

Brannmotstanden til fiberkompositter etter slagskade

Numerisk analyse med beregning for å se endringen i kapasitet til fiberarmerte kompositter under høy temperatur etter at det har blitt utsatt for en slagskade.

Simon Berg

Veileder

Reidar Anderssen

Masteroppgaven er gjennomført som ledd i utdanningen ved Universitetet i Agder og er godkjent som del av denne utdanningen. Denne godkjenningen innebærer ikke at universitetet inntår for de metoder som er anvendt og de konklusjoner som er trukket.

Universitetet i Agder, 2018

Fakultet for Teknologi og Realfag

Institutt for Ingeniørvitenskap

Forord

Denne rapporten er en del av emne Byg500, og er en besvarelse av masteroppgaven. Oppgaven er en avslutning på et 2-årig masterstudiet for bygg ved Universitetet i Agder, og ble skrevet høsten 2017, med innlevering i Januar 2018. Formålet med oppgaven er å ta for seg den generelle bruken av fiberarmerte kompositter i forskjellige applikasjoner, hvor det utsettes for støt- og kollisjonsskader under brukstiden. Noe som vil påvirke de mekaniske egenskapene under høye temperaturer. Det forutsetter at personen som leser denne rapporten har generell kunnskap om anisotrope materialer, bruddmekanikk, og oppførselen til materialer under varmepåvirkning. For å svare på oppgaven så har det blitt utført numerisk analyse og beregning, ved bruk av dataverktøy. Lære seg disse programmene har vært en del av oppgaven.

Jeg ønsker å takke min veileder Reidar Anderssen fra OPS Composite Solutions AS, som har bidratt med hjelp og gode råd, under skriving av denne masteroppgaven.

Simon Berg

Sarpsborg 26.01.2018

Summary

Fiber reinforced composites have many good properties, but also many applications that make it vulnerable to accidental loads, like impact damage and fire. The problem with this is that minor and larger damage can be difficult to observe and a challenge to inspect on the spot. All materials exposed to fire, or high temperatures will expand, which can cause instability and large deformations. Several studies have examined the behavior of composites under these typical accidental loads individually, but none or very few have investigated when they occur simultaneously or the overall effect they provide.

To address the problem in this thesis, it has been done a numerical computation in ANSYS APDL, and created a spreadsheet in Mathcad.

Analyzes and calculations have been made by varying the impact load, equivalent to a hole with the same reduced capacity as in a impact damage. Measures were taken around the hole, both at room temperature and with a temperature rise of 150 degrees Celsius at a given load.

Capacity was measured at one-axial tensile load combined with temperature load. The results showed both reduced stiffness and strength, which reduced fire resistance to the material under a standard fire with several minutes. The reduction of capacity showed a harmonic curve of strength, but greater discrepancies regarding stiffness.

To get a better understanding and graphical curve of the results, a nonlinear analysis should be performed along with experiments, where you vary with smaller intervals. It should also be checked for compression capacity, different fiber orientation and possibly bending moment of the laminate when it is part of a sandwich element.

Sammendrag

Fiberarmerte kompositter har flere gode egenskaper, og mange bruksområder. Noe som innebærer at det utsettes for ulykkeslaster som slagskader og brann. Problemet med dette er at mindre og større skader kan være vanskelig å observere og en utfordring å inspisere på stedet. Alle materialer som utsettes for brann eller høye temperaturer vil utvide seg, noe som kan skape instabilitet og store deformasjoner. Flere studier har undersøkt oppførselen til kompositter under disse typiske ulykkeslastene hver for seg, men ingen eller veldig få har undersøkt når de opptrer samtidig, eller den samlede effekten de gir.

For å svare på denne oppgaven, så har det blitt gjort en numerisk analyse i programmet ANSYS APDL, og laget et regneark i MathCAD.

Analyser og beregninger har blitt utført ved å variere slagkraften, tilsvarende et hull med den samme reduserte kapasiteten som ved en slagskade. Det ble målt spenninger rundt hullet både i romtemperatur og med temperaturøkning på 150 grader celsius ved en gitt belastning.

Kapasiteten ble målt ved en-aksial strekkbelastning kombinert med temperaturtøyning. Resultatene viser både redusert stivhet og styrke, noe som reduserer brannmotstanden til materialet under en standardbrann med flere minutter. Reduksjonen av kapasitet viser en harmonisk kurve for styrke, men større avvik når det gjelder stivhet.

For å få en bedre forståelse og grafisk kurve av resultatene, bør det utføres en ikke-lineær analyse sammen med eksperimenter, hvor man varierer med mindre intervaller. Det bør også sjekkes for trykkapasitet, forskjellig fiberorientering og eventuelt bøyemoment av laminatet når det er en del av et sandwichelement.

Innhold

Forord	i
Summary	ii
Sammendrag	iii
Innhold	iv
Figurliste	v
Tabelliste	v
1. Innledning	1
1.1 Bakgrunn for oppgaven	1
1.2 Problemområde.....	1
1.3 Oppbygging og avgrensing	1
2. Metode	2
2.1 Litteraturstudie.....	2
2.2 Numerisk og analytisk beregning	2
3. Materialeegenskaper og oppbygging	3
4. Analytisk beregning	4
4.1 Beregninger med forklaring	6
5. Numerisk analyse i ANSYS APDL	13
6. Resultat	18
6.1 Analysen i ANSYS	18
6.2 Beregninger	20
6.3 Diskusjon	22
7. Konklusjon	23
7.1 Videre arbeid	23
Litteraturliste	24
Vedlegg A – Beregninger i MathCAD	25
Vedlegg B – Tabeller og Grafer	32
Vedlegg C – Egenskaper og styrke	39
Vedlegg D – Loggfil fra ANSYS APDL	41
Vedlegg E – Analyse i ANSYS APDL	46
Vedlegg F – Brannkurve	54
Vedlegg G - A3 POSTER	56

Figurliste

Figur 4. 1 - Laminat med hull.....	4
Figur 5. 1 - Lag-oppbygging	13
Figur 5. 2 - Oversikt antall elementer.....	13
Figur 5. 3 - Nærbilde oversikt antall elementer	14
Figur 5. 4 – Spenningskart	14
Figur 5. 5 – Lag 2, maks-spenning i x-retning ved T = 0.....	14
Figur 5. 6 - Lag 10, mak-spenning i x-retning ved T=0.....	15
Figur 5. 7 - Lag 10, makspenning i x-retning ved T=150.....	15
Figur 5. 8 - Von Mises 1mm hullradius T=0.....	16
Figur 5. 9 - Von Mises 1mm hullradius T=150.....	16
Figur 5. 10 - Von Mises 5mm hullradius T=0.....	17
Figur 5. 11 - Von Mises 5mm hullradius T=150.....	17
Figur 6. 1 - Spenning/forlengelse i x-retning T 150.....	19
Figur 6. 2 - Endring i strekk-stivhet, x-retning.....	19
Figur 6. 3 - Endring strekk-styrke, x-retning.....	20
Figur 6. 4 - Brannmotstand ved en gitt slagenergi.....	21

Tabelliste

Tabell 3. 1 - Egenskaper til vinylester/E-glass	3
Tabell 4. 1 - Variabler og konstanter i beregningene	5
Tabell 6. 1 - spenning rundt hullet ved en gitt belastning.....	18
Tabell 6. 2 - slagenergi ved en gitt hullradius.....	20
Tabell 6. 3 - Sammendrag fra analyse i ANSYS og beregninger.....	21

1. Innledning

1.1 Bakgrunn for oppgaven

Det er viktig å forstå hvordan materialer oppfører seg når det blir utsatt for brann/høye temperaturer og slagskader. For konsekvensene av disse hendelsene kan være katastrofale. Eksempler på områder som kan være utsatt for slike hendelser, er brannskott i skip, subsea-strukturer, togfronter, samt seksjoneringsvegger for å nevne noen.

Det har tidligere blitt gjort studier på skadetoleransen mot slag (Duus, 2016) og oppførselen til kompositter under brann (Rahman, 2015). Disse har blitt sjekket hver for seg, men ingen eller veldig få har undersøkt når de opptrer samtidig, eller den samlede effekten de gir

1.2 Problemområde

Komposittmaterialer, og da spesielt fiberkompositter blir ofte brukt i marine applikasjoner og i stadig flere landbaserte applikasjoner. Styrken ved fiberkompositt er utmatting og korrosjonsmotstand i forhold til betong og stål. Svakhetene derimot er brannmotstand og evnene til å motstå slagskader i form av lavhastighet-sammenstøt.

Alle materialer som utsettes for høyere temperaturer/brann, vil gradvis brytes ned samtidig som materialet utsettes for en indre spenning. Isotrope materialer som metaller har lik oppførsel i alle retninger, uavhengig om det blir utsatt for mekanisk eller termisk belastning. Dette gjør at slike materialer er mer forutsigbart, enn det er for anisotrope materialer som kompositt. Metaller har også en evne til å absorbere energi fra slagkraft i form av plastisk deformasjon, mens mindre duktile materialer som glassfiber-armerte kompositter, blir energien absorbert i form av elastisk deformasjon, via forskjellige brudd-former.

Problemområdet oppgaven tar for seg er hvordan kapasiteten endrer seg, når det blir utsatt for høy temperatur, etter varierende slagskade i form av et ekvivalent hull. Ut i fra problemområde, blir forskerspørsmålet følgende:

Hvordan endres kapasiteten til fiberkompositter under en brann, etter påført slagskade?

1.3 Oppbygging og avgrensning

Opgaven er delt inn i syv deler. Første delen er en introduksjonsdel, som tar for seg bakgrunn for oppgaven, problemområde, avgrensning og oppbygging av oppgaven. Andre delen tar for seg metode for gjennomføring av oppgaven. Den tredje, fjerde og femte delen tar for seg materialegenskaper, beregninger og analyse. Den sjette delen tar for seg resultatene. Den syvende og siste delen tar for seg konklusjon og videre arbeid.

Opgaven er avgrenset til å gjelde for glassfiber-armerte kompositter. Skadeomfanget av slagkraften baserer seg på lavhastighet-sammenstøt, med innslagsvinkel vinkelrett på elementet, og en halvkuleformet tupp. Materialet skal heller ikke være en del av brannkilden.

2. Metode

2.1 Litteraturstudie

Her har det blitt søkt etter tidligere studier på området, for å få en forståelse om hvordan kompositter oppfører seg når det utsettes for ulike temperaturer, og den mekaniske responsen det gir. Videre har det blitt undersøkt skadeomfanget etter sammenstøt, og hvordan kreftene absorberes i kompositter. Det har blitt brukt søkemotorer som Google scholar for å finne tidligere studier og informasjon som har vært tilgjengelig, samt database som ScienceDirect.

Meste av teorien har jeg fra en bok som ikke er publisert, men brukes som kompendiet i undervisning på det tekniske universitet i Stockholm. Denne boken ble tilsendt etter forespørsel fra forfatteren, Dan Zenkert. Den grunnleggende teorien på hvordan materialer oppfører seg under brann, er fra utlandsopphold i København på det Danske tekniske Universitetet.

2.2 Numerisk og analytisk beregning

For å svare på oppgaven har det blitt laget et beregningsark i MathCAD og utført numerisk analyse. Kompleksiteten rundt tema i denne oppgaven, gjør at dataverktøy er en nødvendighet for å få en god forståelse på mikro- og makronivå, samt redusere produksjonskostnader av prøvestykker. Programmet som har blitt brukt i denne oppgaven er en studentversjon av ANSYS APDL, med noen begrensninger. Det blir sjekket for strekkapasitet, med kombinasjon av strekkraft og temperaturtøying. Resultatene blir deretter samlet i tabeller og grafer i Excel.

3. Materialegenskaper og oppbygging

Egenskapene og geometrien er hentet fra en tidligere masteroppgave (Duus, 2016). Bortsett fra de termiske egenskapene, som er hentet fra en eldre rapport (Johansen, 2008). I denne oppgaven presenteres kun de nødvendige egenskapene, og ingen overflødig informasjon. Resten av egenskapene finnes bakerst i vedlegg C. I denne oppgaven betraktes materialet som et svart legeme og brannisolert under en fullt utviklet brann, slik at det ses bort i fra varmestråling og termisk konduksjon. Komposittet er bygd opp som et laminat med 10 lag i orden $[0/90]$. Over en viss temperaturgrense, brytes materialet ned i form av flere prosesser. Derfor er makstemperaturen valgt til 150 grader celsius. Noe som har blitt forklart nærmere i et tidligere studium (Rahman, 2015).

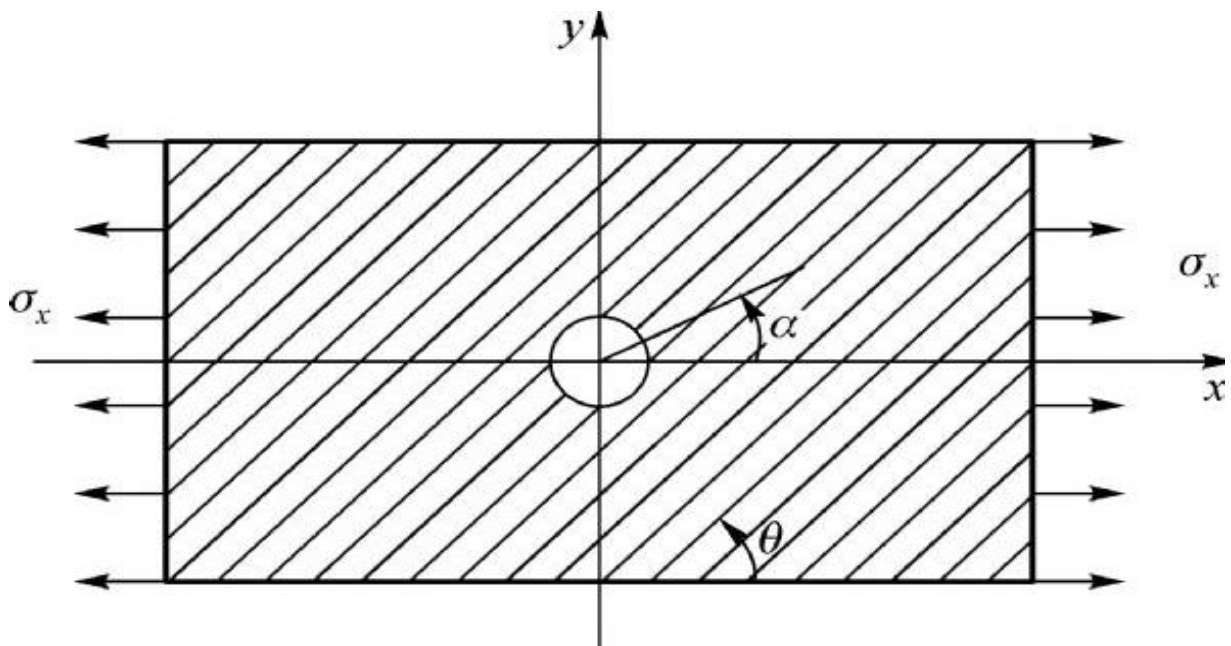
Tabell 3.1 under viser egenskapene for et vinylester/E-glass laminat.

Tabell 3. 1 - Egenskaper til vinylester/E-glass

Egenskaper	Verdi	Enhhet
<i>E-modul, E_1</i>	42280	[MPa]
<i>E-modul, E_2</i>	9650	[MPa]
<i>E-modul, E_3</i>	9650	[MPa]
<i>Skjærmodul, G_1</i>	3620	[MPa]
<i>Skjærmodul, G_2</i>	3620	[MPa]
<i>Skjærmodul, G_3</i>	3620	[MPa]
<i>Tverrkontraksjon, ν_{12}</i>	0.27	-
<i>Tverrkontraksjon, ν_{13}</i>	0.27	-
<i>Tverrkontraksjon, ν_{23}</i>	0.43	-
<i>Strekkekapasitet, X_S</i>	1133.4	[MPa]
<i>Trykkapasitet, X_T</i>	755.8	[MPa]
<i>Strekkekapasitet, Y_S</i>	64.8	[MPa]
<i>Trykkapasitet, Y_T</i>	194.5	[MPa]
<i>Skjærkapasitet, S_{XY}</i>	96.1	[MPa]
<i>Tyngdetetthet, ρ</i>	0.00186322	[g/mm ³]
<i>Volum</i>	50	[%]
<i>Varmeutvidelseskoeffisient, α_1</i>	0.00005	[°C ⁻¹]
<i>Varmeutvidelseskoeffisient, α_2</i>	0.00035	[°C ⁻¹]
<i>Makstemperatur for materialet</i>	150	[°C]

4. Analytisk beregning

Alle ligningene er samlet og plassert i kronologisk rekkefølge i vedlegg A. Dvs. det presenteres kun de viktigste ligningene, og alle mellom-regninger ligger i appendiksen. Beregningen er utført i MathCAD Express prime 4.0, med en begrenset versjon.



Figur 4. 1 - Laminat med hull

Figur 4.1 Illustrerer et laminat med et sirkulært hull som blir usatt for aksial belastning. Hvor både fiberorientering og kraft-resultant vil variere, noe som kommer til og vises senere i oppgaven.

Radiusen på hullet og temperaturen varieres, mens de andre parameterne holdes konstant. De fleste ligningene og teorien er hentet fra, og baserer seg på boken (*Foundation of fibre composites*, 2015).

Alle variabler og konstanter som er med i utregningene vises i Tabell 4.1 med forklaringer.

Tabell 4. 1 - Variabler og konstanter i beregningene

Variabler	forkortelse	enhet
Lengde	l	[mm]
Bredde	w	[mm]
Tykkelse til ett lag	h_i	[mm]
Total tykkelse	h	[mm]
hullradius	R	[mm]
Lokal stivhetsmatrise	[Q]	[MPa]
global stivhetsmatrise	[A]	[N/mm]
lastmatrise	[N]	[N/mm]
romtemperatur	T_{ref}	[°C]
Maks tillat temperatur uten skade	T_{max}	[°C]
Matrise for temperaturtøyning	[α_k]	[°C ⁻¹]
Temperaturlast	N^T	[N/mm ²]
Spenning i hvert enkelt lag	σ^k	[MPa]
Maksspenning i x-retning	$\sigma_{x.maks}$	[MPa]
Kritisk temperatur ved brudd	T_R	[°C]
Kritisk tid under brann	t_{crit}	[min]
Slagenergi	E_i	[Joule]
Konstanter	Forkortelse	Enhet
slagenergi uten konsekvens	E_{th}	[Joule]
hullradius uten konsekvens	L_0	[mm]
Minimum bæreevne ved en standardbrann	T_{60}	[min]
Korreksjonsfaktor	m	-
Korreksjonsfaktor	α	-

4.1 Beregninger med forklaring

Laminatet er bygd opp med bi-aksial fiberorientering, og 10 lag med 0- og 90-lag vekselvis. Det belastes med en kombinasjon av en-aksial strekkraft og en temperaturtøyning. Det blir også sjekket for kapasiteten ved referansetemperaturen $T=0$. Beregningene skal delvis brukes som verifisering for den numeriske modellen.

Regnearket er delt opp i to deler, hvor i den første delen regnes det ut kapasiteten til et uskada laminat ved bruk av laminat-teori. Den andre delen regnes det ut kapasiteten ved slagskade i form av et ekvivalent hull, og med varierende radius (R). Kapasiteten blir sjekket med og uten temperaturbelastning i begge tilfellene.

Generalisert hooks lov relaterer spenninger og tøyninger i et material på følgende måte:

$$\sigma_{ij} = C_{ijkl} \cdot \varepsilon_{kl}$$

$$\varepsilon_{ij} = S_{ijkl} \cdot \sigma_{kl}$$

$$Q_{ijkl} = C_{ijkl}$$

Det generelle uttrykket [Q] er stivhetsmatrisen til det betraktede laget i laminatet, hvor i og j står for retningen på kreftene og k står hvor fiberorientering. Siden et laminat betraktes som en ortotropisk plate, har man forskjellig egenskaper i alle tre hovedretninger. Tykkelsen i forhold til lengde og bredde er liten i dette tilfelle, slik at det kun opptrer membrankrefter i laminatet. Noe som betyr at vi har en plan spenningstilstand, hvor alle egenskaper og krefter ut av plateplanet er neglisjert.

Stivhetsmatrise til hvert enkelt lag i sitt lokale koordinatsystem blir da:

$$[Q_0] = \begin{bmatrix} 42995 & 2649 & 0 \\ 2649 & 9813 & 0 \\ 0 & 0 & 3620 \end{bmatrix} \quad [Q_{90}] = \begin{bmatrix} 9813 & 2649 & 0 \\ 2649 & 42995 & 0 \\ 0 & 0 & 3620 \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

Generell lastmatrise som viser kreftene med hensyn på stivhet, tøyning og rotasjoner. Hvor A er global stivhetsmatrise, og B er en sammenkoblingsmatrise mellom de forskjellige lagene og nøytralaksen. D-matrisen er stivhetsmatrisen ved momenter.

$$\begin{bmatrix} N \\ M \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ B & D \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \varepsilon_0 \\ \kappa \end{bmatrix}$$

Siden det i dette tilfelle kun er aksialbelastning og ingen momenter i form av torsjon eller bøyning, blir kun N-matrisen betraktet.

$$[N] = [A] \cdot [\varepsilon_0] - [N^T] \quad (4.2)$$

Den globale stivhetsmatrisen er gitt ved:

$$[A_{ij}] = \sum [Q_k] \cdot h_i \cdot \frac{1}{2} \quad (4.3)$$

Laminatet er balansert med like mange lag av hver vinkel, men det er bygd opp usymmetrisk i forhold til den geometriske nøytralaksen. Noe som fører til at man får en vridning innad i laminatet og den generelle stivheten blir noe redusert. Siden vi har kun aksialbelastning kan forholdet forenkles til:

$$[A_{ij}^*] = \left(A_{ij} - \frac{B_{ij}^2}{D_{ij}} \right) \quad (4.4)$$

Den reduserte stivhetsmatrisen blir da:

$$[A_{ij}^*] = \begin{bmatrix} 22041 & 2649 & 0 \\ 2649 & 22041 & 0 \\ 0 & 0 & 3620 \end{bmatrix} \cdot h$$

Varmeutvidelseskoeffisientene spesifisert tidligere settes inn på matrise-form og får:

$$[\alpha_0] := \begin{bmatrix} 5 \\ 35 \\ 0 \end{bmatrix} \cdot 10^{-6} \quad [\alpha_{90}] := \begin{bmatrix} 35 \\ 5 \\ 0 \end{bmatrix} \cdot 10^{-6} \quad (4.5)$$

Lastmatrisen ved en gitt temperaturlastning og tykkelse blir:

$$\Delta T := T_{max} - T_{ref} = 150 \text{ } ^\circ C \quad (4.6)$$

$$[N^T] = \Sigma [Q_k] \cdot [\alpha_k] \cdot h \cdot \Delta T \quad (4.7)$$

$$[N^T] = \begin{bmatrix} 0.332 \\ 0.332 \\ 0 \end{bmatrix} 0.4 \cdot 10 \cdot 150 = \begin{bmatrix} 199.2 \\ 199.2 \\ 0 \end{bmatrix} \frac{N}{mm}$$

Summerer opp de totale tøyningene i hele laminatet og får:

$$[\varepsilon_0] = ([N] + [N^T]) \cdot [A]^{-1} \quad (4.8)$$

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix}_0 = \begin{bmatrix} 46.03 \cdot N_x + 8067.6 \\ -5.53 \cdot N_x + 8067.6 \\ 0 \end{bmatrix} \cdot \frac{1}{(0.4 \cdot 10)} = \begin{bmatrix} 11.508 N_x + 2016.9 \\ -1.383 N_x + 2016.9 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Reaksjonskreftene i hvert enkelt lag.

$$[\sigma^k] = [Q^k] (\varepsilon_0 - \alpha_k \cdot \Delta T) \quad (4.9)$$

I dette tilfelle hvor det bare skal sjekkes for strekkapasitet, blir kun det laget med svakest kapasitet i strekk og lengst vekk fra nøytralaksen betraktet. Ut i fra oppbygging så vet man at lag med partall er 90-lag og har en strekkapasitet på 65MPa, sammenlignet med 0-laget som har strekkapasitet på 1133MPa. Spenningene som virker i 90-laget blir da:

$$\begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix}^{90} = \begin{bmatrix} 9813 & 2649 & 0 \\ 2649 & 42995 & 0 \\ 0 & 0 & 3620 \end{bmatrix} \cdot \left(\begin{bmatrix} 11.508 N_x + 2016.9 \\ -1.383 N_x + 2016.9 \\ 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 35 \\ 5 \\ 0 \end{bmatrix} \cdot 150 \right) 10^{-6}$$

$$\begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix}^{90} = \begin{bmatrix} 0.1092 \cdot N_x - 28.37 \\ -0.0289 \cdot N_x + 46.03 \\ 0 \end{bmatrix} MPa$$

Resultatet for en plate uten hull eller sprekk er regnet ut under, ved å sette inn strekkapasiteten for det betraktede laget i ligning (4.9). Her er kun x-retning av interesse, så tillate maksspenning ved T=0 og T=150 blir da:

$$\sigma_{x,max} = 593.7 MPa \quad (T = 0 \text{ } ^\circ C)$$

$$\sigma_{x,max} = 853.4 MPa \quad (T = 150 \text{ } ^\circ C) \quad (4.10)$$

I Plater med sprekker eller hull, vil spenningskonsentrasjonene som tangerer hullet eller sprekken være uendelig stor, slik at kapasiteten blir urealistisk lav vis man skal belage seg på vanlig bruddkriterier. Whitney og Nuismer kom opp med en løsning på dette ved å måle den gjennomsnittlige spenningen en gitt avstand vekk fra hullet. Når denne spenningen når strekkapasiteten for det uskada materialet, vil brudd inntreffe. Dette kriteriet blir kalt «Average stress»-kriteriet, og er gitt ved ligningen:

$$\frac{\sigma_N}{\sigma_0} = \frac{2(1-\zeta_2)}{2-\zeta_2^2-\zeta_2^4-(K_\infty-3)(\zeta_2^6-\zeta_2^8)} = \left(\frac{(1-\zeta_2)}{(1+\zeta_2)} \right)^{0.5} \quad (4.11)$$

$$\zeta_2 = \left(\frac{R}{R+a_0} \right)$$

Formelen over er basert på en plate med stor bredde relativt i forhold til hullradiusen, slik at korreksjonsfaktoren for dette når man har en begrenset platebredde er gitt ved:

$$\frac{K_T}{K_\infty} = \left(\frac{2 + \left(1 - \left(2 \frac{R}{w}\right)\right)^3}{3 \left(1 - \left(2 \frac{R}{w}\right)\right)} \right) \quad (4.12)$$

Den endelige kapasiteten for en plate i romtemperatur, med en gitt hullradius regnes ut ved:

$$\sigma_N = f_R \cdot \sigma_0 \quad f_R = \frac{\sigma_N}{\sigma_0} \cdot \frac{K_T}{K_\infty} \quad (4.13)$$

Når temperaturen og bruddstyrken er kjent, blir reststyrken uttrykt ved:

$$x = T = 0 \quad \sigma_N = \frac{f_R \cdot (\sigma_f)}{0.1092} = f_R \cdot 594 \quad \sigma_f = 64.8 \text{ MPa}$$

$$x = T = 150 \quad \sigma_N = \frac{f_R (\sigma_f + 28.37)}{0.1092} = f_R \cdot 853 \quad \sigma_f = 64.8 \text{ MPa}$$

Den generelle ligningen for spenninger rundt et hull i en plate er gitt ved:

$$\sigma_x = \frac{E_1}{1 - \nu_{12} \cdot \nu_{21}} \cdot \varepsilon_{11} + \frac{\nu_{21} \cdot E_1}{1 - \nu_{12} \cdot \nu_{21}} \cdot \varepsilon_{22} \quad (4.14)$$

Ved å snu om formelen fra tidligere lengre oppe, kan man finne kritisk temperatur ved en gitt reststyrken under varmepåvirkning og strekkapasitet:

$$x = \frac{(0.1092 \sigma_N + 25.135 - \sigma_f)}{0.357} = T_R \quad (^\circ\text{C}) \quad (4.15)$$

Temperaturen som regnes ut over, settes videre inn i formelen under (4.17) for hver hullradius. Siden det ikke er ett bestemt bruksområdet velges det en standard brannkurve med et gitt brannforløp. Det finnes flere typer kurver som er tilpasset de forskjellige bruksområdene, f.eks. en hydrokarbonkurve/jettbrann, som bruker i rør-applikasjoner og generelt hydrokarbonbaserte-materialer, eller RWS-kurven som brukes i tunneller osv. For nærmere informasjon om dette gå til appendiks G. Isolasjonsmengden bestemmes ut i fra temperaturdifferensen mellom temperaturen i en fullt utviklet brann, og toleransen til komposittet. Men dette har ikke blitt regnet ut her, og må tilpasses spesifikk mot bruksområdet.

Standard brannkurve følger funksjonen:

$$T = 20 + 345 \log(8t + 1) \quad (4.16)$$

Det tas utgangspunkt i et R-60 krav, som betyr krav til bæreevne i 60 minutter fra starten av en brann til overtenning, og videre til en fullt utviklet brann. Snudd om på formelen over blir den kritiske tiden:

$$t_{crit} = 0.125 \cdot 10^{\left(\frac{(T_{60} - T_{crit}) - 20}{345}\right)} \quad (\text{minutter}) \quad T_{crit} = 150 - T_R \quad T_{60} = 945 \quad (4.17)$$

Giancarlo Caprino fant ut at det er en sammenheng mellom reststyrken til kompositter utsatt for slagskade, og reststyrken til kompositter med et sirkulært hull (Caprino, 1983) & (Caprino, 1984). Dette bekreftes også i en tidligere masteroppgave (Duus, 2016). De to ligningen fra Caprino er gitt ved:

$$\frac{\sigma_R}{\sigma_0} = \left(\frac{L_0}{L}\right)^m \quad \frac{\sigma_R}{\sigma_0} = \left(\frac{E_{th}}{E_i}\right)^\alpha$$

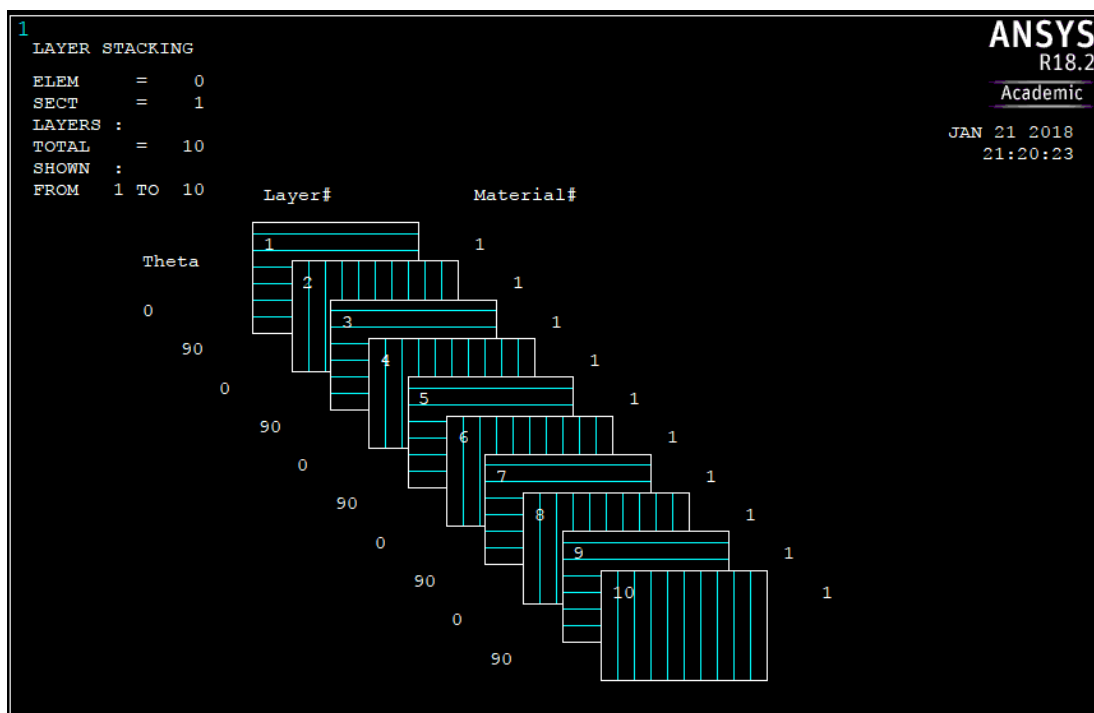
Ved å sette de to ligningene uttrykt hverandre kan man løse ut slagenergien (E_i), noe som gir ligningen:

$$E_i = \frac{E_{th}}{\alpha \sqrt[\alpha]{\left(\frac{L_0}{R}\right)^m}} \quad L = R \quad L_0 = 0.5 \quad m = 0.24 \quad E_{th} = 7 \quad \alpha = 0.17 \quad (4.18)$$

Hele regnearket ligger i vedlegg A, og alle utregninger er samlet under resultater i tabeller og grafer. Verdiene L_0 , α , m er konstanter som er bestemt empirisk og har blitt hentet ut fra en tidligere masteroppgave (Duus, 2016).

5. Numerisk analyse i ANSYS APDL

Laminatet er bygd opp som et lagvis skallelement med fiberorientering [0/90]. Hovedgeometrien er bygd opp med målene 28*244*h mm, hvor h er den totale tykkelsen for hele laminatet på. Det er laget en modell for hver hullradius. ANSYS-versjonen som har blitt brukt her er en studentversjon, og som har en begrensning på tillat antall elementer. For å slippe en veldig «tung» beregnings-fil, så har det blitt modellert kun ¼ av modellen. Men det vises hele modellen her pga. symmetri. Modellen viser grovere elementer utenfor hullområdet og gradvis reduksjon fra 1mm til 0.25mm rundt hullet.

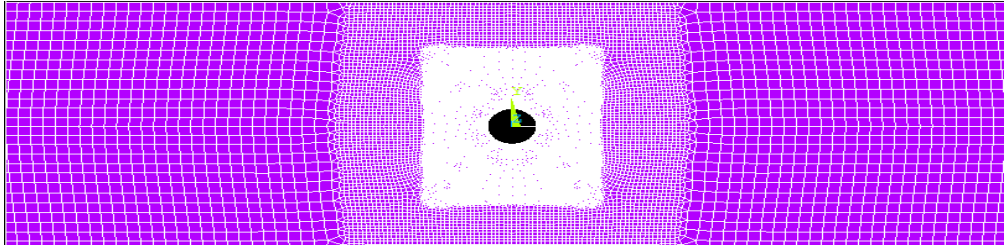


Figur 5. 1 - Lag-oppygging

For å finne en realistisk elementstørrelse, ble ett element over hullet sjekket for konvergens. Modellen konvergente med 1600 elementer rundt hullet for den minste hullradiusen, og for enkeltheten skyld ble denne elementstørrelsen bruk for all hullradiusene (0.5-5mm).



Figur 5. 2 - Oversikt antall elementer



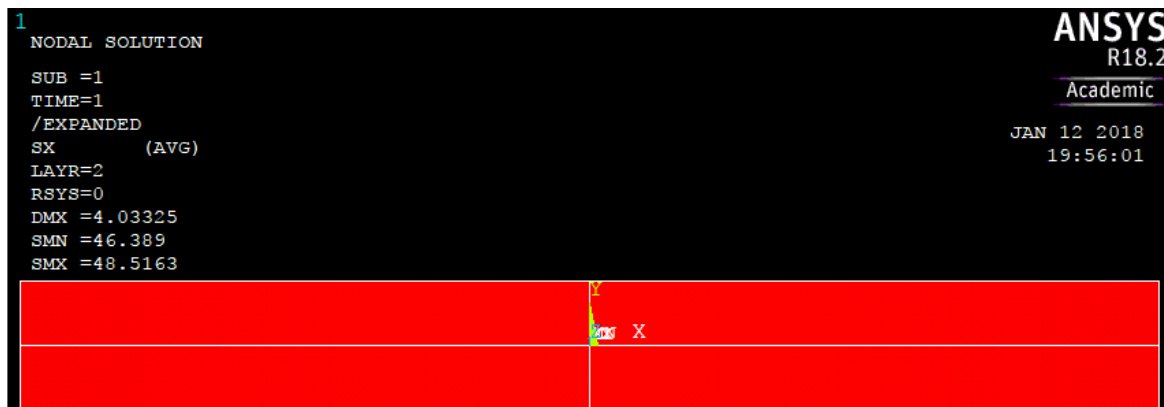
Figur 5. 3 - Nærbilde oversikt antall elementer

De Valgte grensebetingelsene er fastholding i midten av platen, mens randen har fri bevegelse og tverrutvidelse.

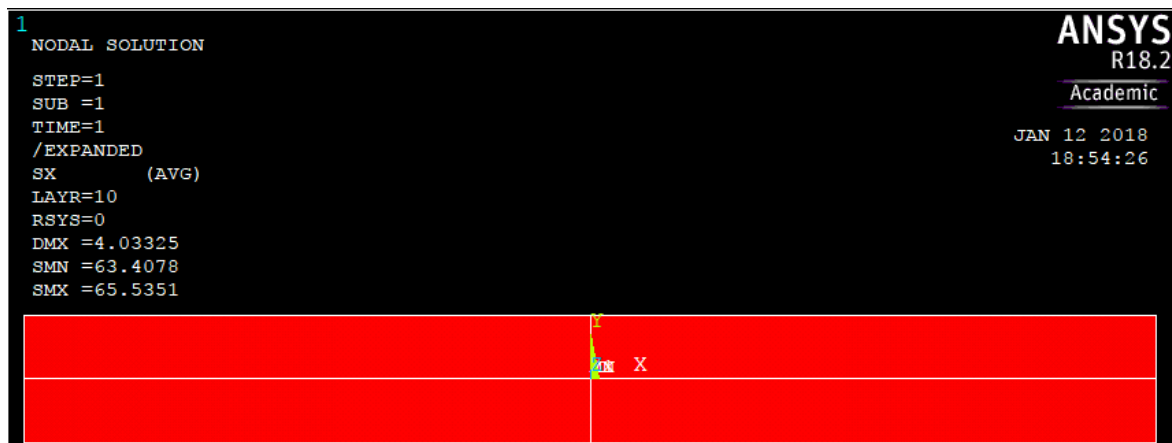
Først ses det på en plate uten hull. Siden laminatet er usymmetrisk og hvert lag har forskjellige egenskaper, vil ett lag gå i brudd først (FPF) og ikke flere samtidig. De lagene som har størst og minst absolutt spenning, ligger lengst vekk fra den geometriske nøytralaksen. De betraktede lagene blir derfor 2 og 10 (LAYR). Figur 5.4 og 5.5 viser makspenning i x-retning (SMX) for hvert lag ved samme belastning. Figur 5.3 viser et fargekart over maks- og minimumspenning, med stigende verdi fra blått mot rødt.



Figur 5. 4 – Spenningskart



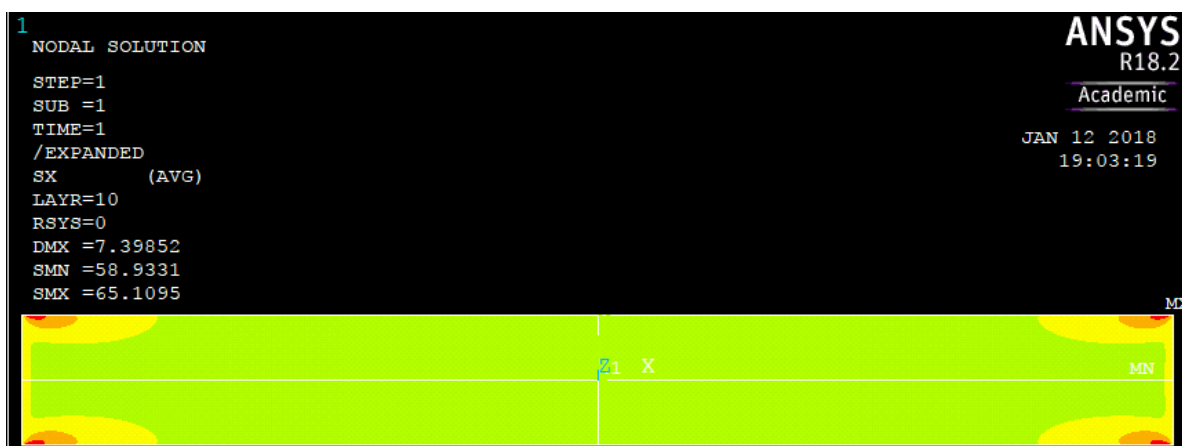
Figur 5. 5 – Lag 2, maks-spenning i x-retning ved $T = 0$



Figur 5. 6 - Lag 10, mak-spenning i x-retning ved T=0

Over ser man at lag 10 er det laget som har høyest spenning og vil ryke først. Dette er også tilfelle for alle analysene.

Figur 5.6 under viser den samme platen som ovenfor, bare nå med en temperaturbelastning på 150°C i tillegg til den ytre belastningen. Nå ble belastningen økt til 854MPa ved brudd, under samme kriteriet. Dette kan ses på deformasjonen, som har en nesten dobbel så stor verdi (DMX) som for platen med T=0.

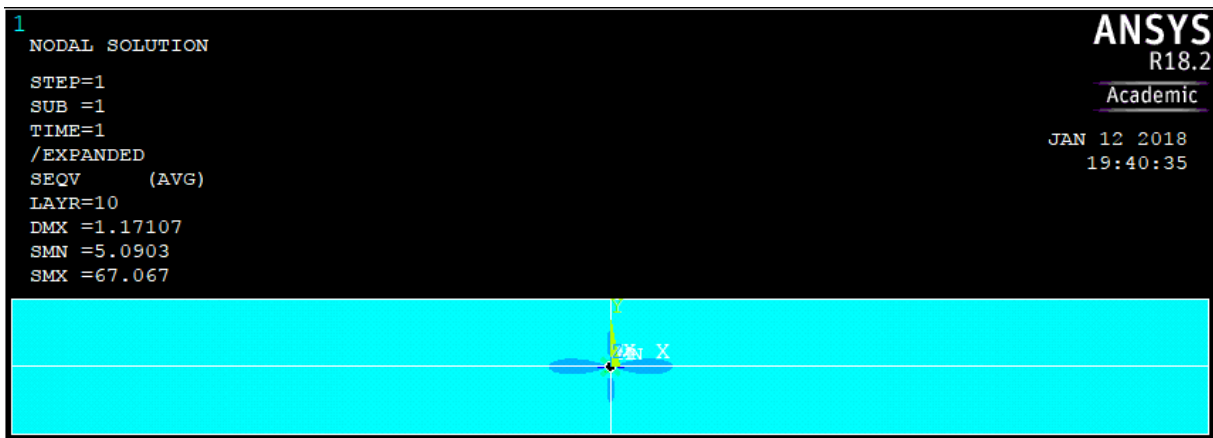


Figur 5. 7 - Lag 10, makspenning i x-retning ved T=150

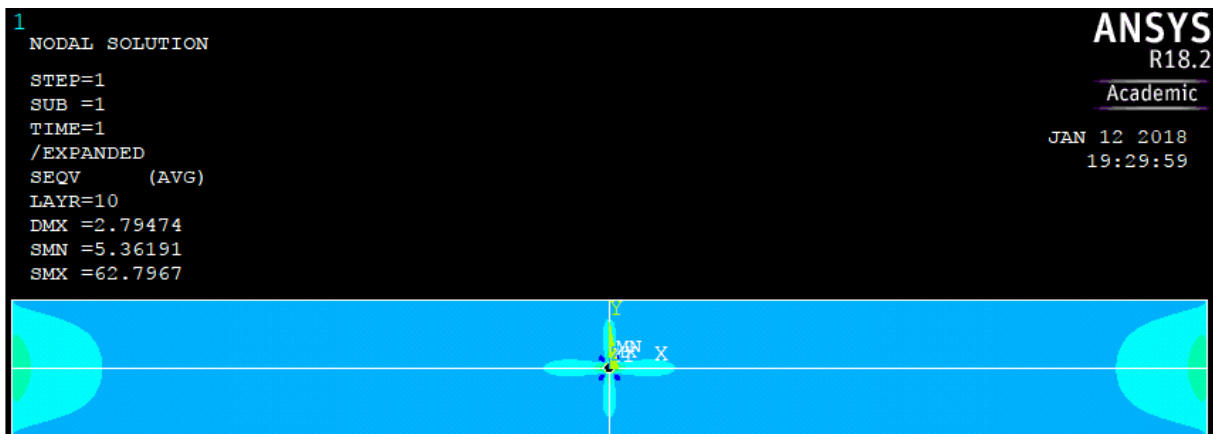
Figurene under viser von mises spenning for spenningskonsentrasjonen rundt hullet, når maks spenning-kriteriet (max stress) får verdien 1. For analysene, viser den mørkeste blåfargen lave absolutte spenninger, mens spenningene øker, når fargen nærmer seg rød (referer til spenningskart figur 5.4). Utgangspunktet var å utføre en ikke-linær analyse, hvor laminatet får en reduksjon i egenskaper etter hvert som spenningen øker, noe som skaper et progressivt brudd rundt hullet.

Problemet var når stivheten og styrken ble redusert, oppsto det konvergeringsproblemer og lastene ble urealistiske høye. Av hensyn til oppgavens fremdrift og liten tid, ble resultatene målt ved lineær analyse.

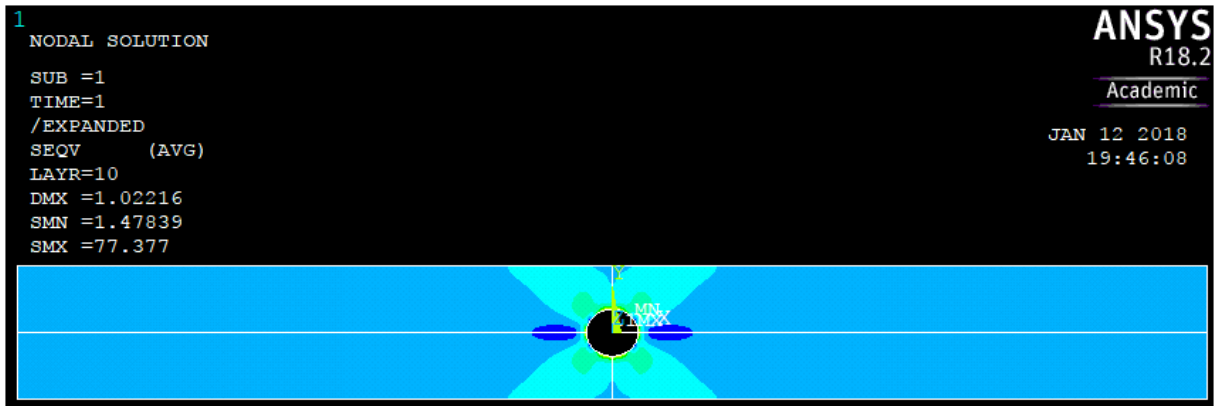
Spenningene ble derfor målt når spenningen rundt hullet nådde strekkapasiteten til det betraktede laget, som var på 65MPa. Figur 5.7 - 5.10 viser von mises-spenning, og man kan se forandringene rundt hullet ved forskjellig hullradius og temperatur. Maks. og min. verdiene er lokalisert rundt hullet ved romtemperatur, og min. verdiene flytter seg gradvis lengre vekk fra hullet ved høy temperatur. For å få et bedre bilde på nært hold, se i vedlegg E. Legg også merke til her forandringen i DMX-verdiene.



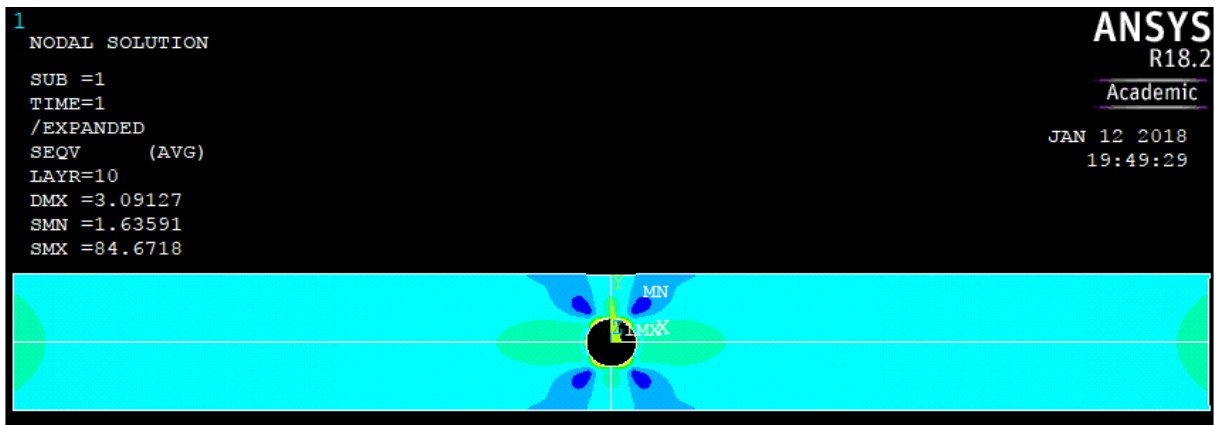
Figur 5. 8 - Von Mises 1mm hullradius T=0



Figur 5. 9 - Von Mises 1mm hullradius T=150



Figur 5. 10 - Von Mises 5mm hullradius T=0



Figur 5. 11 - Von Mises 5mm hullradius T=150

6. Resultat

6.1 Analysen i ANSYS

Resultatene fra Analysen i ANSYS er i samsvar med beregningene når det gjelder for laminatene uten hull. Dette indikerer at grensebetingelsene og oppsett av modellen i ANSYS er korrekt. Plater med hull vil oppnå uendelig høye spenninger rundt et hull (K-sonen), og skal man følge standard bruddkriterier vil kapasiteten bli urealistisk liten som tidligere nevnt. Dette løses ved å utføre en ikke-lineær analyse med progressivt brudd. Pga. konvergensproblemer ble det utført en lineær-analyse istedenfor. Spenningene og forlengelsen ble derfor målt utenfor hullets K-dominante sone. Det har blitt gått ut i fra lineær oppførsel til materialet, noe som betyr at forholdet mellom spenning og tøyning/forlengelse er konstant.

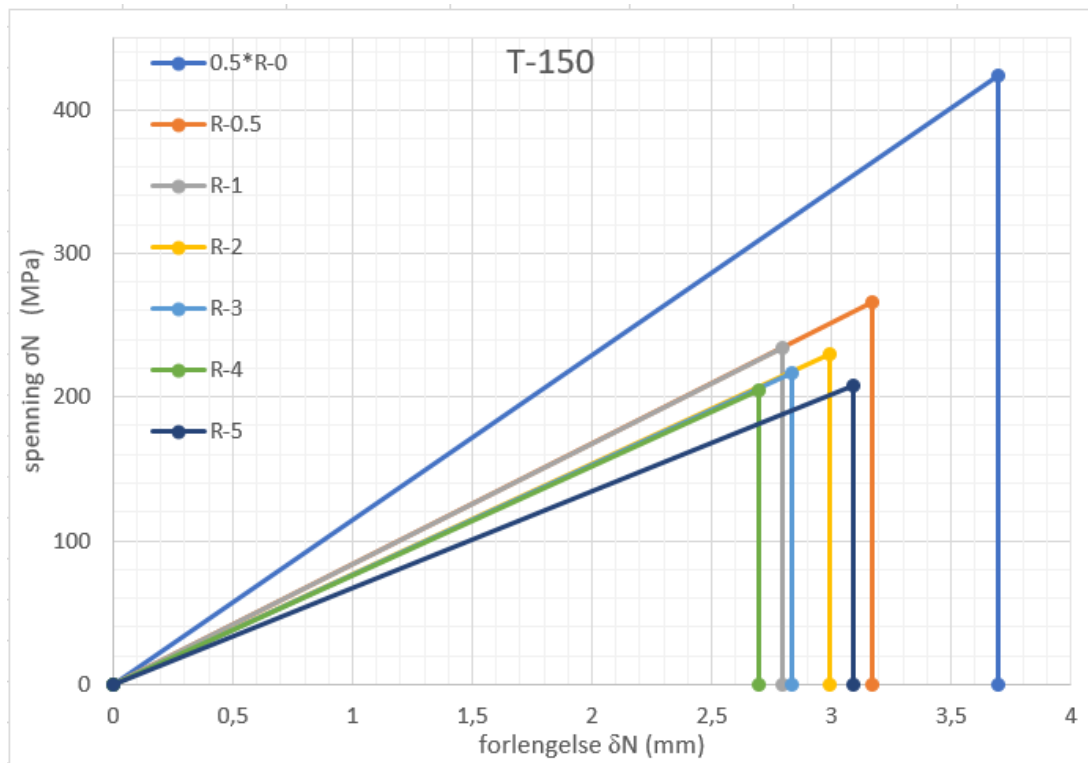
Tabell 6.1 under viser spenningene i x- og y-retning samt maksimum skjærspenning, ved en gitt belastning σ_N . Målingene ble tatt når spenningene ved hullet nådde det betraktede laget sin strekkapasitet. Resten av tabellene ligger i vedlegg B.

Tabell 6. 1 - spenning rundt hullet ved en gitt belastning

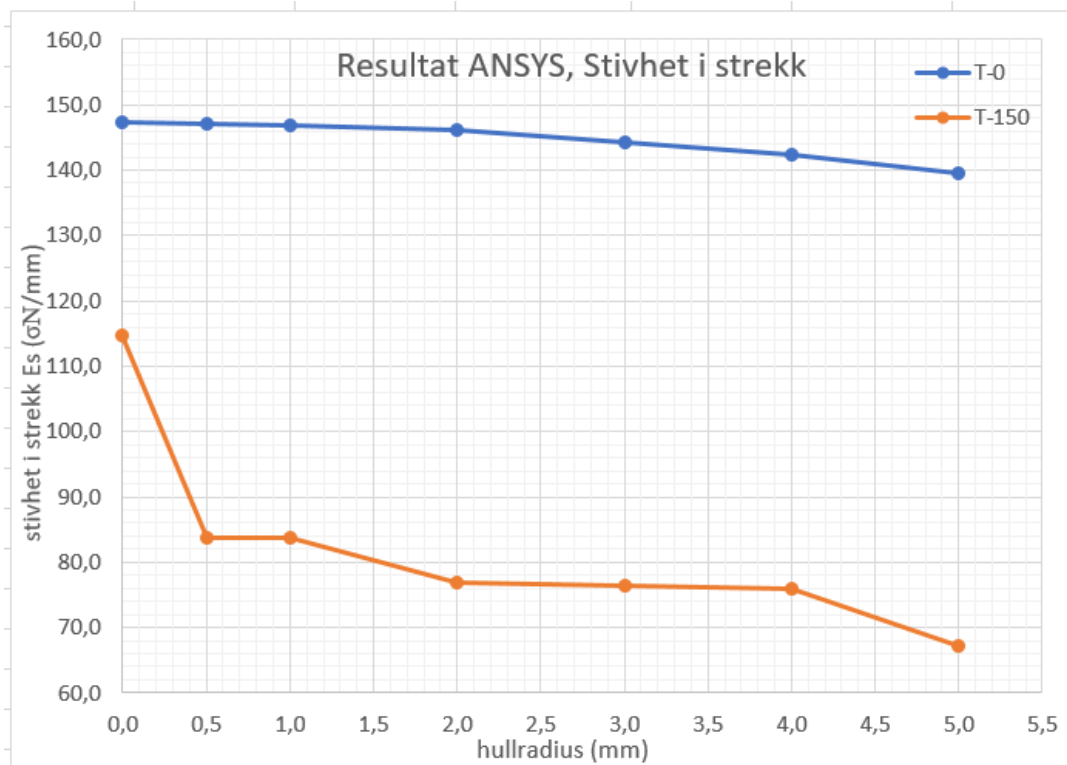
Temp. [°C]	Radius [mm]	σ_x [MPa]	σ_y [MPa]	σ_{xy} [MPa]	δ_N [mm]	σ_N [MPa]	K_T
0 (maks)	0	65.47	-6.701	0.00	4.022	594	1
	0.5	65.32	9.92	1.19	1.291	190	2.92
	1	65.30	17.49	2.70	1.171	172.2	2.65
	2	65.09	20.89	4.61	1.112	162.4	2.49
	3	65.10	20.80	5.39	1.085	156.5	2.41
	4	65.05	20.06	6.18	1.054	150	2.31
	5	65.52	19.03	6.96	1.022	142.5	2.19
150 (maks)	0	65.02	21.375	2.58	7.168	853	1
	0.5	65.22	28.50	2.18	3.168	265.5	4.09
	1	65.46	39.03	3.93	2.794	234	3.6
	2	65.59	47.93	6.53	2.992	230	3.54
	3	65.02	46.09	7.47	2.838	217	3.34
	4	65.04	43.66	8.43	2.695	204.4	3.14
	5	65.48	48.52	10.16	3.091	208	3.2

Figur 6.1 under vises forholdet mellom spenning og forlengelse for laminater med forskjellige hullradius ved T=150. Den negative delen av kurven er ikke realistisk, men grafen er laget for å illustrere materialoppførsel under temperaturbelastning. Den målte verdien (σ_N) for laminatet uten hull er mye større enn for laminater med, slik at det kun vises 50% av den reelle verdien i grafen for laminatet uten hull.

Videre i figur 6.2 vises det hvordan stivheten i strekk endrer seg under høy temperatur, og er regnet ut ved å ta spenning dividert med forlengelse. Grafen viser den reduserte stivheten med resultatene fra romtemperatur for sammenligning.



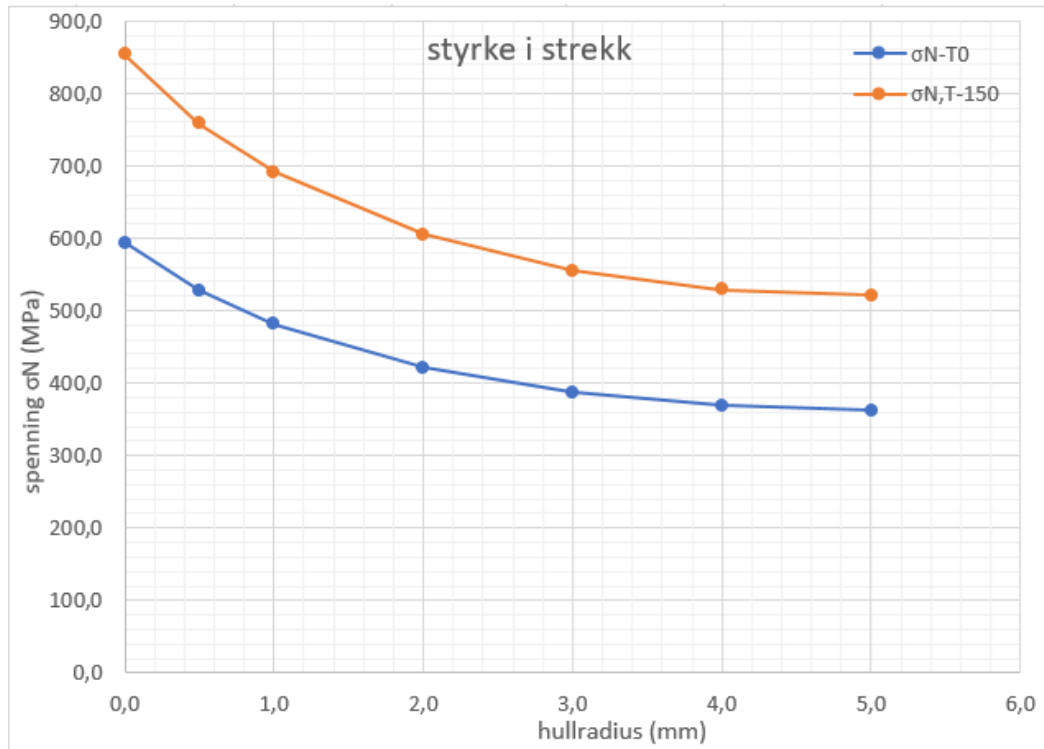
Figur 6. 1 - Spenning/forlengelse i x-retning T 150



Figur 6. 2 - Endring i strekk-stivhet, x-retning.

6.2 Beregninger

Figur 6.3 Viser den teoretiske strekkapasiteten fra regnearket både med og uten temperaturbelastning.



Figur 6. 3 - Endring strekk-styrke, x-retning

Tabell 6.2 viser sammenhengen mellom slagenergi og et hull som gir den samme reduksjonsfaktoren for reststyrke.

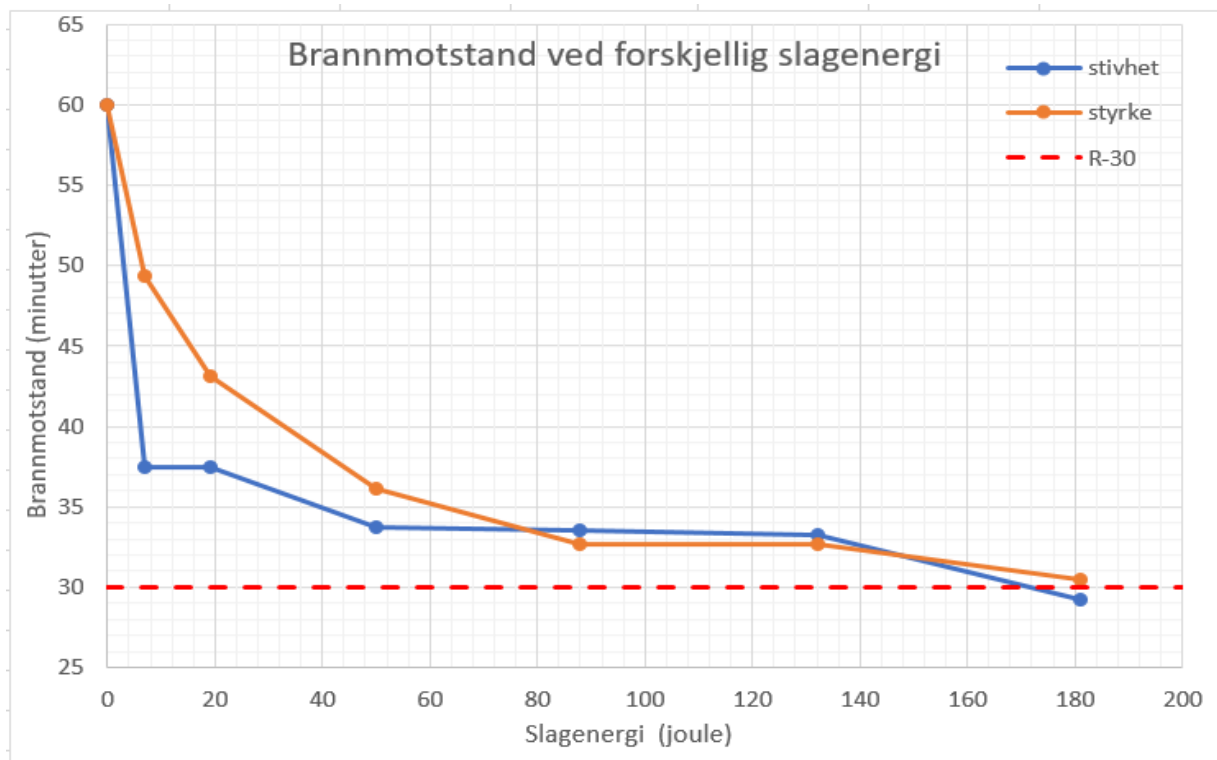
Tabell 6. 2 - slagenergi ved en gitt hullradius

Radius [mm]	0,5	1	2	3	4	5
Slagenergi [Joule]	7	19	50	88	132	181

Tabell 6.3 Viser sluttresultatet sammen med analysene fra ANSYS og beregningene. Den kritiske tiden ved forskjellig slagenergi/hullradius vises i figur 6.4.

Tabell 6. 3 - Sammendrag fra analyse i ANSYS og beregninger

Styrke (Beregninger)						
Slagenergi [J]	σ_{N-T0} [MPa]	σ_{N-T150} [MPa]	σ_N/σ_0	T_R [°C]	T_{crit} [°C]	t_{crit} [min]
0	593.4	853.7	1	150	0	60
7	527.7	757.8	0.89	121	29	49
19	481.1	690.9	0.81	100	50	43
50	421.1	604.7	0.71	74	76	36
88	386.8	555.4	0.65	59	91	33
132	368.6	529.3	0.62	59	91	33
181	362.7	520.8	0.61	48	102	30
Stivhet (ANSYS)						
Slagenergi [J]	E_N [MPa/mm]	E_N/E_0	T_R [°C]	T_{crit} [°C]	t_{crit} [min]	
0	114.7	1	150	0	60	
7	83.8	0.73	80	70	38	
19	83.8	0.73	79	71	37	
50	76.8	0.67	64	86	34	
88	76.5	0.67	63	87	34	
132	75.8	0.61	62	88	33	
181	67.3	0.59	42	108	29	



Figur 6. 4 - Brannmotstand ved en gitt slagenergi

6.3 Diskusjon

Fiber-armerte kompositter har en utfordring når det gjelder brannmotstand og skadetoleranse mot slagskader. I denne oppgaven har analyser og beregninger blitt utført ved å variere slagkraften, tilsvarende et hull med den samme reduserte kapasiteten som ved en slagskade. Det ble målt spenninger rundt hullet både i romtemperatur og med temperaturøkning på 150 grader celsius, ved en gitt belastning.

Kapasiteten ble målt ved en-aksial strekkbelastning kombinert med temperaturtøyning, og resultatene viste både redusert stivhet og styrke.

Strekk-stivheten (figur 6.2) får en kraftig reduksjon under varmepåvirkning, og selv uten hull så reduseres kapasiteten til 78% sammenlignet med et laminat ved romtemperatur. Når det ble laget et hull og tilført høy temperatur, reduseres kapasiteten til 73% ved den minste hullradiusen på 0.5mm. For deretter flate mer eller mindre ut mellom 2 og 4, før det blir en ny reduksjon ved den største hullradiusen på 5mm. Når det kommer til strekk-styrken (figur 6.3) ifølge beregningene, viser dette en mer harmonisk kurve og gradvis reduksjon i styrke fra 89% til 61% under samme betingelser som ved stivhet.

Sluttresultatet viser at brannmotstanden reduseres med 22 og 30 minutter ved den minste og største hullradiusen når det kommer til strekk-stivhet, mens resultatet viser at den reduserte tiden er 11 og 30 minutter for strekk-styrke.

7. Konklusjon

Det er viktig å forstå hvordan materialer oppfører seg når det blir utsatt for brann/høye temperaturer og slagskader. Eksempler på områder som kan være utsatt for slike hendelser, er brannskott i skip, subsea-strukturer, togfronter, samt seksjoneringsvegger for å nevne noen.

Alle materialer som utsettes for høyere temperaturer/brann, vil gradvis brytes ned samtidig som materialet utsettes for en indre spenning. Isotrope materialer som metaller har lik oppførsel i alle retninger, uavhengig om det blir utsatt for mekanisk eller termisk belastning. Dette gjør at slike materialer er mer forutsigbart, enn det er for anisotrope materialer som kompositt. Metaller har også en evne til å absorbere energi fra slagkraft i form av plastisk deformasjon, mens mindre duktile materialer som glassfiber-armerte kompositter, blir energien absorbert i form av elastisk deformasjon, via forskjellige brudd-former. Oppgaven tar for seg er hvordan kapasiteten endrer seg, når det blir utsatt for høy temperatur, etter varierende slagskade i form av et ekvivalent hull. Kapasiteten basere seg på brannmotstanden under en standard brannkurve.

Ut i fra forskerspørsmålet «Hvordan endres kapasiteten til fiberkompositter under en brann, etter påført slagskade?», blir konklusjonen at kapasiteten reduseres med 30 minutter ved 5mm hullradius, noe som tilsvarer 181 J i slagenergi. For å sette dette i perspektiv, tilsvarer det en diameterstørrelse på 850mm på en seksjoneringsvegg/brannskott, med romhøyde på 2400mm. Dette forutsetter at resultatet gjelder for det relative forholdet mellom platebredde og hullstørrelse.

Analysene ble ikke som forventet, noe som gir usikkerhet rundt den reelle kapasiteten. Likevel gir resultatet et godt bilde på hvordan materialet oppfører seg. Det skal nevnes at korrelasjonen mellom slagkraft og hullradius er basert på null deformasjon ut av planet ved sammenstøt, som gir noe konservative verdier. Det må også tas hensyn til den ikke-lineære oppførselen til kompositter under varmepåvirkning.

7.1 Videre arbeid

Forslag til videre arbeid er å utføre en ikke-lineær analyse med stivhets-reduksjon pga. temperatur, og styrke-reduksjon pga. progressivt brudd rundt hullet. Det burde sjekkes for varierende fiberorientering og trykkbrudd. Eventuelt bøyestrekke når det er bygd opp som et sandwich-element. Man burde også utføre fullskala test eller mindre tester, for å se om det er i samsvar med beregningene

Litteraturliste

- Caprino, G. (1983, 8 18). On the prediction of residual strenght for notched laminates. *Journal of material science*, ss. 2269-2273.
- Caprino, G. (1984, 6 18). Residual strenght prediction of impacted CFRP laminates. ss. 508-518.
- D.Zenkert&M.Battley. (2015). *Foundation of fibre composites*.
- Dutta & Hui. (2000). *creep rupture of GFRP composites at elevated tempearture*. New Orleans: Computers and structures.
- Duus, P. (2016). *Low-velocity impact and residual strenght analysis of glass reinforced composites*.
- Dvorak, B.-E.-D. &. (2007). *Enhancement of blast resistant of sandwich plates*. Cairo: elsevier.
- Johansen, H. (2008, 10 10). *materialteknologi.hig.no*. Hentet fra <http://www.ansatt.hig.no/henningj/materialteknologi/Materiallare/arbeidsplan/kompositter/Materiallaere-kompositter-kompendium.pdf>
- Rahman, A. A. (2015). *Fire structural properties of sandwich composites*.

Vedlegg A - Beregninger i MathCAD

Geometri

$$b := 27 \text{ mm} \quad h_i := 0.4 \text{ mm} \quad \text{Lag } [0/90]_5$$

$$l := 244 \text{ mm} \quad h = n - \text{lag} \cdot h_i = 10 \cdot h_i$$

Materialegenskaper

$$E_1 := 42.28 \cdot 10^3 \text{ MPa} \quad \nu_{12} := 0.270$$

$$E_2 := 9.65 \cdot 10^3 \text{ MPa} \quad \nu_{21} := 0.0616$$

$$G_{12} := 3.62 \cdot 10^3 \text{ MPa}$$

$$G_{12} := 3.62 \cdot 10^3 \text{ MPa}$$

Styrke

$$X_T := 1133.42 \text{ MPa} \quad \varepsilon_{t,x} := 0.0268 \quad \alpha_1 := 5 \cdot 10^{-6}$$

$$X_C := 755.78 \text{ MPa} \quad \varepsilon_{c,x} := 0.0178 \quad \alpha_2 := 35 \cdot 10^{-6}$$

$$Y_T := 64.83 \text{ MPa} \quad \varepsilon_{t,y} := 0.0067$$

$$Y_C := 194.50 \text{ MPa} \quad \varepsilon_{c,y} := 0.0201$$

$$S_{12} := 96.10 \text{ MPa} \quad \gamma_{12} := 0.0265$$

laster

$$T_{ref} := 0 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$T_{max} := 150 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\sigma_{ij} = C_{ijkl} \cdot \varepsilon_{kl}$$

$$\varepsilon_{ij} = S_{ijkl} \cdot \sigma_{kl}$$

$$Q_{ijkl} = C_{ijkl}$$

$$Q_{11} := \frac{E_1}{1 - \nu_{12} \cdot \nu_{21}} = 42995 \text{ MPa}$$

$$Q_{12} := \frac{\nu_{21} \cdot E_1}{1 - \nu_{12} \cdot \nu_{21}} = 2649 \text{ MPa}$$

$$Q_{22} := \frac{E_2}{1 - \nu_{12} \cdot \nu_{21}} = 9813 \text{ MPa}$$

$$Q_{33} := G_{12} = 3620 \text{ MPa}$$

$$[Q_0] = \begin{bmatrix} 42995 & 2649 & 0 \\ 2649 & 9813 & 0 \\ 0 & 0 & 3620 \end{bmatrix}$$

$$[Q_{90}] = \begin{bmatrix} 9813 & 2649 & 0 \\ 2649 & 42995 & 0 \\ 0 & 0 & 3620 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} N \\ M \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ B & D \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \varepsilon_0 \\ \kappa \end{bmatrix}$$

$$[N] = [A] \cdot [\varepsilon_0] \quad [M] = 0$$

$$[N] = [A] \cdot [\varepsilon_0] - [N^T]$$

$$[\varepsilon_0] = ([N] + [N^T]) \cdot [A]^{-1}$$

$$[A_{ij}] = \sum [Q_k] \cdot h_i \cdot \frac{1}{2}$$

$$[B_{ij}] = \Sigma [Q_k] \cdot h_i \cdot \frac{1}{2} \frac{(z_i^2 - z_i - 1^2)}{2} = \frac{1}{2} \left(Q_0 \cdot \frac{(z_i^2 - z_i - 1^2)}{2} + Q_{90} \cdot \frac{(z_i^2 - z_i - 1^2)}{2} \right)$$

$$[D_{ij}] = \Sigma [Q_k] \cdot h_i \cdot \frac{1}{2} \frac{(z_i^3 - z_i - 1^3)}{3} = \frac{1}{2} \left(Q_0 \cdot \frac{(z_i^3 - z_i - 1^3)}{3} + Q_{90} \cdot \frac{(z_i^3 - z_i - 1^3)}{3} \right)$$

$$B_{11} = \Sigma \left(\frac{9}{4} \cdot Q_0 + \frac{11}{4} \cdot Q_{90} \right) h_i^2 = 19795.9$$

$$D_{11} = \Sigma \left(\frac{85}{6} \cdot Q_0 + \frac{115}{6} \cdot Q_{90} \right) h_i^3 = 51019.4$$

$$[A_{ij}^*] = \left(A_{ij} - \frac{B_{ij}^2}{D_{ij}} \right)$$

$$A^* = A_{11} - \frac{B_{11}^2}{D_{11}} \quad A_{11}^* = A_{22}^* = 22041 \quad B_{12} = B_{66} = 0$$

$$[A_{ij}^*] = \begin{bmatrix} 22041 & 2649 & 0 \\ 2649 & 22041 & 0 \\ 0 & 0 & 3620 \end{bmatrix} \cdot h \quad [A_{ij}^*]^{-1} = \begin{bmatrix} 46.03 & -5.53 & 0 \\ -5.53 & 46.03 & 0 \\ 0 & 0 & 276.24 \end{bmatrix} \cdot \frac{10^{-6}}{h}$$

$$\Delta T := T_{max} - T_{ref} = 150 \text{ } ^\circ C$$

$$[\alpha_0] = \begin{bmatrix} 5 \\ 35 \\ 0 \end{bmatrix} \cdot 10^{-6} \quad [\alpha_{90}] = \begin{bmatrix} 35 \\ 5 \\ 0 \end{bmatrix} \cdot 10^{-6}$$

$$[N^T] = \Sigma [Q_k] \cdot [\alpha_k] \cdot h_i$$

$$[N^T] = \left(\begin{bmatrix} 42995 & 2649 & 0 \\ 2649 & 9813 & 0 \\ 0 & 0 & 3620 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 5 \\ 35 \\ 0 \end{bmatrix} \cdot \frac{5}{10} + \begin{bmatrix} 9813 & 2649 & 0 \\ 2649 & 42995 & 0 \\ 0 & 0 & 3620 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 35 \\ 5 \\ 0 \end{bmatrix} \cdot \frac{5}{10} \right) 10^{-6}$$

$$[N^T] = \begin{bmatrix} 0.332 \\ 0.332 \\ 0 \end{bmatrix} 0.4 \cdot 10 \cdot 150 = \begin{bmatrix} 199.2 \\ 199.2 \\ 0 \end{bmatrix} \frac{N}{mm}$$

$$[\varepsilon_0] = ([N] + [N^T]) \cdot [A]^{-1}$$

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix}_0 = \begin{bmatrix} 46.03 & -5.53 & 0 \\ -5.53 & 46.03 & 0 \\ 0 & 0 & 276.24 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} N_x + 199.2 \\ 199.2 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 46.03 N_x + 8067.6 \\ -5.53 N_x + 8067.6 \\ 0 \end{bmatrix} \frac{1}{h}$$

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix}_0 = \begin{bmatrix} 46.03 \cdot N_x + 8067.6 \\ -5.53 \cdot N_x + 8067.6 \\ 0 \end{bmatrix} \cdot \frac{1}{(0.4 \cdot 10)} = \begin{bmatrix} 11.508 N_x + 2016.9 \\ -1.383 N_x + 2016.9 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$[\sigma^k] = [Q^k] (\varepsilon_0 - \alpha_k \cdot \Delta T^0)$$

$$\begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix}_0^0 = \begin{bmatrix} 42995 & 2649 & 0 \\ 2649 & 9813 & 0 \\ 0 & 0 & 3620 \end{bmatrix} \cdot \left(\begin{bmatrix} 11.508 N_x + 2016.9 \\ -1.383 N_x + 2016.9 \\ 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 5 \\ 35 \\ 0 \end{bmatrix} \cdot 150 \right) 10^{-6}$$

$$\begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix}_0^0 = \begin{bmatrix} 0.4911 \cdot N_x + 45.905 \\ 0.0169 \cdot N_x - 28.37 \\ 0 \end{bmatrix} MPa$$

$$\begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix}^{90} = \begin{bmatrix} 9813 & 2649 & 0 \\ 2649 & 42995 & 0 \\ 0 & 0 & 3620 \end{bmatrix} \cdot \left(\begin{bmatrix} 11.508 N_x + 2016.9 \\ -1.383 N_x + 2016.9 \\ 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 35 \\ 5 \\ 0 \end{bmatrix} \cdot 150 \right) 10^{-6}$$

$$\begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix}^{90} = \begin{bmatrix} 0.1092 \cdot N_x - 28.37 \\ -0.0289 \cdot N_x + 46.03 \\ 0 \end{bmatrix} MPa$$

$$\sigma_x^0 = 0.4911 \cdot \sigma_x + 45.91 = 1133 MPa$$

$$\sigma_x^{\infty} = 0.1092 \cdot \sigma_x - 28.37 = 64.8 MPa$$

laminat uten hull.

$$\sigma_{x,max} = 593.7 MPa \quad (T = 0 \text{ } ^\circ C)$$

$$\sigma_{x,max} = 853.4 MPa \quad (T = 150 \text{ } ^\circ C)$$

$$\frac{\sigma_N}{\sigma_0} = \frac{2(1-\zeta_2)}{2-\zeta_2^2-\zeta_2^4-(K_\infty-3)(\zeta_2^6-\zeta_2^8)} = \left(\frac{1-\zeta_2}{1+\zeta_2} \right)^{0.5}$$

$$\zeta_2 = \left(\frac{R}{R+a_0} \right)$$

$$\frac{K_T}{K_\infty} = \left(\frac{2 + \left(1 - \left(2 \frac{R}{w} \right) \right)^3}{3 \left(1 - \left(2 \frac{R}{w} \right) \right)} \right)$$

$$\sigma_N = f_R \cdot \sigma_0 \quad f_R = \frac{\sigma_N}{\sigma_0} \cdot \frac{K_T}{K_\infty}$$

$$\sigma_0 = \sigma_{x,max} \quad a_0 = 3.7 \text{ mm} \quad w = 28 \text{ mm} \quad R = \text{hullradius}$$

$$R=0.5 \quad f_R = \left(\frac{2 + \left(1 - \left(2 \frac{0.5}{28} \right) \right)^3}{3 \left(1 - \left(2 \frac{0.5}{28} \right) \right)} \right) \cdot \left(\frac{1 - \left(\frac{0.5}{0.5 + 3.7} \right)}{\left(1 + \left(\frac{0.5}{0.5 + 3.7} \right) \right)} \right)^{0.5} = 0.888$$

$$R=1 \quad f_R = \left(\frac{2 + \left(1 - \left(2 \frac{1}{28} \right) \right)^3}{3 \left(1 - \left(2 \frac{1}{28} \right) \right)} \right) \cdot \left(\frac{1 - \left(\frac{1}{1 + 3.7} \right)}{\left(1 + \left(\frac{1}{1 + 3.7} \right) \right)} \right)^{0.5} = 0.810$$

$$R=2 \quad f_R = \left(\frac{2 + \left(1 - \left(2 \frac{2}{28} \right) \right)^3}{3 \left(1 - \left(2 \frac{2}{28} \right) \right)} \right) \cdot \left(\frac{1 - \left(\frac{2}{2 + 3.7} \right)}{\left(1 + \left(\frac{2}{2 + 3.7} \right) \right)} \right)^{0.5} = 0.709$$

$$R=3 \quad f_R = \left(\frac{2 + \left(1 - \left(2 \frac{3}{28} \right) \right)^3}{3 \left(1 - \left(2 \frac{3}{28} \right) \right)} \right) \cdot \left(\frac{1 - \left(\frac{3}{3 + 3.7} \right)}{\left(1 + \left(\frac{3}{3 + 3.7} \right) \right)} \right)^{0.5} = 0.651$$

$$R=4 \quad f_R = \left(\frac{2 + \left(1 - \left(2 \frac{4}{28} \right) \right)^3}{3 \left(1 - \left(2 \frac{4}{28} \right) \right)} \right) \cdot \left(\frac{1 - \left(\frac{4}{4 + 3.7} \right)}{\left(1 + \left(\frac{4}{4 + 3.7} \right) \right)} \right)^{0.5} = 0.620$$

$$R=5 \quad f_R = \left(\frac{2 + \left(1 - \left(2 \frac{5}{28}\right)\right)^3}{3 \left(1 - \left(2 \frac{5}{28}\right)\right)} \right) \cdot \left(\frac{\left(1 - \left(\frac{5}{5+3.7}\right)\right)^{0.5}}{\left(1 + \left(\frac{5}{5+3.7}\right)\right)} \right) = 0.611$$

+

$$\sigma_x = \frac{E_1}{1 - \nu_{12} \cdot \nu_{21}} \cdot \varepsilon_{11} + \frac{\nu_{21} \cdot E_1}{1 - \nu_{12} \cdot \nu_{21}} \cdot \varepsilon_{22}$$

$$\sigma_f = 9813 \cdot (11.508 \sigma_N + 2016.9 - 35 \cdot x) \cdot 10^{-6} + 2649 \cdot (-1.383 \sigma_N + 2016.9 - 5 \cdot x) \cdot 10^{-6}$$

$$x = T = 0 \quad \sigma_N = \frac{f_R \cdot (\sigma_f)}{0.1092} = f_R \cdot 594 \quad \sigma_f = 64.8 \text{ MPa}$$

$$x = T = 150 \quad \sigma_N = \frac{f_R (\sigma_f + 28.37)}{0.1092} = f_R \cdot 853 \quad \sigma_f = 64.8 \text{ MPa}$$

$$x = \frac{(0.1092 \sigma_N + 25.135 - \sigma_f)}{0.357} = T_R \quad (^\circ\text{C})$$

$$T = 20 + 345 \log(8 t + 1)$$

$$t_{\text{crit}} = 0.125 \cdot 10^{\left(\frac{(T_{\text{m}} - T_{\text{crit}}) - 20}{345}\right)} \quad (\text{minutter}) \quad T_{\text{crit}} = 150 - T_R \quad T_{60} = 945$$

$$\frac{\sigma_R}{\sigma_0} = \left(\frac{L_0}{L}\right)^m \quad \frac{\sigma_R}{\sigma_0} = \left(\frac{E_{th}}{E_i}\right)^\alpha$$

$$E_i = \frac{E_{th}}{\alpha \sqrt{\left(\frac{L_0}{R}\right)^m}} \quad L = R \quad L_0 = 0.5 \quad m = 0.24 \quad E_{th} = 7 \quad \alpha = 0.17$$

Vedlegg B – Tabeller og Grafer

Tabell 1. – Sammendrag fra analyse og beregninger

Styrke (Beregninger)						
Radius [mm]	σ_N -T0 [MPa]	σ_N -T150 [MPa]	σ_N/σ_0	T_R [°C]	T_{crit} [°C]	t_{crit} [min]
0	593.4	853.7	1	150	0	60
0.5	527.7	757.8	0.89	121	29	49
1	481.1	690.9	0.81	100	50	43
2	421.1	604.7	0.71	74	76	36
3	386.8	555.4	0.65	59	91	33
4	368.6	529.3	0.62	59	91	33
5	362.7	520.8	0.61	48	102	30
Stivhet (fra ANSYS)						
Radius [mm]	E_N [MPa/mm]	E_N/E_0	T_R [°C]	T_{crit} [°C]	t_{crit} [min]	
0	114.7	1	150	0	60	
0.5	83.8	0.73	80	70	38	
1	83.8	0.73	79	71	37	
2	76.8	0.67	64	86	34	
3	76.5	0.67	63	87	34	
4	75.8	0.61	62	88	33	
5	67.3	0.59	42	108	29	

Tabell 2. – Fra analysen i ANSYS

spenning og forlengelse				
T0	Radius [mm]	σ_N [MPa]	δ_N [mm]	σ_N/σ_x
	0	593.4	4.029	-
	0.5	190	1.291	2.923
	1	172	1.171	2.634
	2	162.4	1.112	2.495
	3	156.5	1.085	2.404
	4	150	1.054	2.306
	5	142.5	1.022	2.175

Tabell 3. – Fra analysen i ANSYS

spenning og forlengelse				
T150	Radius [mm]	σ_N [MPa]	δ_N [mm]	σ_N/σ_x
	0	853.7	7.392	-
	0.5	265.5	3.168	4.071
	1	234	2.794	3.575
	2	230	2.992	3.507
	3	217	2.838	3.338
	4	204.4	2.695	3.142
	5	208	3.091	3.172

Tabell 3. – Fra analysen i ANSYS

Maks spenning				
	Radius [mm]	σ_x [MPa]	σ_y [MPa]	σ_{xy} [MPa]
T0	0	65.47	-6.70	0.00
	0.5	65.32	9.92	1.19
	1	65.30	17.49	2.70
	2	65.09	20.89	4.61
	3	65.10	20.80	5.39
	4	65.05	20.06	6.18
	5	65.52	19.03	6.96

Tabell 4. – Fra analysen i ANSYS

Maks spenning				
	Radius [mm]	σ_x [MPa]	σ_y [MPa]	σ_{xy} [MPa]
T150	0	65.05	21.38	2.58
	0.5	65.22	28.50	2.18
	1	65.46	39.03	3.93
	2	65.59	47.93	6.53
	3	65.02	46.10	7.47
	4	65.04	43.66	8.43
	5	65.58	48.52	10.16

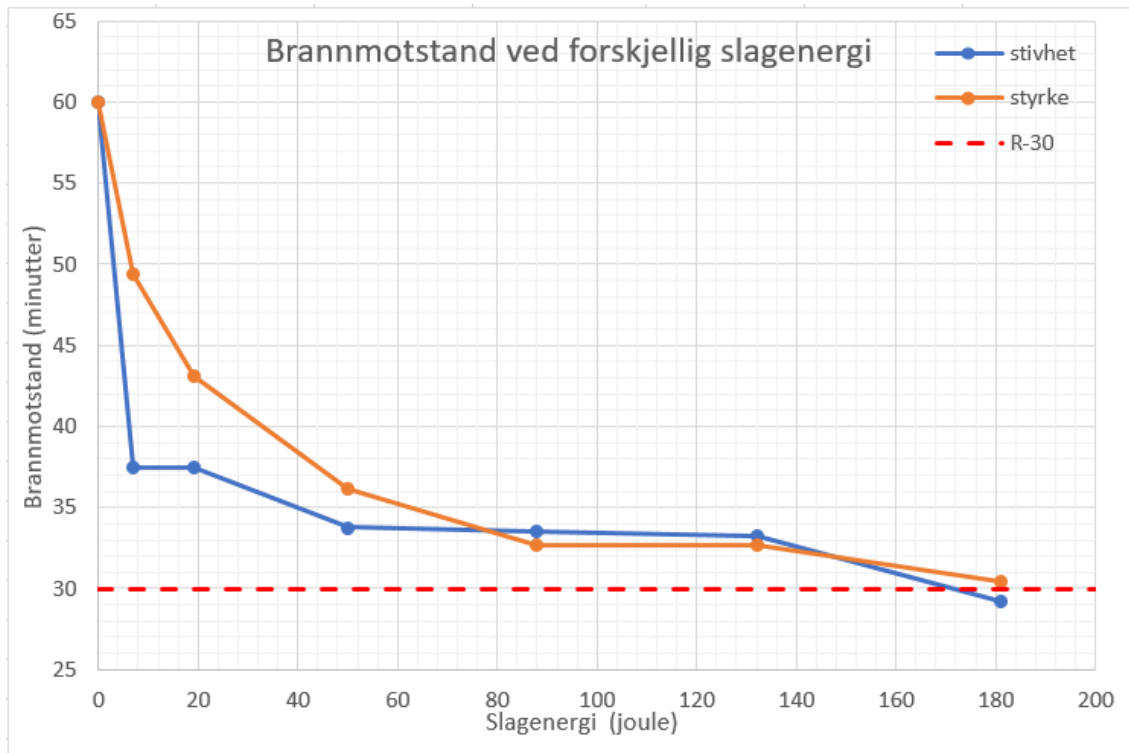
Tabell 5. – Fra analysen i ANSYS

Min spenning				
	Radius [mm]	σ_x [MPa]	σ_y [MPa]	σ_{xy} [MPa]
T0	0	63.41	-7-28	0.00
	0.5	-2.13	-51-68	-26.20
	1	-2.37	-59-53	-26.53
	2	-2.42	-63-82	-27.87
	3	-2.63	-70-49	-28.16
	4	-2.68	-74-26	-27.99
	5	-2.82	-78-75	-27.84

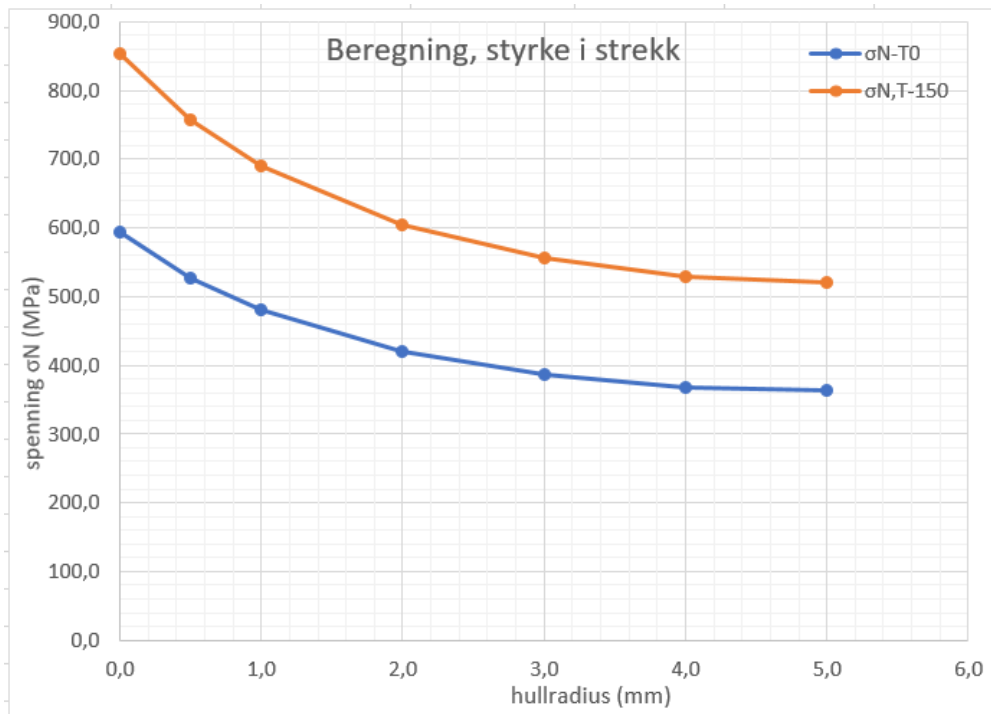
Tabell 6. – Fra analysen i ANSYS

Min spenning				
	Radius [mm]	σ_x [MPa]	σ_y [MPa]	σ_{xy} [MPa]
T150	0	58.88	-7.61	0.00
	0.5	-28.46	-56.59	-36.42
	1	-26.34	-64.78	-35.99
	2	-30.55	-73.99	-39.48
	3	-29.23	-81.97	-38.97
	4	-27.77	-86.47	-38.15
	5	-34.78	-96.39	-40.64

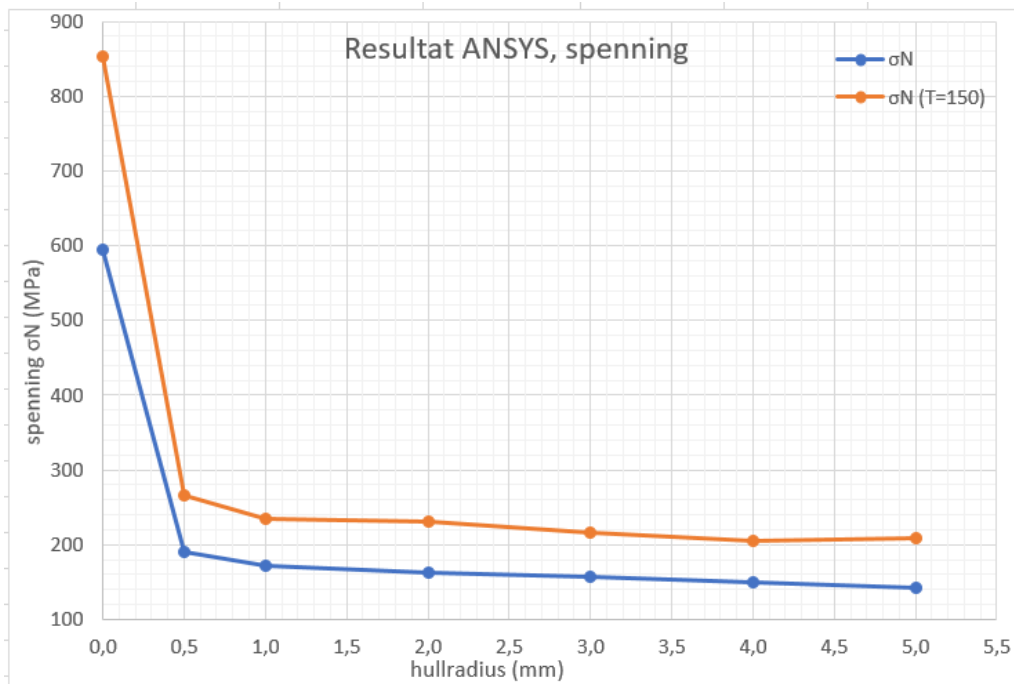
1. – Brannmotstand ved forskjellig slagenergi



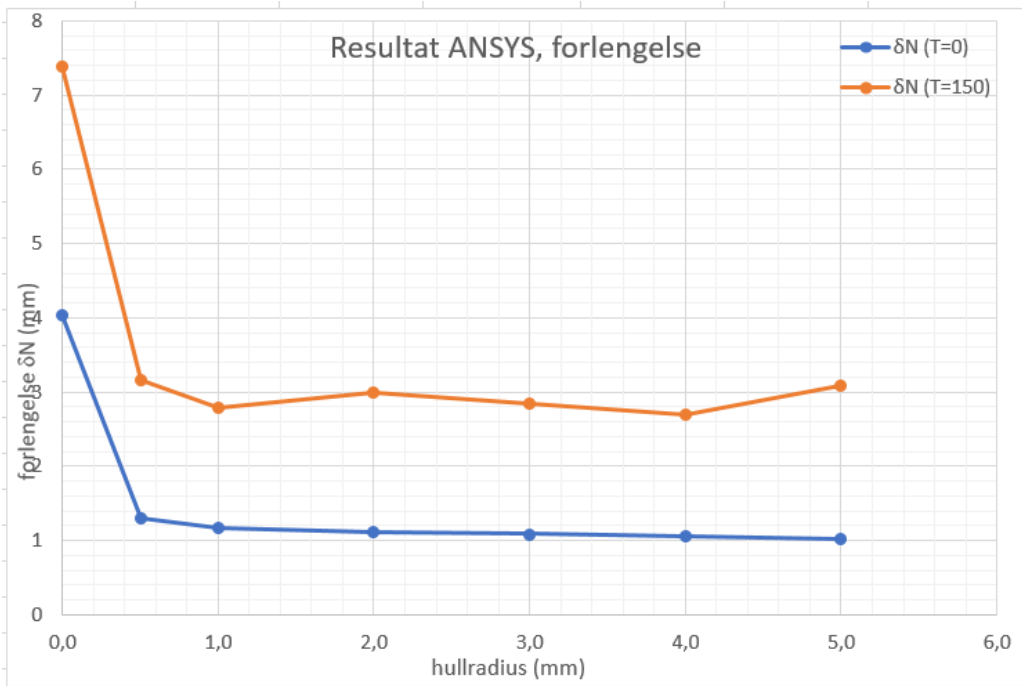
2. – Spenninger fra beregning



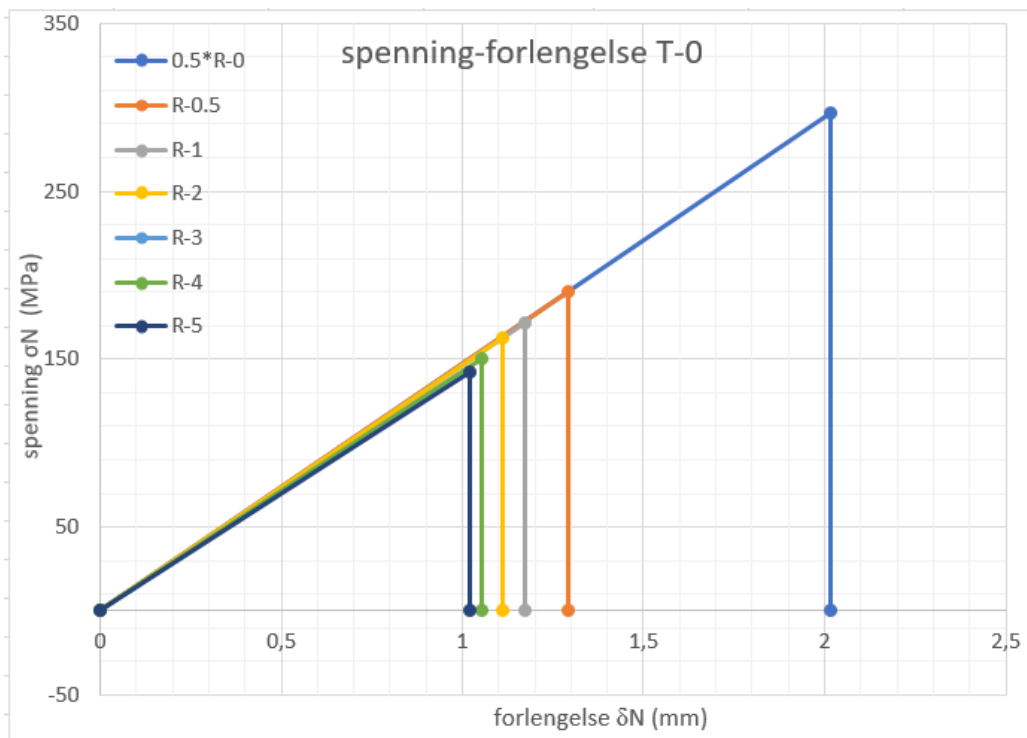
3. – Spenninger fra analyse i ANSYS



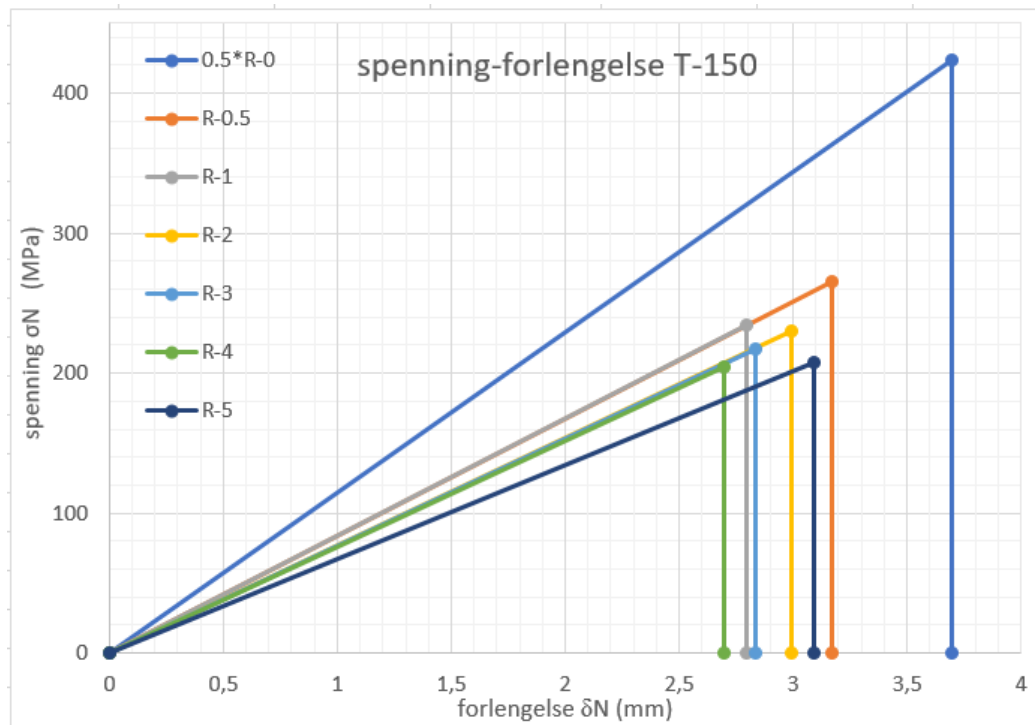
4. – Forlengelse fra analyse i ANSYS



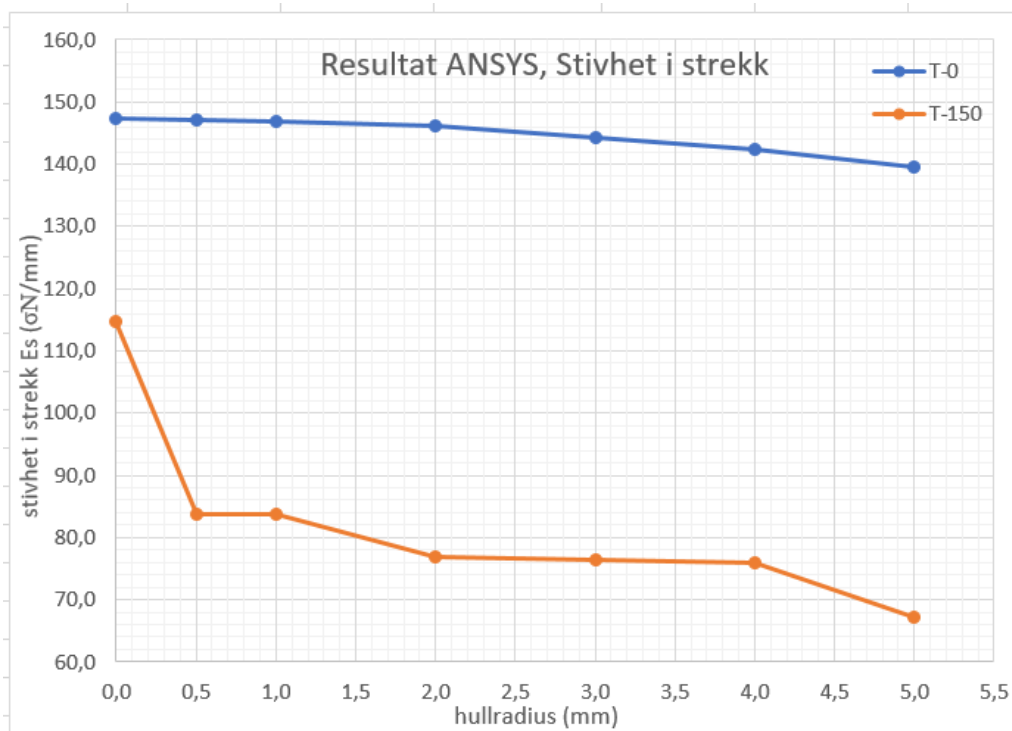
15. – Spenninger-forlengelse, $T = 0$



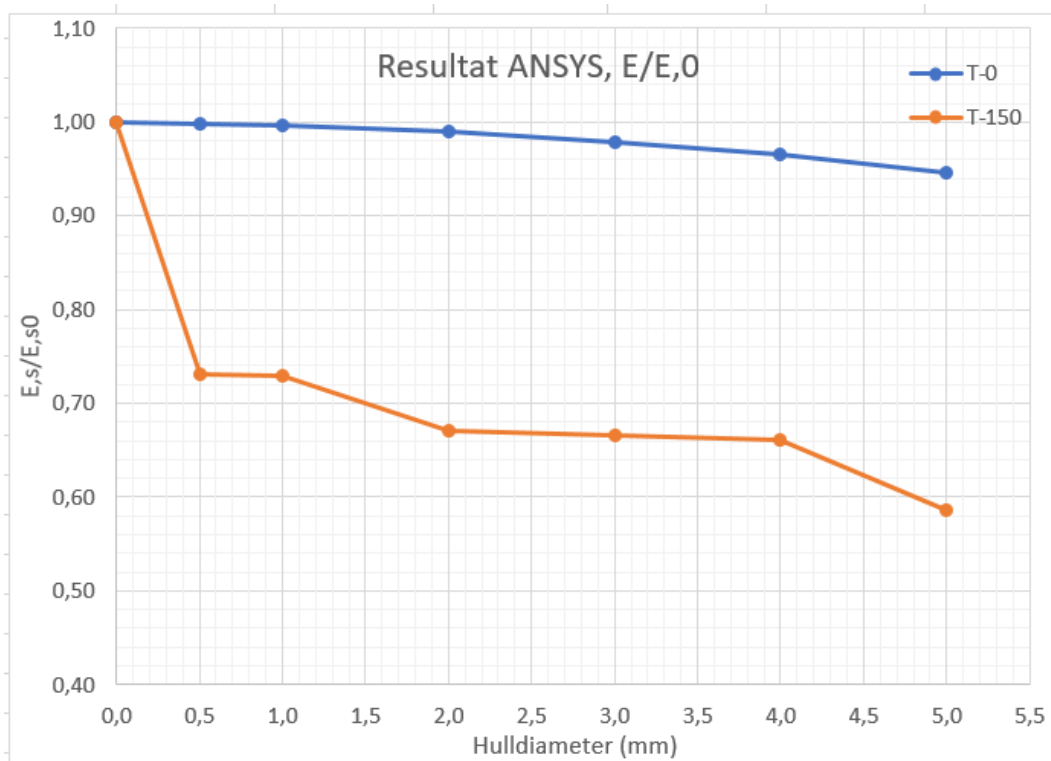
6. – Spenninger-forlengelse, $T = 150$



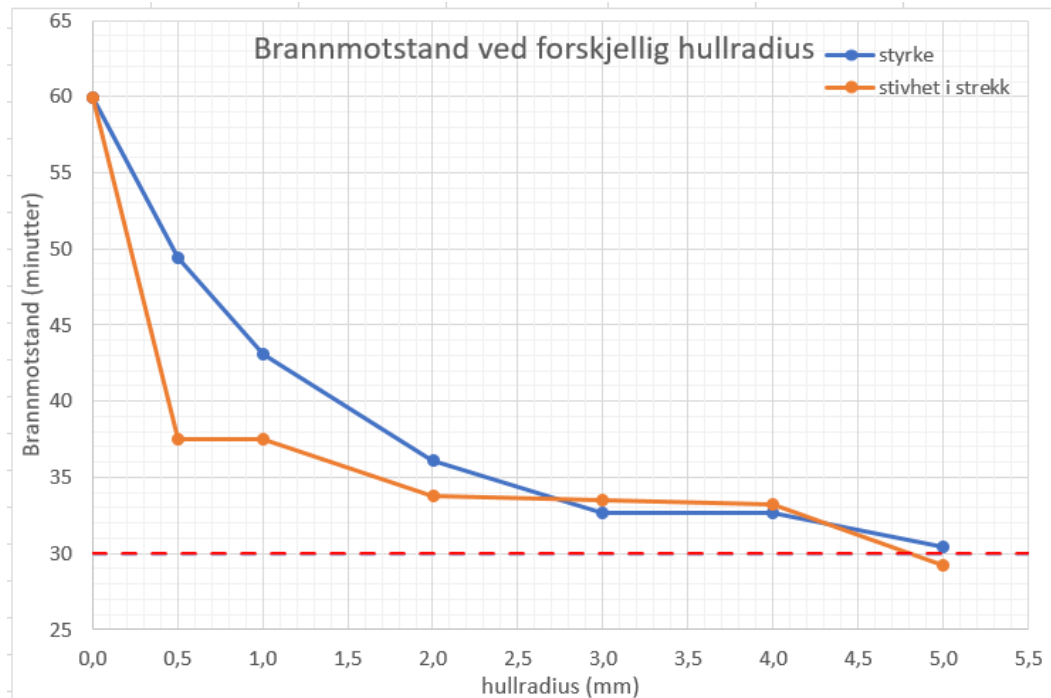
7. – Stivhet i strekk



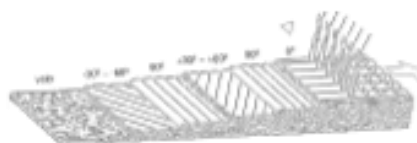
8. – Relativ stivhet i strekk



9. – Brannmotstand ved forskjellig hullradius



Vedlegg C – Egenskaper og styrke



SELCOM

Multiaxial Technology

SELCOM SRL
via della Torre n. 17
31010 FREGONA (TV) ITALY
phone +39 0438 581188
modem fax +39 0438 581172
manual fax +39 0438 916049

cap. soc. EURO 101490,00
cod. fisc. e p.i. IT 02389430285
trib. Treviso n. 33842 reg. soc.
c.c.i.a.a. Treviso n. 208024
M. estero TV 028944
E-mail: info@selcom-ri.com

MULTIAXIAL TECHNOLOGY (MCT)
unidirectional & stitched multi-axial fabrics in
glass, carbon, aramid... and hybrids for the
composite industry
internet: www.selcom-ri.com

Technical Data Sheet

PRODUCT NAME EBXS900M100	Code
Biaxial fabric 0° 90° in 'E' glass stitched with chop strand mat	01311000900

layers	angle	fiber	glass	tex	areal weight	areal weight		
	tolerance				gr/m ²	tolerance		
0°	± 1°	PPG Roving 2002	L4	1200 - 600	448	± 3 %		
90°	± 1°	PPG Roving 2002	L4	1200	448	± 3 %		
random	-	PPG 'E' glass 7864	L4	2800 - 2400	100	± 3 %		
0°	-	polyester	L4	7,8	8	± 3 %		
TOTAL gr/m ²					-	-	1006	± 3 %

Characteristics for fabric

lunghezza rotolo - standard roll length:	md 60 ± 1 md
larghezza rotolo - standard roll width:	mm 1270 ± 10 mm
peso netto rotolo - net roll weight:	Kg. 64 ± 3 %
toleranza sulla grammatura - areal weight tolerance:	± 3 % (± 30 gr/m ²)
grammatura teorica - theoretical areal weight:	gr/m ² 1006
identificazione rotolo - ident roll:	EBXS900M100
identificazione yarn:	two green yarns
tipo di legatura - knitting type:	tricot
fila di legatura - stitch yarn:	polyester, texturated, 7,8 tex

Characteristics for filament yarn

tipo fibra - type:	PPG Roving 2002
binder content:	0.66 - 0.66 % (nominal)
produttore - manufacturer:	PPG Industries
densità volumetrica - volumetric density:	gr/cm ³ 2.68 - 2.62
diametro filamento - filament diameter:	µm 12 - µm 17
resistenza a trazione - tensile strength:	Mpa 1900 - 2400 (ASTM D-2343) *
modulo a trazione - tensile modulus:	Gpa 69 - 76 (ASTM D-2343) *
allungamento a rottura - elongation at break:	3.6 - 4 %

* Determined from resin impregnated rovings according to ASTM D-2343

Regione IT 03/04/12

Quality Assurance
Ing. Giovanni Ferdin

NR: THIS DOCUMENT IS COMPUTER GENERATED AND ITS VALID WITHOUT SIGNATURE



TYPE APPROVED PRODUCT - CERTIFICATE NO. K-4016

SELCOM Srl is a weaver of technical textiles from continuous filaments (rovings). All information supplied by or on behalf of SELCOM Srl in relation to its products, whether in the nature of data, recommendations or otherwise, has been given in good faith and in compliance with technical and commercial information supplied by raw materials (fibre) manufacturers. All information aforementioned are supported by its own experience and believed reliable but SELCOM Srl declines all responsibility in respect of the application, processing or use of the aforementioned information or any consequence thereof. The buyer undertakes all liability in respect of the application, processing or use of the aforementioned information or product, whose quality and other properties he shall verify or any consequence thereof. SELCOM Srl believes that it is the user that shall determine the suitability of a product for its end-use and the user that assumes all liability in connection therewith. © M10-1-02.DOC Ed.01-Rev.00-12.05.10





AME™ 6001 INF-120 Premium Marine Resin / Infusion

AME 6001 INF-120 Infusion resin is a high performance 100% epoxy vinyl ester resin, that have both excellent processability and superior mechanical properties. AME 6001 INF-120 resin utilizes the proven history of resilience, blister resistance, excellent fatigue life and toughness of AME 6000 resins with new technology that further increases strength and improves surface profile for the boat builder that demands faultless, long lasting performance.

Greater Resistance to Fatigue Failure
Excellent Surface Profiles with Low Shrink
Increased Hydrolysis Resistance
Exceeds ISO 12215-1 Type "A" mechanical requirements
Exceeds DNV Grade "1" mechanical requirements

Typical liquid resin properties	Property at 25 °C			
	Property	Value	Unit	Method
	Viscosity, cone & plate	170	mPas	ISO 2884
	Styrene content	39	%	SFS 4864
	Geltime, 1,5% Norox MCP-75	120	min	D 006

Typical cured resin properties	Property			
	Property	Value	Unit	Method
	Postcured for 24h at 60 °C			
	Tensile strength	79	MPa	ASTM D-638
	Tensile modulus	3450	MPa	ASTM D-638
	Elongation at break	5,2	%	ASTM D-638
	Flexural strength	149	MPa	ASTM D-790
	Flexural modulus	3620	MPa	ASTM D-790
	Heat Deflection Temperature	91	°C	ASTM D-648
	Ultimate Heat Deflection temperature*	111	°C	ASTM D-648

* postcured for 2h at 60°C + 3h at 138°C

Application and use AME 6001 INF-120 resin is especially recommended for marine applications using the Infusion process. AME 6001 INF-120 is designed as a premium resin for high performance off-shore motor and sailing yachts, that remain in the water for an extended period of time.

Remark: For more information on curing characteristics of AME 6001 INF-120 Infusion resin and adjustments of Inhibitor (NLC-10) and peroxide (MCP-75) levels for optimal curing, please contact your Ashland representative.



Ashland is committed to the continuous evolution of technology and service solutions that promote health, safety and environmental protection around the world.
* Registered service mark of the American Chemistry Council. © Registered trademark and ™ trademarks of Ashland Inc.

ASHLAND
With good chemistry great things happen.™

Vedlegg D – Loggfil fra ANSYS APDL

!PLATE!MED!HULL

!ELEMENTTYPE:

/PREP7

ET,1, SHELL281

KEYOPT,1,1,0

KEYOPT,1,5,0

KEYOPT,1,8,1

KEYOPT,1,9,0

KEYOPT,1,10,0

KEYOPT,1,11,0

!EGENSKAPER:

TOFFST,273

MPTEMP,,,,,,,,

MPTEMP,1,0

MPDATA,DENS,1,,0.00186322

MPDATA,EX,1,,42280

MPDATA,EY,1,,9650

MPDATA,EZ,1,,9650

MPDATA,PRXY,1,,0.27 MPDATA,PRYZ,1,,0.43

MPDATA,PRXZ,1,,0.27

MPDATA,GXY,1,,3620 MPDATA,GYZ,1,,3430

MPDATA,GXZ,1,,3620

MPDATA,ALPX,1,,5E-006

MPDATA,ALPY,1,,3.5E-005

MPDATA,ALPZ,1,,3.5E-005

!BRUDDSTYRKE:

FC,1,S,XTEN,1133

FC,1,S,YTEN,65

FC,1,S,ZTEN,65

FC,1,S,XCMP,-756 FC,1,S,YCMP,-195

FC,1,S,ZCMP,-195

FC,1,S,XY,96 FC,1,S,YZ,96 FC,1,S,XZ,96

FC,1,EPEL,XTEN,0.0268 FC,1,EPEL,YTEN,0.0067

FC,1,EPEL,ZTEN,0.0067

FC,1,EPEL,XCMP,-0.0179 FC,1,EPEL,YCMP,-0.0202

!GRENSEBETINGELSER:

nselect,s,loc,x,-0.01,0.01 d,all, ux,0
d,all,roty,0 d,all,rotz,0 nall
nselect,s,loc,y,-0.01,0.01 d,all, uy,0
d,all,rotx,0 d,all,rotz,0 nall
lselect,s,line,,3 nselect,s,1
d,all,uz,0 nall eall

!LASTER:

/solu
tunif,0 !TEMPERATUR
lselect,s,line,,3
sfl,all,presx,-600 !KRAFT
solv

!PLATE!UTEN!HULL

!ELEMENTTYPE:

/PREP7
ET,1,SHELL281
KEYOPT,1,1,0
KEYOPT,1,5,0
KEYOPT,1,8,1
KEYOPT,1,9,0
KEYOPT,1,10,0
KEYOPT,1,11,0

!EGENSKAPER:

TOFFST,273
MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,0
MPDATA,DENS,1,,0.00186322
MPDATA,EX,1,,42280
MPDATA,EY,1,,9650
MPDATA,EZ,1,,9650
MPDATA,PRXY,1,,0.27 MPDATA,PRYZ,1,,0.43
MPDATA,PRXZ,1,,0.27
MPDATA,GXY,1,,3620 MPDATA,GYZ,1,,3430
MPDATA,GXZ,1,,3620
MPDATA,ALPX,1,,5E-006

MPDATA,ALPY,1,,3.5E-005
MPDATA,ALPZ,1,,3.5E-005
!BRUDDSTYRKE:

FC,1,S,XTEN,1133
FC,1,S,YTEN,65
FC,1,S,ZTEN,65
FC,1,S,XCMP,-756 FC,1,S,YCMP,-195
FC,1,S,ZCMP,-195
FC,1,S,XY,96 FC,1,S,YZ,96 FC,1,S,XZ,96
FC,1,EPEL,XTEN,0.0268 FC,1,EPEL,YTEN,0.0067
FC,1,EPEL,ZTEN,0.0067
FC,1,EPEL,XCMP,-0.0179 FC,1,EPEL,YCMP,-0.0202
FC,1,EPEL,ZCMP,-0.0202
FC,1,EPEL,XY,0.0265 FC,1,EPEL,YZ,0.0279
FC,1,EPEL,XZ,0.0279

!LAGOPPBYGGING:

sect,1,shell,, secdata, 0.4,1,0.0,3 secdata, 0.4,1,90,3
secdata, 0.4,1,0.0,3 secdata, 0.4,1,90,3 secdata,
0.4,1,0.0,3 secdata, 0.4,1,90,3 secdata, 0.4,1,0.0,3
secdata, 0.4,1,90,3 secdata, 0.4,1,0.0,3 secdata,
0.4,1,90,3 secoffset,MID seccontrol,,,, , , , !SECPLOT,
1,,
KEYOPT,1,1,0
KEYOPT,1,5,0
KEYOPT,1,8,1
KEYOPT,1,9,0
KEYOPT,1,10,0
KEYOPT,1,11,0

!GEOMETRI:

bredde=122
lengde=14

k,1, k,2,bredde k,3,bredde,lengde
k,4,,lengde l,1,2 l,2,3 l,3,4 l,4,1
al,1,2,3,4

!MESH:

esize,1
amesh,all esel,all local,11,0,
emodif,all,esys,11

!GRENSEBETINGELSER:

nselect,s,loc,x,-0.01,0.01
d,all, ux,0 d,all,roty,0
d,all,rotz,0 nselect,s,loc,y,-
0.01,0.01 d,all, uy,0
d,all,rotx,0 d,all,rotz,0 nall
lselect,s,line,,2 nselect,s,1 d,all,uz,0
nall eall

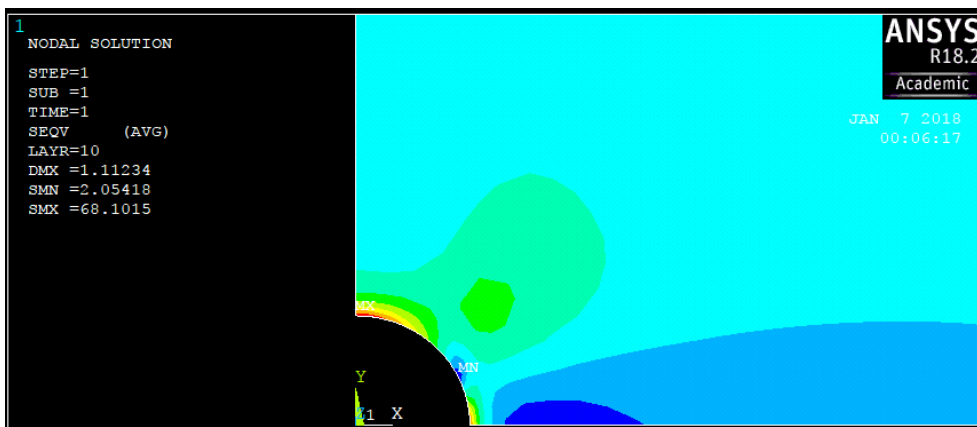
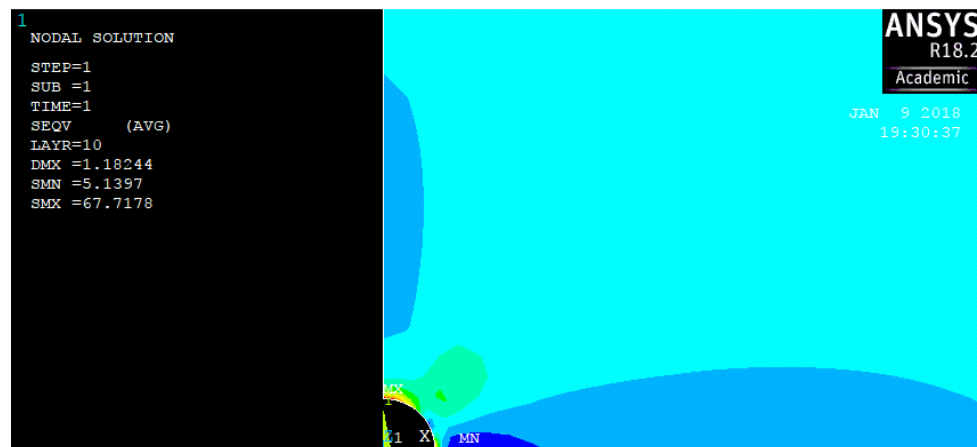
!LASTER:

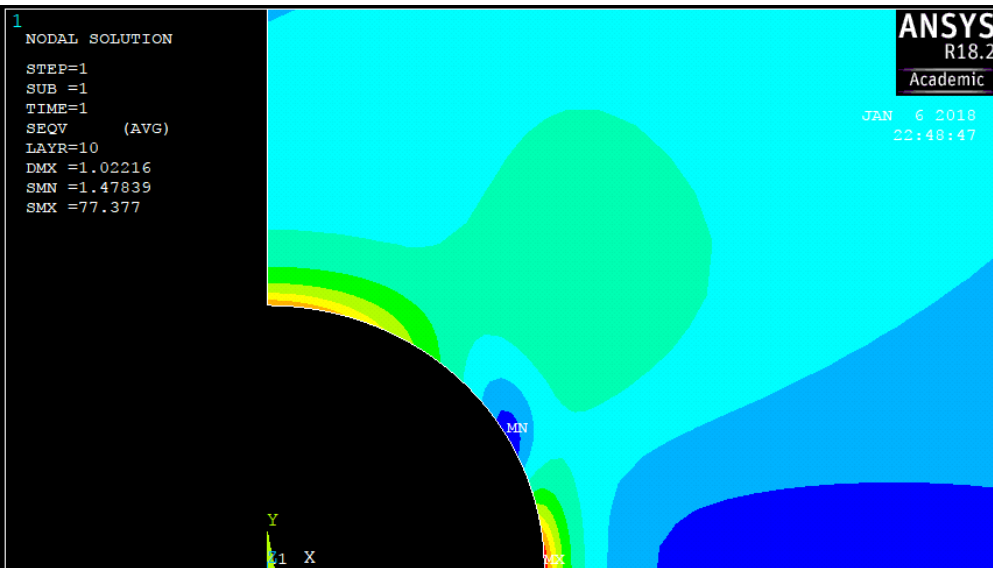
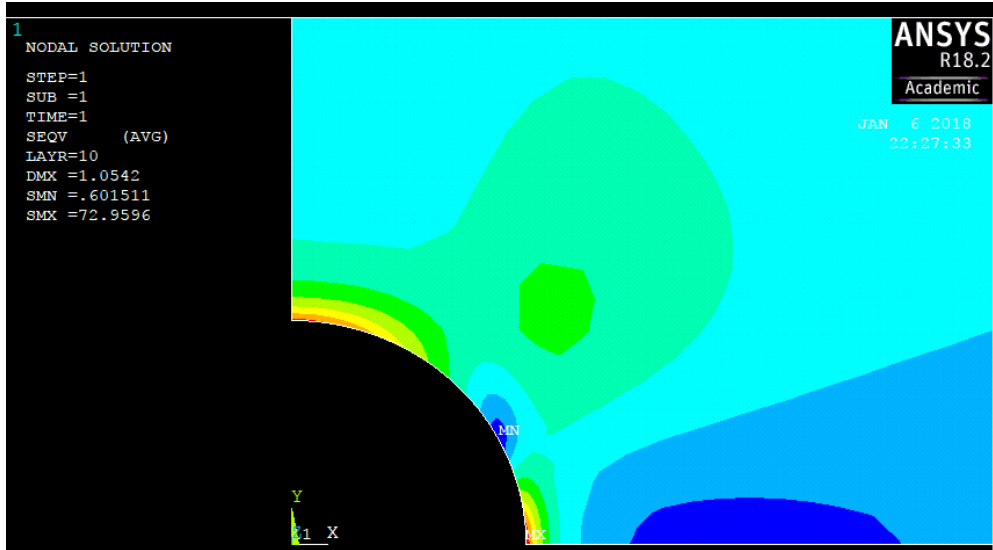
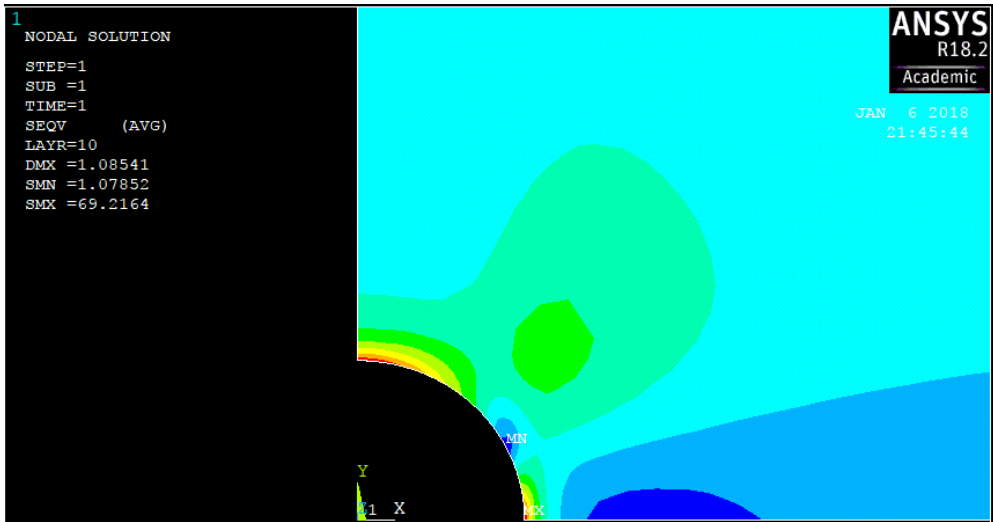
/solu
tunif,0
lselect,s,line,,2
sfl,all,presx,-800
solv

!TEMPERATUR
!KRAFT

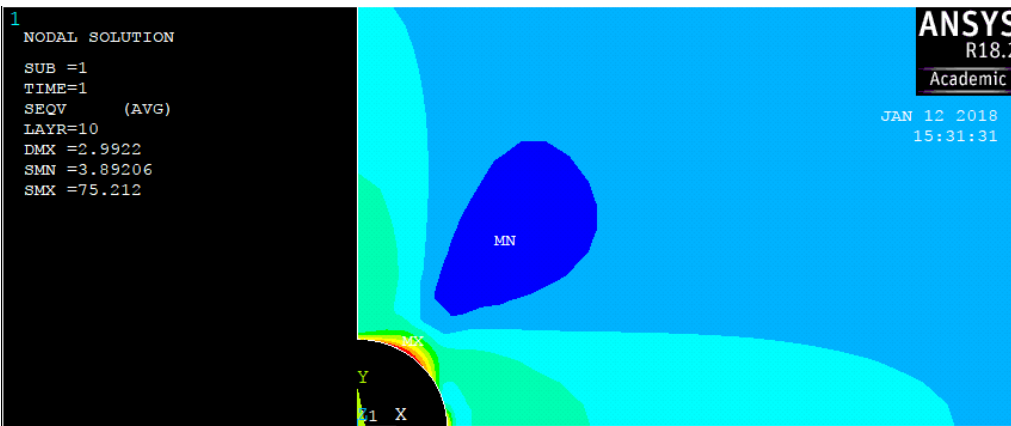
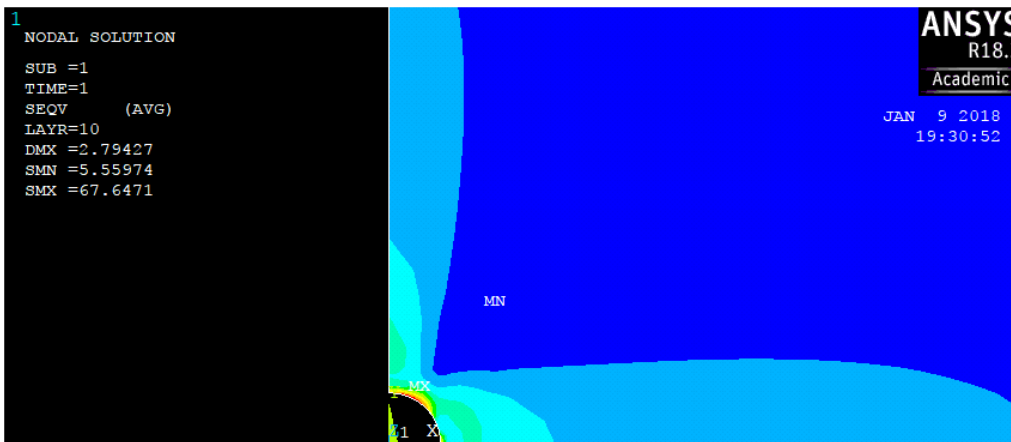
Vedlegg E – Analyse i ANSYS APDL

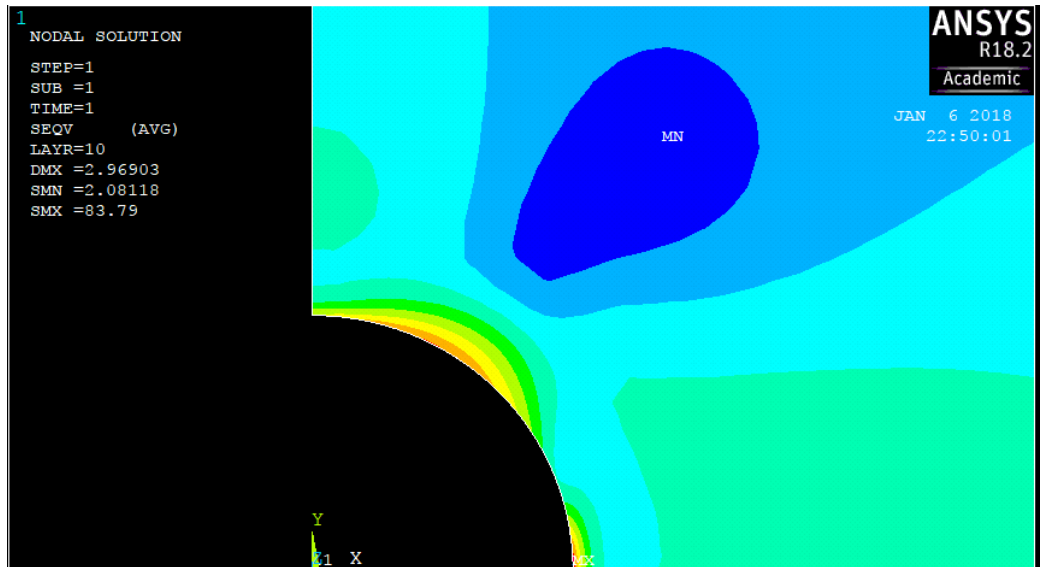
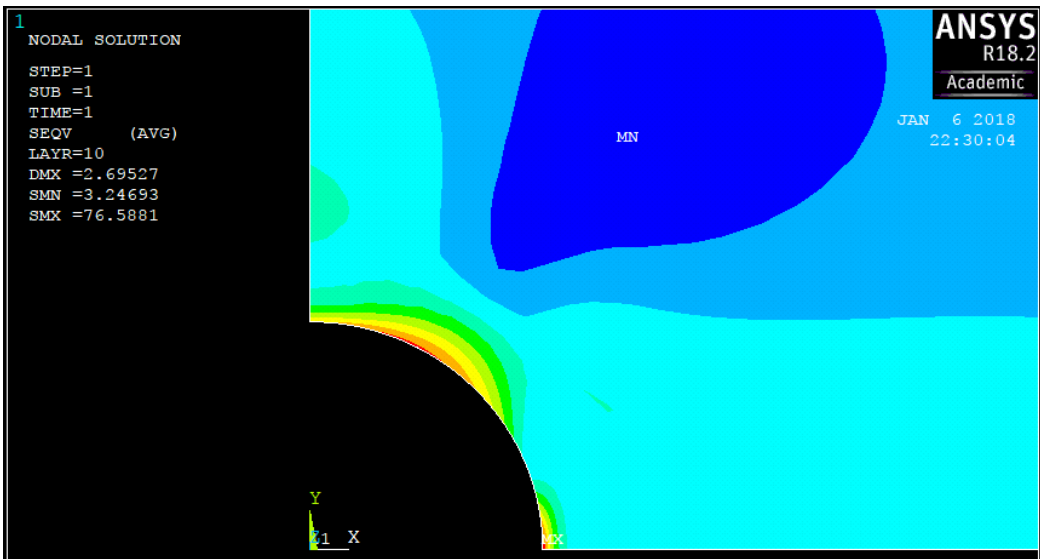
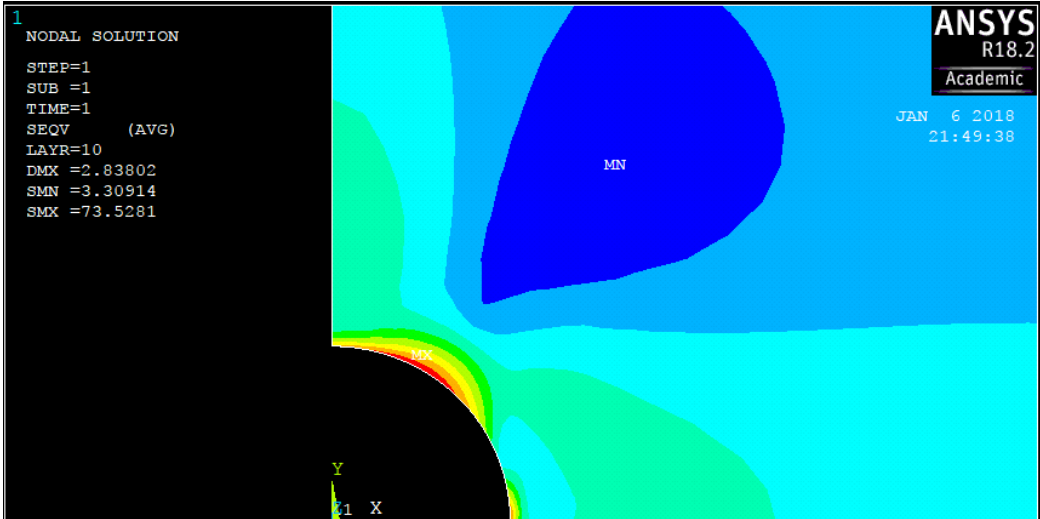
Figur 1. – Von mises, T0



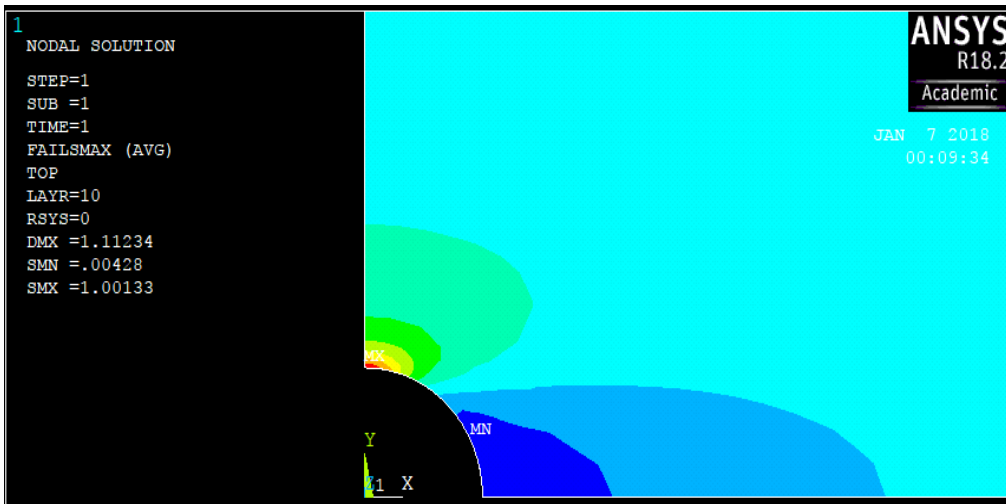
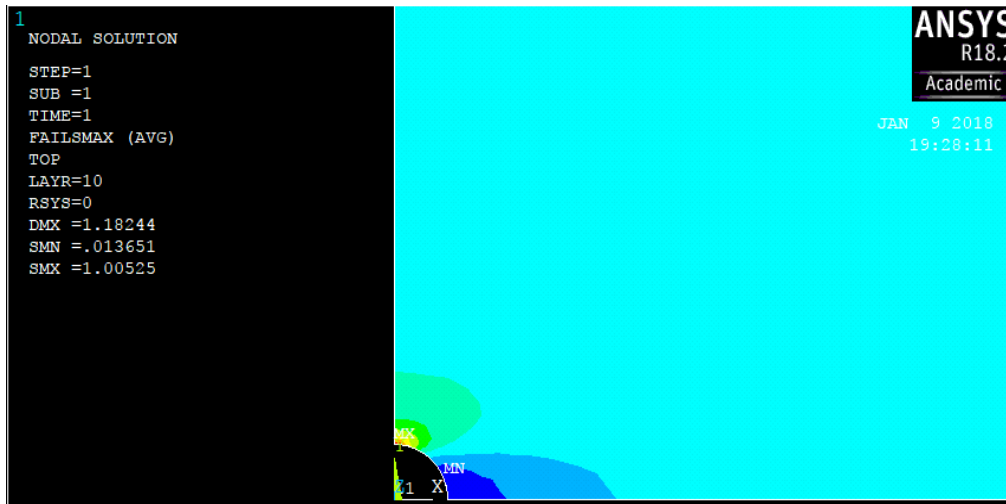


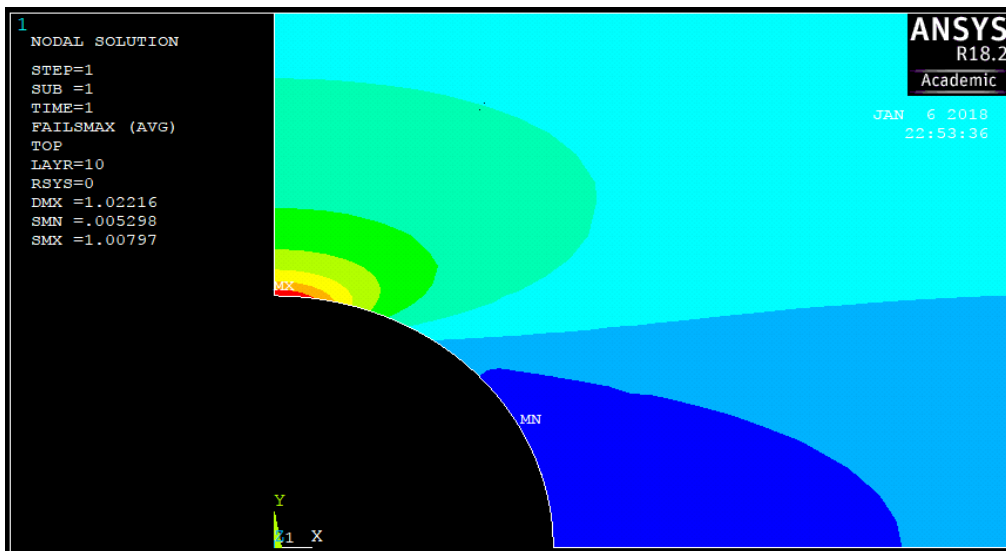
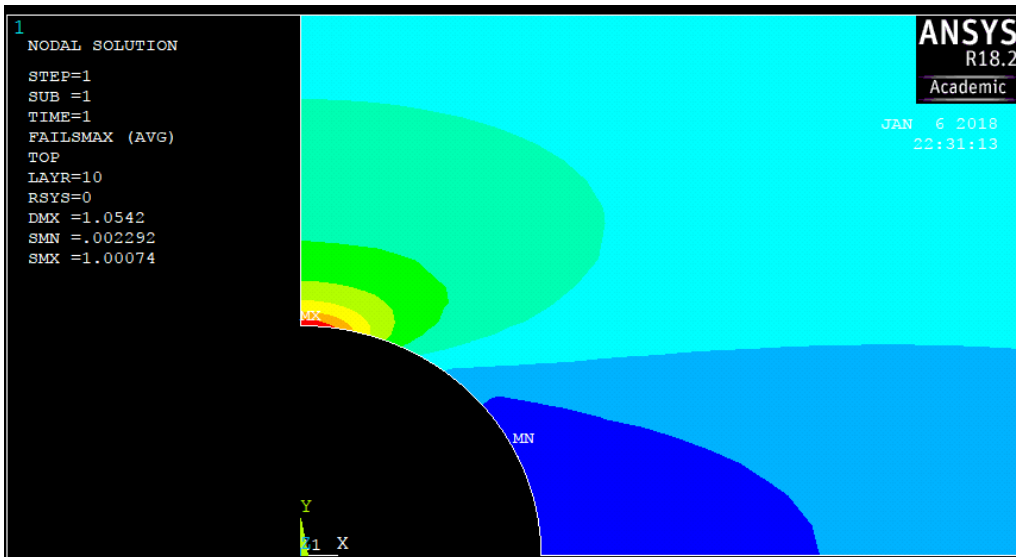
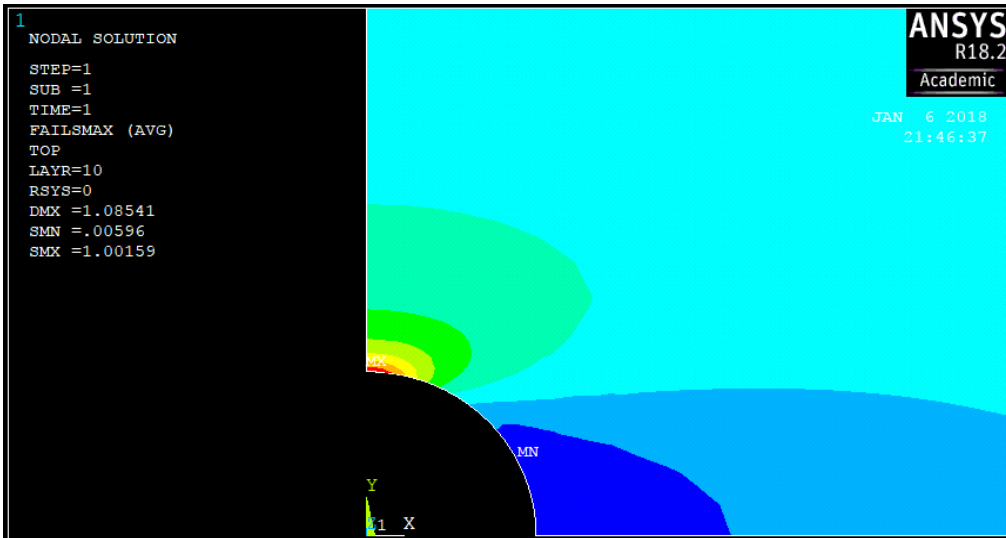
Figur 2. – Von mises, T150



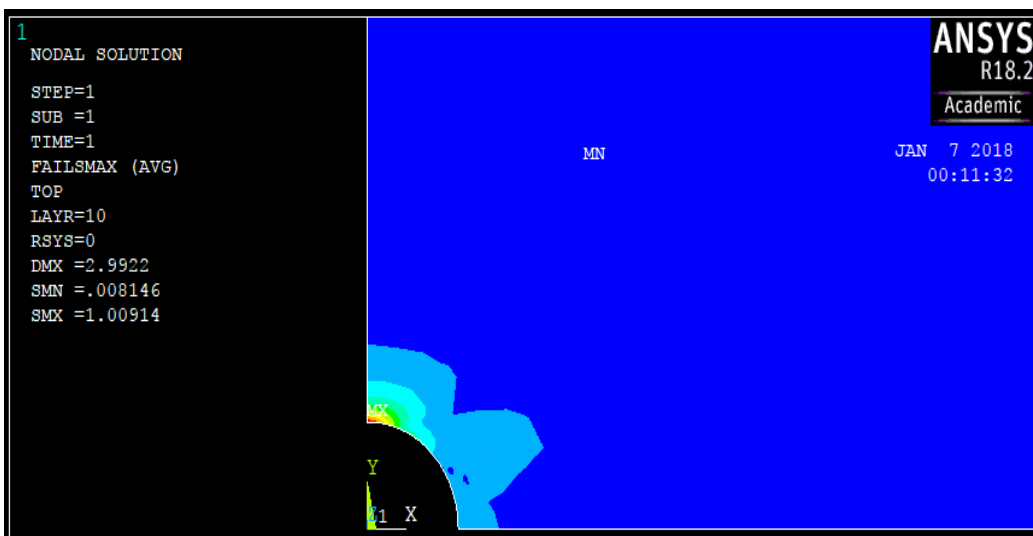
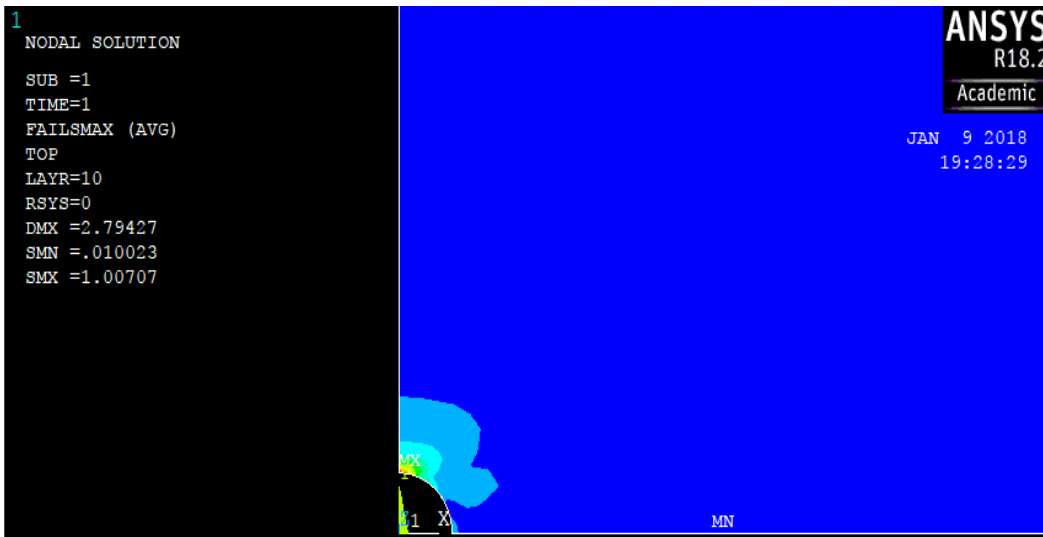
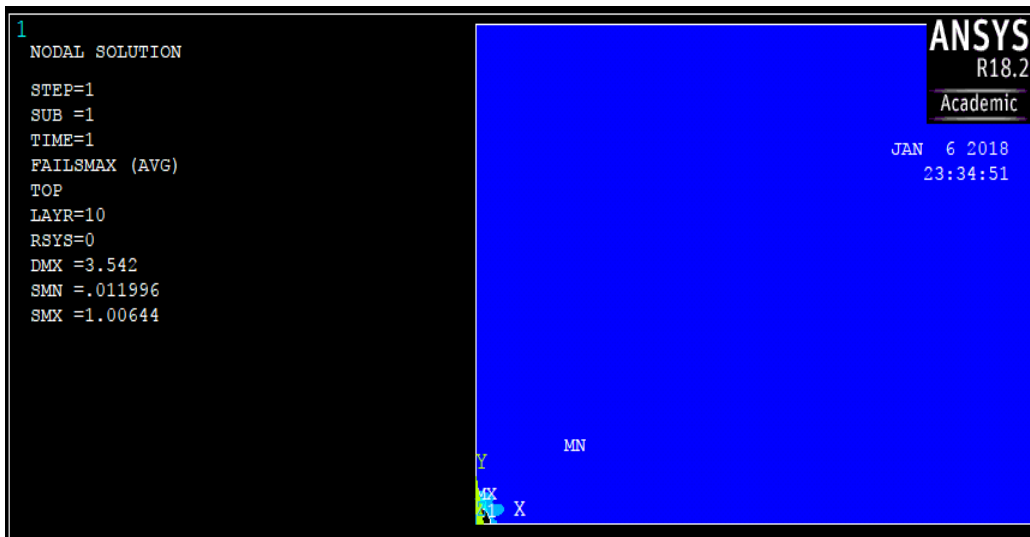


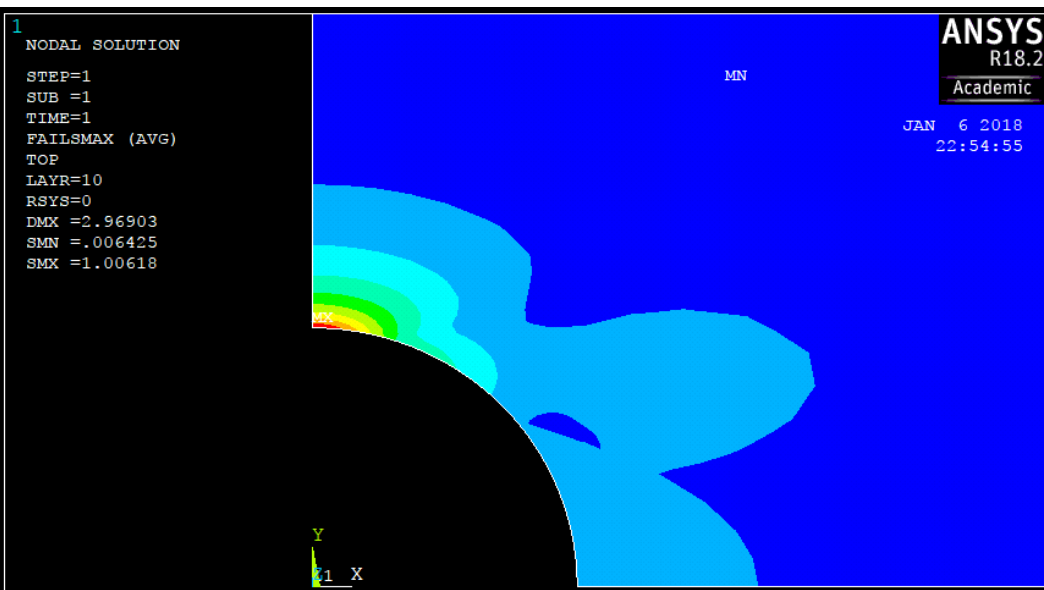
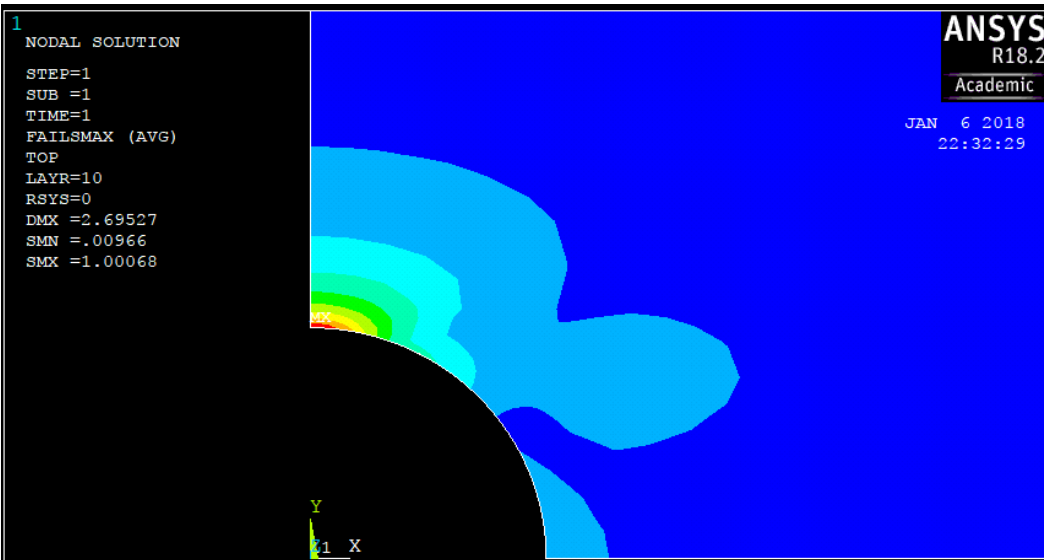
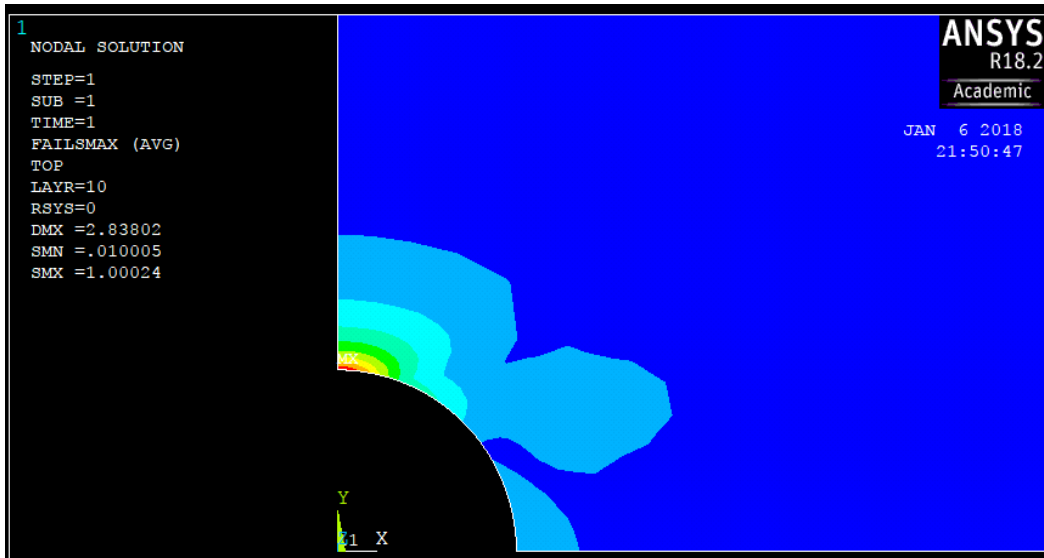
Figur 3. – Max stress, T0





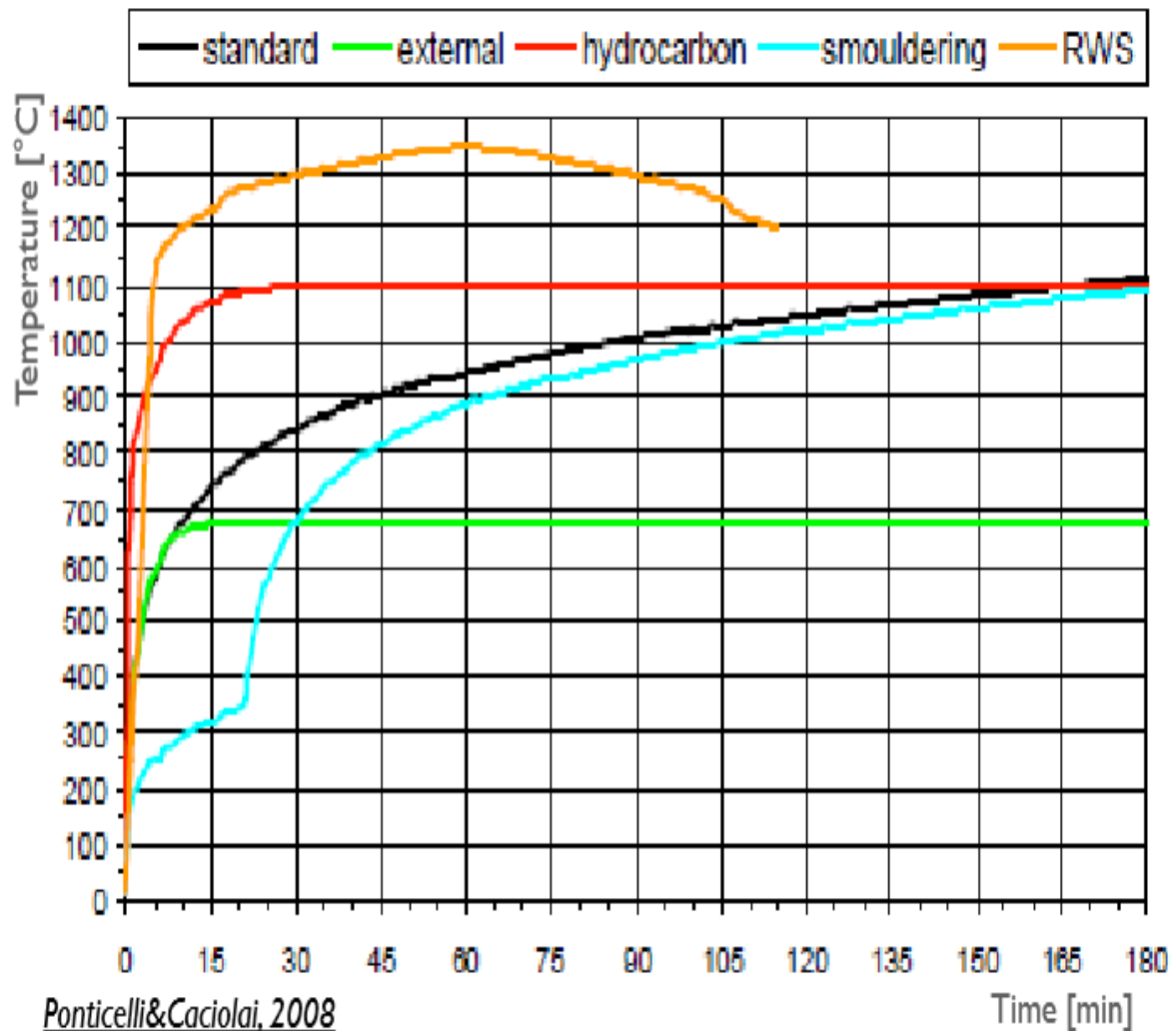
Figur 4. – Max stress, T150





Conventional fire curves

NOMINAL DESIGN FIRES



NOMINAL DESIGN FIRES

- Temperature in [°C] and time in [min]
- Very steep initial phase (post-flashover)
- No cooling phases → REQUIRED TIME OF RESISTANCE! (Rclass)

- Standard curve (ISO834): $T = 20 + 345 \log(8t + 1)$

to be used in case of confined fires of wood or other cellulosic materials.

- Hydrocarbon curve: $T = 1080(1 - 0.325 e^{-0.167t} - 0.675 e^{-2.5t}) + 20$

to be used for confined fire of hydrocarbon-based materials

- External fire curve: $T = 660(1 - 0.687 e^{-0.32t} - 0.313 e^{-3.8t}) + 20$

to be used for compartment-confined fire that attacks object outside the compartment.

- Smouldering curve: $t < 20 \rightarrow T = 154 t^{0.25} + 20$; $t > 20 \rightarrow T = 20 + 345 \log[8(t-20)+1]$

to be used for modelling of slow-heating fires

- RWS curve: per points (Rijkswaterstaat, Nederland)

to be used for fire in tunnels.

Vedlegg G - A3 POSTER

Tittel:

Brannmotstanden til fiberkompositter etter slagskade

Numerisk analyse med beregning for å se endringen i kapasitet til fiberarmerte kompositter under høy temperatur etter at det har blitt utsatt for slagskade

Veileder:

Reidar Anderssen, UiA/OPS

Bakgrunn

Det er viktig å forstå hvordan materialer oppfører seg når det blir utsatt for brann/høye temperaturer og slagskader. For konsekvensene av disse hendelsene kan være katastrofale. Eksempler på områder som kan være utsatt for slike hendelser, er brannskott i skip, subsea-strukturer, togfronter, samt seksjoneringsvegger for å nevne noen.

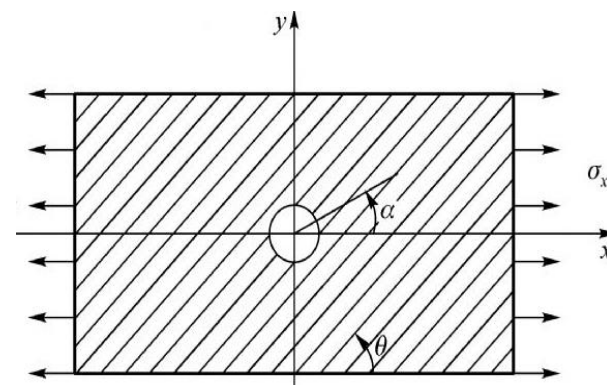


Problemområde

Alle materialer som utsettes for høyere temperaturer/brann, vil gradvis brytes ned samtidig som materialet utsettes for en indre spenning. Isotrope materialer som metaller har lik oppførsel i alle retninger, uavhengig om det blir utsatt for mekanisk eller termisk belastning. Dette gjør at slike materialer er mer forutsigbart, enn det er for anisotrope materialer som kompositt. Metaller har også en evne til å absorbere energi fra slagkraft i form av plastisk deformasjon, mens mindre duktile materialer som glassfiber-armerte kompositter, blir energien absorbert i form av elastisk deformasjon, via forskjellige brudd-former.

Problemstilling/Forskerspørsmål

Oppgaven tar for seg er hvordan kapasiteten til fiberkompositter endrer seg, når det blir utsatt for høy temperatur, etter varierende slagskade i form av et ekvivalent hull.



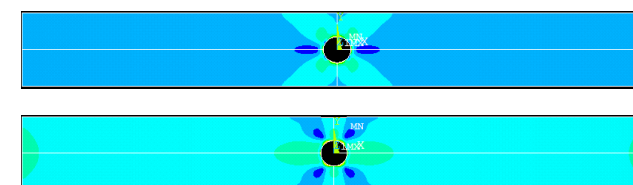
Metode

For å svare på oppgaven har det blitt laget et beregningsark i MathCAD og utført numerisk analyse. Programmet som har blitt brukt til analysen er ANSYS APDL. Det blir sjekket for strekkapasitet, ved kombinasjon av strekkraft og temperaturtøyning. Resultatene blir deretter samlet i tabeller og grafer i Excel.



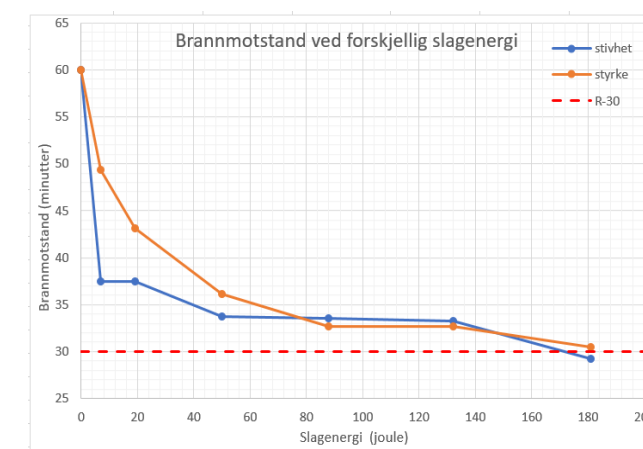
Resultat

Strekk-stivheten får en kraftig reduksjon under varmepåvirkning, og selv uten hull så reduseres kapasiteten til 78% sammenlignet med et laminat ved romtemperatur. Når det ble laget et hull og tilført høy temperatur, reduseres kapasiteten til 73% ved den minste hullradiusen på 0.5mm. For deretter flate mer eller mindre ut mellom 2 og 4, før det blir en ny reduksjon ved den største hullradiusen på 5mm. Når det kommer til strekk-styrken ifølge beregningene, viser dette en mer harmonisk kurve og gradvis reduksjon i styrke fra 89% til 61% under samme betingelser som ved stivhet



Konklusjon

kapasiteten reduseres med 30 minutter ved 5mm hullradius, noe som tilsvarer 181 J i slagenergi. For å sette dette i perspektiv, tilsvarer det en diameterstørrelse på 850mm på en seksjoneringsvegg/brannskott, med romhøyde på 2400mm. Dette forutsetter at resultatet gjelder for det relative forholdet mellom platebredde og hullstørrelse.



Summary

Fiber reinforced composites have many good properties, but also many applications that make it vulnerable to accidental loads, like impact damage and fire. None or very few have investigated when they occur simultaneously or the overall effect they provide. To address the problem in this thesis, it has been done a numerical computation in ANSYS APDL, and created a spreadsheet in Mathcad. Capacity was measured at one-axial tensile load combined with temperature load. The results showed both reduced stiffness and strength, which reduced fire resistance to the material under a standard fire with several minutes. The reduction of capacity showed a harmonic curve of strength, but greater discrepancies regarding stiffness.