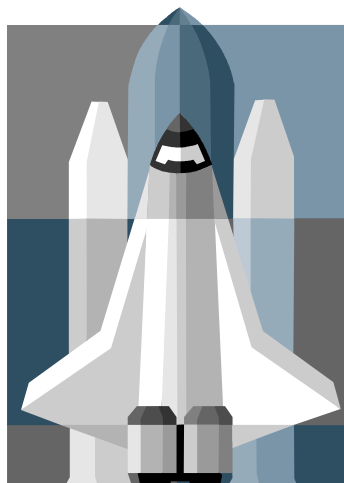


# NASCRACT vs. NASGRO

## Sprickpropagering



---

**Jeanette Karlsson**

# EXAMENSARBETE

## NASCRACT vs. NASGRO

Jeanette Karlsson

### Sammanfattning

I denna rapport analyseras sprickberäkningsprogrammen NASCRAC:s och NASGRO:s möjligheter till beräkning av rätt livslängd på stator 2, en del i Vulcain LH2 motorn, med i programmen befintliga geometrier, sprickor och möjligheter att lägga på spänningar.

Den modell/geometri som mest liknar verkligheten, Variable med triangelgeometri, går bara att använda i det äldsta programmet NASCRAC. I NASGRO kunde bara modell Regular, rektangulär geometri, och modell Quad, kvadratisk geometri, användas.

Hörnspricka går bara att använda på modell Quad och Regular och för att komma så nära verkligheten som möjligt användes hörnspricka endast på modell Quad. På modell Regular och Variable användes genomgående kantspricka. Ingen av dessa kombinationer är helt likt verkligheten då det där uppstår en spricka i övergången i hörnet mellan skenan och höljet.

Spänningar lades på dels som medelspänning över arean och som spänningar i de koordinater som överförts från FEM-beräkningens noder. Det går inte att skilja på kraftstyrda- och töjningsstyrda spänningar vilket hade varit önskvärt då de påverkar spricktillväxt och utmattning olika. Inom rymd och flyg är temperaturpåverkan och därmed också töjningsstyrda spänningar störst.

Enligt körningar i NASCRAC betedde sig modellerna olika beroende på hur spänningarna lades på men modell Variable hade längst eller näst längst livslängd i samtliga körningar. Modell Quad hade längst livslängd flest gånger och modell Regular pendlade mellan kortast och näst kortast livslängd under alla körningar.

Detta visar att det skulle behövas en modell Variable i NASGRO för att komma närmast verkligheten när livslängden för statorbladet beräknas.

<b>Utgivare:</b>	Högskolan Trollhättan/Uddevalla, Institutionen för teknik, matematik och datavetenskap, Box 957, 461 29 Trollhättan Tfn: 0520-47 50 00 Fax: 0520-47 50 99 Web: www.htu.se		
<b>Examinator:</b>	Niklas Järvstråt		
<b>Handledare:</b>	Per Ekedahl, Volvo Aero Corporation		
<b>Huvudämne:</b>	Sprickpropagering	<b>Språk:</b>	Svenska
<b>Nivå:</b>	Fördjupningsnivå 1	<b>Poäng:</b>	10
<b>Rapportnr:</b>	2005:M16	<b>Datum:</b>	2005-06-10
<b>Nyckelord:</b>	sprickpropagering, livslängd, spänning, NASCRAC, NASGRO		

## NASCRAC vs. NASGRO

Jeanette Karlsson

### Summary

This report presents a comparison of the fatigue crack growth programs NASCRAC and NASGRO and their ability to estimate the right life of stator two vanes, a part in the Vulcain LH2 engine, with existing geometries, cracks and possibilities to add stresses.

The model that corresponds best with the reality, Variable with a triangular geometry, can only be used in the oldest program NASCRAC which only can perform linear calculations. In NASGRO it was possible to use model Regular, with a rectangular geometry, and model Quad, with a quadratic geometry. In NASGRO it is also possible to perform non linear calculations.

At the Quad model a corner crack is used and at the Regular and Variable model a thru crack on edge is used. None of these combinations looks like the reality where the crack brakes out in the transition between the vane and the shroud.

The stresses are applied both as mean stress and as stress in coordinates which has been translated from the FEM-calculations nodes. Unfortunately it is not possible to make a distinction between stresses caused by force and stresses caused by deformation. That would be welcome when they affect the crack propagation and fatigue life in different ways. In space- and aviation propulsion the highest stresses appear due to high temperature which cause deformation related stress.

Due to different "runs" in NASCRAC the models and the cracks behaviour was very dependent on how the stresses were applied. The Variable model had the longest or next longest life in all "runs". The Quad model had the longest life most of the times and model Regular model oscillates between the shortest and next shortest life during all "runs".

This show a need of a Variable model in NASGRO for both linear and non linear calculations. There are still discussions whether to use linear or non linear calculations on space components. It will take some further investigation to sort that out.

<b>Publisher:</b>	University of Trollhättan/Uddevalla, Department of Technology, Mathematics and Computer Science, Box 957, S-461 29 Trollhättan, SWEDEN Phone: + 46 520 47 50 00 Fax: + 46 520 47 50 99 Web: www.htu.se		
<b>Examiner:</b>	Niklas Järvstråt		
<b>Advisor:</b>	Per Ekedahl, Volvo Aero Corporation		
<b>Subject:</b>	Crack propagation	<b>Language:</b>	Swedish
<b>Level:</b>	Advanced	<b>Credits:</b>	10 Swedish, 15 ECTS credits
<b>Number:</b>	2005:M16	<b>Date:</b>	June 10, 2005
<b>Keywords</b>	crack propagation, life, stress, NASCRAC, NASGRO		

## Innehållsförteckning

Sammanfattning.....	i
Summary.....	1
1 Inledning.....	3
1.1 Bakgrund.....	3
1.2 Syfte och mål.....	3
2 Förutsättningar.....	3
2.1 Detaljbeskrivning.....	4
3 Linjär & icke linjär brottmekanik.....	6
4 Min och max spänning.....	6
4.1 Start.....	6
4.2 Stopp.....	7
4.3 Beräkning av spänningar.....	7
5 NASCRAC.....	9
5.1 Spricktillväxtlagar.....	9
5.2 Olika sprickor.....	10
5.3 Olika geometrier på beräkningsmodellen.....	11
5.4 Beräkningar.....	12
6 De olika körningarna.....	13
7 Fallstudie i NASCRAC.....	22
7.1 Geometrier använda i fallstudien.....	22
7.2 Spänningar använda i fallstudien.....	23
8 NASGRO.....	24
8.1 Ekvationer.....	24
8.2 Interagerande spricktillväxtmodeller.....	25
8.3 Icke interagerande spricktillväxtmodell.....	27
8.4 Sprickor.....	27
8.5 Geometrier på beräkningsmodellen.....	28
8.6 Beräkningar.....	29
9 Avgränsningar.....	29
10 Resultat.....	29
10.1 Fallstudie på olika geometrier.....	29
10.2 Ekvationer.....	34
10.3 Sprickor.....	35
10.4 Körningar i NASCRAC.....	35
10.5 Körningar i NASGRO.....	51
10.6 Analys av resultat.....	52
10.7 Rekommendationer till fortsatt arbete.....	58
11 Slutsatser.....	58
Källförteckning.....	60

### Bilagor: A Spänningar i Körningarna

## 1 Inledning

Detta examensarbete är gjort på Volvo Aero Corporation Space Propulsion avdelning 6670 Turbiner och Rotorer. Min handledare på Volvo var Per Ekedahl och på HTU Kjell Nicklasson. Examensarbetet utfördes våren 2005.

### 1.1 Bakgrund

Volvo Aero har problem med sprickor i statorerna, en turbindel, i Vulcain LH2 motorn som bl.a. används i Arianeraketen. Motorn utsätts för stora temperaturskillnader vid start och stopp och ett tryck under körning vilket ger upphov till utmattnings- och därmed spricktillväxt. Hittills har man kört motorn i 20 cykler d.v.s. startat och stannat 20 gånger och nu skulle man vilja göra en utvärdering av livslängden på de modeller som finns att tillgå i NASCRAC och NASGRO. Problemet med att beräkna livslängden är att inget av programmen som används, NASCRAC och NASGRO, har en geometri som stämmer överens med den som finns i statorn. Det gör det svårt att lägga på rätt spänningar och svårt att simulera sprickans egentliga sprickväg och då också tillväxthastigheten.

### 1.2 Syfte och mål

Målet med detta examensarbete var att använda olika ekvationer, geometrier och spänningar i både NASCRAC och NASGRO och sedan jämföra och utvärdera resultaten för att hitta en så sann livslängd som möjligt. Om tid finns även jämföra med liknande befintliga beräkningar.

## 2 Förutsättningar

Med hjälp av programmen NASCRAC, NASA CRack Analysis Code, version 3.0 och NASGRO, Fracture Mechanics and Fatigue Crack Growth Analysis Software, version 4.2 och deras manualer där de ekvationer som är möjliga att använda finns, plus befintlig materialdata och en del gamla beräkningar skulle arbetet genomföras.

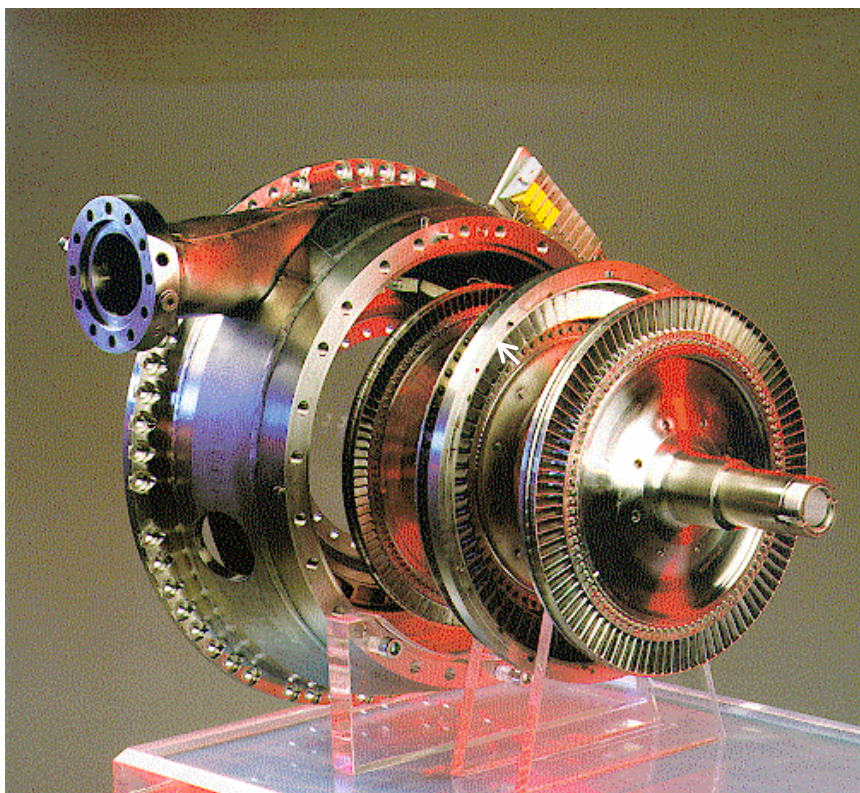
## 2.1 Detaljbeskrivning

### 2.1.1 Statorn

Statorns geometri och spänningarna, som uppkommer p.g.a. temperaturen och lufttrycket, visas nedan. Från turbinen kommer luft med hög hastighet som går genom en rotor som sitter fast på en axel. När luften går genom rotorn och dess sneda kanaler snurrar axeln och genererar drivning. För att kunna använda luften som kommer ifrån rotorn igen måste hastigheten ökas och riktningen ändras. Detta gör man genom att pressa luften genom statorn. Statorns kanaler är sneda åt motsatt håll jämfört med rotorn vilket gör att luften vänds och kan driva nästa rotor. Detta upprepas två gånger dvs. det finns två statorer.

Stator 1 är fabricerad i ett stycke med manifoldern, kanalen som förser rotorn och statorn med gas. Medan stator 2 är gjord i ett stycke för sig.

Det förekommer mest sprickor i första statorn vilket skulle kunna bero på att avkylningsluften som blåses in i stoppphasen är som kallast i början för att sedan bli varmare ju längre in den kommer. Detta gör att avsvälning och krympning blir mest påtaglig i första statorn.



Manifolder med stator 1, rotor 1, stator 2 & rotor 2. Stator 2 är den större skivan i mitten.



Stator 2 med ledsidan av skenorna/skovlarna/kanalerna synlig.

Sprickorna uppstår i övergången mellan bladet och höljet, en geometri som ej finns tillgänglig i varken NASCRAC eller NASGRO.



Foto av sprickorna på ledsidan.

### 3 Linjär & icke linjär brottmekanik

De flesta beräkningar är gjorda med antagandet att LEFM, Linear Elastic Fracture Mechanics, gäller. Dvs. att den plastiska zonen i sprickspetsen är liten jämfört med omgivande material och att bladet är tunt så det bara är spänning och inte töjning som påverkar. Detta är inte riktigt sant då den största inverkan kommer från temperaturen som verkar töjningsstyrt och är då icke linjär. I NASCRAC går det att använda icke linjära beräkningar dels med J-integralmetoder, dels med så kallad plastisk omfördelning av spänningen för att ta hand om spänningar över sträckgränsen; båda dessa tillvägagångssätt har dock begränsningar och har inte använts här.

Enligt Larisa Stepanovas rapport [3] är skillnaden mellan beräkningar gjorda med LEFM och test gjorda med stor töjning, under samma förutsättningar vid en temp på 687°C, inte stora. Testen är gjorda på en kubisk modell med ytspricka med material Inconel 718.

I en rapport av Geng Sheng Wang [4] hävdas motsatsen. Enligt honom skall icke linjära beräkningar utföras på rymd- och flygkomponenter som utsätts för höga temperaturer och kemiska medier som bränsle och kylmedel då fel oftast uppstår pga. plastisk kollaps.

I en rapport av Staffan Brodin [5] drar han följande slutsatser av de tester och beräkningar han gjort. Icke linjära spänningar ger för lång livslängd om de används i en linjär beräkning, vilket är fallet i NASCRAC.

Icke linjära beräkningar kan utföras i NASGRO men även där är möjligheterna starkt begränsade då bara några sprickor och några geometrier är tillgängliga. Endast två modeller som liknar de som använts tidigare fanns att tillgå.

### 4 Min och max spänning

En cykel består av för kylning, start, kontinuerlig drift och stopp. De snabba temperaturförändringarna inträffar under start och stopp och det är då det uppstår spänningar i statorn. Min spänning uppstår efter ca 1 sekunds körning och max spänning uppstår ca 1 sekund efter stopp, då har motorn körts i 711 sekunder.

#### 4.1 Start

Under startförloppet värms statorns delar upp ungefär lika snabbt och en hög temperatur i alla delar ger låga drag- och tryckspänningar. Alltså uppstår de minsta spänningarna under starten.

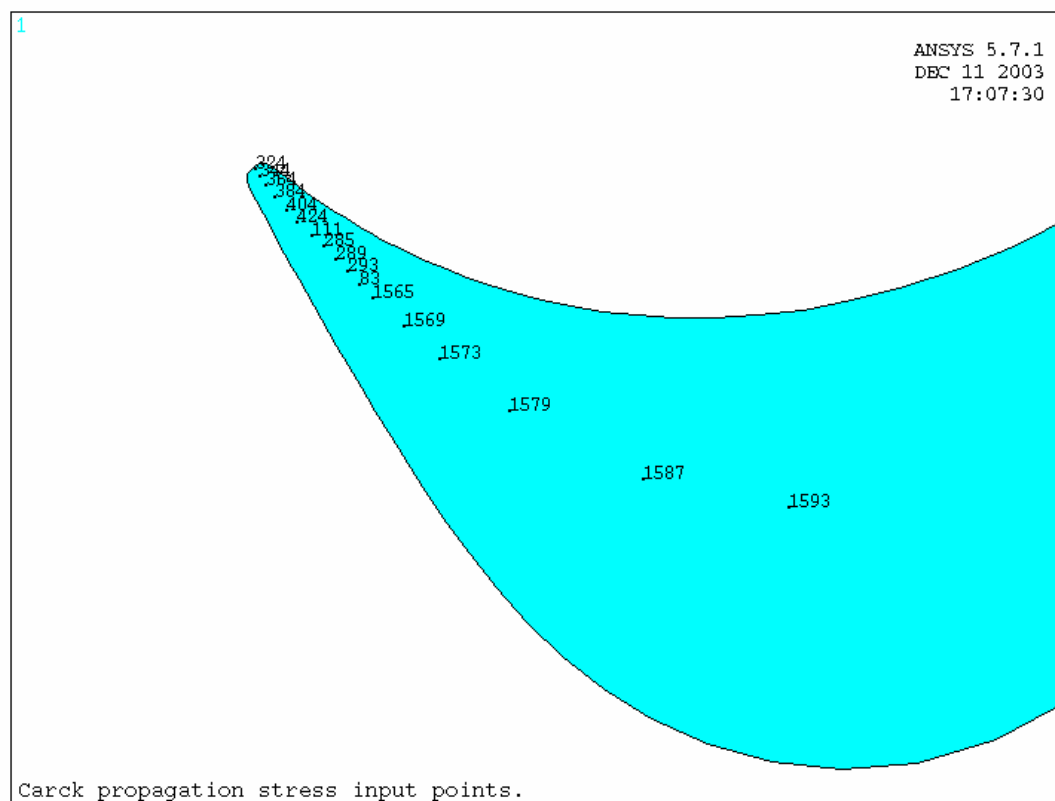


## 4.2 Stopp

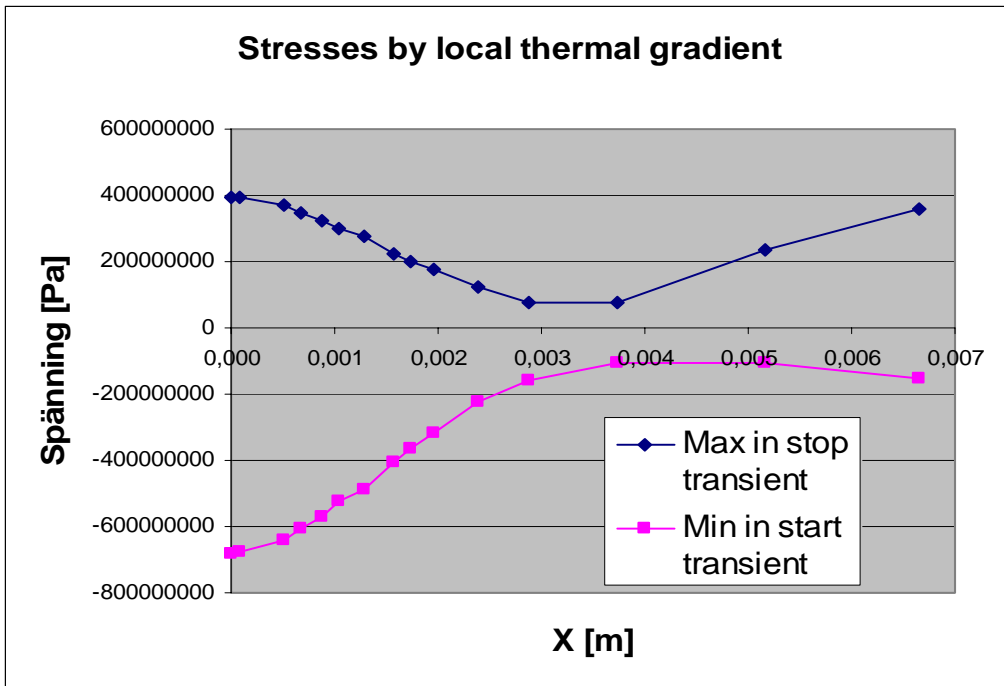
Under stoppförloppet kyls statorn ner men eftersom bladen är mycket tunnare än höljet svalnar också bladen snabbare och vill dra ihop sig, medan det fortfarande varma höljet ”håller emot”. I det läget uppstår dragspänningar vilka anses vara cykelns största påfrestning och ger därmed också max spänning.

## 4.3 Beräkning av spänningar

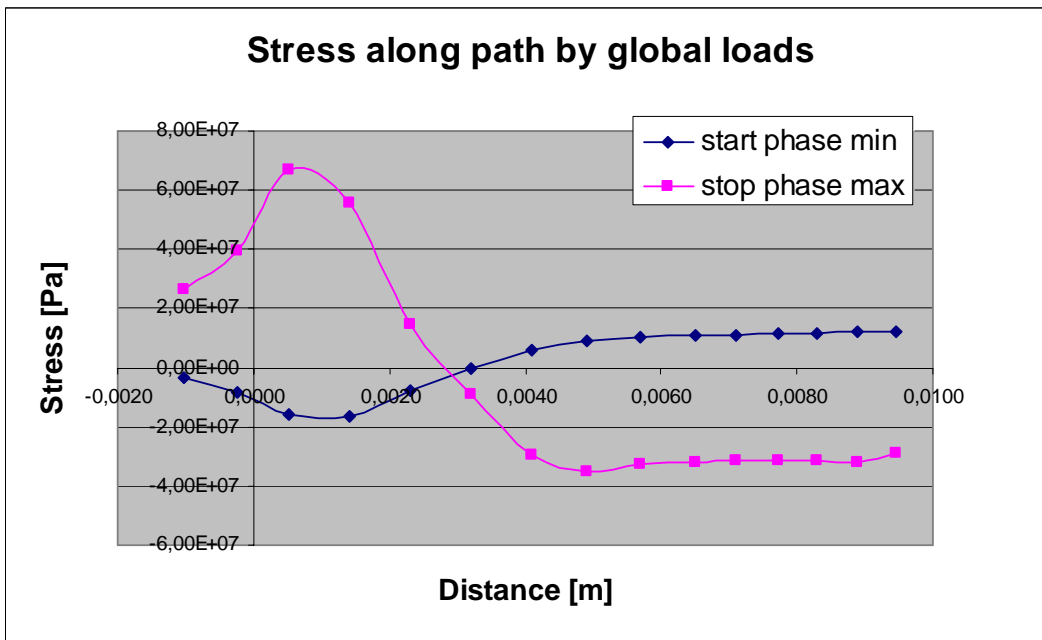
Spänningarna är beräknade i FEM och kommer från temperatur och tryck. Där är spänningarna mätta i en rad noder i stator 2 som sedan översats till koordinater för modellen som används i NASCRAC. Spänningar och modeller har sedan ritats upp i Excel för en tydlig överblick av spänningsfördelningen (Se körningar).



Spänningar i ledskenan från temperatur, lokal och global påverkan, och tryck beräknade i FEM.



Spänningar orsakade av den lokala temperaturpåverkan.



Spänningar orsakade av tryck & global temperaturpåverkan.

## 5 NASCRAC

Uppgifterna om ekvationer och spricktillväxtlagar är hämtade ur NASCRAC: s användar manual. [1]. NASCRAC utför endast linjära beräkningar.

### 5.1 Spricktillväxtlagar

#### 5.1.1 Da/dN kontra ΔK (DADNDK)

da/dN och ΔK är framtagna vid tester av materialet.

da/dN är spricktillväxt per cykel (m/cykel).

$$\Delta K = K_{\max} - K_{\min}$$

#### 5.1.2 Paris lag

$$da/dN = C (\Delta K)^m$$

C och m är materialkonstanter som tagits fram vid tester av materialet.

#### 5.1.3 Walker

$$da/dN = C ((\Delta K)/(1-R))^{(1-n)^m} \text{ där } R = K_{\min}/K_{\max}$$

I Walker ekvationen tar man hänsyn till R-värdet dvs. förhållandet mellan  $K_{\min}$  och  $K_{\max}$ . C, m, och n är materialkonstanter som tagits fram vid tester av materialet.

#### 5.1.4 Modifierad Forman (MF)

$$da/dN = C(1-R)^n * [\Delta K - (1-C_{0R})^d \Delta K_{th}]^p / [(1-R)K_{Ic} - \Delta K]^q$$

MF förespar det asymptotiska beteendet av spricktillväxten när  $K_{\max}$  närmar sig  $K_c$ . MF tar också hänsyn till att ingen spricktillväxt sker innan ΔK börjar närma sig  $K_{th}$ . Alla konstanter måste provas fram i ett materialtest. Inga sådana tester för Inconel 718 är gjorda vilket gör att Modifierad Forman inte kan användas för livslängdsberäkningen.

#### 5.1.5 Hop-Rau

Hop-Rau ekvationen är en tidig upplaga på Modifierad Forman så man rekommenderas att använda Modifierad Forman istället.

#### 5.1.6 Collipriest

$$da/dN = C(K_{Ic}\Delta K_{th})^{(m/2)} \exp \{m/2 \ln(K_c/\Delta K_{th}) \arctan[\ln(\Delta K_2/(1-R)K_{Ic}\Delta K_{th})/\ln((1-R)K_{Ic}/\Delta K_{th})]\}$$

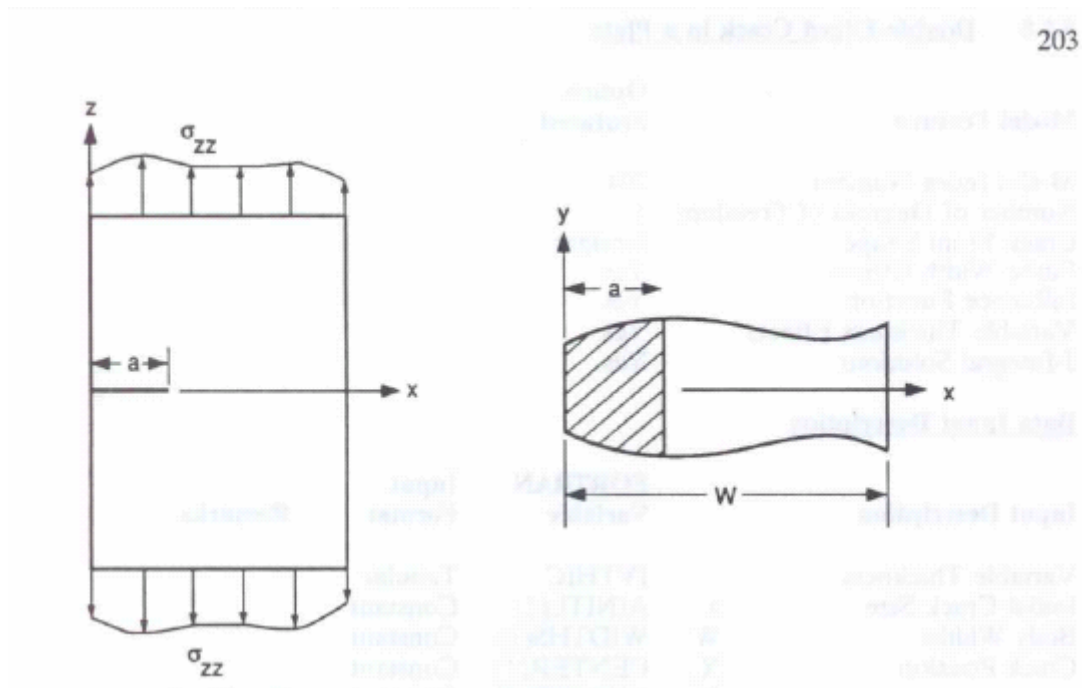
Collipriestekvationen är ytterligare en utveckling av de ovan nämnda ekvationerna. Den redogör för effekten på spricktillväxten orsakat av R-förhållandet och tonar ner spricktillväxthastigheten nära  $\Delta K_0$  och  $K_c$ .

### 5.1.7 Wheeler- och Willenborgmodellen

Wheeler- och Willenborgmodellen bygger på att en överlast lagts på viket gör att spricktillväxten stannar av eller bromsas upp.

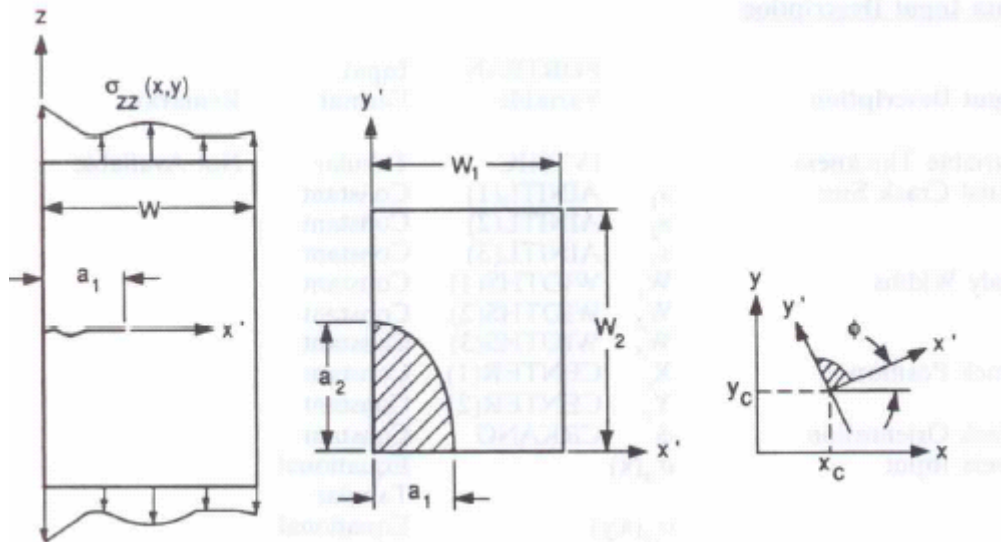
## 5.2 Olika sprickor

Två olika spricktyper har använts. Dels genomgående kantspricka på tunn plåt nr 203 och hörnspricka, 2-D, på tjock plåt nr 605. Ingen av dessa stämmer överens med verkligheten då sprickan där uppkommer i ett hörn i en övergång mellan det tunna kanalbladet och det mycket tjockare höljet där bladet sitter fast.



Genomgående kantspricka, 203.

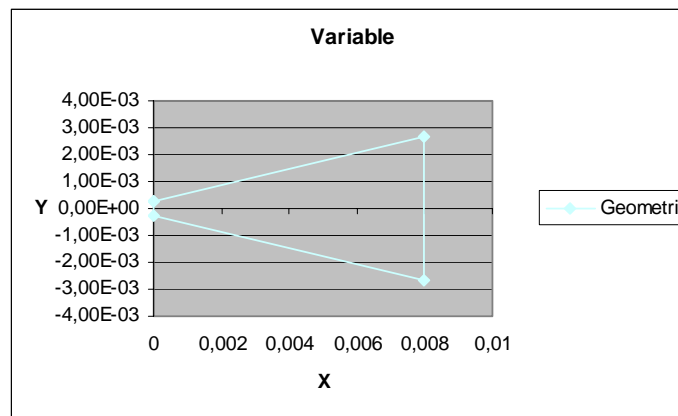
605

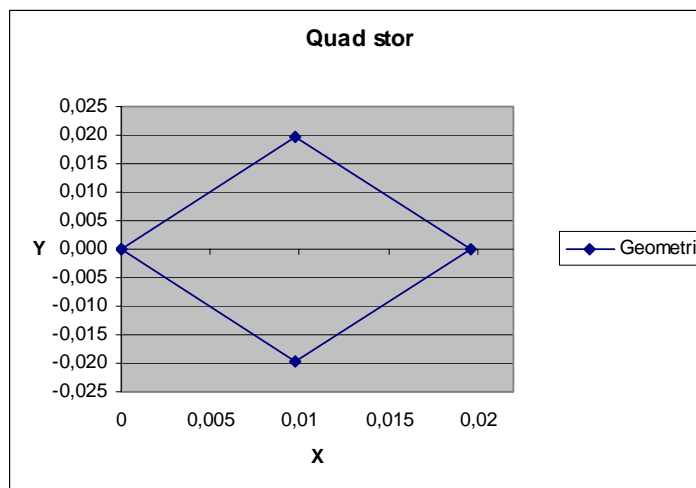
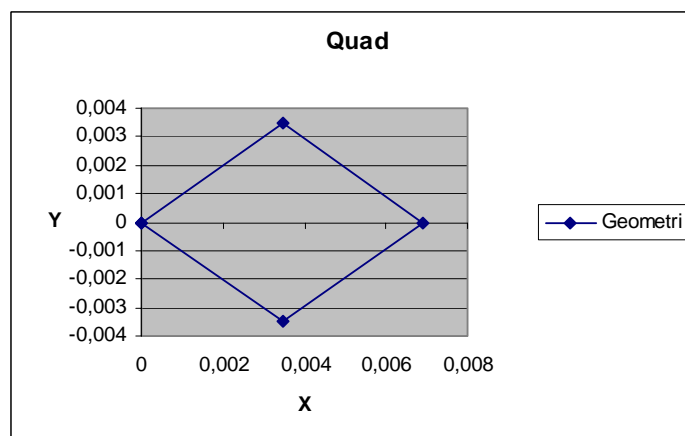
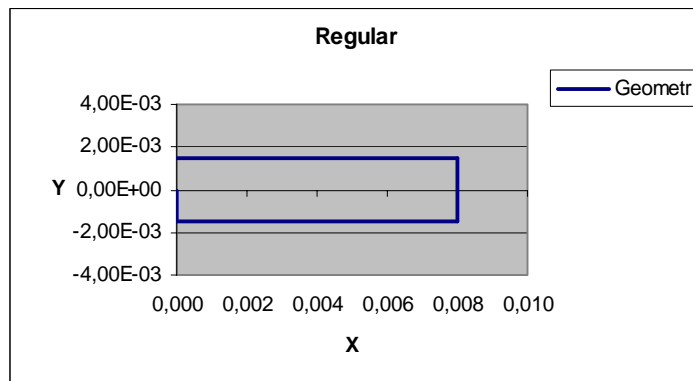


Två-dimensionell hörnspricka, 605.

### 5.3 Olika geometrier på beräkningsmodellen

Fyra olika geometrier har använts. Variable som är den som mest liknar bladet. Regular, en rektangel, som är 3\*8mm. Quad som är en kvadrat med måtten 4, 9\*4, 9mm. Måtten på de olika geometrierna har beräknats utifrån arean på det verkliga bladet som är 24mm<sup>2</sup>. Quad stor 9, 8\*9, 8mm som har dubbelt så långa sidor som vanlig Quad och därmed 4 ggr så stor area har använts vid en beräkning. Detta för att se hur en större modell reagerar.





## 5.4 Beräkningar

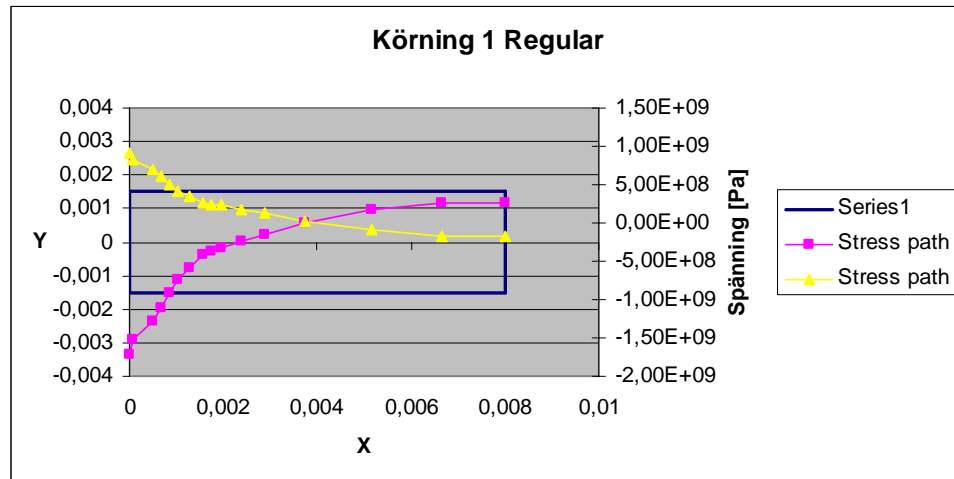
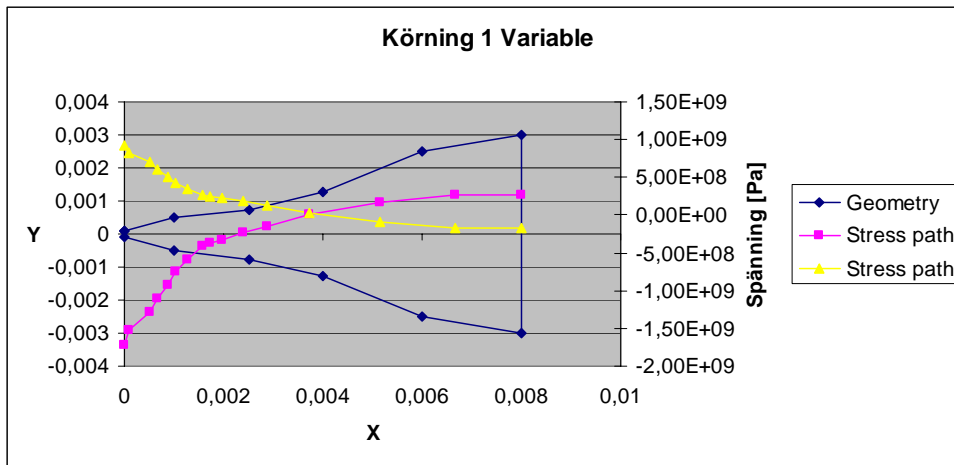
Det visade sig att det inte gick att beräkna hörnsprickor på geometrin Variable pga. att programmet vill ha ett 90 gradigt hörn att räkna på. Spetsen på Variable är bara några grader. Alltså kördes spricknr. 203 på Variable och Regular och spricknr. 605 på Quad för att skapa en modell så lik verkligheten som möjligt.

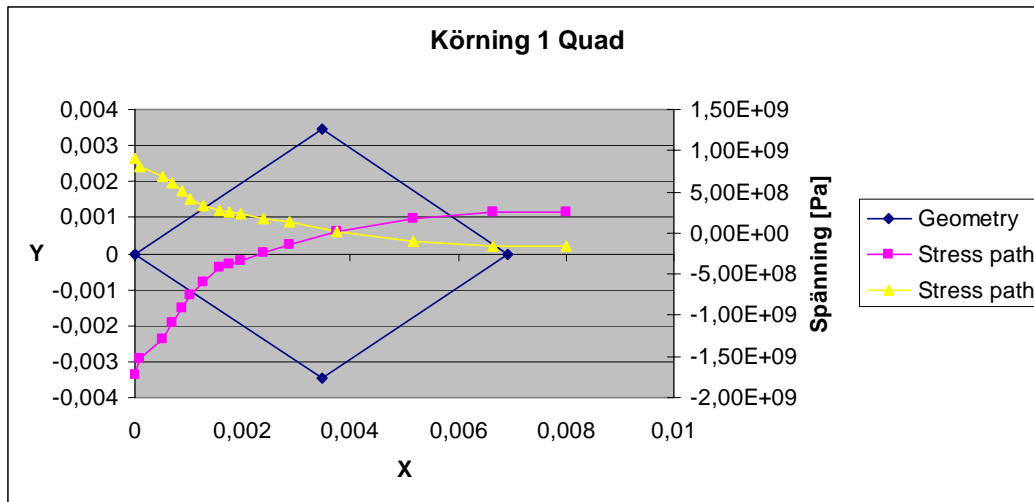
## 6 De olika körningarna

Alla spänningar finns i bilaga A.

### 6.1.1 Körning 1

I körning 1 används summan av spänningarna för temperatur, som är töjningsstyrda, och för tryck, som är kraftstyrd, i 16 koordinater på modell Variabel, Regular och Quad med startspricka på 1mm. Spänningarna här är korsade, max- och minspänning byter plats 4 punkter från modellens slut.



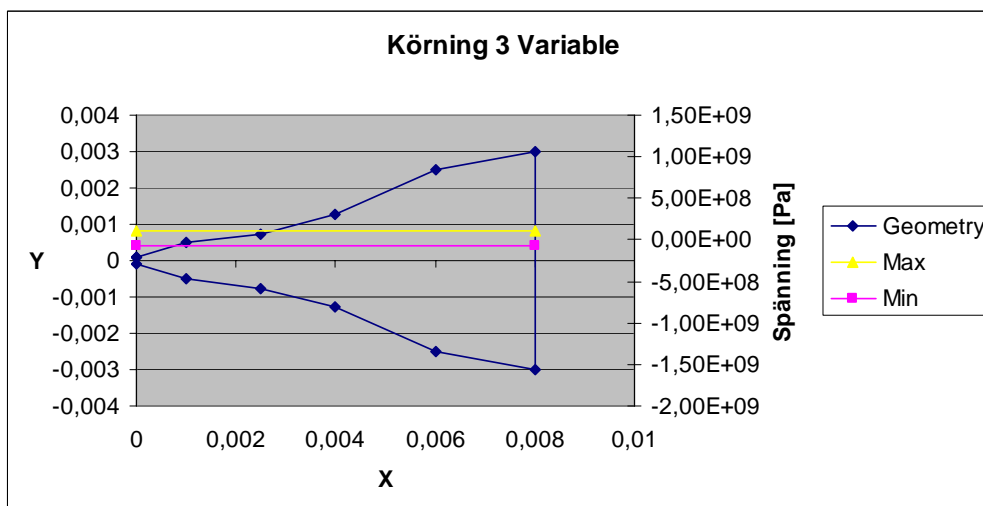


### 6.1.2 Körning 1b

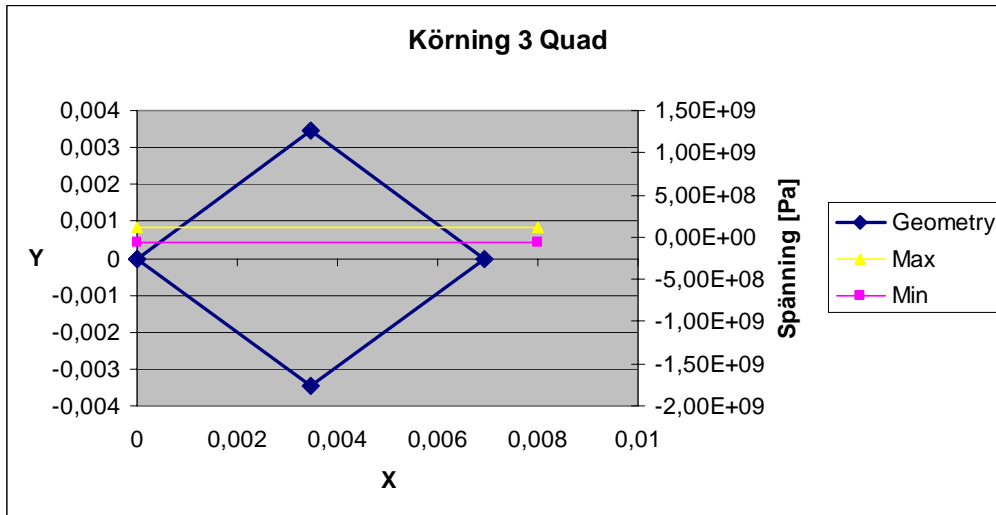
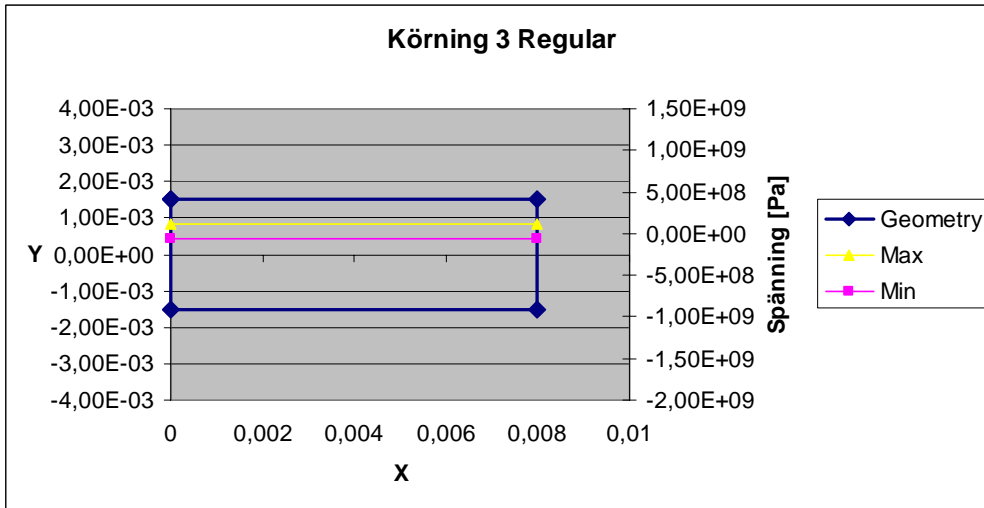
Körning 1b är samma som körning 1 men med en startspricka på 2, 2mm på Variable och Quad. Detta för att senare kunna jämföra med en körning som försöker kompensera för att viss del av spänningen (den som beror av temperaturfördelningen) relaxeras när sprickan växer.

### 6.1.3 Körning 3

Körning 3 är en viktad medelspänning beräknad med körning 1: s spänningar över arean. Denna medelspänning användes till Variable, Regular och Quad med startsprickan 1mm. Max 106 Mpa & Min -61,4 Mpa.



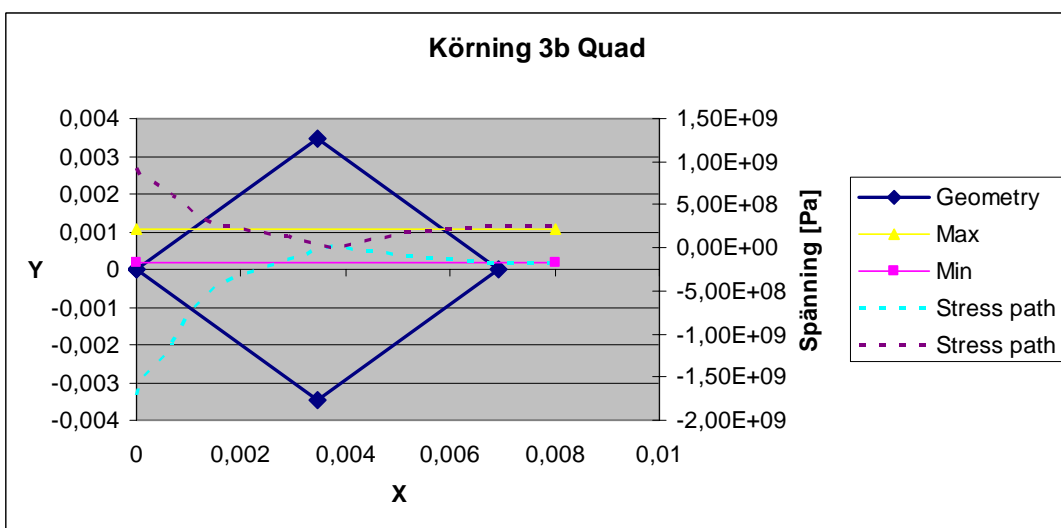
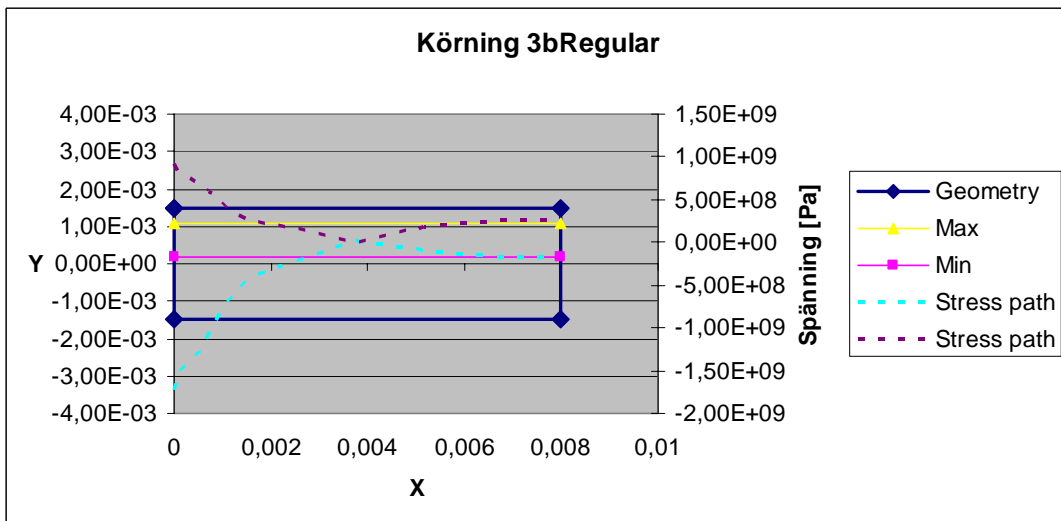
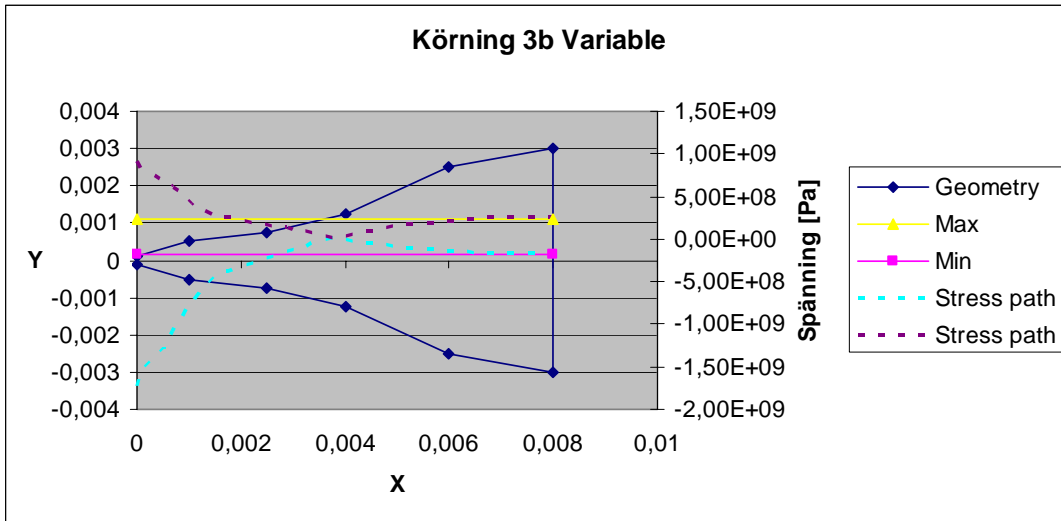




#### 6.1.4 Körning 3b

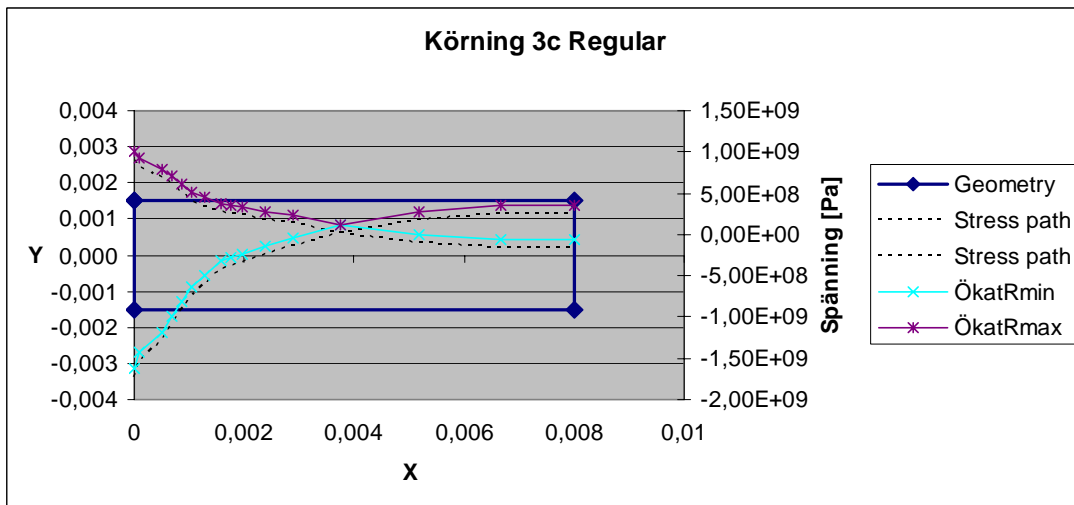
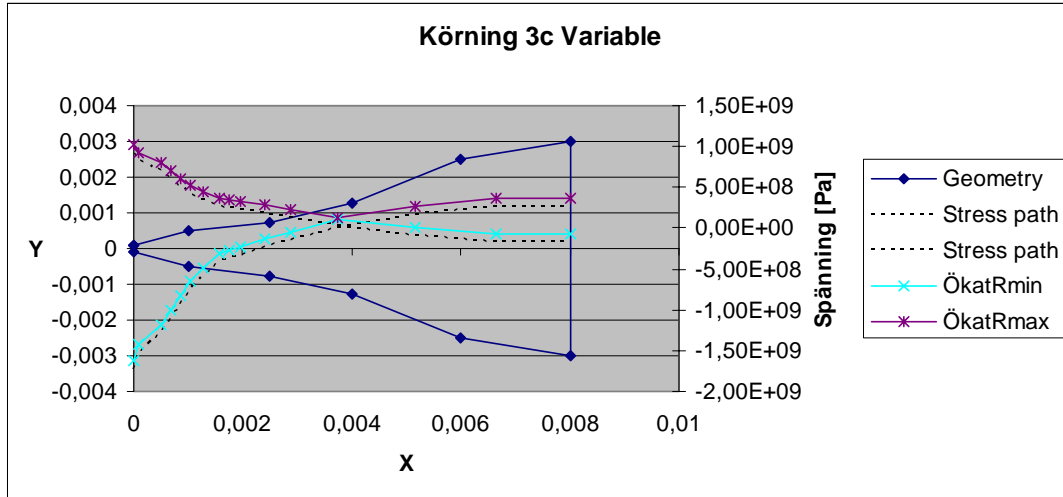
I körning 3b skiftades de tre sista spänningarna i min- och maxkurvan, spänningarna är då O-korsade, och en ny viktad medelspänning över arean räknades fram. Även denna nya medelspänning användes på Variable, Regular och Quad med startspricka 1 mm. O-korsad fördelad spänning provades också på modell Variable, se körning 3d under 6.1.6.

Max 225 Mpa & Min -181 Mpa



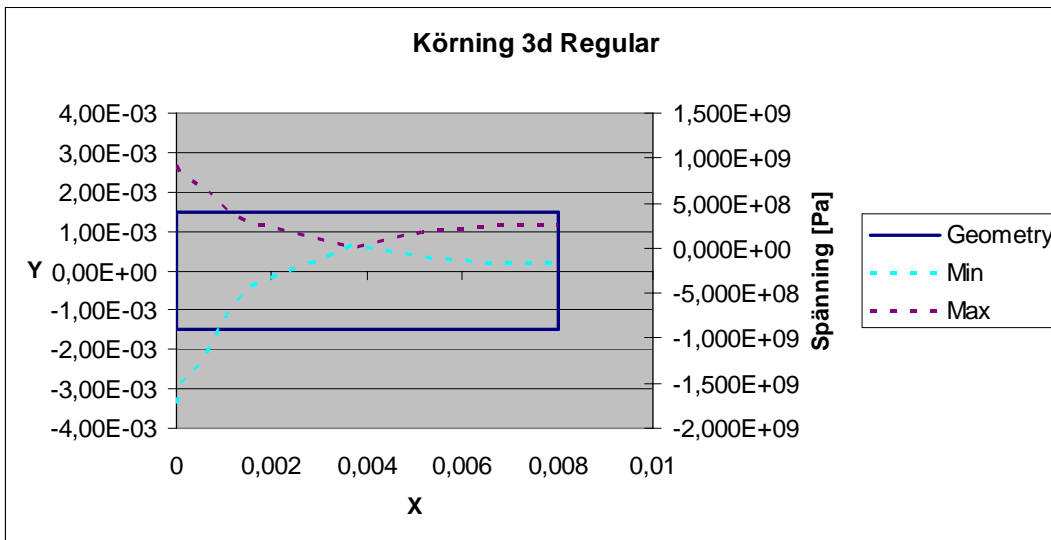
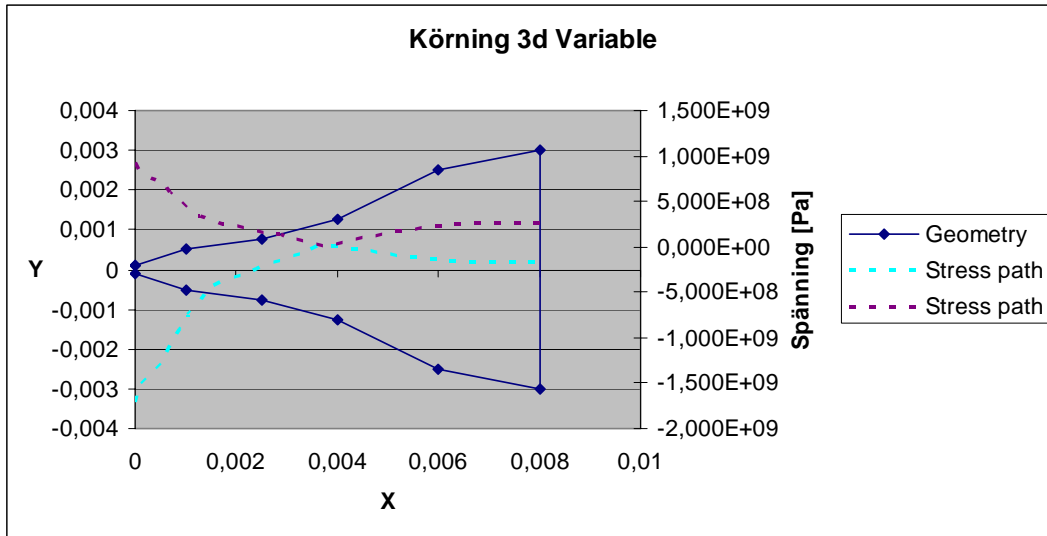
### 6.1.5 Körning 3c

I körning 3c lades 100 Mpa på spänningen i varje koordinat plus att O-korsad spänning användes. Detta innebär alltså en direkt ökning av R värdet med syfte att undersöka hur de olika provade spricktillväxtlagarna då reagerar. Variable och Regular med startspricka 1mm beräknades.



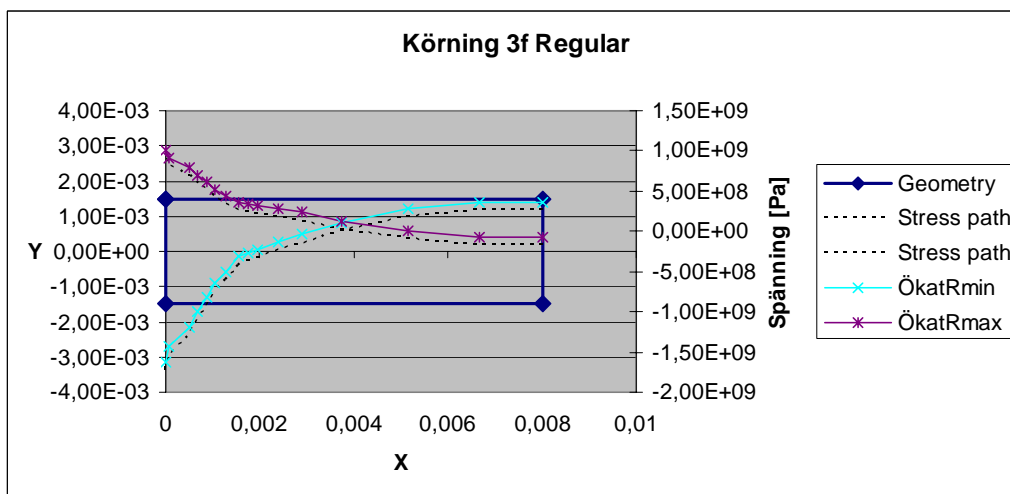
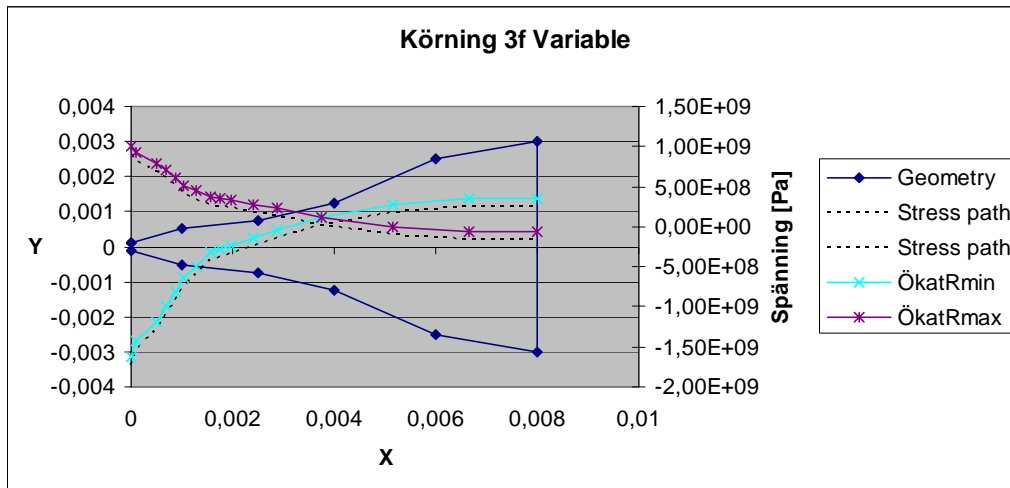
### 6.1.6 Körning 3d

I körning 3d används spänningarna från körning 1 men med de tre sista spänningarna O-korsade för att se hur programmet viktat  $\Delta K$  och beräknar spänning i sprickspetsen när  $K_{max}$  hela tiden är större än  $K_{min}$ . Detta simulerar ett renodlat lastfall att jämföra med vårt drag-tryck / tryck-drag lastfall där  $K_{min}$  ibland är större än  $K_{max}$ . Modell Variable och Regular med startspricka 1 mm beräknades här.



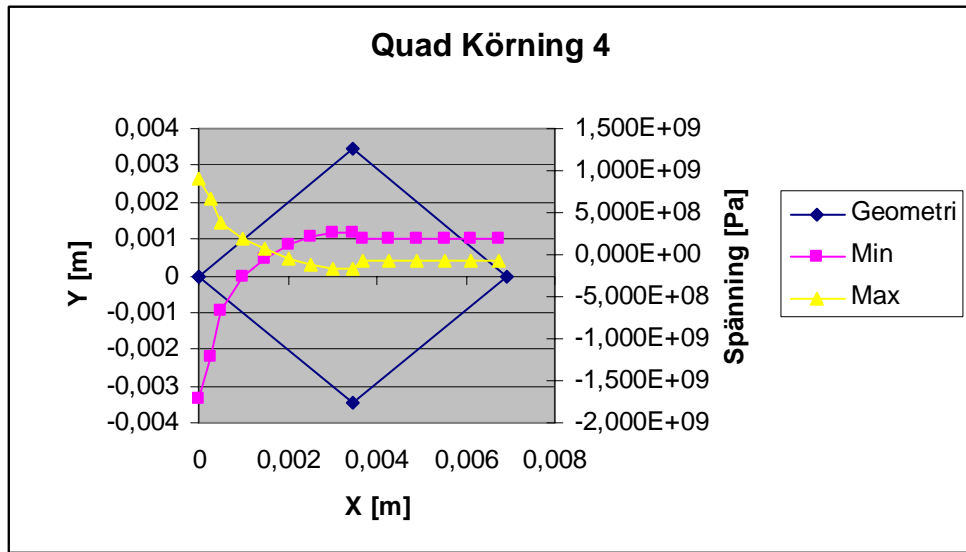
### 6.1.7 Körning 3f

I körning 3f lades 100Mpa på i varje koordinat, samma som i 3c, men med de tre sista spänningarna korsade. Användes på Variable och Regular och med startspricka 1mm.



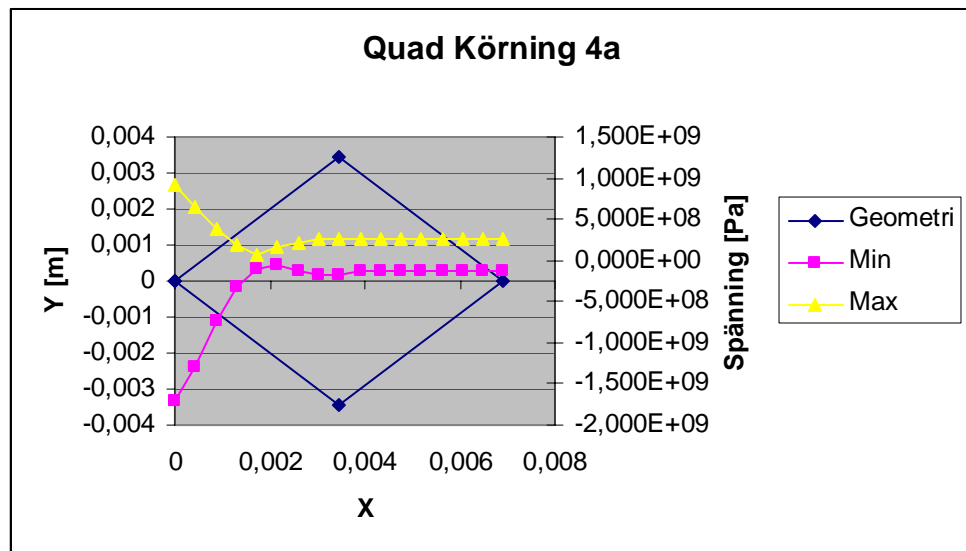
### 6.1.8 Körning 4

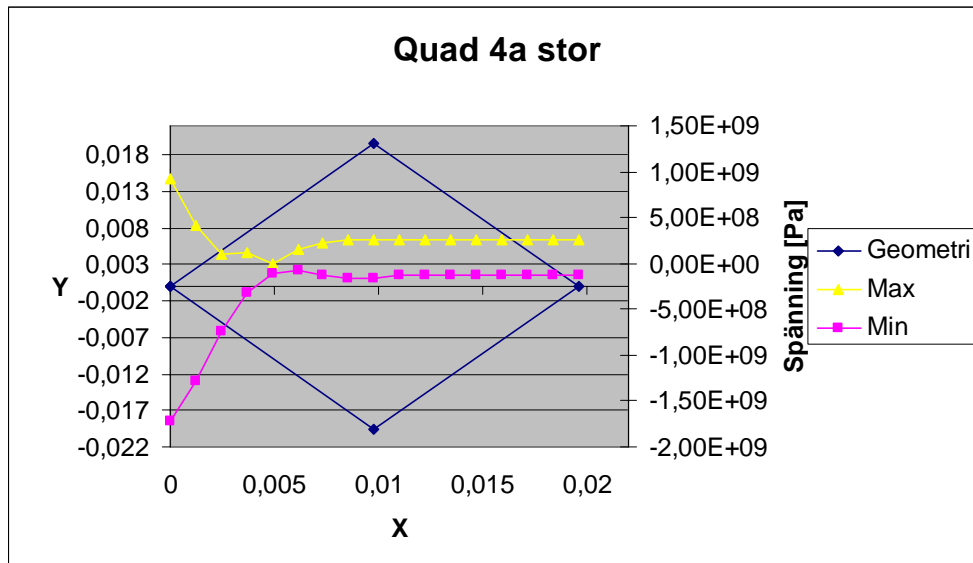
Körning 4 användes endast på modellen Quad. Spänningarna räknades om till medelspänning i 9 valda koordinater som i sin tur sedan lades på som 9 spänningsfält över modellen.



### 6.1.9 Körning 4a

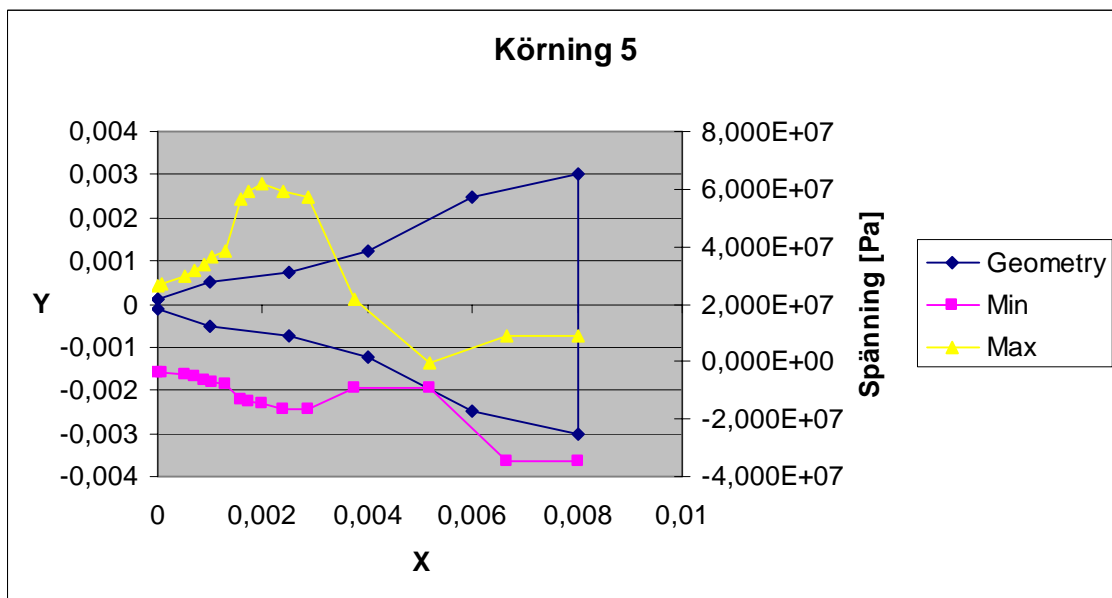
Körning 4a är samma som körning 4 men med okorsad spänning. Denna körning gjordes också på en Quadmodell stor, med 4 ggr så stor area som den ”lilla” Quadmodellen. Detta för att se hur Nascrac ”gör” med en större modell.





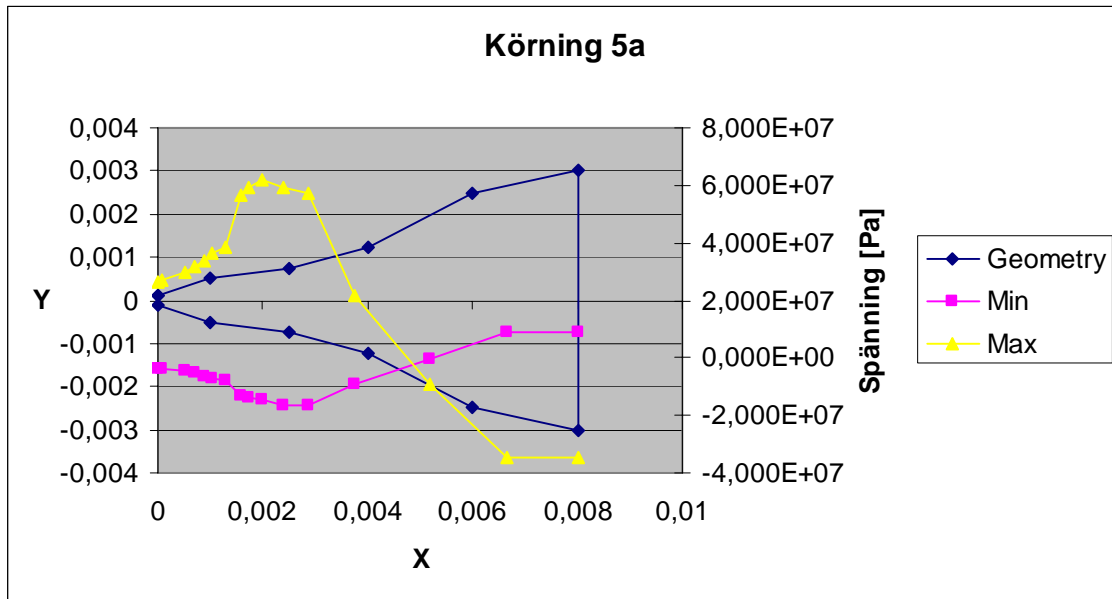
### 6.1.10 Körning 5

I körning 5 är de töjningsstyrda spänningarna orsakade av de lokala temperaturgradienterna borttagna och spänningarna är O-korsade. Detta för att simulera effekten av att ytspänningen pga. temperatur relaxerar då sprickan växer. Modell Variable med startspricka 1mm och 2, 2mm användes.



### 6.1.11 Körning 5a

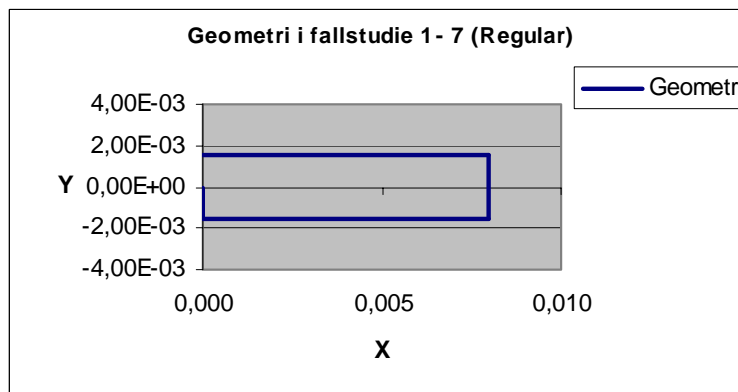
Körning 5a är samma som körning 5 men med korsad spänning.



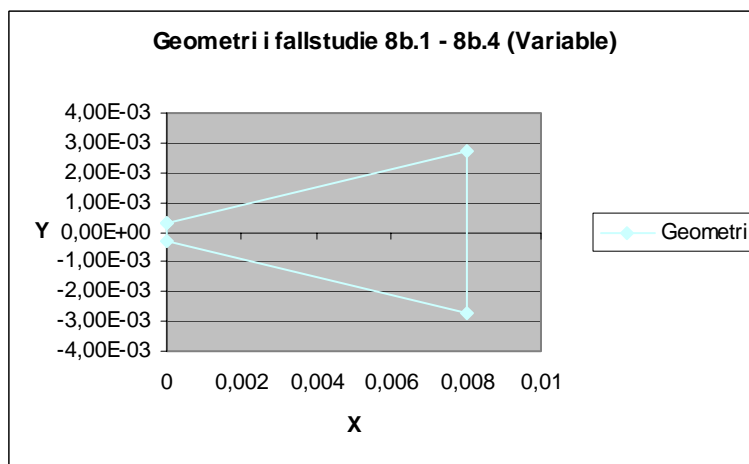
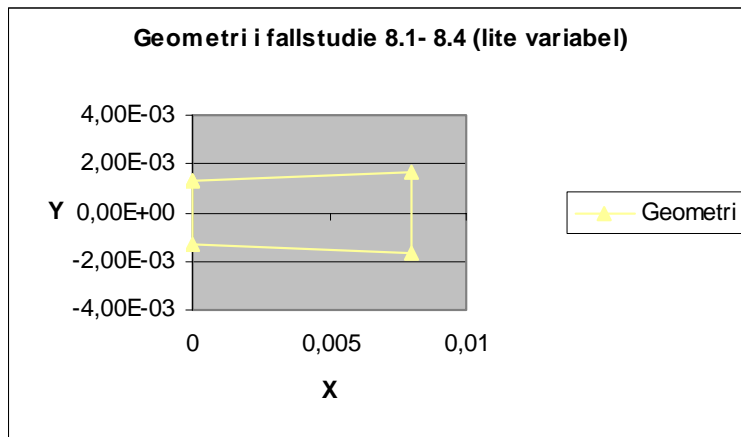
## 7 Fallstudie i NASCRAC

För att ta reda på hur programmet agerar när spänningarna går från max till min och tvärtom gjordes ett test. Spänningar från 1000 Mpa till -1000 Mpa kördes på en modell Regular och två modeller med varierande tjocklek.

### 7.1 Geometrier använda i fallstudien

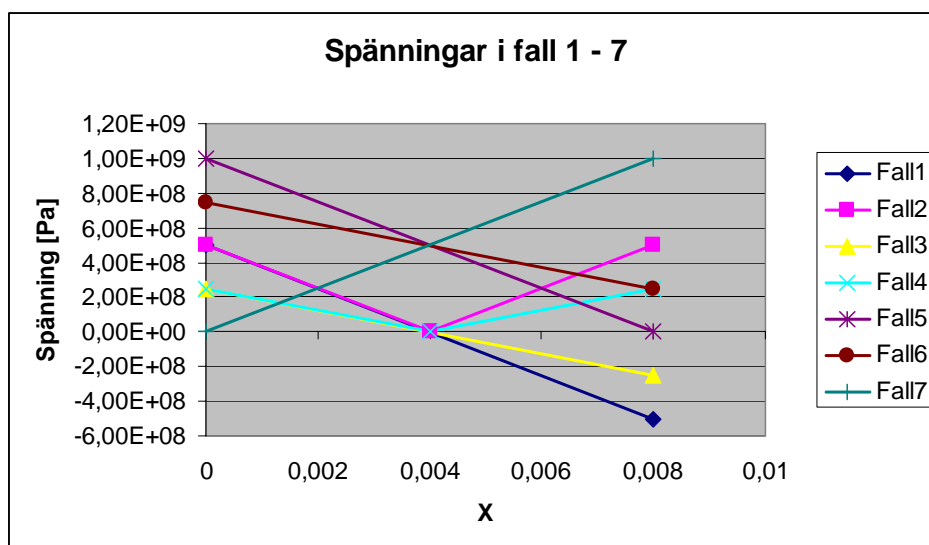






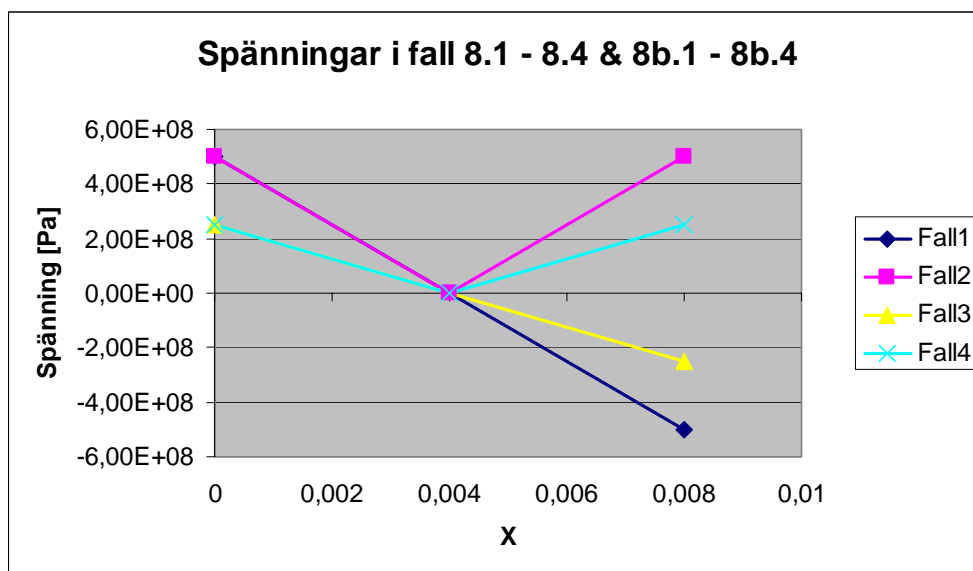
## 7.2 Spänningar använda i fallstudien

Fall 1– 7, 8.1-8.4 och 8b.1-8b.4



Samtliga spänningar är motsvarande max i cykeln, som min används uniform 0 MPa.

Intressant att jämföra är ju fall 5,6 och 7 som har samma medelspänning. Samma medelspänning har ju också fall 1 och 3. Fall 1 och fall 2 har ju samma  $\Delta K$  vilket också fall 3 och fall 4 men med omkastat tecken för sista hälften av modellen.



Här har fall 1 och 2 samma  $\Delta K$  liksom fall 3 och fall 4.

## 8 NASGRO

### 8.1 Ekvationer

Uppgifterna om ekvationer och spricktillväxtlagar är hämtade ur NASGRO: s användar manual. [2] NASGRO hanterar både linjära och icke linjära beräkningar.

#### 8.1.1 1-D & 2-D Table

1-D Table är DADNDK för en dimension och ett R-värde.

2-D Table är DADNDK för två dimensioner och ett eller flera R-värden.

#### 8.1.2 NASGRO-ekvationen

För bräkning av spricktillväxthastigheten i NASGRO används ett förhållande som kallas NASGRO-ekvationen. Den tillhandahåller en mer korrekt formulering för effekten av spänningsförhållandet än vad DADNDK gör.

### 8.1.3 Walker-ekvationen

$$da/dN=C((\Delta K)/(1-R)^{(1-n)})^m \text{ där } R=K_{\min}/K_{\max}$$

I Walker ekvationen tar man hänsyn till R-värdet dvs. förhållandet mellan  $K_{\min}$  och  $K_{\max}$ . C, m, och n är materialkonstanter som tagits fram vid tester av materialet.

## 8.2 Interagerande spricktillväxtmodeller

Alla modeller nedan är interaction-modeller dvs. att de påverkar de ekvationer, Nasgro- och Walkerekvationen, 1-D table (DADNDK), 2-D table, som används i dessa modeller genom att hävda sprickretardation.

### 8.2.1 Generaliserad Willenborgmodell

Generaliserad Willenborgmodell behandlar sprickretardation och tar ej hänsyn till om det är **en** eller **flera** överlaster.

$$R_{eff}=(K_{\min}-K_R)/(K_{\max}-K_R)$$

$K_R$  Kvarstående spänningsintensitet

Endast Nasgroekvationen går att använda.

### 8.2.2 Modifierad Generaliserad Willenborgmodell

Samma som GW men tar hänsyn till att underlaster minskar bromsandet av spricktillväxten. En underlast är en last som är mindre än den sista minsta pålastningen som gjorts närmast efter en överlast.

$$K_{\max,eff}=K_{\max}-K_R$$

$$K_{\min,eff}=\text{Max}\{(K_{\min}-K_R),0\} \text{ för } K_{\min}>0$$

Endast Nasgro ekvationen går att använda.

### 8.2.3 Chang-Willenborgmodellen

I Chang-Willenborgmodellen räknar man med en ökad spricktillväxthastighet även för negativ spänning.

Endast Walkerekvationen går att använda.

För  $\Delta K > \Delta K_{th}$ ,  $R > 0$ :

$$da/dN=C[\Delta K/(1-R')^{1-n}]^m$$

$$R < R_{+cut}, R' = R$$

$$R > R_{+cut}, R' = R_{+cut}$$

För  $\Delta K > \Delta K_{th}$ ,  $R < 0$ :

$$da/dN = C [\Delta K / (1 - R'^2)^q * K_{max}]^m$$

$$R \rightarrow R_{-cut}, R' = R$$

$$R < R_{-cut}, R' = R_{-cut}$$

$R_{+cut}$  och  $R_{-cut}$  är cutoff-värden för positiva och negativa spänningsförhållanden.

### 8.2.4 Strip Yield-modellen

Strip Yield Model är en mekanisk modell baserad på antagandet att utmattningssprickan propagerar genom sprickspetsens plastiska zon och att den plastiska deformation som uppstår där sprickan dragit fram bidrar till spricktillväxtens acceleration och retardation. Strip Yield tar också hänsyn till  $K_{open}$  och  $K_{close}$  vilket är spänningsintensiteten som krävs för att öppna och sluta sprickan.

Är  $K_{min}$  mindre än  $K_{open}$  används vanligen Paris lag. Är  $K_{min}$  större än  $K_{open}$  används  $\Delta K_{eff}$  istället för  $\Delta K$  i Paris lag.

Nsgroekvationen och DADNDK kan användas.

$$K_{min} < K_{open}$$

$$da/dN = C (\Delta K)^m$$

$$\Delta K = K_{max} - K_{min}$$

eller

$$K_{min} > K_{open}$$

$$da/dN = C (\Delta K_{eff})^m$$

$$\Delta K_{eff} = K_{max} - K_{open}$$

### 8.2.5 Boeing Constant Closure-modellen

Antar en kontrollerad över- och underlast som gör att kvarstående spänningar i vaken efter sprickspetsen hålls konstanta.

Nasgroekvationen, 1-D table (DADNDK) och 2-D table kunde användas.

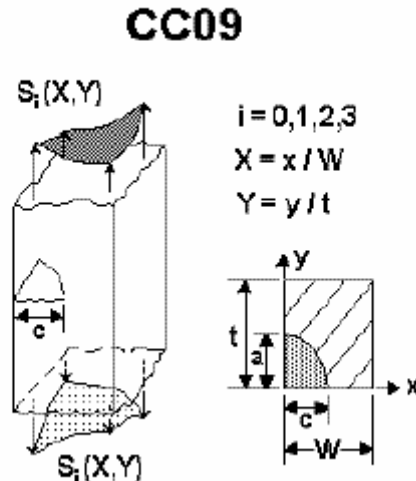
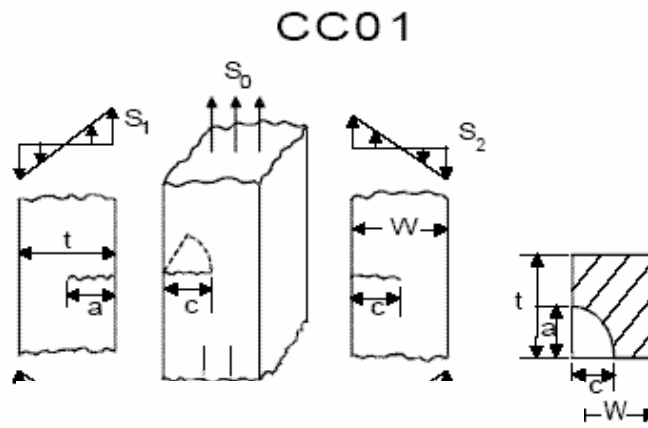
### 8.3 Icke interagerande spricktillväxtmodell

#### 8.3.1 Non interaction-modellen

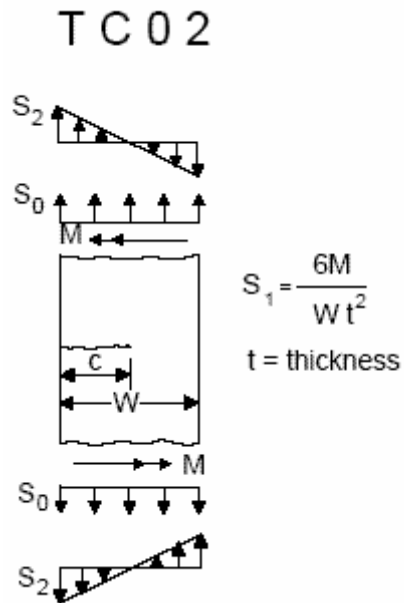
Denna modell är mer konservativ och tar inte hänsyn till sprickretardation vilket de ovanstående modellerna gör. Man bör vara helt säker på hur den verkliga modellen beter sig är innan man använder någon av Interaction-modellerna ovan. Nasgro- och Walkerekvationen, 1-D table (DADNDK), 2-D table används utan retardationspåverkan av någon omgärdande modell.

### 8.4 Sprickor

De sprickor som finns att tillgå i NASGRO som liknar problemfallet är hörnspricka i tjock plåt CC01 med samma eller linjärt varierande spänning över plåten och CC05 & CC09 med varierande spänning över plåten. CC09 är en uppdatering på CC05.

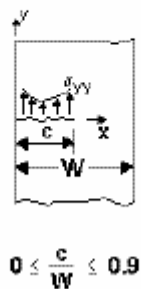


TC02 är en genomgående kantspricka i tunn plåt med konstant eller linjärt varierande spänning över plåten.



TC12 är en genomgående kantspricka i tunn plåt med varierande spänning över plåten.

### TC12



## 8.5 Geometrier på beräkningsmodellen

Då det inte finns möjlighet att använda en modell med varierande tjocklek i NASGRO var det modell Regular och Quad som användes här.

## 8.6 Beräkningar

Inmatningarna i NASGRO är enklare än i NASCRAC. Utdatan är också mycket mer informativ och ger varningar för t.ex. överskridande av sträckgräns, ostabil spricktillväxt och  $K_{max} > K_{Ic}$ .

## 9 Avgränsningar

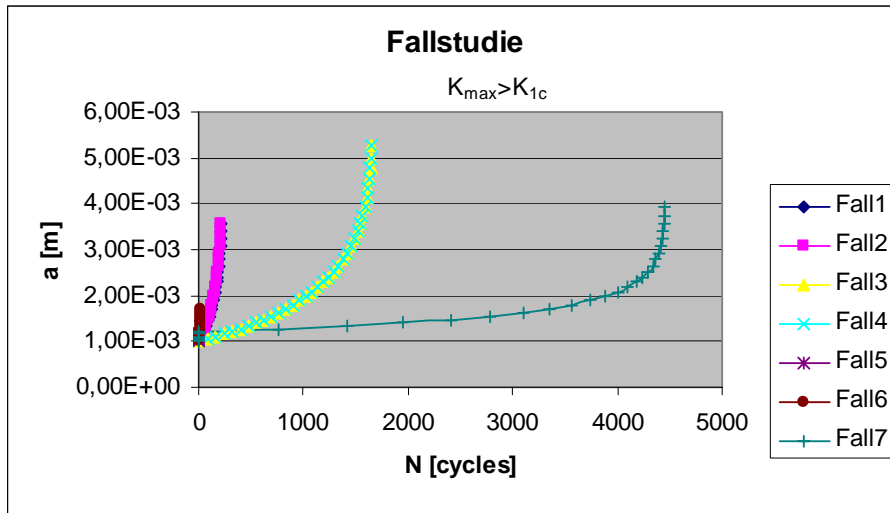
De avgränsningar som gjorts är på grund av att det inte funnits materialdata till spricktillväxtlagarna/ekvationerna och inte heller fler tänkbara geometrier att arbeta med.

## 10 Resultat

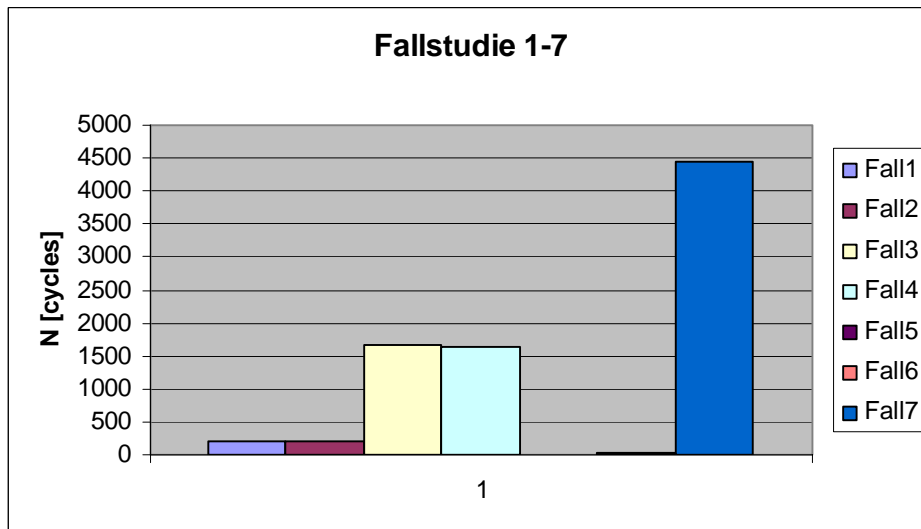
### 10.1 Fallstudie på olika geometrier

#### 10.1.1 Fall 1 - 7

Fallstudien visar att NASCRAC är mycket beroende av hur modellen är utformad. När den rektangulära modellen Regular används fördelar sig spänningen jämt över hela modellen. Resultatet blev detsamma vilken bredd som än användes på en och samma längd. Areal som håller emot sprickan är konstant och kraften och spänningen är lika stor i hela modellen samtidigt. Fall 1-7 beräknas på modell Regular.



Spricktillväxt och livslängd

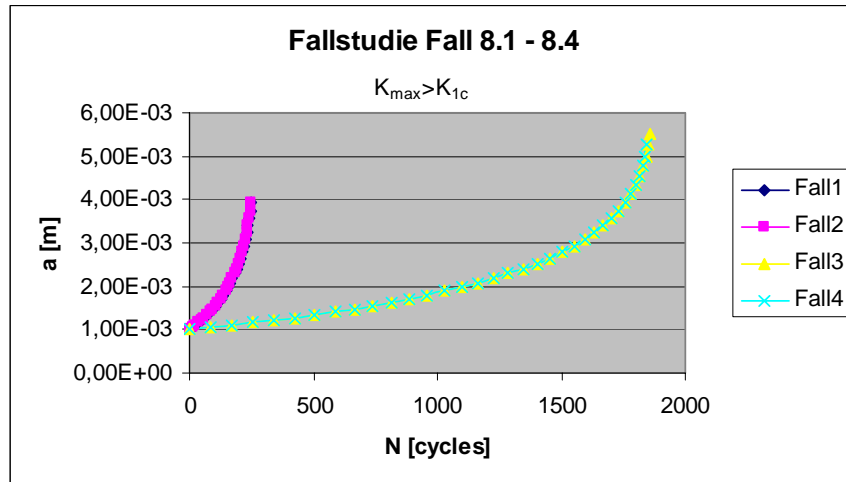


Livslängd

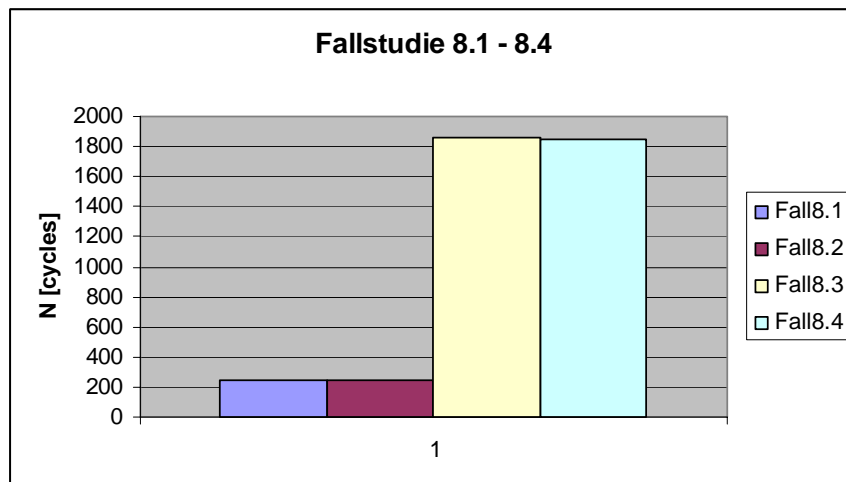
### 10.1.2 Fall 8.1 – 8.4

Modellen som är lite variabel ger något längre livslängder än Regular men mycket kortare än modell Variable.





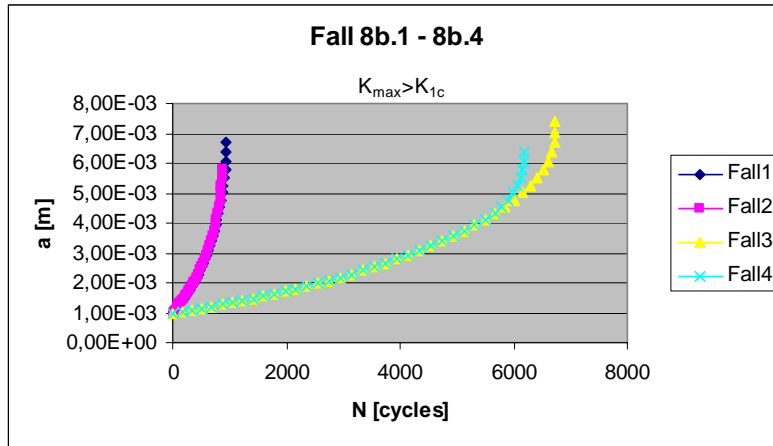
Spricktillväxt och livslängd på lite variabel modell.



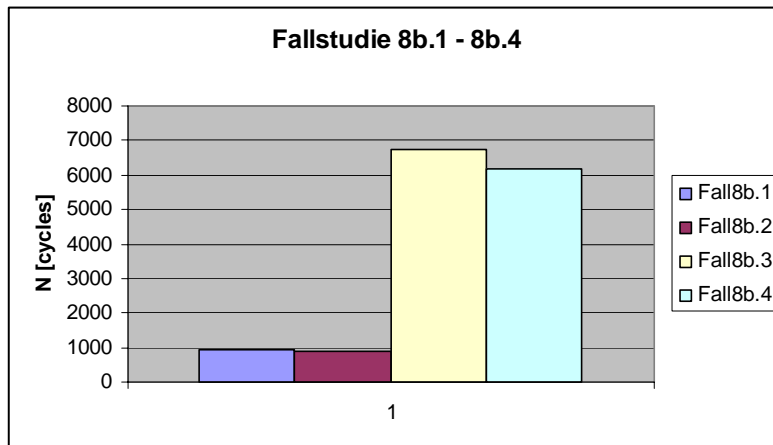
Livslängd på lite variabel modell.

### 10.1.3 Fall 8b.1 – 8b.4

Den mest Variabla modellen ger längst livslängd. Sprickan hinner växa längre i den variabla modellen än i den rektangulära innan modellen kollapsar. Detta beror på att arean framför sprickan blir större och kan hålla emot mer ju längre in sprickan växer.



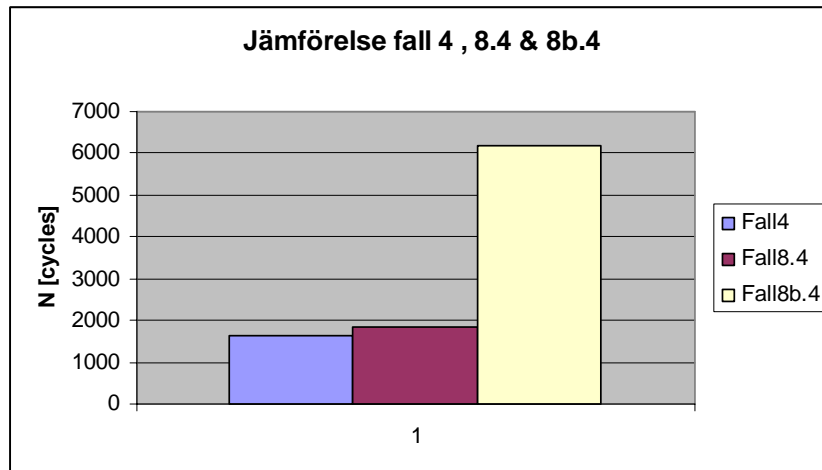
Spricktillväxt och livslängd på modell Variable.



Livslängd på modell Variable.

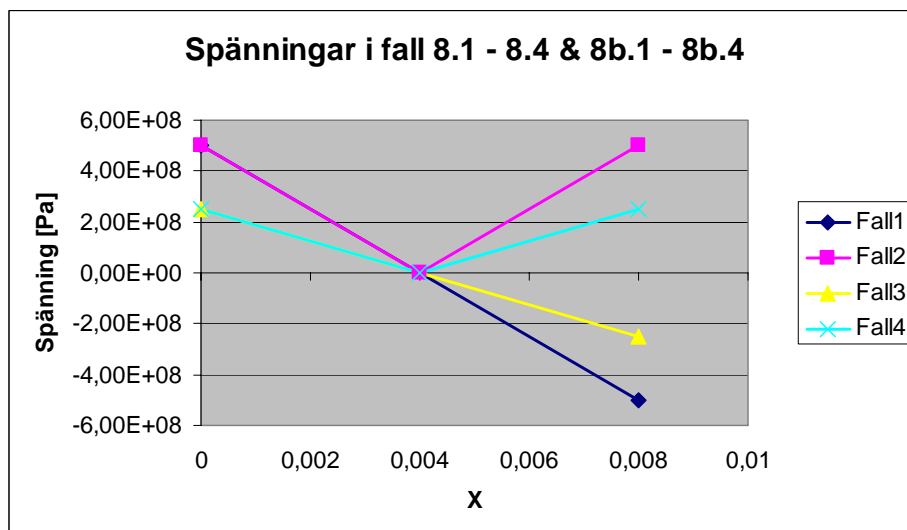
#### 10.1.4 Jämförelse mellan geometrierna

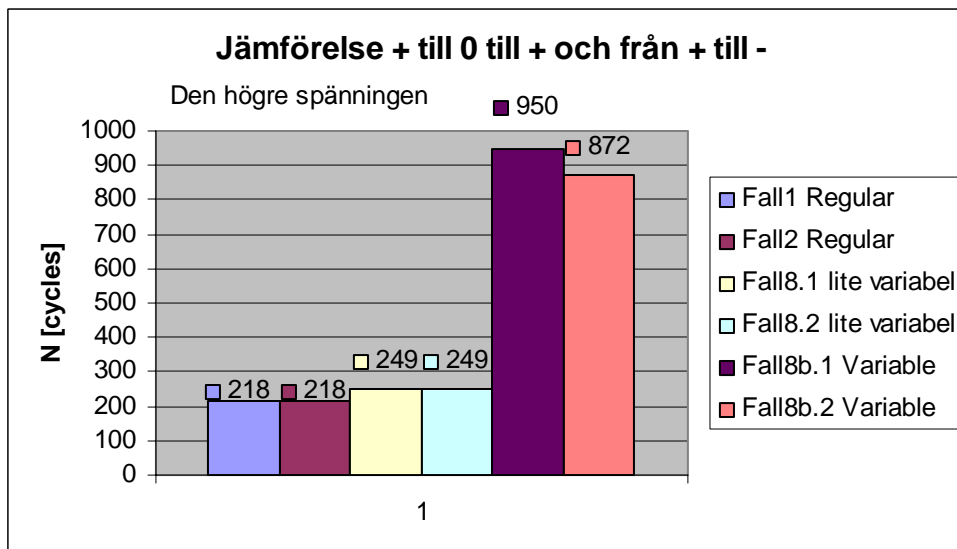
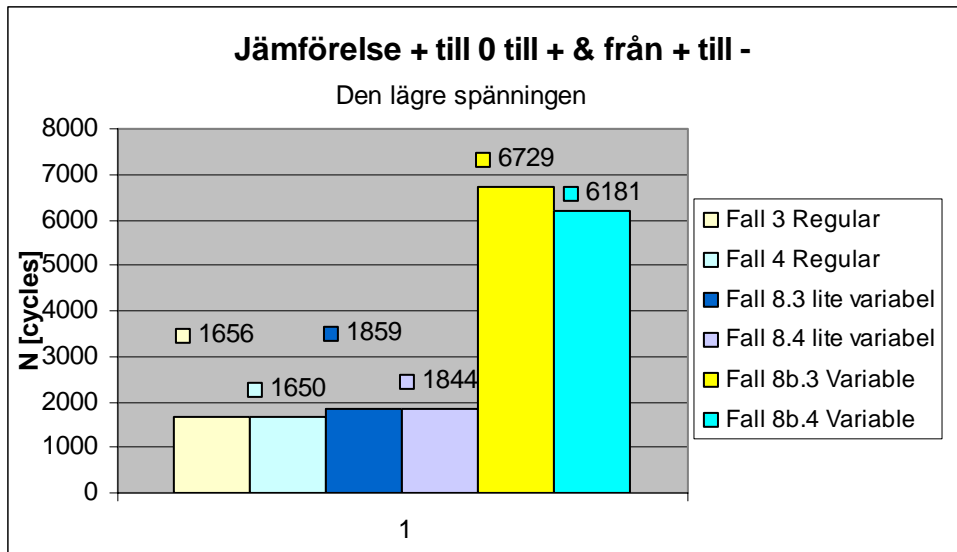
Livslängdsjämförelse mellan Regular, lite variabel och Variable modellerna.



### 10.1.5 Positiv kontra negativ spänning

En observation som gjordes var att spänningar som gick från + till - gav samma resultat som när spänningen gick från + till 0 och till + igen i rektangulärmodell. I lite variabel modell syns en liten skillnad och i den variabla modell som liknar den som använts vid beräkningarna i NASCRAC blev det större skillnad. Intuitivt borde första fallet ge en mycket längre livslängd i alla modeller då tryckspänning inte påverkar spricktillväxten men först i modell Variable blev resultatet det förväntade. De flesta experiment som gjorts tyder också på att ingen spricktillväxt uppkommer under kompression. I Nasrcac får man tydligen ändå tillväxt - antagligen beroende på att deltaK ändå blir större än 0, koden kastar nämligen om  $K_{max}$  och  $K_{min}$  om den förra är mindre än den senare och effektivt blir då cyklingen noll till -spänning som  $\sigma_{max}$ ,  $\sigma_{min}$  när sprickan löper in i den andra hälften av modellen. Detta kan tolkas som att Nasrcac fungerar dåligt för en inmatning -spänning till noll (eg.  $R > 1$ ), men utan att göra test kan man ju inte säga säkert.





## 10.2 Ekvationer

Den enda ekvationen som det finns materialdata för är DADNDK och därför är beräkningar med de andra ekvationerna ”utanför gränserna”. Beräkningar med Walker och Paris har ändå gjorts för en ungefärlig jämförelse med DADNDK.

### 10.2.1 I NASCRAC

I NASCRAC kunde alla ekvationer användas på alla geometrier vilket gjorde en jämförelse mellan dem möjlig.

DADNDK gav väldigt långa livslängder jämfört med Paris och Walker. Walker ger livslängder ungefär mitt emellan DADNDK och Paris.

### **10.2.2 I NASGRO**

Det fanns fem olika interagerande spricktillväxtmodeller i NASGRO men för att vara på den säkra sidan, då det inte är helt säkert/fastställt hur den verkliga modellen beter sig, så användes DADNDK i en icke interagerande modell. Inga andra ekvationer användes. Det fanns inte heller materialdata för att kunna använda de interagerande spricktillväxtlagarna.

## **10.3 Sprickor**

### **10.3.1 I NASCRAC**

I NASCRAC gick det bara att använda hörnspricka på Quadmodellen och genomgående kantspricka på modell Regular och Variable. Det som var mest likt den verkliga modellen som gick att använda i NASCRAC var en kantspricka på den Variabla modellen.

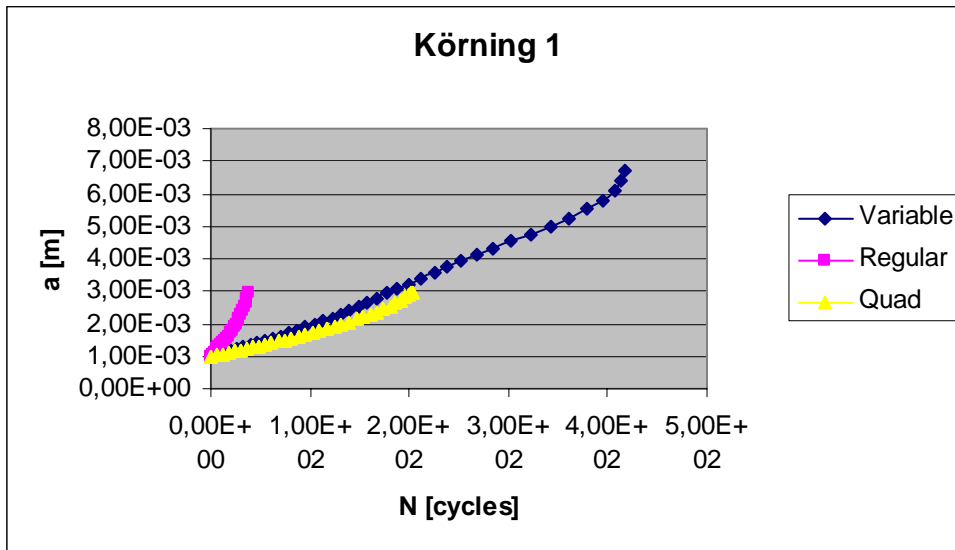
### **10.3.2 I NASGRO**

I NASGRO gick det inte att använda en modell med varierande tjocklek så där användes Quadmodell med hörnspricka och kantspricka på modell Regular.

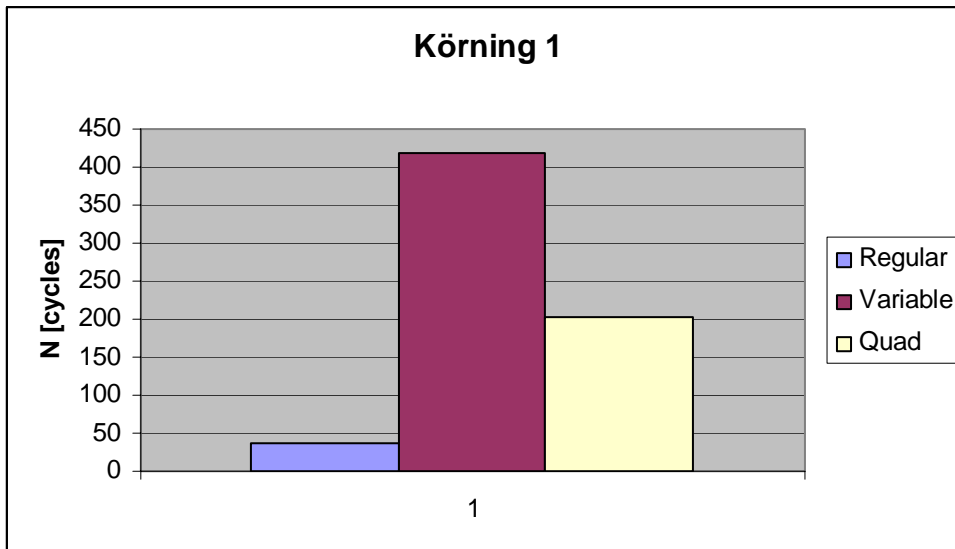
## **10.4 Körningar i NASCRAC**

### **10.4.1 Körning 1**

Körning 1 gav sjunkande livslängd i ordningen Regular, Variable.



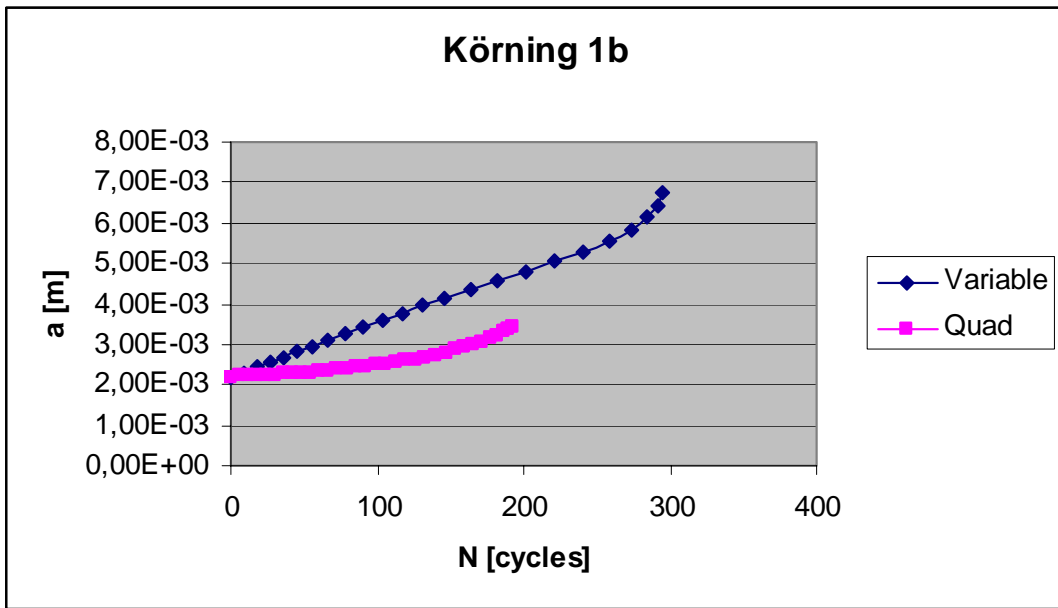
Spricktillväxt & livslängd



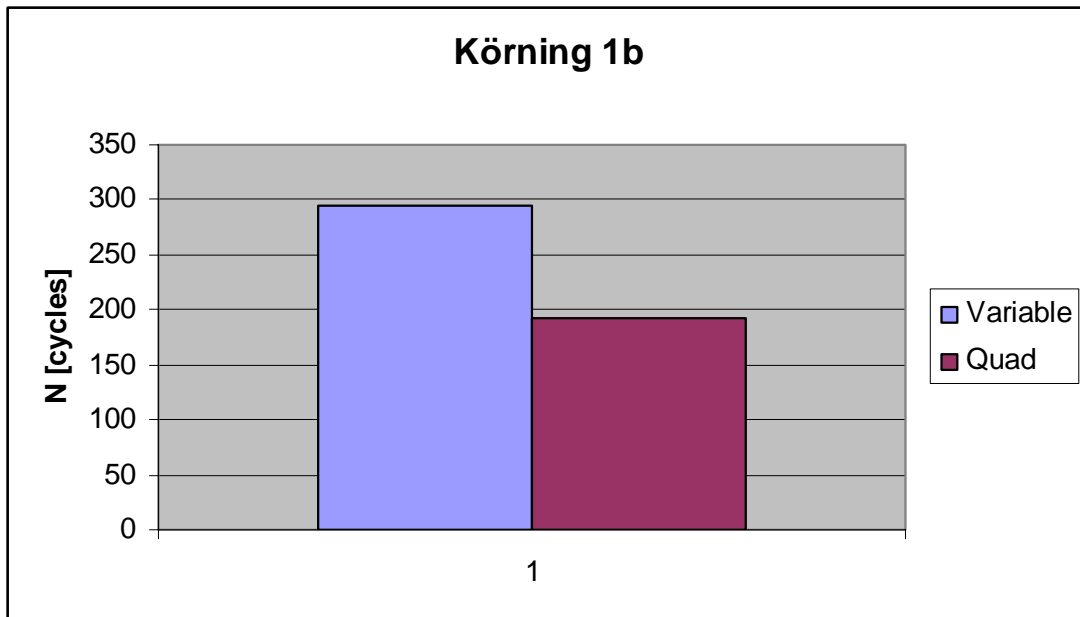
Livslängd

#### 10.4.2 Körning 1b

Körning 1b med startsprickan 2, 2mm kördes på Variable och Quad, med resultatet kortast livslängd på Quadmodellen.



Spricktillväxt & livslängd

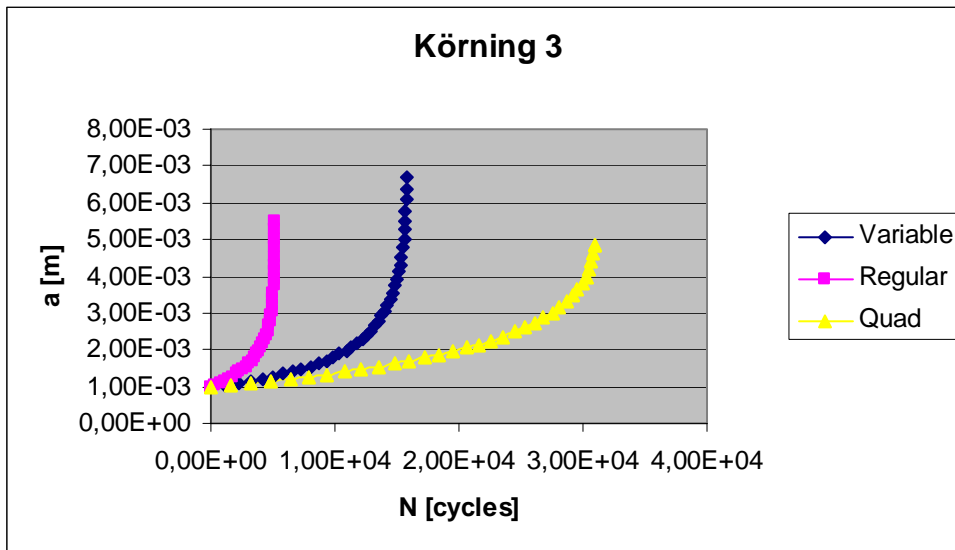


Livslängd

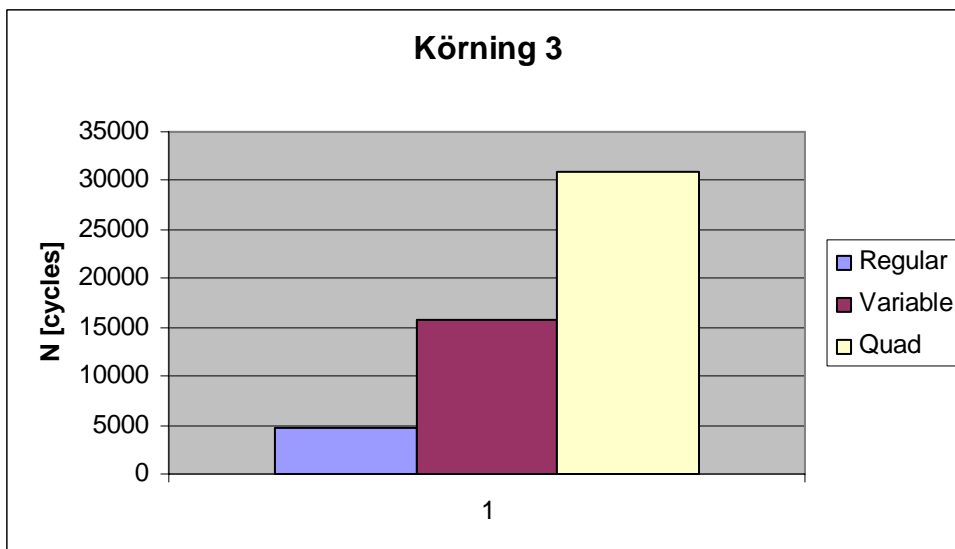
### 10.4.3 Körning 3

Körning 3 med viktad medelspänning kördes på Variable, Regular och Quad med sjunkande livslängd i samma ordning.

Max 106 Mpa & Min -61,4 Mpa



Spricktillväxt & livslängd



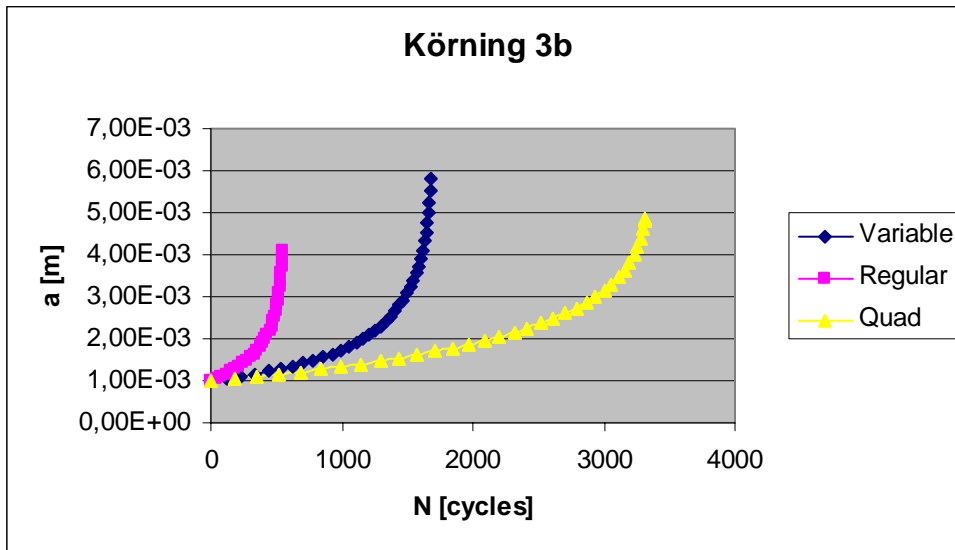
Livslängd

#### 10.4.4 Körning 3b

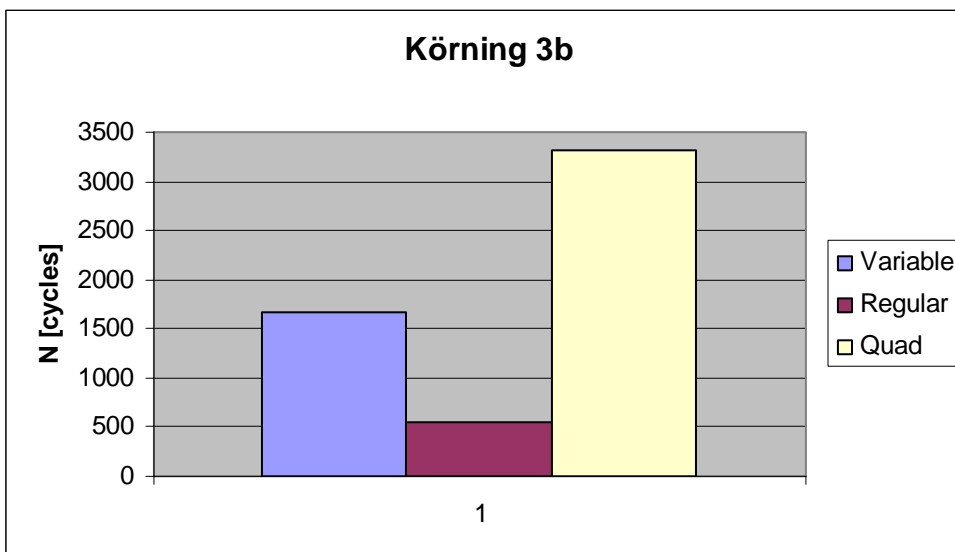
Körning 3b med viktad högre medelspänning kördes på Quad, Variable och Regular med resultatet sjunkande livslängd i samma ordning.

Max 225 Mpa & Min -18,1 Mpa





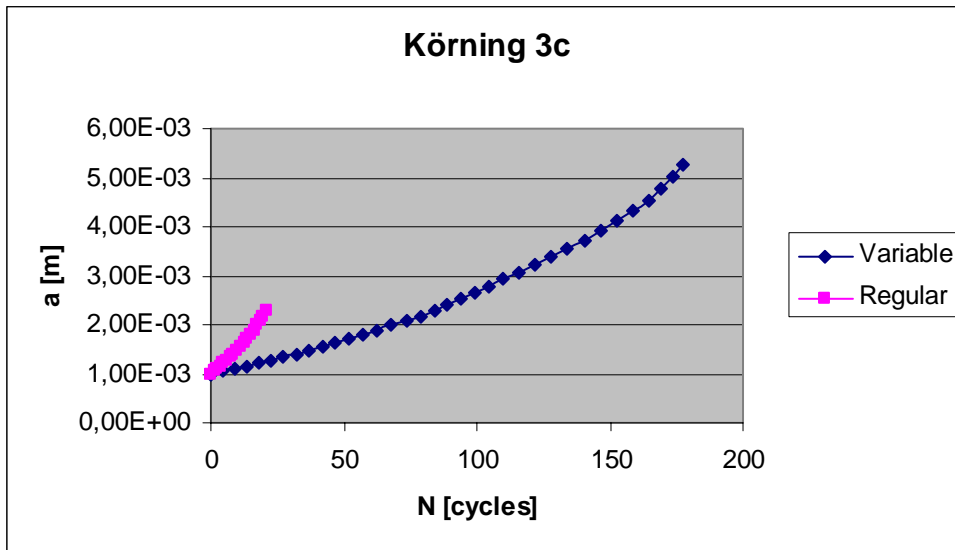
Spricktillväxt & livslängd



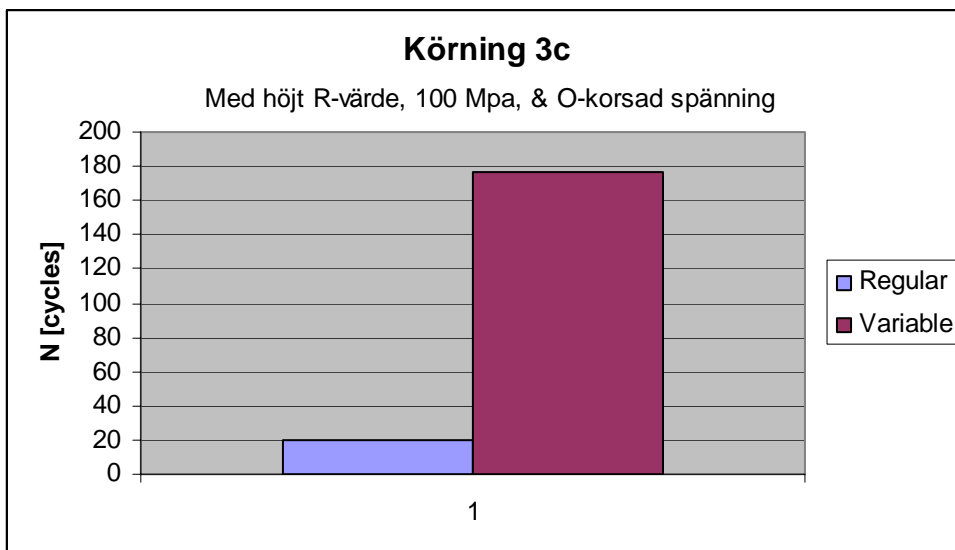
Livslängd

### 10.4.5 Körning 3c & 3f

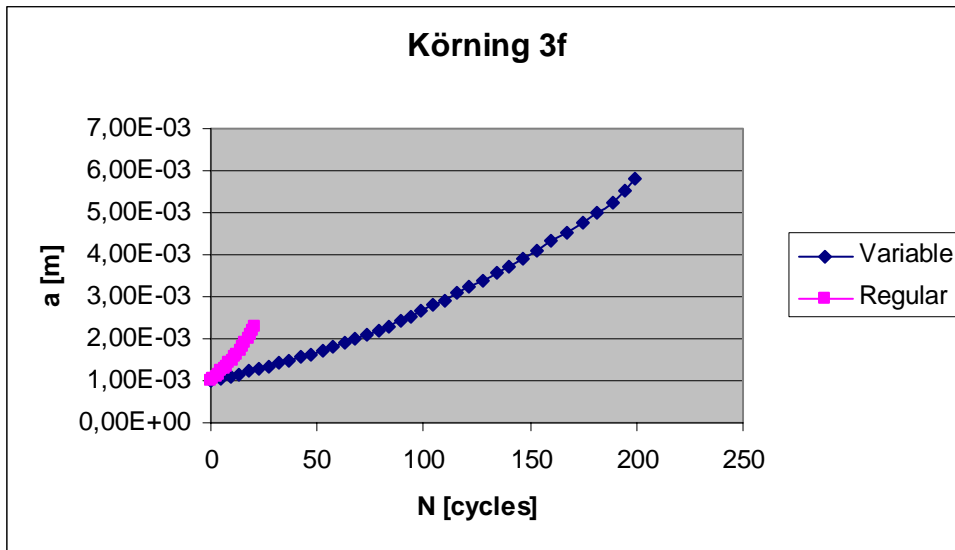
Körning 3c med höjt R-värde, 100 Mpa, och O-korsade spänningar gav ngt kortare livslängd än 3f med höjt R-värde, 100 Mpa, och korsade spänningar.



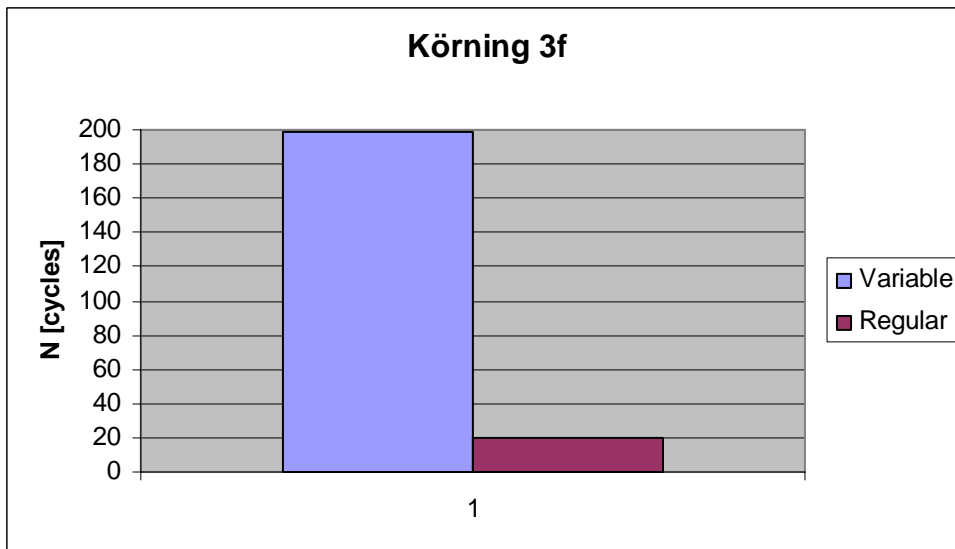
Spricktillväxt & livslängd



Livslängd



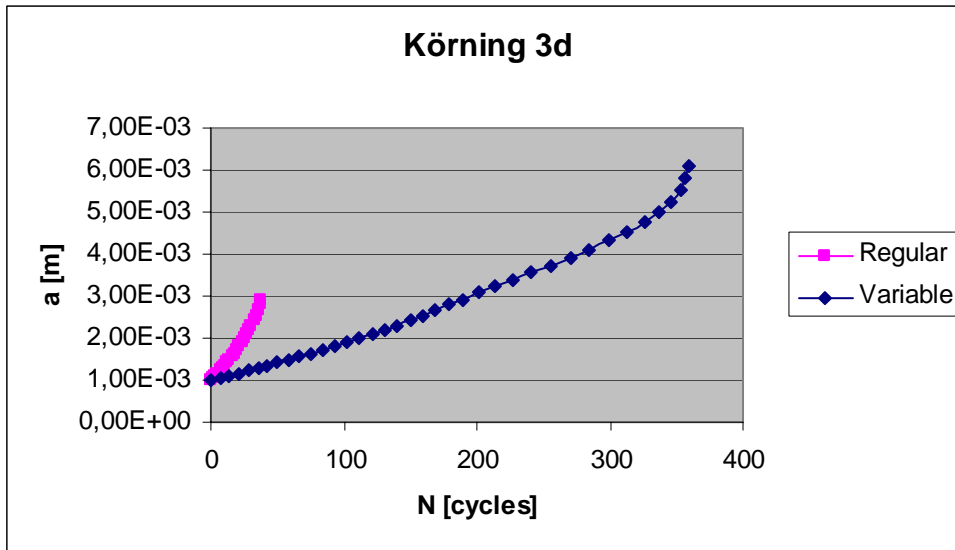
Spricktillväxt & livslängd



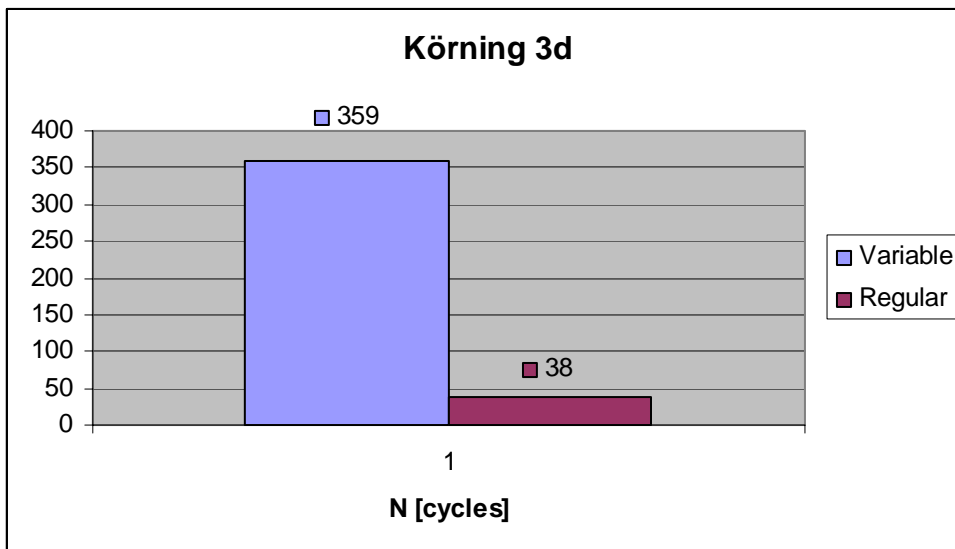
Livslängd

### 10.4.6 Körning 3d

Körning 3d med O-korsad spänning, använd på Variable och Regular.



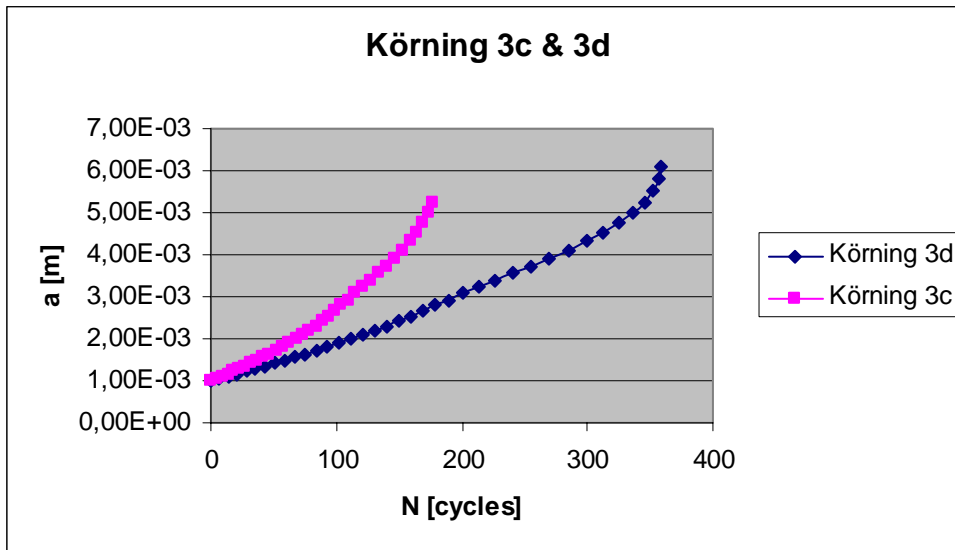
Spricktillväxt & livslängd



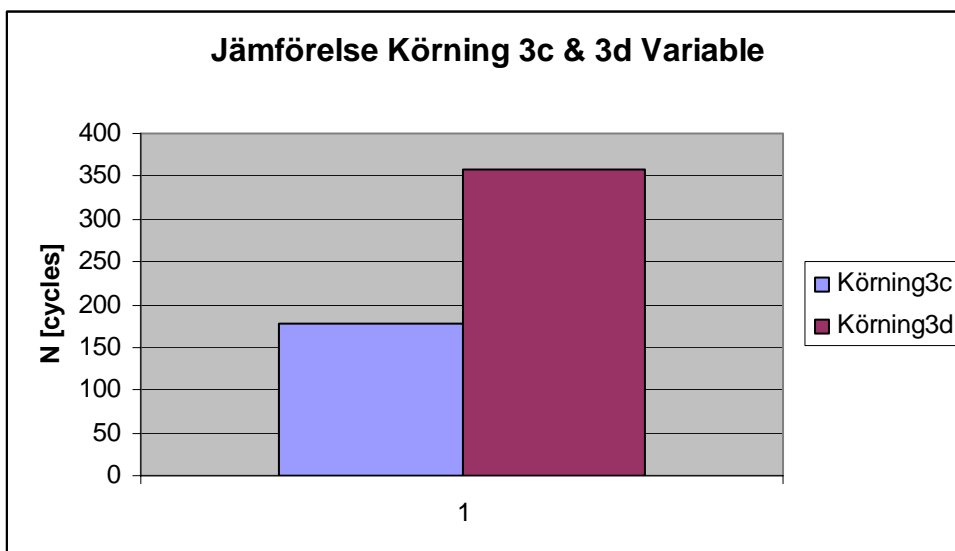
Livslängd

### 10.4.7 Körning 3c & 3d

Jämförelse mellan körning 3c & 3d på modell Variable med DADNDK. Körning 3d med O-korsad spänning i jämförelse med 3c som har korsad spänning och ökat R-värde.



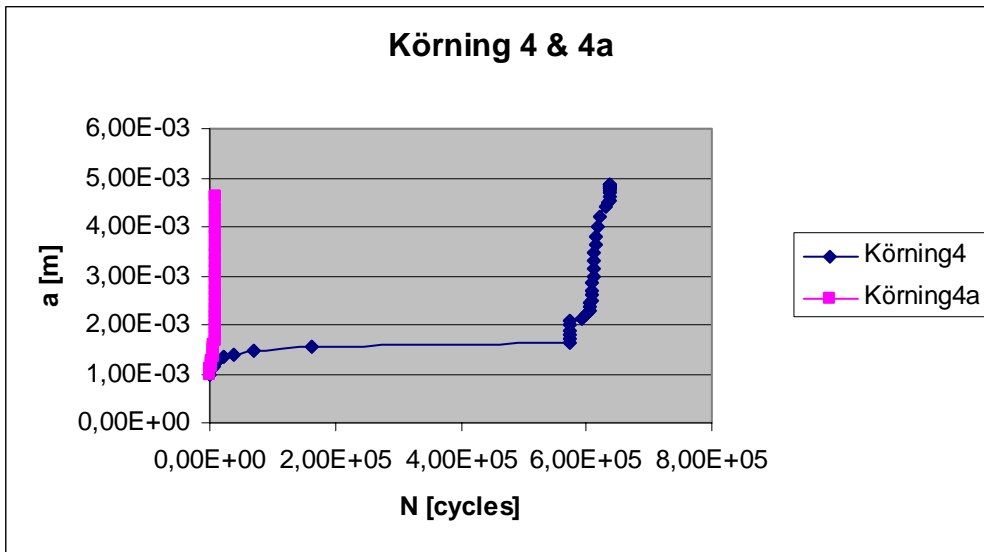
Spricktillväxt & livslängd på Variable



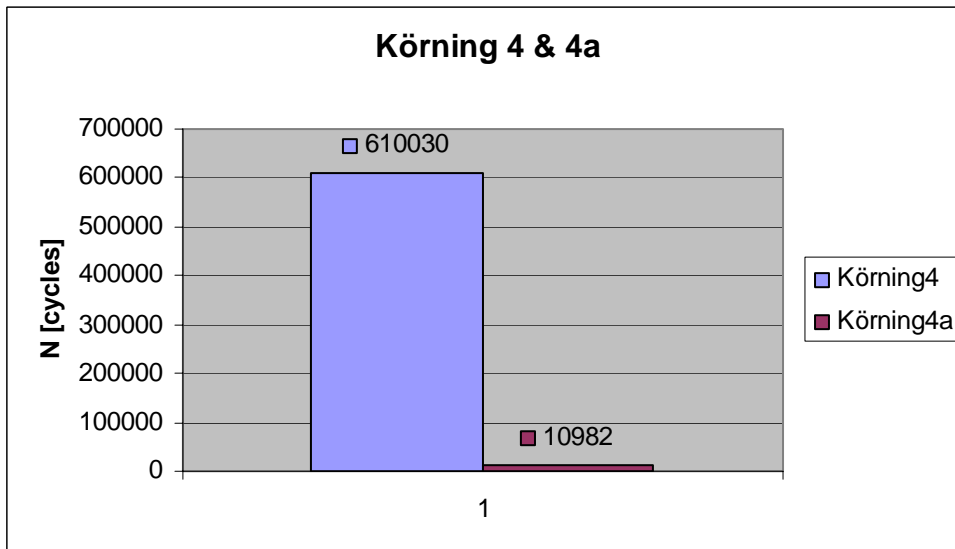
Livslängd

#### 10.4.8 Körning 4 & 4a

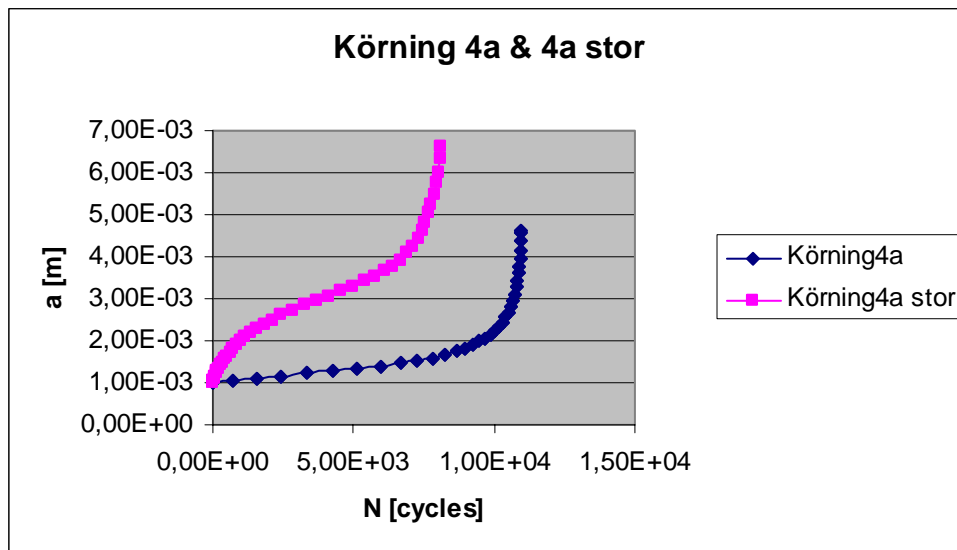
Körning 4 med korsad spänning gav mycket längre livslängd än körning 4a med O-korsad spänning. Körning 4a på Quad stor gav däremot kortare livslängd än på Quad.



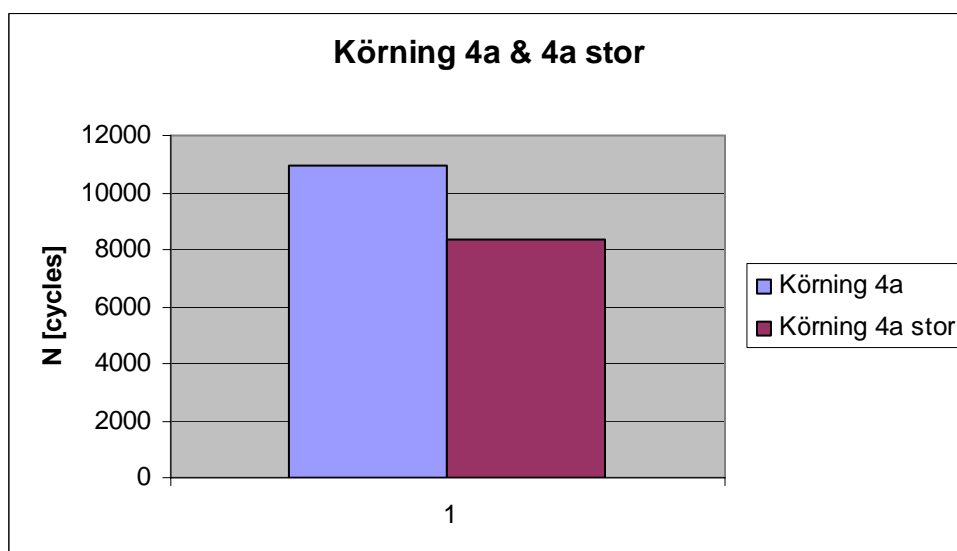
Spricktillväxt & livslängd



Livslängd



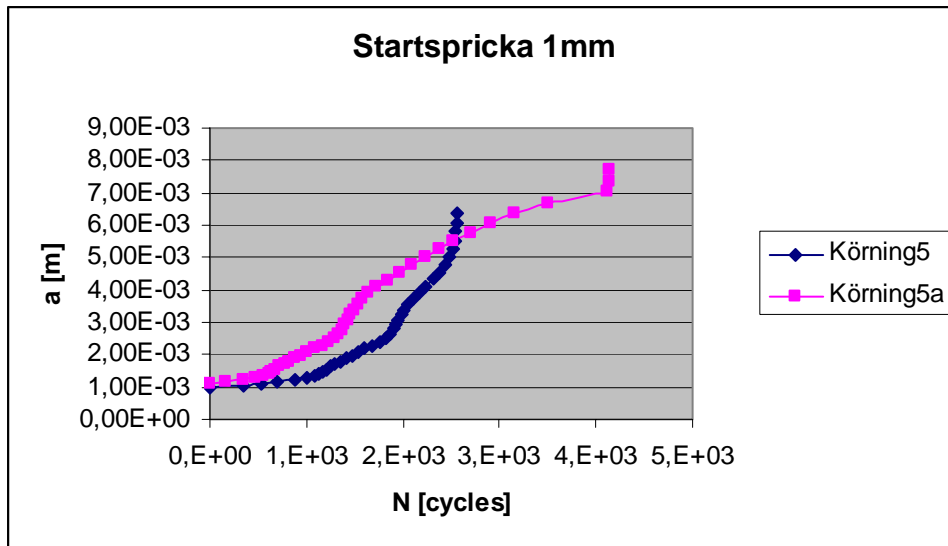
Spricktillväxt & livslängd



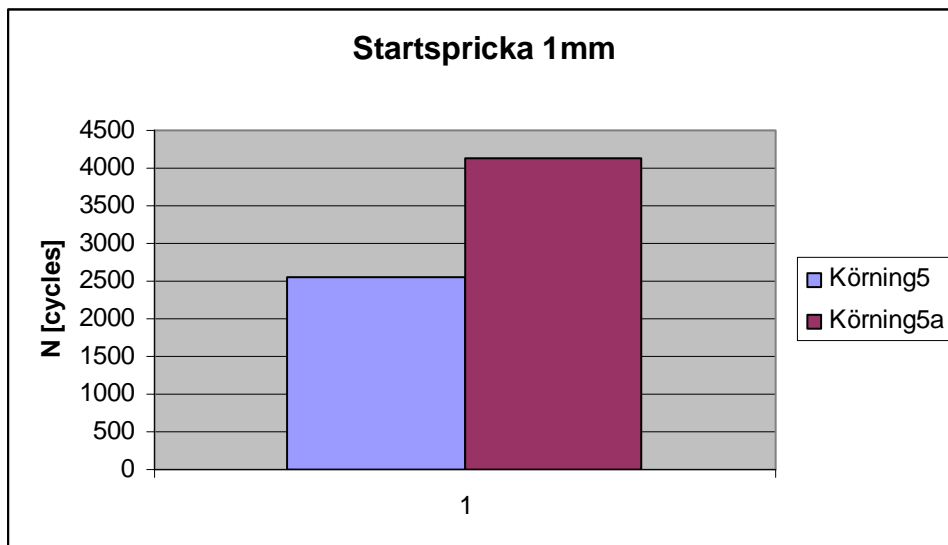
Livslängd

### 10.4.9 Körning 5 & 5a

Körning 5 med O-korsad spänning ger kortare livslängd än 5a med korsad spänning. 1mm startspricka ger, som väntat, längre livslängd än 2, 2mm startspricka.

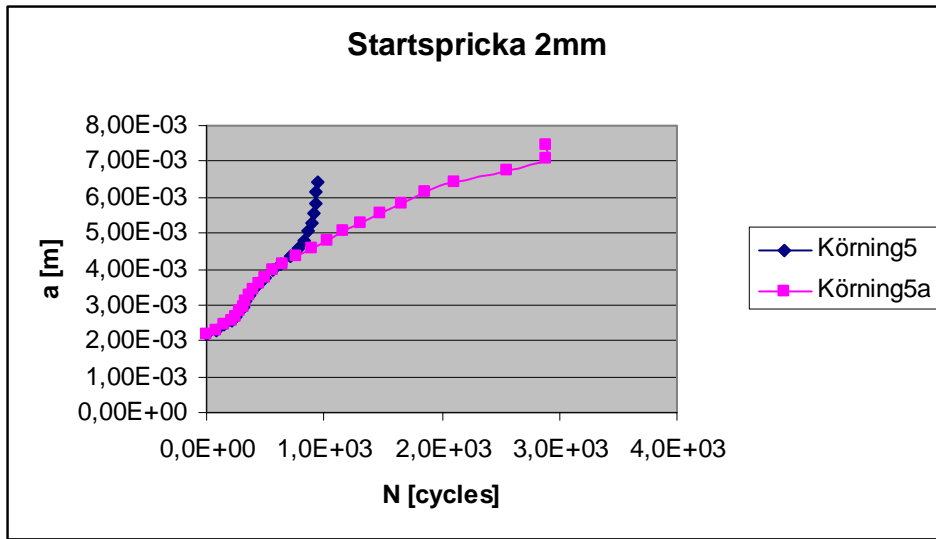


Spricktillväxt & livslängd

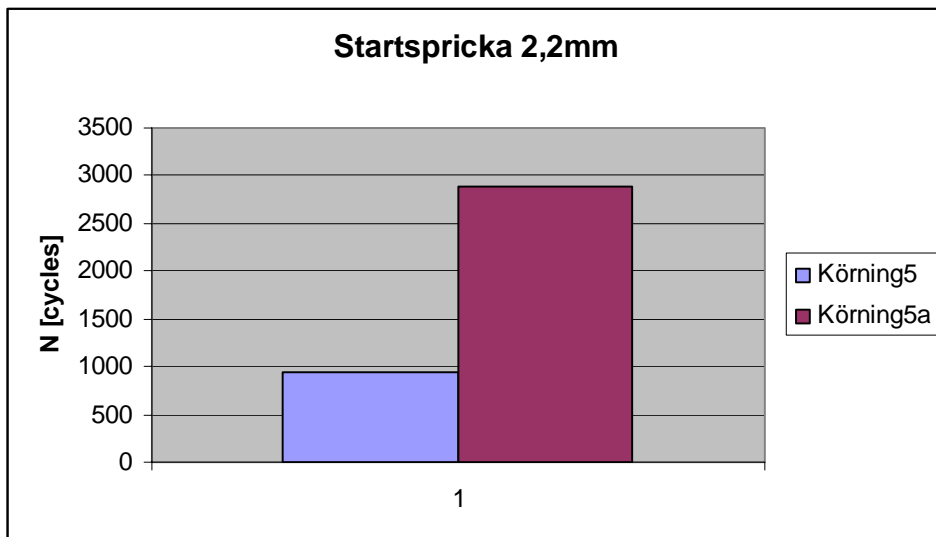


Livslängd





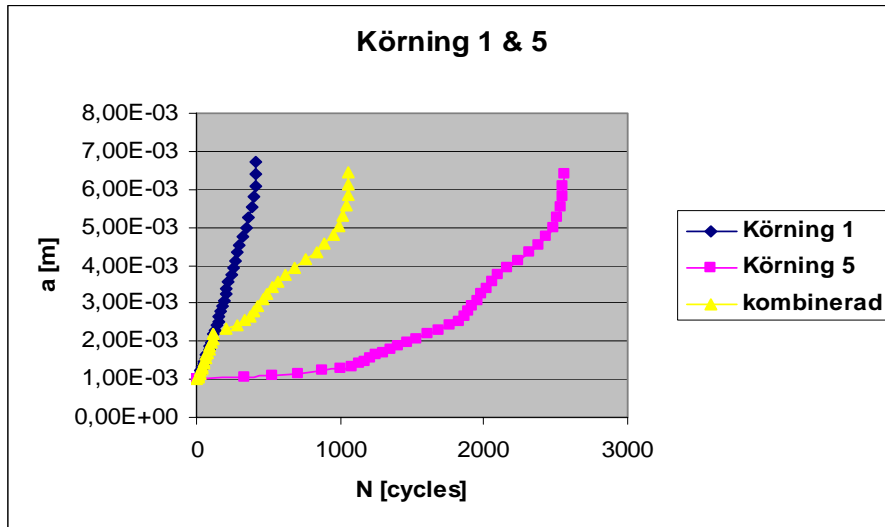
Spricktillväxt & livslängd



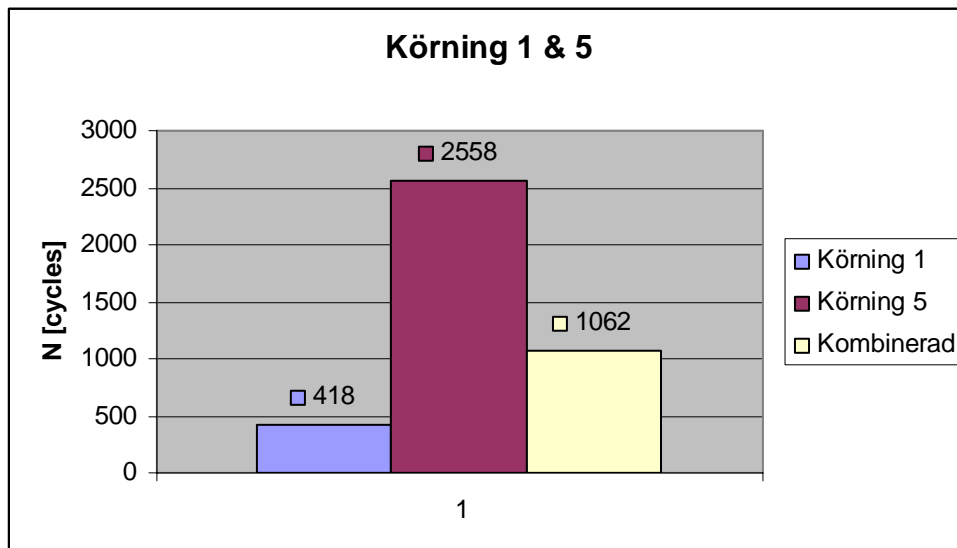
Livslängd

#### 10.4.10 Körning 1 & 5

Jämförelse mellan körning 1 & 5 på modell Variable med DADNDK. Livslängden blir ca 1500 cykler längre om påverkan av den lokala temperaturgradienten tas bort.



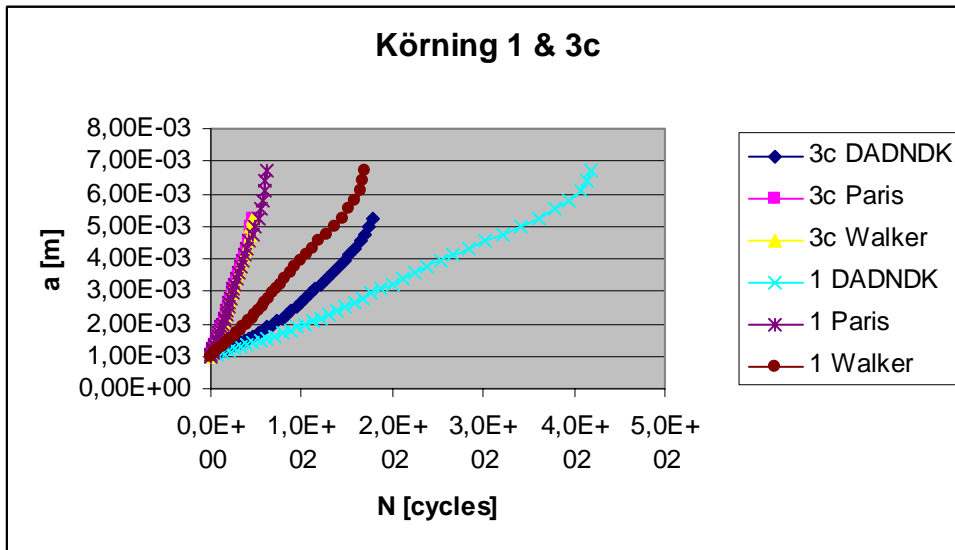
Spricktillväxt & livslängd



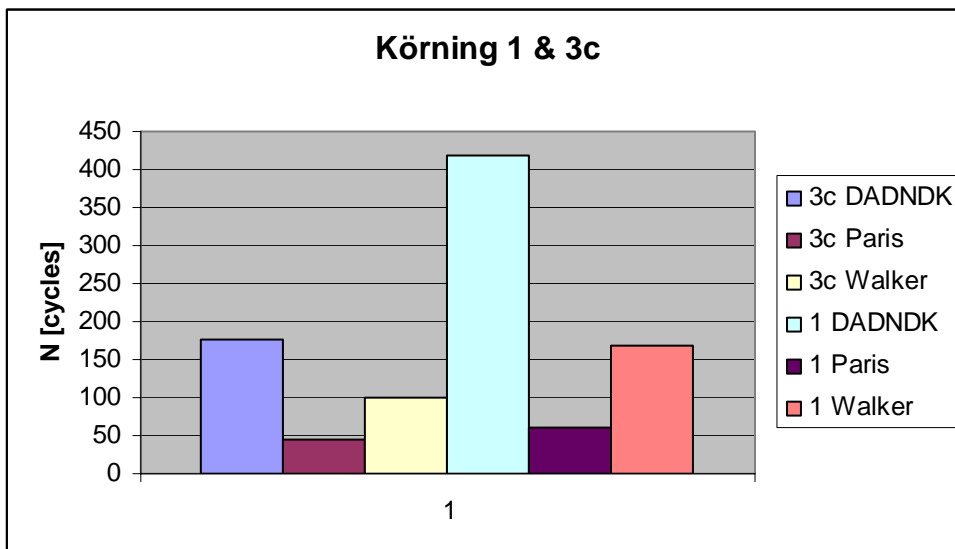
Livslängd

### 10.4.11 Körning 1 & 3c

Jämförelse mellan körning 1, korsad spänning, & 3c, O-korsad spänning med höjt R-värde, på modell Variable med DADNDK, Paris & Walker.



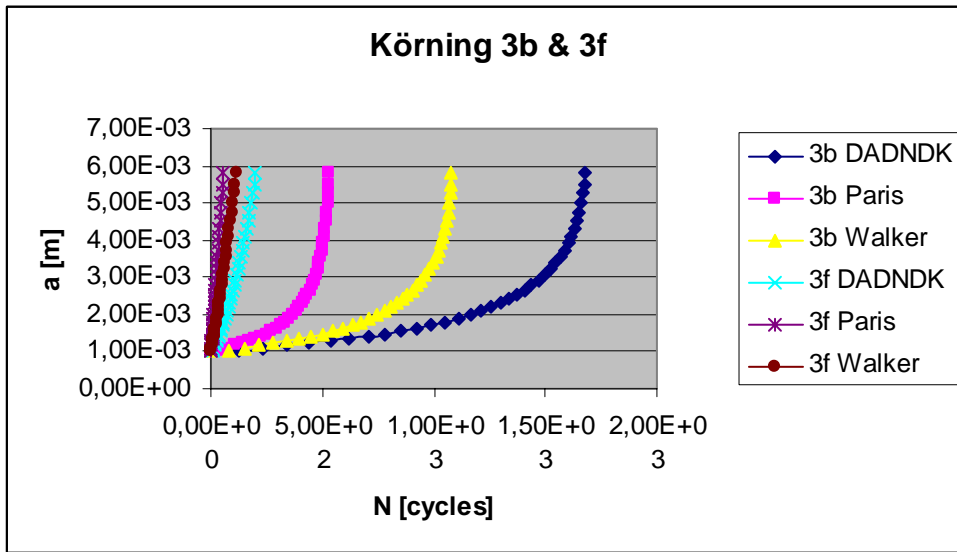
Spricktillväxt och livslängd.



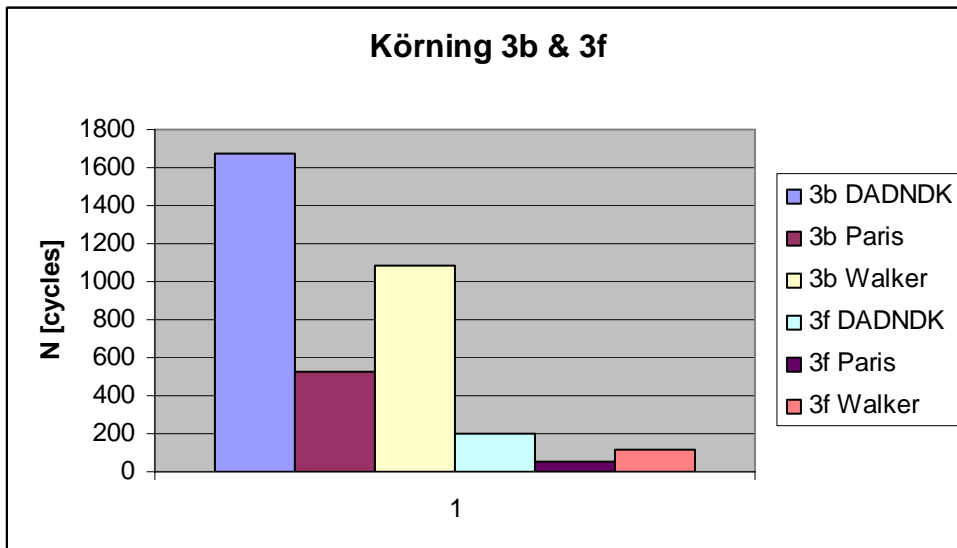
Livslängd

### 10.4.12 Körning 3b & 3f

Jämförelse mellan körning 3b & 3f på modell Variable med DADNDK, Paris & Walker.



Spricktillväxt & livslängd



Livslängd

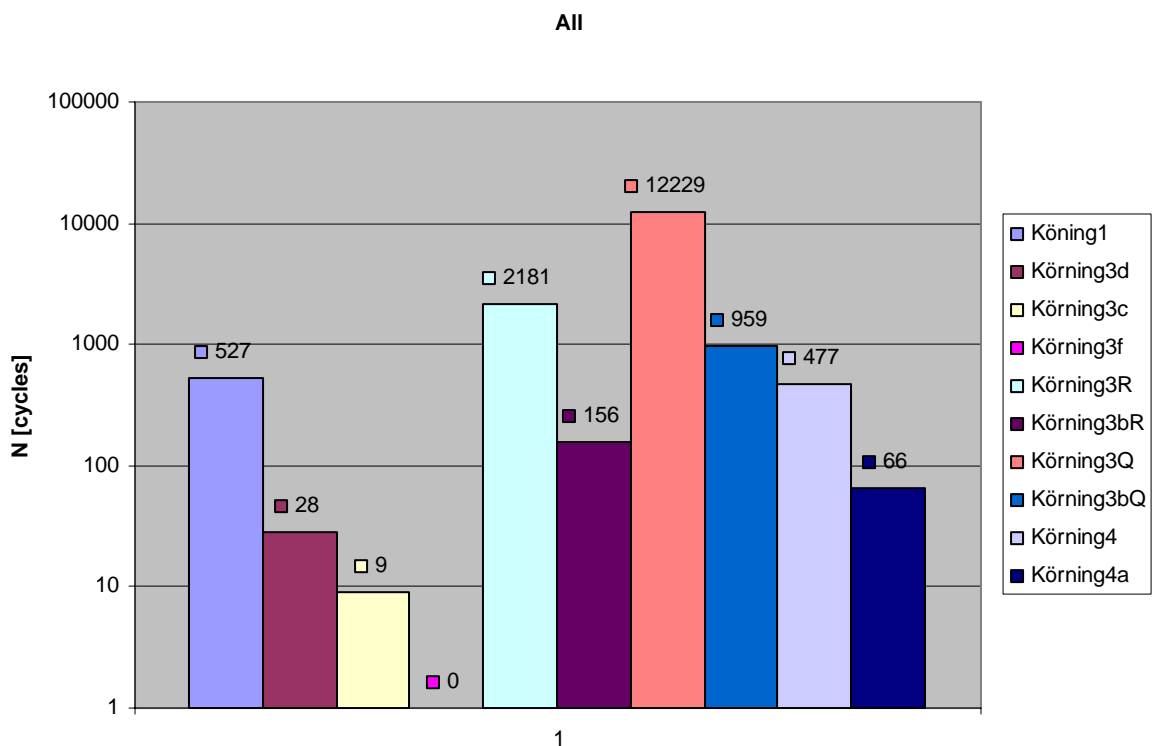
### 10.5 Körningar i NASGRO

På modell TC02 gjordes körning 3 och 3b. Körning 3 gav 14ggr längre livslängd än 3b.

På modell CC09 gjordes körning 4, korsad, och 4a, okorsad. Körning 4 gav ca 7ggr längre livslängd än körning 4a.

På modell TC12 gjordes körning 1, 3c och 3d. Körning 1 gav längst livslängd sedan 3d och sist 3c.

På modell CC01, dels som Regular och dels som Quad, gjordes körning 3 och 3b. Körning 3 gav ca 11 ggr längre livslängd än 3b.



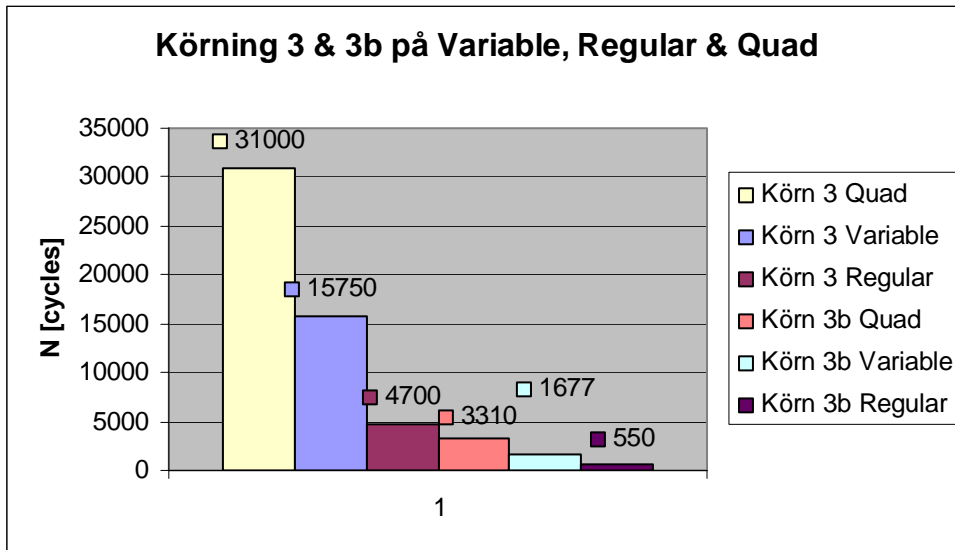
Livslängd på de olika körningarna.

## 10.6 Analys av resultat

### 10.6.1 NASCRAC

#### 10.6.1.1 Medelspänning

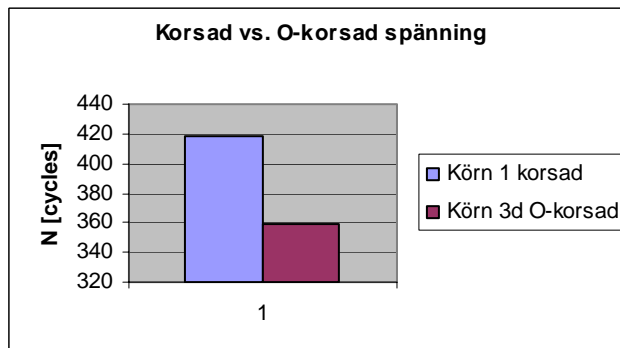
När medelspänning användes fick Quad den längsta, ca 85 % längre, livslängden och Regular den kortaste. Modell Variable hamnade nästan mitt emellan dessa två. Detta gällde för både den lägre och högre medelspänningen.



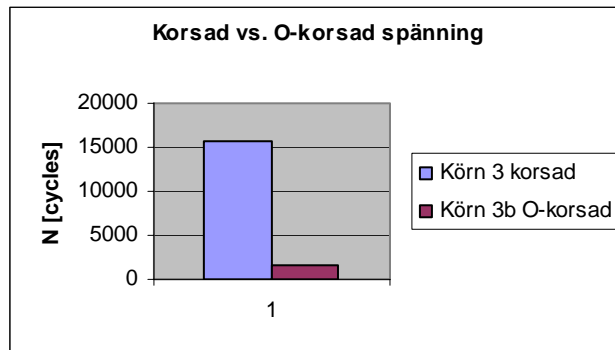
Körning 3 den lägre medelspänningen & Körning 3b den högre medelspänningen.

#### 10.6.1.2 Korsad/O-korsad spänning

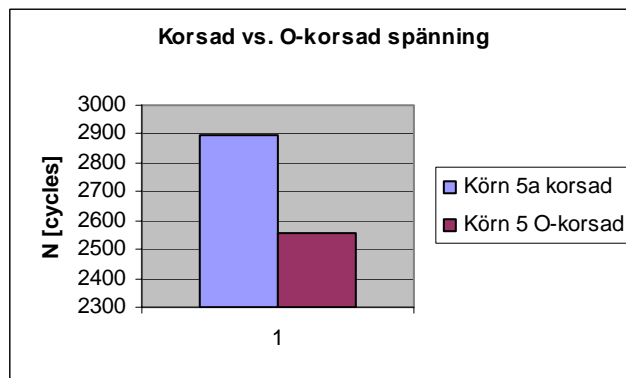
När det gällde korsad och O-korsad spänning så gav den korsade spänningen längst livslängd när den användes på modell Variable. På genomförda beräkningar skiljde det mellan 50-90 % i livslängd på korsad och O-korsad spänning.



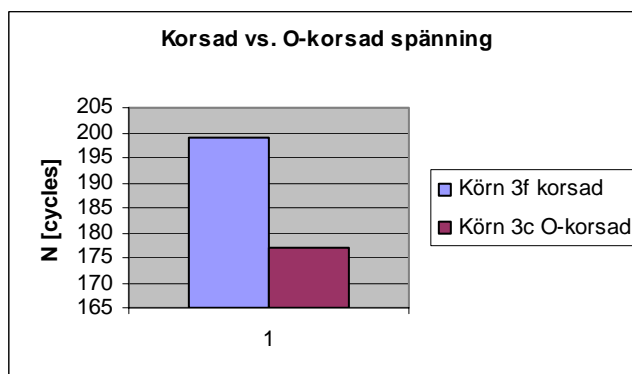
Beräkningar gjorda på modell Variable.



Beräkningar gjorda på modell Variable, medelspänning.

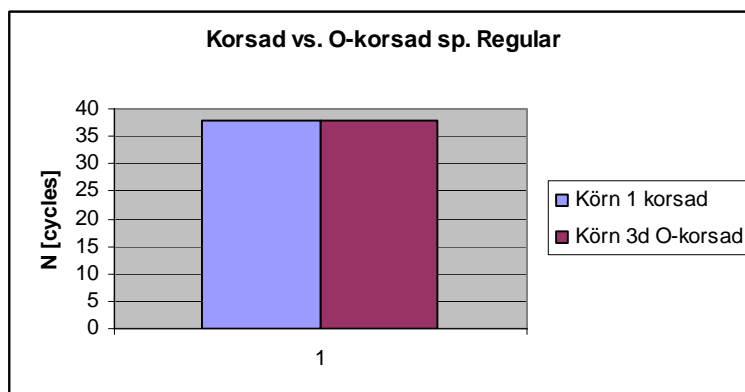


Beräkningar gjorda på modell Variable, spänningar utan lokal temperaturgradient.

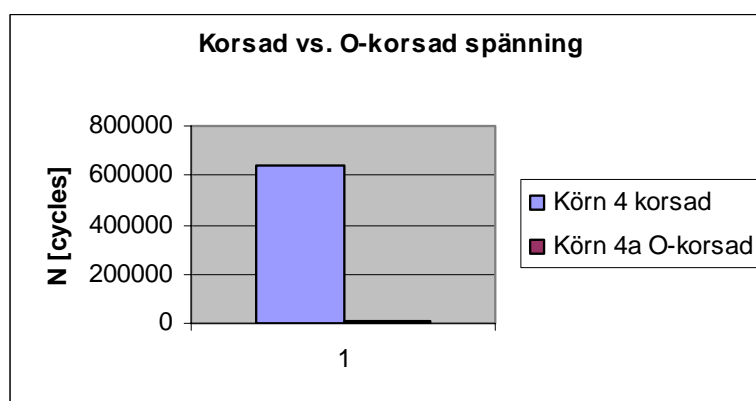


Beräkningar gjorda på modell Variable, spänning med höjt R-värde.

Med Regular skiljde det däremot inget alls mellan korsade och O-korsade spänningar.



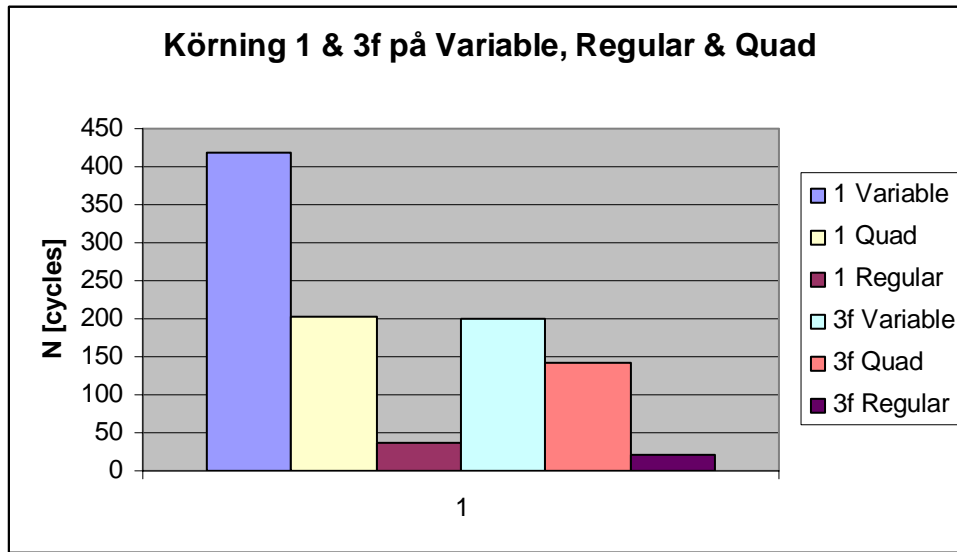
På Quadmodellen skiljde det mycket mellan korsad och O-korsad spänning.



### 10.6.1.3 Höjd spänning

När spänningen höjdes med 100Mpa sänktes livslängden ngt på Regular och Quad och mer på modell Variable. Jämförelsen är gjord på korsad spänning.





Livslängder för körning 1, korsad, & körning 3f, korsad, med höjt R-värde.

## 10.6.2 NASGRO

### 10.6.2.1 Geometrier

Eftersom modell Variables livslängd, enligt de olika körningarna i NASCRAC, varierar efter hur spänningen är pålagd så skulle det behövas en Variable modell i NASGRO för mer exakta beräkningar.

### 10.6.2.2 ASTM-villkoret

För att linjär brottmekanik, LEFM, skall kunna tillämpas måste ASTM-villkoret vara uppfyllt.

$$l \geq 2,5 \left[ \frac{K_{Ic}}{\sigma_s} \right]^2$$

$l = a, (W-a), t$  där

$W-a$  = ligamentets längd (m) Med startspricka 1mm varierar ligamentet från 7 till 3,84mm på de olika modellerna.

$t$  = plåttjocklek (m) Tjockleken varierar från 0 till 7,6mm.

$a$  = startspricka (m) Max startspricka som används är 2,2 mm.

$K_{Ic}$  = brottseghet (Mpa $\sqrt{m}$ )

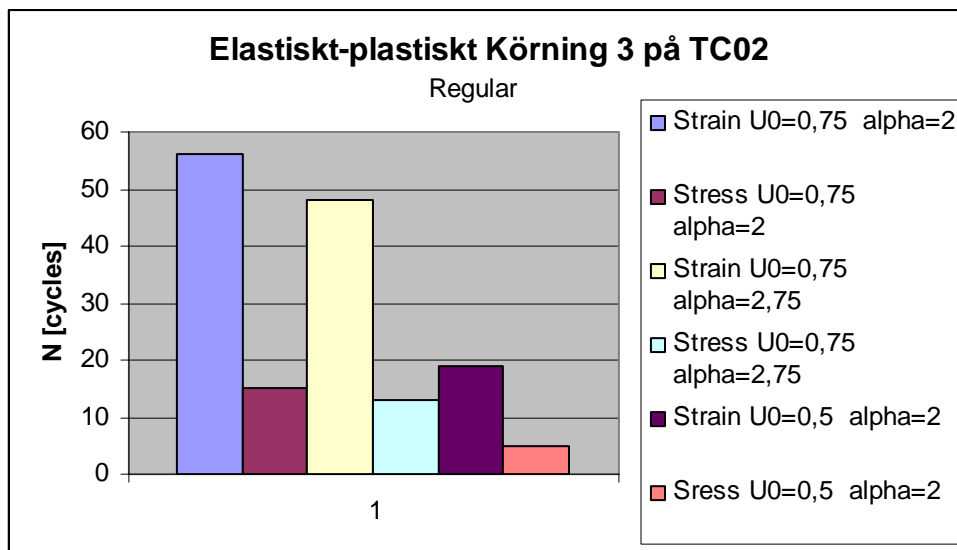
$\sigma_s$  = sträckgräns (Mpa)

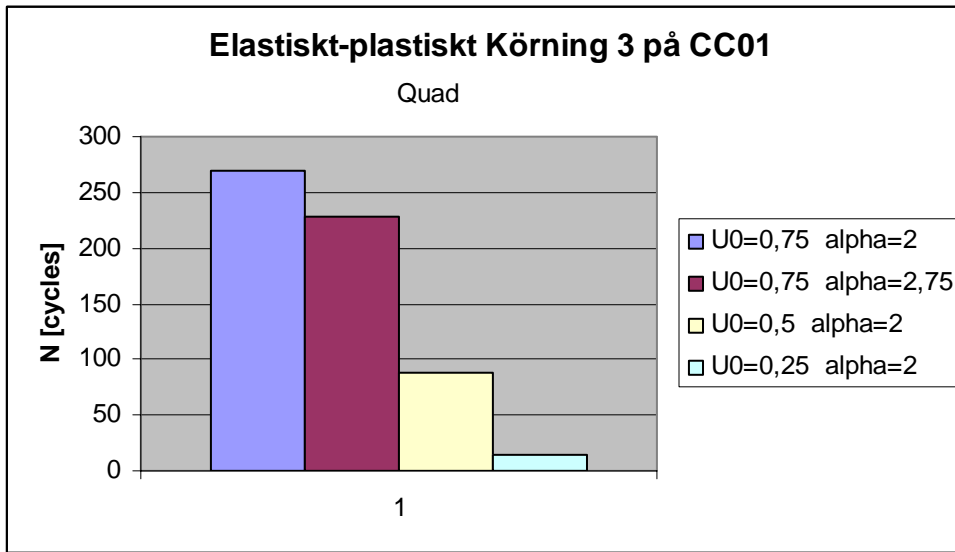
Enligt beräkning där  $K_{Ic}$  är 70 Mpa och  $\sigma_s$  är 760 Mpa blir  $l = 21,20$  mm vilket gör att villkoret ej är uppfyllt och icke linjär brottmekanik skall tillämpas. Några beräkningar

med elasticitetstyp elastiskt-plastiskt och några beräkningar med Strip Yield har genomförts.

### 10.6.2.3 Elastiskt-Plastiskt

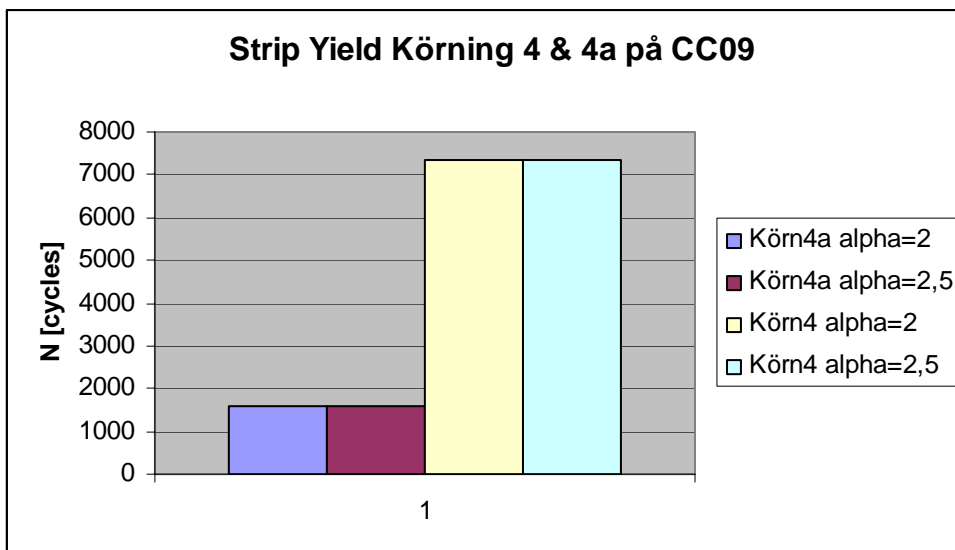
De elastisk-plastiska beräkningarna gick endast att genomföra på TC02, regular, och CC01, Quad, som båda kräver medelspänning eller linjärt varierande spänning.  $U_0$ , sprickslutning, och constraint  $\alpha$ , hur mycket spänning och töjning som verkar på modellen, var de parametrar som var intressanta att laborera med för att se hur de påverkade livslängden. Valdes Plane strain vid inmatning gav den längre livslängd än plane stress oavsett vad  $U_0$  och constraint  $\alpha$  sattes till. Vare sig plane strain eller plain stress valdes så gav ett höjt  $\alpha$  eller ett sänkt  $U_0$  kortare livslängd. I verkligheten är det svårt att veta hur mycket spänning och hur mycket töjning som påverkar bladet i statorn och därför är det svårt att säga vilka värden på  $U_0$  och  $\alpha$  som är mest riktiga. Vanligast är att  $U_0$  sätts till 0,75 och  $\alpha$  sätts mellan 1,15 och 2,5, ju större  $\alpha$  desto mer töjning. Enligt resultaten från beräkningarna tyder ett högre  $U_0$  på större sprickslutning då det går åt mer spänning för att öppna sprickan vilket gör att det tar längre tid innan den börjar växa.





#### 10.6.2.4 Strip Yield

För att kunna köra elastiskt-plastiskt på en modell med icke linjärt varierande spänning användes Strip Yield på CC09, Quad. Här fanns ingen sprickslutningsparameter så det var endast  $\alpha$  som gick att variera. Här gav inte varierande  $\alpha$  något utslag men livslängderna blev generellt mycket längre än i de elastiskt-plastiska beräkningarna. Körning 3 med strip yield på CC01 gav oändlig livslängd då  $\Delta K < \Delta K_{th}$  medan elastisk-plastisk beräkning gav mellan 88-270 cykler beroende på vilket  $U_0$  och  $\alpha$  som användes. Körning 3b med strip yield på CC01 gav 9631 cykler medan elastisk-plastisk beräkning gav 1 cykel oberoende av vilket  $U_0$  och  $\alpha$  som användes.



## 10.7 Sammanfattande tabell

### Jämförelse NASCRAC-NASGRO enligt LEFM

Körning	Modell	NASCRAC [cykler]	NASGRO [cykler]
1	Regular	30	527
1	Variable	418	
1	Quad	203	
3	Regular	4700	2181
3b	Regular	550	156
4	Quad	610030	477
4a	Quad	10982	66

### Linjärt - ickelinjärt i NASGRO

Modell	Linjärt [cykler]	Ickelinjärt [cykler]
Quad	12229	270
Regular	2181	56

## 10.8 Rekommendationer till fortsatt arbete

För att NASGRO skall vara ett pålitligt program i framtida beräkningar måste det fortsätta att utvecklas. Främst måste det finnas fler geometrier och sprickmodeller att välja på men det borde också gå att välja mellan kraftstyrda och töjningsstyrda spänningar för att hamna mest rätt med/i beräkningarna.

## 11 Slutsatser

Eftersom ASTM-villkoret ej är uppfyllt och de största spänningarna uppkommer pga. temperatur och att det skiljer mycket i livslängd på linjärt och icke linjärt beräknad utmattning måste det vara mest rätt att räkna icke linjärt.

Det går inte att skilja mellan kraftstyrda och töjningsstyrda spänningar vid beräkningar i NASCRAC och NASGRO vilket hade varit önskvärt då de påverkar spricktillväxt och utmattning på olika sätt. Eftersom det inte heller går att mata in en geometri som stämmer överens med verkligheten så är resultaten för livslängdsberäkning av statorbladen ej tillfredsställande. För att i framtiden kunna beräkna livslängd för delar som utsätts för tryck och temperatur, t.ex. turbiner inom rymd och flyg, är en utveckling av NASGRO:s utbud av geometrier och sprickmodeller ett måste. Detta borde inte vara

omöjligt då Volvo är med i konsortiet som äger NASGRO och kan därmed ställa kravet att så skall ske.

## Källförteckning

- 1 NASCRAC användarmanualen version 3.0 (1994)
- 2 NASGRO användarmanualen version 4.2 (2004)
- 3 Larisa Stepanova (1998) Cyclic crack growth at elevated temperatures in a nickel-based alloy [Dokument] Volvo Aero Corporation
- 4 Geng Sheng Wang (1999) Damage Tolerance and Life Analyses [Dokument] Volvo Aero Corporation
- 5 Brodin, Staffan (1997) Crack propagation under inelastic conditions [Dokument] Volvo Aero Corporation



## A Spänningar

Körning 1

<b>Min [Pa]</b>	<b>Max [Pa]</b>
1,717E+09	9,145E+08
1,530E+09	8,172E+08
1,287E+09	6,971E+08
1,099E+09	6,015E+08
9,199E+08	5,100E+08
7,453E+08	4,207E+08
5,964E+08	3,423E+08
4,185E+08	2,649E+08
3,776E+08	2,481E+08
3,329E+08	2,297E+08
2,395E+08	1,827E+08
1,420E+08	1,334E+08
8,947E+06	2,503E+07
1,761E+08	9,414E+07
2,606E+08	1,663E+08



Körning 3

**viktad spänning**

**Medelspänning**

**max:**

medelx	spänning vid medel x	
0,0005	1,29E+09	-7,76E+02
0,00175	3,77E+08	-7,08E+02
0,00325	7,71E+07	-2,31E+02
0,005	1,57E+08	1,17E+03
0,007	2,80E+08	3,08E+03

**min:**

medelx	spänning vid medel x	
0,0005	7,00E+08	4,20E+02
0,00175	2,47E+08	4,64E+02
0,00325	8,68E+07	2,61E+02
0,005	8,02E+07	-6,02E+02
0,007	1,83E+08	-2,01E+03

	X	Spänning max
medelspänning	0	1,06E+08
	0,008	1,06E+08

	X	Spänning min
medelspänning	0	-6,14E+07
	0,008	-6,14E+07

Körning 3b

**viktad spänning**

**min:**

medelx	spänning vid medel x	
0,0005	1,293E+09	775,929
0,00175	377389000	707,604
0,00325	-77117219	231,352
0,005	-80232180	601,741
0,007	183098625	2014,08

**max:**

medelx	spänning vid medel x	
0,0005	7E+08	419,9771
0,00175	2,47E+08	463,8412
0,00325	86839552	260,5187
0,005	1,57E+08	1174,492
0,007	2,8E+08	3083,673

	X	Spänning max
medelspänning	0	1,8E+08
	0,008	1,8E+08

	X	Spänning min
medelspänning	0	2,25E+08
	0,008	2,25E+08

Körning 3c

**okat R (+100MPa)**

<b>min</b>	<b>max</b>
1,617E+09	1,015E+09
1,430E+09	9,172E+08
1,187E+09	7,971E+08
9,985E+08	7,015E+08
8,199E+08	6,100E+08
6,453E+08	5,207E+08
4,964E+08	4,423E+08
3,185E+08	3,649E+08
2,776E+08	3,481E+08
2,329E+08	3,297E+08
1,395E+08	2,827E+08
4,197E+07	2,334E+08
1,089E+08	1,250E+08
5,857E+06	2,761E+08
6,626E+07	3,606E+08
6,626E+07	3,606E+08

Körning 3d

<b>Min [Pa]</b>	<b>Max [Pa]</b>
-1,717E+09	9,145E+08
-1,530E+09	8,172E+08
-1,287E+09	6,971E+08
-1,099E+09	6,015E+08
-9,199E+08	5,100E+08
-7,453E+08	4,207E+08
-5,964E+08	3,423E+08
-4,185E+08	2,649E+08
-3,776E+08	2,481E+08
-3,329E+08	2,297E+08
-2,395E+08	1,827E+08
-1,420E+08	1,334E+08
8,947E+06	2,503E+07
-9,414E+07	1,761E+08
-1,663E+08	2,606E+08
-1,663E+08	2,606E+08

Körning 3f

**Körning 3f (+100 Mpa)**

<b>min</b>	<b>max</b>
1,617E+09	1,015E+09
1,430E+09	9,172E+08
1,187E+09	7,971E+08
9,985E+08	7,015E+08
8,199E+08	6,100E+08
6,453E+08	5,207E+08
4,964E+08	4,423E+08
3,185E+08	3,649E+08
2,776E+08	3,481E+08
2,329E+08	3,297E+08
1,395E+08	2,827E+08
4,197E+07	2,334E+08
1,089E+08	1,250E+08
2,761E+08	5,857E+06
3,606E+08	6,626E+07
3,606E+08	6,626E+07

Körning 4, beräkning av spänning som skall användas.

<b>Spänning (min)</b>			<b>Spänning (max)</b>		
<b>X</b>	<b>Y</b>		<b>X</b>	<b>Y</b>	
0	0	-1,7E+09	0	0	9,15E+08
3,55E-05	8,21E-05	-1,5E+09	3,55E-05	8,21E-05	8,17E+08
0,000221	0,00051	-1,3E+09	0,000221	0,00051	6,97E+08
0,000295	0,000682	-1,1E+09	0,000295	0,000682	6,01E+08
0,000376	0,000868	-9,2E+08	0,000376	0,000868	5,1E+08
0,000451	0,001042	-7,5E+08	0,000451	0,001042	4,21E+08
0,000553	0,001278	-6E+08	0,000553	0,001278	3,42E+08

NASCRAC vs. NASGRO

0,000677	0,001565	-4,2E+08	0,000677	0,001565	2,65E+08
0,000754	0,001742	-3,8E+08	0,000754	0,001742	2,48E+08
0,000852	0,001969	-3,3E+08	0,000852	0,001969	2,3E+08
0,001037	0,002395	-2,4E+08	0,001037	0,002395	1,83E+08
0,001247	0,002881	-1,4E+08	0,001247	0,002881	1,33E+08
0,001619	0,00374	8947058	0,001619	0,00374	25027640
0,002236	0,005167	1,76E+08	0,002236	0,005167	-9,4E+07
0,002879	0,006653	2,61E+08	0,002879	0,006653	-1,7E+08
0,003462	0,008	2,61E+08	0,003462	0,008	-1,7E+08

Förenklad Min		Max	
X	[Pa]	X	[Pa]
0,00E+00	1,72E+09	0,00E+00	9,15E+08
2,50E-04	1,21E+09	2,50E-04	6,59E+08
5,00E-04	6,74E+08	5,00E-04	3,83E+08
1,00E-03	2,58E+08	1,00E-03	1,92E+08
1,50E-03	3,92E+07	1,50E-03	5,96E+07
2,00E-03	1,12E+08	2,00E-03	4,86E+07
2,50E-03	2,11E+08	2,50E-03	1,24E+08
3,00E-03	2,61E+08	3,00E-03	1,66E+08
3,46E-03	2,61E+08	3,46E-03	1,66E+08

Ny medelspänning i färre X-koordinater för att passa Quadmodellen

Använd spänning i körning 4

Min			Max		
X	spänning (y=0)		X	spänning (y=0)	
0	0	-1,7E+09	0	0	9,15E+08
0,000354	0	-1,2E+09	0,000354	0	6,59E+08
0,000707	0	-6,7E+08	0,000707	0	3,83E+08
0,001414	0	-2,6E+08	0,001414	0	1,92E+08
0,002121	0	-3,9E+07	0,002121	0	59609110
0,002828	0	1,12E+08	0,002828	0	-4,9E+07
0,003536	0	2,11E+08	0,003536	0	-1,2E+08

NASCRAC vs. NASGRO

0,004243	0	2,61E+08	0,004243	0	-1,7E+08
0,004896	0	2,61E+08	0,004896	0	-1,7E+08

x	spänning (y=0,25E-4)		x	spänning (y=0,25E-4)	
0	0,00025	-1,2E+09	0	0,00025	6,59E+08
0,000354	0,00025	-6,7E+08	0,000354	0,00025	3,83E+08
0,000707	0,00025	-2,6E+08	0,000707	0,00025	1,92E+08
0,001414	0,00025	-3,9E+07	0,001414	0,00025	59609110
0,002121	0,00025	1,12E+08	0,002121	0,00025	-4,9E+07
0,002828	0,00025	2,11E+08	0,002828	0,00025	-1,2E+08
0,003536	0,00025	2,61E+08	0,003536	0,00025	-1,7E+08
0,004243	0,00025	2,61E+08	0,004243	0,00025	-1,7E+08
0,004896	0,00025	1,18E+08	0,004896	0,00025	-7,2E+07

x	spänning (y=5E-4)		x	spänning (y=5E-4)	
0	0,0005	-6,7E+08	0	0,0005	3,83E+08
0,000354	0,0005	-2,6E+08	0,000354	0,0005	1,92E+08
0,000707	0,0005	-3,9E+07	0,000707	0,0005	59609110
0,001414	0,0005	1,12E+08	0,001414	0,0005	-4,9E+07
0,002121	0,0005	2,11E+08	0,002121	0,0005	-1,2E+08
0,002828	0,0005	2,61E+08	0,002828	0,0005	-1,7E+08
0,003536	0,0005	2,61E+08	0,003536	0,0005	-1,7E+08
0,004243	0,0005	1,18E+08	0,004243	0,0005	-7,2E+07
0,004896	0,0005	1,18E+08	0,004896	0,0005	-7,2E+07

x	spänning (y=1E-3)		x	spänning (y=1E-3)	
0	0,001	-2,6E+08	0	0,001	1,92E+08
0,000354	0,001	-3,9E+07	0,000354	0,001	59609110
0,000707	0,001	1,12E+08	0,000707	0,001	-4,9E+07
0,001414	0,001	2,11E+08	0,001414	0,001	-1,2E+08
0,002121	0,001	2,61E+08	0,002121	0,001	-1,7E+08
0,002828	0,001	2,61E+08	0,002828	0,001	-1,7E+08
0,003536	0,001	1,18E+08	0,003536	0,001	-7,2E+07
0,004243	0,001	1,18E+08	0,004243	0,001	-7,2E+07
0,004896	0,001	1,18E+08	0,004896	0,001	-7,2E+07

x	spänning (y=1,5E-3)		x	spänning (y=1,5E-3)	
0	0,0015	-3,9E+07	0	0,0015	1,92E+08
0,000354	0,0015	1,12E+08	0,000354	0,0015	59609110
0,000707	0,0015	2,11E+08	0,000707	0,0015	-4,9E+07
0,001414	0,0015	2,61E+08	0,001414	0,0015	-1,2E+08
0,002121	0,0015	2,61E+08	0,002121	0,0015	-1,7E+08
0,002828	0,0015	1,18E+08	0,002828	0,0015	-1,7E+08
0,003536	0,0015	1,18E+08	0,003536	0,0015	-7,2E+07
0,004243	0,0015	1,18E+08	0,004243	0,0015	-7,2E+07
0,004896	0,0015	1,18E+08	0,004896	0,0015	-7,2E+07

NASCRACT vs. NASGRO

x	spänning (y=2E-3)		x	spänning (y=2E-3)	
0	0,002	1,12E+08	0	0,002	59609110
0,000354	0,002	2,11E+08	0,000354	0,002	-4,9E+07
0,000707	0,002	2,61E+08	0,000707	0,002	-1,2E+08
0,001414	0,002	2,61E+08	0,001414	0,002	-1,7E+08
0,002121	0,002	1,18E+08	0,002121	0,002	-1,7E+08
0,002828	0,002	1,18E+08	0,002828	0,002	-7,2E+07
0,003536	0,002	1,18E+08	0,003536	0,002	-7,2E+07
0,004243	0,002	1,18E+08	0,004243	0,002	-7,2E+07
0,004896	0,002	1,18E+08	0,004896	0,002	-7,2E+07

x	spänning (y=2,5E-3)		x	spänning (y=2,5E-3)	
0	0,0025	2,11E+08	0	0,0025	-4,9E+07
0,000354	0,0025	2,61E+08	0,000354	0,0025	-1,2E+08
0,000707	0,0025	2,61E+08	0,000707	0,0025	-1,7E+08
0,001414	0,0025	1,18E+08	0,001414	0,0025	-1,7E+08
0,002121	0,0025	1,18E+08	0,002121	0,0025	-7,2E+07
0,002828	0,0025	1,18E+08	0,002828	0,0025	-7,2E+07
0,003536	0,0025	1,18E+08	0,003536	0,0025	-7,2E+07
0,004243	0,0025	1,18E+08	0,004243	0,0025	-7,2E+07
0,004896	0,0025	1,18E+08	0,004896	0,0025	-7,2E+07

x	spänning (y=3E-3)		x	spänning (y=3E-3)	
0	0,003	2,61E+08	0	0,003	-1,2E+08
0,000354	0,003	2,61E+08	0,000354	0,003	-1,7E+08
0,000707	0,003	1,18E+08	0,000707	0,003	-1,7E+08
0,001414	0,003	1,18E+08	0,001414	0,003	-7,2E+07
0,002121	0,003	1,18E+08	0,002121	0,003	-7,2E+07
0,002828	0,003	1,18E+08	0,002828	0,003	-7,2E+07
0,003536	0,003	1,18E+08	0,003536	0,003	-7,2E+07
0,004243	0,003	1,18E+08	0,004243	0,003	-7,2E+07
0,004896	0,003	1,18E+08	0,004896	0,003	-7,2E+07

x	spänning (y=3,46E-3)		x	spänning (y=3,46E-3)	
0	0,00346	2,61E+08	0	0,00346	-1,7E+08
0,000354	0,00346	1,18E+08	0,000354	0,00346	-1,7E+08
0,000707	0,00346	1,18E+08	0,000707	0,00346	-7,2E+07
0,001414	0,00346	1,18E+08	0,001414	0,00346	-7,2E+07
0,002121	0,00346	1,18E+08	0,002121	0,00346	-7,2E+07
0,002828	0,00346	1,18E+08	0,002828	0,00346	-7,2E+07
0,003536	0,00346	1,18E+08	0,003536	0,00346	-7,2E+07
0,004243	0,00346	1,18E+08	0,004243	0,00346	-7,2E+07
0,004896	0,00346	1,18E+08	0,004896	0,00346	-7,2E+07

Körning 4a

"Okorsad" spänning

X	Y	Max	X	Y	Min
0	0	9,15E+08	0	0	-1,7E+09
0,000354	0	6,59E+08	0,000354	0	-1,2E+09
0,000707	0	3,83E+08	0,000707	0	-6,7E+08
0,001414	0	1,92E+08	0,001414	0	-2,6E+08
0,002121	0	59609110	0,002121	0	-3,9E+07
0,002828	0	1,12E+08	0,002828	0	-4,9E+07
0,003536	0	2,11E+08	0,003536	0	-1,2E+08
0,004243	0	2,61E+08	0,004243	0	-1,7E+08
0,004896	0	2,61E+08	0,004896	0	-1,7E+08
0	0,00025	6,59E+08	0	0,00025	-1,2E+09
0,000354	0,00025	3,83E+08	0,000354	0,00025	-6,7E+08
0,000707	0,00025	1,92E+08	0,000707	0,00025	-2,6E+08
0,001414	0,00025	59609110	0,001414	0,00025	-3,9E+07
0,002121	0,00025	1,12E+08	0,002121	0,00025	-4,9E+07
0,002828	0,00025	2,11E+08	0,002828	0,00025	-1,2E+08
0,003536	0,00025	2,61E+08	0,003536	0,00025	-1,7E+08
0,004243	0,00025	2,61E+08	0,004243	0,00025	-1,7E+08
0,004896	0,00025	1,18E+08	0,004896	0,00025	-7,2E+07
0	0,0005	3,83E+08	0	0,0005	-6,7E+08
0,000354	0,0005	1,92E+08	0,000354	0,0005	-2,6E+08
0,000707	0,0005	59609110	0,000707	0,0005	-3,9E+07
0,001414	0,0005	1,12E+08	0,001414	0,0005	-4,9E+07
0,002121	0,0005	2,11E+08	0,002121	0,0005	-1,2E+08
0,002828	0,0005	2,61E+08	0,002828	0,0005	-1,7E+08
0,003536	0,0005	2,61E+08	0,003536	0,0005	-1,7E+08
0,004243	0,0005	1,18E+08	0,004243	0,0005	-7,2E+07
0,004896	0,0005	1,18E+08	0,004896	0,0005	-7,2E+07
0	0,001	1,92E+08	0	0,001	-2,6E+08
0,000354	0,001	59609110	0,000354	0,001	-3,9E+07
0,000707	0,001	1,12E+08	0,000707	0,001	-4,9E+07
0,001414	0,001	2,11E+08	0,001414	0,001	-1,2E+08
0,002121	0,001	2,61E+08	0,002121	0,001	-1,7E+08
0,002828	0,001	2,61E+08	0,002828	0,001	-1,7E+08
0,003536	0,001	1,18E+08	0,003536	0,001	-7,2E+07
0,004243	0,001	1,18E+08	0,004243	0,001	-7,2E+07
0,004896	0,001	1,18E+08	0,004896	0,001	-7,2E+07
0	0,0015	1,92E+08	0	0,0015	-3,9E+07
0,000354	0,0015	1,12E+08	0,000354	0,0015	59609110
0,000707	0,0015	2,11E+08	0,000707	0,0015	-4,9E+07
0,001414	0,0015	2,61E+08	0,001414	0,0015	-1,2E+08
0,002121	0,0015	2,61E+08	0,002121	0,0015	-1,7E+08
0,002828	0,0015	1,18E+08	0,002828	0,0015	-1,7E+08
0,003536	0,0015	1,18E+08	0,003536	0,0015	-7,2E+07



NASCRAC vs. NASGRO

0,004243	0,0015	1,18E+08	0,004243	0,0015	-7,2E+07
0,004896	0,0015	1,18E+08	0,004896	0,0015	-7,2E+07
0	0,002	59609110	0	0,002	1,12E+08
0,000354	0,002	2,11E+08	0,000354	0,002	-4,9E+07
0,000707	0,002	2,61E+08	0,000707	0,002	-1,2E+08
0,001414	0,002	2,61E+08	0,001414	0,002	-1,7E+08
0,002121	0,002	1,18E+08	0,002121	0,002	-1,7E+08
0,002828	0,002	1,18E+08	0,002828	0,002	-7,2E+07
0,003536	0,002	1,18E+08	0,003536	0,002	-7,2E+07
0,004243	0,002	1,18E+08	0,004243	0,002	-7,2E+07
0,004896	0,002	1,18E+08	0,004896	0,002	-7,2E+07
0	0,0025	2,11E+08	0	0,0025	-4,9E+07
0,000354	0,0025	2,61E+08	0,000354	0,0025	-1,2E+08
0,000707	0,0025	2,61E+08	0,000707	0,0025	-1,7E+08
0,001414	0,0025	1,18E+08	0,001414	0,0025	-1,7E+08
0,002121	0,0025	1,18E+08	0,002121	0,0025	-7,2E+07
0,002828	0,0025	1,18E+08	0,002828	0,0025	-7,2E+07
0,003536	0,0025	1,18E+08	0,003536	0,0025	-7,2E+07
0,004243	0,0025	1,18E+08	0,004243	0,0025	-7,2E+07
0,004896	0,0025	1,18E+08	0,004896	0,0025	-7,2E+07
0	0,003	2,61E+08	0	0,003	-1,2E+08
0,000354	0,003	2,61E+08	0,000354	0,003	-1,7E+08
0,000707	0,003	1,18E+08	0,000707	0,003	-1,7E+08
0,001414	0,003	1,18E+08	0,001414	0,003	-7,2E+07
0,002121	0,003	1,18E+08	0,002121	0,003	-7,2E+07
0,002828	0,003	1,18E+08	0,002828	0,003	-7,2E+07
0,003536	0,003	1,18E+08	0,003536	0,003	-7,2E+07
0,004243	0,003	1,18E+08	0,004243	0,003	-7,2E+07
0,004896	0,003	1,18E+08	0,004896	0,003	-7,2E+07
0	0,00346	2,61E+08	0	0,00346	-1,7E+08
0,000354	0,00346	1,18E+08	0,000354	0,00346	-1,7E+08
0,000707	0,00346	1,18E+08	0,000707	0,00346	-7,2E+07
0,001414	0,00346	1,18E+08	0,001414	0,00346	-7,2E+07
0,002121	0,00346	1,18E+08	0,002121	0,00346	-7,2E+07
0,002828	0,00346	1,18E+08	0,002828	0,00346	-7,2E+07
0,003536	0,00346	1,18E+08	0,003536	0,00346	-7,2E+07
0,004243	0,00346	1,18E+08	0,004243	0,00346	-7,2E+07
0,004896	0,00346	1,18E+08	0,004896	0,00346	-7,2E+07

Körning 5

**Korsad**

Min [Pa]	Max [Pa]
3,488E+06	2,646E+07
3,699E+06	2,704E+07
4,717E+06	2,989E+07
5,459E+06	3,197E+07
6,175E+06	3,397E+07

7,123E+06	3,662E+07
7,851E+06	3,865E+07
1,313E+07	5,679E+07
1,379E+07	5,907E+07
1,453E+07	6,163E+07
1,649E+07	5,937E+07
1,662E+07	5,754E+07
9,180E+06	2,169E+07
3,994E+05	8,966E+06
9,040E+06	3,490E+07
9,040E+06	3,490E+07

#### Körning 5a

##### Okorsad spänning

Min [Pa]	Max [Pa]
3,488E+06	2,646E+07
3,699E+06	2,704E+07
4,717E+06	2,989E+07
5,459E+06	3,197E+07
6,175E+06	3,397E+07
7,123E+06	3,662E+07
7,851E+06	3,865E+07
1,313E+07	5,679E+07
1,379E+07	5,907E+07
1,453E+07	6,163E+07
1,649E+07	5,937E+07
1,662E+07	5,754E+07
9,180E+06	2,169E+07
8,966E+06	3,994E+05
3,490E+07	9,040E+06
3,490E+07	9,040E+06

