

Dokument: SASAK-RAP-VA-AKS-FI-0011-00

# **Krympekræfter ved svejsning af aluminium**

SASAK  
Projekt 2 - Varmepåvirkning

Patrick Ronni Schotti

Juni 2001

## Abstrakt

Denne rapport, som bygger på uddrag fra et afgangprojekt udført for SASAK af en ingeniørstuderende fra Ingeniørhøjskolen Københavns Teknikum, omhandler brugen samt kalibrering af hulboremetoden i aluminium. Blandt andet er der en udledning af en formel til forudsigelse af krympekræfter på langs af svejste aluminiumsplader. Formlen til beregning af krympekræften er udledt teoretisk, og det er eftervist, at den virker via forsøg.

Rapporten indeholder en konklusion over hele projektet, samt formelen til beregning af krympekræften.

Under afsnittet forsøg er der foretaget forsøg med strain gauges (hulboremetoden). De udførte forsøg er til kalibrering af hulboremetoden og understøtter teorien der er brugt, til forudsigelse af krympekræfter.

## Indholdsfortegnelse

<u>Abstrakt</u> .....	2
<u>Indholdsfortegnelse</u> .....	3
<u>Indledning</u> .....	4
<u>Mål</u> .....	4
<u>Midler</u> .....	4
<u>Materialer</u> .....	6
<u>Terorisk grundlag for hulboremetoden</u> .....	7
<u>Indledning til Hulboremetoden</u> .....	7
<u>Beskrivelse af hulboremetoden</u> .....	7
<u>Kalibrering</u> .....	9
Slibeteknik.....	9
Kalibrerings kontrol.....	10
<u>Udstyr til hulboremetoden</u> .....	11
<u>Usikkerheds vurdering</u> .....	12
Fordele .....	13
Ulemper .....	13
<u>Udledning af formler til hulboremetode n</u> .....	13
<u>Målt spændingsgradient</u> .....	18
<u>Hulboremetoden i brug</u> .....	19
<u>Kalibrering</u> .....	19
A og B faktorer .....	19
Slibespændinger .....	25
Borespændinger.....	26
Plastisk deformation.....	27
<u>Krympning og vinkelknæk</u> .....	29
<u>Tværs og langsgående krympning</u> .....	29
<u>Vinkelknæk</u> .....	30
<u>Krympekræfter</u> .....	33
<u>Indledning til krympekræfter</u> .....	33
<u>Teorien bag krympekraftformlen</u> .....	34
<u>Idé 1 (krympekraften ved brug af svejsningsarealet)</u> .....	36
<u>Idé 2 (krympekraft ved brug af påført varme)</u> .....	40
<u>Varmeudbredelse (faktor 0.11 udledning)</u> .....	42
<u>Formler til beregning af krympekræfter</u> .....	45
<u>Konklusion</u> .....	47
<u>Referenceliste</u> .....	48

## **Indledning**

Denne rapport er baseret på et afgangsprøve udført af Patrick Ronni Schotti i samarbejde med FORCE Institutet, i forbindelse med SASAK delprojekt 2-Varmepåvirkning.

### **Mål**

At skabe et værktøj til forudsigelse af langsgående krympekræfter når der svejses i aluminium. Dette værktøj tænkes udformet analogt med de værktøjer, der omhandler stål. Det er meningen, at resultaterne skal indgå i den rapport og ståbi, der bliver lavet i projektet SASAK. Der ønskes registrering af krympning samt vinkeldeformationer ved svejseforsøgene.

### **Midler**

Bestemmelse af krympekræfter ved hjælp af strain gauges - "hulboremetoden".

### ***Grundmaterialer***

5083 (AlMg4,5Mn0,7) (H111, H116) anvendes til skibe

6082 (AlSiMgMn) typisk, stærk til ekstrudering

### ***Materialetykkelser***

5 mm, 8mm, 12mm og 20 mm. Der arbejdes i forskellige tykkelser, først og fremmest for at kunne få forskellige strengeantal i svejsningen.

### ***Processer***

Der svejses med MIG, til forsøgene.

### ***Sømtyper***

Kun stumpsømme, svejst ensidigt.

Opgaven er en underdel af projektet SASAK, der er under udførelse hos FORCE.  
Alle Forsøgene og svejsningerne udføres på FORCE i Brøndby, under supervision af vejlederen på projektet, civilingeniør Gunnar Sørensen. Under svejseforsøgene skal der svejses med hhv. 1 streng (hvor muligt) og flere strenge.

## Materialer

Materialet, der er udvalgt til kalibrering, er aluminium 6082 T6 og 5083 H111 (se bilag 10 og 13). Dette materiale er udvalgt, da materialet er velegnet til kalibrering og skulle være uden valespændinger, når forsøgene påbegyndes. Materialet bruges til kalibrering af de slibespændinger, der påføres materialet under forsøgene, når gaugen monteres.

Materialet 5083 (H116 og H111) er det mest anvendte aluminium som plademateriale til skibsindustrien, hvilket bl.a. er det, projektet omhandler. Derfor anvendes materialet til forsøgene i rapporten.

### **Materialeoversigt**

#### ***Forsøgsmateriale***

6082 T6 (AlMgSi1) modningshærdede ( $R_m = 331$  MPa,  $R_{p0,2} = 279$  MPa)

5083 H111 (AlMg4,5Mn0,7) ikke modningshærdede ( $R_m = 296$  MPa,  $R_{p0,2} = 126$  MPa)

5083 H116 (AlMg4,5Mn0,7) ikke modningshærdede ( $R_m = 360$  MPa,  $R_{p0,2} = 251$  MPa)

Der er i bilag 2 et certifikat DIN 50049-3.1.b over materialerne.

#### ***Tilsatsmateriale***

5183 er AlMg4,5Mn som er søvands bestandigt ( $R_m = 290$  MPa,  $R_{p0,2} = 140$  MPa)

#### ***Materialetilstande***

T6 betyder kunstigt modnet, og har betydning for materialets trækstyrke.

H116 og H111 betyder kold deformeret, hvilket har stor betydning for materialets 0,2 spænding.

# Terorisk grundlag for hulboremetoden

## Indledning til Hulboremetoden

Hulboremetoden kan betragtes som en semi destruktiv metode til måling af egenspændingstilstanden i et elastisk materiale. Ved denne metode er det muligt at bestemme egenspændingerne i et punkt ved at bore et lille hul i materialet. Hullet bores i centrum af gaugen (rosetten). Rosetten monteres emnet med egenspændinger, og spændingsaflastningen i materialet op til det borede hul måles.

Det hedder en rosette, fordi der sider 3 gauges fast monteret på et underlag. Hver gauge har en retning, som de andre ikke har, og derved opstår ordet rosette.

Måleaflæsningen kan foretages med strain gauges, som limes på materialets overflade i en 45° roset rundt om det sted, hvor hullet skal bores. Metoden giver en acceptabel nøjagtighed. Nøjagtigheden fremgår af ref. 11.

Tidligere var det vanskeligt at bore hullet med en tilstrækkelig præcision. Med de moderne værktøjer er det nu muligt at bruge metoden. Det skyldes, at den boremetode, der nu anvendes, er med optisk centrering.

## Beskrivelse af hulboremetoden

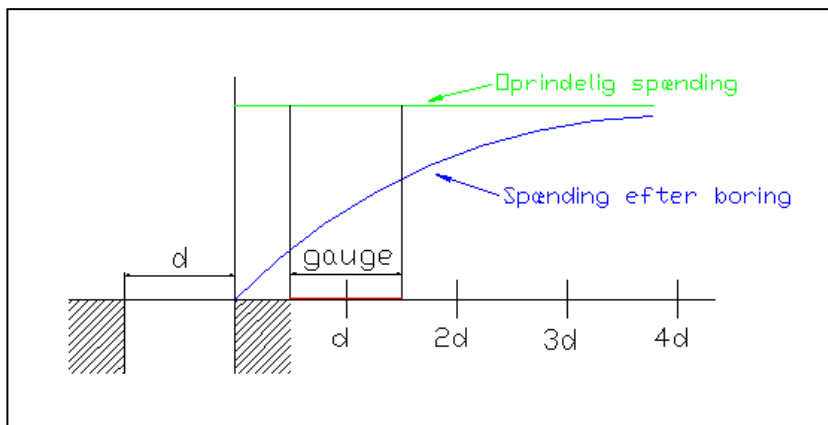
Boring af huller i et elastisk materiale med egenspændinger vil medføre at spændingerne ved hulkanten vil være nul, altså det samme som spændingerne på en fri overflade.

Efter at hullet er boret, giver det en lokal aflastning af spændingerne i materialet. Boringen giver en ændringen af overfladetøjningen i en given afstand fra hulkanten. Det er derfor et udtryk for aflastningen af egenspændingerne på dette sted. Denne spændingsaflastning vil så afhænge af aflastningen ved hulkanten, som er lig med egenspændingerne i materialet.

Egenspændingerne kan bestemmes ved tøjningsmåling med strain gauges, og de målte tøjninger kan omsættes til spændingsaflastningen ved hulkanten.

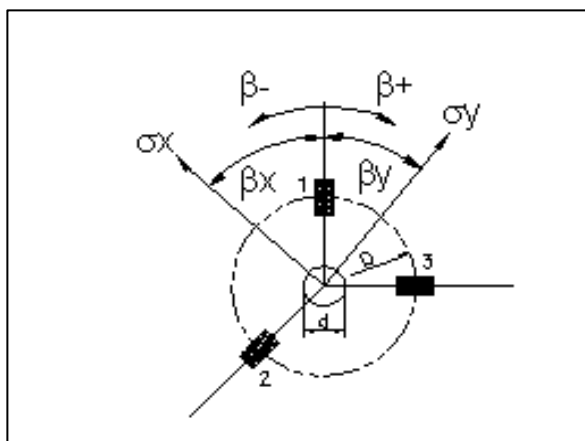
I et enakset spændingsfelt med kendt spændingsretning kan egenspændingen måles med en enkelt strain gauge, monteret radiale ud fra hullet i spændingens retning.

På fig. 4 ses fordelingen af radialspændingen før og efter hullet er boret.



Figur 4

Normalt vil egenspændingstilstanden på overfladen være toakset med ukendt hovedretning, og tøjningerne må derfor måles i tre retninger med en strain gauge roset som vist på fig. 5 .



Figur 5

Beskrivelse af de tegn, der bruges:

$D$  = Middeldiameter af strain gauges

$d$  = Hul diameter

$z$  = Hul dybde

$\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3$  = Målte tøjninger

$\sigma_x, \sigma_y$  = Hovedspændinger

$\varepsilon_r$  = Radial tøjning

$R_{p0.2}$  = Flydespænding

## **Kalibrering**

Kalibreringen skal udføres, fordi der er stor forskel på de personer, der skal udføre forsøgene. Det vil sige den nøjagtighed, der bores med og måden der slibes på, vil være forskellig fra person til person.

Kalibrerings forsøgene kan blandt andet udføres ved at montere gauge rosetten på en trækstang og belaste denne med en kendt kraft i en trækprøvemaskine. Herefter bores hullet og tøjnings ændringen aflæses ved en ny belastning.

Den "påtrykte" spænding måles med fire almindelige strain gauges, to på hver side af trækstangen, over og under rosetten, hvorved eventuelle overlejlrede bøjningsspændinger kan registreres.

Der skal kalibreres for slibespændinger, der påføres emnet før gaugen monteres.

Slibningen er for at fjerne uønskede partikler på overfladen samt for at jævne overfladen ud, så gaugen sidder plant.

Når der bores et hul i et emne, der er udsat for store spændinger, opstår der et fænomen, der kaldes plasticitet i hulranden. Det svarer til at bore et hul i pladen og trække med en stor kraft, at der vil opstå flydning i hulranden.

Plasticitet er et problem, der også skal kalibreres for.

Når der bores i et materiale introduceres nye spændinger, som det er nødvendigt at kende. Det kan kalibreringen også detekttere. Hvis man bruger et materiale med valse spændinger, kan de også måles (kalibreres) med hulboremotoden.

## **Slibeteknik**

Slibning skal ske før montering af rosetten. Slibningen foretages med en håndslibemaskine med små slibeskiver, hvor kornstørrelsen er 60, 120, 180, og 320.

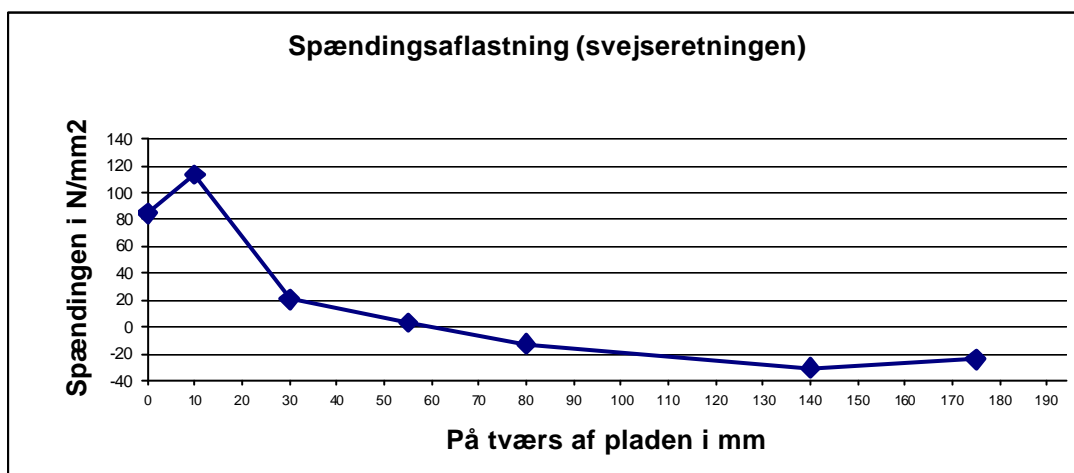
For hver finhed slibes der, indtil den fineste skive er brugt. Skiverne bruges kun en gang.

Når der slibes, skal det gøres med et let tryk, og der skal slibes i samme retning hver gang.

### Kalibrerings kontrol

Det er muligt at se, om der er kalibreret ordentligt. Dette gøres ved at tage en svejst plade og måle på forskellige punkter hen over pladen, fra miden til pladens kant.

Disse målte spændinger sættes ind i et skema, se skema 6.



Skema 6

På skemaet ses en positiv del og en negativ del. Disse to dele skal opveje hinanden, det vil sige at arealet under den positive del skal være lige så stor som arealet over den negative del. Kurven svarer også til ref. 8.

Det kan også forstås ved Newton`s anden lov, hvor summen af kræfter skal være lig med masse gange acceleration. Når emnet ligger stille, er den del med masse gange acceleration lig med nul, og det skal summen af kræfter også være.

Det forudsætter, at spændingskurven er et udtryk for spændingen i midten af pladens tykkelse, da der kan være forskel i over- og undersidens kurver.

Når dette er opfyldt, er der kalibreret korrekt. De målte spændinger skal korrigeres for kalibrerings spændingerne (plasticitet, slibespændinger og borespændinger), der påføres under hele processen med hulboremetoden. Når dette er sket, får man skema 6, hvor de omtalte arealer skal være lige store.

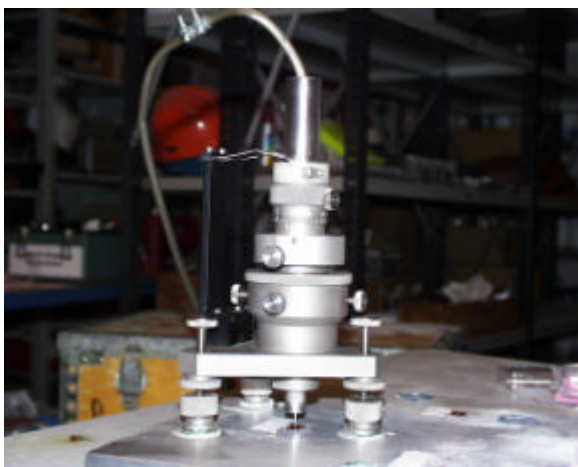
### **Udstyr til hulboremetoden**

Det anvendte hulboreudstyr består af en RS-200 Milling Guide med optisk centrerung og med high speed luftturbine, der har et omdrejnings tal på ca. 300.000 omdrejninger per minut. Den bruger et lufttryk på 2,8 atmosfære.

Hullet bores med en hårdmetalsfræser Ø1,6 med flad bund. Boreddybden styres af en mikrometerskrue, der er monteret på boresoklen.

En fjederbelastning på boreholderen sikrer konstant tilspændingskraft under boringen. Tilspændingen reguleres ved at dreje på en dybdemikrometerskrue indsat mellem fjederen og boret. Mikrometerskruen sikrer samtidig en nøjagtig indstilling af huldybden. Der er valgt at bore med luftturbine på grund af denne metodes lave boreeffekt og den kontrollerede tilspændingskraft. Derved minimeres kalibreringsspændingerne.

Den eneste operatørfhængige manøvre ved denne metode er at dreje på mikrometerskruen. Tøjningsmålingen foretages med TEA-062RK-120 (se bilag 9) standard hulgaugerosetter, som har nedenstående specifikationer. Billede 1 viser boresoklen, og billede 2 viser måleudstyret.



Billede 1



Billede 2

### Specifikationer

$D_0 = 5.13$  mm middel gauge diameter

$R = 120 \Omega \pm 0.4\%$  gauge modstand

$K = 2.04 \pm 1\%$  gauge faktor

### Usikkerheds vurdering

De væsentlige operatørafhængige fejlkilder ved hullboremetoden er slibning af overfladen, centrering af boret, tilspændingshastighed ved boring samt instrumentaflæsning.

Når der er blevet kalibreret, kan der undersøges, hvor mange procents usikkerhed der er ved denne metode. Usikkerheden er blevet minimeret med det moderne udstyr, efter man har kalibreret sin boring. Usikkerheden ifølge ref. 11 er på 18%, hvilket må siges at være større end ved normal brug af strain gauges, hvor usikkerheden er på ca. 6% afvigelse fra det rigtige.

Hvis metoden ikke kalibers, må man sige at metoden er meget usikker, næsten ubrugelig.

## Fordele

1. Det er muligt at måle på et emne, der allerede er udsat for spændinger
2. Man kan måle på alt, som rosetten kan side på

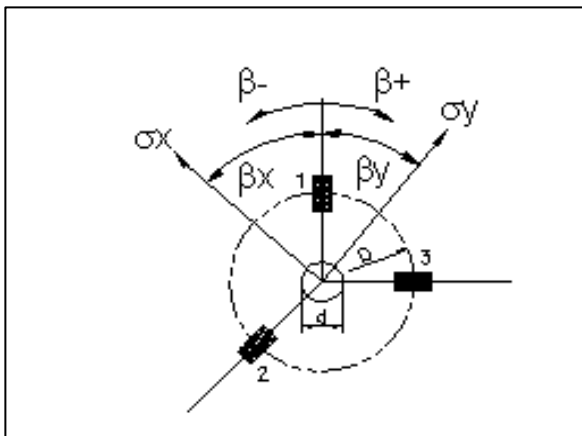
## Ulemper

1. Hvis boret er slidt, bliver forsøgene unøjagtige
2. Når lejet i turbinen bliver slidt, bores der med for stort hul, og der skal omkalibreres
3. Kræver stor omhyggelighed
4. Kalibreringen tager meget tid

## Udledning af formler til hulboremetoden

Til hulboremetoden skal der bruges en beregningsformel til at fastlægge hovedtøjningerne samt retningen af dem. Det vil sige deres retning (vinkel) samt størrelse ud fra rosettens koordinatsystem. Formlerne, der skal anvendes, skal udledes fra Hook's lov.

Figur 6 viser strain gaugen, der bruges til hulboremetoden, og gaugens koordinatsystem.



Figur 6

Teorien bag normale gauges (rosetter) er taget fra ref. 11 og 16. Formlen, der anvendes, er hentet fra bilag 11. Formlen er følgende :

$$\mathbf{e}_{x,y} = \frac{\mathbf{e}_3 - \mathbf{e}_1}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{\mathbf{e}_3 - \mathbf{e}_2}{2}\right)^2 + \left(\frac{\mathbf{g}_{xy}}{2}\right)^2}$$

$\varepsilon_{x,y}$  = Tøjningen både i x & y retning.

$\gamma$  = Vinkelændringen

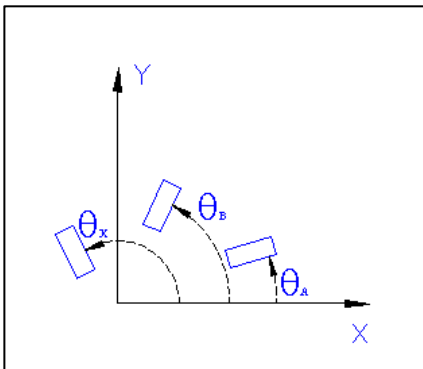
Formlen skrives nu lidt om til følgende:

$$\mathbf{e}_{x,y} = \frac{\mathbf{e}_3 - \mathbf{e}_1}{2} \pm \frac{1}{2} \cdot \sqrt{(\mathbf{e}_3 - \mathbf{e}_2)^2 + \mathbf{g}^2}$$

**Formel 1.**

Ud fra bilag 11 vil jeg udlede vinkelændringen ( $\gamma$ ). Til det skal jeg kende rosettens type, der skal bruges i forsøgene.

I dette tilfælde er det en rosette med vinklerne  $0^\circ$ ,  $90^\circ$  og  $225^\circ$ , se figur 7. Når denne formel er udledt, kan den kun bruges til den omtalte gauge type.



Figur 7

$$\theta_a = 0^\circ$$

$$\theta_b = 90^\circ$$

$$\theta_c = 225^\circ$$

Følgende 3 formler er fra bilag 11 samt ref. 16. De vil blive omskrevet til formel 2, der er et udtryk for vinkelændringen.

$$\mathbf{e}_1 = \mathbf{e}_{-x} \cdot \cos^2(\mathbf{q}_c) + \mathbf{e}_y \cdot \sin^2(\mathbf{q}_c) + \mathbf{g}_{xy} \cdot \sin(\mathbf{q}_c) \cdot \cos(\mathbf{q}_c)$$

$$\mathbf{e}_2 = \mathbf{e}_{-x} \cdot \cos^2(\mathbf{q}_b) + \mathbf{e}_y \cdot \sin^2(\mathbf{q}_b) + \mathbf{g}_{xy} \cdot 2 \cdot \sin(\mathbf{q}_b) \cdot \cos(\mathbf{q}_b)$$

$$\mathbf{e}_3 = \mathbf{e}_x \cdot \cos^2(q_a) + \mathbf{e}_y \cdot \sin^2(q_a) + \mathbf{g}_{xy} \cdot 2 \cdot \sin(q_a) \cdot \cos(q_a)$$

Vinklerne sættes ind og giver følgende:

$$\mathbf{e}_1 = \mathbf{e}_x \cdot \frac{1}{2} + \mathbf{e}_y \cdot \frac{1}{2} + \mathbf{g}_{xy} \cdot \frac{1}{2}$$

$$\mathbf{e}_2 = \mathbf{e}_y$$

$$\mathbf{e}_3 = \mathbf{e}_x$$

Nu kan de tre ligninger løses og formel 2 udledes.

$$\mathbf{g}_{xy} = -\mathbf{e}_3 + 2 \cdot \mathbf{e}_1 - \mathbf{e}_2$$

**Formel 2**

Til formel 2 er vinklerne fra rosetten brugt, og formelen er udledt af de tre formler ovenfor.

Nu læges formel 1 og formel 2 sammen.

$$\mathbf{e}_{x,y} = \frac{\mathbf{e}_1 + \mathbf{e}_3}{2} \pm \frac{1}{2} \cdot \sqrt{(\mathbf{e}_3 - \mathbf{e}_2)^2 + (2 \cdot \mathbf{e}_1 - \mathbf{e}_3 - \mathbf{e}_2)^2}$$

**Formel 3**

Formlen for beregning af spændinger er fra ref. 16. Formlen er følgende:

$$\mathbf{s} = \mathbf{e} \cdot E$$

**Formel 4**

Nu vil jeg lægge formel 3 og 4 sammen.

$$\mathbf{s}_{1,2} = E \cdot \frac{\mathbf{e}_1 + \mathbf{e}_3}{2} \pm \frac{1}{2} \cdot E \cdot \sqrt{(\mathbf{e}_3 - \mathbf{e}_2)^2 + (2 \cdot \mathbf{e}_1 - \mathbf{e}_3 - \mathbf{e}_2)^2}$$

**Formel 5**

De næste to formler er taget fra ref. 16 samt bilag 11. Formlen er følgende:

$$\mathbf{s}_1 = \frac{E}{1-n^2} \cdot (\mathbf{e}_1 + n \cdot \mathbf{e}_2)$$

**Formel 6**

$$\mathbf{s}_2 = \frac{E}{1-n^2} \cdot (\mathbf{e}_2 + n \cdot \mathbf{e}_1)$$

Formel 7 ses også i ref. 4-6-7-10, hvor a og b er kalibrerings koefficienter, som kan findes under bilag 3 og bilag 9. Faktorerne a og b, skal findes ved kalibrering, i afsnittet "hulboremetoden i brug" under kalibrering af A og B.

$$A = -\frac{1-n}{2 \cdot E} \cdot \left( \frac{d_{borethul}}{r_{gaugeradius}} \right)^2$$

$$B = -\frac{1+n}{2 \cdot E} \cdot \left[ \left( \frac{d_{borethul}}{r_{gaugeradius}} \right)^2 - 3 \cdot \left( \frac{d_{borethul}}{r_{gaugeradius}} \right)^4 \right]$$

**Formel 7**

For at gøre det overskueligt vil jeg lave formel 3 om ved at indføre en parameter, som hedder x, der står for følgende.

$$x = \sqrt{(e_3 - e_2)^2 + (2 \cdot e_1 - e_3 - e_2)^2}$$

$$e_{x,y} = \frac{e_1 + e_3}{2} \pm \frac{1}{2} \cdot \sqrt{(e_3 - e_2)^2 + (2 \cdot e_1 - e_3 - e_2)^2}$$

**Formel 3**

Formel 3 laves nu midlertidigt om til formel 3a.

$$e_{x,y} = \frac{e_1 + e_3}{2} \pm \frac{1}{2} \cdot x$$

**Formel 3a**

Nu vil formel 6 samt formel 3a blive lagt sammen til formel 8.

$$s_{1,2} = \frac{E}{1+n^2} \cdot \left( \frac{e_a + e_b}{2} \pm \frac{1}{2} \cdot x + n \cdot \frac{e_a + e_b}{2} \pm \frac{1}{2} \cdot x \right)$$

Ved at rokere rundt på de forskellige parametre kommer formlen til at se ud som følgende.

$$s_{x,y} = E \cdot \left( \frac{e_a + e_b}{2 \cdot (1-n)} \pm \frac{1}{2 \cdot (1+n)} \cdot x \right)$$

**Formel 8**

Så kan formel 7 og formel 8 nu lægges sammen. Formel 7 er beskrevet i ref. 4–6–7–10. Af beskrivelsen fremgår, at det kun er den første del i formlen, der skal bruges til dette. Så formlen bliver til følgende:

$$s = \frac{e_1 + e_3}{4A} \pm \frac{1}{4B} \cdot x$$

Nu indføres værdien af x.

$$e = \frac{e_1 + e_3}{4A} \pm \frac{1}{4B} \cdot \sqrt{(e_3 - e_2)^2 + (2 \cdot e_1 - e_3 - e_2)^2}$$

Formlen bliver nu omskrevet til den, der også er i ref. 3 og 6.

$s = \frac{e_1 + e_3}{4A} \pm \frac{\sqrt{2}}{4B} \cdot \sqrt{(e_1 - e_2)^2 + (e_2 - e_3)^2}$	<b>Formel 9</b>
---	-----------------

Formel 9 svarer til formlen fra ref. 3 og 6. Formel 9 er den formel, der skal bruges ved beregningerne i forsøgene.

Da disse formler allerede eksisterer og er velkendte er de udledt for at få en dybere forståelse af deres anvendelse i forbindelse med hulboremotoden.

De anvendte tegn betyder følgende :

A, B, a, b = reduktionskoefficienter

d = hul diameter

r = middelfradius af strain gaugen

E = elasticitets modul

v = kontinuitets forholdet

$\epsilon_{x,y}$  = målte tøjninger

$\sigma$  = spændinger

x = forkortelse

$\gamma_{xy}$  = vinkel ændring

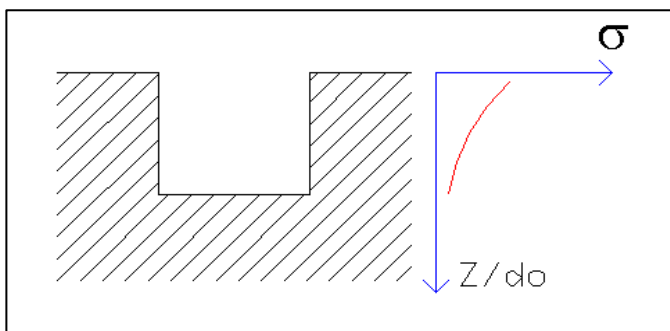
$\theta$  = vinkel i grader

$\tau$  = forskydningsspænding

### Målt spændingsgradient

Figur 8 viser en typisk tøjningsaflastning på overfladen som funktion af huldybden.

Det ses, at den maksimale spændingsaflastning opnået ved fuld huldybde svarer til en huldybde på 1.2 gange huldiameteren. Øges huldybden udover den værdi, vil der ikke ske en yderligere aflastning på overfladen. Dette fremgår af ref. 11.



Figur 8

Den største nøjagtighed opnås ved at bore ned til fuld huldybde, hvilket svarer til 1.2 gange hul diameteren, der bores med. Det skyldes, at aflastningen ikke er særlig stor, hvis der måles med 0.3 gange huldiameteren. Hullets dybde bestemmer aflastningen af overfladen, dog max de 1.2 gange huldiameteren som nævnt ovenfor.

Den kurve, der fremkommer ved forsøgene, er en tilnærmet gradient til den virkelige spænding. Derfor bruges tallene (egenspændingerne) kun for fuld huldybde.

## Hulboremetoden i brug

### Kalibrering

#### **A og B faktorer**

A og B faktorerne kan findes ved kalibreringsforsøg og ved opslag i bilag 3 og 9, hvor kurven for a og b findes. For at komme fra lille a til store A bruges formel nummer 7, som er følgende.

$$A = -\frac{1+n}{2 \cdot E} \cdot a$$

For at komme fra lille b til store B bruges formelen nummer 7, som er følgende.

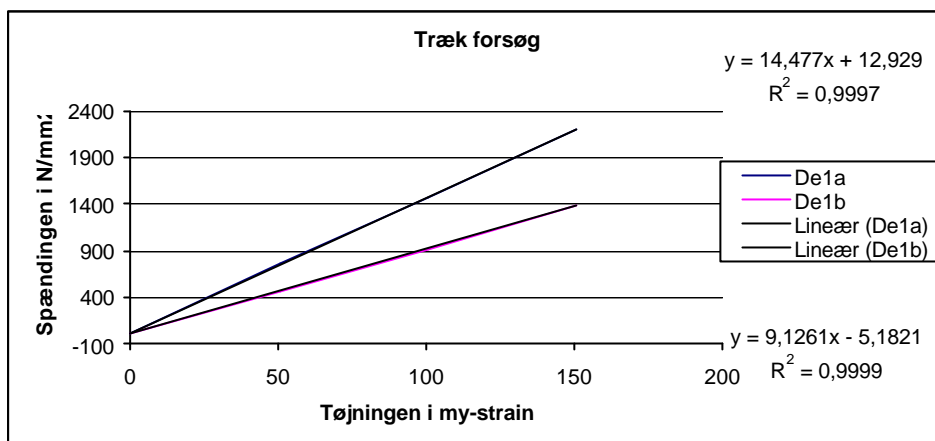
$$B = -\frac{1}{2 \cdot E} \cdot b$$

Det vil nu blive vist, at kalibrerings koefficienterne og de faste koefficienter a og b (fra bilag 9) er ens.

I forsøg 5 er der lavet et trækforsøg til kalibrering af a og b koefficienterne. Først er der trukket i en stang uden at bore hul i gaugen, som giver linjen *De1a* i skema 1, samt *De3a* i skema 2. Derefter bores hullet, og der trækkes igen i samme emne. Denne gang fås linjen *De1b* i skema 1, samt *De3b* i skema 2. *De1a* og *De1b* er tøjnings ændringen i træk retningen på emnet. *De3a* og *De3b* er på tværs af træk retningen på emnet.

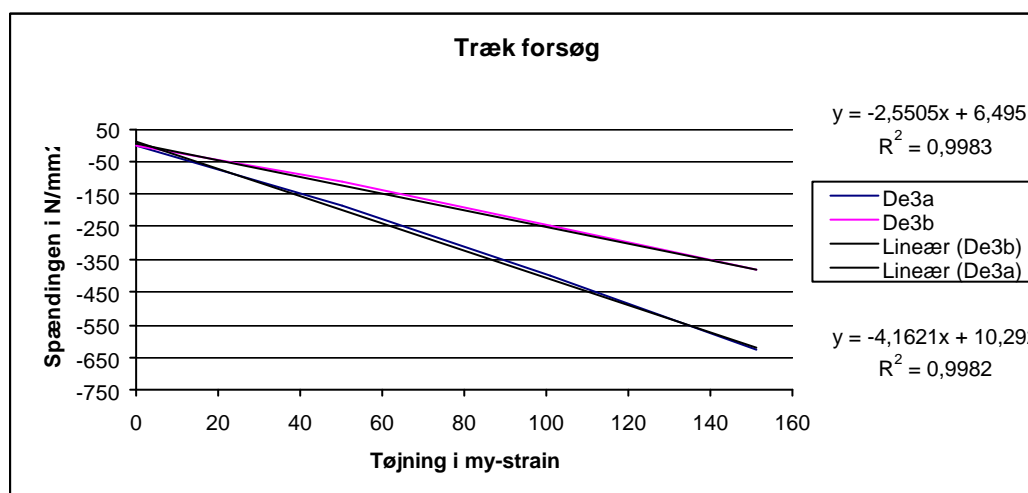
Linear(*De1a*) betyder at der er lavet en lineær regression på den linje (*De linje*), der er lavet i forsøget.

Skema 1 og skema 2 er taget fra forsøg 5, hvor forsøget er beskrevet mere detaljeret.



Skema 1

Skema 1 viser tøjningen samt tilsvarende spænding i trækretningen.



Skema 2

Skema 2 viser tøjningen samt tilsvarende spænding på tværs af trækretningen.

I skema 1 og 2 tages tallene fra den lineære regression, hvor hældningen af kurverne kan aflæses. De hældninger sættes ind i formlerne for A og B faktorerne. Formlerne er taget fra ref. 3 og 6.

$$A = \frac{1}{2} \cdot (e_{c3} + e_{c1})$$

$$B = \frac{1}{2} \cdot (e_{c3} - e_{c1})$$

Den nedenstående formel stammer så fra Hook`s lov, som er  $\boldsymbol{a} = E \frac{\boldsymbol{S}}{e}$ , hvor  $\alpha$  er hældningskoefficienten på arbejdskurven, der svarer til elasticitetsmodulet.

$$\boldsymbol{e}_c = \Delta \boldsymbol{a} = \boldsymbol{a}_a - \boldsymbol{a}_b$$

Hældningen for trækretningens kurve samt kurven for hældningen vinkelret derpå, bliver så følgende:

$$\boldsymbol{e}_{c3} = \Delta \boldsymbol{a}_1 = 9.1261_{(efterboring)} - 14.477_{(førboring)} = -5.3509$$

$$\boldsymbol{e}_{c1} = \Delta \boldsymbol{a}_3 = -2.5503_{(efterboring)} - (-4.1612)_{(førboring)} = 1.6116$$

A og B kan nu regnes ud.

$$A = \frac{1}{2} \cdot (-5.3509 + 1.6116) = -1.86965$$

$$B = \frac{1}{2} \cdot (-5.3509 - 1.6116) = -3.48125$$

For at kunne regne a og b ud, skal man kende E, som er elasticitetsmodulet for materialet, samt  $\nu$ , som er kontinuitets forholdet. E findes ved at tage den inverse af hældningen på trækkurven.  $\nu$  findes ved at dividere de to hældninger på kurverne med hinanden (De1a og De3a). Det udregnes på følgende måde, som er via Hook`s lov.

$$E = \frac{1}{\boldsymbol{a}_1} \cdot 10^{-6}$$

$$E = \frac{1}{14.477_{(førboring)}} \cdot 10^6 = 69075 \frac{N}{mm^2}$$

$$n = \frac{a(De1a)}{a(De3a)}$$

$$n = \frac{4.1621_{(f\ddot{o}rboring)}}{14.477_{(f\ddot{o}rboring)}} = 0.2874 \approx 0.29$$

v er ved fors\dd{o}g fundet til 0.29. Ved opslag i ref. 15 kan v afl\dd{e}ses til 0.3. Dermed er der ingen tvivl om, at v = 0.29 er rigtigt. E er ved fors\dd{o}g fundet til 69075 N/mm<sup>2</sup>. Ved opslag i ref. 15 kan E afl\dd{e}ses til 70000 N/mm<sup>2</sup>. Dermed er der ingen tvivl om, at E = 70000 N/mm<sup>2</sup> er rigtigt.

Nu kan lille a og lille b regnes ud efter formel 8. Den a og b, der nu udregnes, skal sammenholdes med den a og b, som senere findes i kalibrerings kurven fra bilag 9.

$$a = -\frac{A \cdot 2 \cdot E}{1 + n}$$

$$a = -\frac{-1.86965 \cdot 2 \cdot 69075}{1 + 0.29} = 0.20$$

$$b = B \cdot 2 \cdot E$$

$$b = -3.48125 \cdot 2 \cdot 69075 = 0.48$$

Efter at der er kalibreret frem til en a og b faktor, skal a og b nu findes uden kalibrering. Den a og b, der nu skal findes fra bilag 9, er afh\dd{a}ngig af forholdet mellem diameteren p\dd{a} det borede hul og diameteren p\dd{a} rosetten.

I fors\dd{o}get tidligere, hvor der er boret hul i tr\dd{a}kstangen, er hullet m\dd{a}lt til at v\dd{a}re \dd{O}=2.06 mm, og rosetten har en diameter p\dd{a} \dd{O}=5.13 mm.

$$\frac{D_0}{D} = \frac{2.06}{5.13} = 0.40$$

N\dd{a}r dette forhold p\dd{a} 0.40 er fundet, kan a og b findes i kurven, som findes i bilag 9.

a og b er så følgende:

$$a = 0.19$$

$$b = 0.47$$

Deraf ses det, at forskellen mellem forsøget og de fundne koefficienter a og b er meget lille, hvilket vil sige at dette godt kan bruges til beregningerne. Det skal nævnes, at de fundne a og b er for fuld huldybde, det vil sige at der er boret 1.92 mm ned i midten af rosetten.

De anvendte tegn betyder følgende :

A, B, a, b = reduktionskoefficienter

$D_0$  = hul diameter

D = middeldiameter af strain gaugen

E = elasticitets modul

$\nu$  = kontinuitets forholdet

$\alpha$  = kurvens hældning

$\epsilon$  = målte tøjninger

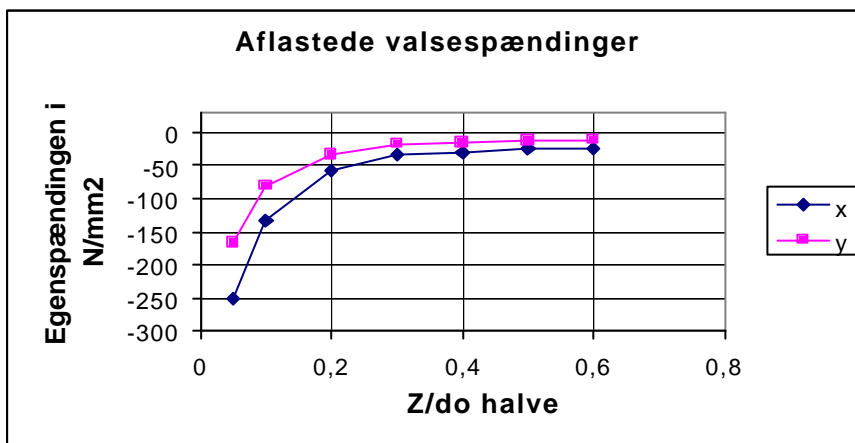
De1a, De3a, De1b, De3b = linear regression

## Valsespændinger

I forsøg 1 er der lavet en undersøgelse af valsespændinger i materialet 6082, fordi dette materiale skulle være næsten uden valsespændinger.

Valsespændingerne findes ved at bruge et stykke plade, hvorpå der monteres en rosette (strain gauges), uden at der først er slebet på emnets overflade.

Skema 3 viser hvor store valsespændingerne er i emnet. Der er i forsøg 1 beskrevet hvordan skemaet er fremkommet, samt hvordan forsøget er udført.



Skema 3

De maksimale valsespændinger i x retningen (valseretning) er  $-23.6 \text{ N/mm}^2$ , og valsespændingerne i y retningen er  $-11.2 \text{ N/mm}^2$ , gældende for fuld huldybde.

Som det kan ses af kurven er der ret store valsespændinger i materialet, så for at kunne kalibrere slibe- og borespændingerne, skal alle valsespændingerne først fjernes. De fjernes ved varmebehandling.

De anvendte tegn betyder følgende :

$x = \sigma_x$  valsespændinger i valseretning, x retning

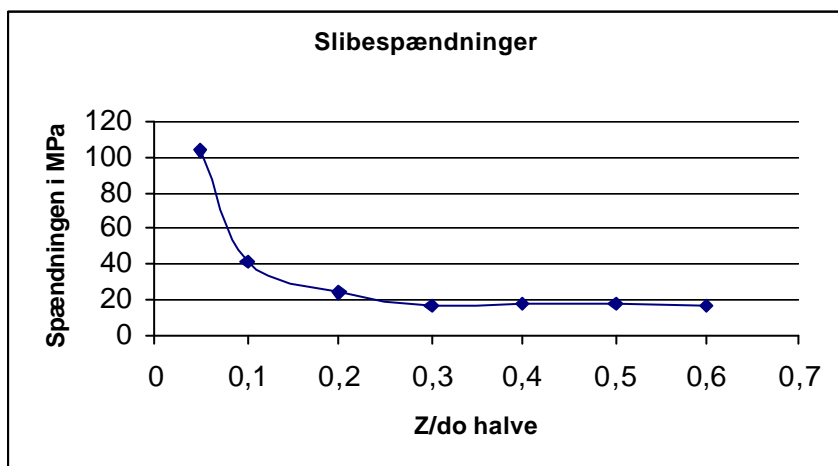
$y = \sigma_y$  valsespændinger  $90^\circ$  på valseretning, y retning

## Slibespændinger

For at kunne finde de slibespændinger, som påføres emnet før montering af rosetten, skal valespændingerne kendes eller fjernes. I dette tilfælde er de fjernet ved en varmebehandling. For at finde de samlede bore- og slibespændinger skal der slibes på overfladen før montering af rosetten. Men for at finde borespændingerne alene, skal der ikke slibes på overfladen før montering af rosetten.

Slibning / ikke slibning før montering af rosetten er gjort i forsøg 14. I forsøg 1, 2 og 3 blev resultaterne ikke som forventet, og derfor må resultaterne fra forsøg 14 kun bruges til kalibrering af måleresultaterne i forsøgene.

Skema 4 viser hvor store slibespændingerne er i emnet. Der er i forsøg 14 beskrevet hvordan tallene til skemaet er fremkommet, samt hvordan forsøget er udført.



Skema 4

De maksimale slibespændinger er en middelværdi af spændingerne i x og y retningerne. Dette skyldes, at slibespændingerne er retningsuafhængige. Skemaet er fremkommet ved at tage forsøg 14a og trække 14b fra. Dette gøres, fordi 14a har både bore- og slibespændinger, hvorimod 14b har kun borespændinger :

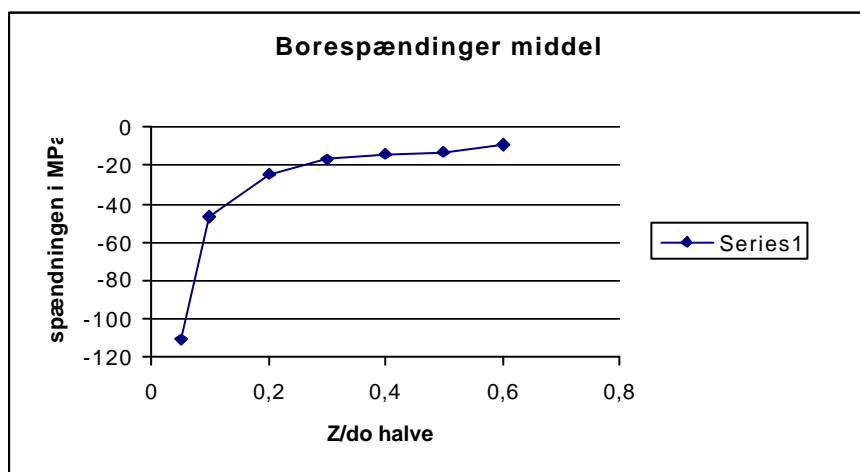
$$(\text{bore} + \text{slibespændinger}) - (\text{borespændinger}) = \text{slibespændinger}$$

Det kan så ses fra skema 4, at slibespændingerne for fuld huldybde er  $16.7 \text{ MPa} = \text{N/mm}^2$

## Borespændinger

Nå der bores i metal, vil der blive introduceret nye spændinger. Disse spændinger hedder borespændinger. Hvad borespændinger i aluminium angår, er det ikke muligt kun at kalibrere borespændingerne alene med hulboremetoden. Det skyldes, at når der måles på et emne før boring, er alt neutralt, og efter boring er det en blanding af både borespændinger og materialets egen spændinger. Det er dog muligt at fjerne næsten alle spændinger, som materialet har, med varmebehandling. Det er dog ikke 100% af spændingerne, der kan fjernes, men næsten.

I forsøg 14 er der kalibreret for borespændinger ved at spændingsudgløde et emne før rosetten monteres. Derved måles kun de borespændinger, der påføres emnet under boring af rosetten. Skema 5 viser kurven for borespændingerne i forhold til huldybden.



Skema 5

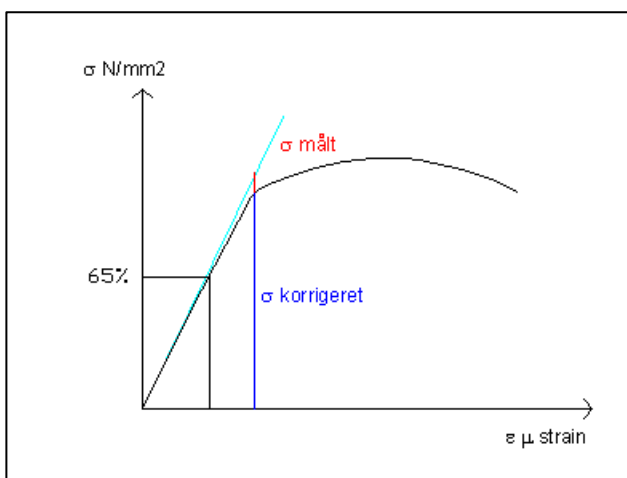
De maksimale borespændinger er en middelværdi af spændingerne i x og y retningerne. Det skyldes, at slibespændingerne er retningsuafhængige.

Det ses i skema 5, at borespændingerne for fuld huldybde er  $-9.6 \text{ MPa} = \text{N/mm}^2$

## Plastisk deformation

Hvis tøjningsmålingerne med hulboremetoden skal kunne lade sig gøre, skal materialet, der måles på, være lineært elastisk. Hvis materialet ikke opfylder kravene om lineær elasticitet, skal der korrigeres for målefejl (plasticitet).

Det omtalte princip, ses i figur 9, hvor der er vist en arbejdscurve for et materiale i forhold til den målte spænding.



Figur 9

Hvis egenspændingerne i materialet er større end 65% af 0,2 spændingen ( $R_{p0.2}$ ), vil der ske en begyndende plastisk tøjning af materialet ved hulkanten.

Ifølge ref.5 vil de beregnede spændinger ved fuld flydning være overestimeret med op til 15% på grund af den plastiske tøjning.

For spændinger større end 65% af 0,2 spændingen ( $R_{p0.2}$ ) forslår ref. 5, at der for toaksede spændingstilstande indføres en korrektion, hvilket næste formel vil vise.

$$S_k = \frac{S_m}{0.28 \cdot \frac{S_m}{R_{p0.2}} + 0.82}$$

Denne formel er en tilnærmelse, og hvis den bruges kan der undgås fejl, som skyldes plastisk tøjning ved hulkanten. Formlen skal bruges, når der er målt på et emne og emnets egenspændinger udregnes, fordi der skal korrigeres for plasticitet.

De anvendte tegn betyder følgende :

$\sigma_k$  = korrigeret spænding

$\sigma_m$  = målt spænding

$R_{p0.2}$  = materialets 0,2 spænding

$\sigma$  = er trækspændingen

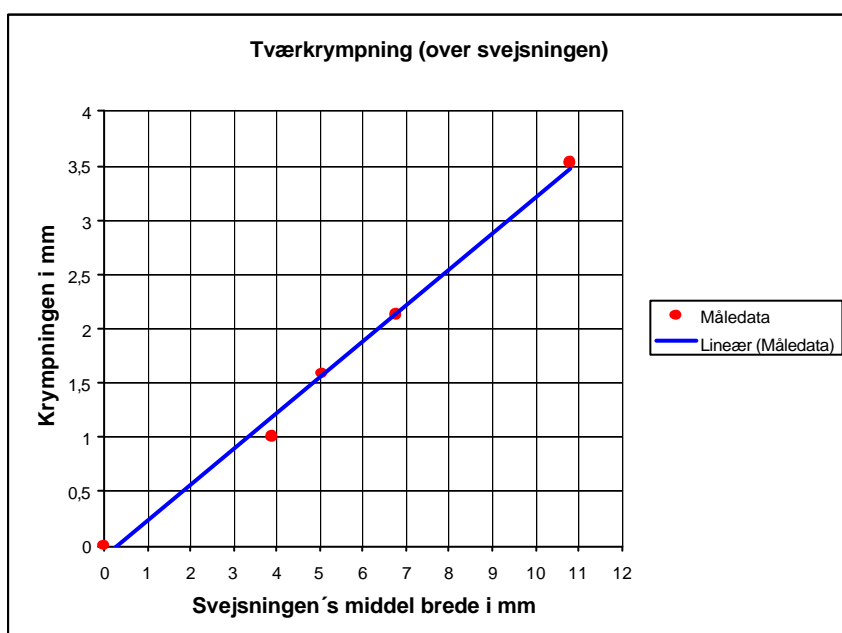
$\varepsilon$  = er målt spænding

## Krympning og vinkelknæk

### Tværs og langsgående krympning

Tværs og langsgående krympning er baseret på forsøg 8. Tværkrympning er målt over svejsningen, altså på tværs af svejseretningen. Tværkrympningen afhænger af, hvor bred svejsningen er. Skema 7 viser tværkrympningen i forhold til middelbredden af svejsningen. På kurven ses de punkter (røde), der er målt under forsøgene. Stregen (blå) er en tilnærmelse (lineær regression) af alle punkterne.

I forsøget er pladerne svejst med en v-fuge på 60°.



Skema 7

Tværkrympningen, som ses i skema 8, viser tværkrympning i forhold til pladetykkelsen for en v-fuge på 60°.

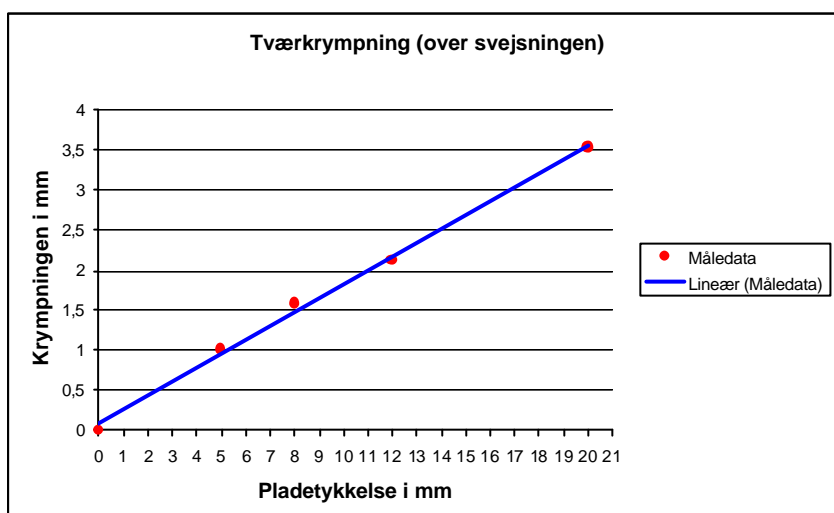
Den langsgående krympning er en krympning langs svejsningen, og kan beregnes med Hook's lov, der er følgende :

$$s = E \cdot e$$

Hook's lov skal omskrives, så den er brugbar til længdekrympning. Dette gøres på følgende måde :

$$\frac{F}{A} = E \cdot \frac{\Delta L}{L} \Rightarrow \Delta L = \frac{F \cdot L}{A \cdot E}$$

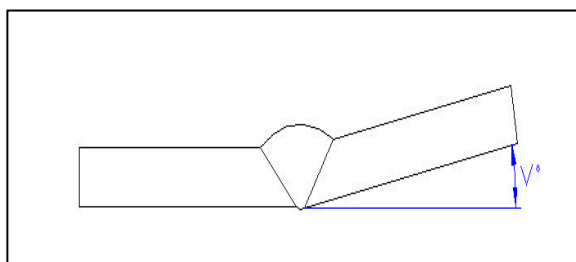
Delta L er ængdeudvidelsen, A er arealet, E er lasticitetsmodulet og L er længden af svejsningen.



Skema 8

### Vinkelknæk

Størrelsen af et vinkelknæk afhænger af, hvor mange strenge der svejses med. Dette skyldes, at placeringen af strengen i forhold til centret af pladetykkelsen bestemmer retningen af vinkelknækket. Det vil sige, hvis den største del af svejsningen ligger over centrum, vil emnet vinkle i den retning (over centrum).

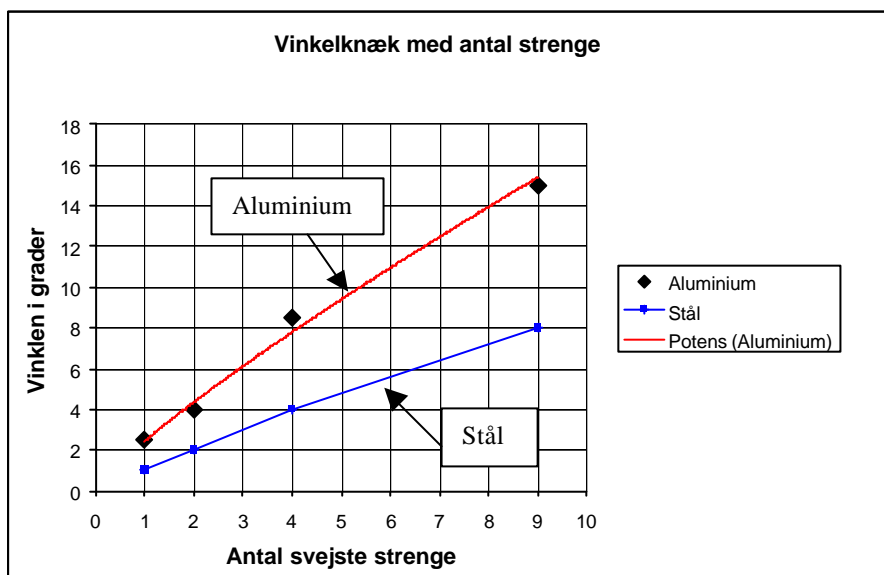


Figur 10

Vinkelknæk er baseret på forsøg 8. Kurven over Vinkelknækket (skema 9) kan med sikkerhed bruges for aluminiums typerne 5083 H116 og 5083 H111. Vinkelknækskurven kan også bruges på andre aluminiums typer, men det er ikke eftervist ved forsøg.

Skema 9 viser vinkelknækket for aluminiumslegeringen 5083 (rød linje). Kurven er vist som funktion af antal svejste strenge. Der er brugt mellem 1 og 9 strenge i forsøgene. I skema 9 er det forholdet mellem antal svejste strenge og vinkelknæk der er vist.

I skemaet er der til sammenligning også vist data for stål. Data for stål er hentet fra ref. 18.



Skema 9

De sorte punkter er målinger fra forsøg 8. Den røde linje er en tilnærmelse af de målte punkter. Den røde linje er den, der skal bruges til forudsigelse af vinkelknækket for aluminium.

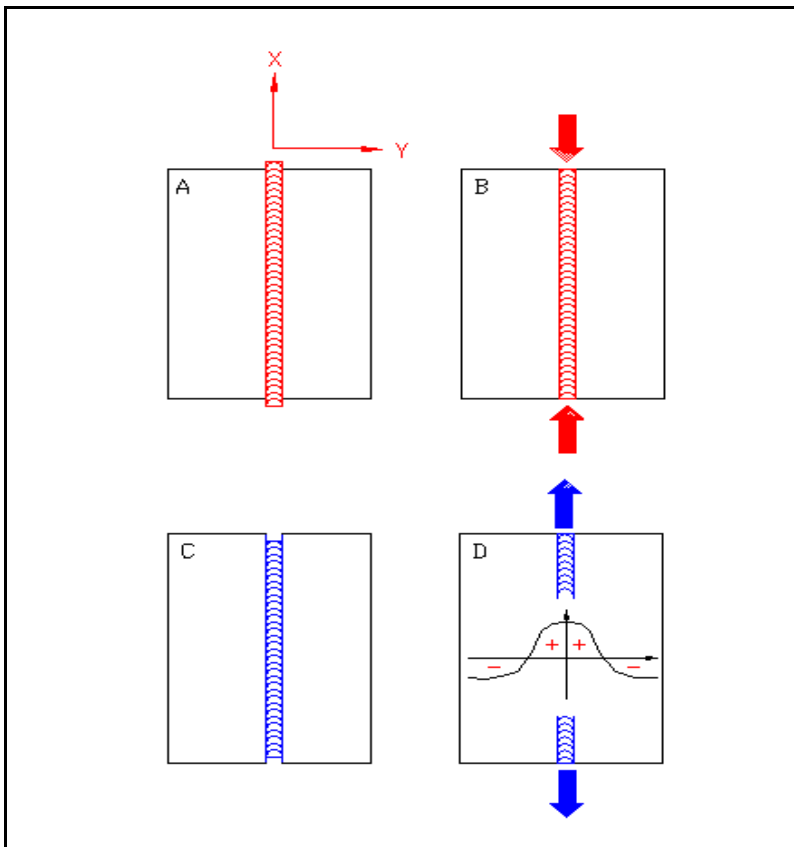
Kurven krummer i en retning således at vinkelknækket ikke øges voldsomt, hvis der bruges mange strenge. Modsat vil der være relativt større vinkelknæk i det område, hvor der er brugt få strenge.

Den blå linje er vinkelknæk for stål. Kurven er taget fra ref. 18. Denne kurve er medtaget, for at kunne lave en sammenligning mellem vinkelknæk for aluminium og for stål.

## Krympekræfter

### Indledning til krympekræfter

Krympekraft er et fænomen, der opstår, når to emner svejses sammen. Den varme, materialet bliver udsat for under svejsningen, gør at der opstår store spændinger i emnet. Krympningen opstår når svejsningen trækker sig sammen under nedkølingen.



Figur 11

Figur 11 viser forløbet når der lige er svejst på et emne. Figur A viser svejsningen, når den lige er svejst og stadig er varm. Da vil svejsningen være lang. På figur B ses, at svejsningen trækker sig sammen, og derved er der begyndende spændinger. Sammentrækningen kommer under nedkøling af svejsningen.

Figur C viser, hvordan svejsningen efter afkøling trækker sig sammen.

På figur D ses, hvordan pladerne tvinger svejsningen til at være længere efter afkøling, end svejsningen ville være uden pladernes indvirkning. Derved opstår krympekræfterne, fordi svejsningen vil trække sig sammen, men ikke får lov.

På figur D er der en optegning af den spændingsfordeling, der er over pladen, når der er svejst, og pladen er afkølet. På figuren er den positive del; krympekraften, og den negative del er; modhold fra pladerne. Dette kan der læses mere om i kapitlet om kalibrering.

Ved konstruktioner med svejsninger gælder det om at få et overblik over de kræfter, der opstår på et svejst emne, se figur 11.

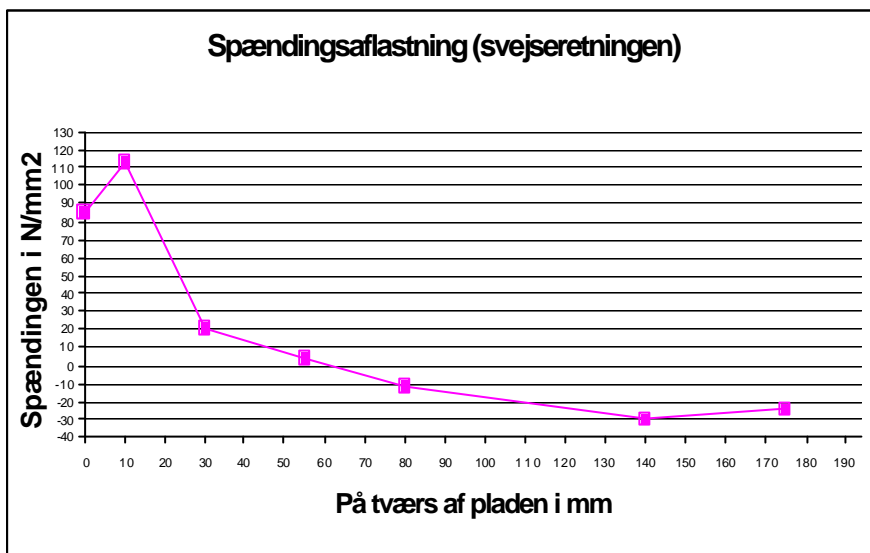
### **Teorien bag krympekraftformlen**

Ved svejsning opnår smeltebadet nødvendigvis er temperatur på mere end 650° C. Det er derfor ret indlysende, at der opstår store svejse-spændinger og svejsedeformationer ved svejsningen, når emnet efterfølgende skal nedkøles. Det er især værst ved lysbuesvejsning, da varmen, der påføres emnet, er meget stor.

Når emnet har opnået en varme på ca. 160°c, er der begyndende krympekræfter. De maksimale krympekræfter er opnået ved ca. 300°c.

Temperaturen er højest i smeltebadet og aftager i retningen; væk fra svejsningen. I området nær svejseømnen sker der store stukninger under opvarmning, og efter afkøling opstår der langsgående trækspændinger af ca. samme størrelse som flydespændingen. Emnet kan ikke indeholde større spændinger end flydespændingen.

I en vis afstand fra svejseømmens midte, bliver trækspændingerne mindre, og til sidst afløst af trykspændinger. Dette kan ses på skema 10, som er taget fra forsøg 7. På skemaet ses en plades egen-spændinger efter svejsning. Den er afbildet fra svejsningens midte til pladens kant. Det er muligt at se mere om dette i Forsøg 7.



Skema 10

På figur 10 er spændingerne med positivt fortegn; trækspændinger, og spændinger med negativt fortegn; trykspændinger.

Trækspændingerne i og omkring svejseømmen kaldes de aktive svejse-spændinger. Trykspændingerne er en følge af trækspændingerne og kaldes derfor de reaktive svejse-spændinger.

Grunden til, at der både er tryk- og trækspændinger kan der læses mere om i afsnittet, kalibrerings kontrol.

## Idé 1 (krympekræften ved brug af svejsningsarealet)

Her er det svejs materialets areal, der skal bruges til at forudsige krympekræften.

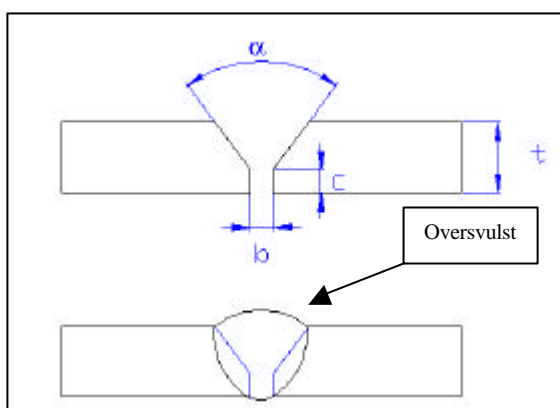
Formlen, der skal bruges under idé 1, er taget fra Birger Hansens formelsamling (ref. 18). Formlen er i formelsamlingen angivet for krympekræfter i stål. I formlen indgår en konstant, som udelukkende dækker i forbindelse med beregninger i stål.

Denne konstant skal derfor ændres, så hele formelen kan bruges til beregninger i Aluminium. Konstanten vil i dette afsnit blive ændret, så formelen kan bruges til Aluminium. Konstanten kaldes C.

Formlen til beregning af svejs materialets areal (som skal bruges senere i formelen til beregning af krympekræften) er taget fra bilag 23. Formlen er følgende :

$$A_{\text{fugeareal}} = A_f = \tan\left(\frac{\alpha}{2}\right) \cdot (t - c)^2 + (t \cdot b) = \text{mm}^2$$

Figur 12 viser hvordan formelen skal bruges, og hvor alle tallene, der skal indsættes i formelen, kommer fra. Det skal huskes, at der skal lægges 8% oven i formelen til oversvulsten på svejsningen. Alle tallene er angivet i mm eller grader.



Figur 12

Der er en sammenhæng mellem A og q, hvor A er svejsearealet, og q er svejsevarmen. I følge ref. 19 vil der for stål være et forhold på 15 mellem A og q, svarende til  $q = 15 \cdot A$ .

I dette projekt er forholdet for Aluminium gennemsnitligt 19, hvilket er acceptabelt.

Forholdet på de 19 er hentet fra bilag 20.

Formlen skal bygges op af flere faktorer. Den første er svejsearealet, og derefter skal der tages højde for svejsemetoden. Til sidst skal der også tages højde for, hvor mange strenge svejsningen er opbygget af. Så formlen til at beregne krympekræften med er følgende (fra Birger Hansens formelsamling) :

$$F = C \cdot R \cdot A_f$$

C er en konstant for den anvendte svejsetype, som I dette tilfælde for Aluminium er MIG-svejsning. Bogstavet R er en reduktionsfaktor, som bruges alt efter hvor mange strenge, der er svejst med.

Konstanten C er forskellig fra svejsemetode til svejsemetode. Det vil sige, at nogle svejsemetoder ikke har så stor nedsmeltning med samme varme, som andre metoder har. Så forholdet mellem varme og nedsmeltet materiale forløber ikke lineært mellem svejsemetoderne.

Reduktionsfaktoren er til gengæld uafhængig af mængden af tilsatsmateriale og påført varme. I en svejsning er der meget stor forskel på hvor mange strenge, der bliver brugt. Antallet af svejsestrenge afhænger af pladetykkelsen. Jo tykkere plade, jo flere strenge.

Reduktionsfaktorens betydning kan ses, hvis der svejses på ny, oven på en allerede svejst streng. Derved vil der blive frigivet nogle af de krympespændinger, den- eller de gamle strenge allerede har opbygget. På den måde er man nødt til at reducere med en faktor for det samlede antal strenge.

Reduktionsfaktoren er i øvrigt samme faktor, som skal bruges til idé 2. Faktoren R er udledt fra flere forsøg. Alle forsøgsresultater er samlet i bilag 20 for at kunne finde reduktionskoefficienten, som passer til alle forsøgene.

Konstanten C er fremkommet ved forsøg, hvor krympekræften og antallet af svejste strenge er kendt. Der er i bilag 20 et skema over idé 1, hvor der er lavet beregninger ud fra forsøgene, for at finde frem til den rigtige C værdi. denne gælder for alle forsøgene.

I nedenstående tabel ses konstanten C.

Svejsetypen	MIG-Svejsning
C faktoren	2100 N/mm <sup>2</sup>

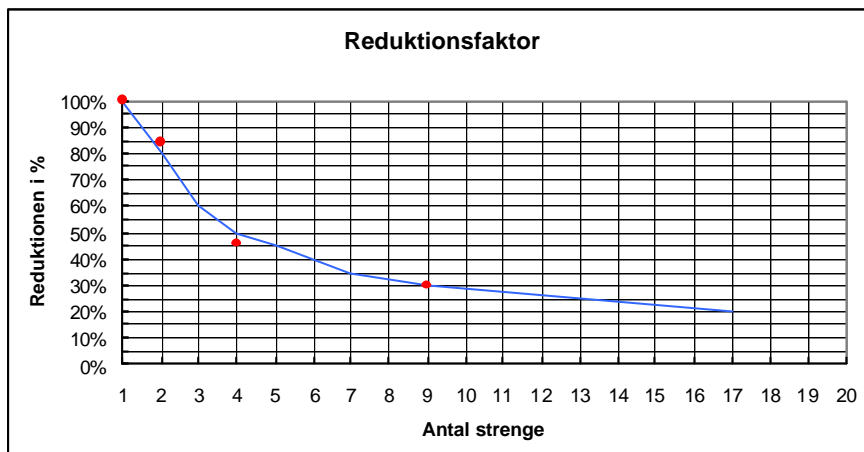
Hvad angår svejsetypen skal der laves flere forsøg for at finde de konstanter, der passer (C). Her er kun fundet konstanten for MIG-svejsning. Skal der bruges konstanter for andre svejsemetoder (for eksempel TIG-svejsning), skal der laves nye forsøg.

Samme metode bruges til at finde R. Tallene der skal bruges til udregning af reduktionsfaktoren R, er fundet ved praktiske forsøg. Tallene kan ses i bilag 20.

Den **reduktionsfaktor, R**, der skal bruges, er både til idé 1 og idé 2. Reduktionsfaktoren kan ses på nedenstående tabel.

Antal strenge	1	2	3	4	5	6 - 8	9 - 13	> 13
Reduktionsfaktor (R)	100%	80%	60%	50%	45%	35%	30%	20%

Kurven, der understøtter reduktionsfaktortabellen, er fra bilag 20 til selve eksamensprojekt rapporten. De røde prikker er tal, der stammer fra bilag 20, og den blå streg er en tilnærmelse af forsøgsresultaterne, se skema 11.



Skema 11

I bilag 20 ses at kurven (skema 11) giver en ca. 8% afvigelse fra de beregnede krympekræfter, til de i forsøgene målte krympekræfter. Denne afvigelse er ikke af stor betydning, da der kan være en lille usikkerhed på målingerne.

Der er lavet forsøg med 1, 2, 4 og 9 streng (forsøg 10, 12, 13, 15 og 16). De samlede resultater kan også ses i bilag 20, hvor alle de vigtige data er samlet. Reduktionsfaktoren for svejsninger med over 9 streng, hvor der ikke er lavet forsøg, er fremkommet ved, at der er lavet en tilnærmelse ud fra kurven (skema 11).

Formlen til krympekræfterberegning er følgende:

$$F = 2100 \cdot R \cdot A_w$$

Den er en blanding mellem forsøgsdata og formelen fra Birger Hansens formelsamling (ref. 18).

## Idé 2 (krympekraft ved brug af påført varme)

Til idé 2 er det meningen, at der skal bruges det varmeinput, der påføres svejsningen, for at kunne forudsige de påførte svejsespændinger.

Under litteraturstudiet blev det observeret, at der fandtes en formel til at forudsige krympekraften. Metoden hedder Okerblom`s metode, og bruges til at forudsige krympekraften i stål.

Det vil i dette afsnit blive undersøgt, om Okerblom`s formel også kan bruges på Aluminium og altså ikke kun på stål. Der vil blive ændret på de nødvendige data, så formelen også kan bruges til Aluminium. Ændringen af formelen gøres ved forsøg.

Formlen, der skal bruges i Okerblom`s metode til at finde krympekraften med, er følgende :

$$F = \frac{k_1 \cdot k_2 \cdot a \cdot E}{1.8 \cdot c \cdot r} \cdot q$$

Formlen er en udledning af Rosentahl`s varmeudbredelsesligning, som i denne rapport ikke vil blive beskrevet, da dette projekt er en praktisk udledning af formelen til krympekraften.

De data, der er nødvendige for at bruge Okerblom`s metode, er blevet oplyst af Force (civilingeniør Gunnar Sørensen), som tidligere har beskæftiget sig med Rosentahl`s varmeudbredelsesligning.

Oplysningerne fra civilingeniør Gunnar Sørensen er følgende, se bilag 16.

$$K_1 = 0.484$$

$$K_2 = 0.69$$

De øvrige konstanter, der skal bruges, er fra ref.15. Konstanterne er følgende:

$$r = 2700 \frac{kg}{m^3} \text{ Massefylde}$$

$$a = 23 \cdot 10^{-6} \frac{1}{^\circ C} \text{ Lineær udvidelseskoefficient}$$

$$E = 70 \cdot 10^9 \frac{N}{m^2} \text{ Elasticitetsmodul}$$

$$c = 985 \frac{J}{kg \cdot ^\circ C} \text{ Varmefylde}$$

Så med disse data vil formlen for krympekræfter beregning reduceres til en mere enkel formel:

$$F = \frac{0.484 \cdot 0.69 \cdot 23 \cdot 10^{-6} \cdot 70 \cdot 10^9}{1.8 \cdot 985 \cdot 2700} \cdot q = 0.11 \cdot q$$

Hvor q er tilført varme ved svejsningen. q indsættes i  $(\frac{J}{m})$ , og de 0.11 er teoretisk udledt.

I bilag 20, som er en opsamling af forsøgene, ses at faktoren (praktisk bestemmelse af faktoren) ligger mellem 0.109 og 0.119, hvilket svarer til ca. 0.11. Det må siges, at ved forsøg samt teoretisk udledning er der ikke nogen forskel på faktoren.

Der vil senere i afsnittet varmeudbredelse blive vist den samme faktor 0.11. Den er også fremkommet ved forsøg med varmeudbredelse under et andet projekt, der forløber på FORCE.

Den færdige formel til beregning af krympekræfter er følgende :

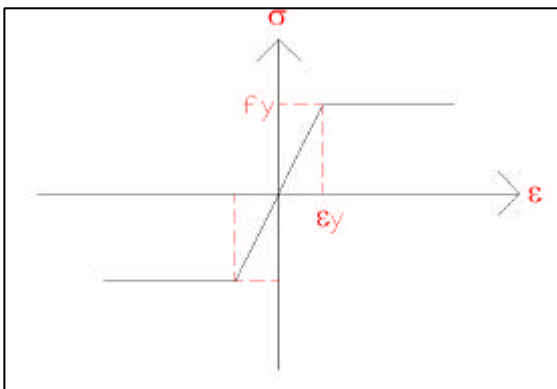
$$\underline{\underline{F = 0.11 \cdot q \cdot R}}$$

Hvor R er den samme reduktionsfaktor som til idé 1, taget fra bilag 20.

## Varmeudbredelse (faktor 0.11 udledning)

Det, at der bliver lavet et andet projekt med varmeudbredelse på Force, kan samføres / bruges til dette projekt. Der er en sammenhæng mellem varmeudbredelse på pladen og plasticiteten, som er en del af dette projekt. Det vil blive vist i dette kapitel.

Plasticitet og den tøjning, der måles i forsøgene, hænger sammen med varmeudbredelsen på pladen. Det kan ses ved følgende formel  $s = E \cdot e_y$ , hvor tøjningen ( $\epsilon$ ) er et udtryk for udvidelseskoefficienten gange temperaturændringen. Formlen er  $e_y = a \cdot \Delta T$ . Det kan også ses på figur 13, som viser en grov skitse af en arbejdskurve.

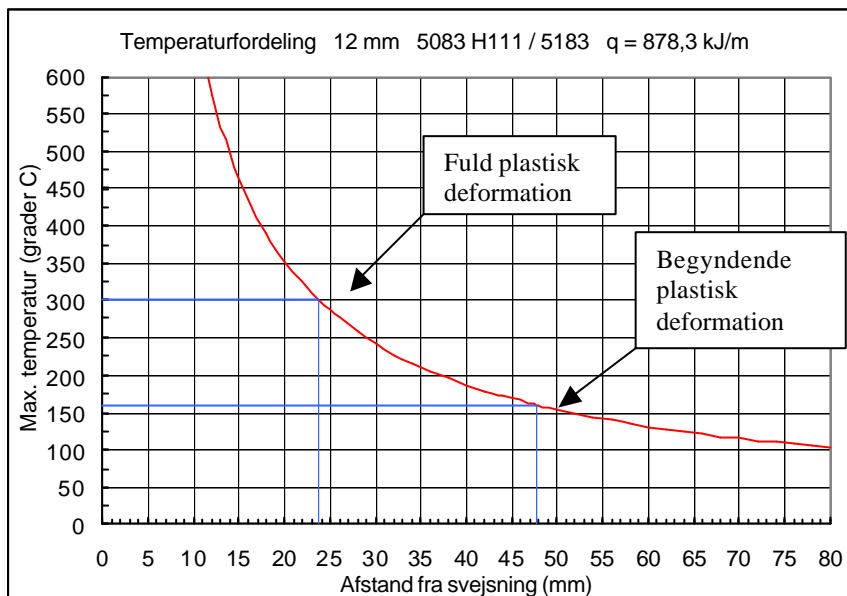


Figur 13

Nå det ses, at temperatur og plasticitet hænger sammen, kan det overføres på skema 12, som viser temperaturgradienten i forhold til afstanden fra svejsningens centrum. I dette tilfælde er det fra en svejsning på en 12 mm plade.

På varmeudbredelseskurven er de områder, hvor der er et startende plasticitets område og hvor der også er et område for fuld plasticitet, vist. Dette skal bruges til at lave kurven til beregning af krympekræften ved hjælp af varmeudbredelseskurven.

Når der er opnået fuld plasticitet, kan der ikke optages flere kræfter i pladen der svejses på. Det burde være klart, at når emnet (pladen) giver efter maksimalt, vil der ikke blive optaget flere kræfter i pladen.



Skema 12

Der er, i bilag 5, en beregningsmodel, som er udleveret af civilingeniør Gunnar Sørensen, til at finde kurverne med. Det er både kurven for varmeudbredelsen og kurven for egenspændingsfordelingen.

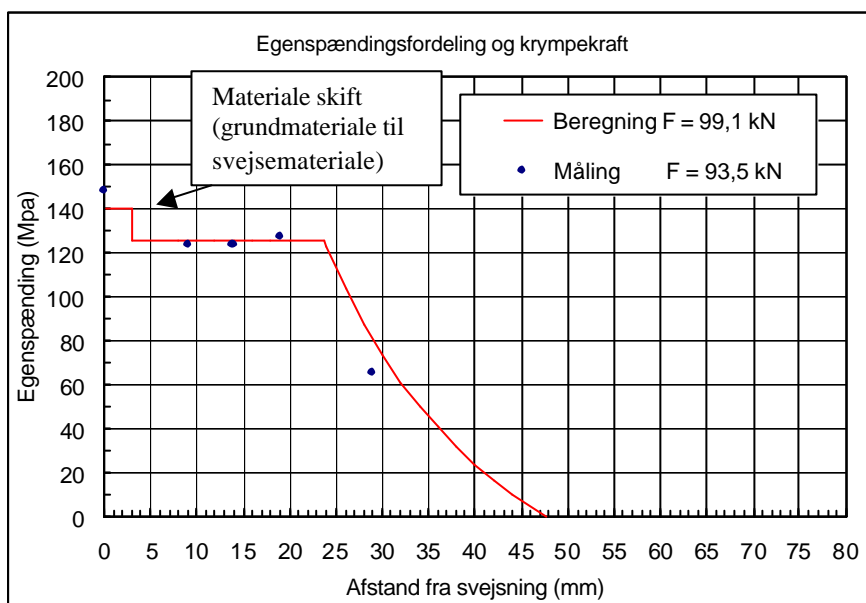
Kurven for egenspændingsfordelingen er fremkommet ved at skære kurven for varmeudbredelse af, når materialet har nået sin maksimale plastiske deformation. Alt over den maksimale plastiske deformation på kurven vil blive erstattet med en vandret linje.

Der laves så en vandret linje ind til det punkt, hvor svejsmaterialet er. I dette punkt bliver der så taget højde for svejsmaterialets flydespænding, som i dette tilfælde ikke er det samme som grundmaterialets flydespænding. I dette punkt vil den vandrette linje lave et spring svarende til svejsmaterialets flydespænding. Se skema 13.

Der, hvor kurven for varmeudbredelse er, når der er startende plasticitet, er det sted, hvor kurven rammer nullinjen for kraftfordelingen. Derefter vil kurven være på den negative side, hvilket er det fænomen, der er omtalt i kapitlet kalibreringskontrol.

Der er i skema 13, som er fra bilag 5, vist en rød streg, der indikerer kurven for egenspændingsfordelingen i forhold til varmeudbredelsen. På kurven er der beregnet en krympekraft.

De blå prikker i skemaet er de punkter, der er fremkommet ved forsøgene. Punkterne er blevet udregnet til en krympe kraft i forsøget, der i dette tilfælde er udført på en 12 mm plade (forsøg 12).



Skema 13

Som det fremgår af skema 13, er der en forskel mellem den beregnede og den målte krympekraft på 6%, hvilket må siges ikke at være af stor betydning.

## Formler til beregning af krympekræfter

Formlerne er lavet for at få et overblik over de to formler, der skal bruges til beregning af krympekræfter i Aluminium.

**Reduktionsfaktoren R** skal bruges til at korrigere beregningen for antal svejste strenge. Skal der for eksempel laves en reduktion på 50%, skal der indsættes 0.5 i formlen.

Antal strenge	1	2	3	4	5	6 - 8	9 - 13	> 13
Reduktionsfaktor (R)	100%	80%	60%	50%	45%	35%	30%	20%

### Formel 1

$$F = C \cdot R \cdot A_f$$

F= Krympekraften (N)

C = svejsetypen ( $\frac{N}{mm^2}$ )

R = reduktionsfaktor

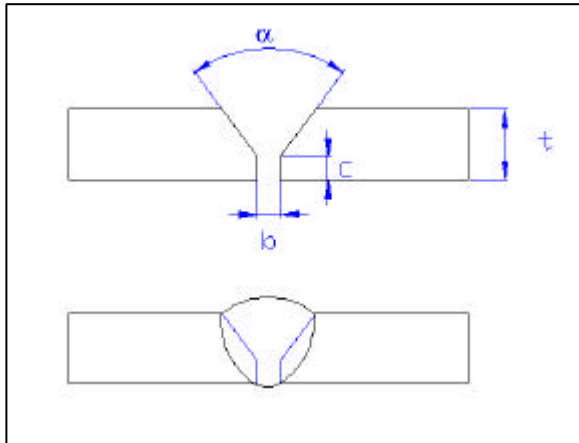
A<sub>f</sub> = svejsningensareal (mm<sup>2</sup>)

Reduktionsfaktoren er følgende :

Svejsetypen	MIG-Svejsning
C faktoren	2100 N/mm <sup>2</sup>

Svejsningens areal beregnes på følgende måde :

$$A_f = \left[ \tan\left(\frac{\alpha}{2}\right) \cdot (t - c) + (t \cdot b) \right] \cdot 1.08 = mm^2$$



b, c, t er i mm

α er i grader

## Formel 2

$$F = 0.11 \cdot R \cdot q$$

F= Krympekraften (N )

R = reduktionsfaktor

q = tilført varme via svejsningen ( $\frac{J}{m}$ )

## Konklusion

Opgaven er stillet af FORCE INSTITUTTET i Brøndby og er et underprojekt til SASAK-projektet.

Projektet bestod i, at finde en formel til forudsigelse af langsgående krympekræfter i aluminium efter svejsning. Desuden skulle projektet belyse vinkelknæk på sammensvejsning af aluminiumsplader.

Under litteraturstudiet blev det observeret, at der fandtes en formel til forudsigelse af krympekræfter i stål. Ved forsøg viste det sig, at formlerne næsten kunne bruges til aluminium. De nødvendige ændringer var, ændringer af nogle konstanter i formlerne.

De to formler til beregning af langsgående krympekræfter, der er udledt i dette projekt, er udledt teoretisk og efterfølgende bevist igennem praktiske forsøg. Ved at se nærmere på varmeudbredelseskurven, fandt jeg ud af, at denne også kan bruges til at bevise, at formlen for krympekraft virker. I projektet er formlerne således eftervist på flere måder, det vil sige både praktisk og teoretisk.

Under de praktiske forsøg blev der registreret vinkelknæk på de svejste plader. Der er lavet en kurve, som beskriver vinkelknækket, udtrykt i grader, som funktion af antal svejste strenge. Kurven er fremkommet ved forsøg med aluminium type 5083, men burde kunne bruges til forudsigelse af vinkelknæk for alle aluminiums legeringer.

## Referenceliste

1. **Study of through-thickness residual stress by numerical and experimental techniques.** By S. Rasouli Yazdi, D. Reiraint, The MS was received on 11 february 1998
2. **Elementær styrkelære.** DIAM nr 213 fra August 1972
3. **TECH NOTE.** Measurements Group TN-503-1 from 1985
4. **A critical evaluation of the centre hole technique for the measurement of residual stresses.** By E. M. Beaney Received July 1973
5. **On the correction of residual stress measurements obtained using the centre-hole methode.** By A. A. Scaramangas and R. F. D. Porter Goff, Cambridge University. Received on August 1982.
6. **Standard Test method for Determining Residual Stresses by the Hole-Drilling strain-gauge method<sup>1</sup>.** ASTM (E 837-95)
7. **Application of Finite Element Calculations to Residual Stress Measurements.** By G. S. Schajer, April 1981, Vol 103/157, University of California.
8. **The Influence of mechanical imperfections on the welded Aluminium alloy members.** By F. M. Mazzolani, University of Naples (Italy), May 1982
9. **Hole-Drilling methode.** By I. A. Lyon, France 1998
10. **Determination of residual stresses in plates by the hole-drillind technique.** By S. Kristoffersen and Per J. Haagensen, Norwegian University (Norway)
11. **Undersøgelse af svejsesømmes egenspændinger og statiske bæreevne.** Af FORCE (Svejs Centralen), ved Gunnar Sørensen og Peter Christenses, Marts 1987
12. **INA Wälzlager Schaeffler KG.** 1994 März
13. **Matrialelære for Metalindustrien.** Erhvervsskolernes Forlag Odense 1990
14. **Standarder for svejsning.** Dansk Standardiseringsråd 1986, Håndbog 6 1. Udgave
15. **Metallurgi for Ingeniører.** Af K. Offer Andersen, 5. Udgave
16. **Mechanics of Materiales.** From Gere and Timoshenko, third SI edition
17. **The alignment error of the hole-drilling method.** By Pang Wang January 1979
18. **Svejsepændinger og svejsedeformationer.** Af Biger Hansen, 1973 FORCE
19. **Extent of the softened zone on 6xxx aluminium.** By John Dwight and Ian Robertson, France