

## **TEKNISK RAPPORT**

### **Beregning af termiske spændinger i vindmølle transformer**

**Kunde:** Middelgrundens Vindmøllelaug I/S  
Blegdamsvej 4B  
2200 København Ø  
  
Att. Jens Larsen

**Dato:** 16. august 2004

**Sagsnummer:** 2004-11-1

## 1. Indledning

På baggrund af havarier af vindmølletransformere er Tech Inno bedt om at vurdere, hvorvidt de termiske spændinger og tøjninger i en silicafyldt epoxystøbemasse i transformerne andrager et kritisk niveau. De termiske spændinger optræder som følge af, at der eksisterer differenser i de termiske udvidelseskoefficienter for de materialer, der indgår i konstruktionen samtidig med, at der optræder temperaturdifferenser. Når der i denne rapport nævnes spændinger er der tale om mekaniske og ikke elektriske spændinger. Alle værdier for spændinger opgives i MPa.

## 2. Geometri og beregningsmetode

Alle beregninger foretages på en geometri, der omfatter den øverste vinding på højspændingssiden af transformeren. Geometriske mål er fundet ved opmåling af en aktuel transformer.

Beregningerne foretages vha. finite element metoden. Der anvendes ANSYS ver. 8.1. Beregninger foretages på  $\frac{1}{4}$  af en omkreds, idet der er påført symmetri- og randbetingelser i de to relevante snit. Et plot af de anvendte elementer ses i bilag 1. Det er under beregningerne forudsat, at der eksisterer perfekt vedhæftning mellem de enkelte lag og parter i konstruktionen.

## 3. Laster

Der er udført beregninger for to lasttilfælde:

1. Stabilt temperaturfelt, dvs. hvor den forløbne tid er tilstrækkelig stor til, at der ikke er variationer i temperaturfeltet over tid.
2. "Termisk chok".

Ad 1. Der er anvendt termisk last i form af en temperaturfordeling modtaget fra kunden. Denne temperaturfordeling er ikke baseret på målinger på den aktuelle konstruktion, men på 2D beregninger på en transformer, der har data tæt på den aktuelle. I vores beregningsmodel er temperaturdifferensen opnået ved at afsætte en effekt i vindingen samtidig med, at de ydre flader afkøles vha. konvektion. Hvordan temperaturdifferensen er fremkommet er i denne sammenhæng irrelevant, med det har vist sig effektivt at gøre det vha. den ovenfor beskrevne metode. Bilag 2. viser temperaturfordelingen for Tech Inno's beregninger samt for data modtaget fra kunden. Det ses heraf, at der er god overensstemmelse.

For de termisk/strukturelt koblede beregninger er den ovenfor beskrevne temperaturfordeling anvendt som last. Som randbetingelser er påført de relevante symmetri- og randbetingelser i modellens snitflader. Herudover er der påført en fastholdelse i lodret retning i modellens bund samt en fastholdelse i lodret retning i et

område svarende til positionen af bjælkerne på oversiden af epoxystøbmassen (bjælker med orientering  $\pm 45^\circ$ )

Ad. 2. Denne beregning forudsætter, at aluminium/Mylarvindingen opvarmes momentant til  $112^\circ\text{C}$  mens den resterende del fastholdes ved  $20^\circ\text{C}$ . Denne situation kan opfattes som en ekstrem situation, hvor der afsættes meget stor effekt i vindingen mens den resterende del af konstruktionen har stuetemperatur. Det skal nævnes, at spændinger beregnet i denne situation er større end de virkelige, idet det ikke er muligt at opvarme vindingen momentant og forhindre varmetransmission til de omgivende materialer.

#### 4. Materialedata

For at kunne holde den stramme tidsplan samt for at holde omkostningerne på et acceptabelt niveau for en indledende beregning, er der foretaget visse simplificeringer af konstruktionen.

Vindingen er modelleret som ét materiale selv om der består af meget stort antal lag aluminium og polymerfolie. Der er foretaget beregning af ækvivalente materialedata (elasticitetsmodul og termisk udvidelseskoefficient) som anført i bilag 3.

For epoxystøbmassen samt folier af Mylar har Teknologisk Institut foretaget måling af elasticitetsmodul samt termisk udvidelseskoefficient vs. temperatur i et relevant interval. De vigtigste resultater fra disse målinger er bearbejdet og ligeledes vedlagt i bilag 3. Det er her karakteristisk, at når temperaturen overstiger glasovergangstemperaturen falder elasticitetsmodulet kraftigt. Det må derfor antages, at styrken ligeledes reduceres voldsomt. Vi har dog ikke kendskab til styrkeegenskaberne ved temperaturer over glasovergangstemperaturen.

I temperaturområdet omkring glasovergangstemperaturen sker der ligeledes voldsomme ændringer i de termiske egenskaber.

Der er i beregningerne anvendt materialedata som anført i bilag 3, dvs. at der er taget hensyn til ulineære elasticitetsmoduler samt termiske udvidelseskoefficienter som funktion af temperaturen. Dette har været nødvendigt, idet driftstemperaturen for transformeren overstiger glasovergangstemperaturen for epoxystøbmassen.

Alle beregninger er udført vha. lineært elastiske materialemodeller.

#### 5. Resultater

Ved udskæring af prøver fra epoxystøbmassen observerede Teknologisk Institut, at specielt én af disse (placeret over den øverste vinding) krummede kraftigt efter udskæring. Dette er en følge af, at der under støbeprocessen er indlejret relativt store egen-spændinger. Vi har foretaget en beregning af disse spændingers størrelse baseret på simple overvejelser. Det viser sig, at der optræder trækspændinger af størrelser ca. lig med  $32\text{ MPa}$ . Denne spænding skal superponeres de beregnede spændinger for at

få det aktuelle billede, men bør ikke medregnes fuldt ved en udmattelsesvurdering, idet spændingen er statisk. Bilag 4 viser beregning af egenspændingerne vha. en simpel beregningsmodel. Værdien 32 MPa er betragtelig sammenlignet med styrkeegenskaberne for materialet, og kan derfor ikke negligeres. Det medfører, at den spændingsreserve der er til rådighed er reduceret kraftigt. Det må antages, at de påviste egenspændinger hidhører fra fremstilling af konstruktionen, dvs. fra udstøbning af epoxymassen. Ved stuetemperatur antages at epoxystøbmassen har en trækstyrke på 60 – 80 MPa jf. R. Kotte. Untersuchungen zur elektrotechnischen Nutzung hochwärmebeständiger Reaktionsharzformstoffe durch Modifizierung der Komponenten, insbesondere der Füllstoffe Universität Hannover, Schering-Institut für Hochspannungstechnik und Hochspannungsanlagen, Rapport nr. 11258/N1.

I bilag 5 er vist temperaturfordelingen for hele beregningsmodellen. Det observeres her, at temperaturfordelingen i ”det tynde snit” er identisk med det i bilag 2 viste, men at i ”det tykke snit” er temperaturen reduceret til ca. 55 °C på ydersiden af epoxystøbmassen mens der stadig er en temperatur på ca. 112 °C i vindingen.

Bilag 6 viser temperaturfordelingen ved termisk chok.

Bilag 7 viser von Mises spændingen ved stationær temperaturfordeling. Det observeres her, at maksimumværdien optræder ved en randbetingelse, hvor der optræder en singularitet i beregningsmodellen. Denne værdi er ikke realistisk, men værdierne i andre områder vurderes at være realistiske.

For stationær temperaturfordeling viser bilag 8 et zoom af spændingerne i epoxystøbmassen i nærheden af ”det tykke snit” ved toppen og ydersiden af vindingen. Vindingen samt Mylarfolierne er fjernet. Det kan her observeres, at der optræder spændinger af størrelsesordenen 15 MPa i overgangen mellem Mylarfolien og epoxystøbmassen. Det må antages, at denne værdi er høj sammenlignet med brudspændingen for materialet ved den pågældende temperatur. Ved stuetemperatur haves en brudspænding ca. lig med 100 MPa.

Bilag 9 viser von Mises tøjningen i det samme område for samme last. Det observeres her, at maksimumværdien er ca. 1,1 %, hvilket igen er meget høj. Denne tøjning må antages at være i størrelsesordenen lig med brudtøjningen for materialet.

Bilag 10 viser von Mises spændingen i epoxystøbmassen udsat for termisk chok. Det observeres her, at maksimumværdien optræder ved en randbetingelse, hvor der optræder en singularitet i beregningsmodellen. Denne værdi er sandsynligvis ikke realistisk, men værdierne i andre områder vurderes at være realistiske.

Bilag 11 viser et zoom af von Mises spændingen i epoxystøbmassen i nærheden af ”det tykke snit” ved toppen og ydersiden af vindingen. Vindingen samt Mylarfolierne er fjernet. Det ses her, at maksimumniveauet er ca. 90 MPa, hvilket er meget højt sammenlignet med styrken af materialet ved den pågældende temperatur.

Bilag 12 viser von Mises tøjningen i det samme område for samme last. Det observeres her, at maksimumværdien er ca. 1,2 %, hvilket igen er meget høj. Denne tøjning må antages at være i størrelsesordenen lig med brudtøjningen for materialet.

Under drift må det antages, at transformeren er udsat for temperaturfelter, som befinder sig et sted mellem de to lasttilfælde, der er analyseret. Idet begge lasttilfælde resulterer i høje spændinger og tøjninger i epoxystøbmassen indikerer dette, at der er tale om, at der eksisterer en reel risiko for initiering og vækst af revner, specielt ved hjørnerne mellem vinding/Mylarfolie og epoxystøbmasse.

Partial discharge har muligvis reduceret de mekaniske egenskaber lokalt i epoxystøbmassen således, at risikoen for havari er større end beregnet i denne rapport. Ligeledes kan vi ikke på det foreliggende grundlag udelukke, at reduktionen i elektrisk isoleringsevne ved forhøjet temperatur har til følge, at styrkeegenskaberne reduceres.

En yderligere forbedring af nøjagtigheden af resultaterne kan opnås ved at anvende mere korrekte og anisotrope egenskaber for de enkelte materialer.

I tilfælde af, at der blev udarbejdet en beregningsmodel, der indeholder en større del af konstruktionen, vil dette medføre større nøjagtighed for resultaterne, idet modellen vil være mindre følsom overfor unøjagtigheder i de påførte randbetingelser.

En brudmekanisk vurdering kan afgøre hvorvidt en given defektstørrelse er kritisk eller ej. Det er muligt at vurdere hvorvidt en given defekt/revne vil udbrede sig eller være stabil.

Glasovergangstemperaturen for epoxystøbmassen ligger iflg. Teknologisk Institut's målinger på ca. 95 °C. Det medfører, at stivheden (elasticitetsmodul) over denne temperatur er kraftigt reduceret ift. værdien for stuetemperatur. Idet styrkeegenskaberne (brudspændingerne) må antages ligeledes at være kraftigt reduceret, og idet transformeren har en driftstemperatur i viklingerne over denne temperatur, vil der kunne opstå muligheder for en u hensigtsmæssig kombination af mekaniske egenskaber og termiske spændinger. Vi har dog ikke relevante styrkeegenskaber ved temperaturer på og over glasovergangstemperaturen, hvorfor vi ikke med sikkerhed kan udtale os om, hvorvidt der er tale om en kritisk kombination.

Effekten af krybning kan ikke umiddelbart ignoreres. Specielt for høje temperaturer kombineret med højt spændingsniveau er denne effekt værd at være udtalt, og den kan derved bidrage til revners initiering og udbredelse.

Der er ikke taget hensyn til de magnetiske kræfter, der ligeledes er til stede i en driftssituation.

## 6. Konklusioner

Der er foretaget beregning af termiske spændinger i området omkring den øverste vikling i en transformer. Der er udført beregninger for stabile temperaturfelter smat for termisk chok, hvor vindingen opvarmes momentant mens den resterende del af konstruktionen bibeholder stuetemperatur.

Beregningerne viser, at der er tale om store tøjninger og spændinger i epoxystøbmassen i områderne over den øverste vinding.

Ved udskæring af et prøveemne i epoxystøbmassen er der målt en kraftig krumning af emnet, hvilket indikerer store egenspændinger, som sandsynligvis hidhører fra udstøbning af emnet. Disse egenspændinger bidrager til initieringen og væksten af revner i støbmassen.

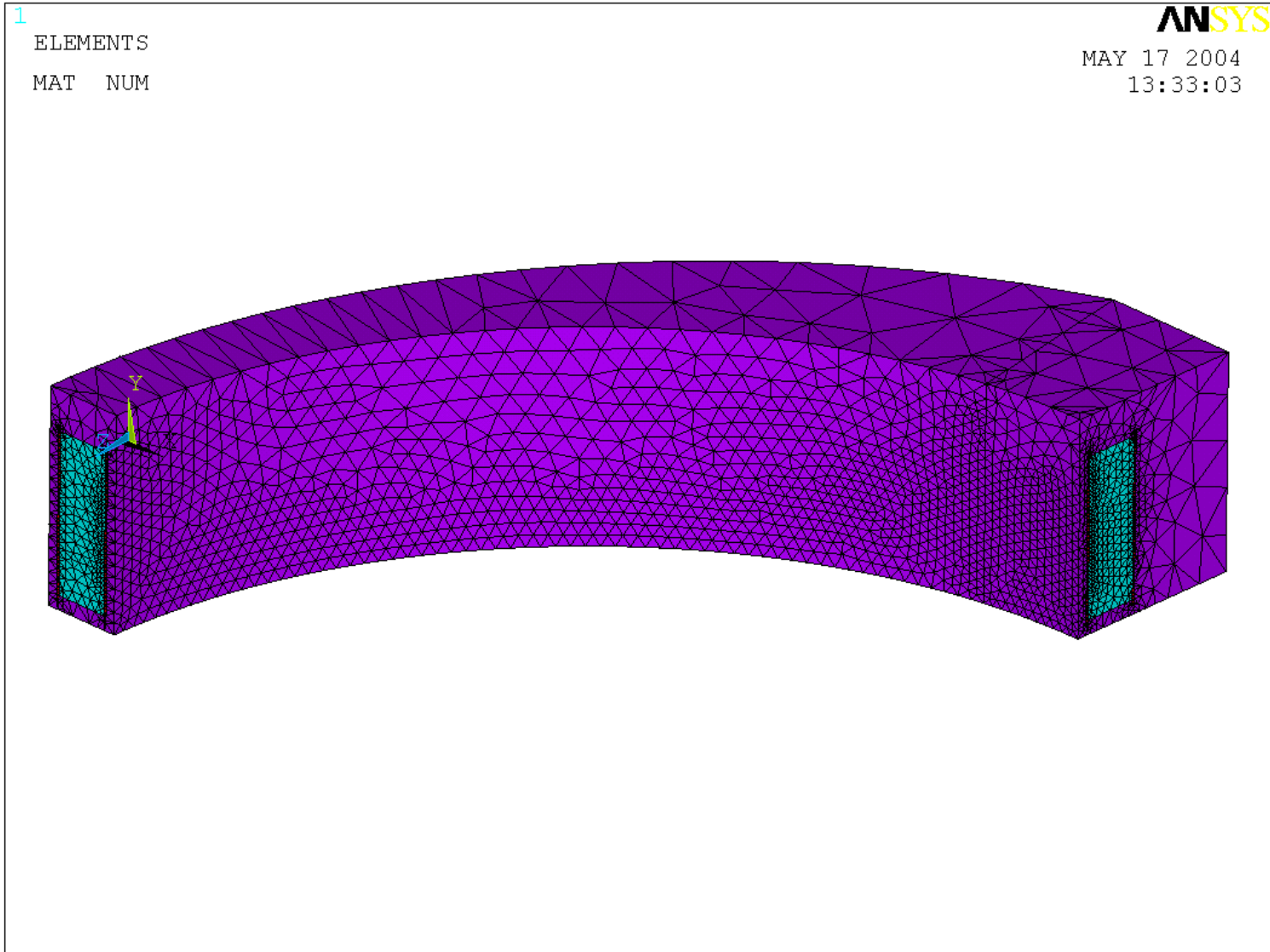
Der er således klare indikationer for, at de termiske spændinger udgør et væsentligt bidrag til revnerne som forårsager havarierne. En mere nøjagtig beregning vil kunne afklare, hvorvidt dette er tilfældet.

I tilfælde af, at der ønskes yderligere oplysninger står vi naturligvis til rådighed.

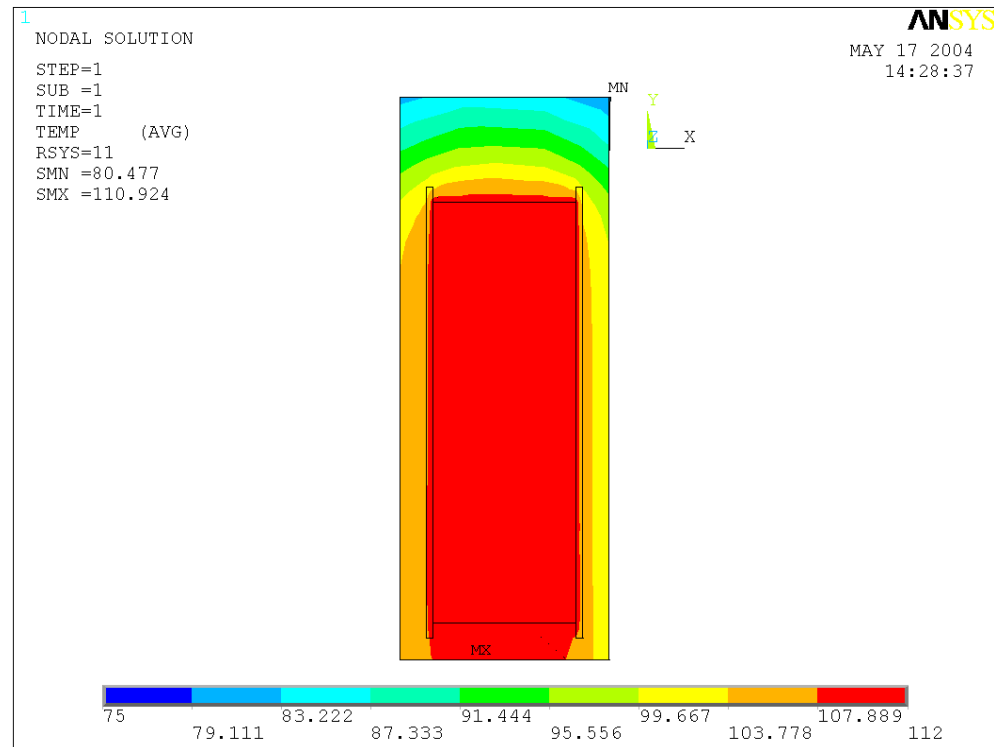
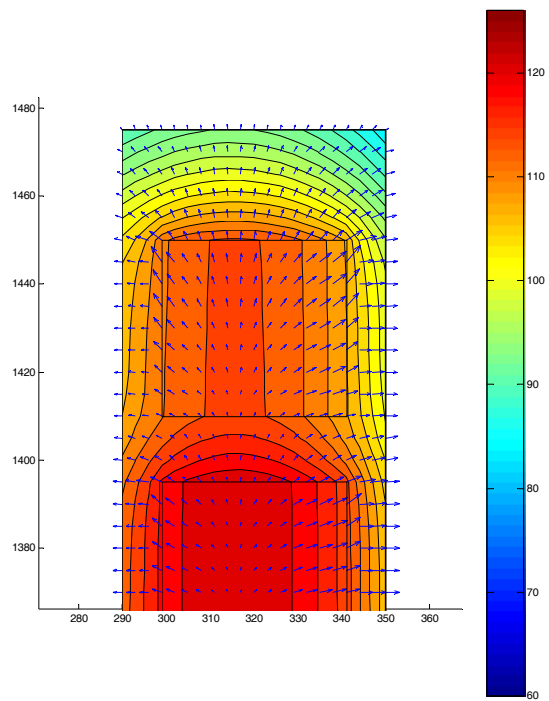
Viby J den 16. august 2004

Carl Østervig  
Tech Inno

Martin Holm  
Tech Inno



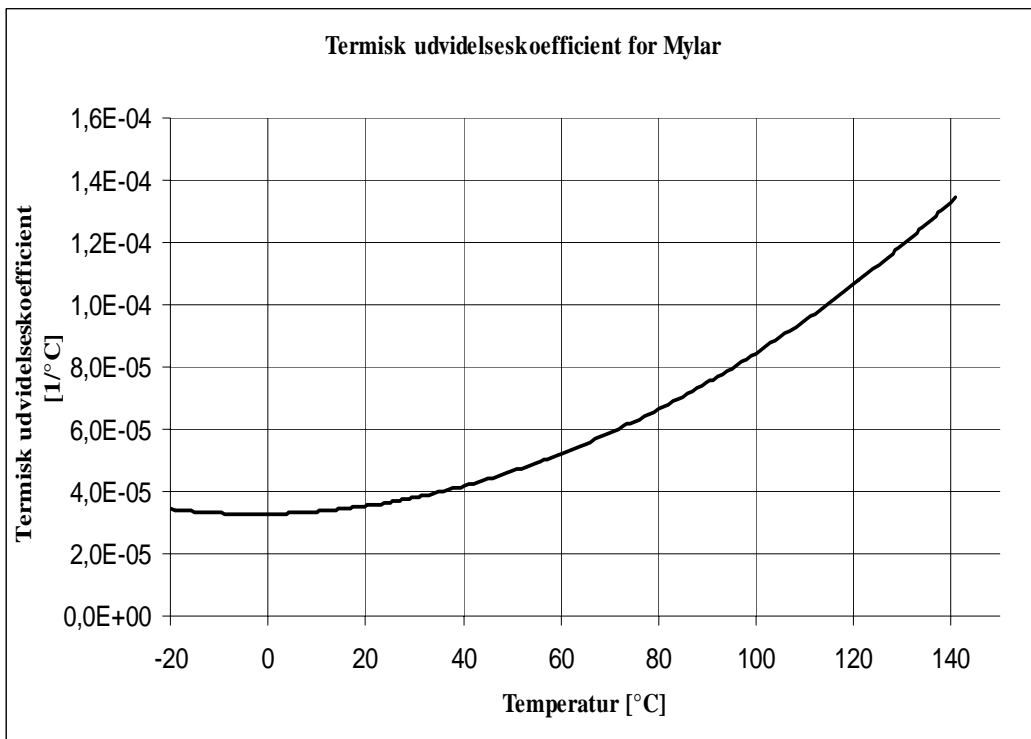
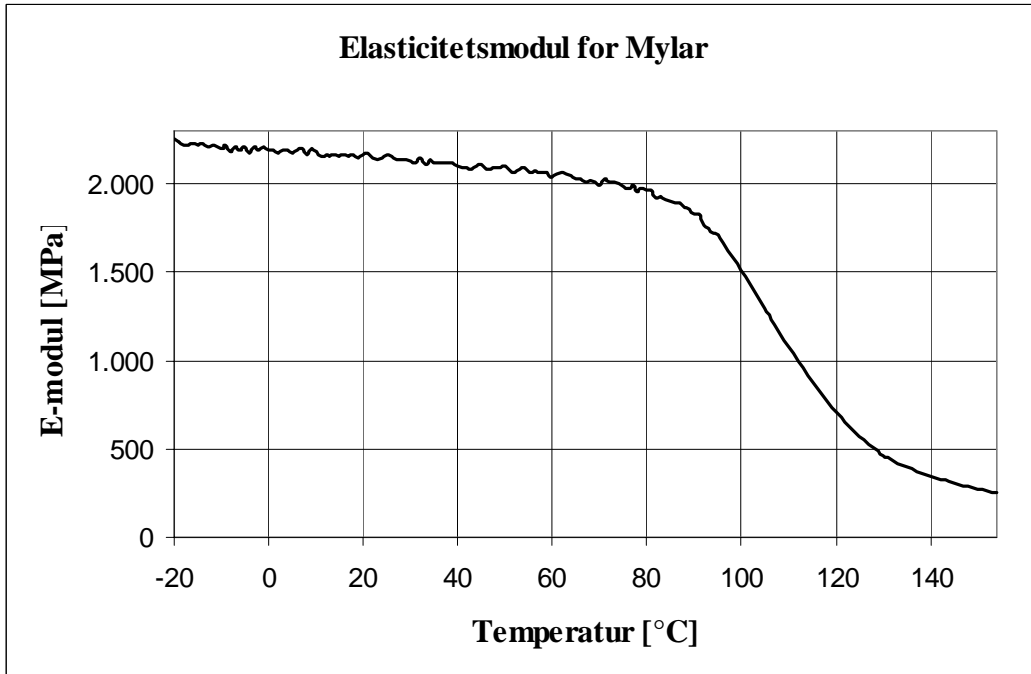
**Bilag 1. Plot af elementer. Forskellige materialer er vist med forskellige farver. Mylarfolierne er vanskeligt observerbare, men er modelleret.**



**Bilag 2. Temperaturfordeling modtaget fra kunden (venstre billede) samt for beregninger foretaget af Tech Inno (højre billede).**

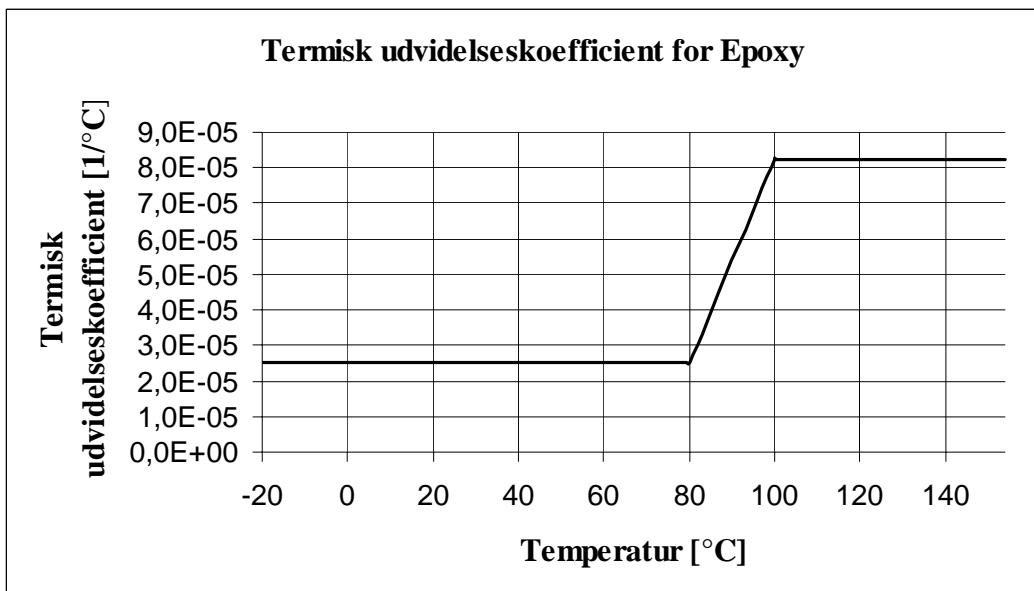
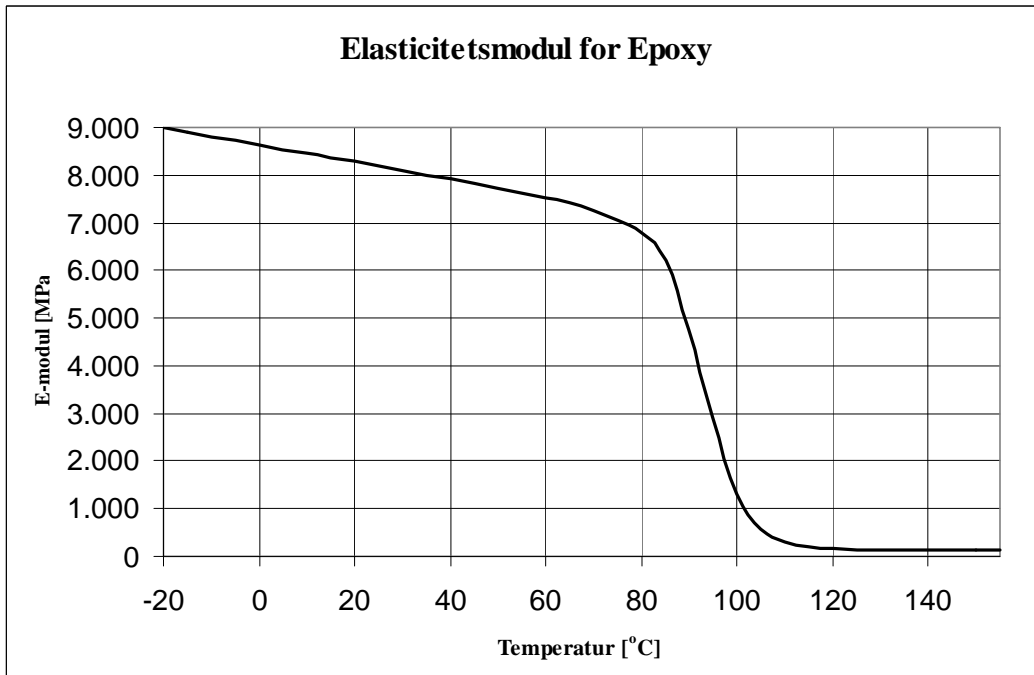


### Bilag 3. Materialedata



Termisk konduktivitet for Mylar:  $1,5 \cdot 10^{-4}$  W/mm $\cdot$ °C

### Bilag 3. Materialedata forts.



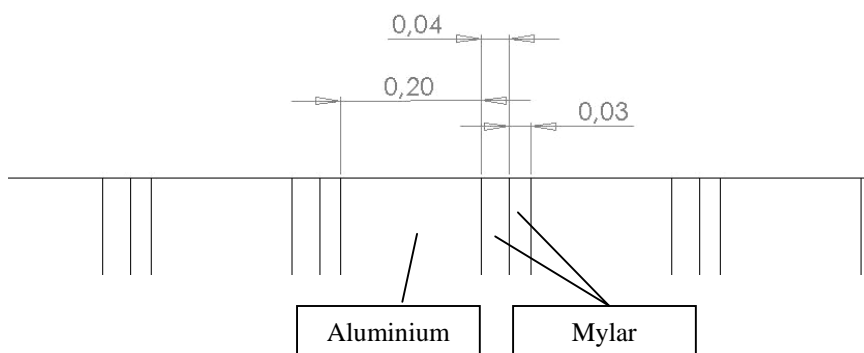
Termisk konduktivitet for Epoxy:  $6 \cdot 10^{-4}$  W/mm·°C

### Bilag 3. Materialedata forts.

	E-modul [MPa]	Termisk udvidelseskoefficient [1/°C]
Aluminium	71.000	$2,3 \cdot 10^{-5}$
Mylar (*)	870	$1,0 \cdot 10^{-4}$

(\*) E-modul og termisk udvidelseskoefficient for Mylar gælder for en temperatur på 115 °C.

Aluminium og Mylar er samlet i en sandwichkonstruktion (se figur 1)



Figur 1.

Tykkelse af Aluminium [mm]:	0,20
Tykkelse af Mylar [mm]:	0,07
Total tykkelse [mm]:	0,27

For at finde en ækvivalent værdi for E-modulet af Alu-Mylar opstilles følgende formel:

$$\frac{(E_{alu} \cdot t_{alu}) + (E_{mylar} \cdot t_{mylar})}{t_{total}}$$
, hvor  $E_{alu}$  er aluminiums elasticitetsmodul,  $t_{alu}$  er tykkelsen af de enkelte aluminiumslag i sandwichkonstruktionen, hvor  $E_{mylar}$  er mylars elasticitetsmodul (ved 115 °C),  $t_{mylar}$  er tykkelsen af de to mylarlag i sandwichkonstruktionen,  $t_{total}$  er den samlede tykkelse af aluminium og mylar i lagene i sandwichkonstruktionen.

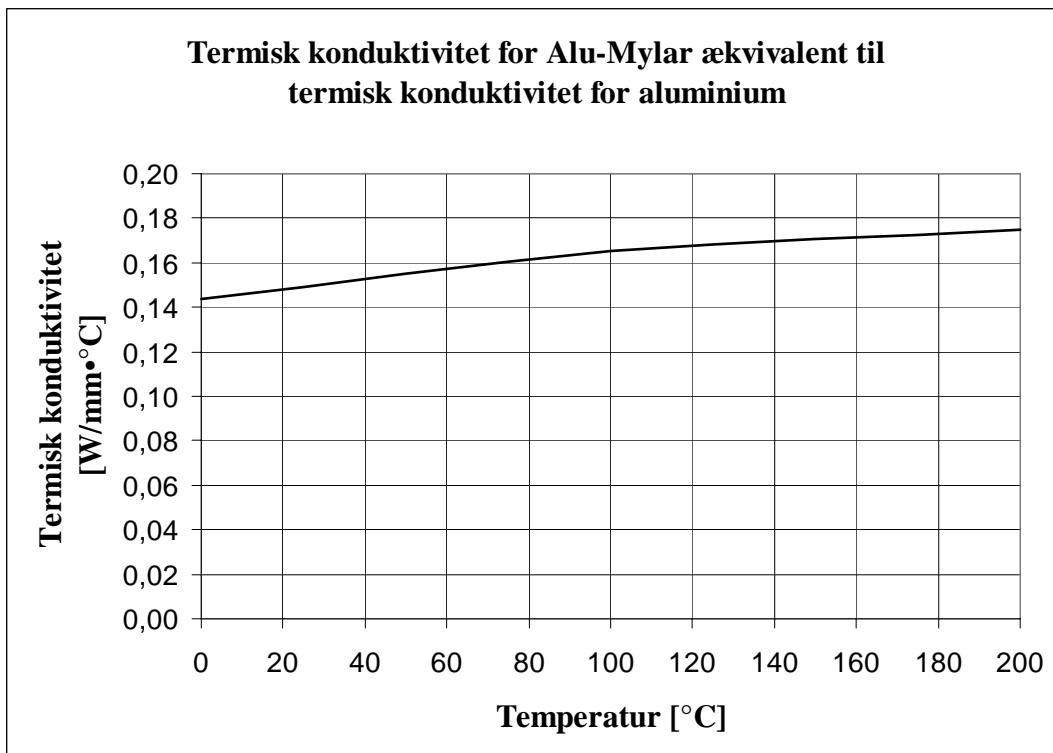
E-modul af Alu-Mylar ækvivalent til: 
$$\frac{(71.000 \cdot 0,20) + (870 \cdot 0,07)}{0,27} = 52.818 \text{ MPa}$$

På lignende måde, kan der opstilles en formel for et finde en ækvivalent værdi for den termiske udvidelseskoefficient.

### Bilag 3. Materialedata forts.

Termisk udvidelseskoefficient af Alu-Mylar ækvivalent til:

$$\frac{(2,3 \cdot 10^{-5} \cdot 0,20) + (1,0 \cdot 10^{-4} \cdot 0,07)}{0,27} = 4,3 \cdot 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$$



#### Bilag 4. Beregning af egenspændinger i prøveemne

Der er udskåret en plan prøve af den røde epoxystøbemasse med dimensionen  $l \cdot b \cdot t = 46 \cdot 22 \cdot 1,5$  mm (efter slibning). Prøven er udskåret som en tynd plade, hvis plan er parallelt med en spoles øvre afslutning. Prøvens underside var beliggende ca. 4,5 mm fra afslutningen af de transparente folielag, mens pladens overside var beliggende ca. 6,0 mm fra de transparente lags afslutning. Pladen udviste en positiv pilhøjde (opadgående krumning) på 1,4 mm. Dette påviser, at der er betydelige "indefrosne" trækspændinger i støbemassen umiddelbart over spolens øvre afslutning. De påviste trækspændinger forløber på tværs af ligeledes påviste revner i støbemassen udgående fra spolens viklinger. Omgivelsestemperaturen var 20 °C, da prøverne blev udskåret.

De "indefrosne" trækspændinger i støbemassen, kan vurderes ved hjælp af følgende:

Pilhøjden på en simpelt understøttet bjælke kan bestemmes ved hjælp af følgende formel:

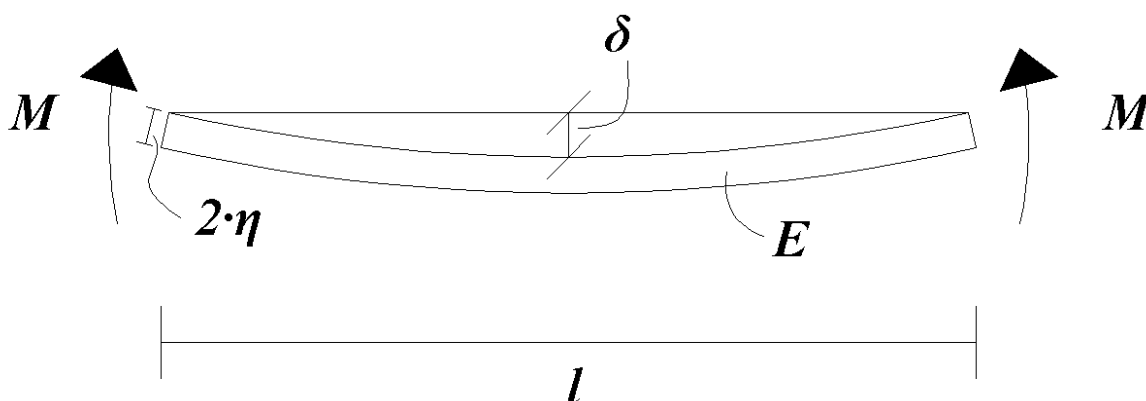
$$\delta = \frac{M}{8 \cdot E \cdot I} \cdot l^2 \Rightarrow M = \frac{8 \cdot E \cdot I \cdot \delta}{l^2} \quad (\text{a})$$

hvor  $\delta$  er pilhøjden,  $l$  er længden af bjælken,  $E$  er bjælkens elasticitetsmodul,  $I$  er bjælkens inertimoment og  $M$  er bjælkens bøjningsmoment

Spændingen i en simpelt understøttet bjælke kan bestemmes ved hjælp af følgende formel:

$$\sigma = \frac{M}{I} \cdot \eta \quad (\text{b})$$

hvor  $\sigma$  er spændingen i bjælken,  $M$  er bøjningsmomentet i bjælken,  $I$  er bjælkens inertimoment og  $\eta$  er halvdelen af bjælkens tykkelse (se figur 1).



Figur 1.

#### Bilag 4. Beregning af egenspændinger forts.

Ved indsættelse af (a) i (b) fås:

$$\sigma = \frac{8 \cdot E \cdot I \cdot \delta \cdot \eta}{l^2 \cdot I} = \frac{8 \cdot E \cdot \delta \cdot \eta}{l^2}$$

Da krumningen af den udskårne prøve skyldes et opstået bøjningsmoment i epoxystøbmassen, kan den udledte formel anvendes til at vurdere epoxystøbmassens egenspændinger.

Epoxy's elasticitetsmodul ved 20 °C er: 8.200 MPa

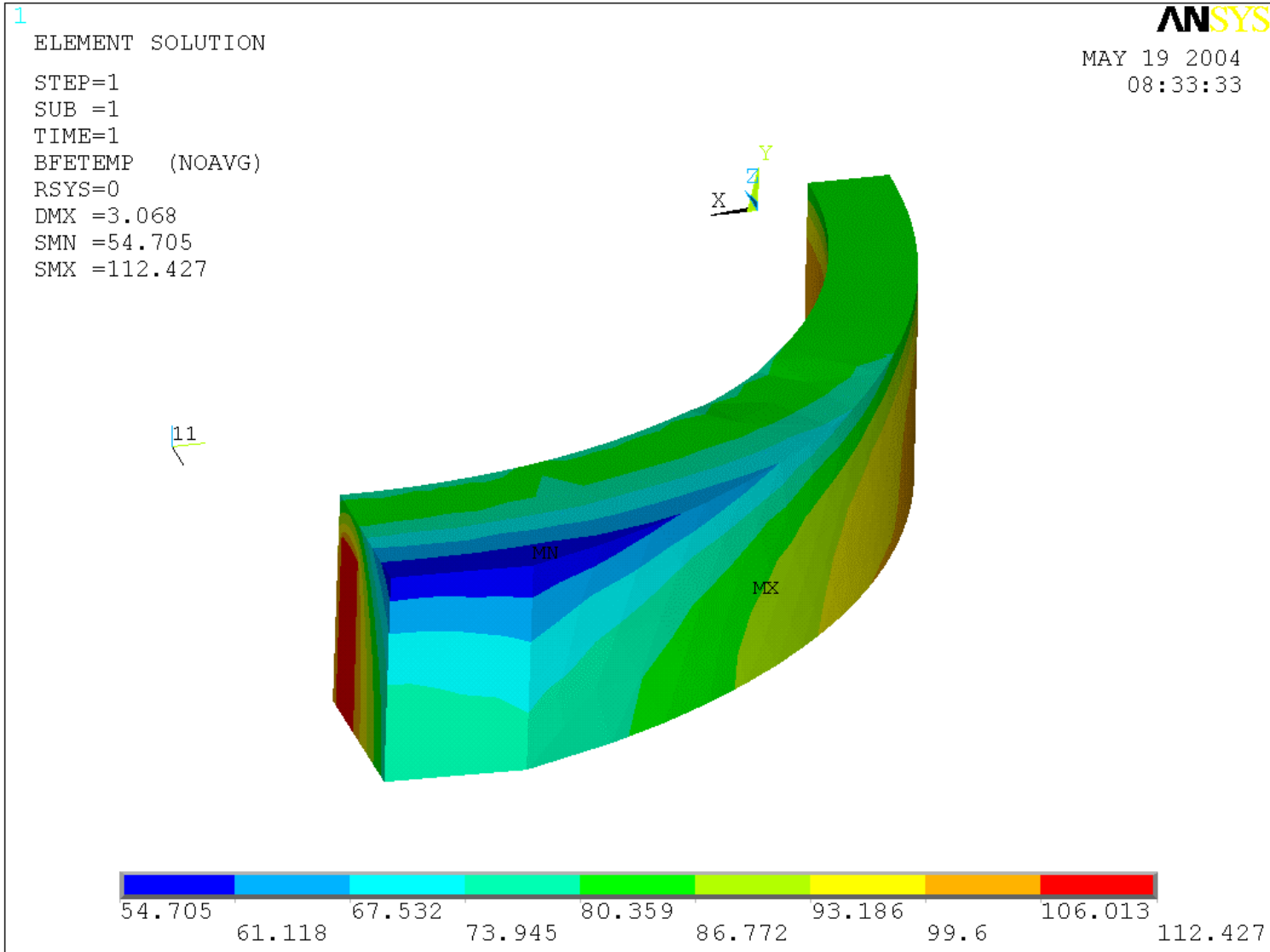
Længden af den udskårne prøve var: 46 mm

Tykkelsen af den udskårne prøve var 1,5 mm  $\Rightarrow \eta = 0,75$  mm

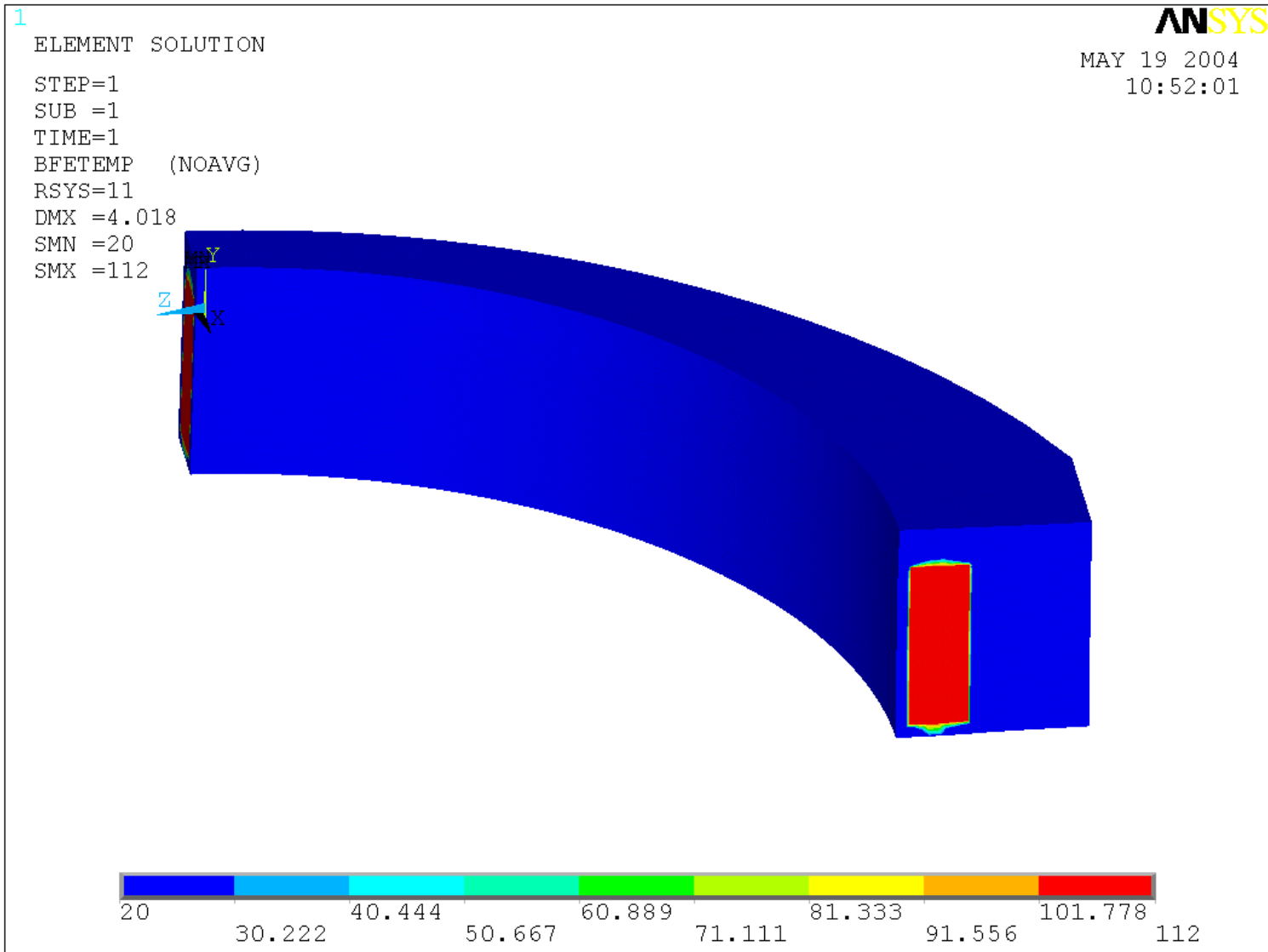
Pilhøjden på den udskårne prøve var: 1,4 mm

Vi får:

$$\sigma = \frac{8 \cdot 8.200 \cdot 1,4 \cdot 0,75}{(46)^2} = 32,6 \text{ MPa}$$

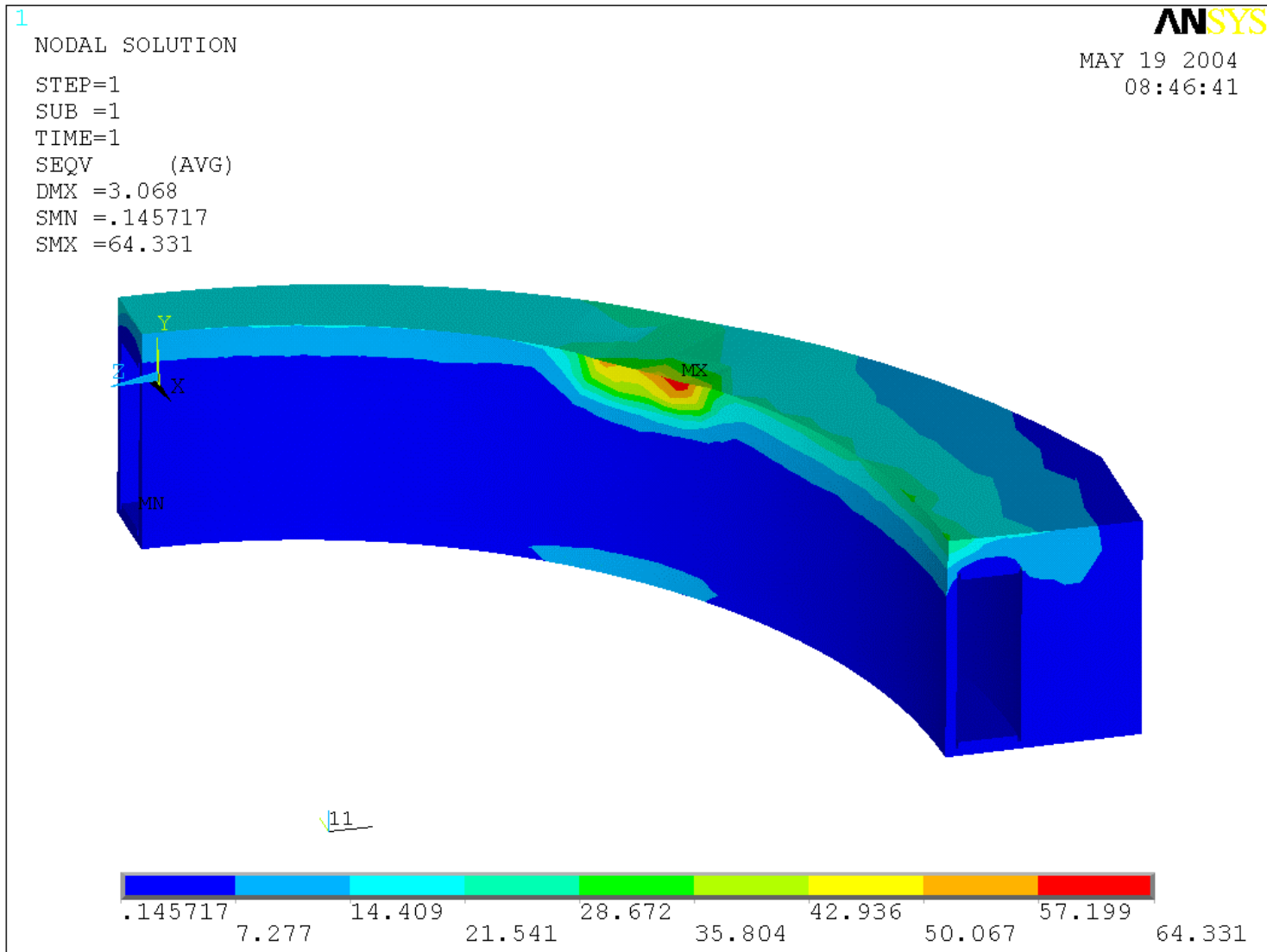


**Bilag 5. Temperaturfordeling ved stationær tilstand.**

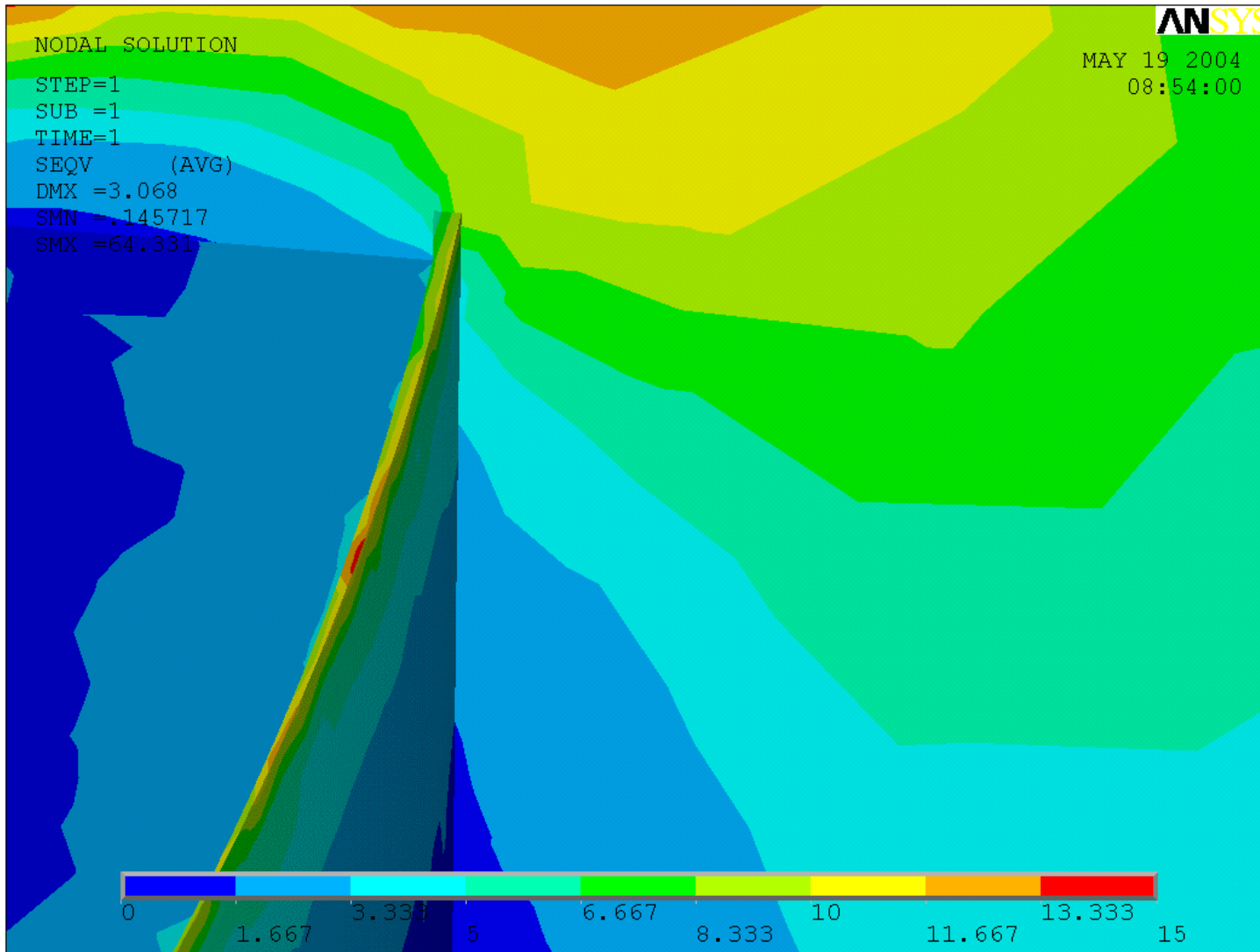


Bilag 6. Temperaturfordeling under termisk chokbelastning.

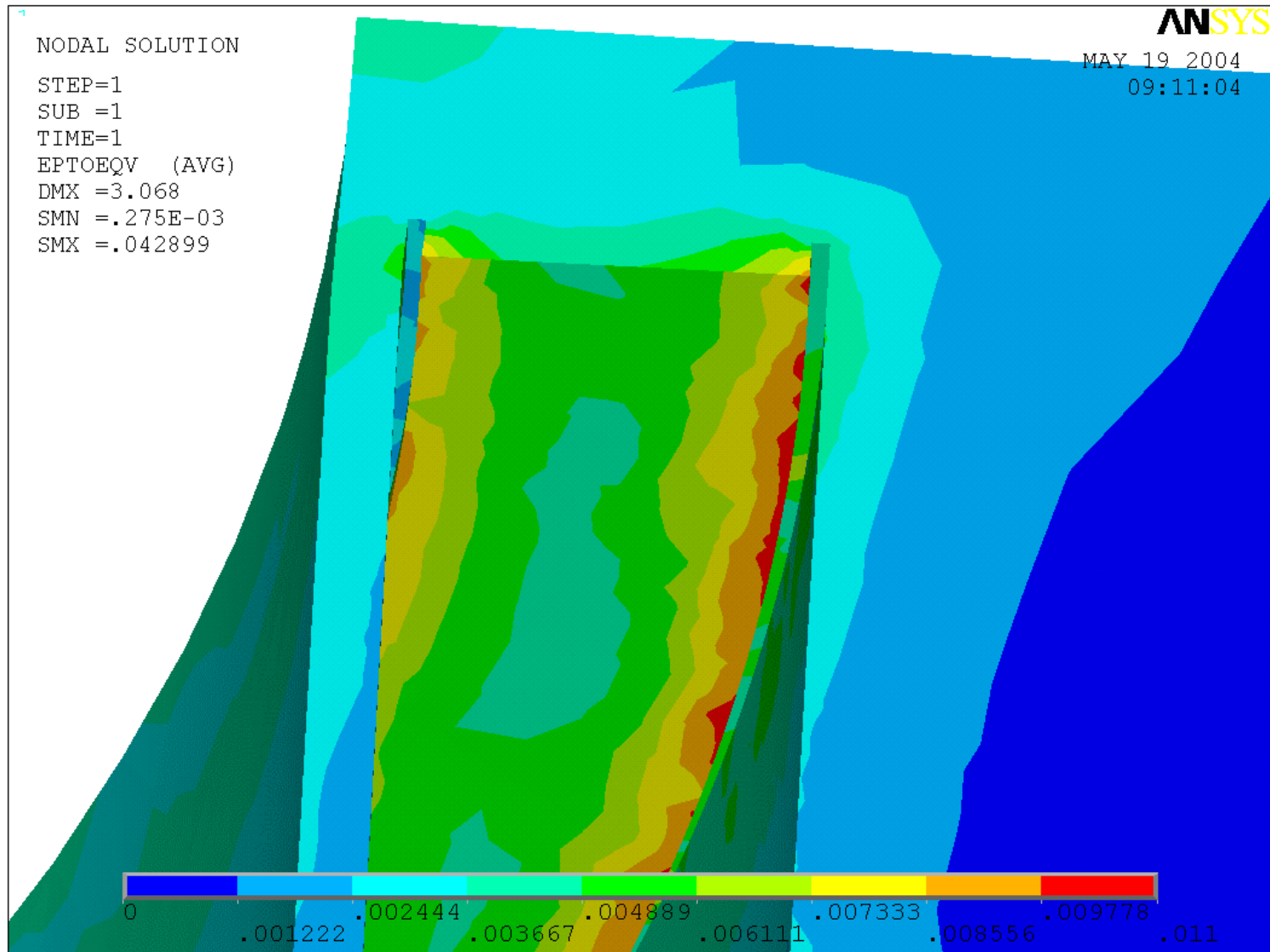




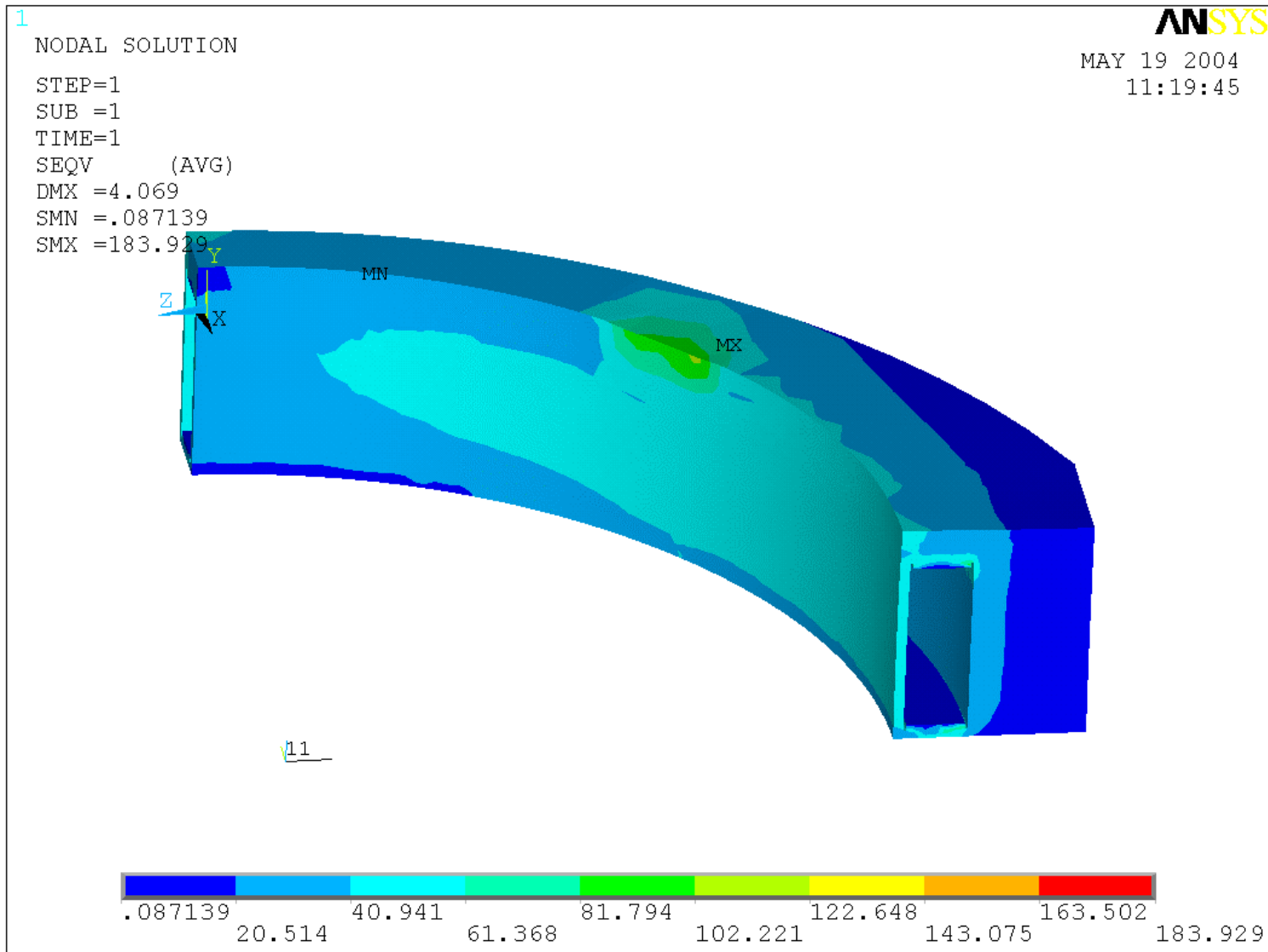
Bilag 7. Plot af von Mises spændinger i epoxystøbemasse for stationær temperatur. Max-værdi optræder ved randbetingelse og er ikke realistisk.



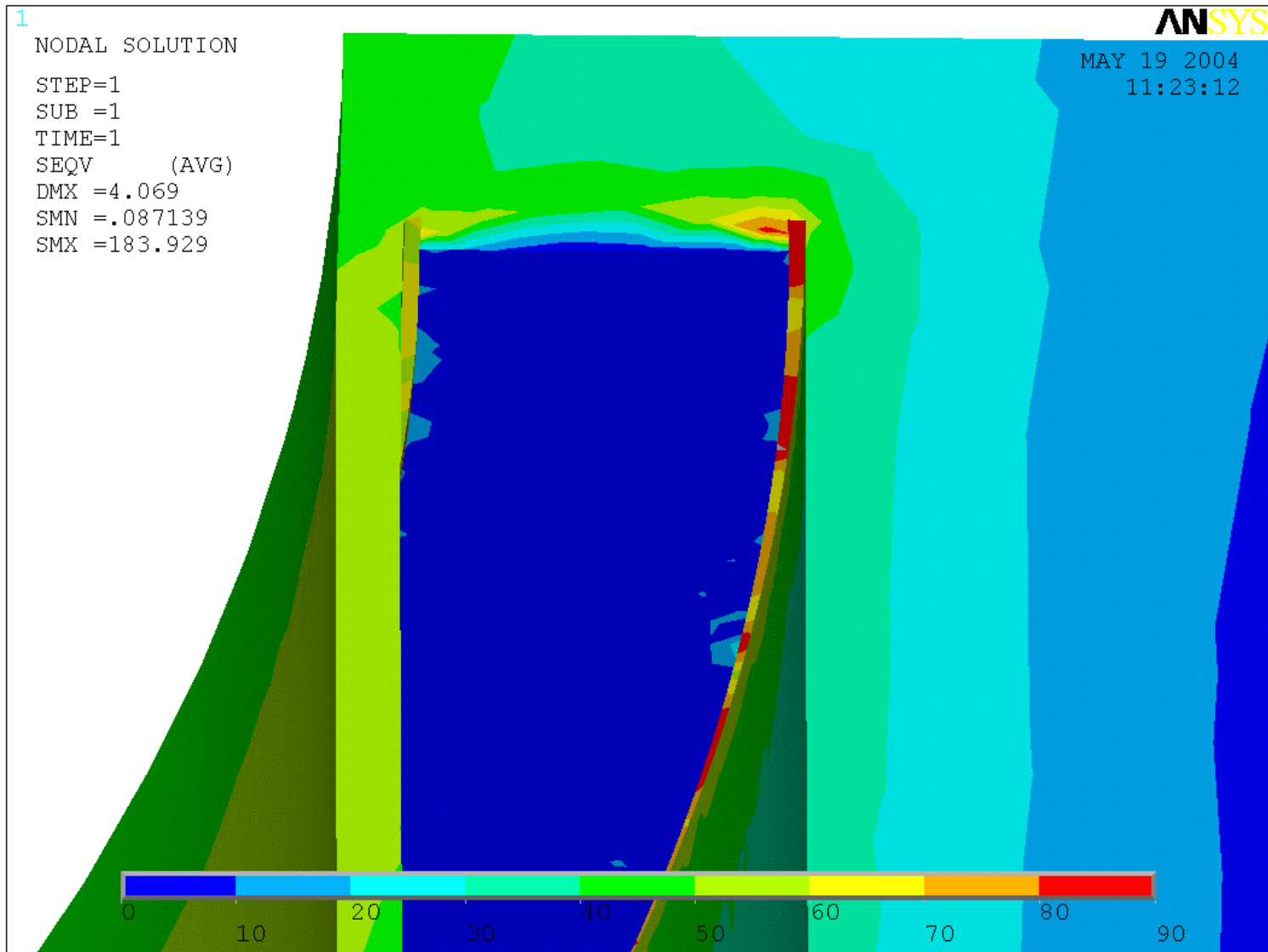
**Bilag 8. Plot af von Mises spænding i epoxystøbemasse i område hvor revner er observeret. Last er stationær temperaturfordeling.**



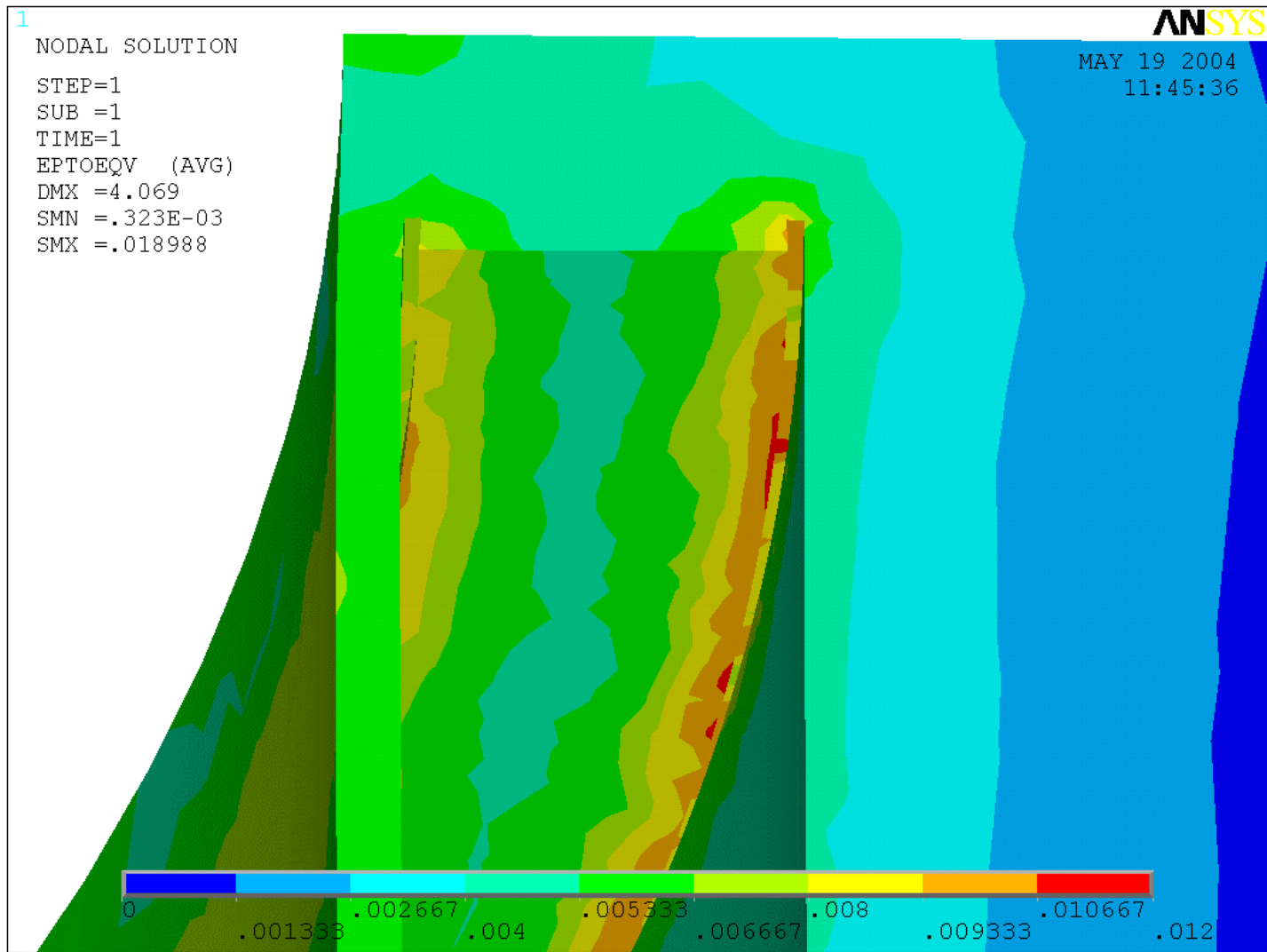
Bilag 9. Plot af von Mises tøjning i epoxystøbemasse i område hvor revner er observeret. Last er stationær temperaturfordeling.



Bilag 10. Plot af von Mises spændinger i epoxystøbemasse for termisk chok. Max-værdi optræder ved randbetingelse og er ikke realistisk.



**Bilag 11. Plot af von Mises spændinger i epoxystøbemasse for termisk chok.**



**Bilag 12. Plot af von Mises tøjninger i epoxystøbemasse for termisk chok.**