

Tøyningsendringer rundt utsparinger i limtrebjelker forsterket med selvborrende skruer

Eksperimentelle tester og analytiske
betraktninger

Kasper Steen

Bygg- og miljøteknikk

Innlevert: August 2012

Hovedveileder: Kjell A Malo, KT

Medveileder: Pål Ellingsbø, KT

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet
Institutt for konstruksjonsteknikk



MASTEROPPGAVE 2012

| | | |
|------------------------------|------------------|-------------------|
| FAGOMRÅDE: Trekonstruksjoner | DATO: 06.08.2012 | ANTALL SIDER: 115 |
|------------------------------|------------------|-------------------|

TITTEL:

**Tøyningsendringer rundt utsparinger i limtrebjelker
forsterket med selvborrende skruer**

Ekperimentelle tester og analytiske betraktninger

***Strain Changes Around Holes in Glulam Beams
Strengthened with Self-tapping Screws***

Experimental Tests and Analytical Considerations

UTFØRT AV:

Kasper Steen



SAMMENDRAG:

Oppgaven er en del av et større prosjekt der målet er å få teorier for hvordan man bedre kan ta ut utsparinger i limtrebjelker, og om det ved hjelp av skruer som forsterkning er mulig å oppnå samme kapasitet som bjelker uten utsparing. Fullskallatester er nødvendige og oppgaven baseres på tidligere utførte kapasitetsforsøk og tøyningsanalyser, i tillegg til nye utførte forsøk. Oppgaven inkluderer en detaljert forklaring av metoden brukt til utførelse av forsøkene, og hvordan forsøksdata ble hentet ut fra det optiske målesystemet (Aramis). De mest brukte teoriene for styrkeanalyse av trekonstruksjoner presenteres.

Oppgaven er tredelt:

En tøyningsanalyse av fem kapasitetsforsøk på K-bjelker med sirkulær utsparing på 170 mm og forsterket av to selvborrende skruer plassert normalt på fiberretning er gjennomført. Analysen viser at en sprekke oppstår og vokser på grunn av at tøyningskonsentrasjonene i et område øker til et visst nivå. Tendensen er at sprekken utvikler seg når tøyningene vinkelrett på fibrene ved sprekktupp øker til mellom 1,3-1,8 %. Sprekkene stoppet i all hovedsak ved skruel plasseringen.

20 nye kapasitetsforsøk med skruel plassering på 45° i forhold til fiberretningen, skrudd med to forskjellige kantavstander fra utsparing (2,0d og 0,5d) er blitt gjennomført. Resultatet fra disse forsøkene er at en slik skruel plassering er svært gunstig. Skruene gir bjelken økt stivhet slik at kapasiteten når tilnærmet hva en slik limtrebjelke med utsparing kan oppå. Et snitt av makslast på 18,2 kN er ikke langt ifra en bjelke uten utsparing på 23,0 kN. Skruene motvirker tøynings- og sprekkeoppbygging langs utsparingene, og gjør at bjelken holder seg stabil fram til eventuell kollaps (strekkebrudd i underkant av utsparing) eller lokal utbøyning (Bruddmode 3).

Spenningsintensitetsfaktoren K ble beregnet ut ifra tøyingsdata hentet i området rundt 5 sprekkupper. 100 K -verdier ble beregnet ved å kombinere lineær-elastisk bruddteori med spennings-tøyingsforhold. Beregnet K -verdi: $K = 391,9 \pm 32,1 \text{ N/mm}^{3/2}$.

ABSTRACT:

The thesis is part of a larger project aiming to get theories of how to better take out holes in glulam beams, and if by the use of screws as reinforcement is possible to obtain the same capacity as beams without a hole. Full-scale tests are necessary and the thesis is based on previously completed tests and strain analysis, as well as new tests executed. The thesis includes a detailed explanation of the method used for the execution of the tests and how experimental data were extracted from the optical measurement system (Aramis). The most commonly used theories for strength analysis of timber structures are presented.

The thesis is threefold:

A strain analysis of five capacity tests on K -beams with a circular hole ($d=170 \text{ mm}$), reinforced by two self-tapping screws placed normal to the fiber direction. The analysis shows the effect of inserting screws in terms of stresses and crack development, and the most appropriate angle of insertion. It concludes that a crack occurs and grows because of strain concentrations in an area increases to a certain level. The trend is crack propagation when strains normal to the fiber direction at the crack tip increases to around 1.3-1.8 %. The cracks stopped mainly near screw insertion.

20 new capacity tests with screw placement at 45° relative to the fiber direction, with two different edge distances from the hole ($2,0d$ and $0,5d$) were executed. Results from these tests shows that such a screw position is very favorable. The screws provide increased beam stiffness and a capacity reaching close to what such a glulam beam with hole can achieve. An average of the maximum load of 18.2 kN is not far from a beam without hole (23,0 kN). The screws prevent strain and crack development along the holes, allowing the beam to remain stable until an eventual collapse (tensile failure below hole) or local bending (Crack Mode 3).

The tension intensity factor K was calculated from strain data obtained around 5 crack-tips. 100 K -values were calculated by combining the linear-elastic fracture mechanics with stress-strain ratio. Calculated K -value: $K = 391.9 \pm 32.1 \text{ N/mm}^{3/2}$.

FAGLÆRER: Kjell Arne Malo

VEILEDER: Pål Ellingsbø

UTFØRT VED: Institutt for konstruksjonsteknikk, NTNU

Oppgavetekst

Det overordnede målet med denne oppgaven er å komme nærmere en løsning på hva som skal til for at en sprekk i en limtrebjelke skal utvikle seg. Kapasitetsforsøk av limtrebjelker med utsparinger, forsterket av selvborrende skruer, skal utføres og analyseres. I denne oppgaven skal det ses nærmere på hvordan tøyningssendringer rundt en sprekk utvikler og fordeler seg før og etter et brudd. Dette for å se på hvilken effekt skruer har på tøyningssendringene. Tøyingsdata rundt sprekketopp skal hentes ut og brukes til å bestemme en materialparameter; spenningsintensitetsfaktoren K . Med K kjent, er det mulig å estimere den videre sprekkveksten eller forutsi nye oppsprekninger.

Forord

Denne oppgaven avslutter mitt studie, Bygg- og Miljøteknikk ved NTNU i Trondheim, og er skrevet i samarbeid med treavdelingen ved Institutt for Konstruksjonsteknikk.

Jeg vil rette en stor takk til min veileder Pål Ellingsbø for all hjelp og veiledning gjennom hele oppgaven og til Kjell Arne Malo for starthjelp og inspirasjon til valg av oppgave.

Takk for et godt og inspirerende samarbeid.

Trondheim, 6. August 2012

Kasper Steen

Innholdsfortegnelse

| | |
|--|-----------|
| Oppgavetekst | i |
| Forord..... | iii |
| 1 Innledning..... | 1 |
| 2 Teori | 2 |
| 2.1 Tre som materiale..... | 2 |
| 2.2 Hvorfor oppstår et brudd? | 5 |
| <i>Brudd på atomnivå.....</i> | <i>5</i> |
| 2.3 Styrkeanalyse..... | 6 |
| 2.4 Spennings-tøyningsforhold | 7 |
| 2.5 Konvensjonell spenningsanalyse | 10 |
| 2.6 Lineær elastisk bruddmekanikk (LEFM)..... | 10 |
| <i>Energibalanse</i> | <i>11</i> |
| <i>Spenningsintensitetsfaktoren, K.....</i> | <i>12</i> |
| <i>Kombinasjon lineær-elastisk bruddmekanikk og spennings-tøyningsforhold.....</i> | <i>14</i> |
| 2.7 Weibull's Weakest Link Theory | 15 |
| 3 Erfaringer fra tidligere forsøk | 17 |
| 3.1 Degro og Solberg | 17 |
| 3.2 Steen | 19 |
| 3.3 Videre arbeid..... | 20 |
| 4 Testoppsett..... | 21 |
| 5 Utstyr..... | 23 |
| 6 Metode | 27 |
| 6.1 Utføring av forsøk..... | 27 |
| 6.2 Analyse av forsøk..... | 29 |
| <i>Uthenting av data</i> | <i>29</i> |
| 7 Resultater | 32 |
| 7.1 Analyse av BMS-170 | 32 |
| <i>BMS-170-6.....</i> | <i>32</i> |
| <i>BMS-170-7.....</i> | <i>39</i> |
| <i>BMS-170-8.....</i> | <i>46</i> |
| <i>BMS-170-9.....</i> | <i>53</i> |
| <i>BMS-170-11</i> | <i>57</i> |
| 7.2 Observasjoner fra forsøkene..... | 62 |
| 7.3 Nye forsøk | 63 |
| <i>BMS,45°-170-2d-serien.....</i> | <i>64</i> |
| <i>BMS,45°-170-0,5d-serien</i> | <i>65</i> |
| <i>Valg av bjelker til analyse.....</i> | <i>66</i> |
| 7.4 Analyse av BMS,45-170 | 67 |
| <i>BMS,45-170-14.....</i> | <i>67</i> |
| <i>BMS,45-170-15.....</i> | <i>72</i> |
| <i>BMS,45-170-16.....</i> | <i>76</i> |
| <i>BMS,45-170-18.....</i> | <i>80</i> |
| <i>BMS,45-170-19.....</i> | <i>84</i> |
| <i>BMS,45-170-20.....</i> | <i>88</i> |
| 7.5 Observasjoner fra forsøkene..... | 91 |
| 8 Spenningsintensitetsfaktoren K..... | 92 |

| | | |
|-----------|--|-----------|
| 9 | Konklusjoner | 95 |
| 10 | Referanser | 97 |
| | Vedlegg | I |
| I | Analyse av Aramis-bilder | I |
| II | Notater fra testserie BMS,45-170 | II |
| III | Minnepinne | X |

1 Innledning

Limtrebjelker med utsparinger har blitt mer og mer vanlig, på grunn av en økende mengde tekniske installasjoner i nybygg. For å spare plass, er det mye å tjene på å legge vann-, varme- og ventilasjonsrør i bjelkelagene, men dette skaper også store konstruksjonsmessige utfordringer. I mange tilfeller er den nødvendige størrelsen på disse utsparingene så stor som halvparten av bjelketverrsnittet.

Vann- og avløpsrør er vanligvis 160 mm i diameter, og bransjen etterspør derfor utsparinger på 170 mm (inkl. fôringer). Hvis man ønsker å bruke limtrebjelkene som bærende lag i etasjeskillere og tak, blir høyden på disse store. Det er i dag ingen godkjente beregningsregler for limtrebjelker med utsparinger i Eurocode 5. Økonomiske og arkitektoniske krav legger likevel føringer for bjelkens utforming, i praksis bjelkehøyden. Det er ønskelig med så lave bjelker som mulig, helst ned mot 300 mm. Med utsparinger på 170 mm blir dermed netto-tverrsnittet under halvparten.

Målet er å få teorier for hvordan man bedre kan ta ut utsparinger, og om det ved hjelp av forsterkninger er mulig å oppnå samme kapasitet som bjelken har uten utsparing.

Fullskalatester er nødvendige. En rekke kapasitetsforsøk er allerede utført [1, 2], der man har sett på plassering av og størrelse på utsparingene og bruk av skruer som forsterkninger rundt disse. En analyse av tøyningsemdringer i Y-retning fra forsøk uten skruer er også utført [3], for å se hvordan tøyningene i de kritiske områdene rundt en utsparing utvikler seg før og etter brudd.

Ved videre analyse av tøyningfordelingen ved bruk av skruer, vil man også kunne se hvilke utslag dette gir på tøyningene. Siden bransjen etterspør utsparinger på 170 mm, vil det i denne oppgaven utføres en tøyninganalyse av Solbergs kapasitetsforsøk type BMS-170 [2]. I tillegg vil det utføres nye forsøk, med nye skrueplasseringer, basert på Solberg [2] og Steen [3], etterfulgt av en analyse av disse.

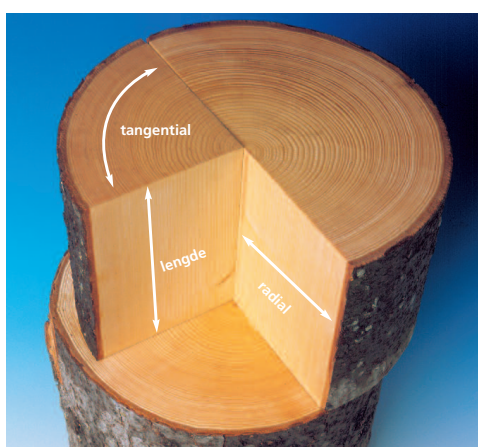
Det er også et mål å kunne estimere bruddutviklingen i treet. Et viktig skritt i den retningen er å finne spenningsintensitetsfaktoren K . Dette gjøres ved å hente ut tøyningsdata rundt en sprekketupp, og kombinere denne dataen med bruddteori.

2 Teori

Det er tidligere blitt gjennomført en rekke studier av hvordan limtrebjelker, hovedsakelig med firkantede utsparinger, oppfører seg. For en samling av de fleste fullskalatestene som er blitt utført, metoder for styrkeanalyse og spesifikke beregningsmetoder for styrkeberegning av limtrebjelker med utsparinger, vises det til Danielsson [4]. I dette avsnittet vil hovedtrekkene av denne teorien presenteres.

2.1 Tre som materiale

Tre er et av våre mest brukte byggematerialer både i store og små konstruksjoner. Tre gir store arkitektoniske muligheter, samtidig som treets egenskaper gjør det til et miljøvennlig og sikkert konstruksjonsmateriale.



Figur 1: Trestammens snittretninger [5]



Figur 2: Limtrebjelke [5]

Trevirke er et naturlig, organisk cellemateriale som i hovedsak består av cellulose og lignin. Trecellene er bygd opp av lange og sterke cellulosefibre buntet sammen i grupper som kalles fibriller. Ligninet fyller rommet mellom fibre og fungerer som et lim. Cellulosen kan dermed kalles trevirkets armering. Treet har en karakteristisk vekst. I sommerhalvåret dannes det nye celler, mens på vinteren tar veksten pause. Treet blir på denne måten lagvis bygget opp av årringer som vokser ut i en sirkel. En trestamme får dermed tre snittretninger: tverrsnitt, radialsnitt og tangentialsnitt (Figur 1). Disse retningene er viktige å skille fra hverandre, for de har høyst forskjellige egenskaper.

Treets mekaniske egenskaper henger nøye sammen med treets struktur og oppbygging. Egenskapene varierer fra tresort til tresort, vekstforhold, årringebredde, densitet, fuktighet og lastretning på fibre, for å nevne noe. Tre er også et materiale med mange defekter (kvister, skjøter i limtrebjelker o.l.), som kan redusere kapasiteten av bjelken betraktelig. Disse materielle egenskapene gjør at fullskala tester er nødvendige.

Tre er med andre ord et anisotropisk materiale, som vil si at de mekaniske egenskapene er ulike i de forskjellige retningene. Siden det er så stor variasjon, sorteres trevirke i ulike styrkeklasser med klart definerte verdier for de mekaniske egenskapene. Alt trevirke, uansett opprinnelse, kan derfor benyttes

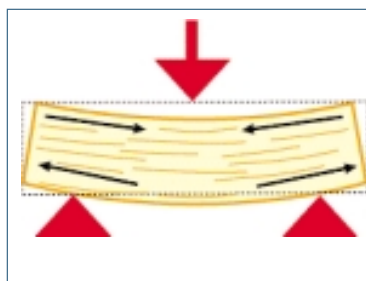
til bærende konstruksjoner dersom samsvarende standarder for sortering (NS-EN 338) og dimensjonering (EC5) benyttes [6, 7].

Tabell 1: Karakteristiske fasthetsverdier for konstruksjonstre [7] [NS-EN 338]

| Fasthetsverdier (N/mm ²) | | Fasthetsklasser i henhold til NS-EN 338 | | | | |
|--------------------------------------|------------|---|------|------|--------------------|--------------------|
| | | C14 | C18 | C24 | C30 | C40 |
| Bøyning | f_{mb} | 14,0 | 18,0 | 24,0 | 30,0 | 40,0 |
| Strekk | | | | | | |
| i fiberretningen | f_{t0k} | 8,0 | 11,0 | 14,0 | 18,0 | 24,0 |
| på tvers av fiberretningen | f_{t90k} | 0,3 | 0,3 | 0,4 | 0,4 | 0,4 |
| Trykk | | | | | | |
| i fiberretningen | f_{c0k} | 16,0 | 18,0 | 21,0 | 23,0 ⁴⁾ | 26,0 ⁴⁾ |
| på tvers av fiberretningen | f_{c90k} | 4,3 | 4,8 | 5,3 | 5,7 | 6,3 |
| Skjær¹⁾ | f_{vk} | 1,7 | 2,0 | 2,5 | 3,0 | 3,8 |

Som tabell 1 viser, er trevirke mye sterkere i lengderetning enn vinkelrett på fiberretningen. For strekk er styrken på tvers av fiberretningen bare 1/35 av styrken i fiberretningen. Dette gir spesielle utfordringer når spenninger omfordeles fra parallelt med fiberretningen til vinkelrett på f.eks. hull i bjelker.

Ved dimensjonering er det ofte snakk om bøyestyrke, som er en kombinasjon av strekk og trykk. Når en bjelke presses ned, vil det oppstå trykk i overkant og strekk i underkant (Figur 3).

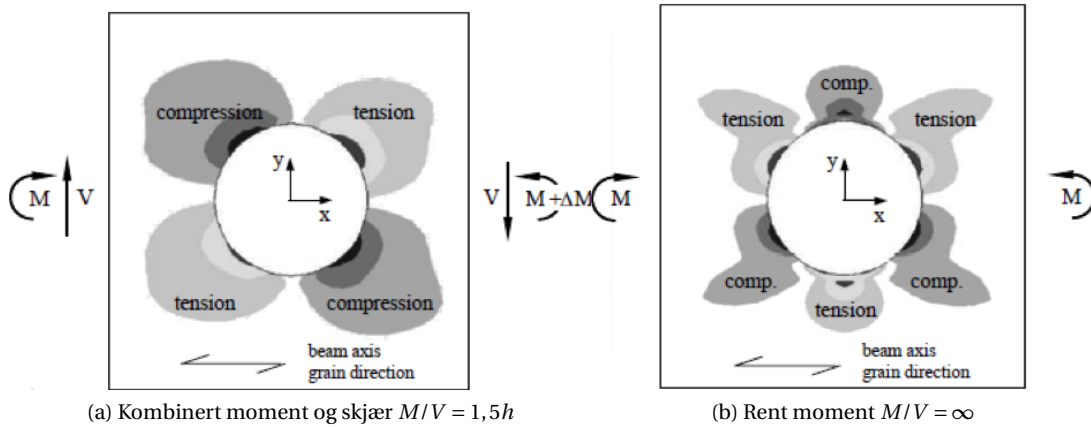


Figur 3: Spenningsfordeling i bjelke [6]

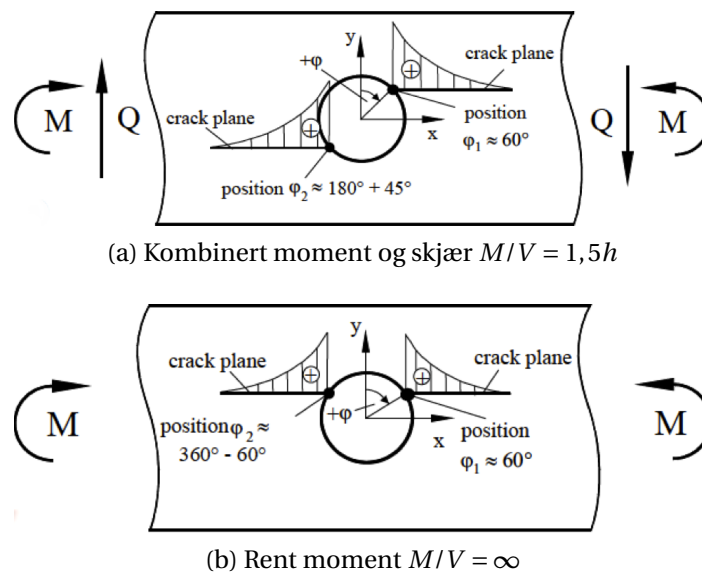
Ved innføring av utsparinger i limtrebjelker endres denne fordelingen av spenningene rundt utsparingene betydelig. I omrisset av utsparingene oppstår det spenningskonsentrasjoner (Figur 4). Betydelige og konsentrerte strekkspenninger oppstår vinkelrett på fiberretningen med medfølgende lastreduksjon, og blir oftest derfor dimensjonerende. I tillegg er brudd i denne retningen veldig sprøtt.

De største spenningsverdiene oppstår langs kanten av hullet, og synker eksponentielt med avstanden langs fibrene bort fra hullkanten (Figur 5). Et område med slike spenningskonsentrasjoner har en utstrekning på mellom en halv til to ganger diameteren på hullet. Dersom spenningene overgår trevirkets strekkapasitet normalt på fibrene, fås bruddflater parallelt med fibrene. For å

unngå bruddutvikling, virker det derfor som området nær hullet er det viktigste stedet å forsterke.



Figur 4: Lokale spenningsvariasjoner rundt utsparing [4]



Figur 5: Spenningsdistribusjon langs bruddflaten [4]

2.2 Hvorfor oppstår et brudd?

I et stadig mer komplekst teknologisk samfunn er bruddproblematikk en stor utfordring. Samtidig har man gjort framskritt i bruddmekanikken, som har utlignet en del av disse nye farene for brudd. Det er likevel fortsatt mye som må læres, og eksisterende kunnskap anvendes ikke alltid når det er nødvendig.

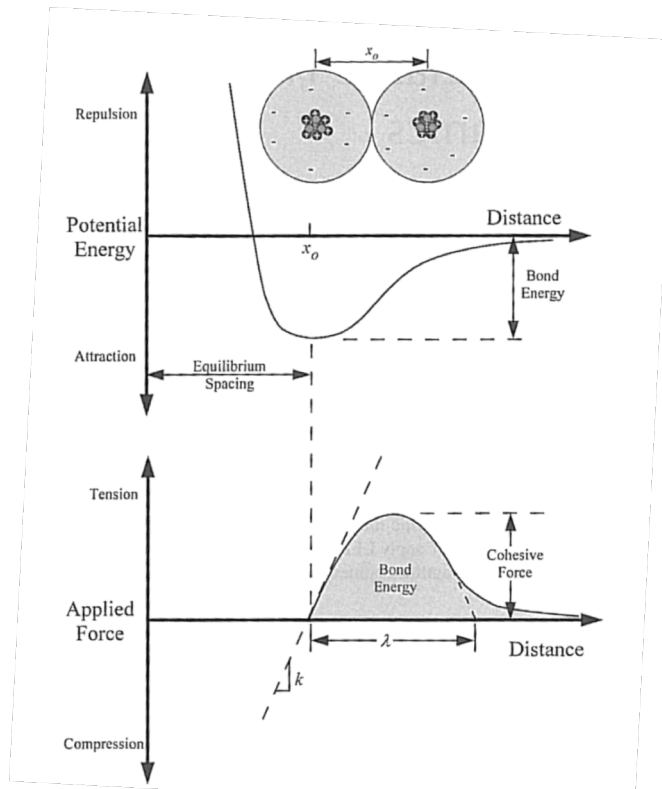
Grunnen til konstruksjonsfeil faller hovedsakelig under en av følgende kategorier [8]:

1. Uaktsomhet i utformingen, byggingen eller driften av konstruksjonen
2. Anvendelse av nye materialer eller utforminger, som skaper en uventet (og uønsket) effekt.

For det første tilfellet er allerede eksisterende prosedyrer tilstrekkelig for å unngå brudd, men som dessverre ikke blir fulgt opp. Dette kommer hovedsakelig av menneskelig svikt, feil bruk av materialer og dårlig håndverk. Det andre tilfellet er mye vanskeligere å unngå. En ny utforming eller ny anvendelse av materialer vil skape nye usikkerhetsmomenter som man ikke kan forutse. Derfor er det en nødvendighet å gjøre omfattende tester og analyser før man setter ting ut i drift.

Brudd på atomnivå

Et materiale går i brudd når tilstrekkelig spenning og arbeid påføres slik at bindingene som holder atomene sammen brytes. Styrken til bindingene skapes av tiltrekkende krefter mellom atomer. To atomer er i likevekt når den potensielle energien mellom dem er på et minimum. For å øke distansen mellom atomene må strekkraft påføres, og denne må overgå de kohesive kreftene som holder bindingene sammen (Figur 6).



Figur 6: Potensiell energi og kraft som en funksjon av separasjon av atomer [8]

$$E_b = \int_{x_0}^{\infty} P dx \quad (1)$$

hvor x_0 er likevekts-mellomrommet og P er påført kraft.

De kohesive kreftene kan estimeres ved å idealisere kraftforskyvningsforholdet som en halv periode av en sinusbølge.

$$P = P_c \sin\left(\frac{\pi x}{\lambda}\right) \quad (2)$$

der λ er definert i figur 6. For små forskyvninger er forholdet lineært:

$$P = P_c \left(\frac{\pi x}{\lambda}\right) \quad (3)$$

2.3 Styrkeanalyse

Trevirke er et komplekst materiale. Antagelser og forenklinger i noen materialmodeller kan være akseptable i visse tilfeller, men de kan også føre til upålitelige resultater.

Det er flere tilgjengelige metoder for styrkeanalyse av trekonstruksjoner. Hovedsakelig kan disse deles inn i to materialmodeller, *deterministiske* og *stokastiske* (Tabell 2). I de deterministiske modellene anses trevirket som et homogent materiale med like egenskaper i alle retninger. I de stokastiske modellene blir de naturlige defektene i materialet tatt hensyn til ved en sannsynlighetsbasert tilnærming.

Tabell 2: Materialmodeller [4]

| | Deterministic (homogeneous) | Stochastic (heterogenous) |
|--|--|----------------------------------|
| Brittle $G_f = 0$ | Conventional stress analysis | Weibull weakest link theory |
| With fracture ductility $G_f \neq 0$ | Linear elastic fracture mechanics Generalized linear elastic fracture mechanics Nonlinear fracture mechanics | Probabilistic fracture mechanics |

I denne oppgaven belyses hovedsakelig de overordnede metodene. Den deterministiske modellen, *lineær elastisk bruddmekanikk (LEFM)*, og den stokastiske modellen, *Weibull's Weakest Link Theory*. Først en liten innføring i spennings-tøynings-forhold [8, 9] og hvordan dette kan brukes til å bestemme materialparameteren K .

2.4 Spennings-tøyningsforhold

I lineær-elastisk teori er forholdet mellom spenninger og tøyninger uttrykt av *Hookes lov*, der spenning (σ) er en funksjon av E-modul (E) og tøyning (ε):

$$\sigma = E\varepsilon \quad (4)$$

Spenningsstilstanden for et generelt anisotrop materiale kan representeres av ni spenningskomponenter σ_{ij} og ni tøyningkomponenter ε_{ij} (der $i, j = 1, 2, 3$) som virker på sidene av en elementær kube (Figur 9).

For en slik 3-dimensjonal spenningsstilstand defineres en 4. ordens elastisitetsmodul, C , bestående av 81 elastiske komponenter. Hookes lov uttrykkes dermed:

$$\sigma_{ij} = C_{ijkl}\varepsilon_{kl} \quad (5)$$

På grunn av spennings- og tøyningssymmetrier:

$$\sigma_{ij} = \sigma_{ji} \quad (6)$$

$$\varepsilon_{ij} = \varepsilon_{ji} \quad (7)$$

reduseres antallet uavhengige elastiske konstanter til 36.

Energibetraktninger skaper flere symmetrier. Arbeid per enhetsvolum uttrykkes som:

$$W = \frac{1}{2}C_{ij}\varepsilon_i\varepsilon_j \quad (8)$$

Ved å derivere denne får man spennings-tøyningsrelasjonen:

$$\sigma_i = \frac{\partial W}{\partial \varepsilon_i} = C_{ij}\varepsilon_j \quad (9)$$

Deriverer man igjen får man

$$C_{ij} = \frac{\partial^2 W}{\partial \varepsilon_i \partial \varepsilon_j} \quad (10)$$

Denne kan reverseres:

$$C_{ji} = \frac{\partial^2 W}{\partial \varepsilon_j \partial \varepsilon_i} \quad (11)$$

Siden rekkefølgen på derivasjonen er uvesentlig får man at:

$$C_{ij} = C_{ji} \quad (12)$$

Antallet uavhengige stivhetskonstanter kan dermed reduseres til 21.

For et ortotrop materiale (som har tre vinkelrette plan med ulike egenskaper), reduseres antall uavhengige elastiske konstanter videre til 9. Dette er sees tydelig hvis koordinatsystemet er lagt i hovedspenningsretningene. Da skaper hovedspenninger kun normaltøyninger, og skjærspenninger skaper kun skjærtøyninger.

I de fleste konstruksjoner benyttes tynne komposittmaterialer (her: limtrebjelke) belastet i planet. Man kan derfor anta plane spenninger, der alle spenninger i z-retning er lik null, dvs.:

$$\sigma_3 = 0 \quad (13)$$

$$\tau_{23} = \tau_4 = 0 \quad (14)$$

$$\tau_{13} = \tau_5 = 0 \quad (15)$$

Det ortotrope materialet har dermed et spennings-tøynings-forhold som følger:

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ \tau_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{22} & C_{23} & 0 & 0 & 0 \\ C_{13} & C_{23} & C_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \gamma_4 \\ \gamma_5 \\ \gamma_6 \end{bmatrix} \quad (16)$$

Dette kan skrives som:

$$\sigma_{xx} = C_{xx}\varepsilon_x + C_{xy}\varepsilon_y + C_{xz}\varepsilon_z \quad (17)$$

$$\sigma_{yy} = C_{xy}\varepsilon_x + C_{yy}\varepsilon_y + C_{yz}\varepsilon_z \quad (18)$$

$$0 = C_{xz}\varepsilon_x + C_{yz}\varepsilon_y + C_{zz}\varepsilon_z \quad (19)$$

$$\tau_{xy} = C_{xy}\gamma_{xy} \quad (20)$$

Eliminerer ε_z , og vi får:

$$\sigma_{xx} = \left(C_{xx} - \frac{C_{xz}C_{xz}}{C_{zz}} \right) \varepsilon_x + \left(C_{xy} - \frac{C_{xz}C_{yz}}{C_{zz}} \right) \varepsilon_y = Q_{xx}\varepsilon_x + Q_{xy}\varepsilon_y \quad (21)$$

$$\sigma_{yy} = \left(C_{xy} - \frac{C_{yz}C_{xz}}{C_{zz}} \right) \varepsilon_x + \left(C_{yy} - \frac{C_{yz}C_{yz}}{C_{zz}} \right) \varepsilon_y = Q_{xy}\varepsilon_x + Q_{yy}\varepsilon_y \quad (22)$$

$$\tau_{xy} = C_{xy}\gamma_{xy} \quad (23)$$

Dermed kan spennings-tøynings-forholdet i planet i et ortotrop materiale med plane spenninger uttrykkes med kun 4 elastiske komponenter; Q_{xx} , Q_{xy} , Q_{yy} og C_{xy}

Relasjon mellom matematiske og tekniske konstanter:

$$C_{xy} = G_{xy} \quad (24)$$

Vi får da:

$$Q_{xx} = \frac{E_x}{1 - \nu_{xy}\nu_{yx}} \quad (25)$$

$$Q_{yy} = \frac{E_y}{1 - \nu_{xy}\nu_{yx}} \quad (26)$$

$$Q_{xy} = \frac{\nu_{yx}E_x}{1 - \nu_{xy}\nu_{yx}} = \frac{\nu_{xy}E_y}{1 - \nu_{xy}\nu_{yx}} \quad (27)$$

Disse innsatt i lign. 21-23 gir:

$$\sigma_{xx} = \frac{E_x}{1 - \nu_{xy}\nu_{yx}} \varepsilon_x + \frac{\nu_{yx}E_x}{1 - \nu_{xy}\nu_{yx}} \varepsilon_y \quad (28)$$

$$\sigma_{xx} = E_x \left[\frac{\varepsilon_x + \nu_{yx}\varepsilon_y}{1 - \nu_{xy}\nu_{yx}} \right] \quad (29)$$

$$\sigma_{yy} = \frac{\nu_{xy}E_y}{1 - \nu_{xy}\nu_{yx}} \varepsilon_x + \frac{E_y}{1 - \nu_{xy}\nu_{yx}} \varepsilon_y \quad (30)$$

$$\sigma_{yy} = E_y \left[\frac{\varepsilon_y + \nu_{xy}\varepsilon_x}{1 - \nu_{xy}\nu_{yx}} \right] \quad (31)$$

$$\tau_{xy} = G_{xy}\gamma_{xy} \quad (32)$$

2.5 Konvensjonell spenningsanalyse

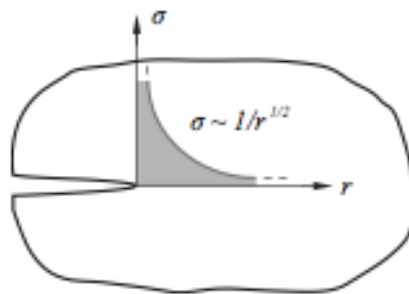
Den mest vanlige måten å konstruere trekonstruksjoner på er å benytte seg av et spenningsbasert bruddkriterium. Her antar man at materialet er tilfredsstillende dersom fastheten er større enn antatt belastning. Sikkerhetsfaktorer benyttes for å unngå sprøbrudd. Man antar at treet er et lineært elastisk materiale som er kontinuerlig, homogent, isotropt og sprøtt. Dette blir ikke i alle tilfeller helt korrekt å anta for tre, siden tre verken er homogent eller isotropt. Dersom disse forenklingene tas med, så ser man bort i fra ulike materielle egenskaper i radiell og tangentiell retning og hvilken retning trevirket ligger. Disse egenskapene varierer veldig ut i fra hvilken retning belastningen er i forholdt til orientering av årringene.

2.6 Lineær elastisk bruddmekanikk (LEFM)

Bruddmekanikken har en annerledes tilnærming til dimensjonering enn den tradisjonelle mekanikken. Her byttes variabelen *fasthet* ut med *sprekkstørrelse* og *bruddfasthet*. Man har da tre variabler, og bruddmekanikken kvantifiserer kritiske kombinasjoner av disse.

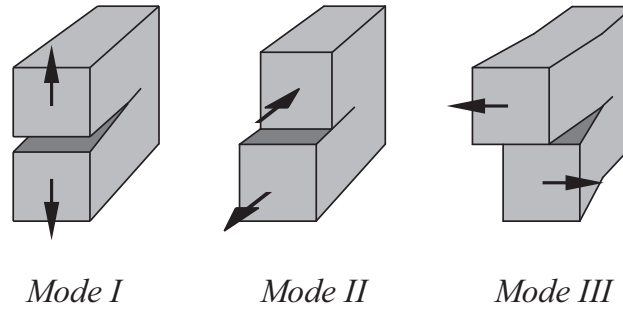
Lineær-elastisk bruddmekanikk kan benyttes i analyser av materialer som opplever sprekkdannelse, og videre utvikling av disse sprekke. Teorien baserer seg på antagelsen av en lineær-elastisk oppførsel av materialet og at det allerede eksisterer en sprekk. Teorien kan ikke benyttes til å finne ut hvor det vil oppstå sprekk i et belastet materiale, men er godt egnet for å finne ut om en sprekk vil vokse eller ikke.

Konsekvensen av å anta lineær-elastisk oppførsel, er at spenningene ved bruddkanten i teorien er uendelig store, et singularitetspunkt (Figur 7). Dette gjør at et spenningsbasert bruddkriterium ikke kan benyttes. Unntaket er hvis området sprekken utvikler seg, der det er høyest spenninger, er lite i forhold til eksisterende sprekk. Dette området dreier seg om bare noen få centimeter.



Figur 7: Lineær elastisk spenningsfordeling [9]

Analyser av videre sprekkutvikling kan bli gjort på flere måter, men de mest vanligste metodene er *energibalanse* og *spenningsintensitetsfaktoren*. Disse tar utgangspunkt i tre bruddformer for en gitt bruddflate: I, II og III (Figur 8). Disse beskriver henholdsvis strekkspenning normalt bruddflaten, skjærspenninger i planet og skjærspenninger på tvers. Vanligvis oppstår brudd som en kombinasjon av bruddform I og II. Denne oppgaven vil i hovedsak ta for seg Mode I- og III-brudd



Figur 8: Bruddformer [4]

Energibalanse

Denne tilnærmingen ser på hvordan en virtuell ekspansjon av en sprekk påvirker systemets energibalanse. For at en sprekk skal utvikle seg må tilgjengelig energi være stor nok til å overgå materialets motstand. Parameteren *Energy Release Rate* (G) defineres som hvor stor *potensiell energi* (U) som trengs for at *overflatearealet* (A) av sprekken økes uendelig stor.

$$G = -\frac{\partial U}{\partial A} \quad (33)$$

Denne parameteren uttrykker endringen av potensiell energi i sprekkområdet, og kalles også for *crack extension force* eller *crack driving force*.

For en vid plate utsatt for plane spenninger, og med en sprekk med lengde $2a$ kan denne ligningen uttrykkes som:

$$G = \frac{\pi \sigma^2 a}{E} \quad (34)$$

G er avhengig av prøvens geometri, sprekkenes geometri, grensebetingelser, last og stivhet til materialet. For at en sprekk skal vokse seg større, må G overstige den kritiske verdien av G , G_c , også kjent som materialets bruddmotstand.

$$G > G_c \quad (35)$$

G_c er en verdi som må bestemmes eksperimentelt, og kan ha forskjellig verdi avhengig av de tre bruddformene. G er også avhengig av hvilken bruddform som er aktuell, og for ortotrope materialer kan G deles inn i de ulike bruddformene (figur 7). Man får da:

$$G_{tot} = G_1 + G_2 + G_3 \quad (36)$$

Spenningsintensitetsfaktoren, K

Denne tilnærmingen ser på spenningene i området rundt sprekkuttet, for alle tre bruddformer. Spenningsintensitetsfaktoren gir en fullstendig beskrivelse av spenningene ved sprekkuttet for et lineært elastisk materiale. Faktoren er avhengig av prøvens geometri, sprekkens geometri og grensebetingelser, samt lasten på prøven. Ved å anta lineært elastisk materiale er spenningene og spenningsintensiteten, K , proporsjonale med lasten. Hvis K er kjent, er det mulig å regne ut alle spennings-, tøyings- og forskyvningskomponenter som en funksjon av r og θ . Et av de viktigste konseptene i bruddmekanikk.

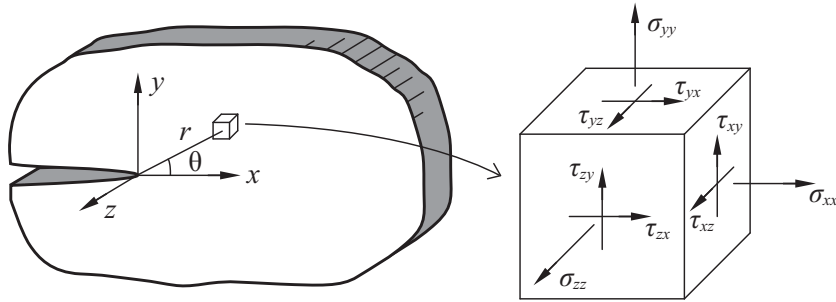
Spenningsintensitetsfaktorene er definert som [8]:

$$K_I = \lim_{r \rightarrow 0} \sigma_{yy}(r) \sqrt{2\pi r} \quad (37)$$

$$K_{II} = \lim_{r \rightarrow 0} \tau_{xy}(r) \sqrt{2\pi r} \quad (38)$$

$$K_{III} = \lim_{r \rightarrow 0} \tau_{yz}(r) \sqrt{2\pi r} \quad (39)$$

der $\theta = 0$ og r er lengden fra sprekkuttet (Figur 9).



Figur 9: Definisjon av spenninger for spenningsintensitetsfaktoren [4]

For at en sprekk skal vokse seg større må spenningsintensiteten overstige den kritiske spenningsintensiteten K_c , også kalt bruddstyrke.

Detaljerte ligninger for Mode I [8]:

$$\sigma_{xx} = \frac{K_1}{\sqrt{2\pi r}} \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) \left[1 - \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \sin\left(\frac{3\theta}{2}\right)\right] \quad (40)$$

$$\sigma_{yy} = \frac{K_1}{\sqrt{2\pi r}} \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) \left[1 + \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \sin\left(\frac{3\theta}{2}\right)\right] \quad (41)$$

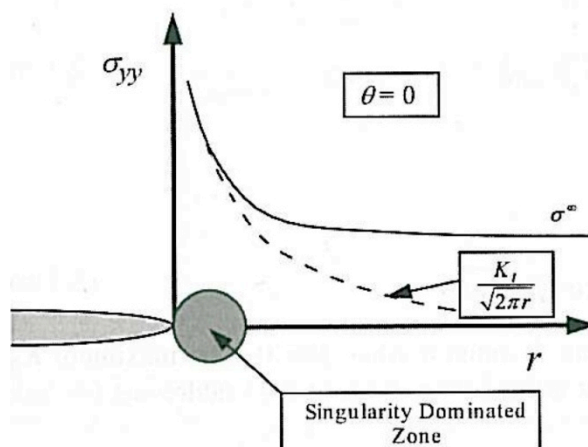
$$\tau_{xy} = \frac{K_1}{\sqrt{2\pi r}} \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) \left[\sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \cos\left(\frac{3\theta}{2}\right)\right] \quad (42)$$

$$\sigma_{zz} = \tau_{xz} = \tau_{yz} = 0 \quad (43)$$

Ved singularitetspunktet, der $\theta = 0$, er spenningene i x- og y-retning like.

$$\sigma_{xx} = \sigma_{yy} = \frac{K_1}{\sqrt{2\pi r}} \quad (44)$$

Ligningen er kun gjeldende nærme sprekketuppen, der spennings-singulariteten $\sigma = 1/\sqrt{r}$ dominerer (Figur 10). Spenninger langt unna sprekketuppen styres av grensebetingelser, for eksempel en uniform strekkspenning σ_{yy} som når en konstant verdi σ^∞ . Ligningene over beskriver den singularitetsdominerte sonen.



Figur 10: Spenning normalt på bruddplan, mode I [8]

For at intensitetsfaktoren skal være nyttig, må man bestemme K ut i fra ytre belastning og geometri. Løsninger er utledet for et antall enkle tilfeller. For mer komplekse situasjoner kan intensitetsfaktoren estimeres ved eksperiment eller ved numeriske analyser.

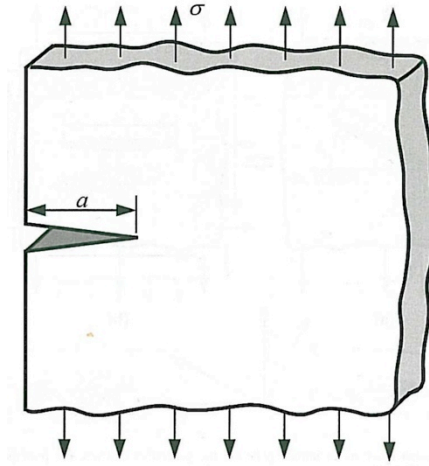
Løsning for en hul sprekk i uendelig plate belastet med ytre strekkspenning vinkelrett på sprekk; Mode 1:

$$K_1 = \sigma\sqrt{\pi a} \quad (45)$$

Løsning for ende-sprekk i Mode 1 (Figur 11):

$$K_1 = 1,12\sigma\sqrt{\pi a} \quad (46)$$

Økningen på 12 % skyldes ulike grensebetingelser.



Figur 11: Endesprekk utsatt for strekkspenning [8]

Energibalanse- og spenningsintensitets-tilnærmingene til bruddmekanikk er i hovedsak ekvivalente for lineært elastiske materialer. Ved å kombinere lign. 34 og lign. 45 kan forholdet defineres som:

$$G = \frac{K_I^2}{E} \quad (47)$$

Kombinasjon lineær-elastisk bruddmekanikk og spennings-tøyningsforhold

Ved å kombinere gjengitt teori for spennings-tøyningsforhold (lign. 29, 31 og 32) og ligninger for spenningsfeltet ved sprekkuttipp for bruddmode I (lign. 40, 41 og 42), fås:

$$E_x \left[\frac{\varepsilon_x + \nu_{yx}\varepsilon_y}{1 - \nu_{xy}\nu_{yx}} \right] = \frac{K_1}{\sqrt{2\pi r}} \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) \left[1 - \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \sin\left(\frac{3\theta}{2}\right) \right] \quad (48)$$

$$E_y \left[\frac{\varepsilon_y + \nu_{xy}\varepsilon_x}{1 - \nu_{xy}\nu_{yx}} \right] = \frac{K_1}{\sqrt{2\pi r}} \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) \left[1 + \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \sin\left(\frac{3\theta}{2}\right) \right] \quad (49)$$

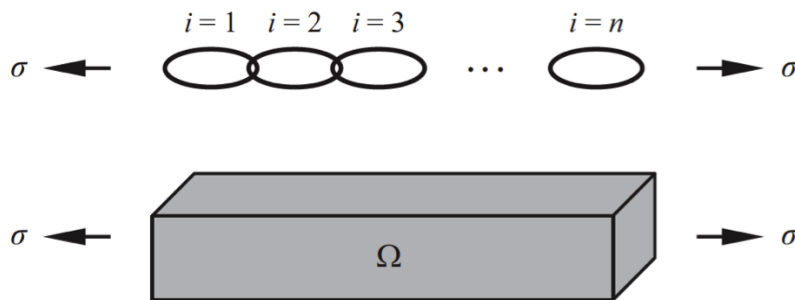
$$G_{xy}\gamma_{xy} = \frac{K_1}{\sqrt{2\pi r}} \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) \left[\sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \cos\left(\frac{3\theta}{2}\right) \right] \quad (50)$$

Ved å benytte disse ligningene, kan man beregne spenningsintensitetsfaktoren K uten å kjenne til spenningene ved en sprekkuttipp.

2.7 Weibull's Weakest Link Theory

Ved stor belastning i et område med mange feil/defekter kan det oppstå brudd der, selv om det er større spenningskonsentrasjoner i områder rundt. Dette kan med god tilnærming forklares med Weibulls teori om svakeste ledd; et brudd oppstår når bruddgrensen til det svakeste leddet er nådd – kjeden ryker. En kjede av n elementer sammenlignes med et volum Ω (Figur 12) Slik er det for en bjelke med strekk normalt fibre. Fibrene ligger parallelt oppå hverandre med bred kontaktflate. Når denne kontaktflaten ryker, så dannes det en sprekk. Det er mange fibre parallelt, så strekkspenningene blir fordelt over de andre fibrene, hvis en kontaktflate ryker.

Weibulls teori er en sannsynlighetsbasert tilnærming til styrkeanalyse; sannsynligheten for brudd i et prøvestykke med en gitt spenning og et gitt volum, med kjent kapasitetsfordeling. For trevirke er dette viktig, da et økt volum gir sterkt økende sannsynlighet for svake områder. Teorien antar at materialet er perfekt sprøtt, noe som er en god antagelse med strekk normalt fibre. En mangel teorien har, er at den ikke kan brukes i tilfeller med spenningssingulariteter på grunn av sprekker og skarpe kanter.



Figur 12: Weibulls teori. En kjede med n elementer sammenlignes med et volum Ω i strekk [4]

Ved å anta en strekkbelastet kjede med n elementer, er sannsynligheten for at kjeden ryker gitt ved:

$$S = 1 - e^{-f(\sigma)} \quad (51)$$

Her er $f(\sigma)$ en funksjon som kan bli beskrevet gjennom en 2- eller 3-parametermodell. 2-parametermodellen er mest vanlig og inneholder gjennomsnittspenning og en konstant m , slik at spredningen av spenningsdistribusjonen tas med:

$$f(\sigma) = \left(\frac{\sigma}{\sigma_0}\right)^m \quad (52)$$

For å kunne sammenligne sannsynligheten for brudd mellom ulike prøvestykker er det definert en såkalt *Weibullspenning* (Lign. 53). Dette er en fiktiv homogen spenningsfordeling i volumet Ω , og har samme sannsynlighet for brudd som den virkelig heterogene materielle oppførselen til tre.

$$\sigma_{wei} = \left(\frac{1}{V} \int_V \sigma^m(x, y, z) dV \right)^{1/m} \quad (53)$$

For å få med betydningen av en heterogen materialoppførsel, beregner man forholdet mellom maks heterogen spenning og Weibullspenning:

$$k_{dis} = \frac{\sigma_{maks}}{\sigma_{wei}} \quad (54)$$

Styrken f til materialet med totalt volum V kan så kalkuleres basert på k_{dis} , gitt styrke av et referansevolum f_{ref} og forholdet mellom totalvolumet og referansevolumet:

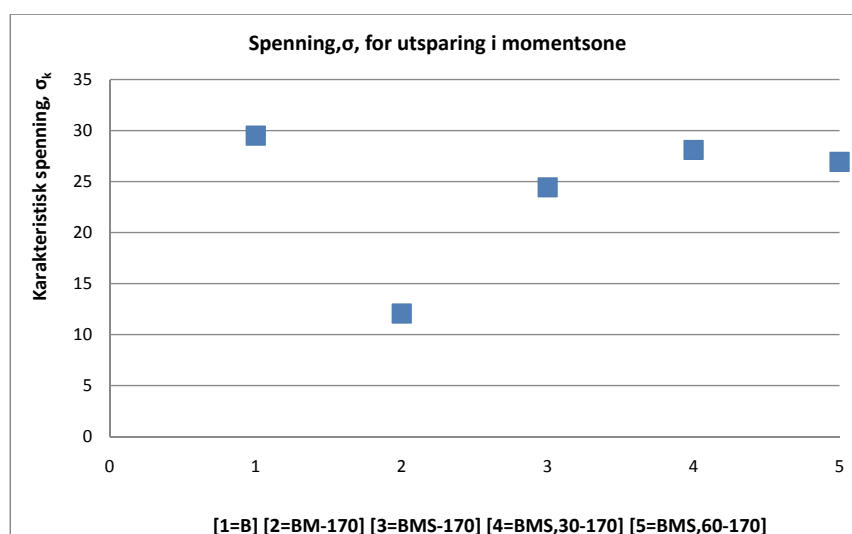
$$f = f_{ref} k_{dis} \left(\frac{V_{ref}}{V} \right)^{1/m} \quad (54)$$

3 Erfaringer fra tidligere forsøk

3.1 Degro og Solberg

Degro [1] og Solberg [2] vurderte kapasiteten av trebjelker med og uten skruer som forsterkning. Her følger noen av konklusjonene:

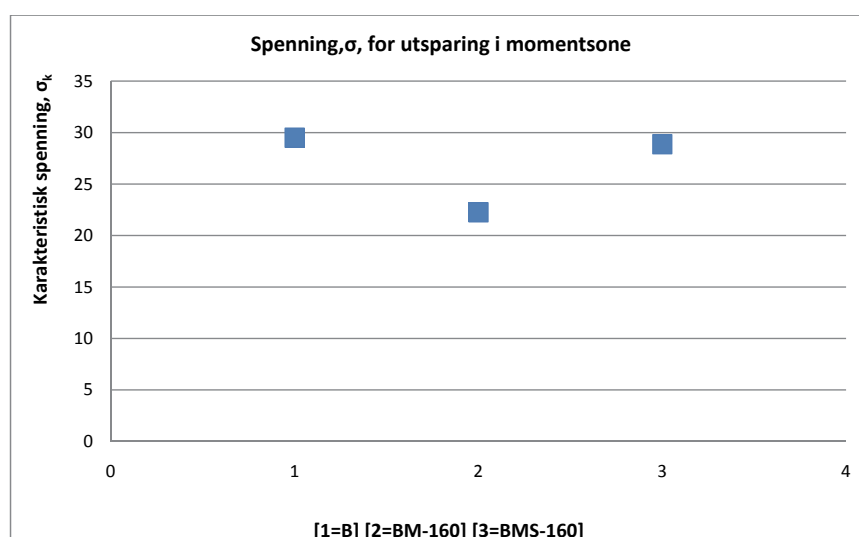
Hvis man ser på *karakteristisk spenning*, σ_k , for bjelker med utsparing på 170 mm (Figur 13), øker kapasiteten rundt 50 % ved å forsterke de utsparte bjelkene med skruer, en kapasitet som også nesten er tilsvarende bjelker uten utsparing. Helningen på skruene innvirker ikke mye på kapasiteten. Ved 90, 60 og 30 grader helning på skruene, i forhold til fiberretning, er kapasiteten omtrent det samme [2].



Figur 13: Karakteristisk spenning for bjelke med 170 mm utsparing i momentsone [2]

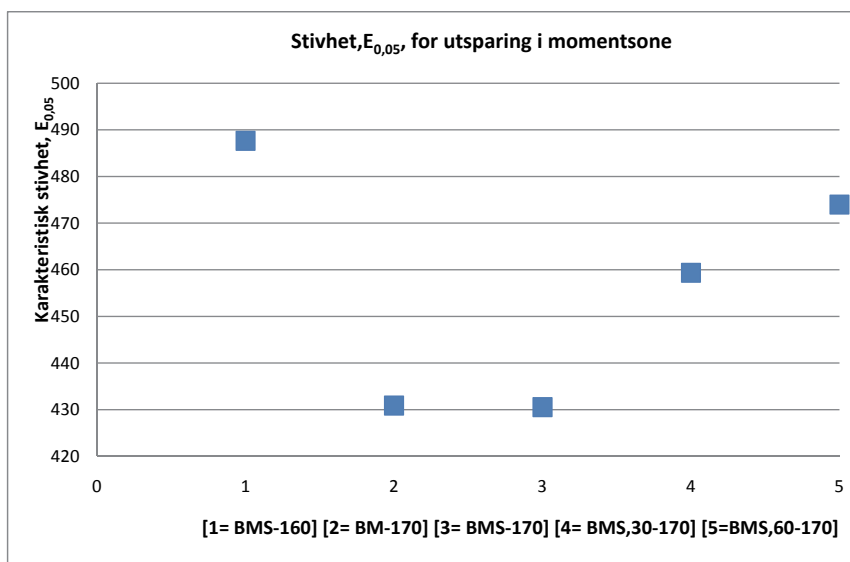
Her er *B* bjelke uten utsparing, *BM* bjelke med utsparing og *BMS* utspart bjelke med skrueforsterkning i ulike vinkler.

For bjelker med utsparing på 160 mm [1] (Figur 14) øker også kapasiteten til ca. samme nivå som bjelker uten utsparing ved å bruke skrueforsterkninger.

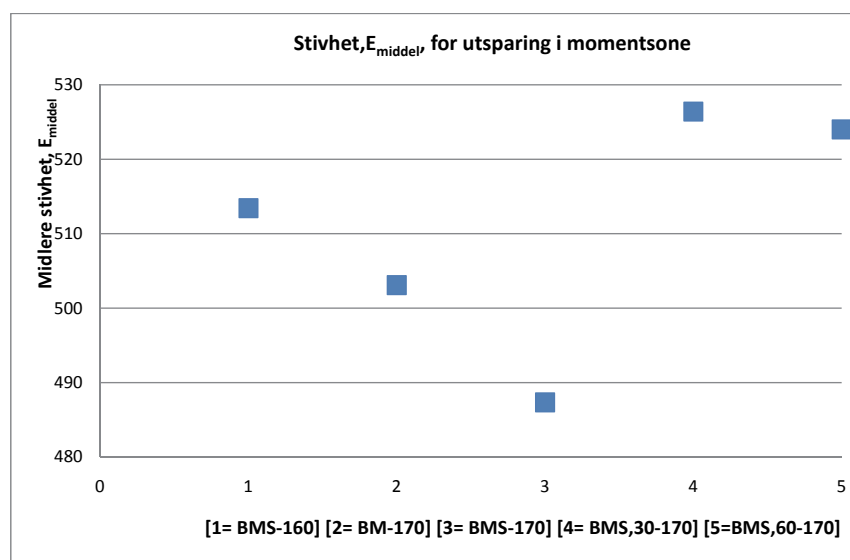


Figur 14: Karakteristisk spenning for bjelke med 160 mm utsparing i momentsone [2]

For *karakteristisk nedbøyningsstivhet*, $E_{0,05}$ (Figur 15), og *stivhet*, E_{middel} (Figur 16), spiller vinkelen på skruene en stor rolle. Jo mer parallelt skruene ligger fiberretning, jo større stivhet, og skruene fungerer da som strekkarmering. 90 grader hjelper lite mot stivhet, mens 30 og 60 grader gir merkbart større stivhet (og ca. like stor stivhet). Her ser man også at skråstilte skruer i ved en utsparing på 170 mm gir stivheter nærmere en utsparing på 160 mm uten skråstilte skruer.



Figur 15: Stivhet til bjelker med utsparing [2]



Figur 16: Midlere stivhet til bjelker med utsparing [2]

Problem: Jo skråere skruene blir plassert, jo vanskeligere er det å få skrudd de inn rett. Ved plassering av skruer så skrå som 30 grader i forhold til fiberretning, blir de liggende så nærme fiberretningen at kvister og lignende kommer i veien og bøyer dem ut av posisjon. Dessuten blir det litt for korte og dekker ikke hele tverrstreksonen. Tynnere skruer og forborring kan hjelpe.

3.2 Steen

Tidligere utførte undertegnende en analyse av tøyningssendringer i Y-retning fra forsøk uten skruer, for å se hvordan tøyningene i de kritiske områdene rundt en utsparing utvikler seg før og etter brudd [3]. Konklusjonen var da:

Avgjørende for brudd er økt tøyningssoppbygging, hovedsakelig innenfor de ytterste 20-30 mm fra bruddkant. Bruddet går når tøyningene i hele dette området har nådd et kritisk punkt.

Tøyningfordelingen er rimelig lineært synkende fra bruddkant og innover, rundt 4% tøyningssendring pr 20 mm (2% pr 10 mm), men større tøyningssendringer ytterste 20-30 mm. Derfor trolig mest hensiktsmessig å plassere skruer innenfor de ytterste 30 mm fra utsparingen, i området der de største tøyningene oppstår (øverst til høyre og nederst til venstre for utsparing).

Ved tøyningsanalyse av forsøk med skruer, vil man kunne se effekten av plasseringen av skruene og hvilken vinkel som er best egnet. I tøyningsanalysen kan det være lurt å hente ut data fra et større antall seksjoner rundt sprekken for å få et nøyaktig tøyningsbilde. Da får man dekket et bredt område og/eller man kan gå mer i detalj.

Oppsummert:

- Plassering av skruer øker kapasiteten av en bjelke med utsparinger.
- Når man ser på bruddspenningen, er kapasitetsøkningen ca. 50 % uavhengig av vinkel på skruene, og tilsvarer omtrent kapasiteten til en bjelke uten utsparing.
- For nedbøyningstivheten er det mye å tjene på å plassere skruer i en skrå vinkel. Jo mer parallelt skruene ligger fiberretningen, jo større stivhet.
- Totalt sett er det ikke stor kapasitetsforskjell mellom skrueinnsetting på 30 og 60°.
- Vanskeligere å plassere skruer i en vinkel, enklest produksjonsmessig er 90°.
- Plassering av skruer bør være innenfor 30 mm fra kant av utsparing, i områdene med størst tøyninger (øverst til høyre og nederst til venstre for utsparing)
- Tøyningfordelingen er rimelig lineært synkende fra bruddkant og innover, rundt 4% tøyningssendring pr 20 mm (2% pr 10 mm), men større tøyningssendringer ytterste 20-30 mm.
- Bør gjøre en tøyningsanalyse av forsøk der skruer er brukt som forsterkning. Sammenligne både med forsøk uten skruer og der skruer er plassert i vinkel.

3.3 Videre arbeid

Ut ifra erfaringene fra tidligere arbeid blir videre arbeid følgende:

Siden det ikke er gjort analyser av tøyninger rundt utsparinger med innsatte skruer, blir det i denne oppgaven analysert Solbergs forsøk, type BMS-170. Dette er forsøk med skruer innsatt $2d$ fra kanten av utsparingen, dvs. 16 mm fra høyre og venstre kant av utsparingen. Analysen vil vise effekten av å sette inn skruer med tanke på tøyninger og sprekkdannelse, og hvilken vinkel som kan være mest hensiktsmessig å bruke.

I nye forsøk plasseres skruer 45° i forhold til fiberretning, og med to ulike distanser fra kant av utsparing, $2d$ og $0,5d$. Målet er å dekke det området der mest oppsprekking finner sted: de strekkutsatte områdene øverst til høyre og nederst til venstre for utsparingen (Figur 4). En analyse av disse forsøkene vil vise hva skråstilte skruer vil bety for tøyningsoppbyggingen.

Tøyningsdata rundt sprekknett skal hentes ut og brukes, sammen med Lign. 49, til å bestemme en materialparameter; spenningsintensitetsfaktoren K . Med K kjent, er det mulig å estimere den videre sprekkveksten eller forutsi nye oppsprekninger.

4 Testoppsett

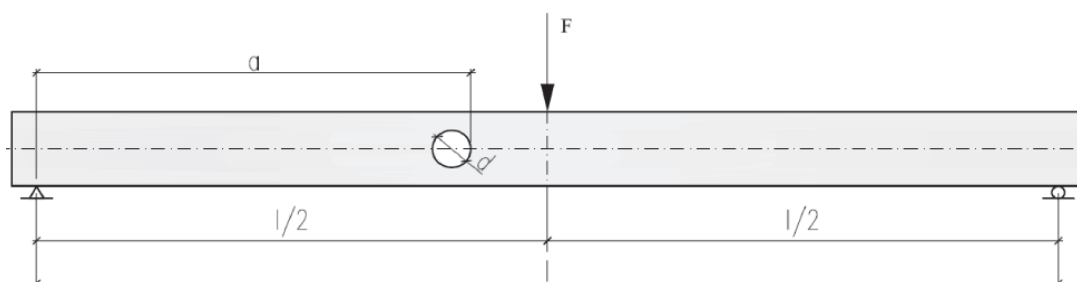
Tester ble utført på limtrebjelker med utsparing plassert nærme midtpunkt.

Bjelke:

- høyde: 300 mm
- bredde: 36 mm
- lengde: 4200 mm (4000 mm + 200 mm anleggsflate)

Utsparing:

- diameter: 170 mm
- lengde senter utsparing til midtpunkt: 385 mm



Figur 17: Testoppsett [1]

Det ble valgt å ta utgangspunkt i Solbergs testoppsett, TI-5* [2], en forbedring fra Degros testoppsett, TI-5 [1], med tanke på vippingsproblematikk.

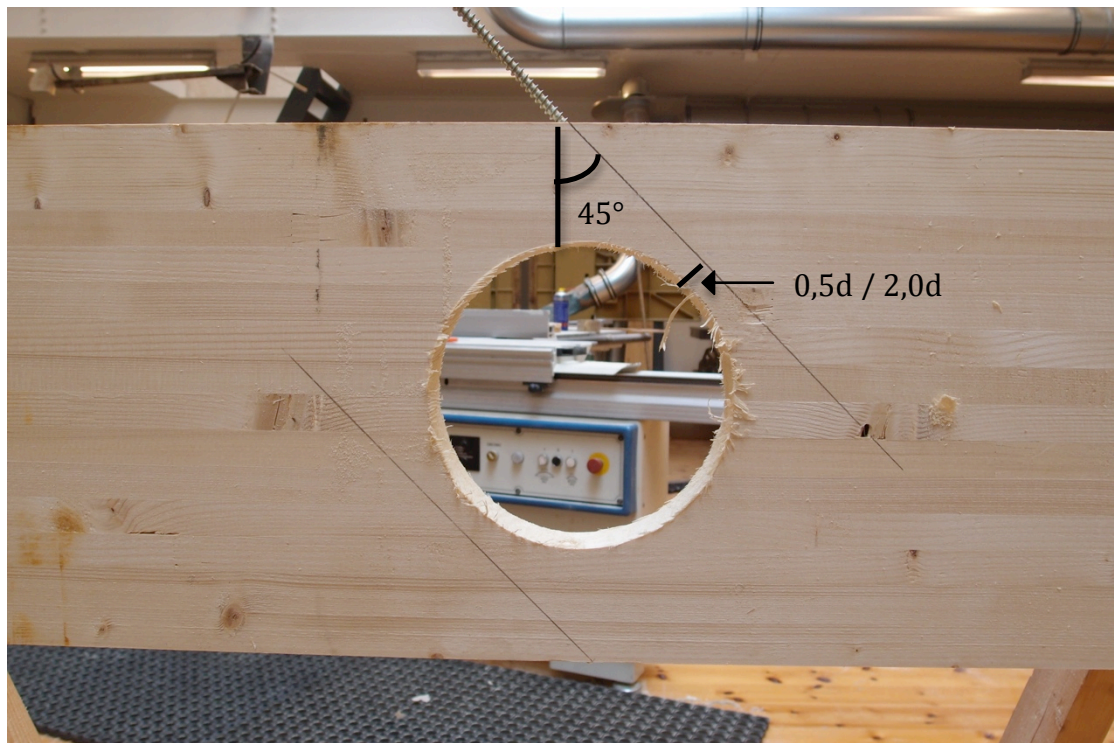
TI-5*:

- Avstivinger i $\frac{1}{4}$ -punktene
 - o Tvinger i overkant
 - o Teflonark mellom bjelke og avstivning
- Sideveis fastholdning ved opplegg
 - o L-formede metallprofil
 - o Teflonark mellom bjelke og opplegg
- Kanalprofil i aluminium ved belastningspunkt (140x50x50)
- Lastsylander i vater

Vippingsproblematikken ble likevel ikke helt løst av TI-5*. Det ble derfor valgt å lage nye avstivinger, der teflonark ble byttet ut med to hjul på hver side av bjelken. Disse ble først plassert i $\frac{1}{4}$ -punktene, men etter første testforsøk ble det valgt å flytte de til $\frac{1}{3}$ -punktene. Kaller det nye testoppsettet TI-6.

Forsterkning med skruer (Figur 18 og 19):

- Vinkel: 45° i forhold til fiberretning
- 2 stk. pr. bjelke
- Plassert i strekkutsatt område langs utsparing
- 1 skrue fra toppside, ned mot høyre for utsparing
- 1 skrue fra bunnside, opp mot venstre for utsparingen
- 2 ulike kantavstander til utsparing: $2d$ og $0,5d$



Figur 18: Skruelassering: 45 grader ift. fiberretning, ulike kantavstander (her: 2,0d)



Figur 19: Innskruing

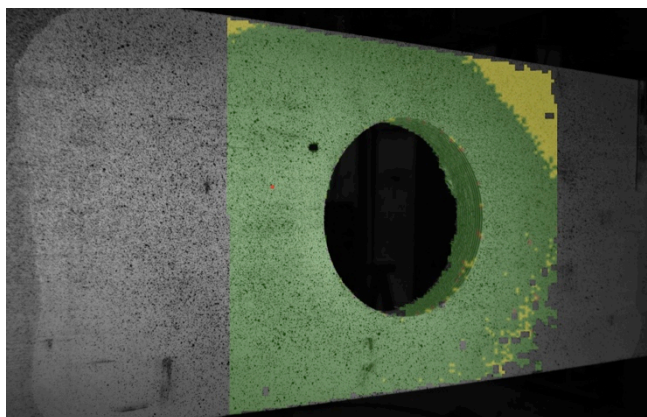
5 Utstyr

ARAMIS

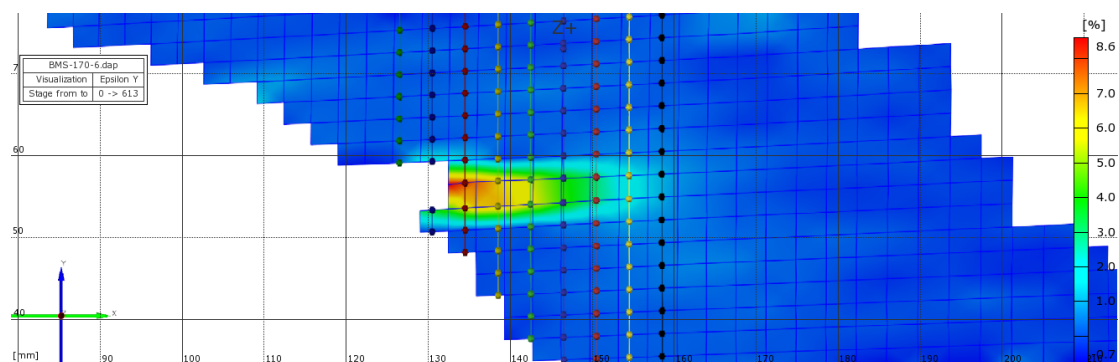
Aramis er et kamera som måler tøyningene i en overflate. Apparatet har to separate kamerahoder i en gitt avstand og vinkel mellom seg, og er koblet opp mot en kraftig datamaskin (Figur 20). Kameraet tar bilder i et gitt tidsintervall (opp til 400 Hz), og prosesserer bilder med nøyaktige koordinater. Ved å sammenligne bildene fra hvert belastningssteg med hverandre, beregner programmet ut tøyninger i X-, Y- og Z-retning. Måleområdet må sprayes med en hvit grunnfarge, etterfulgt av et tynt lag svart lakk. På denne måten får man et homogent mønster av sorte prikker. Det er ut i fra dette mønsteret Aramis kan beregne deformasjonene og tøyningene som oppstår.



Figur 21: Aramis, kamera koblet til datamaskin [2]



Figur 20: Markert måleområde på bjelke



Figur 22: Visualisering av tøyninger i Aramis

Batteridreven drill

- Forboring og skruing av forsterkningene + avstivningene

Elektronisk vekt m/2 stålvaiere

- Før testing ble bjelkene veiet av en elektronisk vekt.
- Bjelkene ble opphengt og balansert av to stålvaiere.

Skruer

- Skruer av merket SPAX
- Lengde: 300 mm
- Diameter: 8 mm
- Helgjengede: Gjenger fra spiss til skruehode
- Selvborrende: Mulighet å skru inn uten forboring



Figur 23: Skruer

Digital fuktmåler

- Wagner Electronics L612.
- Brukt til å finne gjennomsnittlig fuktighet i hver bjelke.
- Måler fuktigheten ved fire sensorer.
- Sender elektroniske impulser. Fuktighetsinnhold beregnes fra forsinkelse mellom signal fra sender til mottaker.



Figur 24: Fuktmåler

Digitalt skyvelær

- Brukt til å finne gjennomsnittlig tykkelse av hver bjelke, og til å måle kantavstand.



Figur 25: Digitalt skyvelær

Tvinger

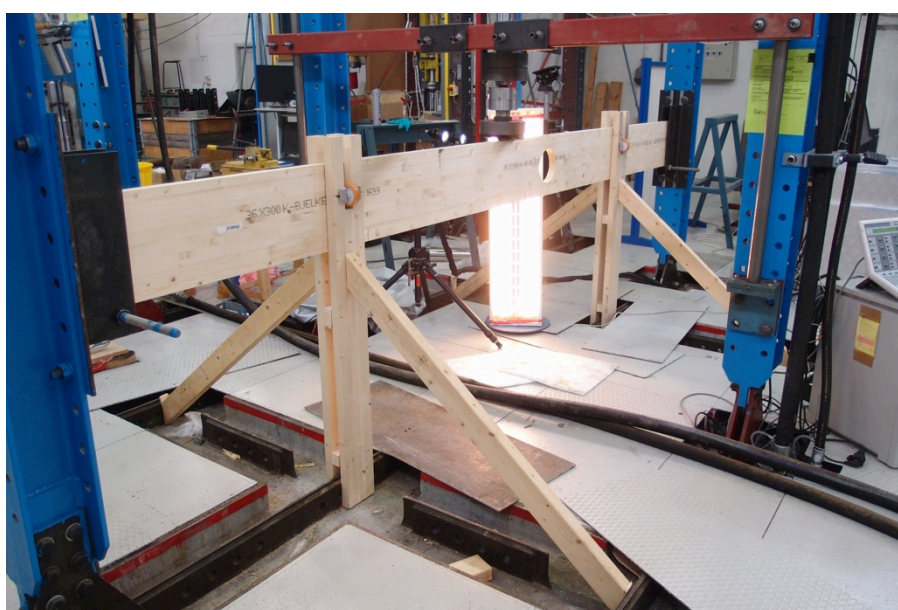
- Til å klemme fast avstivingene, for å unngå vipping.

Spraymaling

- Grunnfarge: Autravit (matt hvit). Skaper en jevn og ikke-reflekterende overflate på aktuelt område.
- Kontrastfarge: Mausoleum (sort). Homogent mønster av sorte prikker. (må gjøres forsiktig, holde igjen noe av trykket)

Testrigg

- Består av to søyler for opplegg av bjelke og en hydraulisk sylinder i midten som påfører lasten (Figur 26)
- To avstivninger m/hjul på hver side av bjelken, for å motvirke vipping og friksjon (Figur 27-28)
- Programvare: Instron Wavematrix.
 - o Registrerer posisjon, kraft og tid
 - o Oppretter grafer og genererer Excel-filer
 - o Kjører predefinerte sykluser (Her: etter figur 30).



Figur 26: Testrigg



Figur 27: Avstivning, detalj 1



Figur 29: Avstivning, detalj 2



Figur 28: Avstivning, full profil

6 Metode

6.1 Utføring av forsøk

Det ble valgt å bruke samme framgangsmåte som Solberg brukte [2], da denne fungerte bra, og for å få best mulig sammenligningsgrunnlag. Kort oppsummert her:

Bjelkene kommer ferdig produsert med utsparinger fra Kjelstad i paller. Disse må plasseres i et klimarom for å stabilisere fuktighetsinnholdet. I rommet skal det helst være 65 % RF og 20°C.

For å få like forutsetninger under alle testene er det viktig at testprosedyrene gjennomføres likt for hver gang. Det er her praktisert at bjelkene markeres og veies inne på klimarommet, og forsterkes med skruer. For å få skrudd inn skruene mest mulig rett markeres først riktig vinkel og kantavstand på skrueninnsettingen (med blyant), og deretter forborres det ca. 10 cm med et borr ($d = 6$ mm). Deretter skrues skruen inn forsiktig og kontrollert, da det er lett å skru skjevt og skruen har litt lett for å bøye seg.

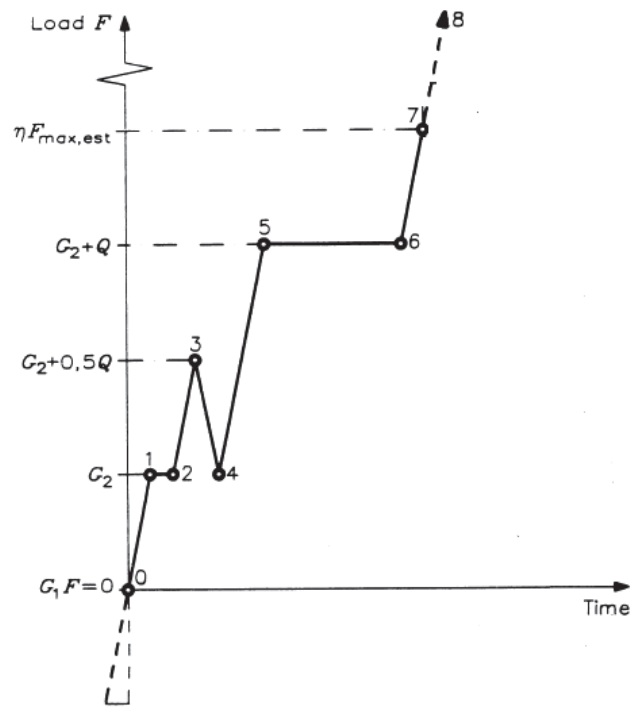
Etter skruene er innskrudd sjekkes bjelken for kritiske defekter og avvik, som kvister og lamelleskjøter, og fraktes deretter til lakkeringsluse og sprayet. Ved lakkering sprayes det på et jevnt lag med den hvite grunnfargen, for så å la det tørke. Så sprayes det over med sort kontrastfarge med et mest mulig homogent mønster av prikker på ≥ 1 mm. For å få dette til må trykket holdes litt igjen, og det må ikke sprayes direkte på bjelken (la det "regne").

Bjelken settes så i testriggeren. Lengde, høyde og tykkelse måles og registreres, og midles ut fra verdier på flere steder. Fuktigheten måles helt til slutt, midlet ut fra en måling på høyre og venstre side av bjelken.

Når dette er gjort gjennomføres en siste kontroll ved hjelp av en utarbeidet sjekkliste:

- Er bjelken målt og veiet?
- Er bjelken sprayet på tilfredsstillende måte?
- Er skruene skrudd inn korrekt?
- Er avstivingene stødige?
- Er testriggeren klargjort og sikker?
- Er sylindere i vater?
- Er kameraet stødig plassert og riktig innstilt?
- Er rett program klar til å settes i gang?

Når alt dette er klart kan testen settes i gang. Programmet og kameraet startes simultant. Testriggeren kjører en syklus som vist i Figur 30. Ca. tid per test: 15-20 min. Tiden fram til man antar bruddet inntreffer kan brukes til å klargjøre neste bjelke, for å effektivisere arbeidet.



Figur 30: Testprosedyre

6.2 Analyse av forsøk

Det ble valgt å gjøre en analyse av følgende forsøk som ble utført av Solberg [2], i tillegg til en analyse av seks utvalgte egne forsøk (Kap. 7.3)

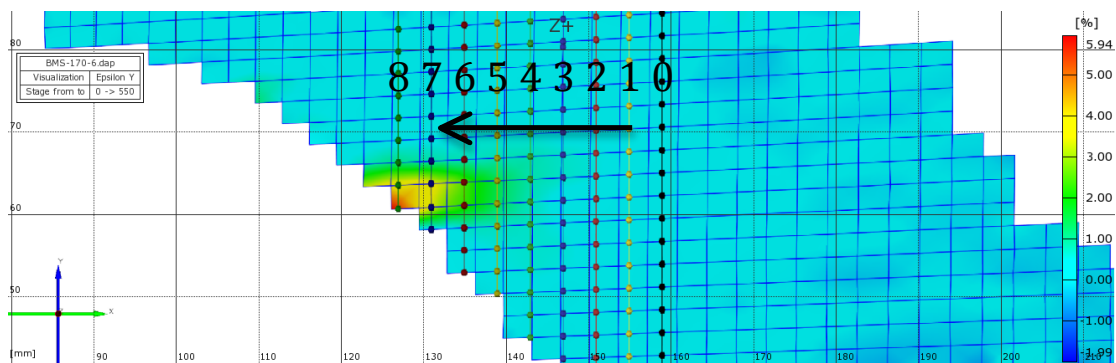
| Solberg | Steen |
|------------|---------------|
| BMS-170-6 | BMS,45-170-14 |
| BMS-170-7 | BMS,45-170-15 |
| BMS-170-8 | BMS,45-170-16 |
| BMS-170-9 | BMS,45-170-18 |
| BMS-170-11 | BMS,45-170-19 |
| | BMS,45-170-20 |

Dette er forsøk med utsparinger med en diameter på 170 mm plassert nær midtpunkt av bjelken. Utvelgelsen ble basert på Solbergs kommentarer til sine forsøk, og egne kommentarer til de nye forsøkene. Disse virket som var de mest vellykkede, mye på grunn av at de var blant de siste forsøkene som ble utført, slik at testoppsettet var så optimalt som mulig og startfeil utelukkes.

Uthenting av data

Metodikken for uthenting av data ble basert på egen tøyingsanalyse av sprekke-dannelse i bjelker *uten* bruk av skruer som forsterkning [3]. Etter erfaringer fra den analysen ble det gjort noen modifikasjoner hovedsakelig for å få ut et enda mer detaljert tøyingsbilde, blant annet å snevre inn måleområdet og hente ut data fra flere målepunkter. For detaljert beskrivelse av framgangsmåte, se Vedlegg I.

Uthenting av data fra forsøkene ble konsentrert til det strekkbelastede området øverst til høyre for utsparing, der det som oftest oppstår sprekker. I Aramis kan man hente ut data fra selvdefinerte Sections. En Section er et linjeutsnitt av bildet med jevnt fordelte målepunkter. Etter tidligere erfaringer, [3] i tillegg til nye undersøkelser av typisk maks lengde på sprekken, ble det valgt å opprette 9 loddrette Sections med jevne mellomrom (4 mm) som dekket det meste av sprekkeutviklingsområdet (Figur 25). Dette er 4 flere Sections enn tidligere og plassert med kortere mellomrom. Plasseringen av disse ble tilpasset hvert forsøk.

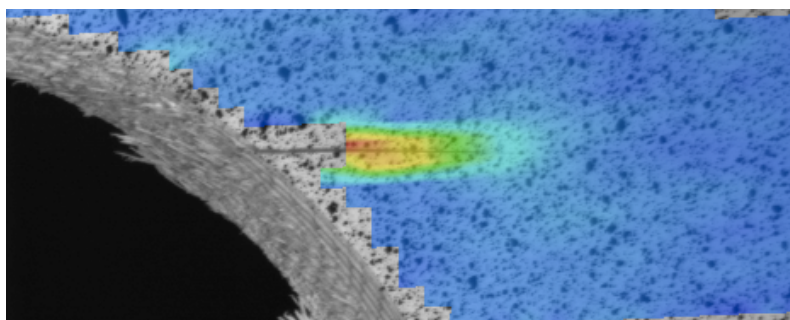


Figur 31: Section 0-8, selvdefinerte linjeutsnitt med målepunkter. Section 0 innerst, Section 8 ytterst.

Aramis beregner blant annet tøyingsendringer fra disse seksjonene. Kameraet tar bilder i et angitt tidsintervall (her: hvert 2. sekund) som registreres som

Stages, altså tidsstadier i forsøket. Det er registrert datamateriale fra ca. 500-600 Stages i hvert forsøk, og tøyningseendringene måles i forhold til starttidspunktet, Stage 0. I Aramis er det flere måter å visualisere resultatene på. Som standard vises tøyningseendringene i et datagenerert bilde med fargeskalaer (Figur 31 og 32) og i et diagram, i tillegg til originalfoto. Analysen kan begynne.

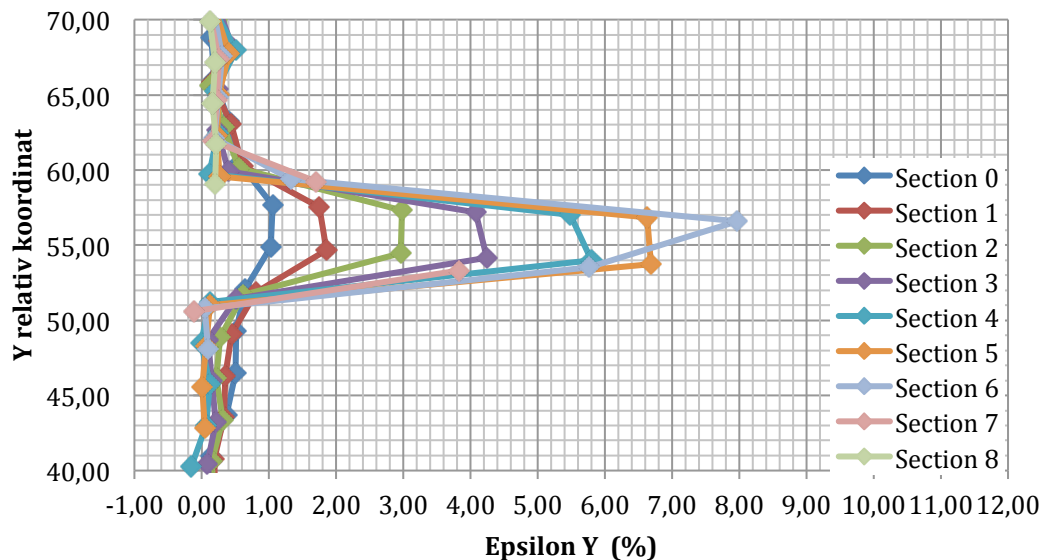
Som utgangspunkt ble bildene kjapt gått over for å finne første sprekkdannelse. Som oftest inntraff dette ganske sent i forsøkene, dermed færre Stages å analysere. Det ble sett på tøyningseendringer i Stages rett før oppsprekking, som ble sammenlignet med Stages rett før videre sprekkutvidelse. Fokus på området nær sprekketuppen, for å se om det var likheter i tøyningseverdier her. I tillegg ble det sett på hvilken påvirkning de innsatte skruene hadde på tøyningseverdiene. Lokalisering av hvor sprekketuppen var i det datagenererte tøyningsebildet ble funnet ved å legge det datagenererte bildet som et lag over originalfoto i Aramis (Figur 32). Alternativt: Legge over et rutenett. Dette var nytt i forhold til tidligere, og oppdagelsen av denne funksjonen gjorde lokaliseringen mye mer nøyaktig, og dermed også tøyningsebildet (særlig ved sprekketupp). Som Figur 32 også viser, forsvinner av og til data der sprekket er stor. Men sprekketuppen er likevel ikke på enden av dette feltet, den er innenfor.



Figur 32: Datagenerert tøyningsebilde som lag over originalfoto

Etter en grundig gjennomgang av sprekkutviklingen, ble et utvalg Stages eksportert som tekstdokumenter og deretter importert i Excel. Dette for å lage bedre og mer tilpassede diagrammer enn det Aramis lager (Figur 33). Disse tekstdokumentene inneholder relativ posisjon i y-retning (ref. Figur 31) og tøyningseendring i et spesifikt punkt, Epsilon Y. Et makro-skript forenklet importen av tekstfilene (vedlagt på minnepinne).

Én Section ble importert om gangen, og lagt i hver sin Sheet i Excel. Diagrammer fra utvalgte Stages ble opprettet ved å legge sammen dataene fra alle Sections. Eksempel: Stage 550 fra Section 0-8, Stage 551 fra Section 0-8 osv. Dette var et ganske så tidkrevende og knotete arbeid da datamengden er stor og antallet diagrammer som skulle lages. Men med et godt forarbeid ble tidsbruken effektivisert.

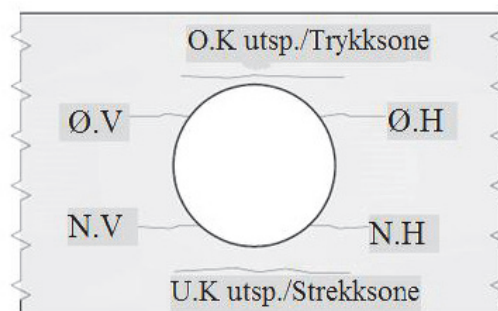


Figur 33: Tøyningsdiagram, Section 0-8

Siden alle forsøk er ulike, gjelder det å prøve å finne sammenhenger og tendenser. Noen ganger fordelte tøyningene seg til nye områder (gjerne områder med allerede eksisterende sprekker/defekter), og da ble dette interessant å se nærmere på. Ved store sprekkdannelser blir ikke all data registrert i Aramis, nettopp fordi sprekken er stor, men rundt sprekktupp var ikke dette et problem.

I de nye forsøkene (Kap. 7.3) ble det hovedsakelig hentet ut datagenererte bilder som viser forskyvning i Z-retning (ut av planet), da flere av forsøkene opplevde lokal utbøyning.

Når det refereres til områder på bjelkene så er det forutsatt at man står på samme siden som kameraet, altså slik at bjelkene ses på som i figur 17. Utsparingene er alltid til venstre for bjelkemidte. Dette fordi utsparingen ble saget fra denne siden og kanten rundt ble en del renere enn på baksiden.



Figur 34: Soneinndeling rundt utsparing

- Ø.H – Øvre høyre
- Ø.V – Øvre venstre
- N.H – Nedre høyre
- N.V – Nedre venstre
- U.K – Underkant
- O.K – Overkant

7 Resultater

7.1 Analyse av BMS-170

Hvert forsøk blir presentert hver for seg, i den rekkefølgen de ble analysert. Underveis gjøres det noen sammenligninger, før det tilslutt kommer en oppsummering. Notater fra Solberg [2] innleder hvert forsøk (i kursiv), for å få et mer helhetlig bilde av forsøkene før, under og etter synlig oppsprekking. Så går tøyingsanalysen igjennom steg for steg, fra før første oppsprekking til evt. kollaps av bjelken. Fokus er på tøyningene rett ved sprekket, for å se på tøyingsoppbyggingen som skal til for at det sprekker opp. Tøyingsdiagram, bilde av sprekke og tøyingsbilde generert av Aramis vises der det er hensiktsmessig. Piler er satt inn noen plasser for enklere å vite hvor teksten henviser til.

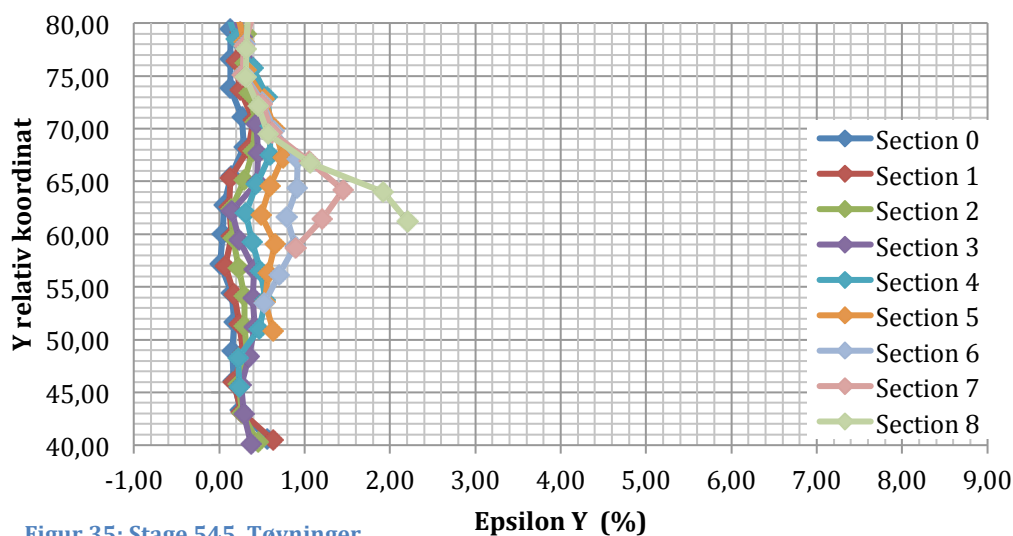
BMS-170-6

*Før Bjelkeskjøt mellom venstre bjelkeende og utsparing.
Lamelleskjøt i N.V og N.H område i utsparing.
Noen åpne lamelleskjøter og liminger midt på bjelken.*

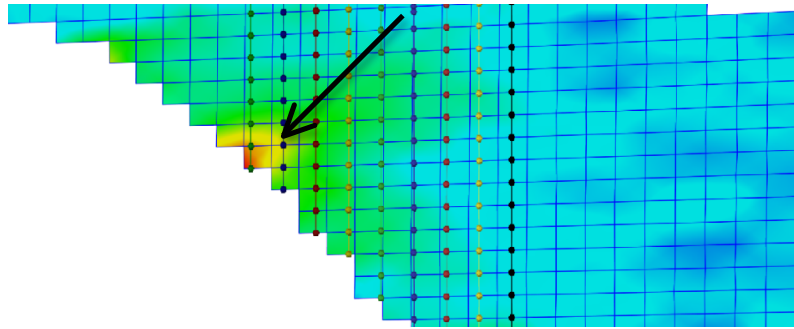
*Under Knaking ved 13,5 [kN] rundt utsparing.
Sprekk i Ø.H område i utsparing ved 14,5 [kN] som stoppet ved den høyre skruen.*

*Etter Strekkbrudd i nedre lamelle ved bjelkeskjøten.
Sprekken gikk bort til N.V del av utsparing.*

I dette forsøket oppstår første synlige sprekke ved Stage 546. Denne er ca. 1,5 cm lang og ligger oppe til høyre, ca. 55° fra sentrum av utsparingen. Tøyningene har ikke vært veldig store i forkant, men en liten tøyingskonsentrasjon har utviklet seg fra rundt Stage 446. Her er maks-tøyningene på ca. 1,0 % og øker til ca. 1,5 % ved Stage 535. Så øker tøyningen plutselig til ca. 2,2 % ved Stage 545 (Figur 35), med antydninger til oppsprekking akkurat i tøyingskonsentrasjonen, før en større synlig sprekke oppstår ved Stage 546 (Figur 37).

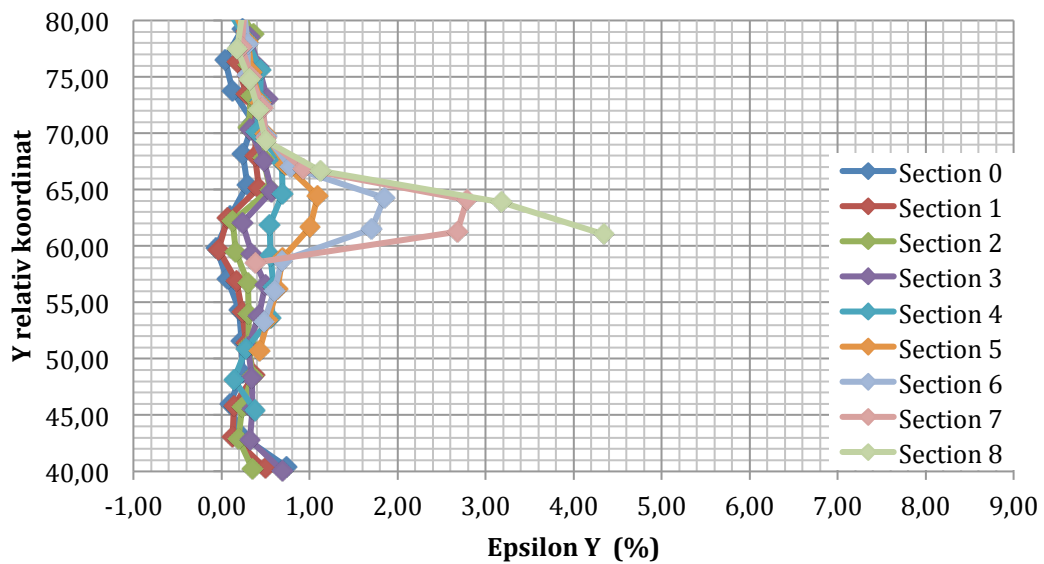


Figur 35: Stage 545, Tøyninger

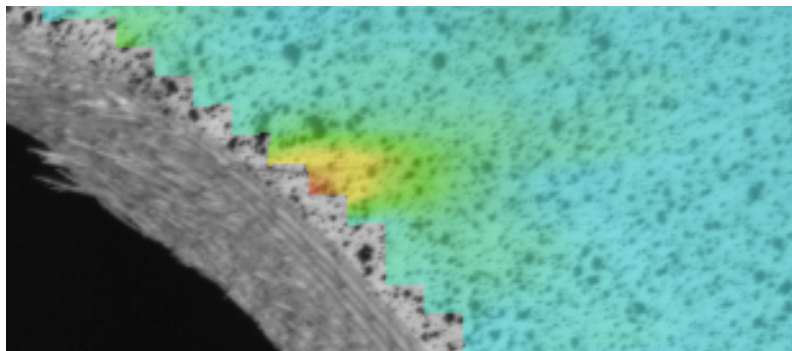


Figur 36: Stage 545, Aramis

Mellom Stage 545 og 546 går tøyningen i Section 8 rett fra 2,2 % til 4,4 %, Section 7 fra 1,5 % til 2,8 % og Section 6 fra 0,9 % til 1,8 %. Sprekktuppen beveger seg fra Section 7 til Section 5-6, altså når tøyningen er ca. 1,5 %.

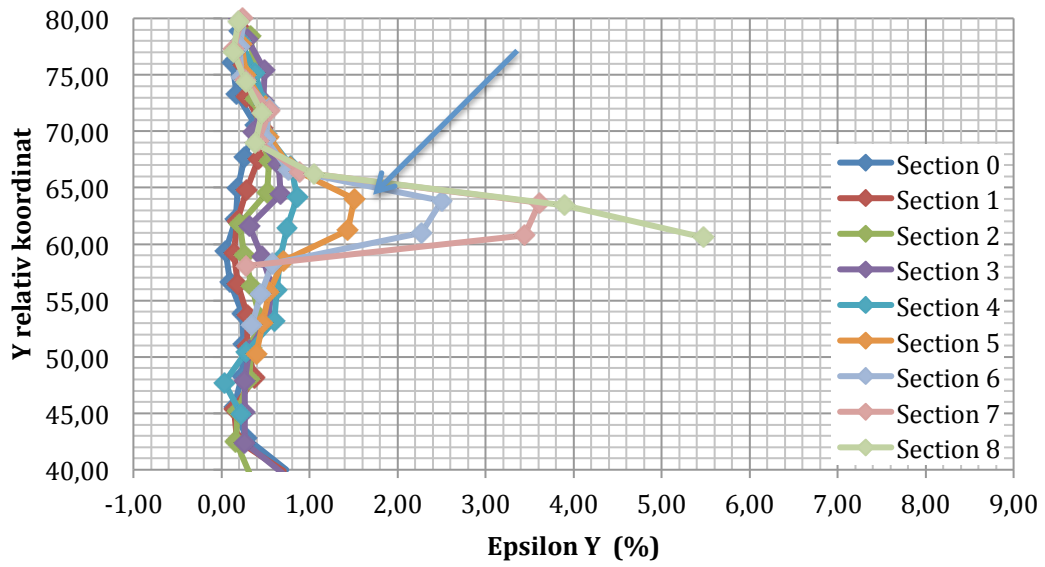


Figur 37: Stage 546, Tøyninger

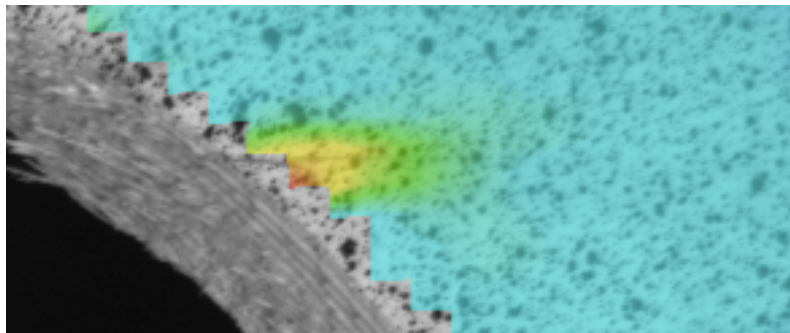


Figur 38: Stage 546, Sprekk

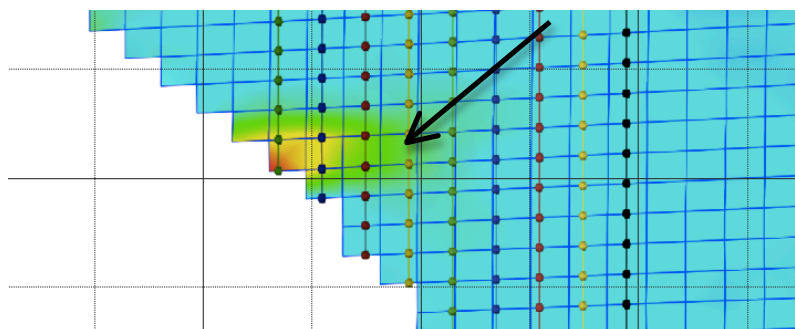
Ved Stage 550 er sprekkgruppen ved Section 5, med en tøyning på ca. 1,5 % (Figur 39).



Figur 39: Stage 550, tøyninger

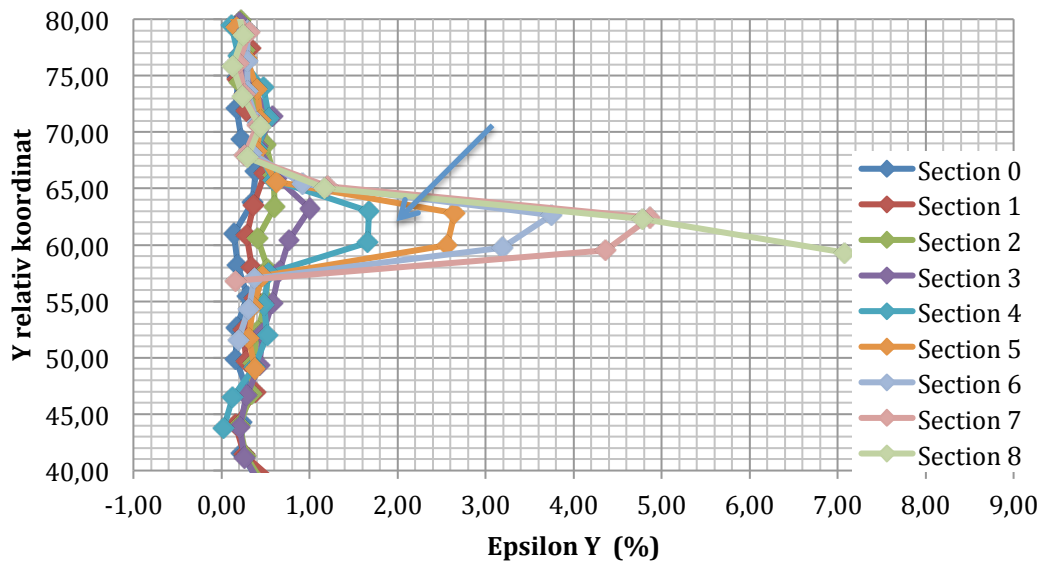


Figur 40: Stage 550, Sprekk

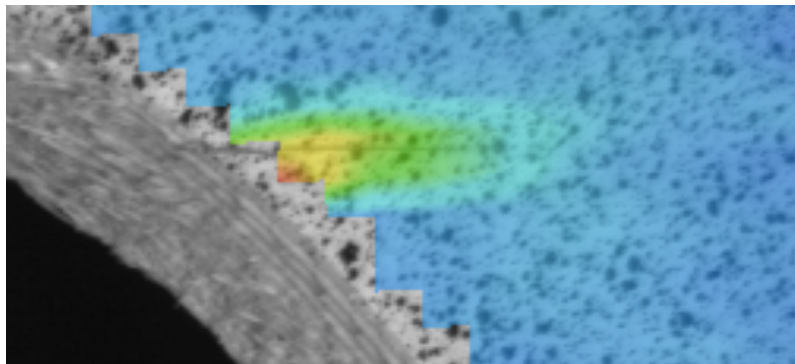


Figur 41: Stage 550, Aramis

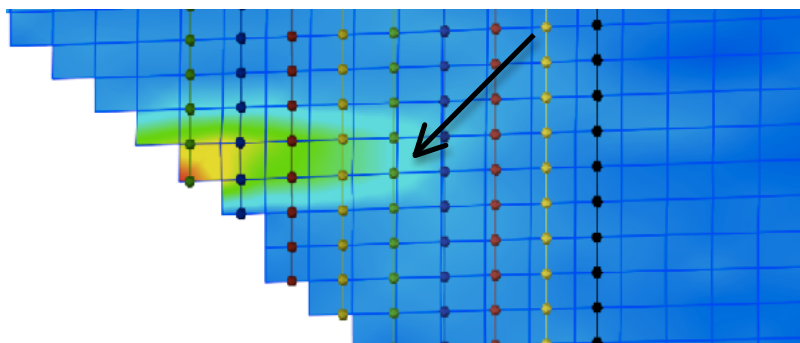
Ved Stage 561 er sprekkgruppen ved Section 4, med en tøyning på ca. 1,6 % (Figur 42).



Figur 42: Stage 561, Tøyninger

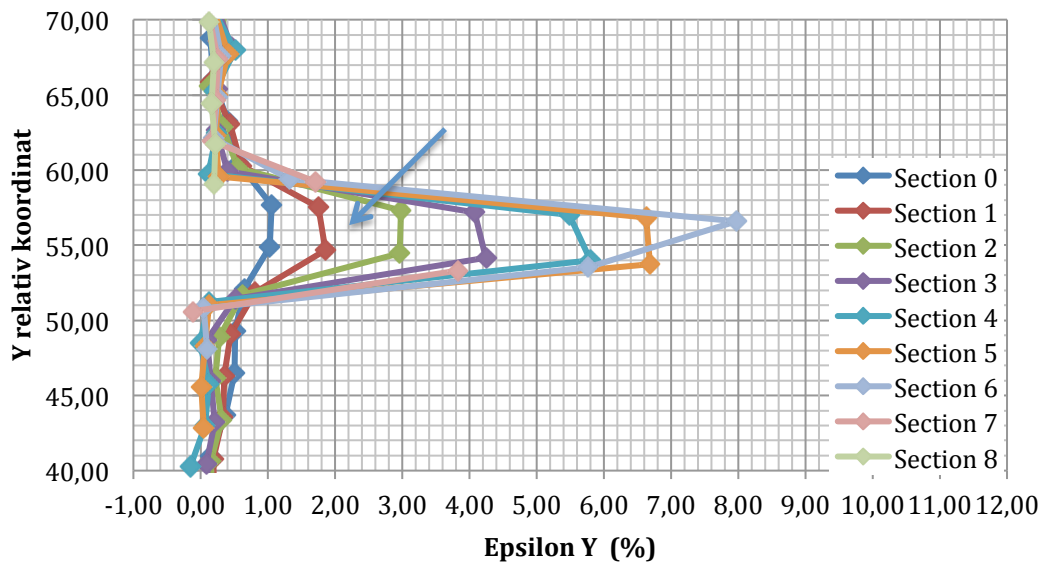


Figur 43: Stage 561, Sprekk

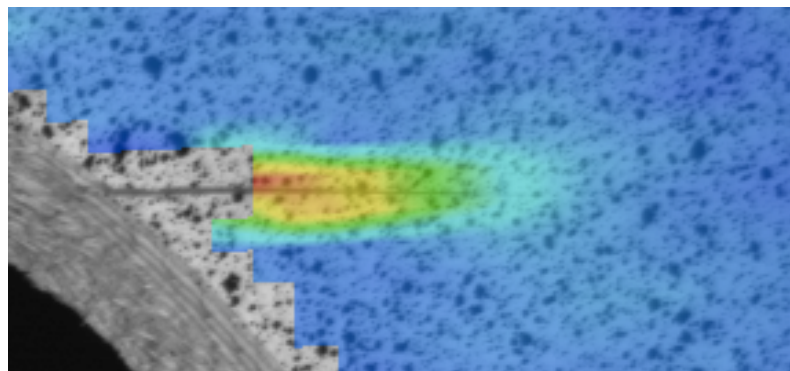


Figur 44: Stage 561, Aramis

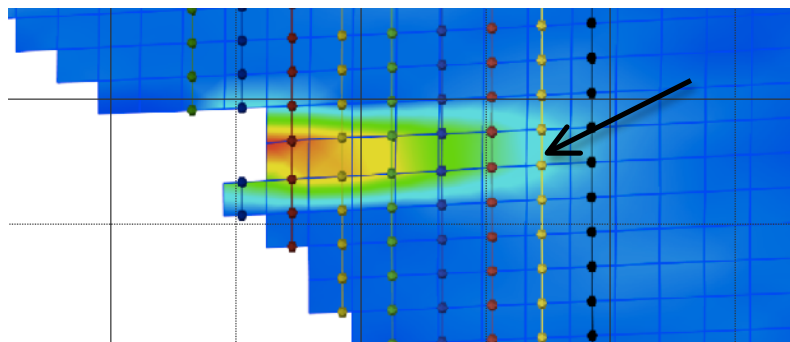
Ved Stage 583 er sprekketuppen ved Section 2, med en tøyning på ca. 1,5 %, og ved Stage 613 er sprekketuppen ved Section 1, med en tøyning på ca. 1,8 % (Figur 45).



Figur 45: Stage 613, Tøyninger

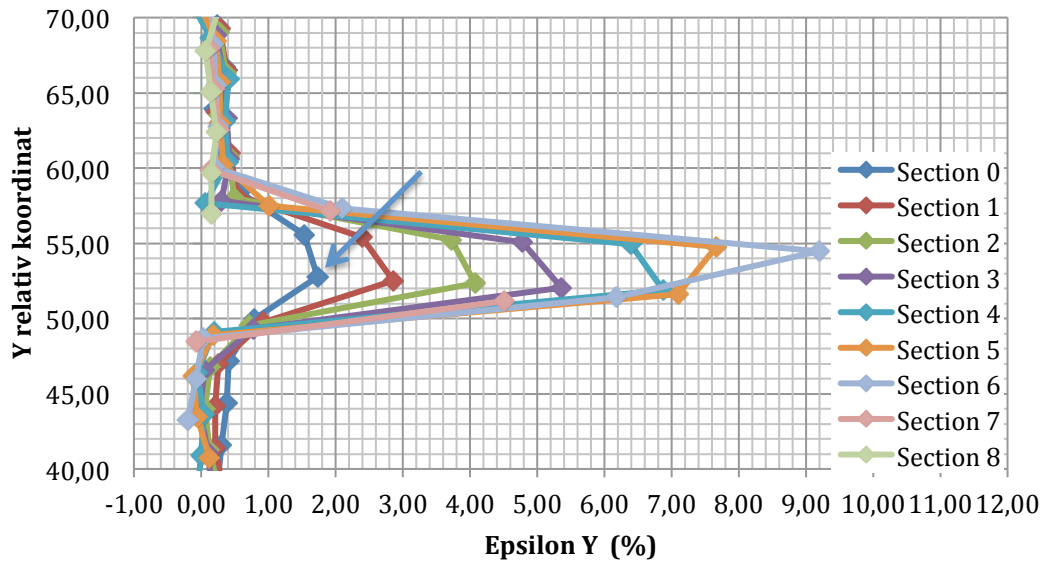


Figur 46: Stage 613, Sprekk

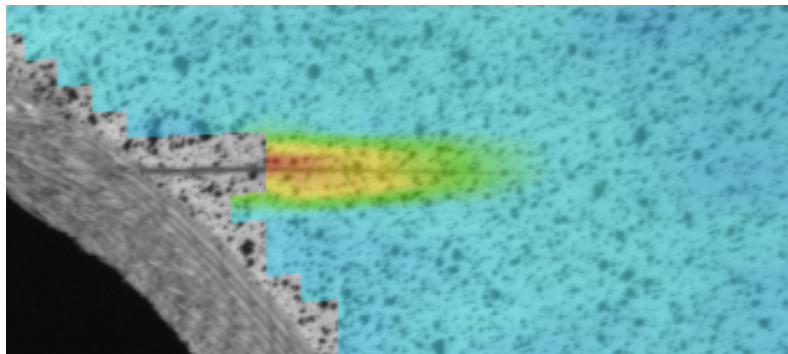


Figur 47: Stage 613, Aramis

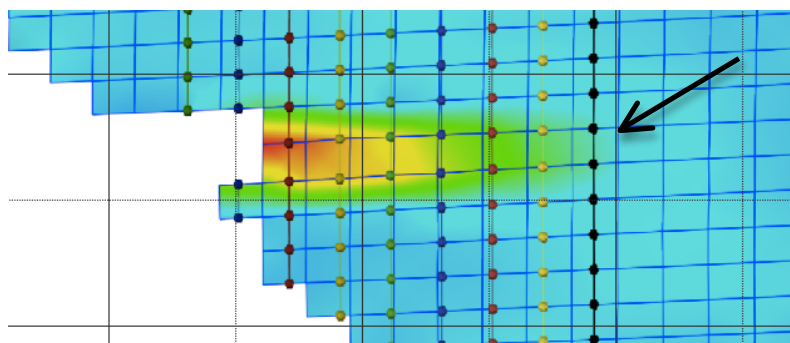
Ved Stage 631 er sprekkgruppen ved Section 0, med en tøyning på ca. 1,8 % (Figur 48)



Figur 48: Stage 631, Tøyninger



Figur 49: Stage 631, Sprekk



Figur 50: Stage 631, Aramis

Etter sprekken oppstår, vokser den seg gradvis større helt fram til brudd, ved Stage 632, og sprekken stopper der skruen er satt inn. Skruene ser ut til å gi treet økt styrke.

Tøyningene er tilnærmet lineære langs hele sprekken, og øker og fordeler seg jevnt etter hvert som sprekken utvikler seg. I dette forsøket er tendensen at sprekken utvikler seg når tøyningen rett ved sprekktuppen øker til rundt 1,5 - 1,8 %.

Tøyningene er litt større rett ved sprekktuppen, rett før videre oppsprekking, enn lenger innover. Et fall på rundt 0,5 % mellom sprekktupp og neste Section, dvs. innenfor 4 mm, før det flater ut (eks.: Figur 42). Dette samsvarer med tidligere observasjoner [3], men de nyeste observasjonene er enda mer nøyaktige. Området med makstøyninger viser seg å være mye kortere.

Selv om det oppstod en sprekke oppe til høyre var det likevel ikke her bruddet gikk. Det oppstod et strekkbrudd i en lamelle nede til venstre og oppsprekking oppe til venstre. Verdt å legge merke til er at sprekken oppe til høyre også stopper ved skruelasseringen.

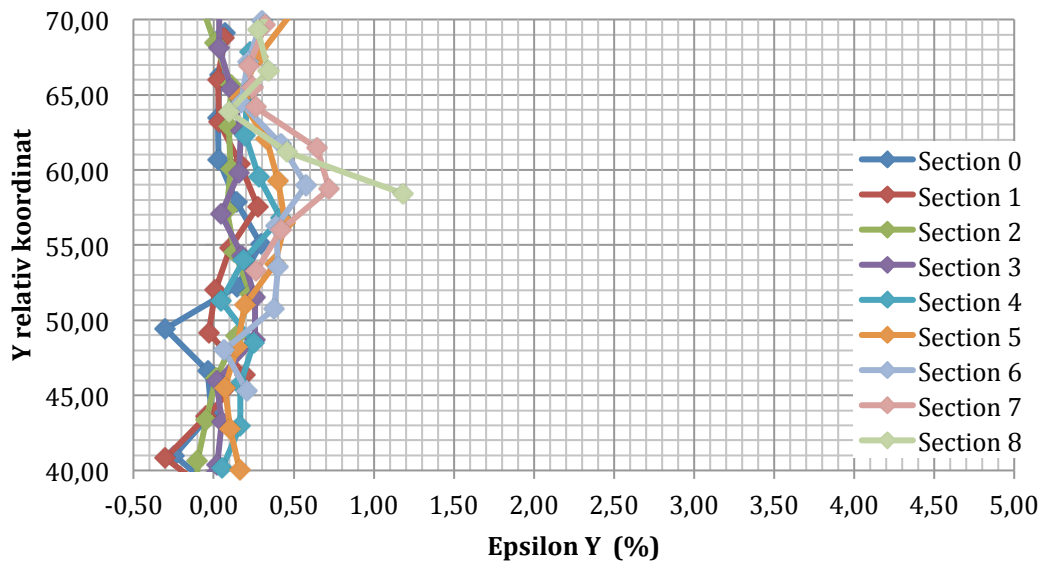
BMS-170-7

Før Kvist i nedre lamelle rett til venstre for utsparing.
Lammelleskjøt i N.V område i utsparing.
Sprekk midt i utsparing langs høyre skrue (30 med mer lang).

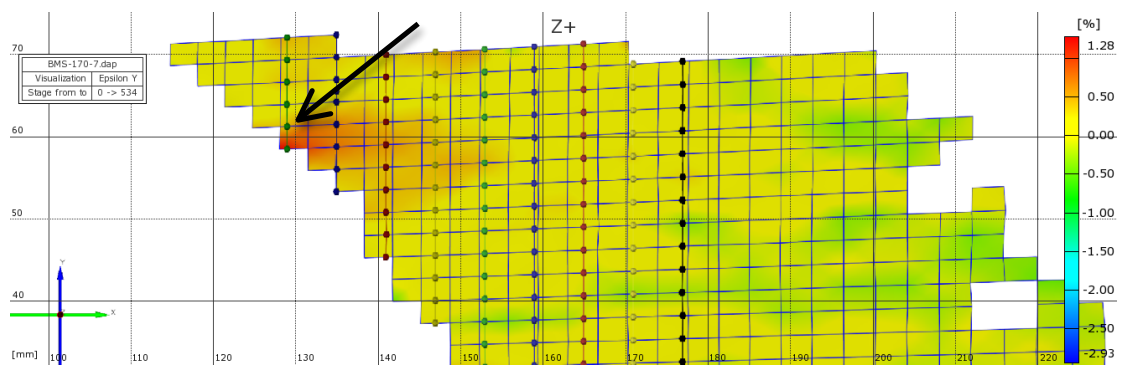
Under Noe knaking rundt utsparing ved 8 [kN].
Synlig sprekk i N.V område ved 13,4 [kN].
Synlig sprekk i Ø.H område ved 16 [kN].

Etter Delvis strekkbrudd under utsparing, men sprekken fra N.V område gikk også samtidig forbi skruen og ut til venstre bjelkeende.

Her ble det valgt å øke mellomrommet mellom seksjonene til 6 mm, da sprekken ble litt lengre enn i de andre forsøkene. I måleområdet har tøyningene ligget under 1,1 % helt fram til Stage 534, der tøyningen ytterst ved Section 8 øker til rundt 1,2-1,3 % (Figur 51). Dette er ca. 50° grader oppe til høyre for utsparingen.

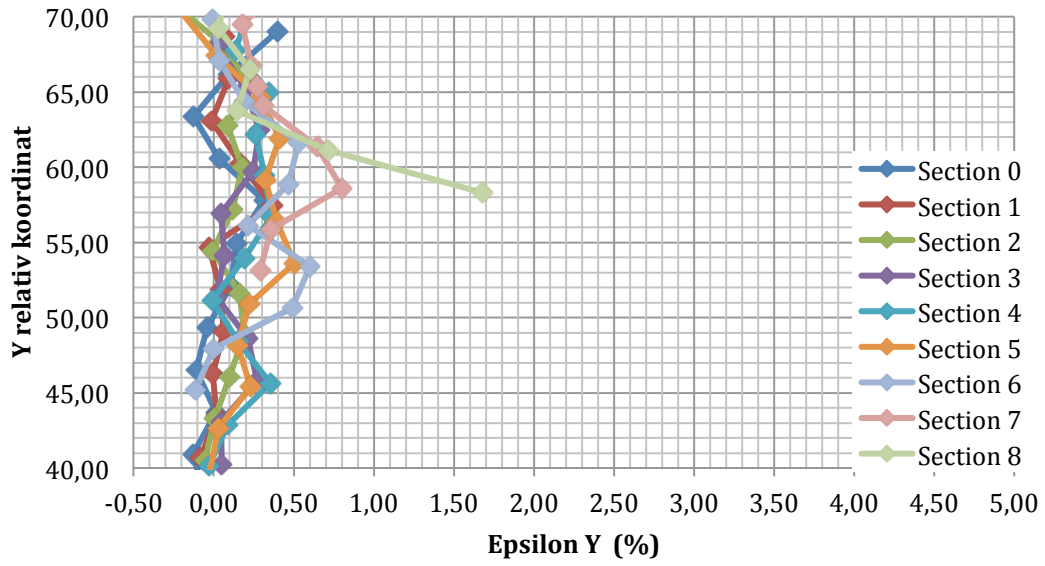


Figur 51: Stage 534, Tøyninger

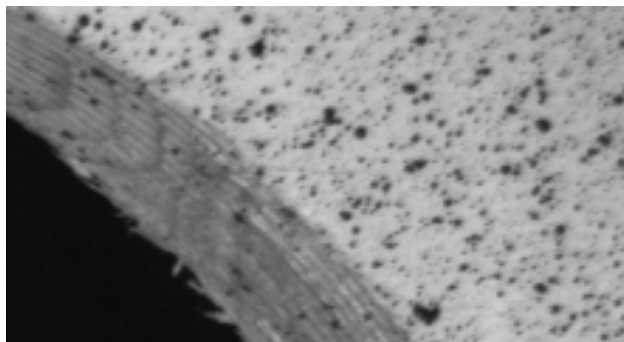


Figur 52: Stage 534, Aramis

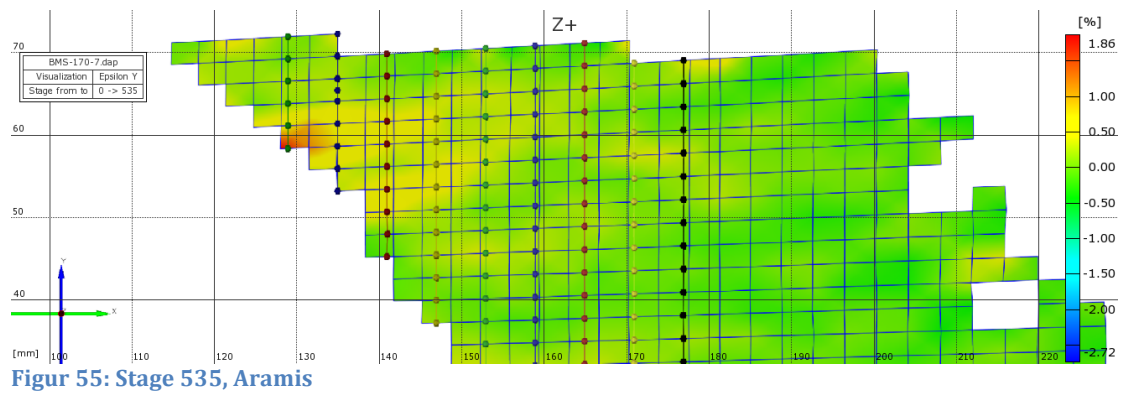
Ved Stage 535 hopper denne opp til rundt 1,7 %, en liten smal sprekk har oppstått (Figur 53).



Figur 53: Stage 535, Tøyninger

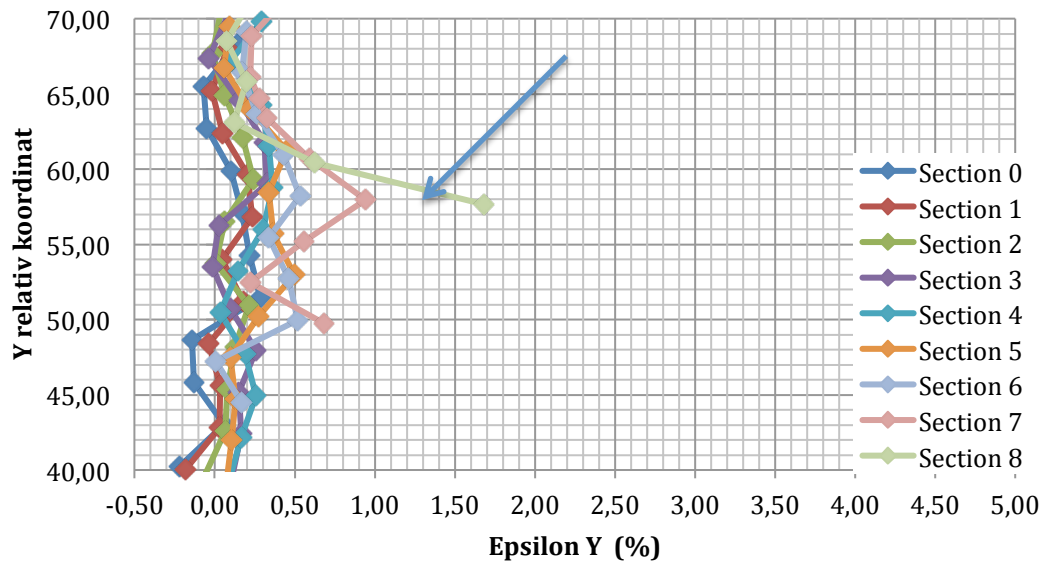


Figur 54: Stage 535, Sprekk

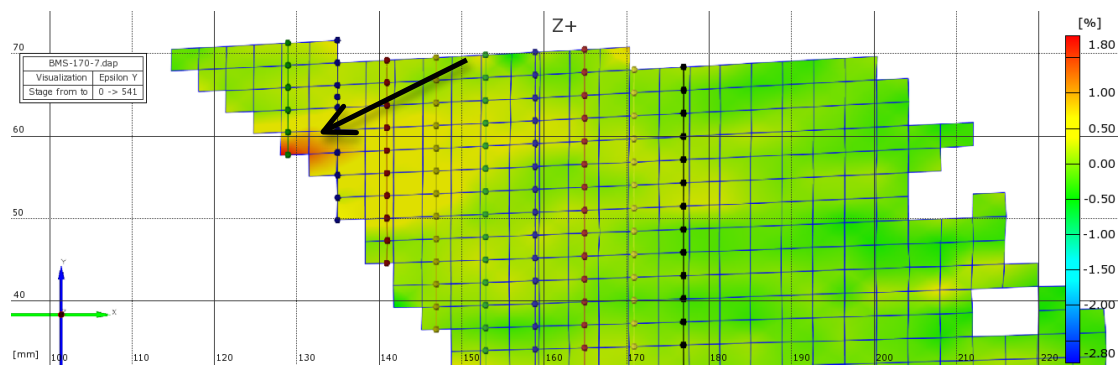


Figur 55: Stage 535, Aramis

Ved Stage 541 ligger sprekketuppen omtrent midt mellom Section 7 og 8 med tøyninger på 1,0-1,8 % (Figur 56).

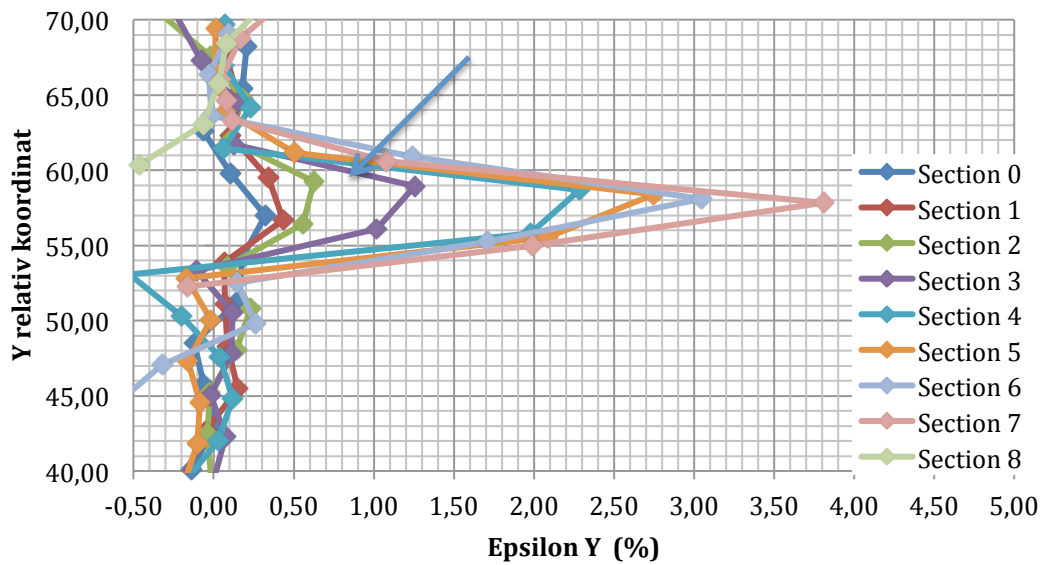


Figur 56: Stage 541, Tøyninger

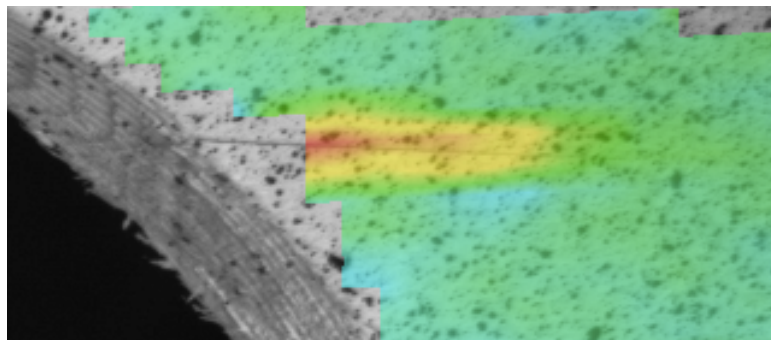


Figur 57: Stage 541, Aramis

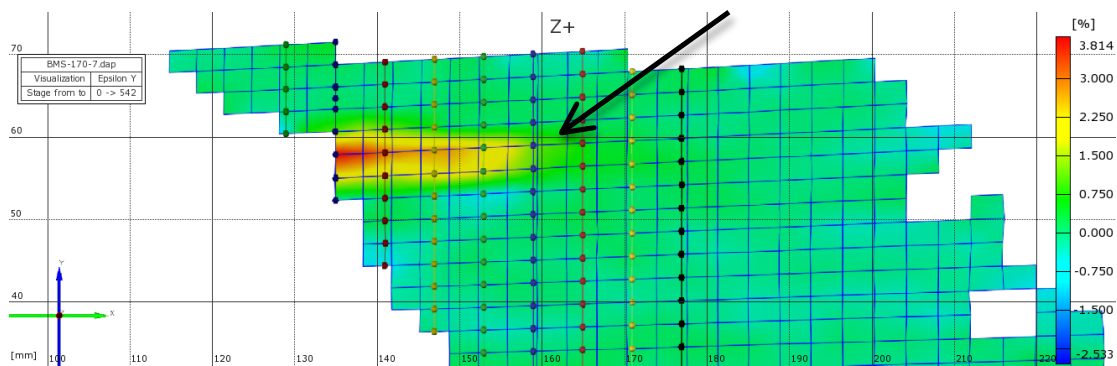
Så oppstår det plutselig en stor sprekke ved Stage 542. Sprekken strekker seg til rundt skrueløsning, midt mellom Section 2 og 3. Tøyningene ved sprekktuppen ligger her på mellom 0,6-1,3 % (Figur 58).



Figur 58: Stage 542, Tøyninger

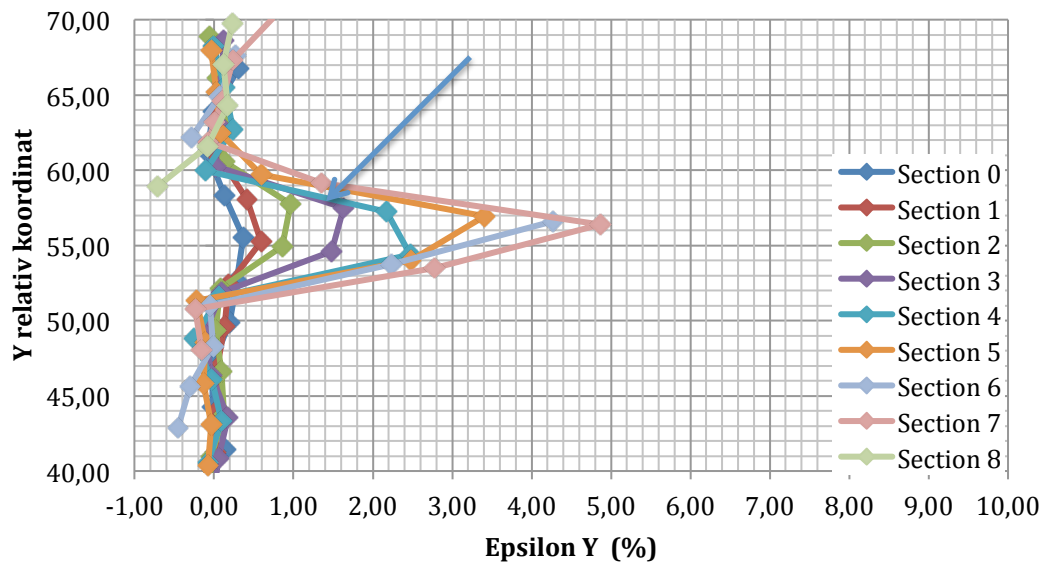


Figur 59: Stage 542, Sprekke

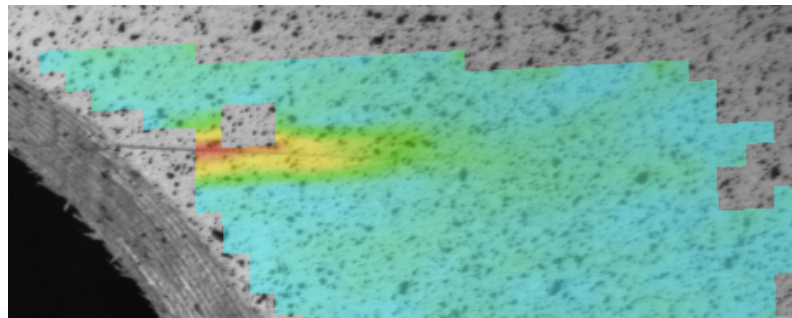


Figur 60: Stage 542, Aramis

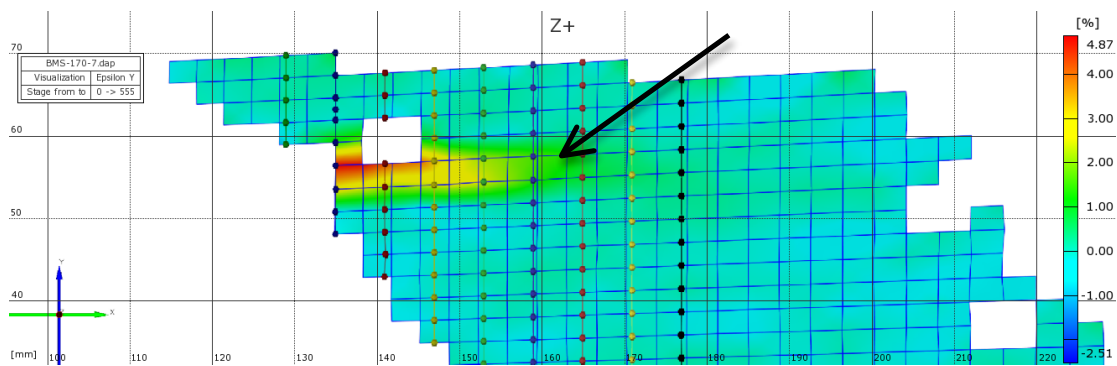
Historien gjentar seg ved Stage 555, der tøyningene mellom Section 2 og 3 har økt fra 0,6-1,3 % til mellom 1,0-1,7 % (Figur 61), før det sprekker enda mer opp i neste Stage.



Figur 61: Stage 555, Tøyninger

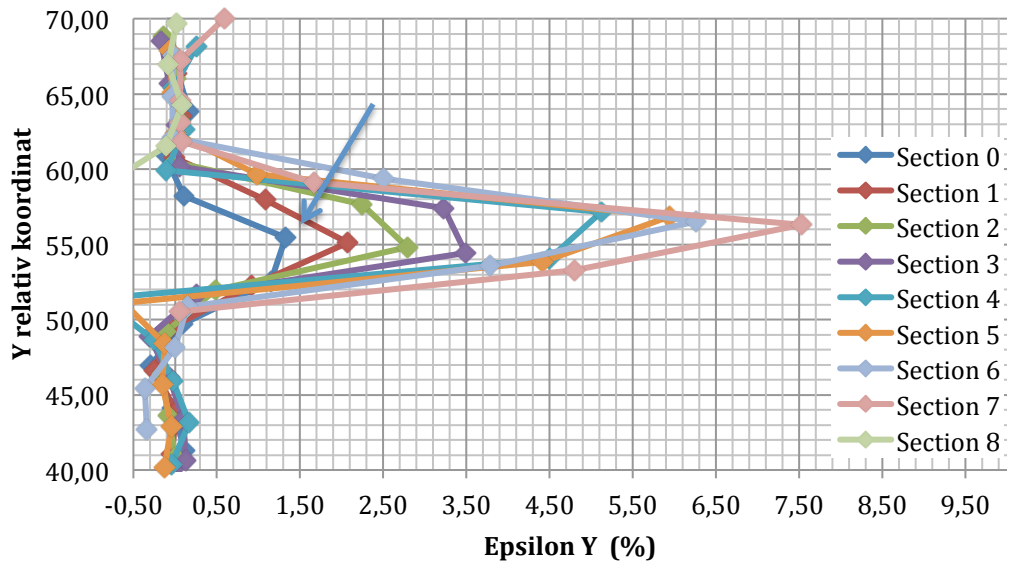


Figur 62: Stage 555, Sprekk

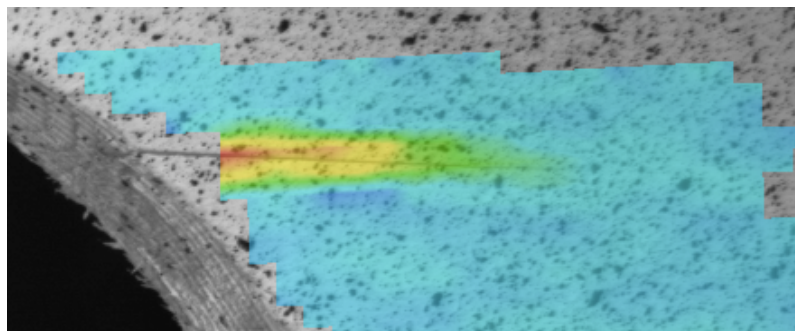


Figur 63: Stage 555, Aramis

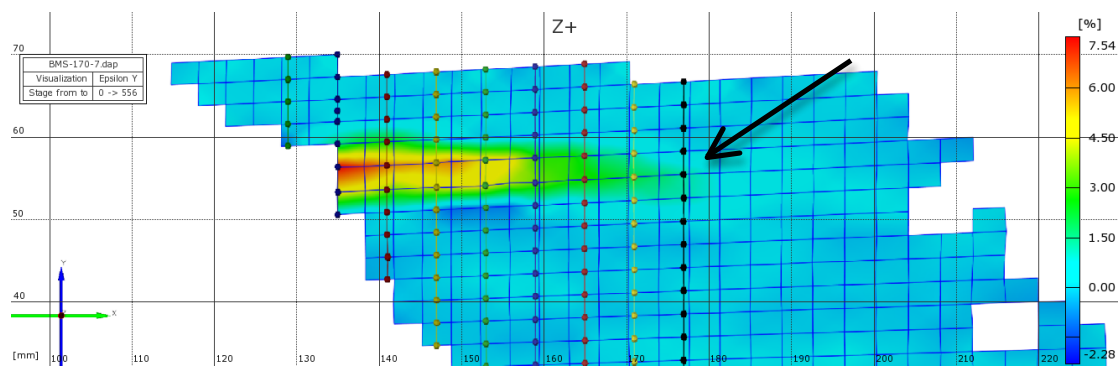
Ved Stage 556 sprekker det opp og sprekktuppen er nå ved Section 0, med en tøyning på 1,3% (Figur 64).



Figur 64: Stage 556, Tøyninger



Figur 65: Stage 556, Sprekk



Figur 66: Stage 556, Aramis

Sprekken har beveget seg litt forbi skruel plasseringen, men det kan komme av at det også har oppstått en sprekk nede til venstre som hjelper til. Det ser likevel ut som at skruen bidrar til at sprekken ikke vokser seg mye lenger inn, da sprekken heller utvider seg mer i Y-retning.

Kollaps ved Stage 693, og bruddet går i overkant av utsparing og nede til venstre (Figur 54 og 55), altså ikke der sprekkdannelsen har vært.



Figur 67: Stage 692



Figur 68: Stage 693, Kollaps

Tøyningene ved sprekketuppen ligger altså i de første to forsøkene i området mellom 1,2-1,8 rett før oppsprekking. Ser altså ut til at tøyningene ved ny sprekketupp må øke til dette området før det sprekker mer opp. Det er også likheter i tøyningfordelingen fra sprekketuppen og videre inn i bjelken. Stor tøyning første 4 mm, med en utflating videre. Strekkbrudd i underkant, via lamelleskjøt, tyder på at skruene virker selv om sprekken gikk litt forbi skruene.

BMS-170-8

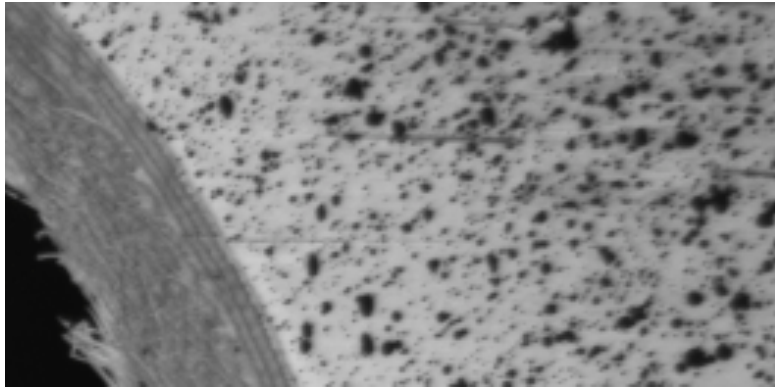
*Før Sprekk i venstre kant av utsparing pga. skjevt iskrudd skrue.
Noen kvister i nedre lamelle over hele bjelkelengden.
Lammeskjøter i hele bjelkehøyden på høyre side av utsparing.*

*Under Sprekkdannelse i Ø.H og N.V område ved 13 [kN].
Begge sprekkene stoppet ved skruene.*

*Etter Strekkbrudd under utsparing.
Sprekken fulgte venstre skrueakse under og høyre skrueakse over
utsparingen.*

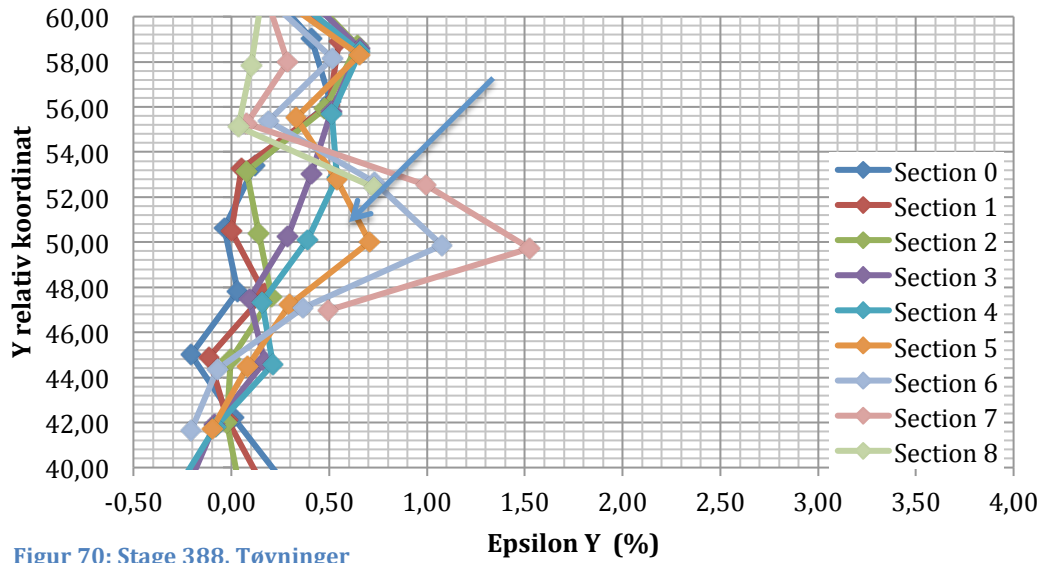
Dette forsøket utvikler seg litt annerledes enn det foregående, og har litt flere defekter i utgangspunktet. En sprekk oppstod allerede ved skrueinnsettelse til venstre for utsparingen, men denne utvikler seg ikke nevneverdig i løpet av forsøket. Til høyre for utsparingen er det en del småsprekker/defekter, som gir grobunn for videre oppsprekking utover i forsøket. Velger å se nærmere på disse.

En liten sprekk går fra starten av ut fra utsparingen oppe til høyre, rundt 40° fra sentrum av utsparingen. Denne er veldig kort og smal, og utvikler seg litt i løpet av forsøket. Tøyningene ligger lenge på mellom 0,5-1,5 % i området mellom Section 4-7, uten at mer oppsprekking skjer. I overkant av denne er det også en liten sprekk (Figur 69).

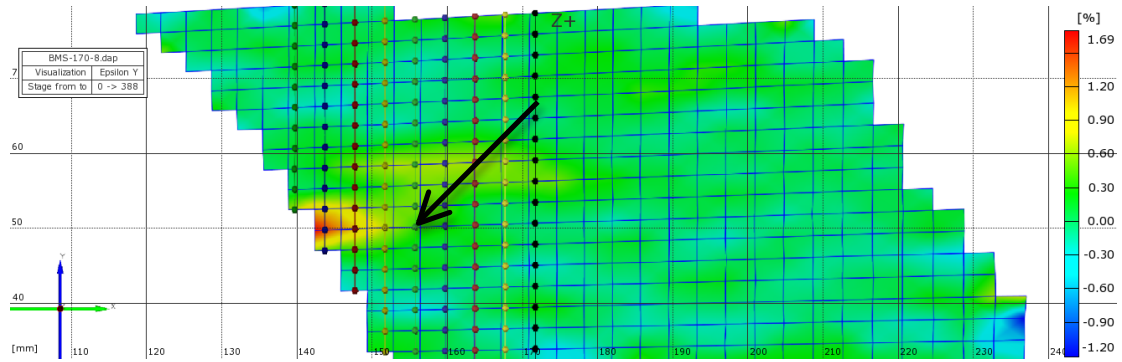


Figur 69: Stage 388, Sprekk

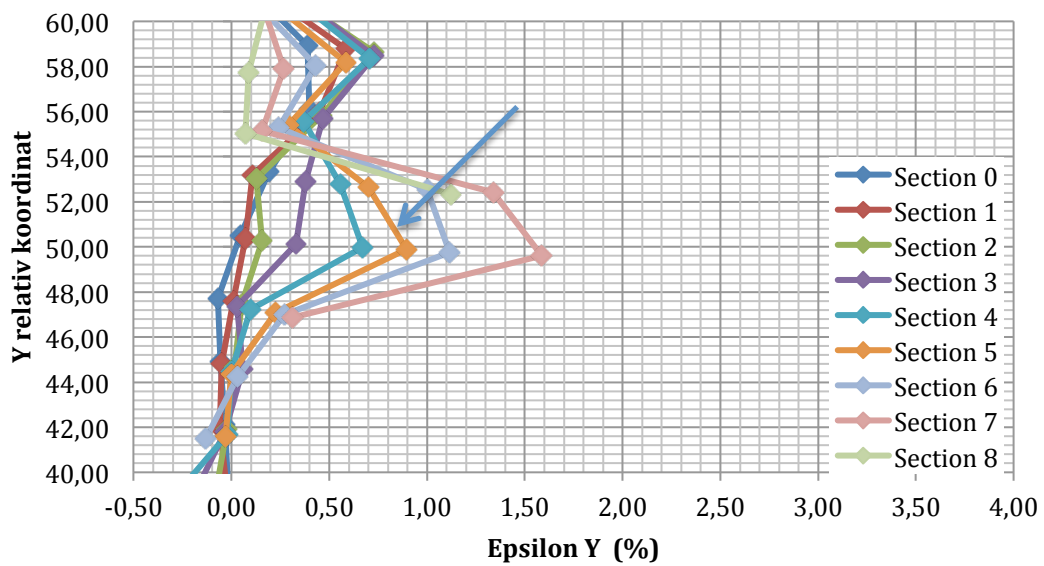
Merkbare tøyningssendringer skjer mellom Stage 388 og Stage 389. Sprekktuppen ligger i området rundt Section 4-5, og tøyningene her går fra henholdsvis 0,4-0,7 % til 0,7-0,9 % (Figur 70 og 72), men ingen synlig ekstra oppsprekking. Section 3 har en tøyning på 0,3 % og Section 7 har en tøyning på 1,5 %. Tøyningoppbygging også i sprekkene i overkant.



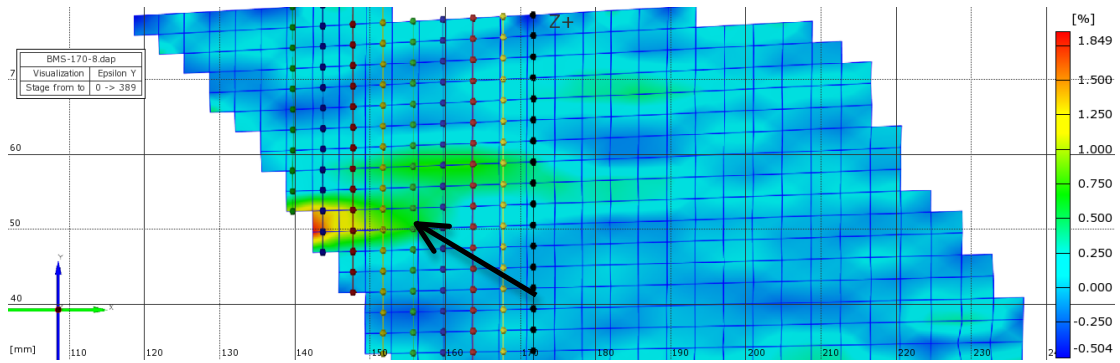
Figur 70: Stage 388, Tøyninger



Figur 71: Stage 388, Aramis

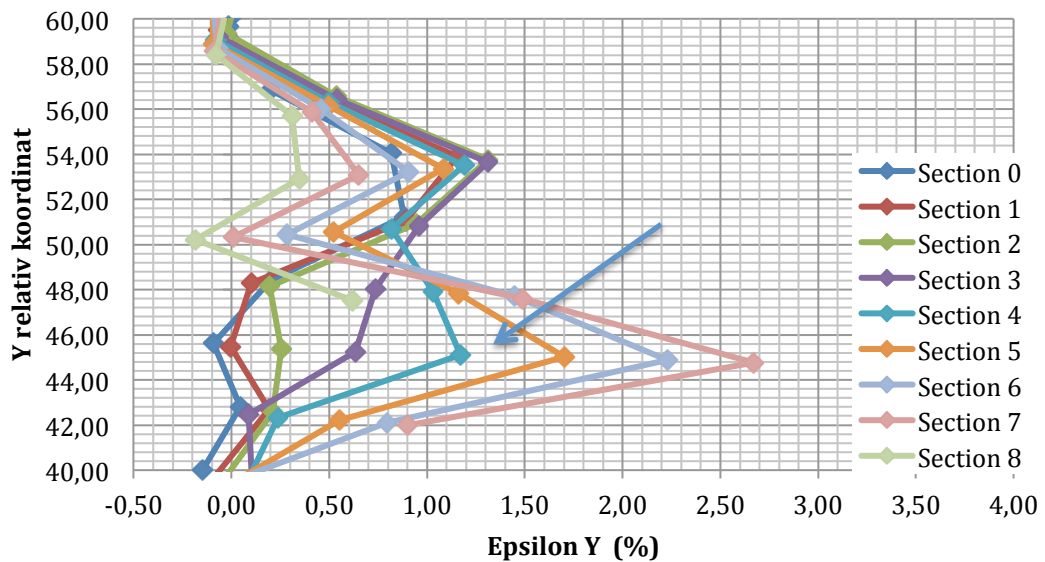


Figur 72: Stage 389, Tøyninger

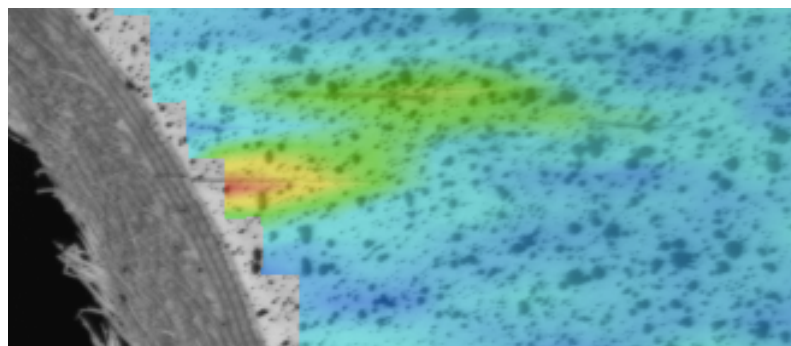


Figur 73: Stage 389, Aramis

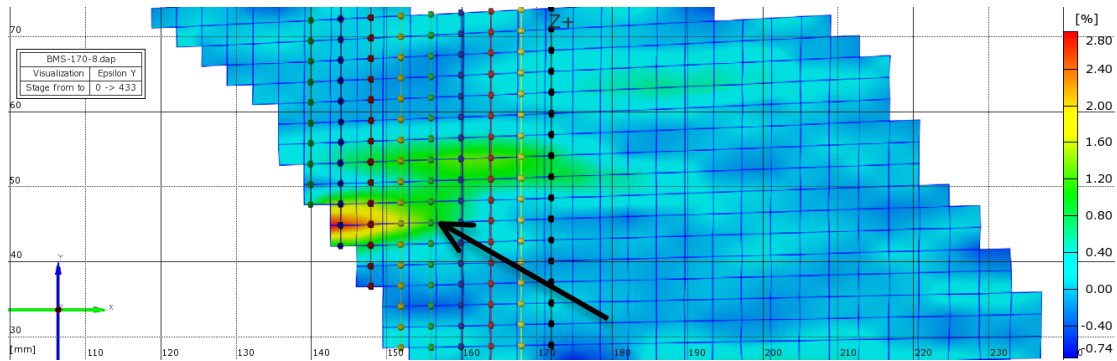
Fram til Stage 433 øker tøyningene mellom Section 4-5 til 1,2-1,7 %. Sprekktuppen har nå flyttet seg til Section 4 (Figur 74). Ved Section 3 er tøyningen på 0,6 %, men er ikke oppsprukket.



Figur 74: Stage 433, Tøyninger



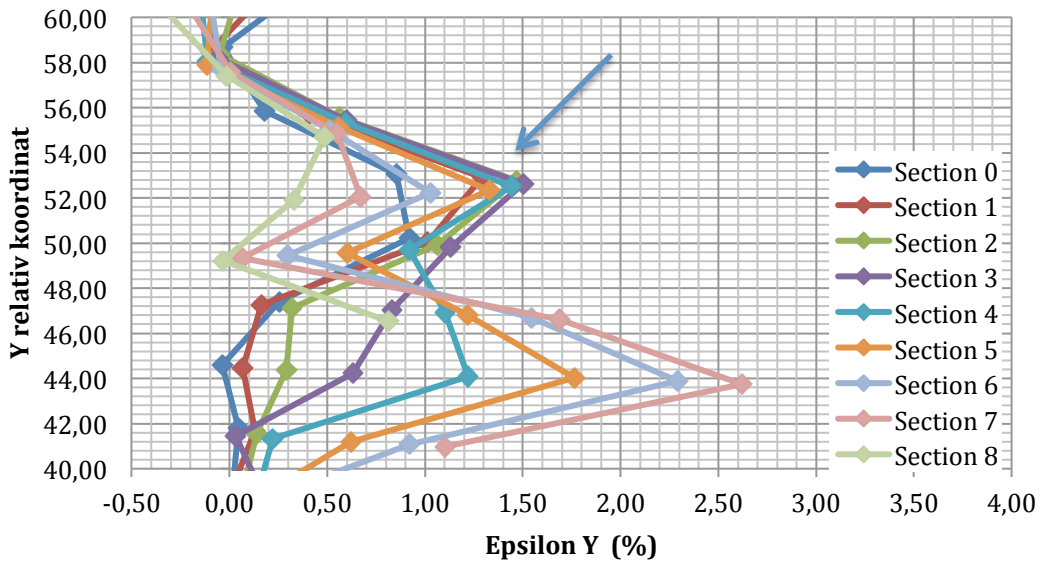
Figur 75: Stage 433, Sprekk



Figur 76: Stage 433, Aramis

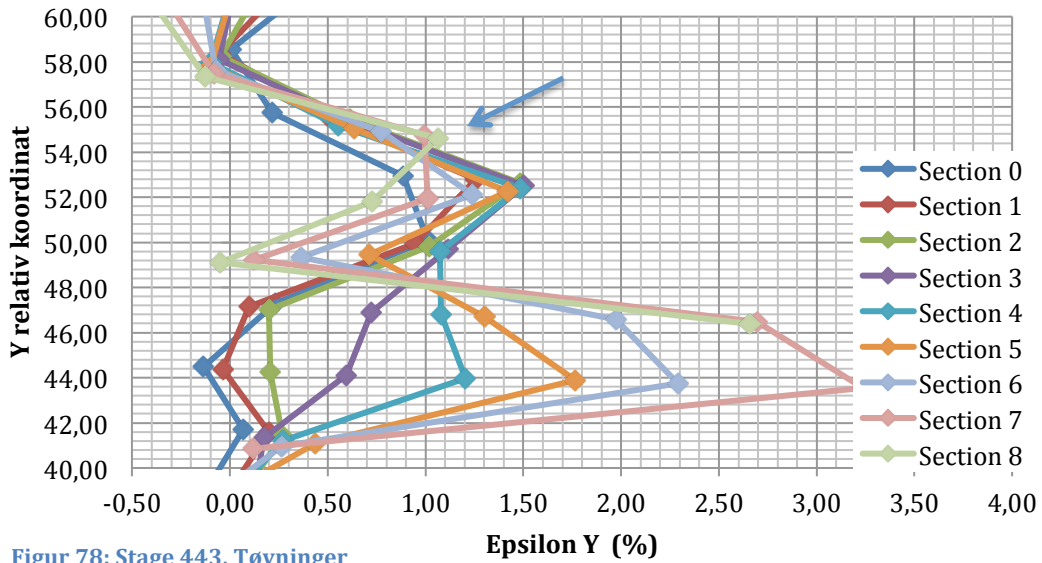
Sprekken strekker seg ikke helt til skruel plasseringen, men tøyningseendringene ser til å forflytte seg til området rundt den andre sprekkken ovenfor, der tøyningene begynner å øke. Dette er ikke en endesprekk, men er innenfor utsparringen. Skruel plassering er rett til høyre for denne sprekkken, ved Section 0.

Flytter fokus til denne sprekkken. Tøyningene innenfor sprekkken, Section 1-5, har ligget i området 0,5-0,7 % fram til rundt Stage 400. Ved Stage 433 øker tøyningene til mellom 1,1-1,3 % (Figur 77). Tøyningene utenfor sprekkken, Section 0 og Section 6-8, ligger mellom 0,3-0,9 %. Ved Stage 442 øker tøyningene innenfor sprekkken til mellom 1,3-1,5 %.



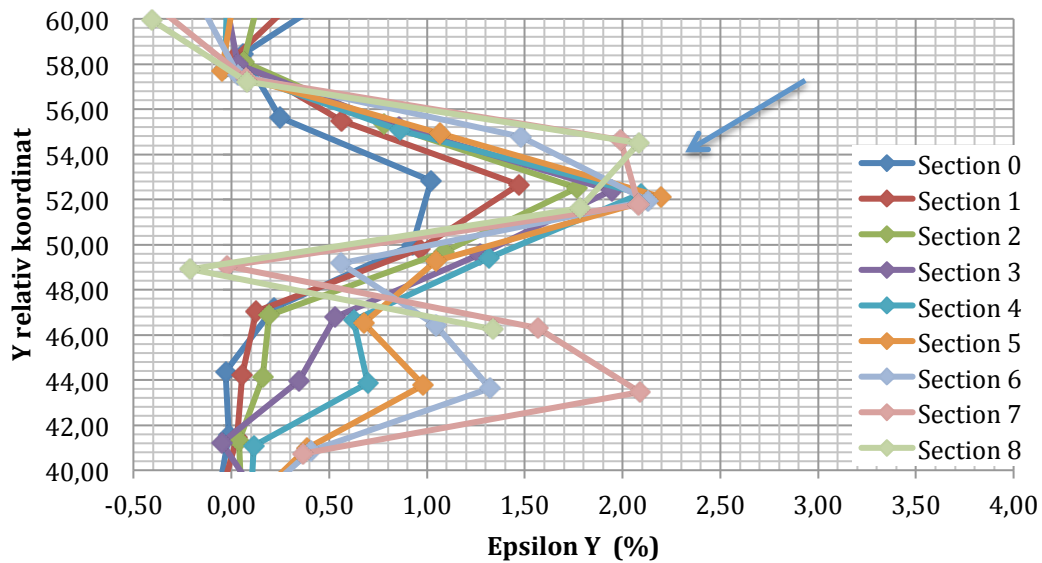
Figur 77: Stage 442, Tøyninger

Ved Stage 443 går plutselig tøyningene utenfor sprekkken, Section 6-8, opp til 1,0-1,2 % (Figur 78).

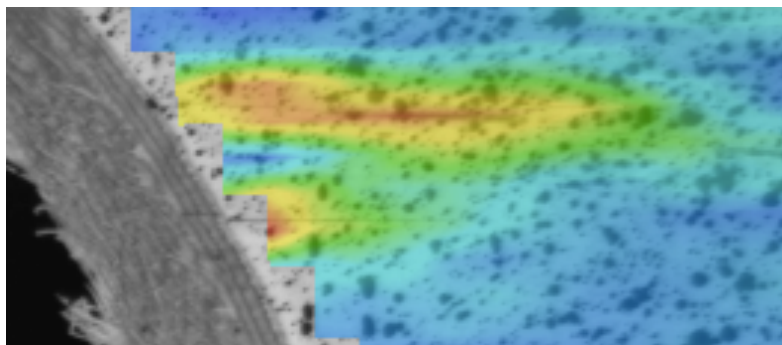


Figur 78: Stage 443, Tøyninger

Påfølgende oppsprekking ved Stage 444, med tøyninger innenfor 1,8-2,2 % i sprekken (Figur 79). Sprekken jobber seg ikke lenger inn i treet enn til skruel plasseringen, i stedet går den ut mot utsparingen. Merkbart fall i tøyningene i den nederste sprekken.

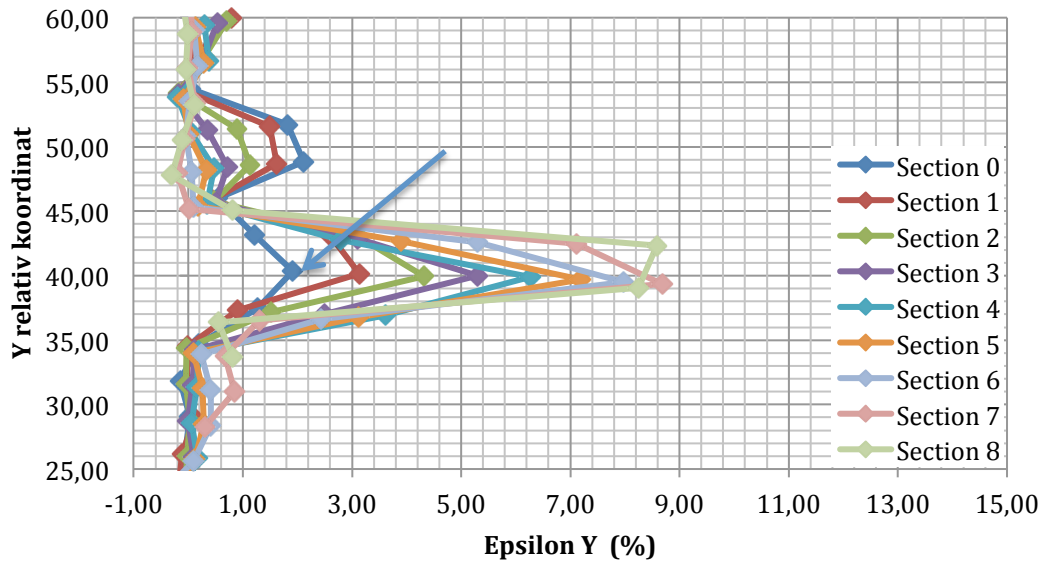


Figur 79: Stage 444, Tøyninger

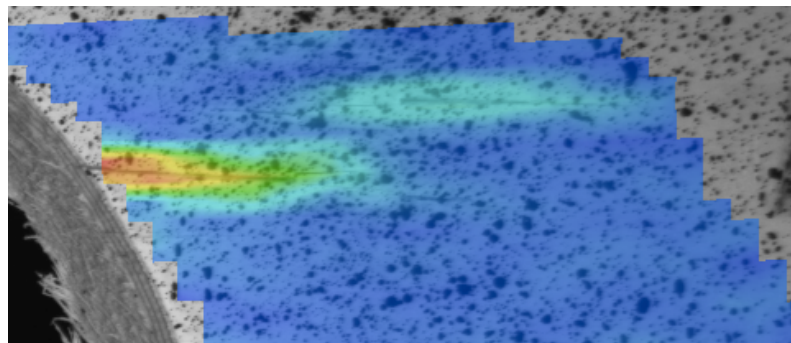


Figur 80: Stage 444, Aramis

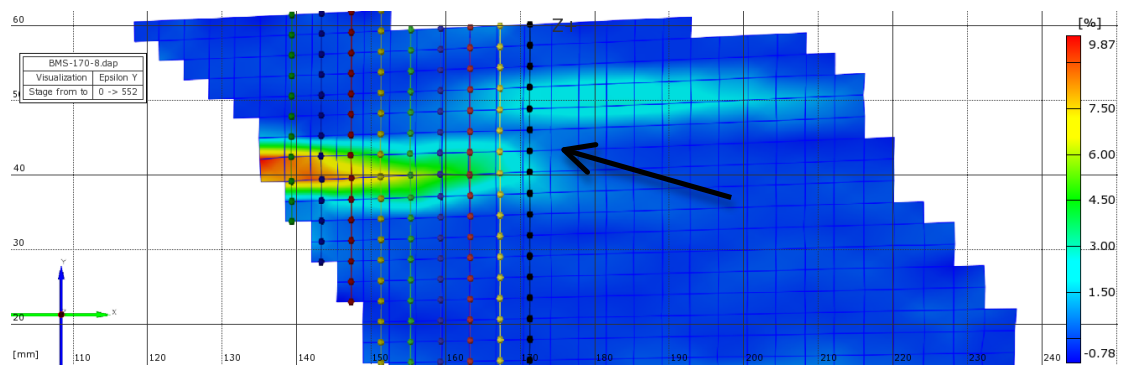
Ved Stage 552 er sprekketuppen ved Section 0, med en tøyning på 1,9 % (Figur 81). Men i stedet for å sprekke mer opp ser det ut som at tøyningene forflyttes til enda en eksisterende sprekk i overkant, og dermed går forbi skruel plasseringen (Figur 81-83).



Figur 81: Stage 552, Tøyninger

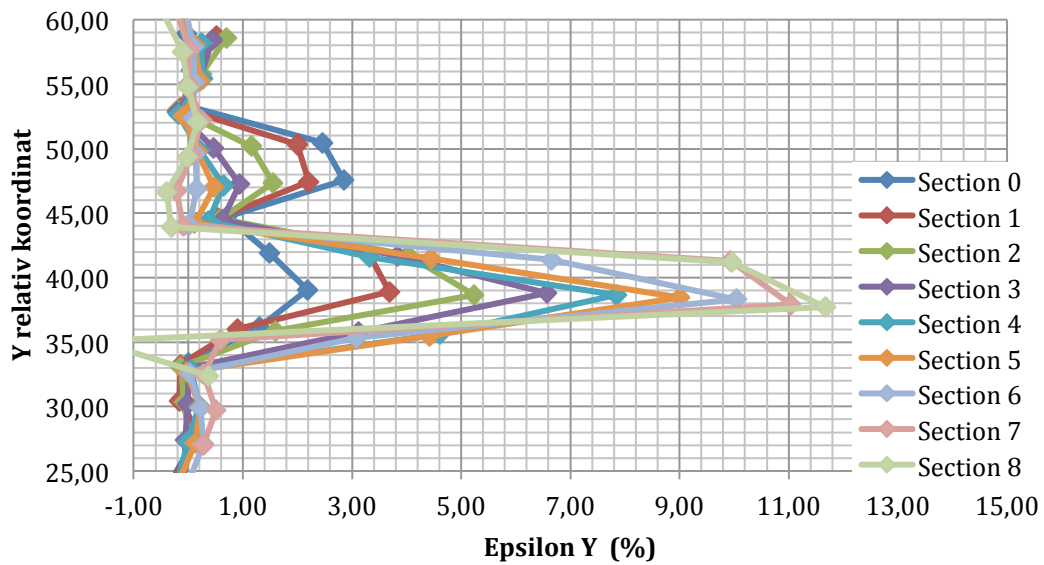


Figur 82: Stage 552, Sprekk

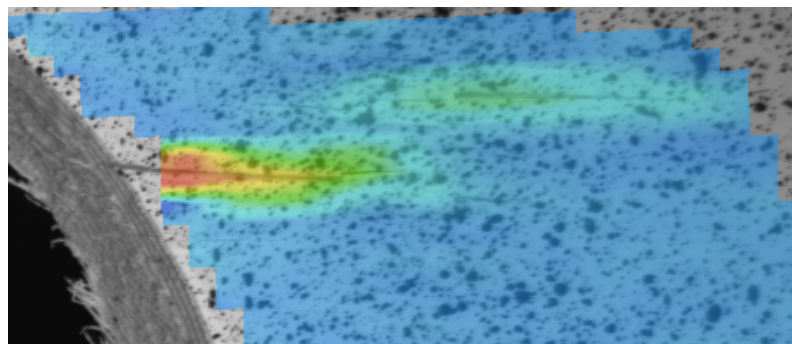


Figur 83: Stage 552, Aramis

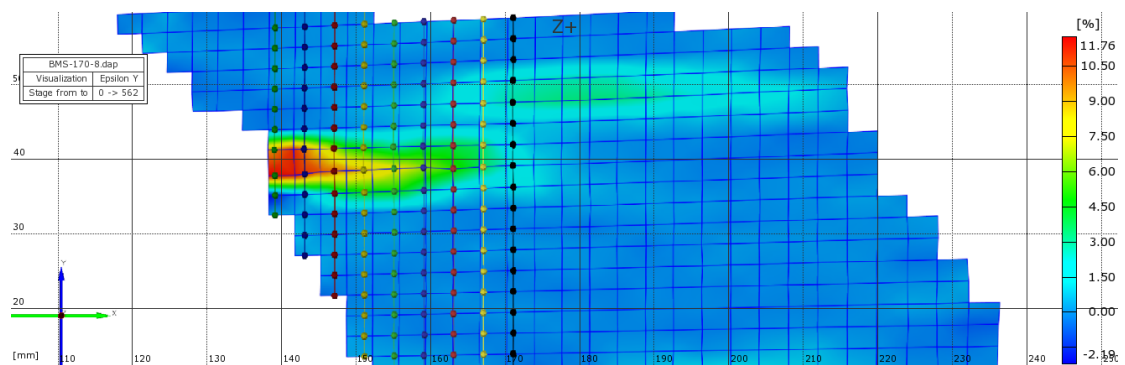
Ved Stage 562 oppstår det en stor sprekke i underkant av utsparingen, som skaper et tøyningshopp ved sprekken oppe til høyre (Figur 84-86). Likevel stopper skruen sprekken fra å vokse seg lenger inn i bjelken.



Figur 84: Stage 562, Tøyninger



Figur 85: Stage 562, Sprekke



Figur 86: Stage 562, Tøyninger

Det kan se ut til at det trengs en tøyningendring på ca. 1,5 % i nærheten av sprekktuppen for at oppsprekking skal skje. Skruen stiver av bjelken og bidrar til at sprekken ikke vokser seg forbi denne, tøyningene fordeler seg heller til andre felt.

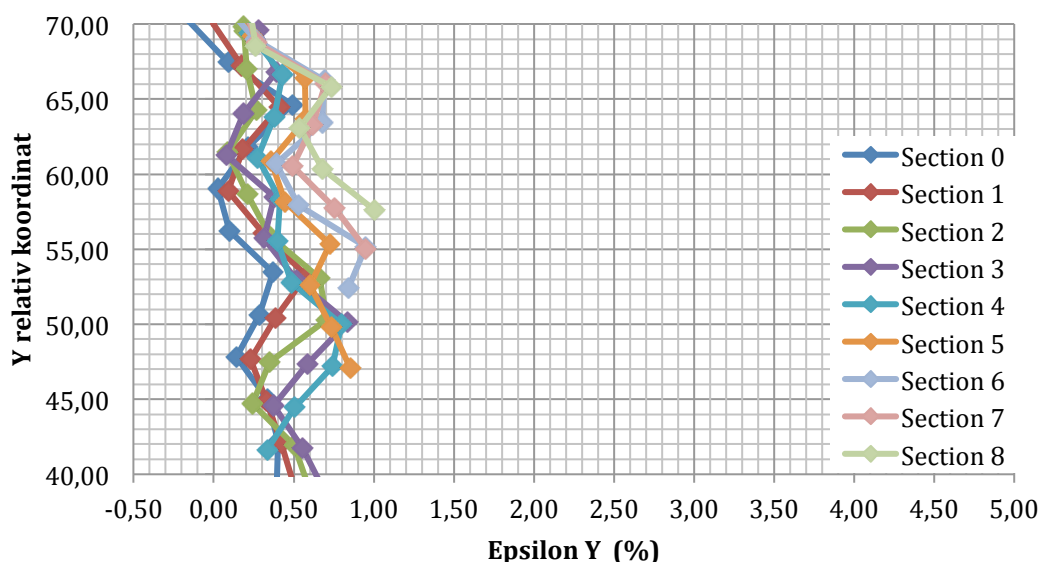
BMS-170-9

Før Bjelkeskjøt mellom venstre opplager og utsparing.
Kvist i nedre lamelle midt under punktlast.

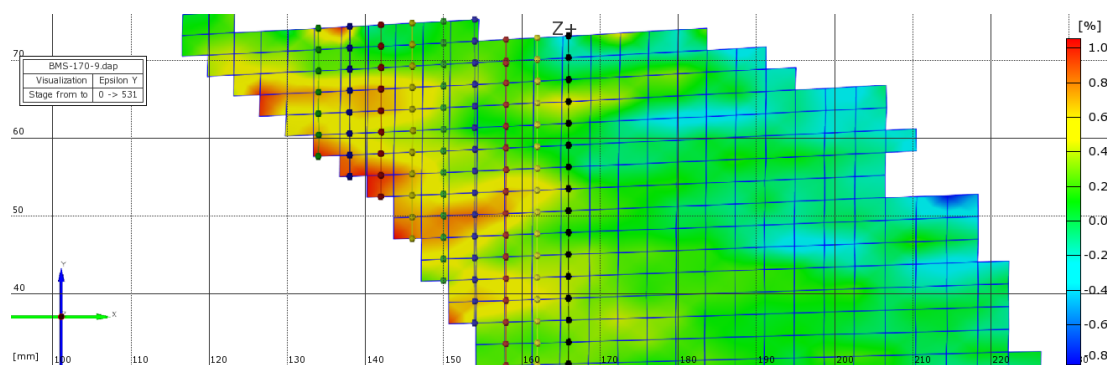
Under Knaking rundt utsparing ved 8 [kN].
Sprekk i Ø.H og N.V område ved 13,9 [kN].

Etter Delvis strekkbrudd under utsparing og sprekk som gikk fra N.V hjørne og bort til bjelkeskjøt.
De to nedre lamellene røyk i bjelkeskjøten ved 15 [kN].

I dette forsøket oppstår det ingen synlige sprekker før Stage 551, like før kollaps. I området der sprekken oppstår, oppe til høyre rundt 50° fra sentrum, har tøyningene tidligere ligget på i underkant av 1,0 % (Figur 87).

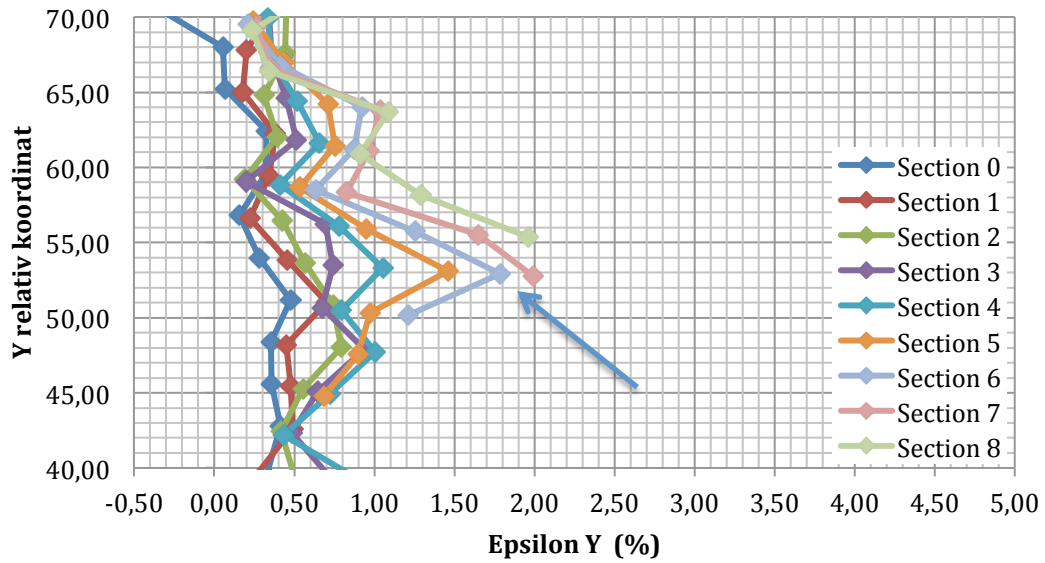


Figur 87: Stage 531, Tøyninger

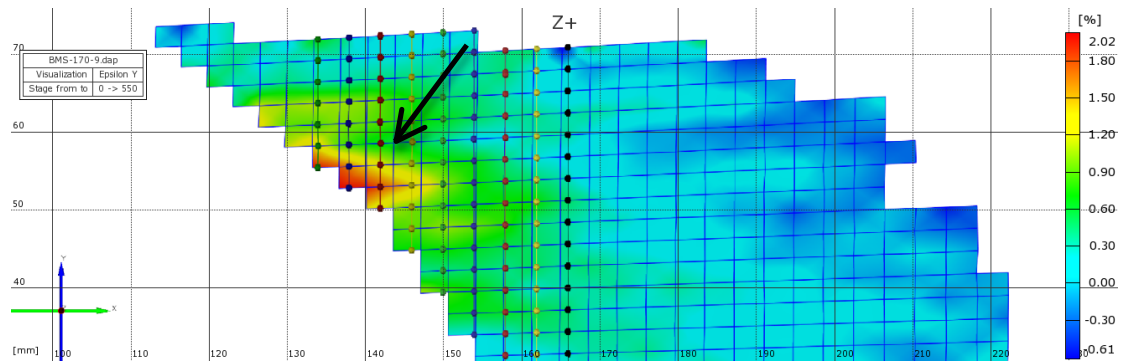


Figur 88: Stage 531, Aramis

Mellom Stage 531 og 550 øker tøyningene i Section 5-8 til 1,5-2,0 % (Figur 89).

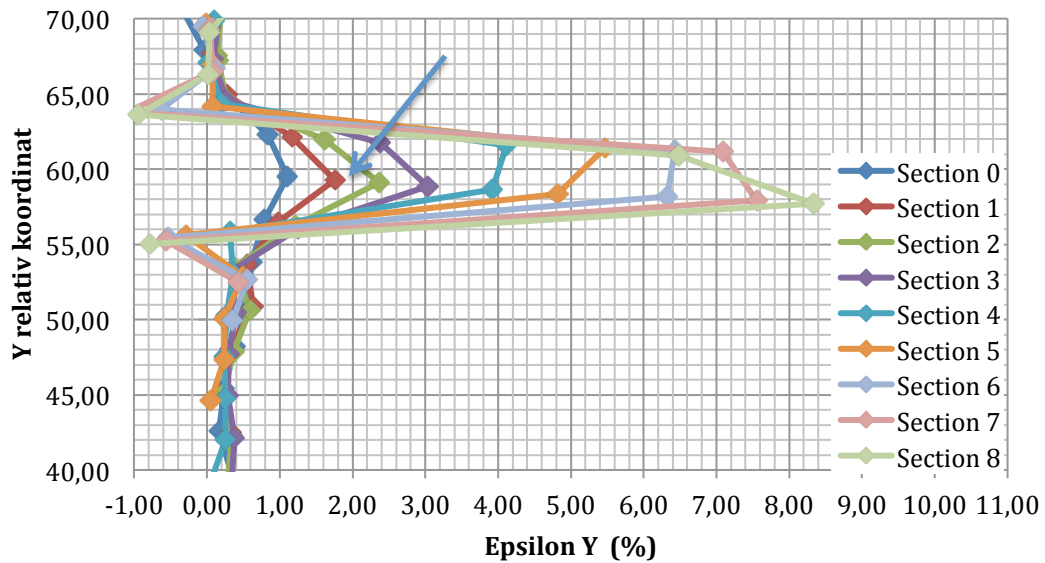


Figur 89: Stage 550, Tøyninger

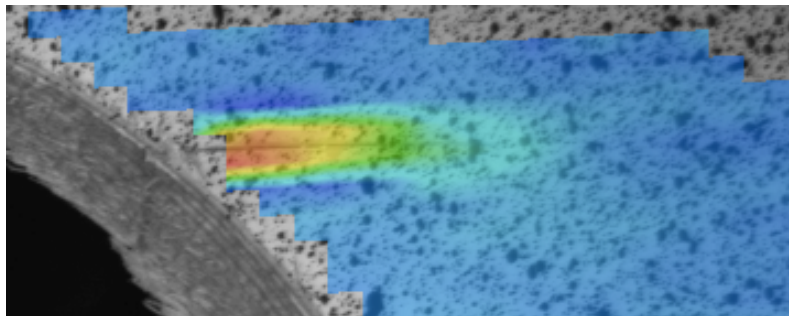


Figur 90: Stage 550, Aramis

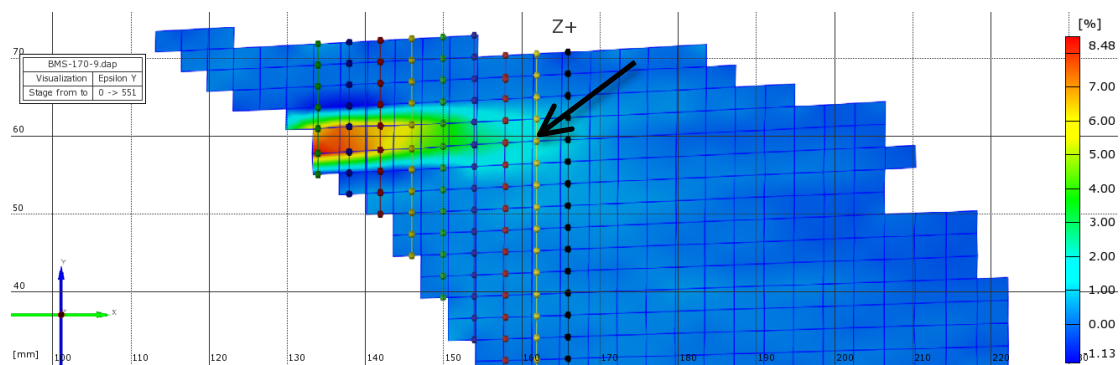
Så oppstår det ved Stage 551 en sprek, ikke der tøyningene har opparbeidet seg, men rett i overkant. Og sprekken går helt til Section 1, med en tøyning på rundt 1,8 % (Figur 91). Ved Section 0 er tøyningen på 1,0 %, men her er det ikke sprukket opp.



Figur 91: Stage 551, Tøyninger

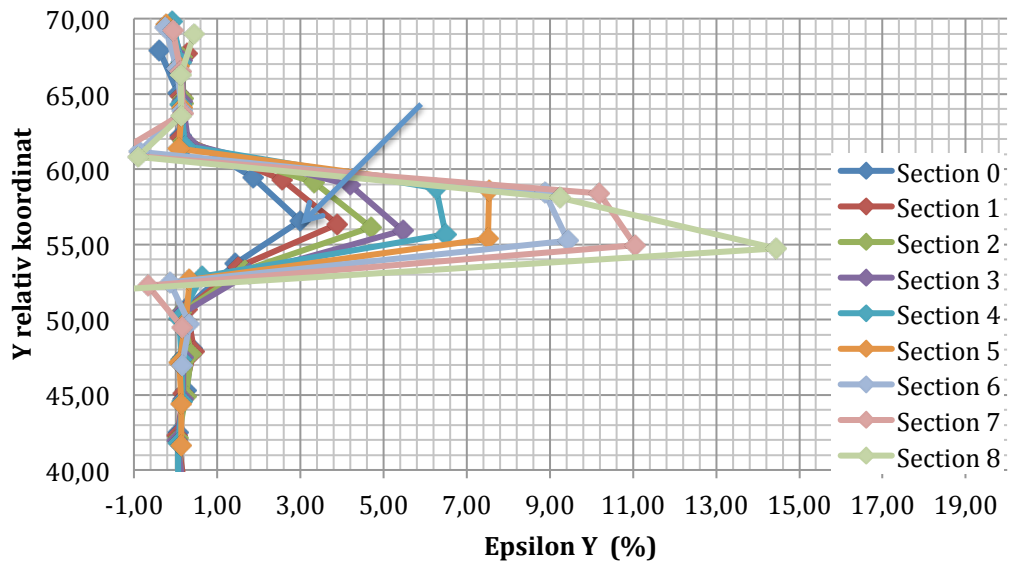


Figur 92: Stage 551, Sprekk

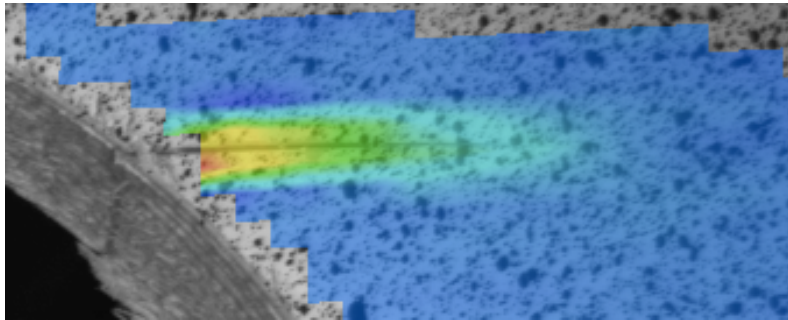


Figur 93: Stage 551, Aramis

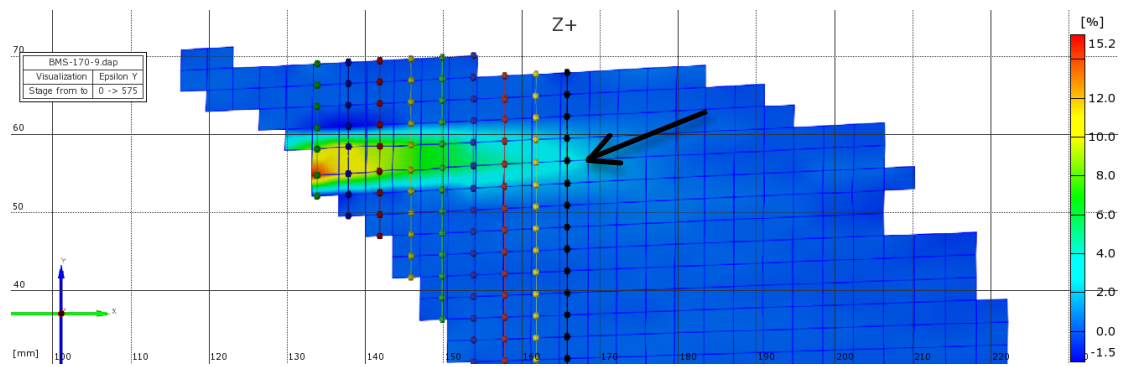
Tøyningene forsetter å øke fram mot kollaps. Sprekken utvider seg, men jobber seg ikke lenger inn i treet enn til ca. skruelassering (ca. ved Section 0). Ved Stage 575 ligger sprekk-tuppen ved Section 0 med tøyning på 3,0 %, (figur 94). Dette er store nok tøyninger til at det kan sprekke ut, så skruen motvirker dette.



Figur 94: Stage 575, Tøyninger



Figur 95: Stage 575, Sprekk



Figur 96: Stage 575, Aramis

Ved kollaps, Stage 576, sprekker det ut i overkant og underkant av utsparingen, altså ikke i de allerede oppståtte sprekkene. Skruene stiver av bjelken.

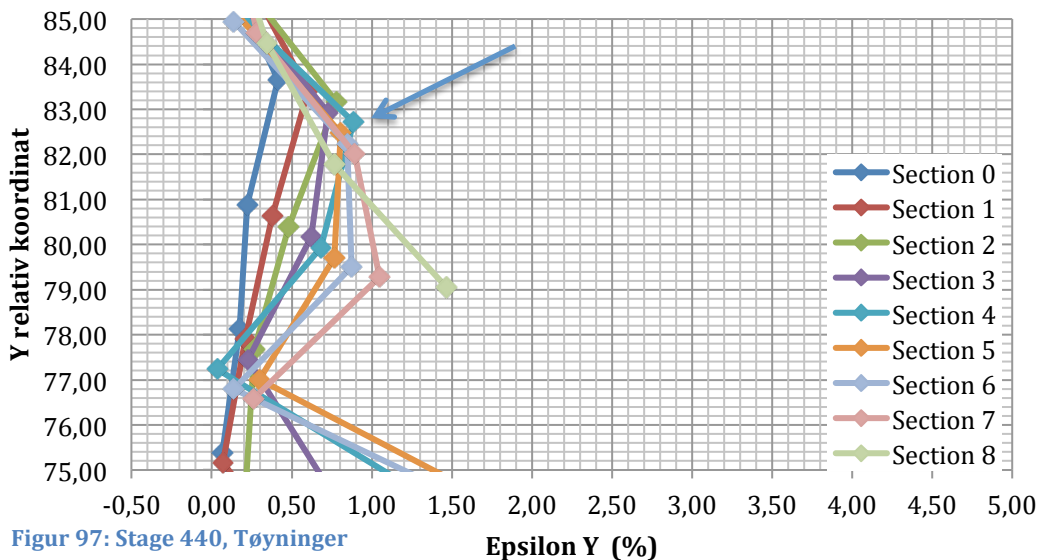
BMS-170-11

Før Lamelleskjøt i øvre lamelle rett over utsparing.
Glip imellom lamellene i Ø.H område i utsparing.
Nedre lamelle er skjøtt litt til høyre under punktlast.

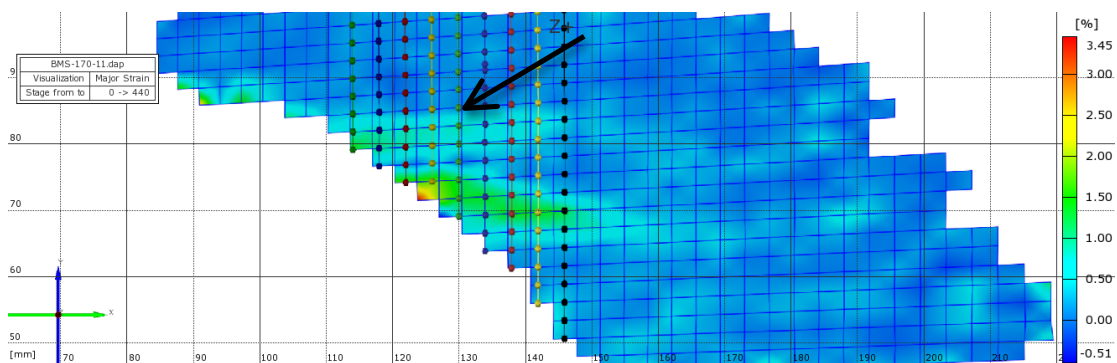
Under Liten sprekk i Ø.H område i utsparing ved 13,8 [kN].
Store sprekker i Ø.H og N.V område i utsparing ved 15,05 [kN].
Sprekkene på begge sider stoppet ved skruene.

Etter Bjelken vippta mellom avstivingene ved 15,6 [kN].
Det så ut som om bjelken hadde gitt seg "litt skjevt" i kontaktpunkt med sylindren.

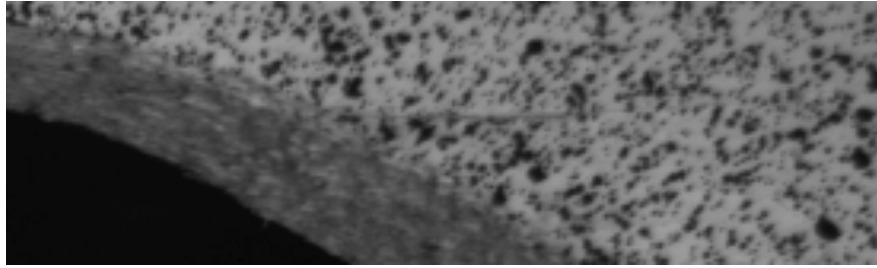
I dette forsøket oppstår det en større sprekk oppe til høyre, rundt 70 grader fra sentrum, og to litt mindre rett i underkant av denne. Velger å fokusere på den største, og denne utvikler seg fra en allerede eksisterende smal sprekk på rundt 1,2 cm, i området Section 5-8. Tøyningene har lenge ligget under 1 %, men fra rundt Stage 400 begynner de å øke. Sprekktuppen ligger mellom Section 4-5, og har en tøyning på rundt 0,8 % ved Stage 440 (Figur 97).



Figur 97: Stage 440, Tøyninger

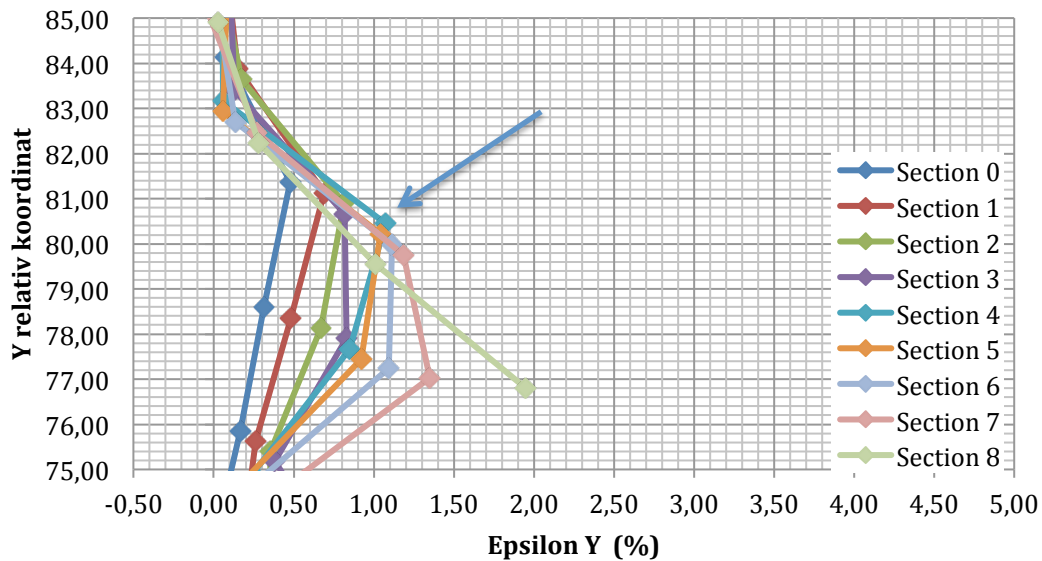


Figur 98: Stage 440, Aramis



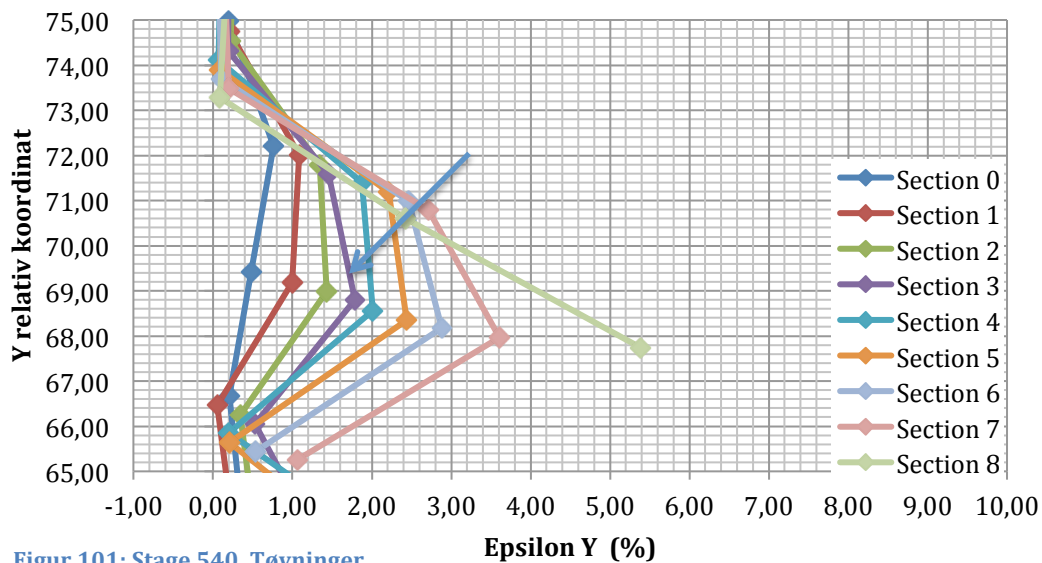
Figur 99: Stage 440, Sprekk

Ved Stage 460 er sprekken uforandret, men tøyningene ved sprekktuppen har økt til rundt 1,0 % (Figur 100).

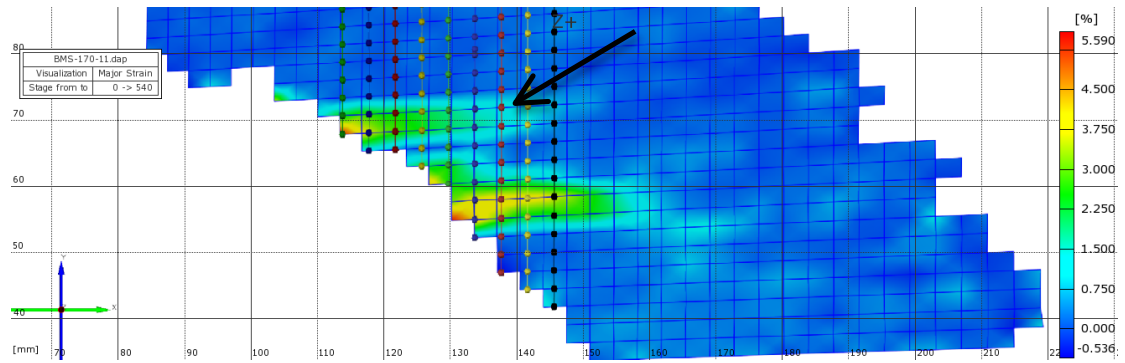


Figur 100: Stage 460, Tøyninger

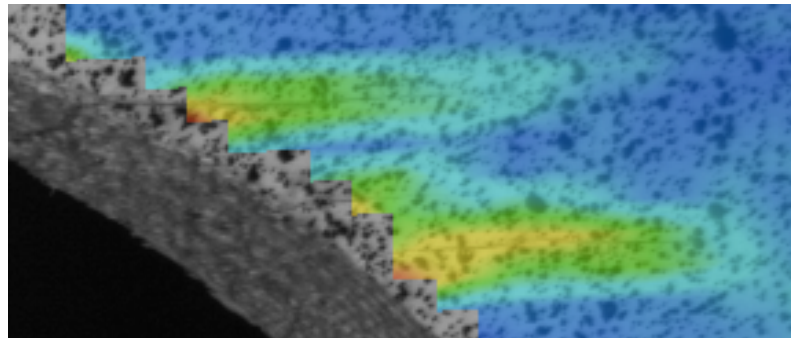
Ved Stage 480 er tøyningene ved Section 4-5 på 1,3 %, og sprekktuppen har flyttet seg til Section 3, med tøyning på 1 %. Ved Stage 540, er tøyningen ved Section 3 økt til 1,8 %, og sprekktuppen har flyttet seg til Section 2, der tøyningen er på 1,4 % (Figur 101). Sprekkdannelse også i underkant.



Figur 101: Stage 540, Tøyninger

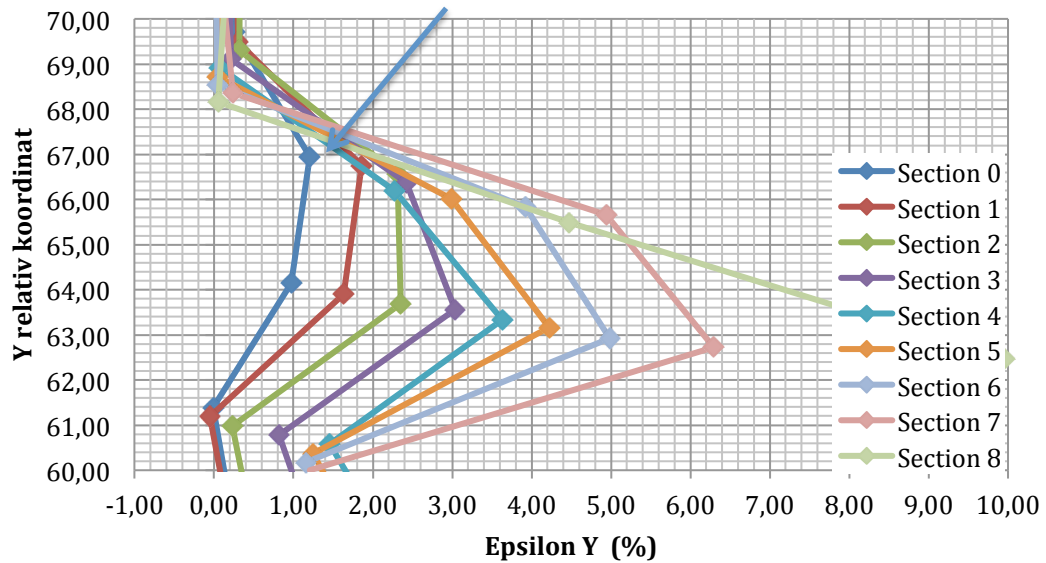


Figur 102: Stage 540, Aramis

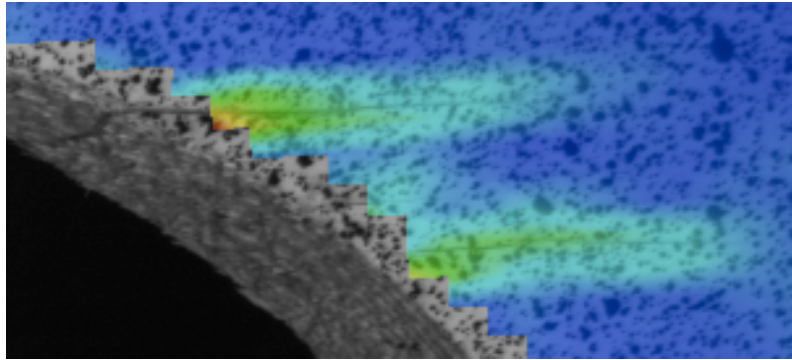


Figur 103: Stage 540, Sprekk

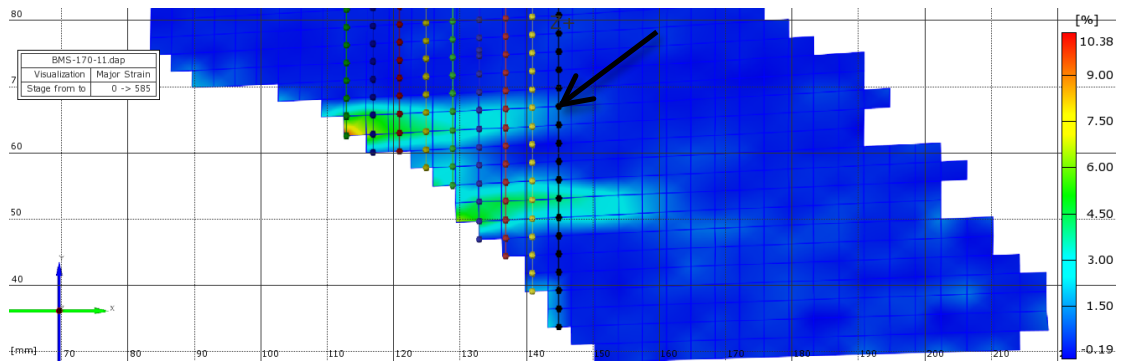
Ved Stage 570 er tøyningen ved Section 2 økt til 1,9 %, og sprekketuppen er flyttet til Section 1, med tøyning på 1,5 %. Ved Stage 585 har sprekketuppen forflyttet seg til mellom Section 0-1, med en tøyning på 1,2-1,8 % (Figur 104), og ved Stage 586 sprekker det plutselig opp (Figur 107).



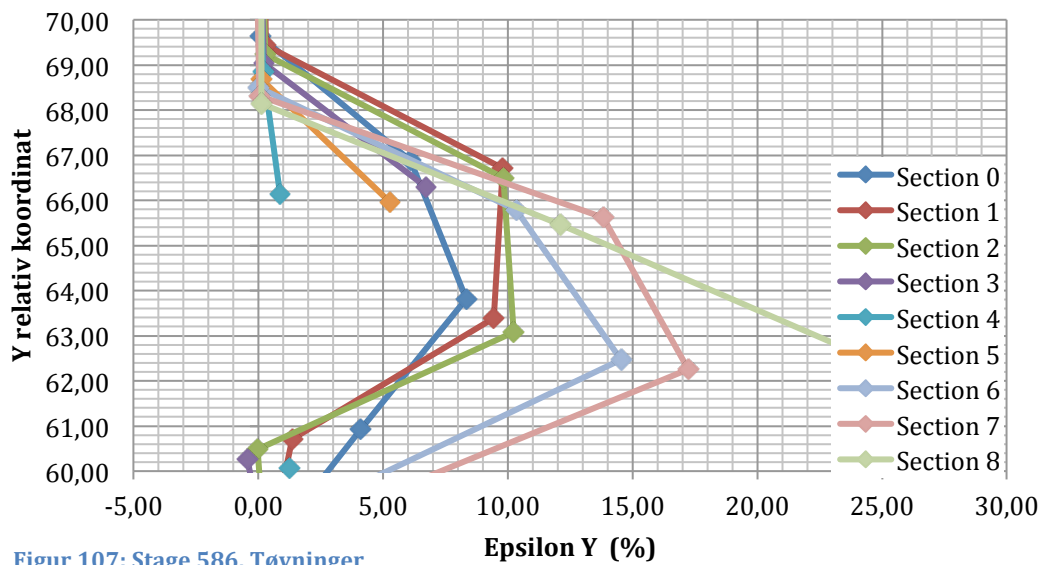
Figur 104: Stage 585, Tøyninger



Figur 105: Stage 585, Sprekk

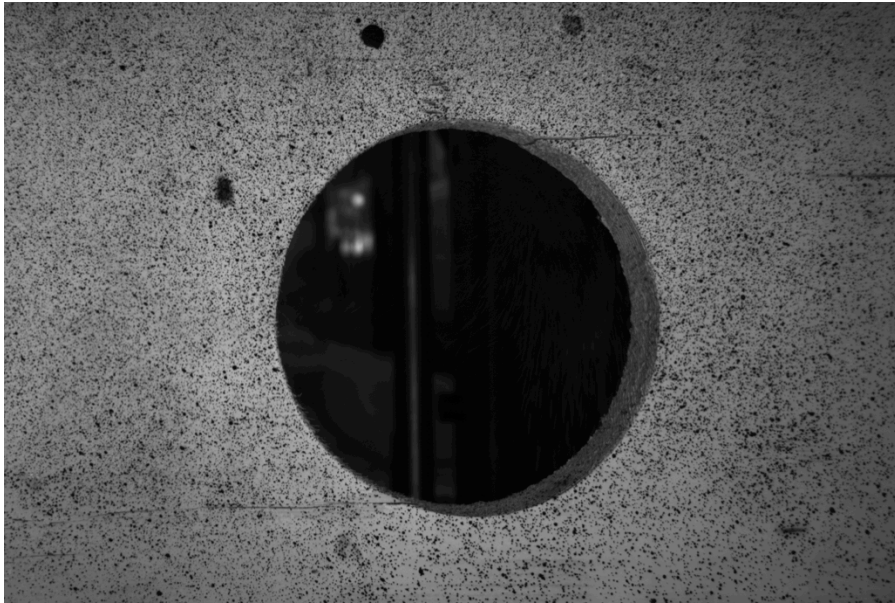


Figur 106: Stage 585, Aramis



Figur 107: Stage 586, Tøyninger

Sprekken stopper ved skrueplasseringen. Sprekken blir ikke lenger enn dette, og bjelken vipper til slutt i stedet for å kollapse.



Figur 108: Stage 586, Sprekk

Det er ganske tydelig at det må til en tøyning på et sted mellom 1,2-1,8 % for at det skal sprekke opp, og at skruene stopper sprekkenes utvikling. Dette er tilsvarende de andre forsøkene.

7.2 Observasjoner fra forsøkene

- Sprekk oppstår og vokser på grunn av tøyningkonsentrasjoner i et område øker til et visst maks punkt.
- Klar tendens til at en sprekk utvikler seg når tøyningene rett ved sprekketopp øker til mellom 1,3-1,8 % (= 1,5 %)
- Sprekkutviklingen skjer hovedsakelig oppe til høyre og nede til venstre for utsparing, i en vinkel 40-70° fra sentrum av utsparing. Snittet i forsøkene var på 53°.
- Tøyningene er merkbart større rett ved sprekketopp enn innover i treet. Det ble i observert fall på rundt 0,5 % mellom sprekketopp og neste Section, dvs. innenfor 4 mm, før det flater ut.
- Tøyningene fordeler seg tilnærmet lineært langs en sprekk, og øker og fordeler seg jevnt etter hvert som sprekken utvikler seg.
- Det er tydelig at skruene gir treet økt styrke og kapasitet. Sprekkene stoppet i all hovedsak ved skrueplasseringen, ofte også ved kollaps.
- Tøyningene konsentrerer seg lettere rundt defekter og allerede eksisterende sprekker. Sprekker utvikler seg ofte med utgangspunkt i disse, noe som er naturlig siden dette er svake punkt i området.
- Ved kollaps sprekker det ikke alltid ut ved oppståtte sprekker, svakeste punkt er gjerne andre plasser.

7.3 Nye forsøk

Det ble valgt å gjøre nye forsøk der skruel plasseringen var 45° i forhold til fiberretningen, med en avstand på $2d$ og $0,5d$ fra utsparing (Figur 18). Dette fordi det erfaringsmessig [1, 2, 3] oppstår flest sprekker i området $40-60^\circ$ (i forhold til senter utsparing). 45° er også en vinkel som er praktisk å forholde seg til. Tidligere er gjort forsøk med skruvinkel på 30° og 60° [2], og det ble derfor interessant å gjøre nye forsøk med skruvinkel på 45° . Ulik distanse fra utsparing, for å se om det har noe effekt.

Det var i utgangspunktet tenkt å plassere 4 skruer rundt utsparingen. 2 i overkant og 2 i underkant, slik at alle sidene rundt utsparingen ble dekket. Dette for at bjelken ikke skulle få en "toppside". Det er kritisk at bjelken blir montert riktig vei hvis bjelken kun er forsterket med 2 skruer. Blir dette feil vil skruene ha tilnærmet null effekt. På grunn av spenningsvariasjonene rundt en utsparing (Figur 4), må man sørge for at skruene plasseres i strekksonene.

Det viste seg likevel å bli vanskelig å montere 4 skruer skikkelig. Skruene måtte krysses og derfor plasseres lenger ut mot kanten. Dette resulterte i at skruene veldig lett ble skrudd inn litt skjevt og bøyde ut av bjelken. Det ble derfor valgt å benytte kun 2 skruer, som i tidligere forsøk. Med bedre utstyr og teknikk, vil kanskje 4 skruer være å foretrekke, og bør testes.

Det ble utført 10 forsøk med skruel plassering $2d$ og 10 forsøk med skruel plassering $0,5d$ (Tabell 3 og 4).

Et utvalg av disse forsøkene blir grundigere analysert i Kap. 7.4. Fyldigere oppsummering av alle forsøkene og analysen blir presentert i Kap. 7.5. Notater fra alle forsøkene ligger vedlagt (Vedlegg II)

Kommentarer til tabellene:

Antar standardmål på bjelkene, da variasjonen var ubetydelig.

De to første forsøkene, BMS,45-170-1 og BMS,45-170-2, ble testforsøk for å tilpasse riggen. Disse begynte å vippe, slik at forsøkene ble midlertidig stanset for å utbedre. Tvinger ble montert på avstivningene, samtidig som avstivningene ble plassert nærmere midten (ca. $\frac{1}{3}$ -delspunkt).

BMS,45°-170-2d-serien

(Bjelke – Moment – Skrudd, 45° ift. fiberretning – 170mm utsparing – 2d kantavstand)

Tabell 3: BMS,45-170-2d

| Navn | Vekt [KG] | Rel. Fukt [%] | Fukt [%] | Temp. [°C] | Bjelke­dimensjon [mm] | | | Kapasi­tet [kN] | Bruddform |
|---------------|--------------|---------------------|-------------|---------------|--------------------------|-----------|-------------|--------------------|-----------------------------------|
| | | | | | h | b | l | | |
| BMS,45-170-1 | 20,93 | 60 | 12,7 | 20 | 300 | 36 | 4200 | 16,0 | Strekk U.K. (lamelle) |
| BMS,45-170-2 | 21,06 | 60 | 11,9 | 20 | 300 | 36 | 4200 | 21,0 | Strekk U.K. (lamelle) |
| BMS,45-170-3 | 21,77 | 60 | 11,8 | 20 | 300 | 36 | 4200 | 17,8 | Strekk i U.K |
| BMS,45-170-4 | 20,92 | 60 | 12,5 | 20 | 300 | 36 | 4200 | 16,0 | Strekk H (bjelkeskjøt) |
| BMS,45-170-5 | 20,66 | 60 | 11,8 | 20 | 300 | 36 | 4200 | 19,6 | Trykk O.K. |
| BMS,45-170-6 | 21,62 | 60 | 12,6 | 20 | 300 | 36 | 4200 | 13,3 | Strekk H(bjelkeskjøt) |
| BMS,45-170-13 | 21,14 | 60 | 11,8 | 20 | 300 | 36 | 4200 | 19,0 | Utbøyning O.K. (ingen kollaps) |
| BMS,45-170-14 | 20,43 | 60 | 11,9 | 20 | 300 | 36 | 4200 | 19,0 | Utbøyning O.K. => Strekk U.K. |
| BMS,45-170-15 | 20,52 | 60 | 11,5 | 20 | 300 | 36 | 4200 | 19,0 | Utbøyning O.K. (ingen kollaps) |
| BMS,45-170-16 | 21,93 | 60 | 12,5 | 20 | 300 | 36 | 4200 | 21,6 | Utbøyning O.K. => Strekk U.K. |
| Snitt | 21,1 | 60 | 12,1 | 20 | 300 | 36 | 4200 | 18,2 | |

BMS,45°-170-0,5d-serien

(Bjelke – Moment – Skrudd, 45° ift. fiberretning – 170mm utsparing – 0,5d kantavstand)

Tabell 4: BMS,45-170-0,5d

| Navn | Vekt [kg] | Rel. Fukt [%] | Fukt [%] | Temp. [°C] | Bjelkedimensjon [mm] | | | Kapasitet [kN] | Bruddform |
|---------------|--------------|---------------|-------------|------------|----------------------|-----------|-------------|----------------|-----------------------------------|
| | | | | | h | b | l | | |
| BMS,45-170-7 | 21,28 | 60 | 12,2 | 20 | 300 | 36 | 4200 | 19,0 | Utbøyning O.K. => Strekk U.K. |
| BMS,45-170-8 | 21,60 | 60 | 13,0 | 20 | 300 | 36 | 4200 | 15,5 | Strekk U.K. (lamelle) |
| BMS,45-170-9 | 21,43 | 60 | 12,5 | 20 | 300 | 36 | 4200 | 15,6 | Strekk U.K. + bjelkeskjøt |
| BMS,45-170-10 | 20,82 | 60 | 11,8 | 20 | 300 | 36 | 4200 | 20,5 | Utbøyning O.K. => Strekk U.K. |
| BMS,45-170-11 | 19,80 | 60 | 11,8 | 20 | 300 | 36 | 4200 | 20,0 | Strekk U.K. (lamelle) |
| BMS,45-170-12 | 20,68 | 60 | 11,8 | 20 | 300 | 36 | 4200 | 21,0 | Strekk H (lamelle) |
| BMS,45-170-17 | 21,55 | 60 | 14,0 | 20 | 300 | 36 | 4200 | 16,0 | Utbøyning O.K. (ingen kollaps) |
| BMS,45-170-18 | 21,70 | 60 | 12,0 | 20 | 300 | 36 | 4200 | 19,0 | Utbøyning O.K. (ingen kollaps) |
| BMS,45-170-19 | 20,68 | 60 | 11,9 | 20 | 300 | 36 | 4200 | 16,0 | Utbøyning O.K. => Strekk U.K. |
| BMS,45-170-20 | 21,25 | 60 | 11,8 | 20 | 300 | 36 | 4200 | 18,0 | Utbøyning O.K. => Strekk U.K. |
| Snitt | 21,08 | 60 | 12,3 | 20 | 300 | 36 | 4200 | 18,1 | |

Tabellene viser at snittet i de to testforsøkene er påfallende like. Bruddformen er også omtrent det samme for alle forsøkene, og særlig de siste forsøkene i hver testserie oppførte seg veldig likt. Her ble bruddform 3 observert (figur 8).

Snittet for makslast er på 18,2 kN. Dette er litt under kapasiteten til en bjelke uten utsparing, men er tilsvarende andre forsøk med skruer plassert i en vinkel mindre enn 90° (Tabell 5) [1, 2]:

Tabell 5: Sammenligning av makslast med tidligere forsøk

| | | |
|----------------------------------|-------------------|----------------|
| Uten utsparing | B | 22,9 kN |
| Med utsparing, Skruer 90° | BMS-170 | 16,7 kN |
| Med utsparing, Skruer 60° | BMS,60-170 | 18,2 kN |
| Med utsparing: Skruer 30° | BMS,30-170 | 18,8 kN |
| Med utsparing: Skruer 45° | BMS,45-170 | 18,2 kN |

Valg av bjelker til analyse

De mest interessante forsøkene er de siste i hver serie, da disse luker ut mye prøving, feiling og tilpasning. Dette vil gi best grunnlag for en analyse. Disse forsøkene hadde også lik bruddform, med utbøyning på topp før evt. strekkbrudd i bunn, noe som vil være ytterst interessant å analysere.

Velger derfor å gå dypere inn på de tre siste forsøkene som ble utført i hver av de to testseriene:

2d:

BMS,45-170-14

BMS,45-170-15

BMS,45-170-16

0,5d

BMS,45-170-18

BMS,45-170-19

BMS,45-170-20

7.4 Analyse av BMS,45-170

Hvert forsøk blir presentert hver for seg. Underveis gjøres det noen sammenligninger, før det tilslutt kommer en oppsummering. Notater fra forsøkene innleder hvert forsøk, for å få et mer helhetlig bilde av forsøkene før, under og etter synlig oppsprekking. På grunn av endret bruddmode blir det ikke like aktuelt å analysere tøyningsendringer i Y-retning. Utbøyning og medfølgende oppsprekking skjer ut av planet (Z-retning), og oppsprekkingen skjer ofte ganske momentant. Det vil derfor for hvert forsøk hovedsakelig presenteres diagrammer som viser forskyvninger i Z-retning. I tillegg går bruddforløpet stegvis igjennom, m/tøyningsanalyse der det eventuelt er relevant.

BMS,45-170-14

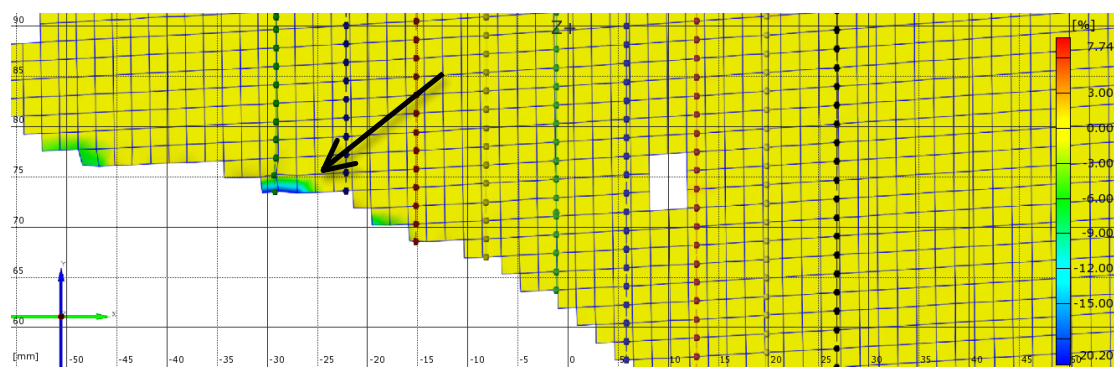
*Før Kvist: Ø.V.
Lamelleskjøt: O.K. + Ø.H. + H
Høyre skrue stikker litt ut på enden*

*Under Knaking mellom 10-17 kN
Bøyer ut i topp ved 19 kN (ca. Stage 400)
Sprekker opp O.K. + Ø.H. pga. utbøyningen (Stage 427)
Sprekken utvider seg mye ved Stage 450.
Lasten synker og stabiliserer seg på rundt 13 kN*

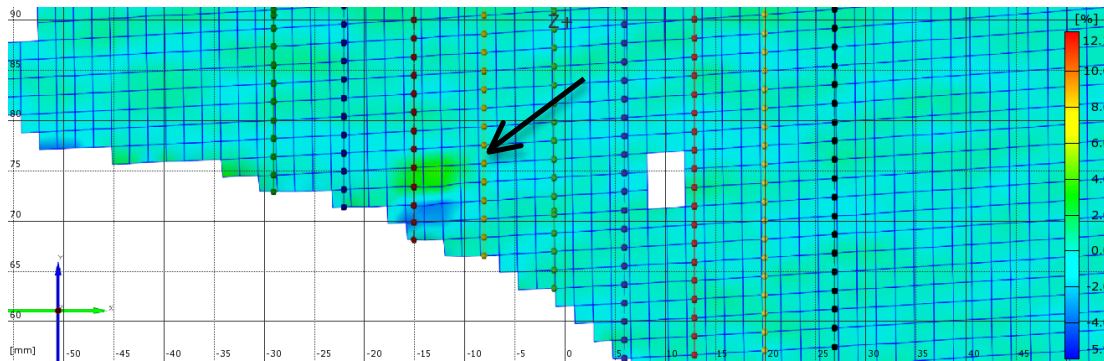
*Etter Kollaps ved 13 kN (Stage 518)
Strekkbrudd U.K. nedre lameller
Sprekk fra U.K. utsparing og ned til bunn
Sprekk Ø.V. mot venstre langs øvre lamelle.*

I dette forsøket holder bjelken seg stabil fram til ca. Stage 400. Ingen betydelige tøyningsendringer, men har en nedbøyning på ca. 30 mm. Bjelken begynner her å bøye litt ut i toppen, i området rundt skrueplasseringen.

Samtidig begynner tøyningene å endre seg. Det oppstår tøyninger ved kanten av utsparingen Ø.H. ved Section 8, på rundt -5,0 % (trykk). Ved stage 425 går denne tøyningen plutselig til -20,0 % (Figur 109). Ved Stage 426 er det trykket plutselig borte, men ved Section 6 oppstår det to soner over hverandre med trykk og strekk (-3 % til + 3 %). Strekk i overkant (Figur 110).

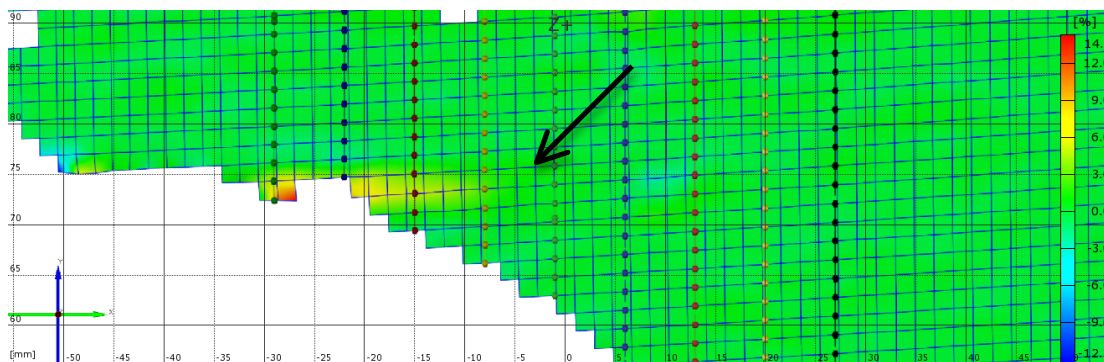


Figur 109: Stage 425, Aramis, Tøyninger

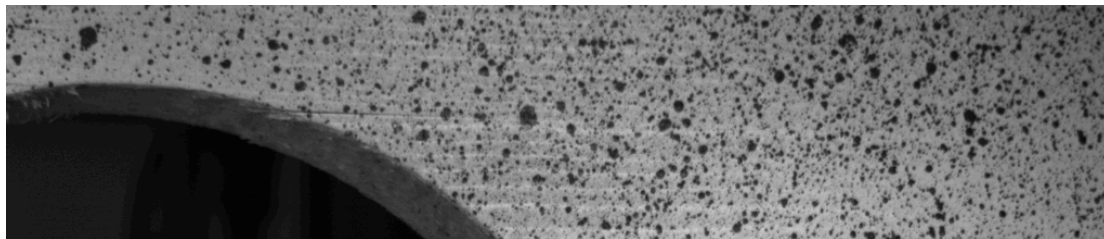


Figur 110: Stage 426, Aramis, Tøyninger

Ved Stage 427 oppstår det en liten sprekk, som strekker seg til nærmere Section 4 (Figur 111). Tøyning ved sprekketopp er på ca. 1,3 %.

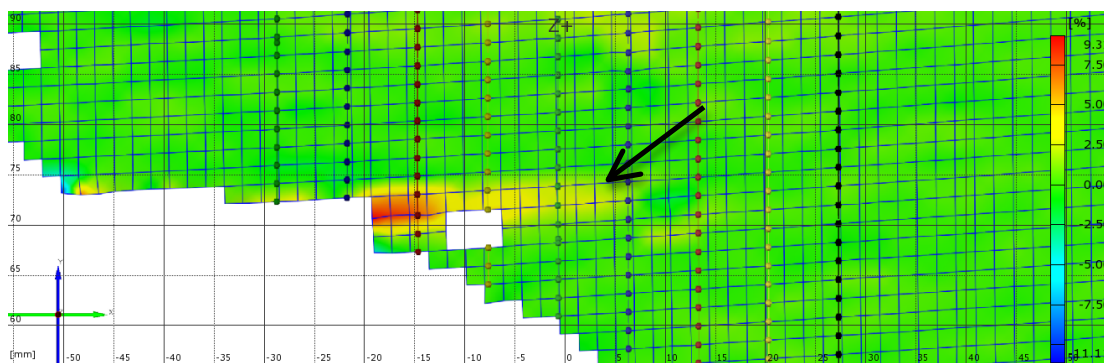


Figur 111: Stage 427, Aramis, Tøyninger



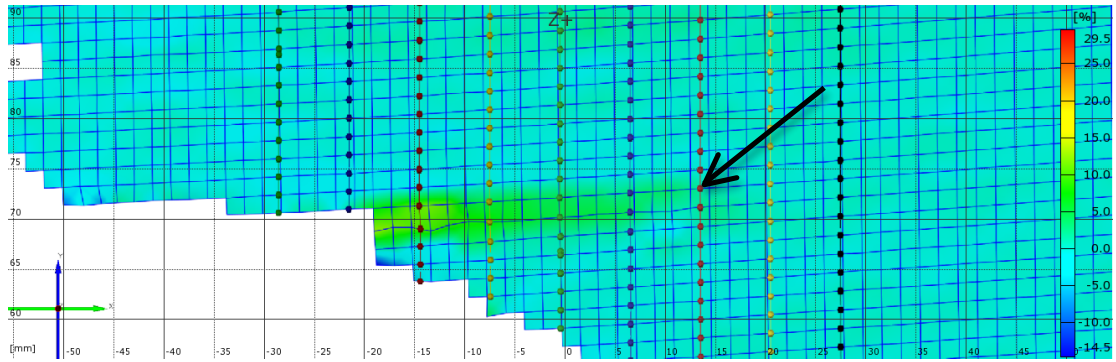
Figur 112: Stage 427, Sprekk

Ved Stage 437 er sprekketoppen vokst seg til mellom Section 3-4, med en tøyning på 1,5-2,0 % (Figur 113), før den i neste Stage sprekker bort til Section 2. Tøyningen ved sprekketoppen er her 1,3 %.



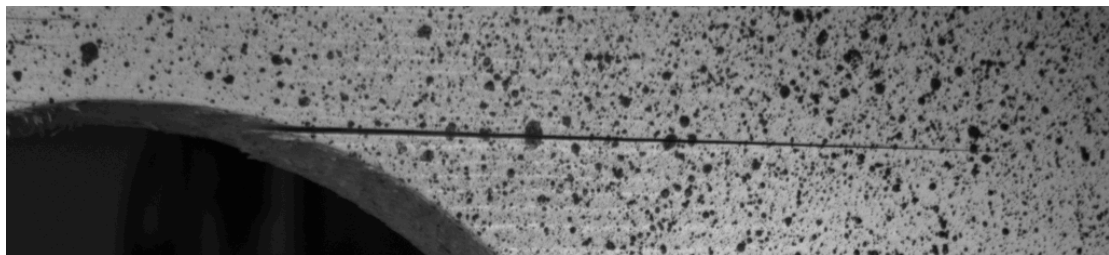
Figur 113: Stage 437, Aramis, Tøyninger

Mellom Stage 445-447 er tøyningen ved sprekketoppen, Section 2 økt til mellom 1,7-2,0 % (Figur 114), og sprekker så opp ved Stage 448.



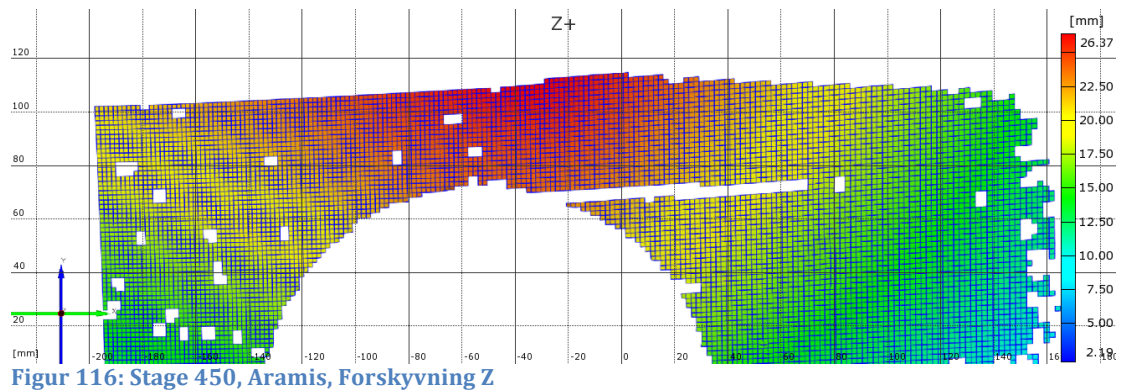
Figur 114: Stage 447, Aramis, Tøyninger

Sprekktuppen forflytter seg til Section 1 og ligger på 1,7-1,8 % til Stage 450, der sprekken ca. doubler lengden (Figur 115).



Figur 115: Stage 450, Sprekk

Bjelken er stabil, men har en utbøyning på 26 mm (Figur 116 og 117). Sprekken er heller ikke gjennomgående, den sprekker ut i planet.

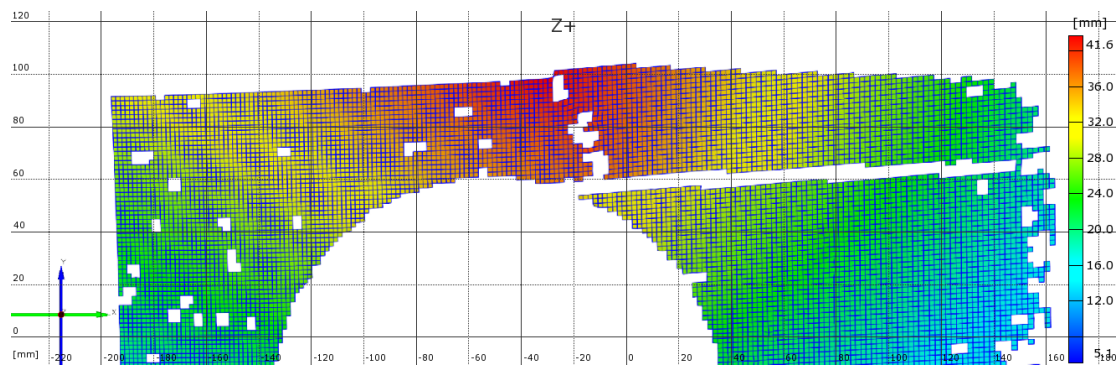


Figur 116: Stage 450, Aramis, Forskyvning Z



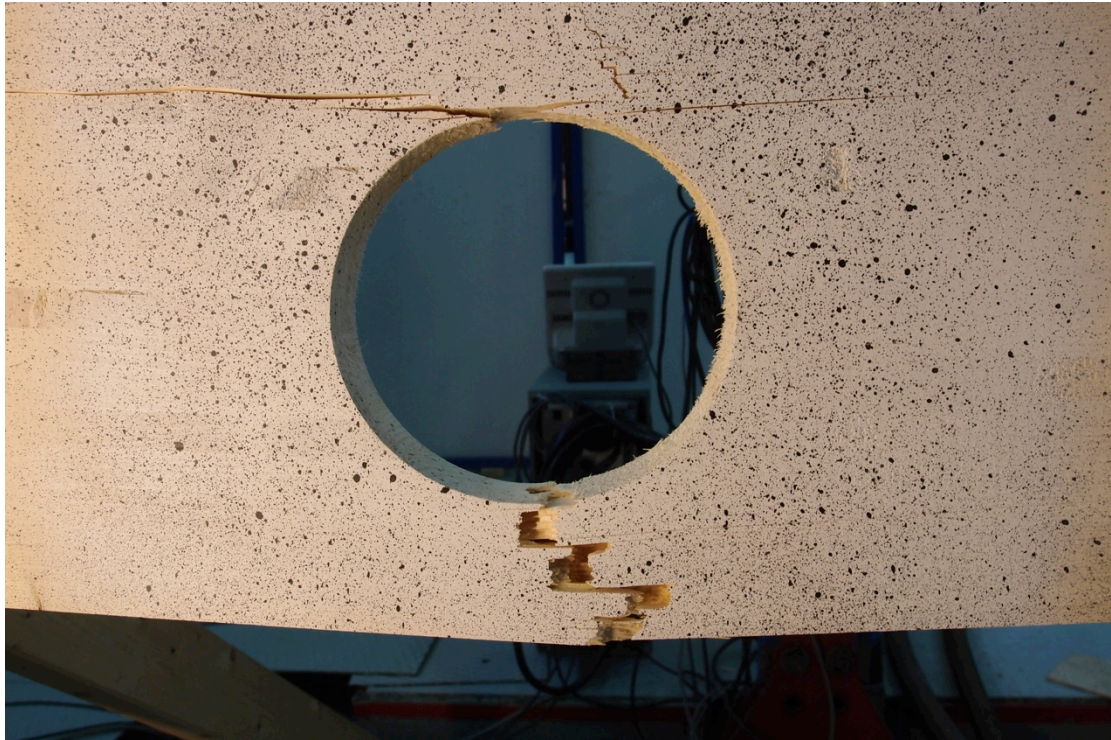
Figur 117: Lokal utbøyning av bjelke

Ved Stage 461 sprekker det opp i overkant, ca. langs skruel plassering. Bjelken knekker utover i de øvre lamellene og danner en ca. loddrett knekk. Denne utbøyningen fortsetter, lokalt rundt skruen, og ved Stage 517 er den på 41,6 mm (Figur 118).



Figur 118: Stage 517, Aramis, Forskyvning Z

Kollaps ved Stage 518, med strekkbrudd i U.K., ved skruel plassering og med ny sprekk Ø.V (Figur 119).



Figur 119: Stage 518, Kollaps

Tøyningsbildet ved utvidelse av sprekk stemmer godt overens med analysen av bjelkene med skruer plassert 90 grader, BMS-170. Tøyninger ved sprekketopp er på 1,5-2,0 % rett før videre sprekkdannelse.

BMS,45-170-15

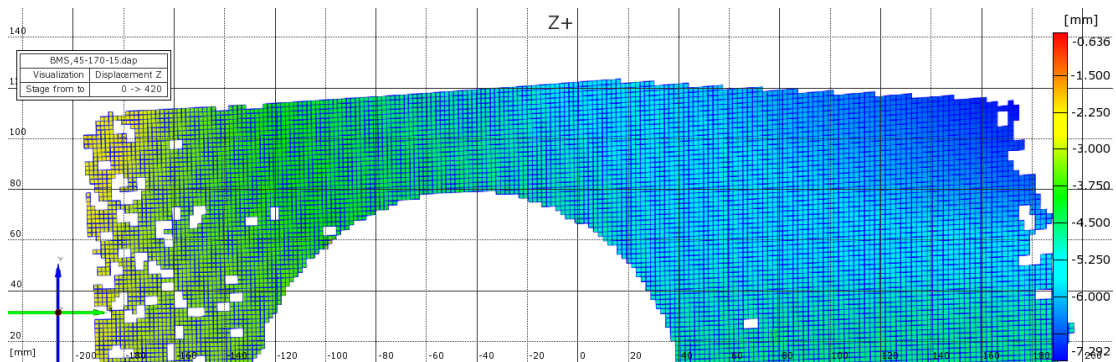
*Før Kvist: V
Lamelleskjøt: V + N.H. + Ø.H.*

*Under Knaking ved 9 kN + 16 kN
Liten sprekk N.V (Stage 375)
Bøyer ut i topp ved 19 kN (Stage 420)
Last synker ned til 14-16 kN
Oppsprekking langs øvre lamelle (ved skrueplassering)*

*Etter Ingen kollaps
Sprekk Ø.V. mot venstre langs lamelle (Stage 519)
Sprekk på overside av bjelke, via skrue*

Dette forsøket viser effekten av skrueforsterkningen godt. Her oppstår det kun en liten smal og ikke gjennomgående sprekk N.V. som strekker seg kun et par cm, bort til skruen. Ingen betydelige tøyningsendringer ellers (i Y-retning), og dermed ingen flere sprekker basert på bruddmode 1 (se figur 8).

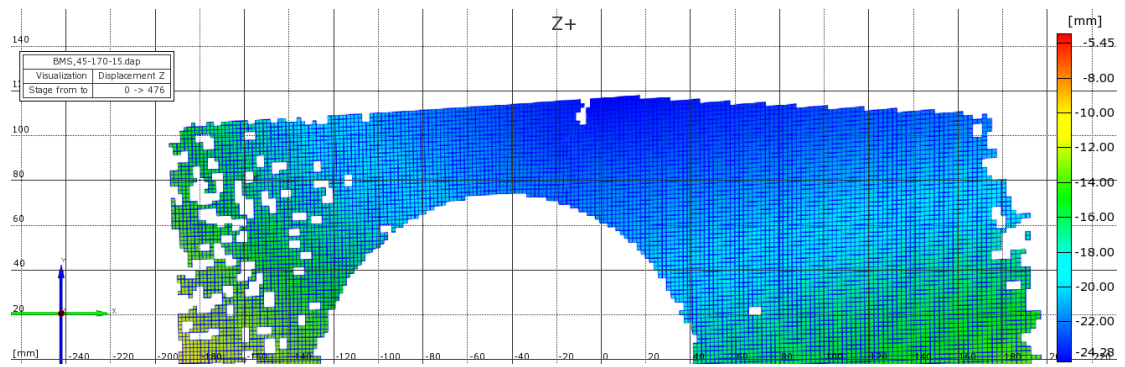
Bjelken holder seg stabil fram til ca. Stage 400. Ingen sprekkdannelse eller nevneverdige tøyningsendringer. Bjelken begynner å bøye ut litt lokalt i toppen, litt til høyre for utsparingen. Fram til Stage 420 øker utbøyningen fra ca. 3 mm til ca. 7 mm (Figur 120). Hele bunnen har en utbøyning på 2-3 mm til sammenligning.



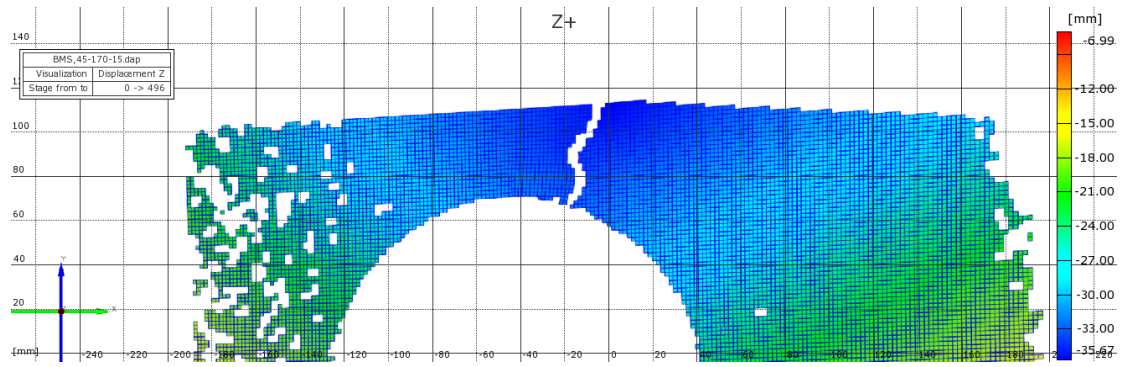
Figur 120: Stage 420, Aramis, Forskyvning Z

Denne utbøyningen fortsetter, og ved Stage 470 er den økt til 17,5 mm (ca. 4 mm i bunn). Dette, i tillegg til en nedbøyning på ca. 40 mm ved Stage 471, resulterer i at det i overkant av utsparingen begynner å knekke ut på baksiden, og samtidig bøyes innover på forsiden. Denne utbøyde knekken går fra rundt skrueplasseringen i toppen av bjelken og ned til utsparingen, og utvider seg gjennom resten av forsøket.

Mellom Stage 476-496 ser man tydelig utviklingen. Utbøyningen går fra 24 mm til 36 mm, og knekken går fra bjelketopp og ned til utsparing (Figur 121-124).



Figur 121: Stage 476, Aramis, Forskyvning Z



Figur 122: Stage 496, Aramis, Forskyvning Z

Her ser man tydelig den lokale utbøyningen og knekken, og oppsprekking på toppside av bjelken.

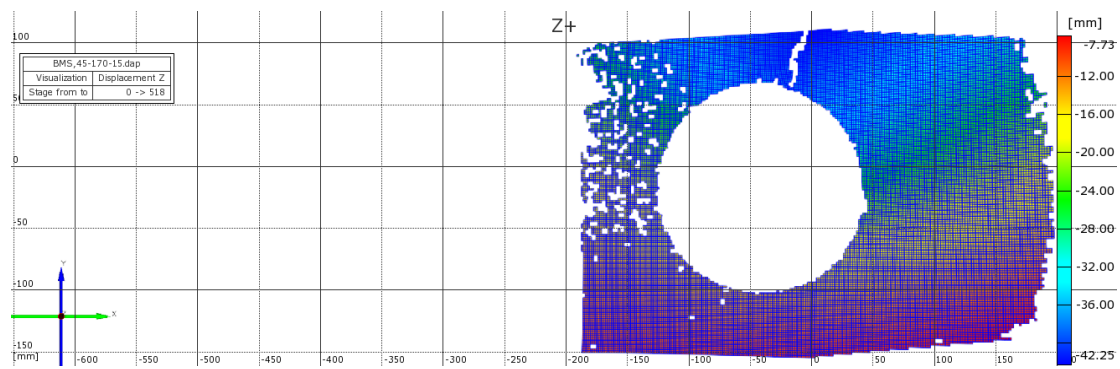


Figur 123: Lokal utbøyning av bjelke

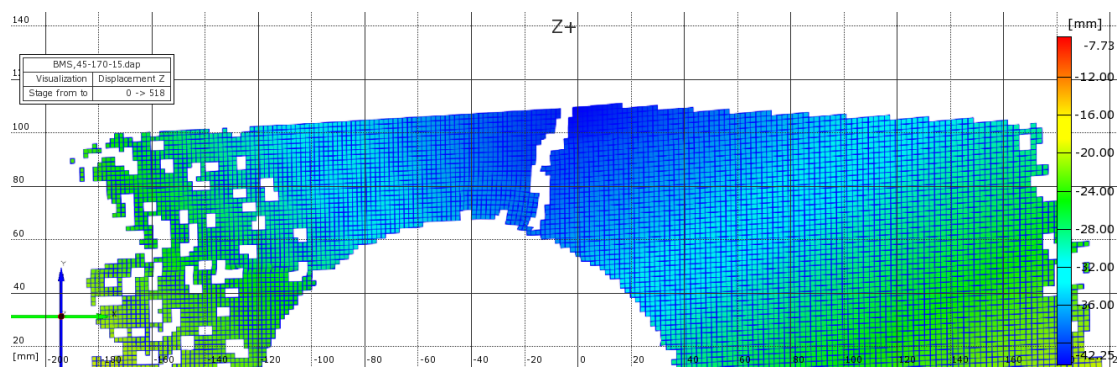


Figur 124: Lokal utbøyning av bjelke

Ved Stage 518 er utbøyningen på 42 mm lokalt i topp (ca. 8 mm i bunn). Til høyre og venstre for knekken (180 mm ifra) er utbøyningen på ca. 25 mm og i underkant av 10 mm langs hele bunnen (Figur 125 og 126). Ingen vipping av bjelken med andre ord.

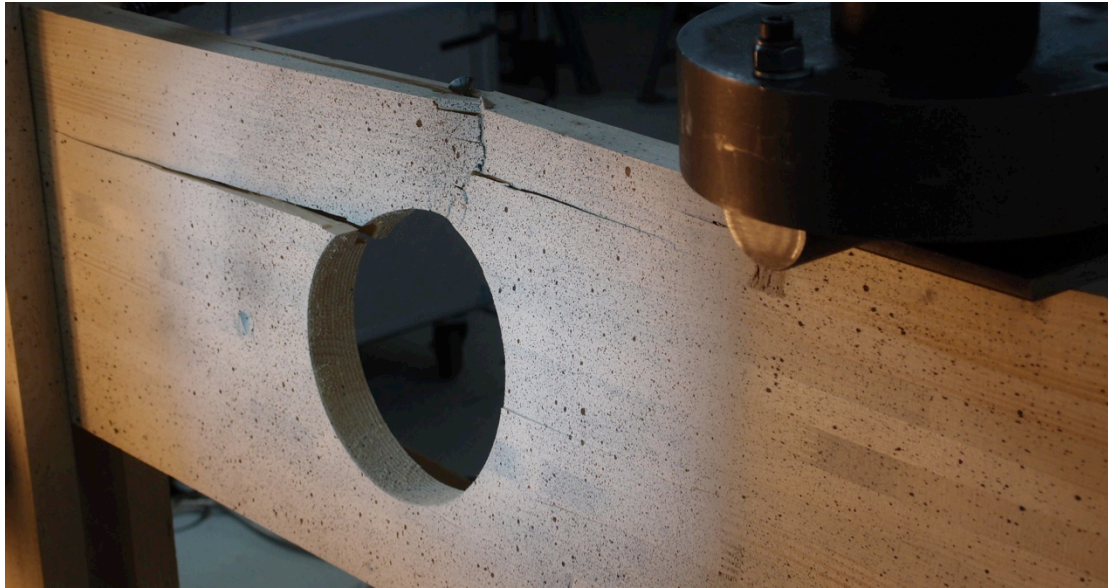


Figur 125: Stage 518, Aramis, Forskyvning Z



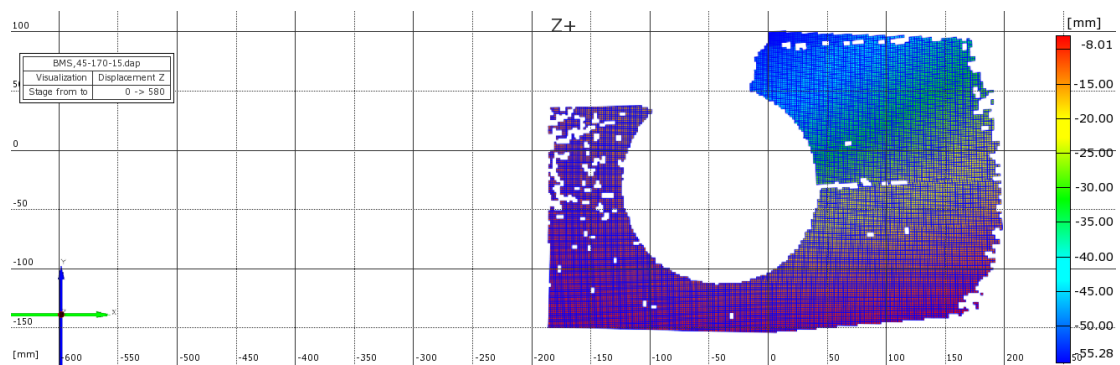
Figur 126: Stage 518, Aramis, Forskyvning Z

Som resultat av utbøyningen, oppstår det ved Stage 519 en større sprekke Ø.V. som knekker litt ut (Figur 127). Tydelig bruddmode 3.



Figur 127: Lokal utbøyning + sprekker

Forsøket ble avsluttet ved Stage 580 (før en evt. kollaps). Det var tydelig hva bruddformen var, og utbøyningen var på nærmere 60 mm i knekken i toppen (Figur 128).



Figur 128: Stage 580, Aramis, Forskyvning

Forsøket nådde en makslast på 19 kN før lasten sank gradvis etter hvert som utbøyningen utviklet seg. Skruene ga bjelken tydelig økt stivhet, da bjelken holdt seg stabil uten betydelige sprekker store deler av forsøket, og bjelken fikk en lokal utbøyning i stedet for å begynne å sprekke opp langs utsparingen.

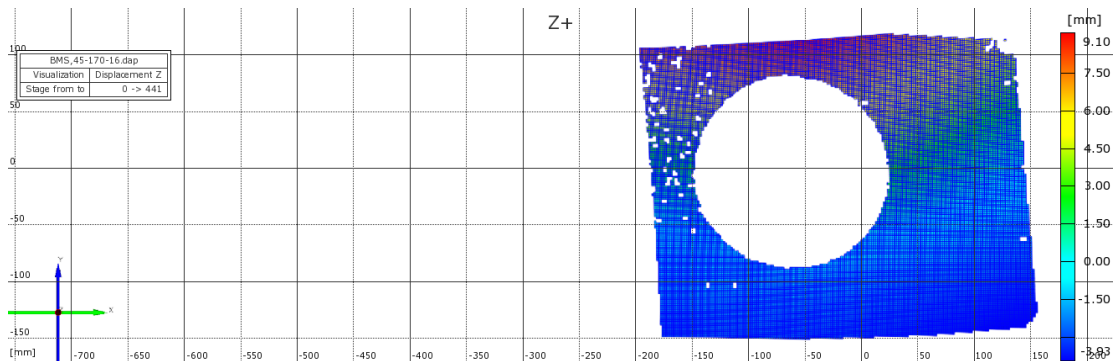
BMS,45-170-16

Før Kvist: N.V. + noen i nedre lamelle
Lammelleskjøt: N.H.
Bjelkeskjøt: høyre ende
Liten sprekk: Ø.H. (1 cm, ikke gjennomgående)

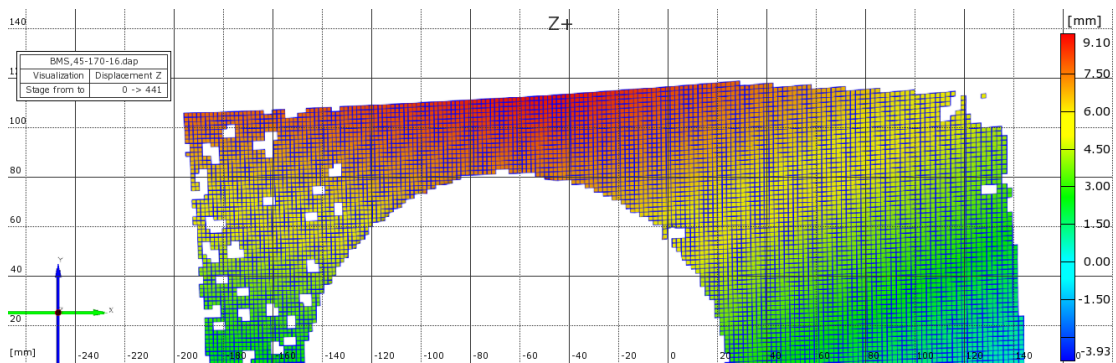
Under Knaking ved 10 kN (ellers lite)
Bøyer ut i topp ved 21,6 kN (Stage 441), ved skruel plassering
Sprekker opp Ø.H. (Stage 481)
Last synker ned til 16-17 kN
Liten smal sprekk V (Stage 494 + 514)

Etter Kollaps ved 11 kN (Stage 571)
Strekbrudd U.K. + N.H.
Sprekk i nedre lamelle, via lamelleskjøt N.H. ut mot høyre.

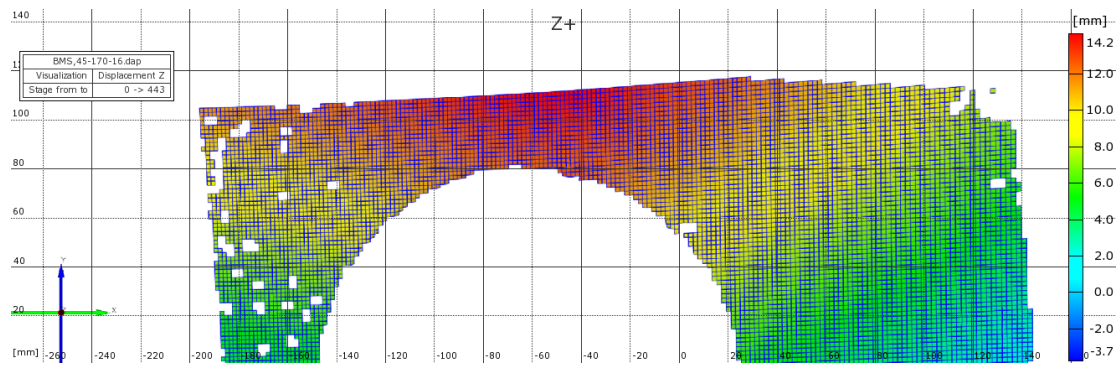
I dette forsøket holder bjelken seg stabil fram til ca. Stage 441. Ingen sprekkdannelse eller nevneverdige tøyingsendringer, men bjelken er nedbøyd ca. 35 mm på midten. Bjelken begynner å bøye ut i toppen, med et knekkpunkt i området ved skruel plasseringen (Figur 129 og 130). Utbøyningen går fra 9 mm i toppen av bjelken, som øker til 14 mm lokalt ved skruen ved Stage 443 (kun 2 steg etter) (Figur 131). Bunnen er konstant på -3 mm.



Figur 129: Stage 441, Aramis, Forskyvning Z

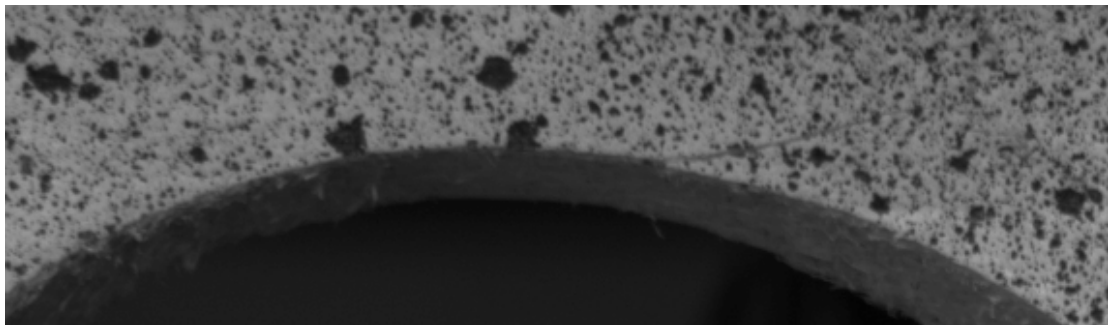


Figur 130: Stage 441, Aramis, Forskyvning Z



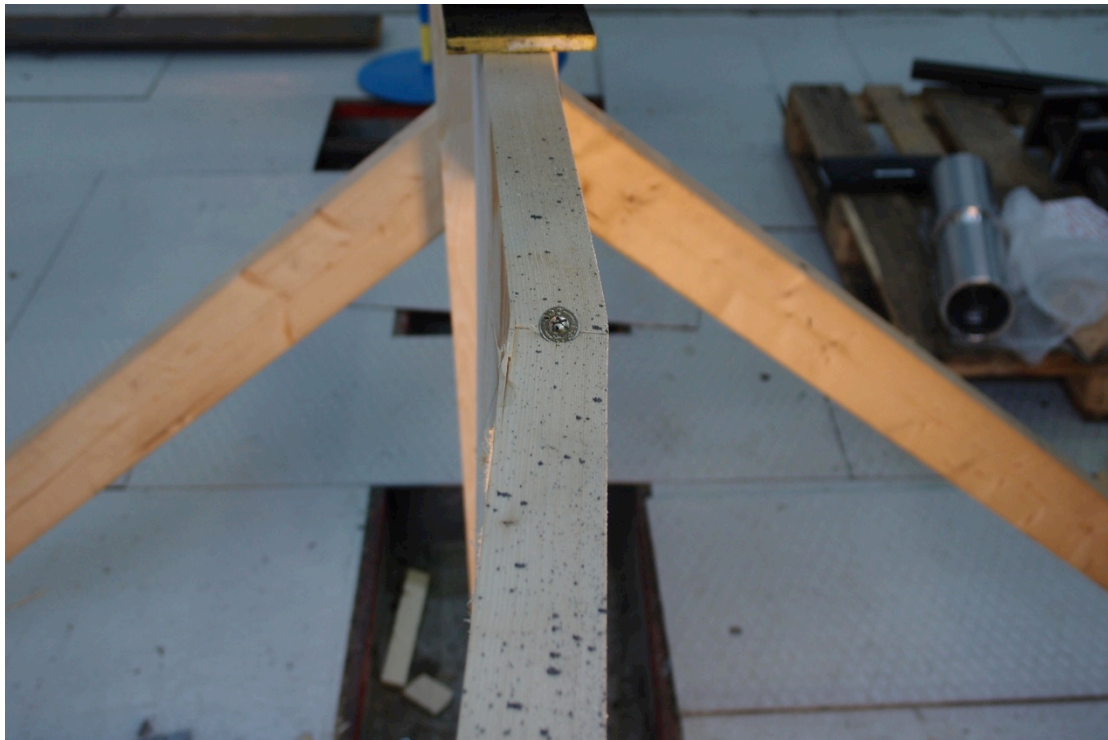
Figur 131: Stage 443, Aramis, Forskyvning Z

Det oppstår en liten smal sprekk \emptyset .H. på ca. 2 cm (Figur 132)



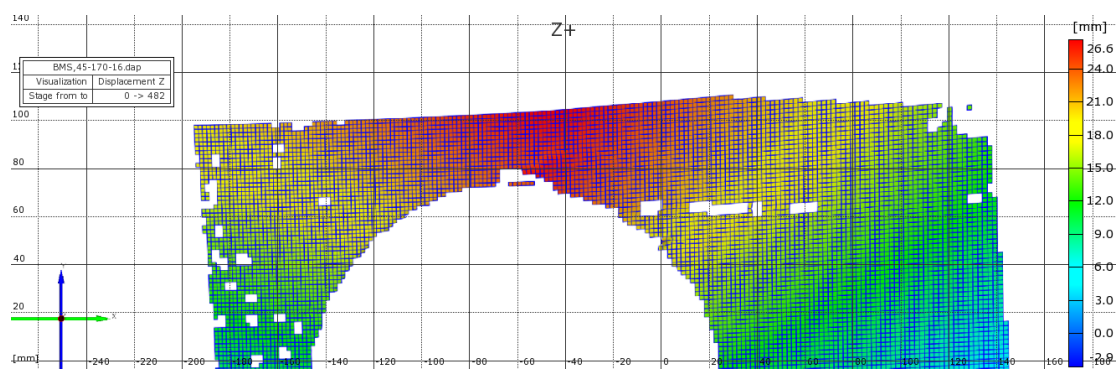
Figur 132: Stage 443, Sprekk

Utbøyningen fortsetter, og ved Stage 482 er den på 26,6 mm, mens bunnen fortsatt ligger på -3 mm (Figur 133-135).



Figur 133: Stage 482, Lokal utbøyning av bjelke

Det oppstår plutselig en lengre sprekk Ø.H., som oppstår pga. utbøyningen. Ingen betydelige tøyningssendringer å se i forkant av denne sprekkdannelsen (i Y-retning).

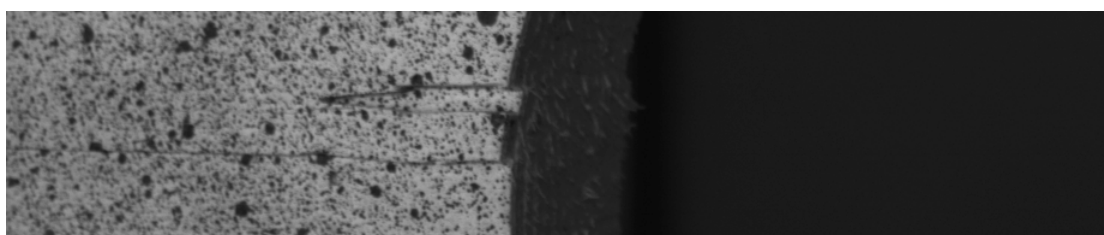


Figur 134: Stage 482, Aramis, Forskyvning



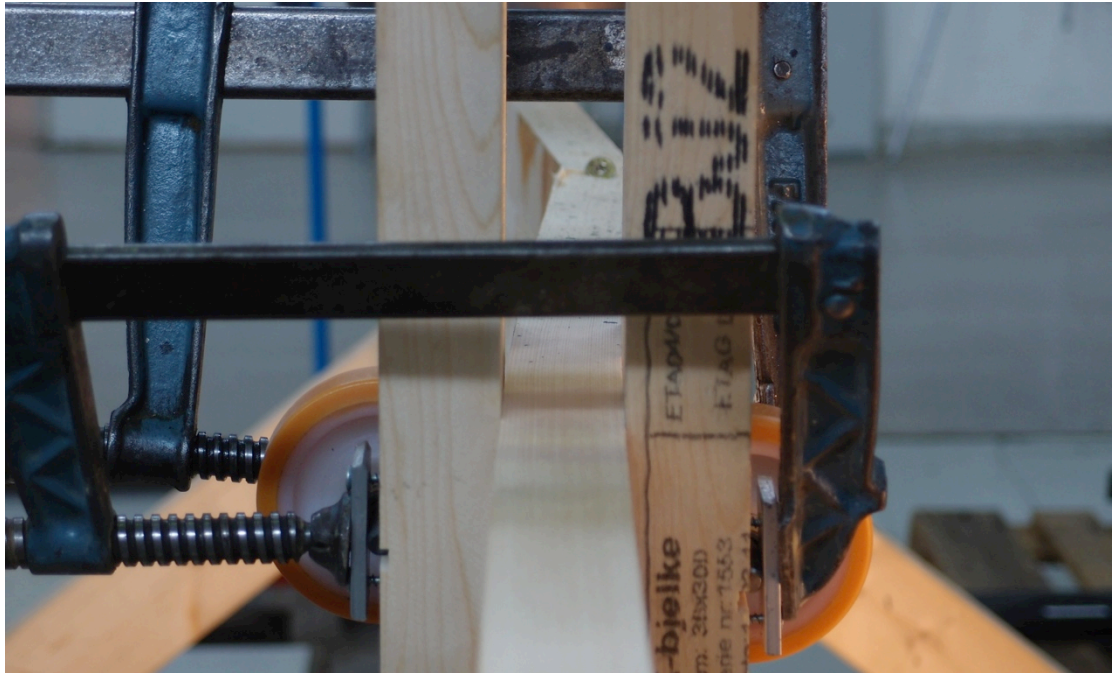
Figur 135: Stage 482, Sprekk

Ved Stage 494 oppstår det en liten smal sprekk V som utvides litt ved Stage 514. Denne oppstår som en konsekvens av utbøyningen og er ikke gjennomgående ("avskalling") (Figur 136).

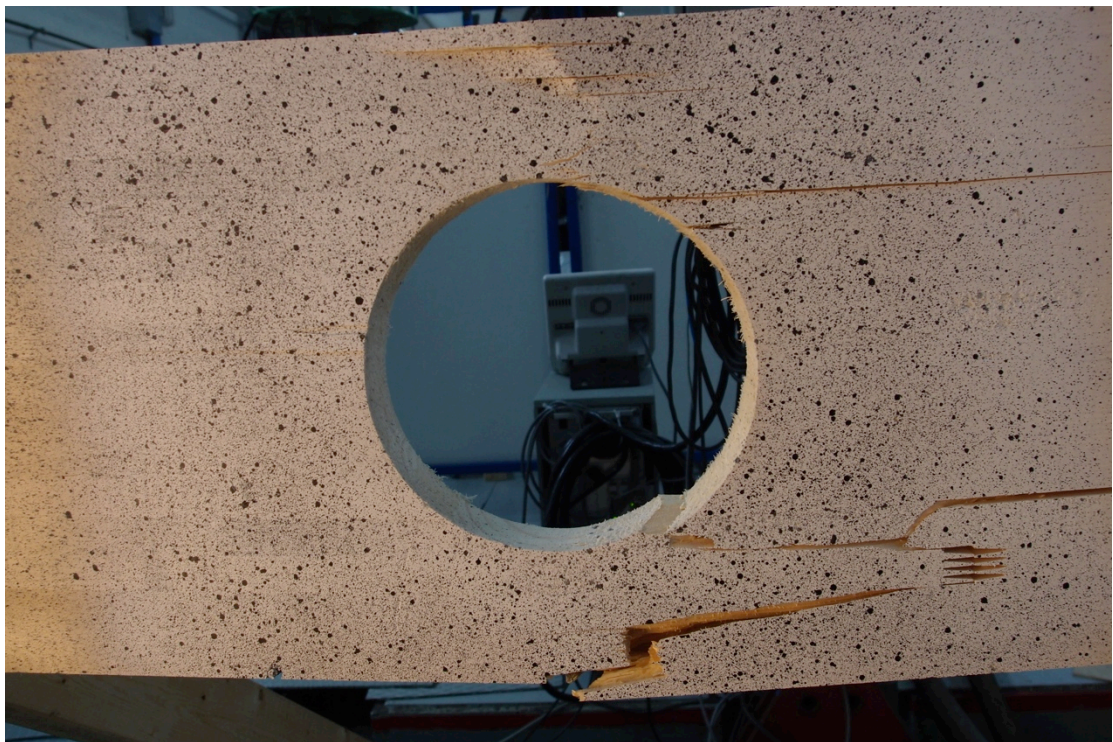


Figur 136: Stage 494, Sprekk

Ved Stage 570 er utbøyningen på ca. 40 mm (0 i bunn, og ca. 25 mm ved siden av knekkpunktet) (Figur 137). Så kollapser bjelken. Strekkbrudd i underkant i nedre lamelle N.H., med sprekk fra skruelasseringen og ut mot høyre via lamelleskjøt (Figur 138).



Figur 137: Stage 570, Maks lokal utbøyning



Figur 138: Kollaps

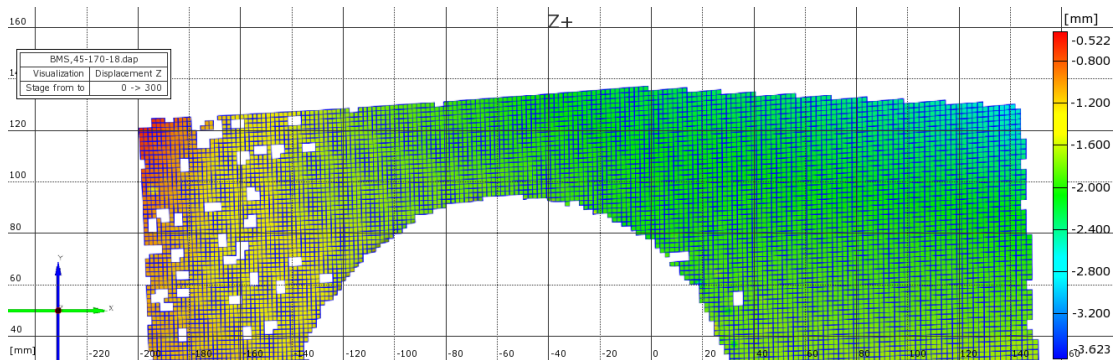
BMS,45-170-18

Før Kvist: Noen i nedre lamelle
Kvisthull: Ø.H.
Lammelleskjøt: $3 \times \text{Ø.H} + \text{Ø.V} + \text{N.H}$.

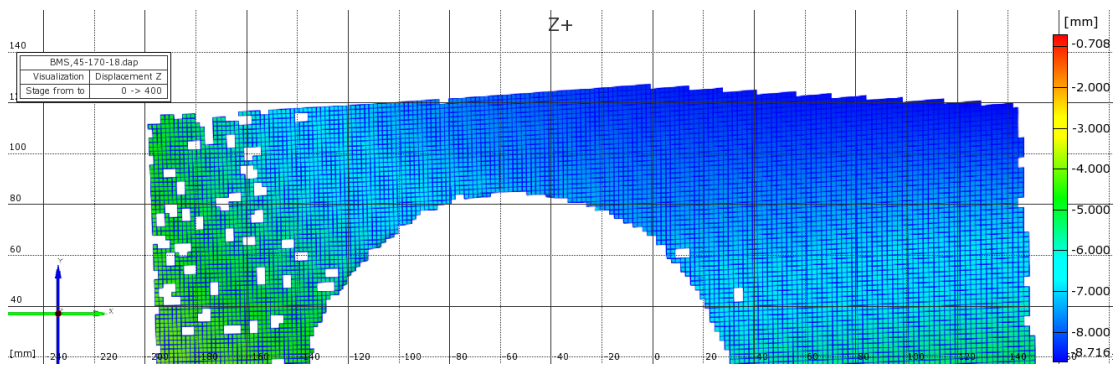
Under Knaking mellom 15-19 kN
Bøyer ut i topp ved 19 kN (Stage 400)
Små, smale sprekker Ø.H. (Stage 410)
Last synker
Mer oppsprekking Ø.H.
Sprekk V (Stage 521)
Sprekk N.H (Stage 647)

Etter Ingen kollaps

I dette forsøket holder bjelken seg stabil fram til ca. Stage 400. Ingen sprekkdannelse eller nevneverdige tøyningsemdringer, men bjelken er nedbøyd ca. 31 mm på midten. Bjelken begynner såvidt å bøye ut litt i toppen fra ca. Stage 300 (Figur 139), men dette er ikke synlig før Stage 400 (Figur 140 og 141), da det begynner å oppstå et knekkpunkt i området ved skrueplasseringen. Utbøyningen går fra ca. 3 mm langs toppen av bjelken til 9 mm lokalt i toppen.



Figur 139: Stage 300, Aramis, Forskyvning Z



Figur 140: Stage 400, Aramis, Forskyvning Z



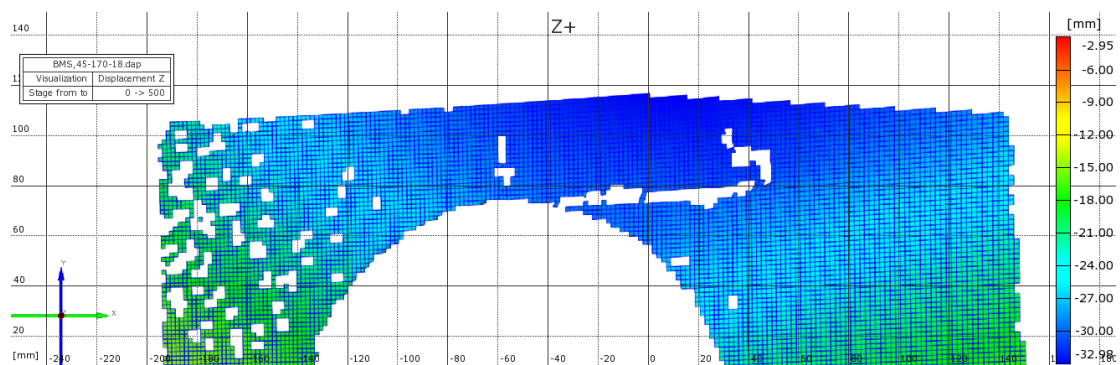
Figur 141: Stage 400, Lokal utbøyning

Sprekkdannelse Ø.H. ved knekkpunktet pga. utbøyningen (Figur 142).



Figur 142: Stage 400, Sprekk

Lasten synker gradvis herifra, samtidig som bjelken bøyes ut om knekkpunktet. Sprekkene Ø.H. utvider seg i takt med utbøyningen. Ved Stage 450 er utbøyningen på 21,5 mm lokalt i toppen (-3,3 mm i bunn). Ved Stage 500 er denne økt til 33 mm (Figur 143).



Figur 143: Stage 500, Aramis, Forskyvning Z

Her ser man tydelig den lokale utbøyningen og sprekkdannelsen om knekkpunktet (Figur 144).



Figur 144: Stage 500, Utbøyning + sprekk

Ved Stage 521 oppstår det en liten sprekk V (ikke gjennomgående). Her er tøyningen på 2 % i steget før sprekkdannelse. Denne øker gradvis i lengde fram til Stage 592, der den sprekker ut i planet (gjennomgående) (Figur 145). Sprekken oppstår som en konsekvens av utbøyningen.



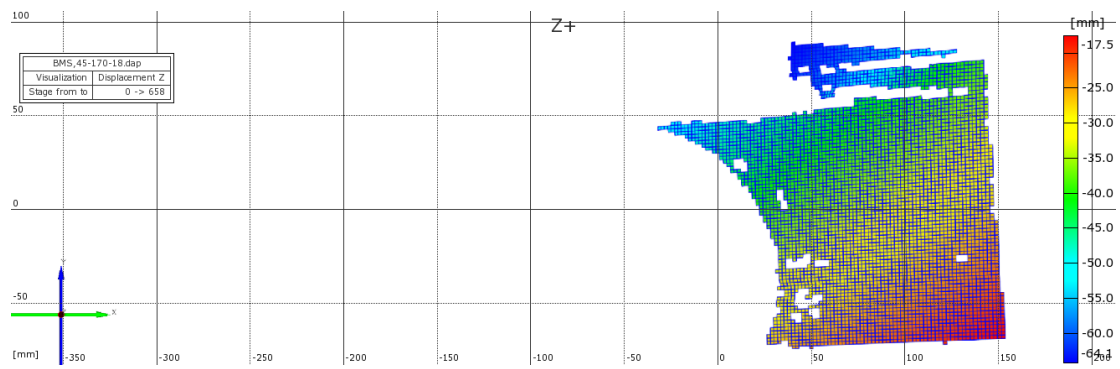
Figur 145: Stage 592, Sprekker

Ved Stage 647 oppstår det en lang smal sprekk N.H. pga. utbøyningen. Denne sprekker ut av planet (Figur 146).

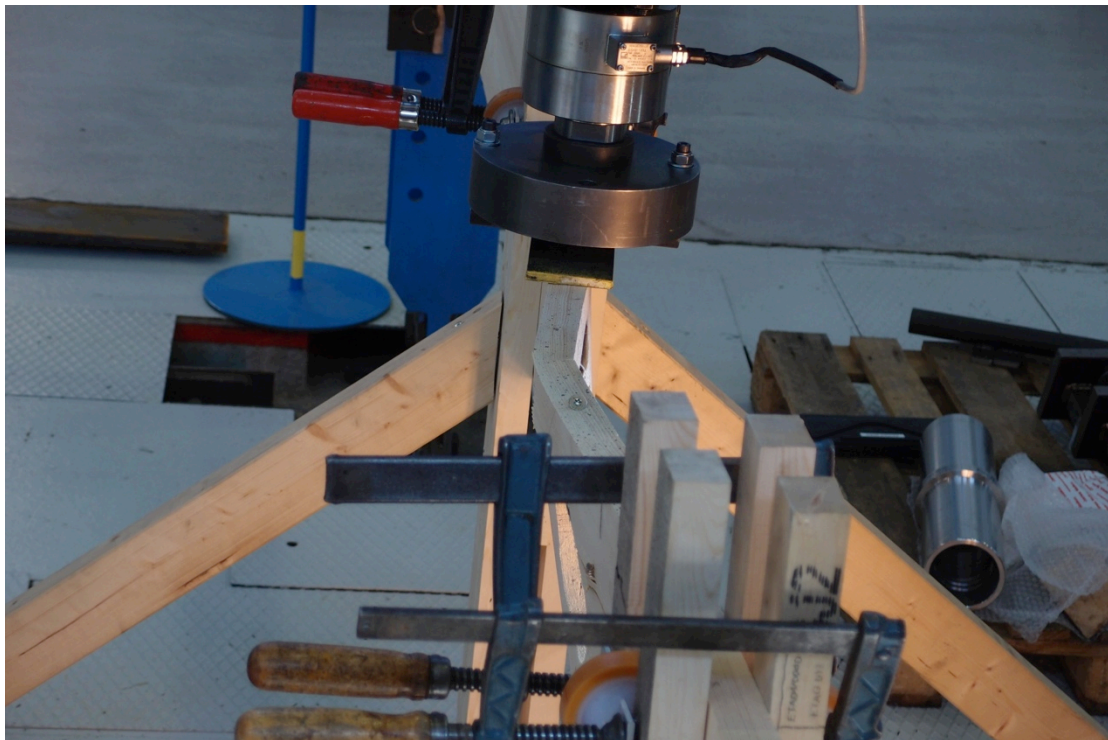


Figur 146: Stage 647, Sprekk

Forsøket avsluttes ved Stage 658. Ingen kollaps, men utbøyningen i ved knekkpunktet er på hele 64 mm. Nedbøyningen er på 65 mm (Figur 147 og 148). Det er tydelig at skruene gir bjelken økt stivhet og full kapasitet.



Figur 147: Stage 658, Aramis, Forskyvning Z



Figur 148: Stage 658, Maks lokal utbøyning

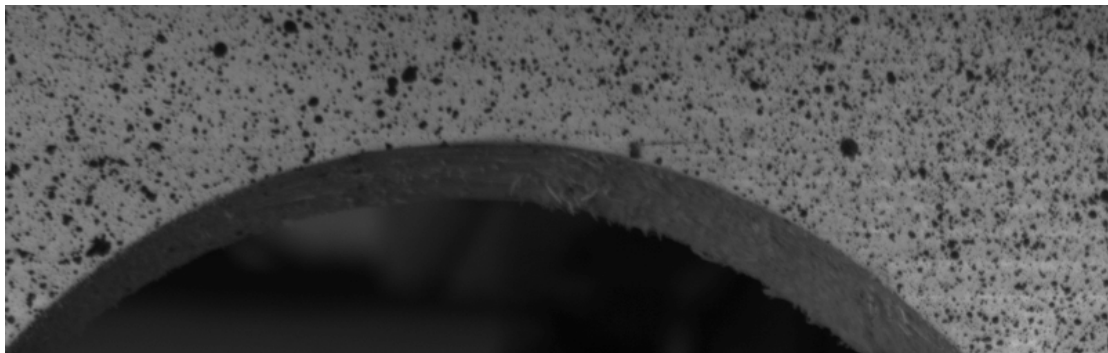
BMS,45-170-19

Før Kvist: V + Ø.H.
Lammleskjøt: O.K. + N.H.
Bjelkeskjøt: V
Venstre skrue stikker litt ut på enden (skjev pga. kvist)

Under Liten sprekk Ø.H. (Stage 250)
Bøyer ut i topp ca. ved 16 kN (Stage 380)
Den lille sprekken sprekker opp mot høyre (Stage 387).
Last synker.
Sprekker O.K. (Stage 455m+ 478)

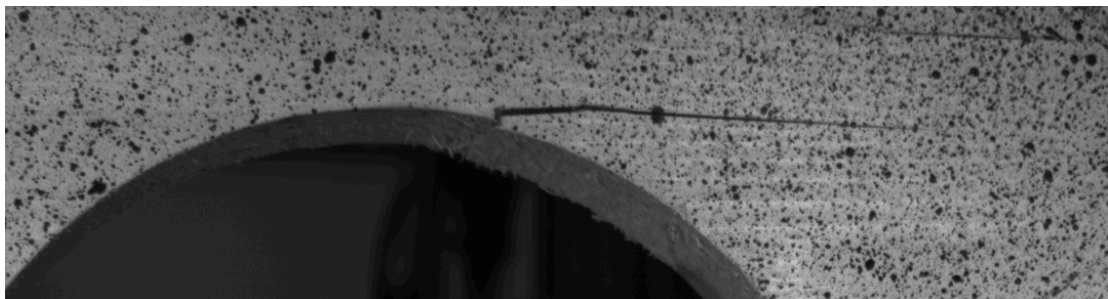
Etter Kollaps ved 12,6 kN (Stage 490)
Strekkbrudd U.K.
Brudd U.K. gjennom nedre lameller
Oppsprekking på overside

I dette forsøket oppstår en liten, smal sprekk på 1 cm Ø.H rundt Stage 250, som utvikler seg gjennom hele forsøket (Figur 149).



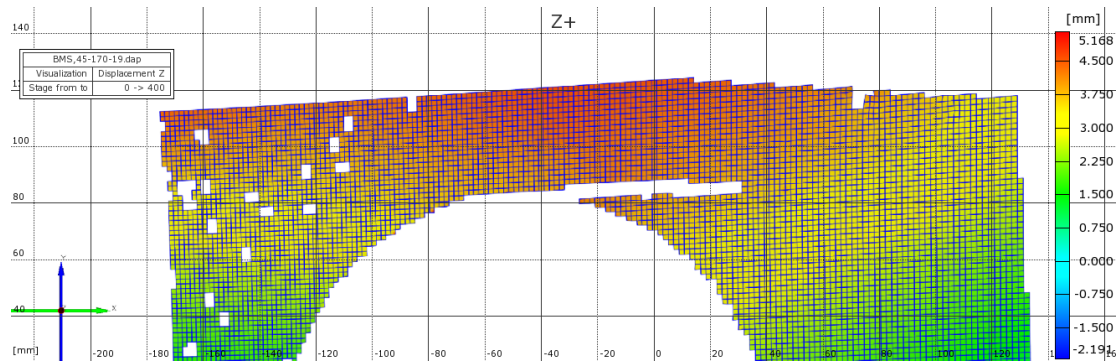
Figur 149: Stage 250, Sprekk

Bjelken holder seg stabil til ca. Stage 380, der bjelken såvidt begynner å bøye ut i toppen. Dette gjør at sprekken utvider seg bittelitt, før den sprekker en del opp ved Stage 387 (Figur 150), også forbi skrueplassering (0,5d) Tøyningene ved sprekketuppen er stabilt på 1,8-2,0 %, tilsvarende tidligere forsøk.

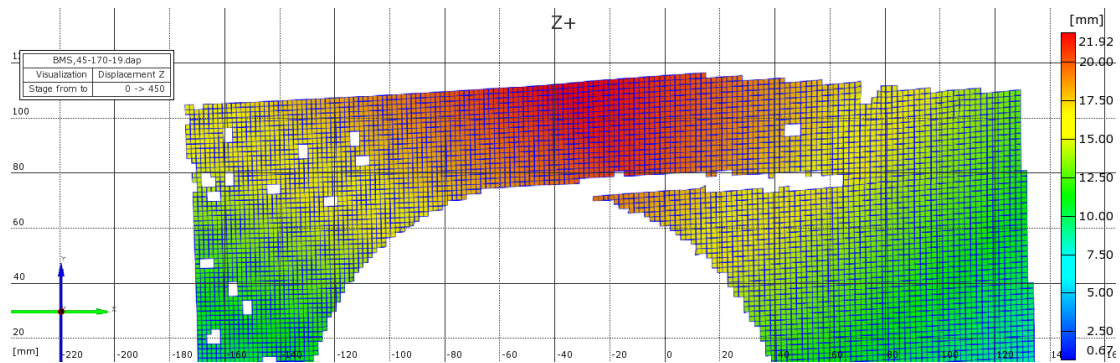


Figur 150: Stage 387, Sprekk

Fra Stage 400 og utover øker utbøyningen raskt. Fram til Stage 450 øker den fra 5 mm til 22 mm, og sprekken utvides i takt med dette (Figur 151 og 152).



Figur 151: Stage 400, Aramis, Forskyvning Z



Figur 152: Stage 450, Aramis, Forskyvning Z

Ved Stage 455 oppstår en liten, smal sprekk O.K. langs øvre lamelle pga. utbøyningen, som vokser seg litt større ved Stage 478 (Figur 153 og 154).

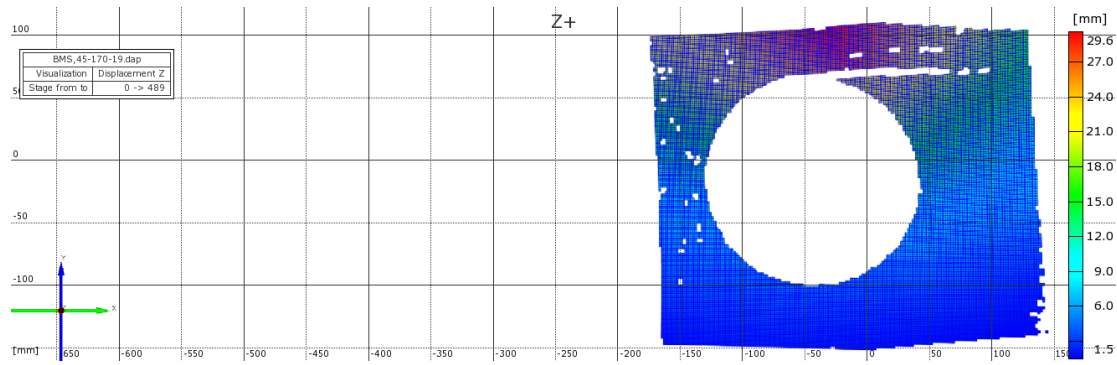


Figur 153: Stage 455, Sprekker

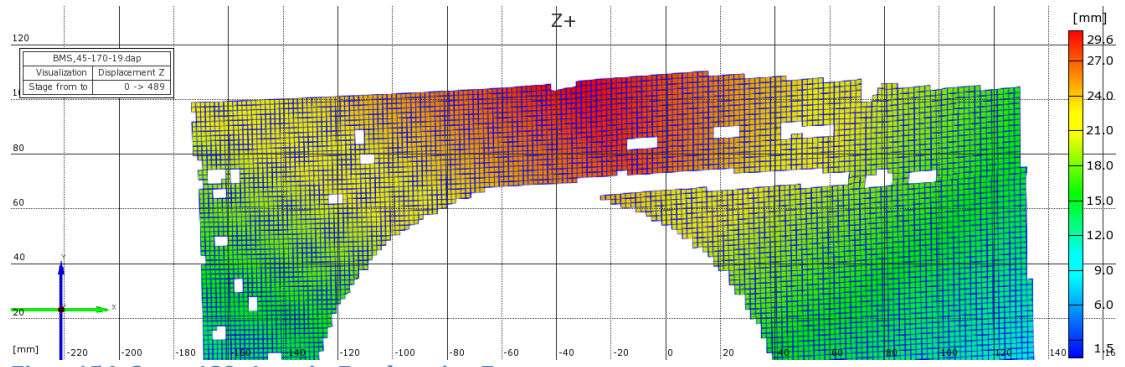


Figur 154: Stage 478, Sprekker

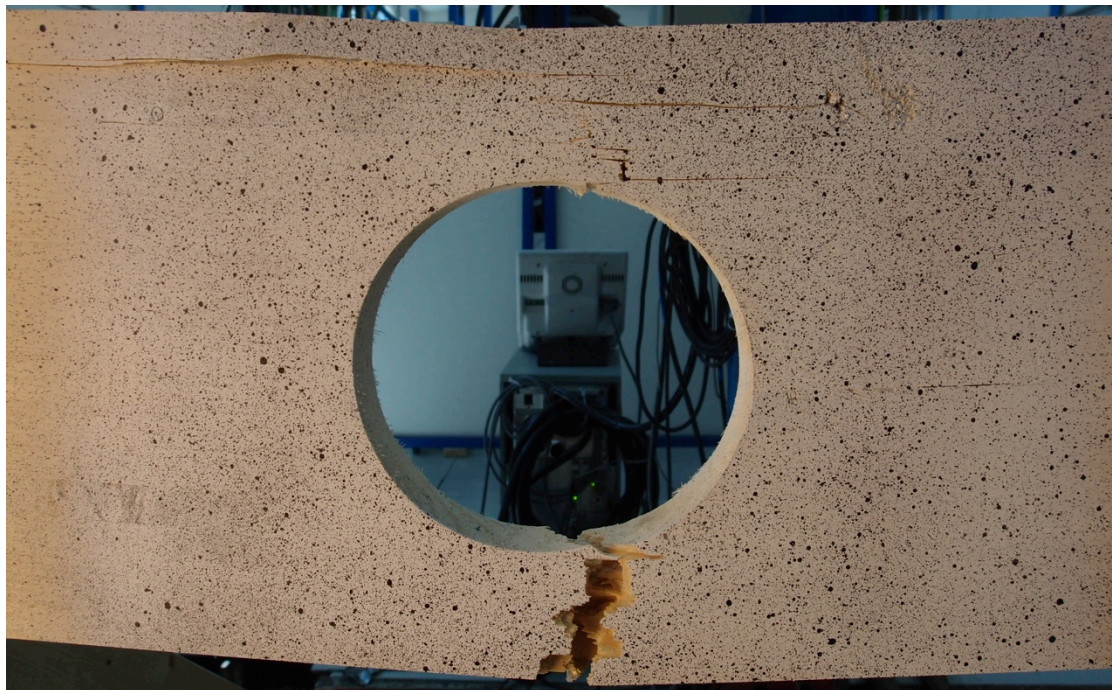
Utbøyningen nådde 30 mm lokalt i toppen ved skruel plasseringen (1,5 mm i bunn og 15 mm på sidene) (Figur 155 og 156), før bjelken kollapset ved Stage 490 (Figur 157 og 158). Strekkbrudd i underkant av utsparingen, gjennom nedre lameller, og altså ikke i sprekken Ø.H.



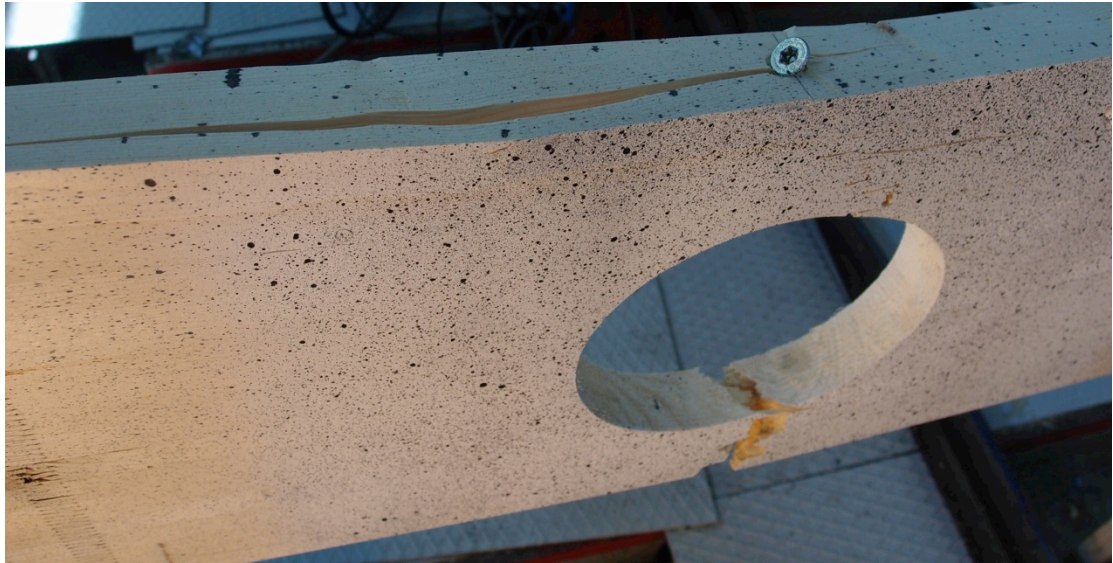
Figur 155: Stage 489, Aramis, Forskyvning Z



Figur 156: Stage 489, Aramis, Forskyvning Z



Figur 157: Stage 490, Kollaps



Figur 158: Stage 490, Kollaps

BMS,45-170-20

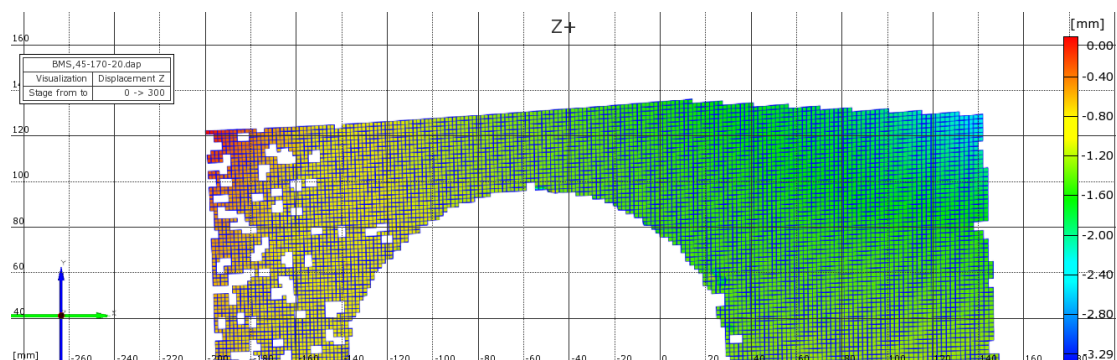
Før Kvist: N.H. (m/hull) + i nedre lamelle
Lamelleskjøt: V + Ø.V. + H

Under Knaking mellom 13-17,5 kN
Bøyer litt ut i topp, makslast 18 kN
Liten smal sprekk N.V. (Stage 300 + 408)
Last synker

Etter Kollaps ved 17 kN (Stage 428)
Strekbrudd i underkant + trykkbrudd i overkant (pga. utbøyning)
Brudd O.K. + U.K. (fra skruel plassering til utsparing)

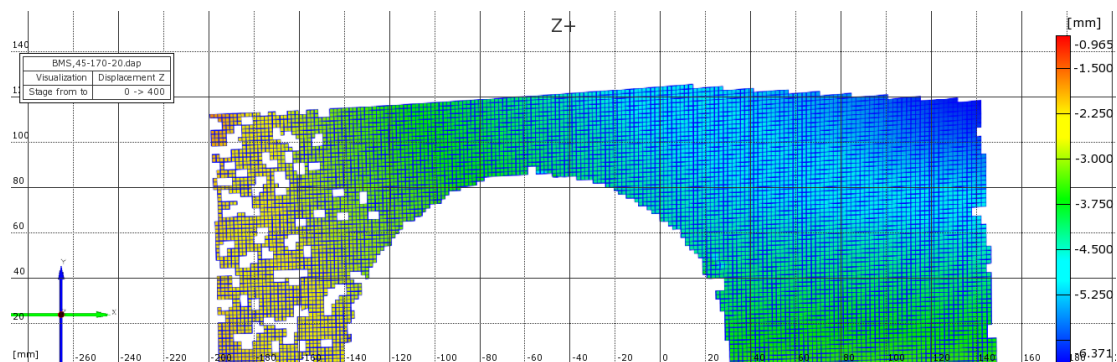
Dette forsøket skilte seg litt fra de foregående forsøkene. Bjelken holdt seg veldig stabil, uten noen betydelige tøyningseendringer, sprekkdannelser eller utbøyning gjennom hele forsøket, fram til plutselig kollaps. Kapasiteten var god og tilsvarende de forrige forsøkene, men oppførselen var mindre duktilt. Bjelken begynte likevel å få litt lokal utbøyning, som resulterte i litt synkende last før kollaps.

Ved Stage 300 er bjelken nedbøyd ca. 21 mm på midten, og har en lokal utbøyning på 3,3 mm (Figur 159). Her oppstår det også en veldig liten, smal sprekk N.V. som vokser seg litt større utover forsøket (neglisjerbar).



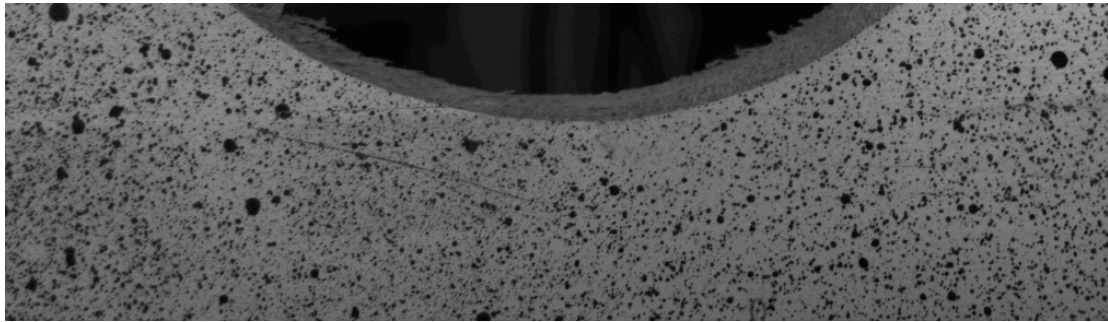
Figur 159: Stage 300, Aramis, Forskyvning Z

Ved Stage 400 har utbøyningen økt til 6,4 mm, og man ser tydeligere at dette skjer lokalt til høyre for utsparingen (Figur 160).



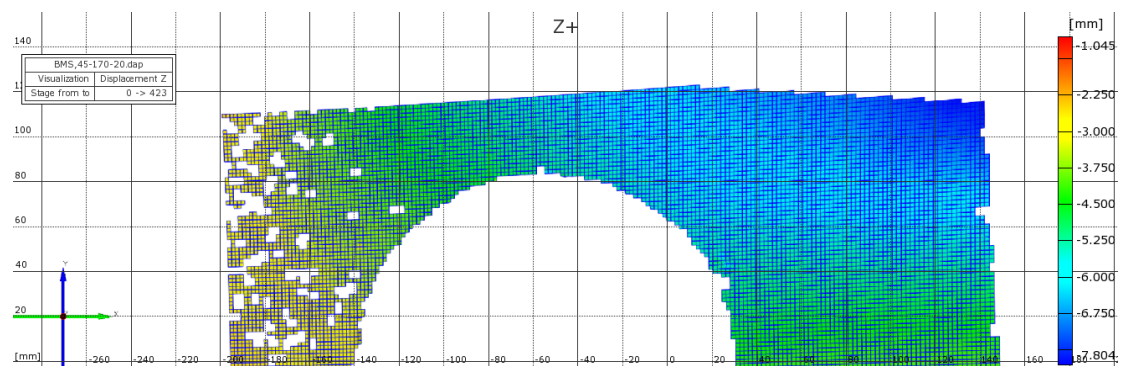
Figur 160: Stage 400, Aramis, Forskyvning Z

Ved Stage 408 oppstår det litt mer sprekkdannelse N.V. (Figur 161).

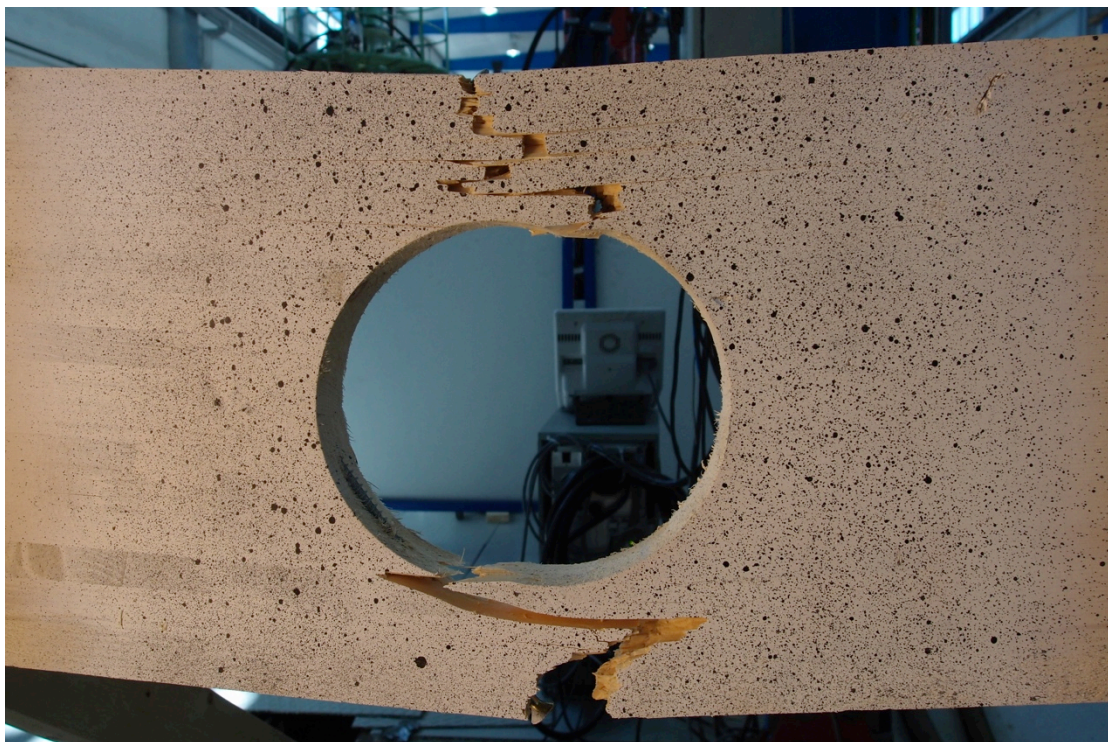


Figur 161: Stage 408, Sprekk

Ved Stage 423 oppnår bjelken maks utbøyning, på 7,8 mm (Figur 162), før bjelken plutselig kollapser ved Stage 428 (Figur 163 og 164). Brudd i gjennom lamellene over og under utsparingen, ved skruelassering.



Figur 162: Stage 423, Aramis, Forskyvning Z



Figur 163: Kollaps



Figur 164: Kollaps

7.5 Observasjoner fra forsøkene

- Bjelkene holdt seg veldig stabile underveis i forsøkene (fram til makslast), uten vipping eller betydelige tøyningseendringer/oppsprekking langs utsparing.
- Etter oppnådd makslast gikk bjelken enten i ganske plutselig kollaps eller begynte å bøye ut lokalt i toppen (ca. ved skrueplasseringen). Tydelig knekkpunkt.
- I forsøkene med lokal utbøyning sank lasten gradvis etter hvert som utbøyningen utviklet seg. Lasten holdt seg likevel over 12 kN før evt. kollaps eller avbrutt test.
- Bruddform 3 ble med andre ord observert (Figur 8) i forsøkene med lokal utbøyning.
- I omtrent alle forsøkene kollapset bjelkene pga. strekk i underkant (både før/etter en evt. lokal utbøyning). Bruddet gikk da oftest i lamelle- og bjelkeskjøter, eller fra bunn av utsparing og ned til skrueinnsettelsespunkt. Sprekker gikk ofte fra utsparing, via skjøtene og ut mot sidene langs øvre/nedre lameller. Oftest gikk disse utenom der skruene var plassert, dvs. at de gikk øverst til venstre og nederst til høyre.
- På grunn av endret bruddmode, ble det mindre aktuelt å gjøre en analyse av tøyningseendringer i Y-retning. Utbøyning og medfølgende oppsprekking skjer ut av planet (Z-retning), og oppsprekkingen skjer ofte ganske momentant (uten nevneverdige tøyningseendringer i Y-retning forkant).
- Det ble utført en tøyningsanalyse i et av forsøkene, og tallene stemmer godt overens med tidligere tøyningsanalyser. Tøyninger ved sprekketopp er på 1,5-2,0 % rett før videre sprekkdannelse. Her er det nok også tøyninger i Z-retning som spiller inn.
- Noen av sprekkene gikk ofte forbi skrueplasseringen, noe som ikke var tilfellet i BMS-170-forsøkene. Dette betyr ikke at skruene ikke virker, tvert imot. Skruene gir bjelken såpass god stivhet i planet at bjelken knekker ut lokalt.
- Kapasiteten er på 18,2 kN for bjelker med skruer skrudd 2d fra utsparing, og 18,1 kN for bjelker med skruer skrudd 0,5d fra utsparing. Rent kapasitetsmessig på papiret utgjør det dermed ikke noe forskjell å skru skruen 0,5d fra utsparing i forhold til 2d. Analysen viser heller ingen merkbare forskjeller.
- Kapasiteten er konservativ, da bjelkene i praksis vil fastholdes i større grad mot vipping og lasten er mer jevnt fordelt.

8 Spenningsintensitetsfaktoren K

Spenningsintensitetsfaktoren K gir en fullstendig beskrivelse av spenningene ved sprekktuppen for et lineært elastisk materiale.

Med K kjent, er det mulig å estimere den videre sprekkevæksten eller forutsi nye oppsprekninger.

Dette skal her gjøres ved å hente ut tøyingsdata rundt en sprekktupp, ved hjelp av Aramis, og kombinere denne dataen med tidligere gjennomgått bruddteori (Lign. 49):

$$E_y \left[\frac{\varepsilon_y + \nu_{xy}\varepsilon_x}{1 - \nu_{xy}\nu_{yx}} \right] = \frac{K_1}{\sqrt{2\pi r}} \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) \left[1 + \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \sin\left(\frac{3\theta}{2}\right) \right] \quad (49)$$

Som kan gjøres om til:

$$K_1 = \frac{E_y \sqrt{2\pi r} \left[\frac{\varepsilon_y + \nu_{xy}\varepsilon_x}{1 - \nu_{xy}\nu_{yx}} \right]}{\cos\left(\frac{\theta}{2}\right) \left[1 + \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \sin\left(\frac{3\theta}{2}\right) \right]} \quad (55)$$

For å få best mulig data ble det valgt å se på forsøk der sprekkdannelsen var tydeligst:

- BMS-170-6 (2 målinger)
- BMS-170-9 (2 målinger)
- BMS,45-170-14 (1 måling)

I hver måling ble det tatt ut et rutenett med 20 målepunkter rundt sprekktupp (Figur 165 og 166).

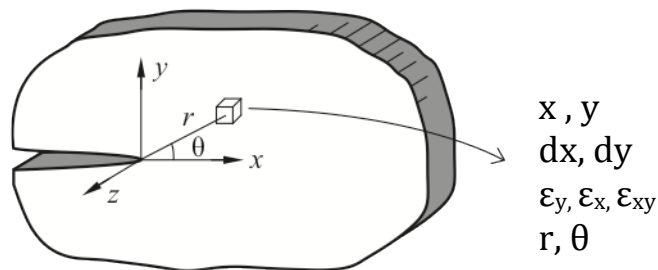
Fra hvert målepunkt ble det hentet ut:

- Posisjon i x- og y-retning
- Tøyingsverdier: ε_y , ε_x og ε_{xy} (= ν_{xy} og ν_{yx})

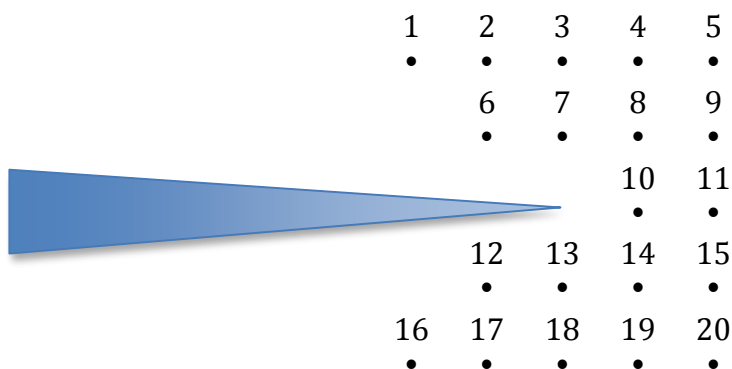
Disse ble brukt til å beregne:

- Radius, r, mellom sprekktupp og målepunkt
- Vinkel, θ , fra sprekktupp til målepunkt. Radianer: $0 < \theta < 2\pi$

Benyttet E_y -verdi for en standard K-bjelke [11] = 11 000 N/mm²



Figur 165: Uthenting av data fra hvert målepunkt



Figur 166: Målepunkter rundt sprekketupp

Verdiene ble satt inn i et Excel-ark (se Vedlegg III), som her i Tabell 5:

Tabell 6: Eksempel på beregning av K-verdi

| | | | | | | | |
|------------|--------------|-----------|----------------------|-------|----------------|--------------------|--|
| | Facet | 160,45 | | | | | |
| | x | 163,8662 | dx | 3,570 | | | |
| Nr: | y | 58,6212 | dy | 5,752 | K-verdi | 244,3203406 | |
| 4 | ey | 0,004421 | | | | | |
| | ex | -0,004887 | Radius, r | 6,770 | | | |
| | exy | -0,000021 | Vinkel, theta | 1,015 | | | |

Det ble beregnet 20 K-verdier fra 5 ulike sprekketupper. Verdiene i målepunkt 1, 6, 12 og 16 ble mellom 10-40 ganger så store som resten, og ble derfor valgt å neglisjere. Gjenstod da med 80 K-verdier som ble midlet (Tabell 6):

Tabell 7: K-verdier

| Måling | K-verdi (midlet) |
|--------------------------|--------------------|
| BMS-170-6, Stage 623 | 440,4485423 |
| BMS-170-6, Stage 631 | 349,4075583 |
| BMS-170-9, Stage 560 | 378,9648369 |
| BMS-170-9, Stage 575 | 398,7256846 |
| BMS,45-170-14, Stage 451 | 229,9211185 |
| Snitt | 359,4935481 |

Standardavvik:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2} = 71,222 \quad (56)$$

Kommer dermed fram til følgende K-verdi:

$$\mathbf{K = 359,5 +/- 71,2 N/mm^3/2}$$

$$\mathbf{288,3 < K < 430,7}$$

Det siste forsøket, *BMS,45-170-14*, ble det også knyttet litt usikkerhet til da denne hadde en lokal utbøyning og dermed mulig litt unøyaktige tøyingsverdier. Her var noen av verdiene ofte mye lavere enn snittet (ned mot 1/20 av snittet), noe som gjenspeiles i Tabell 6. Ved å neglisjere denne målingen fås dermed en trolig mer korrekt K-verdi:

$$\mathbf{K = 391,9 +/- 32,1 N/mm^3/2}$$

$$\mathbf{359,8 < K < 424,0}$$

Tidligere målinger har indikert en K-verdi på mellom 500-1200 N/mm³/2, noe som ikke er så langt ifra de nye målingene. De nye målingene indikerer likevel en noe lavere verdi enn tidligere, og siden målingene er gjort med det nøyaktige kameraet Aramis, tilsier det at denne nye verdien trolig er mer korrekt. Flere tilsvarende forsøk vil være ytterst interessant å gjennomføre, for å komme fram til en enda mer korrekt verdi.

9 Konklusjoner

Forsterkning av K-bjelker med skruer plassert i de strekkutsatte sonene rundt en utsparing er svært hensiktsmessig. Analyser av limtrebjelker med skruer plassert i en vinkel på 90° (BMS-170) og 45° (BMS,45-170), sammenlignet med bjelker uten forsterkning [1, 3] viser at skruerforsterkninger minker tøyings- og sprekkutviklingen i bjelkene, og øker kapasiteten.

Tøyingsanalysen av BMS-170 viser at en sprekk oppstår og vokser på grunn av tøyingskonsentrasjoner i et område øker til et visst maksimum. Det er en klar tendens til at en sprekk utvikler seg når tøyningene i Y-retning rett ved sprekket øker til mellom 1,3-1,8 %. Tøyningene er merkbart større her enn innover i treet. Det ble i observert fall på rundt 0,5 % mellom sprekketopp og neste Section, dvs. innenfor 4 mm. Sprekkene stoppet i all hovedsak ved skrueløsningen, oftest også etter kollaps.

Effekten av en skrueløsning i en vinkel på 45° var mest tydelig, og såpass god at det ble lite aktuelt å gjennomføre en tøyingsanalyse av disse. Forsterkning av en bjelke med 2 skruer, plassert i en 45° vinkel, øker stivheten i planet så mye at bjelken oppfører seg tilnærmet en bjelke uten utsparing. Bjelken holder seg stabil størsteparten av et forsøk, uten nevneverdige tøyingsendringer og dermed ingen særlig oppsprekking. Etter oppnådd makslast går bjelken enten i ganske plutselig kollaps eller begynte å bøye ut lokalt i toppen, omtrent ved skrueløsningen.

Bjelkene kolliderer pga. strekkbrudd i lamelle-/bjelkeskjøter, eller i bunn av utsparing ned til skrueløsningens punkt. Sprekker gikk ofte fra utsparing, via skjøtene og ut mot sidene langs øvre/nedre lameller. Oftest gikk disse utenom der skruene var plassert, dvs. at de gikk øverst til venstre og nederst til høyre.

Lokal utbøyning inntreffer som et resultat av maks oppnådd kapasitet i planet, og er dermed et ønskelig resultat. Et avstivet plan kombinert med nedbøyning av bjelken gjør at det skapes trykk i overkant av bjelken. Dette resulterer i at bjelken bøyes ut av planet, med tydelig knekkpunkt. Eventuell påfølgende oppsprekking skjer som konsekvens av utbøyningen, og går ut av planet. Bruddmoden endres fra mode 1 (B + BM + BMS) til 3 (BMS,45).

Ved skrueløsning i en vinkel på 45 grader sørger skruene stort sett for at det ikke oppstår sprekker i strekksonene de er plassert. Disse er oftest da såpass korte og smale at de er neglisjerbare med tanke på kapasitet. Større sprekker oppstod som oftest kun som en konsekvens av lokal utbøyning, dvs. etter makslast var oppnådd. Disse oppstod momentant, uten nevneverdige tøyingsendringer i Y-retning.

Oppnådd makskapasitet for bjelker med skruer skrudd 0,5d og 2,0d fra utsparing er henholdsvis 18,1 kN og 18,2 kN. Dette vil si at det rent kapasitetsmessig på papiret ikke utgjør noe forskjell å skru skruen 0,5d fra utsparing i forhold til 2d. Analysen viser heller ingen merkbare forskjeller.

Oppnådd kapasitet ved skrueplassering i en vinkel på 45 grader er tilsvarende andre forsøk med skruer plassert i en vinkel mellom 30-60°. Dette tyder på at denne kapasiteten er det maksimale man kan oppnå for en K-bjelke med 170 mm utsparing. Kapasiteten er litt lavere enn en bjelke uten utsparing oppnår (23,0 kN), men er likevel veldig høy. Kapasiteten er i tillegg konservativ, da bjelkene i praksis vil fastholdes i større grad mot vipping og lasten er mer jevnt fordelt.

-

Spenningsintensitetsfaktoren K ble beregnet ut ifra tøyingsdata hentet fra et rutenett rundt 5 sprekktupper. Det ble valgt å neglisjere verdier fra målepunkter som gav mye større eller lavere verdier enn snittet, slik at totalt 74 K -verdier ble midlet. Beregnet K -verdi: $K = 391,9 \pm 32,1 \text{ N/mm}^{3/2}$. De nye målingene indikerer en noe lavere verdi enn tidligere antatt, men siden målingene er gjort med det nøyaktige kameraet Aramis, tilsier det at denne nye verdien trolig er mer korrekt.

10 Referanser

- [1] Degro, Atis. *The Strength of Glulam Beams with Round Holes, Experimental and Numerical Evaluation*. Masteroppgave, NTNU, 2010
- [2] Solberg, Pål Østen. *Selvborrende skruer som forsterking i utsparte limtrebjelker – Eksperimentelle tester og analytiske betraktninger*. Masteroppgave, NTNU, Juni 2011
- [3] Steen, Kasper. *Tøyningsendringer rundt utsparinger i limtrebjelker. En analyse av tøyningsdata*. Prosjektoppgave, NTNU, 2012
- [4] Danielsson, Henrik. *The Strength of Glulam Beams with Holes, A Survey of Tests and Calculation Methods*. PhD thesis, Lund University, Februar 2009
- [5] Kilde, Vegard, *Fokus på TRE nr. 28: Gran*. Hefte. Norsk Treteknisk Institutt og TreFokus. 2011
- [6] Øvrum, Audun og Skaug, Eivind, *Fokus på TRE nr. 43: Konstruksjonsvirke*. Hefte. Norsk Treteknisk Institutt og TreFokus. 2007
- [7] Sagen, Arnold. *Trekonstruksjoner med spikerplater, kap 15: Tre som byggemateriale*. Norges Takstolprodusenters forening, 1999
- [8] Anderson, T.L. *Fracture Mechanics. Fundamentals and Applications (3rd ed.)*. Taylor & Francis Group, 2005, pp. 3-59.
- [9] Daniel, Isaac M og Ishai, Ori. *Engineering Mechanics of Composite Materials (2nd ed.)*. Oxford University Press, 2006, pp. 63-77.
- [10] *Teknisk Godkjenning Nr.2365: K-bjelken*. SINTEF Byggforsk, 2009

Vedlegg

I Analyse av Aramis-bilder

Framgangsmåte:

- Åpne fil
- Project Mode
- Define Mask -> Mask Area -> Marker ønsket område -> Invert Mask
Definer et firkantet område rundt utsparingen/ønsket område
- Auto Start Point: Finner automatisk et punkt med mye kontrast, som blir referansenullpunkt.
- Hvis ikke Auto Start Point fungerer -> Add Start Point. Velg et punkt med høy kontrast. Simple, automate.
- Compute Project
- Set Stage 0 as Strain Reference: Måler tøyning utfra første steg i forsøket.

[spesielt for tøyingsanalyse]

- Sections -> Create Section -> Velg noen seksjoner (f.eks. 9) innenfor et begrenset område som dekker viktige deler av bruddforløpet (f.eks. 4 mm mellom hver). Y-retning.
- Akser : y: Epsilon Y (%) , x: Y-koordinater (ikke Section Length)
- Reports -> Multi Sections -> Edit element -> Visualization -> X-axis (Y-coordinate)
- Studér bruddutviklingen gjennom alle Stages og finn aktuell sprekkdannelse.

[andre analyser]

- Kan for eksempel finne forskyvning i alle retninger, se rullegardin.
- Ikke like aktuelt å sette inn Sections.

[finne sprekktupp]

- Høyreklikk på et av de nedre bildene -> Visualization -> Strain Grid.
Observer hvor sprekktuppen ligger i rutenettet og finn samme plassering i tøyingsbildet. Alternativ: Legg til Visualization -> Strain.
- Sjekk flere Stages etter hverandre for å være sikker (ofte smal sprekke som er vanskelig å se)

[eksport av bilder]

- Høyreklikk -> Snapshot. Velg ønsket type bilder (datagenerert/originalt).

[valgfritt]

- Marker ønskede Stages (f.eks.: rett før, under og etter oppsprekking)
- Multi-Section -> Høyreklikk -> Export data -> Pil ved OK (export selected stages)
- Importer data i Excel (Tips: benytt egnet Makro)
Én Section pr. Sheet.
- Opprett diagrammer

II Notater fra testserie BMS,45-170

BMS,45-170-1

*Før Kvist: H + V (med lite hull) + N.H.
Lamelleskjøt: V + N.H.*

*Under Knaking ved 9,7 kN og 11,6 kN
Begynte å vippe litt ut => avbryter forsøket => flytter avstivninger til 1/3-
punkt => restarter test.*

*Etter Kollaps ved 16 kN
Strekkbrudd U.K, nedre lamelle.
Venstre del av bjelke knakk ut og løsnet.
Stor sprekk O.K helt ut til venstre bjelkeende langs øvre lamelle.
Ingen oppsprekking ved skruer.*

BMS,45-170-2

*Før Kvist: U.K. + N.V.
Lamelleskjøt: Noen til venstre for utsparing + nede på midten av bjelken
Bjelkeskjøt: Ved venstre bjelkeende*

*Under Knaking ved 17 kN, ingen sprekker
Oppstod vipping => påførte klemmer på avstivningene => restartet test
Litt oppsprekking U.K + N.V. (ikke gjennomgående)
Maks last: 21 kN => begynte å vippe litt*

*Etter Kollaps ved 18,5 kN
Strekkbrudd i lamelleskjøter nede på midten av bjelken.
Sprekk fra U.K. mot høyre langs nedre lamelle
Sprekk fra N.H. mot høyre langs lamelle
Sprekk Ø.V. mot venstre.
Liten sprekk O.K. pga. trykk/nedbøyning av bjelke
Ingen sprekker ved skruer*

BMS,45-170-3

- Før Kvist: $H + \emptyset.H + V$
Lamelleskjøt: Øvre lamelle Ø.V.
Bjelkeskjøt: Til høyre for midten av bjelke
Liten sprekk: N.V. + U.K. + V
Avstiving i 1/3-punkt m/klemmer*
- Under Klemmene ble skrudd for stramt, så restartet test (ved 9kN).
Knaking mellom 10,8-16,5 kN
Liten sprekk Ø.H ved 16,5 kN (Stage 457) (ikke gjennomgående)*
- Etter Kollaps ved 17,8 kN (Stage 476)
Strekbrudd i nedre lamelle på midten av bjelken, sprekk til N.H.
Liten, men ubetydelig sprekk Ø.H.
Liten sprekk U.K. (utvikling av eksisterende sprekk)*

BMS,45-170-4

- Før Kvist: $V + N.V$ (m/hull).
Lamelleskjøt: U.K.
Liten sprekk: O.K.
Bjelkeskjøt: Midt på bjelken*
- Under Knaking mellom ca. 6,9 - 9,5 kN*
- Etter Kollaps ved 16 kN (Stage 368)
Brudd i nedre lamelle i bjelkeskjøt
Sprekk N.H. mot høyre til bjelkeskjøt
Sprekk Ø.V. mot venstre langs øvre lamelle
Ingen sprekk langs skruer. Nedre sprekk ved tupp av høyre skrue.*

BMS,45-170-5

- Før Kvist: U.K. + Ø.V.
Liten sprekk: N.V. + Ø.V.*
- Under Knaking mellom 10,5 - 14,6 kN
Bøyer ut i toppen (øvre lamelle, ved skrue). Dette pga. trykk/nedbøyning
=> 2 sprekker langs lamellen.*
- Etter Kollaps ved 19,6 kN (Stage 442)
Brudd O.K.
Sprekk i nedre lamelle på midten av bjelken.
Ingen kollaps
Ingen sprekk langs venstre skrue.*

BMS,45-170-6

*Før Kvist: Ø.V.
Lamelleskjøt: H + Ø.H (m/liten sprekk).
Bjelkeskjøt: Mellom utsparing og høyre bjelkeende
Liten sprekk: V*

Under Knaking mellom 8-10 kN

*Etter Kollaps ved 13,3 kN
Strekkbrudd i bjelkeskjøt
Sprekk fra N.H. mot høyre langs nedre lamelle
Liten og smal sprekk Ø.V.
Smal sprekk O.K. langs øvre lamelle.*

BMS,45-170-7

*Før Kvist: V
Kvisthull: 5 stk. H, 2 stk. V.
Lamelleskjøt: nederst på midten av bjelken*

*Under Knaking mellom 15,5-17,5 kN
Liten sprekk oppstår S
Bøyer ut i toppen (ved skrue) ved 19 kN => oppsprekking Ø.H.
Lasten synker. Ved 16 kN: sprekk i nedre lamelle N.H. mot lamelleskjøt.*

*Etter Kollaps ved 15 kN (Stage 538)
Strekkbrudd i lamelleskjøt i nedre lamelle, sprekk fra N.H. via
lamelleskjøt og ut mot høyre bjelkeende.
Liten sprekk O.K. i øvre lamelle
Sprekk Ø.V. til venstre langs øvre lamelle.
Sprekk ved høyre skrue oppstår pga. utbøyning på toppen.*

BMS,45-170-8

*Før Kvist: U.K. + Ø.V.
Lamelleskjøt: U.K. + Ø.V. + N.H.
Bjelkeskjøt: Ved venstre bjelkeende
Sprekk: Lang sprekk til venstre for utsparing (ikke gjennomgående)*

Under Knaking mellom 8-15 kN

*Etter Kollaps ved 15,5 kN (Stage 378)
Strekkbrudd U.K. i lamelleskjøt.
Sprekk fra lamelleskjøt og ut mot høyre langs nedre lamelle.
Sprekk Ø.V. i lamelleskjøt og ut mot venstre avstiver.*

BMS,45-170-9

- Før Kvist: U.K. + Ø.V.
Bjelkeskjøt: H
Litt skjært innskrudd skrue H (stikker litt ut i enden)*
- Under Knaking mellom 11-12,5 kN
Liten sprekk ved bjelkeskjøt ved 14,5 kN
Ny sprekk ved bjelkeskjøt + liten sprekk Ø.H. ved 15,2 kN (Stage 355)
Sprekkene vokser litt fram mot kollaps*
- Etter Kollaps ved 15,6 kN (Stage 378)
Strekkebrudd i bjelkeskjøt.
Sprekk U.K. mot høyre til bjelkeskjøt
Sprekk Ø.V. mot venstre langs øvre lamelle.
Sprekkene går ved endene av skruene.
På bakside: Sprekk fra bjelkeskjøt som flerrer opp ved skrue.*

BMS,45-170-10

- Før Lamelleskjøt: Ø.V. + N.H.
Liten sprekk: U.K.
Litt skjært innskrudd skrue V (stikker litt ut på bakside)*
- Under Knaking mellom 10-19 kN
Bøyer ut i topp ved 20,5 kN (Stage 446) => liten sprekk N.V.
Liten sprekk Ø.H. ved 19 kN (ikke gjennomgående)
Ved 18 kN forlenges sprekkene + ny sprekk Ø.H (Stage 496)*
- Etter Kollaps ved 16 kN (Stage 502).
Strekkebrudd U.K. nedre lamelle
Sprekker Ø.V. + N.H. via lamelleskjøter og utover.
Sprekker går ved endene av skruene.*

BMS,45-170-11

*Før Kvist: H + Ø.V.
Lamelleskjøt: Ø.V. + N.H.
Liten sprekk: N.H. + V (ikke gjennomgående)
Lang sprekk: 1 ved venstre bjelkeende og 2 ved høyre (ikke gjennomgående)
Den ene skruen stikker litt ut på enden, H.
(glemte å sette på Aramis-kameraet helt i starten)*

*Under Knaking mellom 13,5-19,5 kN
Liten sprekk N.V ved ca. 15 kN (Stage 118)*

*Etter Kollaps ved 20 kN (Stage 176)
Strekkbrudd U.K. nedre lamelle.
Sprekk U.K mot høyre og venstre
Venstre sprekk via lamelleskjøt til utsprukket nedre lamelle.
Sprekk Ø.V. og U.K langs øvre lamelle via lamelleskjøt.*

BMS,45-170-12

*Før Kvist: V + Ø.V. + 2x N.V.
Lamelleskjøt: H + V + O.K.
Bjelkeskjøt: V*

Under Knaking mellom 11-20 kN

*Etter Kollaps ved 21 kN (Stage 429)
Strekkbrudd i lamelleskjøter i nede på midten av bjelken.
Sprekk H ut mot høyre bjelkeende via lamelleskjøter
Liten sprekk O.K. via lamelleskjøt + liten N.Ø (ikke gjennomgående)*

BMS,45-170-13

*Før Kvist: 2x N.V
Kvisthull: (bakside) Ø.V. + V + N.H
Lamelleskjøt: H + V + Ø.V. + Ø.H.
Liten sprekk (bakside) V*

*Under Knaking mellom 9-16 kN
Bøyer ut i topp ved skruen ved 19 kN (Stage 420)
Oppsprekking O.K. langs øvre lamelle (pga. utbøyning/trykk)
Sprekk V
Bøyer ut, samtidig som last synker.*

Etter Kollapset ikke, men stor utbøyning + synkende last.

BMS,45-170-14

- Før Kvist: Ø.V.
Lamelleskjøt: O.K. + Ø.H. + H
Høyre skrue stikker litt ut på enden*
- Under Knaking mellom 10-17 kN
Bøyer ut i topp ved 19 kN (ca. Stage 400)
Sprekker opp O.K. + Ø.H. pga. utbøyningen (Stage 427)
Sprekken utvider seg mye ved Stage 450.
Lasten synker og stabiliserer seg på rundt 13 kN*
- Etter Kollaps ved 13 kN (Stage 518)
Strekkbrudd U.K. nedre lameller
Sprekk fra U.K. utsporing og ned til bunn
Sprekk Ø.V. mot venstre langs øvre lamelle.*

BMS,45-170-15

- Før Kvist: V
Lamelleskjøt: V + N.H. + Ø.H.*
- Under Knaking ved 9 kN + 16 kN
Liten sprekk N.V (Stage 375)
Bøyer ut i topp ved 19 kN (Stage 420)
Last synker ned til 14-16 kN
Oppsprekking langs øvre lamelle (ved skrueplassering)*
- Etter Ingen kollaps
Sprekk Ø.V. mot venstre langs lamelle (Stage 519)
Sprekk på overside av bjelke, via skrue*

BMS,45-170-16

- Før* Kvist: N.V. + noen i nedre lamelle
Lamelleskjøt: N.H.
Bjelkeskjøt: høyre ende
Liten sprekk: Ø.H. (1 cm, ikke gjennomgående)
- Under* Knaking ved 10 kN (ellers lite)
Bøyer ut i topp ved 21,6 kN (Stage 441), ved skrueplassering
Sprekker opp Ø.H. (Stage 481)
Last synker ned til 16-17 kN
Liten smal sprekk V (Stage 494 + 514)
- Etter* Kollaps ved 11 kN (Stage 571)
Strekkebrudd U.K. + N.H.
Sprekk i nedre lamelle, via lamelleskjøt N.H. ut mot høyre.

BMS,45-170-17

- Før* Kvist: mange i øvre lamelle
Lamelleskjøt: i øvre lamelle Ø.V.
Bjelkeskjøt: høyre ende
Venstre skrue stikker litt ut i enden.
- Under* Bøyer ut ved 16 kN (ca. Stage 370), ved skrueplassering
Oppsprekking O.K. + Ø.H. (Stage 400)
Last synker ned til rundt 14 kN
Oppsprekking V (Stage 430)
- Etter* Ingen kollaps

BMS,45-170-18

- Før* Kvist: Noen i nedre lamelle
Kvisthull: Ø.H.
Lamelleskjøt: 3 x Ø.H + Ø.V + N.H.
- Under* Knaking mellom 15-19 kN
Bøyer ut i topp ved 19 kN (Stage 400)
Små, smale sprekker Ø.H. (Stage 410)
Last synker
Mer oppsprekking Ø.H.
Sprekk V (Stage 521)
Sprekk N.H. (Stage 647)
- Etter* Ingen kollaps

BMS,45-170-19

- Før Kvist: V + Ø.H.
Lamelleskjøt: O.K. + N.H.
Bjelkeskjøt: V
Venstre skrue stikker litt ut på enden (skjev pga. kvist)*
- Under Liten sprekk Ø.H. (Stage 250)
Bøyer ut i topp ca. ved 16 kN (Stage 380)
Den lille sprekken sprekker opp mot høyre (Stage 387).
Last synker.
Sprekker O.K. (Stage 455 + 478)*
- Etter Kollaps ved 12,6 kN (Stage 490)
Strekkbrudd U.K.
Brudd U.K. gjennom nedre lameller
Oppsprekking på overside*

BMS,45-170-20

- Før Kvist: N.H. (m/hull) + i nedre lamelle
Lamelleskjøt: V + Ø.V. + H*
- Under Knaking mellom 13-17,5 kN
Bøyer litt ut i topp, makslast 18 kN
Liten smal sprekk N.V. (Stage 300 + 408)
Last synker*
- Etter Kollaps ved 17 kN (Stage 428)
Strekkbrudd i underkant + trykkbrudd i overkant (pga. utbøyning)
Brudd O.K. + U.K. (fra skrueplassering til utsparing)*

III Minnepinne

Innhold:

Tøyningsdata

Tøyningsdiagrammer

Bilder fra alle forsøkene

Utrekning av K-verdier