



Strål  
säkerhets  
myndigheten

Swedish Radiation Safety Authority

Författare: Petter von Unge

Forskning

2017:03

Inverkan av inre tryck på sprickytan  
vid gränslastanalyser



## SSM perspektiv

### Bakgrund

ProSACC är en programvara som med dokumenterat gott resultat kan utföra brottmekaniska beräkningar på ett snabbt sätt med hög kvalitet. Forskningsrön som SSM är med och tar fram implementeras ofta i programvaran. En slutsats från tidigare projekt är att det kan ha stor betydelse för spänningsintensitetsfaktorn, KI, att applicera inre tryck i rör på sprickytan.

I ProSACC beaktas enbart axiella spänningar i rör som uppkommer på grund av det inre trycket, så kallat enaxligt spänningstillstånd. Det undersöks i vilken omfattning beaktandet av fleraxliga spänningstillstånd påverkar resultatet av de brottmekaniska beräkningarna.

### Syfte

Detta projekt syftar till att studera hur beaktande av ett inre tryck som appliceras på sprickytan påverkar gränslasten. Detta sker genom att analysera ett urval geometrier, dels med och dels utan att inre tryck på sprickytan beaktas. Dessutom jämförs resultaten från analys av enaxliga spänningstillstånd med resultaten från analys av fleraxliga spänningstillstånd.

### Resultat

Sammanfattningsvis visar resultaten på att det för stora sprickor (långa och djupa) kan ha en betydande inverkan för gränslasten om inre tryck på sprickytan beaktas. För små sprickor är inverkan försumbar.

Då omkretsspänningar på grund av inre övertryck i en sluten cylinder är omkring dubbelt så höga som axiella spänningar uppnås gränslasten vid betydligt lägre tryck då fleraxliga spänningstillstånd beaktas, framförallt vid små sprickor. Vid större omkretssprickor påverkar framförallt axiella spänningar till öppnandet av sprickan och påverkan på gränslasten på grund av beaktandet av fleraxliga spänningstillstånd blir därmed betydligt mindre. Studeras resultaten framkommer att gränslasttrycken för komponenterna med grunda runtomgående omkretssprickor är förhållandevis höga i jämförelse med tillåtet designtryck för motsvarande ospruckna komponenter. För semielliptiska omkretssprickor är gränslasttrycken förhållandevis höga även för djupa sprickor i jämförelse med tillåtet designtryck. Det finns utifrån denna anledning ingen anledning att revidera ProSACC så att fleraxliga spänningstillstånd kan analyseras. Dock har ProSACC proceduren uppdaterats så att det vid analyser där det inre trycket bidrar till gränslasten framgår, via ett varningsfönster, att även effekter på grund av fleraxligt spänningstillstånd bör undersökas, så att dessa inte är begränsande för analysen.

Via det tillhörande datorprogrammet ProSACC kommer den uppdaterade metoden att användas av de svenska kärnkraftsbolagen, olika konsulter samt av SSM för att göra säkerhetsbedömningar av komponenter med sprickor som ett led att uppfylla 2 kap. 6 § SSMFS 2008:13 när skador påträffas.

### Behov av ytterligare forskning

Inget omedelbart behov av fortsatt forskning bedöms föreligga i denna fråga.

### Projektinformation

Kontaktperson SSM: Daniel Kjellin

Referens: SSM2015-926







Strål  
säkerhets  
myndigheten

Swedish Radiation Safety Authority

Författare: Petter von Unge  
Inspecta Technology AB, Stockholm

# 2017:03

## Inverkan av inre tryck på sprickytan vid gränslastanalyser

Datum: Januari 2017

Rapportnummer: 2017:03 ISSN: 2000-0456

Tillgänglig på [www.stralsakerhetsmyndigheten.se](http://www.stralsakerhetsmyndigheten.se)

Denna rapport har tagits fram på uppdrag av Strålsäkerhetsmyndigheten, SSM. De slutsatser och synpunkter som presenteras i rapporten är författarens/författarnas och överensstämmer inte nödvändigtvis med SSM:s.

# Inverkan av inre tryck på sprickytan vid gränslastanalyser

Rapport nr: 5000542-01

Revision nr: 0

Författare:

Petter von Unge

Sammanfattning:

Den svenska proceduren tillsammans med beräkningsverktyget ProSACC som används för brottmekanisk analys av defekter och inspektionsintervall för komponenter i svenska kärntekniska anläggningar utgår från FAD-analys enligt R6-metoden. Vid R6-analyser kombineras bedömning av tolerans mot brott med tolerans mot gränslast.

I det internationella benchmarkprojektet BENCH-KJ framkom det att det kan ha stor betydelse för spänningsintensitetsfaktorn att applicera inre tryck direkt på sprickytan vid analyser av tryckbärande anordningar. För spänningsintensitetsfaktorn kan detta göras direkt med befintliga geometrilösningar. Det går däremot inte att utnyttja befintliga gränslastlösningar på ett lika enkelt sätt för att beakta tryck på sprickytan vid gränslastanalys.

För att få en djupare förståelse för hur stor betydelse trycket som verkar direkt på sprickytan har för gränslasten i förhållande till övriga spänningar det inre trycket ger upphov till, utförs en studie som undersöker dess inverkan på omkretssprickor i cylindrar för ett antal geometriförhållanden genom FE-analyser.

Studien visar att då tryck på sprickytan beaktas blir inverkan förhållandevis stor för djupa sprickor medan det för grunda sprickor har närmast obetydlig påverkan.

Ett indirekt resultat av denna studie är att vikten att beakta fleraxliga spänningstillstånd för omkretssprickor i cylindrar har framkommit. Detta sker inte nödvändigtvis vid en skadetålighetsanalys där normalt endast de laster som bidrar till öppnande av sprickan brukar beaktas.

Lämpligen bör en metod för att hantera detta på ett praktiskt sätt tas fram.

# Innehåll

<b>1. Beteckningar</b> .....	<b>3</b>
<b>2. Inledning</b> .....	<b>3</b>
<b>3. Metod</b> .....	<b>4</b>
3.1 Geometri.....	5
3.2 Belastning.....	5
3.3 Material.....	5
3.4 FE-modell .....	6
3.4.1 Runtomgående omkretsspricka.....	6
3.4.2 Semielliptisk omkretsspricka .....	6
3.5 Gränslastdefinition.....	7
3.5.1 Runtomgående omkretsspricka.....	7
3.5.2 Semielliptisk omkretsspricka .....	7
<b>4. Resultat</b> .....	<b>8</b>
4.1 Runtomgående omkretsspricka .....	8
4.1.1 Enaxligt spänningstillstånd .....	8
4.1.2 Fleraxligt spänningstillstånd .....	8
4.1.3 Förhållande mellan fleraxligt och enaxligt spänningstillstånd.....	9
4.2 Semielliptisk omkretsspricka.....	10
4.2.1 Enaxligt spänningstillstånd .....	10
4.2.2 Fleraxligt spänningstillstånd .....	11
4.2.3 Förhållande mellan fleraxligt och enaxligt spänningstillstånd.....	12
<b>5. Slutsatser och diskussion</b> .....	<b>13</b>
<b>6. Referenser</b> .....	<b>14</b>

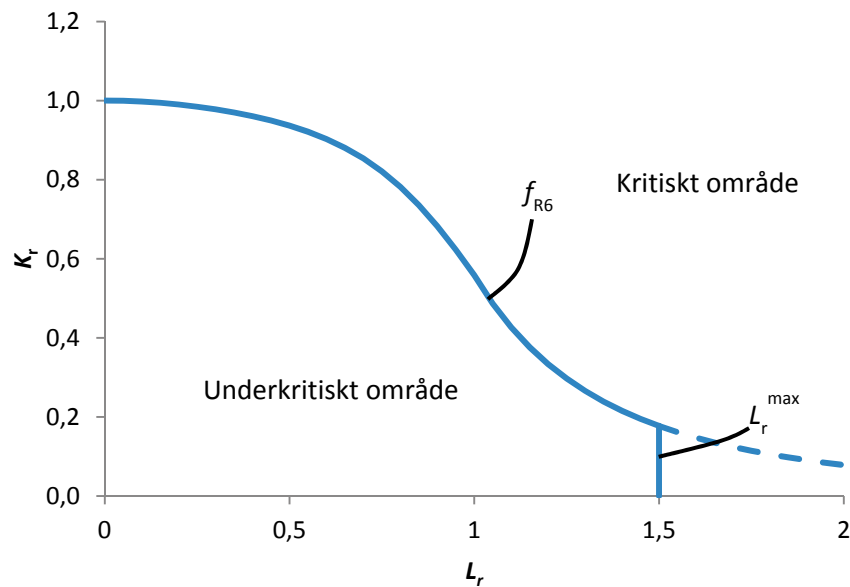
# 1. Beteckningar

$K_r$	Förhållande mellan spänningsintensitetsfaktor och brottseget
$L_r$	Mått på tolerans mot gränslast
$K_I$	Spänningsintensitetsfaktor för modus I, $\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$
$a$	Sprickdjup, mm
$l$	Spricklängd, mm
$t$	Vägg tjocklek i cylinder, mm
$R_i$	Innerradie i cylinder, mm
$R_e$	Ytterradie i cylinder, mm
$\kappa$	Kvot mellan inner- och ytterradie
$p$	Inre tryck, MPa
$P_a$	Gränslasttryck, MPa
$\sigma_z$	Axiell spänningskomponent till följd av inre tryck, MPa
$\sigma_y$	Sträckgräns, MPa
$E$	Elasticitetsmodul, MPa
$E_t$	Tangentmodul, MPa

# 2. Inledning

Den svenska proceduren [1] tillsammans med beräkningsverktyget ProSACC som används för brottmekanisk analys av defekter och inspektionsintervall för komponenter i svenska kärntekniska anläggningar utgår från FAD-analys enligt R6-metoden [2].

Vid R6-analys kombineras  $K_r$ , vilken används för bedömning av tolerans mot brott, med  $L_r$ , vilken används för bedömning av tolerans mot plastisk kollaps, se Figur 1.  $K_r$  beräknas utifrån spänningsintensitetsfaktorn  $K_I$  för den aktuella geometrin och  $L_r$  beräknas utifrån gränslastlösning för geometrin.



**Figur 1.** Failure Assessment Diagram (FAD) där samverkan av brott och plastisk kollaps beaktas.

I det internationella benchmarkprojektet BENCH-KJ framkom det att det kan ha stor betydelse för spänningsintensitetsfaktorn att applicera inre tryck direkt på sprickytan vid analyser av tryckbärande anordningar [3].

Vid beräkning av spänningsintensitetsfaktorn beaktas endast de spänningar som verkar över sprickytan. Det är därför möjligt att lägga till det inre trycket som en ytterligare membranspänning i de befintliga geometrilösningarna för spänningsintensitetsfaktorn.

För analys av gränslasten beaktas däremot spänningsförhållandet över hela tvärsnittet och det är därmed inte möjligt att på ett enkelt sätt utnyttja befintliga gränslastlösningar vid beaktande av tryck på sprickytan.

För att få en djupare förståelse för hur stor betydelse trycket som verkar direkt på sprickytan har för gränslasten i förhållande till övriga spänningar det inre trycket ger upphov till utförs en studie som undersöker dess inverkan på omkretssprickor i cylindrar för ett antal geometriförhållanden.

### 3. Metod

FE-analyser utförs för ett antal fall både med och utan tryck på sprickytan för att undersöka inverkan av denna lastkomponent.

För dessa undersökningar studeras inre omkretssprickor i cylindrar som enbart belastas med ett inre övertryck.

### 3.1 Geometri

Både semielliptiska och runtomgående inre omkretssprickor i cylindrar beaktas då dessa är vanligt förekommande spricktyper för tryckbärande anordningar.

Analyserna utförs för fyra olika sprickdjup samt två olika väggjocklekar. De förhållanden som analyseras är

$$a/t = 0.2, 0.4, 0.6, 0.8$$

$$R_i/t = 8, 20$$

där  $a$  är sprickdjupet,  $t$  är väggjockleken och  $R_i$  är innerradien.

Sprickdjup/längd förhållandet som beaktas för semielliptiska sprickor är

$$a:l = 1:6$$

### 3.2 Belastning

I studien analyseras en sluten cylinder utsatt för ett inre tryck och de belastningar som uppstår till följd av detta.

För att få ett fullständigt spänningstillstånd utifrån det inre trycket appliceras detta dels på insidan av cylindern och dels som en axiell komponent,  $\sigma_z$ , beräknad med tjockväggig teori enligt

$$\sigma_z = p \cdot \frac{\kappa^2}{1 - \kappa^2} \quad (1)$$

där

$$\kappa = \frac{R_i}{R_e} \quad (2)$$

och  $R_i$  samt  $R_e$  är inner- respektive ytterradien.

Vid betraktande av enaxliga spänningstillstånd, likt det som görs i beräkningsverktyget ProSACC, beaktas endast de laster som direkt leder till öppnande av sprickan. Av denna anledning betraktas två olika spänningsförhållanden i denna studie; dels enaxligt spänningstillstånd som endast inkluderar den axiella komponenten  $\sigma_z$ , och dels fleraxligt spänningstillstånd, vilket beaktas genom inkludering av det inre trycket tryck på insidans väggar i cylindern.

För varje geometri och spänningsförhållande utförs dels analys med tryck direkt på sprickytan, och dels utan tryck på sprickytan.

### 3.3 Material

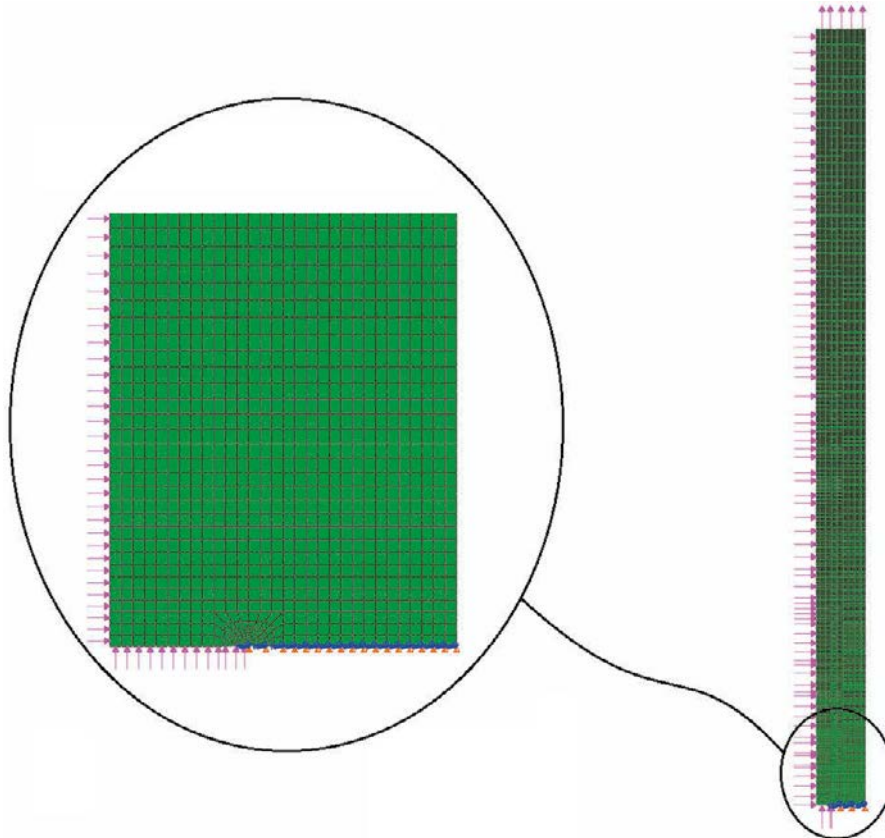
En approximativt elastisk-idealplastisk materialmodell används vid gränslastanalyserna. För att undvika numeriska problem ges ett svagt hårdnande över sträckgränsen,  $\sigma_y$ , med en tangentmodul på  $E_t = E/10^5$ , där  $E$  är elasticitetsmodulen.

### 3.4 FE-modell

Analyserna utförs i FE-programmet Abaqus 6.14-2 [4]. Andra ordningens element används i samtliga analyser och sprickspetsen modelleras med kollapsade noder.

#### 3.4.1 Runtomgående omkretsspricka

De runtomgående omkretssprickorna modelleras med axisymmetri samt symmetri i sprickligamentet enligt Figur 2.

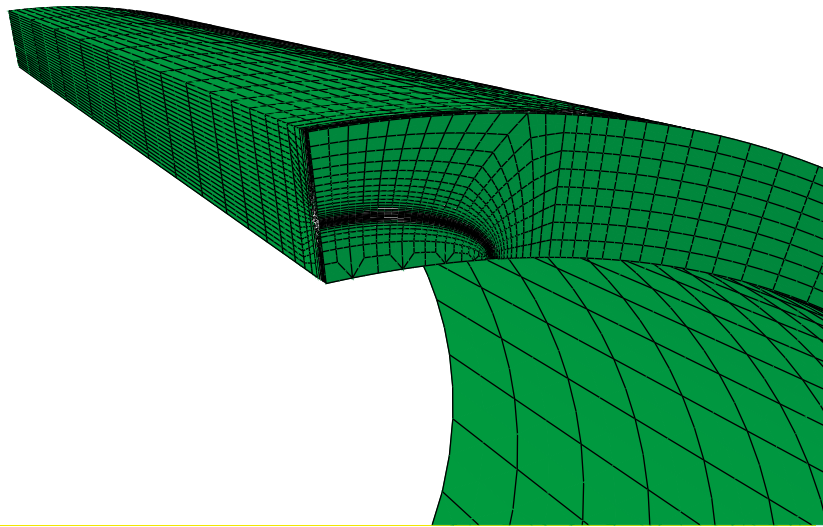


**Figur 2.** Axisymmetrisk FE-modell för runtomgående omkretssprickor.

#### 3.4.2 Semielliptisk omkretsspricka

De semielliptiska sprickorna modelleras med solidmodeller med symmetri i två plan enligt Figur 3.





**Figur 3.** FE-modell för semielliptiska sprickor.

## 3.5 Gränslastdefinition

Det finns ett antal gränslastdefinitioner som kan användas för att bestämma när plastisk kollaps sker. En huvudsaklig uppdelning är mellan global och lokal gränslast, där global gränslast innebär att ett helt tvärsnitt tappar sin bärande förmåga. Lokal gränslast innebär att genomplasticering sker inom ett definierat område och uppstår därmed före global gränslast.

Värt att notera är att denna studie studerar skillnader i gränslast beroende på belastning. Det är därmed inte av avgörande vikt vilken gränslastdefinition som används så länge den är konsekvent vald. Kontroller har utförts för andra definitioner vilka visat på motsvarande resultat.

I FE-analyser bestäms gränslasttrycket genom att visuellt studera när den ekvivalenta plastiska töjningen spridit sig på ett sådant sätt den uppfyller kriterierna.

### 3.5.1 Runtomgående omkretsspricka

För runtomgående omkretssprickor definieras gränslasten som den last som ger plasticering genom tjockleken någonstans i det modellerade snittet. Vanligen sker detta från sprickspetsen och ut till yttertan.

### 3.5.2 Semielliptisk omkretsspricka

För semielliptiska sprickor används en lokal gränslastdefinition enligt [5] där gränslasten anses uppnådd då genomplasticering skett någonstans i sprickans plan.

## 4. Resultat

### 4.1 Runtomgående omkretsspricka

#### 4.1.1 Enaxligt spänningstillstånd

Gränslasttryck vid beaktande av ett enaxligt spänningstillstånd presenteras i Tabell 1 och Tabell 2 för en tjockväggig ( $R_i/t = 8$ ) respektive tunnväggig ( $R_i/t = 20$ ) cylinder med en runtomgående omkretsspricka.

I Bilaga 1 presenteras FE-plottar för samtliga fall när gränslast uppnås.

**Tabell 1.** Gränslasttryck för runtomgående omkretssprickor vid enaxligt spänningstillstånd för  $R_i/t = 8$

$a/t$	$P_a$ [MPa]		Skillnad [%]
	Utan tryck på sprickytan	Med tryck på sprickytan	
0.2	45.77	43.63	-4.68
0.4	34.05	30.67	-9.93
0.6	22.71	19.57	-13.83
0.8	11.76	9.67	-17.76

**Tabell 2.** Gränslasttryck för runtomgående omkretssprickor vid enaxligt spänningstillstånd för  $R_i/t = 20$

$a/t$	$P_a$ [MPa]		Skillnad [%]
	Utan tryck på sprickytan	Med tryck på sprickytan	
0.2	17.69	17.40	-1.64
0.4	12.90	12.34	-4.34
0.6	8.38	7.87	-6.13
0.8	4.32	3.99	-7.78

Det kan ses att för runtomgående omkretssprickor i enaxligt spänningstillstånd har tryck på sprickytan stor inverkan på djupa sprickor i tjockväggiga rör. För grundare sprickor och tunnväggigare rör blir inverkan mindre.

#### 4.1.2 Fleraxligt spänningstillstånd

Gränslasttryck vid beaktande av ett fleraxligt spänningstillstånd presenteras i Tabell 3 och Tabell 4 för en tjockväggig ( $R_i/t = 8$ ) respektive tunnväggig ( $R_i/t = 20$ ) cylinder med en runtomgående omkretsspricka.

I Bilaga 2 presenteras FE-plottar för samtliga fall när gränslast uppnås.

**Tabell 3.** Gränslasttryck för runtomgående omkretssprickor vid fleraxligt spänningstillstånd för  $R_i/t = 8$

$a/t$	$P_a$ [MPa]		Skillnad [%]
	Utan tryck på sprickytan	Med tryck på sprickytan	
0.2	27.16	27.16	0.00
0.4	27.02	26.88	-0.52
0.6	23.05	19.97	-13.36
0.8	11.96	9.84	-17.74

**Tabell 4.** Gränslasttryck för runtomgående omkretssprickor vid fleraxligt spänningstillstånd för  $R_i/t = 20$

$a/t$	$P_a$ [MPa]		Skillnad [%]
	Utan tryck på sprickytan	Med tryck på sprickytan	
0.2	11.26	11.26	0.00
0.4	11.18	11.15	-0.27
0.6	8.59	8.06	-6.18
0.8	4.39	4.04	-7.81

För runtomgående omkretssprickor i fleraxligt spänningstillstånd fås betydligt lägre tillåtna tryck vid grunda sprickor än vid enaxligt spänningstillstånd. Vid djupa sprickor blir skillnaden däremot liten mellan fler- och enaxligt spänningstillstånd.

Inverkan från tryck på sprickytan är likartad vid fleraxligt spänningstillstånd som enaxligt där tryck på sprickytan har stor inverkan vid djupa sprickor i tjockväggiga rör medan det minskar i betydelse för grundare sprickor i tunnväggigare rör.

#### 4.1.3 Förhållande mellan fleraxligt och enaxligt spänningstillstånd

Förhållandet mellan gränslasttryck i ett fleraxligt gentemot enaxligt spänningstillstånd presenteras för en tjockväggig ( $R_i/t = 8$ ) cylinder med en runtomgående omkretsspricka i Tabell 5 och Tabell 6 utan respektive med tryck på sprickytan.

För en tunnväggig ( $R_i/t = 20$ ) cylinder med en runtomgående omkretsspricka presenteras motsvarande jämförelse i Tabell 7 och Tabell 8 utan respektive med tryck på sprickytan.

**Tabell 5.** Gränslasttryck för runtomgående omkretssprickor utan tryck på sprickytan för  $R_i/t = 8$

$a/t$	$P_a$ [MPa]		Skillnad [%]
	Fleraxligt spänningstillstånd	Enaxligt spänningstillstånd	
0.2	27.16	45.77	68.52
0.4	27.02	34.05	26.02
0.6	23.05	22.71	-1.48
0.8	11.96	11.76	-1.67

**Tabell 6.** Gränslasttryck för runtombgående omkretssprickor med tryck på sprickytan för  $R/t = 8$

$a/t$	$P_a$ [MPa]		Skillnad [%]
	Fleraxligt spänningstillstånd	Enaxligt spänningstillstånd	
0.2	27.16	43.63	60.64
0.4	26.88	30.67	14.10
0.6	19.97	19.57	-2.00
0.8	9.84	9.67	-1.71

**Tabell 7.** Gränslasttryck för runtombgående omkretssprickor utan tryck på sprickytan för  $R/t = 20$

$a/t$	$P_a$ [MPa]		Skillnad [%]
	Fleraxligt spänningstillstånd	Enaxligt spänningstillstånd	
0.2	11.26	17.69	57.10
0.4	11.18	12.90	15.38
0.6	8.59	8.38	-2.49
0.8	4.39	4.32	-1.44

**Tabell 8.** Gränslasttryck för runtombgående omkretssprickor med tryck på sprickytan för  $R/t = 20$

$a/t$	$P_a$ [MPa]		Skillnad [%]
	Fleraxligt spänningstillstånd	Enaxligt spänningstillstånd	
0.2	11.26	17.40	54.53
0.4	11.15	12.34	10.67
0.6	8.06	7.87	-2.43
0.8	4.04	3.99	-1.40

Det kan ses att spänningstillståndet har stor betydelse för grunda runtombgående sprickor medan det har liten inverkan vid djupa sprickor. Vid djupa sprickor har tryck pålagt på insidan till och med en positiv inverkan på gränslasten kring sprickspetsen.

## 4.2 Semielliptisk omkretsspricka

### 4.2.1 Enaxligt spänningstillstånd

Gränslasttryck vid beaktande av ett enaxligt spänningstillstånd presenteras i Tabell 9 och Tabell 10 för en tjockväggig ( $R/t = 8$ ) respektive tunnväggig ( $R/t = 20$ ) cylinder med en semielliptisk omkretsspricka.

I Bilaga 3 presenteras FE-plottar för samtliga fall när gränslast uppnås.

**Tabell 9.** Gränslasttryck för semielliptiska omkretssprickor vid enaxligt spänningstillstånd för  $R_i/t = 8$

$a/t$	$P_a$ [MPa]		Skillnad [%]
	Utan tryck på sprickytan	Med tryck på sprickytan	
0.2	52.98	52.94	-0.08
0.4	51.30	49.79	-2.94
0.6	46.84	43.10	-7.98
0.8	35.81	31.84	-11.09

**Tabell 10.** Gränslasttryck för semielliptiska omkretssprickor vid enaxligt spänningstillstånd för  $R_i/t = 20$

$a/t$	$P_a$ [MPa]		Skillnad [%]
	Utan tryck på sprickytan	Med tryck på sprickytan	
0.2	20.49	20.49	0.00
0.4	20.18	19.92	-1.29
0.6	18.96	18.48	-2.53
0.8	16.00	15.29	-4.44

Det kan ses att för semielliptiska omkretssprickor i enaxligt spänningstillstånd har tryck på sprickytan mindre inverkan än för runtomgående omkretssprickor i samma belastningstillstånd.

För tjockväggiga rör med mycket djupa sprickor har tryck på sprickytan en inverkan på över 10 %. För tunnväggiga rör har tryck på sprickytan mindre betydelse.

#### 4.2.2 Fleraxligt spänningstillstånd

Gränslasttryck vid beaktande av ett fleraxligt spänningstillstånd presenteras i Tabell 11 och Tabell 12 för en tjockväggig ( $R_i/t = 8$ ) respektive tunnväggig ( $R_i/t = 20$ ) cylinder med en semielliptisk omkretsspricka.

I Bilaga 4 presenteras FE-plottar för samtliga fall när gränslast uppnås.

**Tabell 11.** Gränslasttryck för semielliptiska omkretssprickor vid fleraxligt spänningstillstånd för  $R_i/t = 8$

$a/t$	$P_a$ [MPa]		Skillnad [%]
	Utan tryck på sprickytan	Med tryck på sprickytan	
0.2	27.18	27.18	0.00
0.4	27.14	27.06	-0.29
0.6	27.04	26.85	-0.70
0.8	26.62	26.19	-1.62

**Tabell 12.** Gränslasttryck för semielliptiska omkretssprickor vid enaxligt spänningstillstånd för  $R_i/t = 20$

$a/t$	$P_a$ [MPa]		Skillnad [%]
	Utan tryck på sprickytan	Med tryck på sprickytan	
0.2	11.26	11.26	0.00
0.4	11.24	11.24	0.00
0.6	11.19	11.12	-0.63
0.8	11.09	10.9	-1.71

Precis som för runtomgående omkretssprickor fås betydligt lägre tillåtet inre tryck vid ett fleraxligt spänningstillstånd.

Inverkan av tryck på sprickytan är i princip obetydlig vid fleraxligt spänningstillstånd för semielliptiska omkretssprickor.

#### 4.2.3 Förhållande mellan fleraxligt och enaxligt spänningstillstånd

Förhållandet mellan gränslasttryck i ett fleraxligt gentemot enaxligt spänningstillstånd presenteras för en tjockväggig ( $R_i/t = 8$ ) cylinder med en semielliptisk omkretsspricka i Tabell 13 och Tabell 14 utan respektive med tryck på sprickytan.

För en tunnväggig ( $R_i/t = 20$ ) cylinder med en semielliptisk omkretsspricka presenteras motsvarande jämförelse i Tabell 15 och Tabell 16 utan respektive med tryck på sprickytan.

**Tabell 13.** Gränslasttryck för semielliptiska omkretssprickor utan tryck på sprickytan för  $R_i/t = 8$

$a/t$	$P_a$ [MPa]		Skillnad [%]
	Fleraxligt spänningstillstånd	Enaxligt spänningstillstånd	
0.2	27.18	52.98	94.92
0.4	27.14	51.30	89.02
0.6	27.04	46.84	73.22
0.8	26.62	35.81	34.52

**Tabell 14.** Gränslasttryck för semielliptiska omkretssprickor med tryck på sprickytan för  $R_i/t = 8$

$a/t$	$P_a$ [MPa]		Skillnad [%]
	Fleraxligt spänningstillstånd	Enaxligt spänningstillstånd	
0.2	27.18	52.94	94.78
0.4	27.06	49.79	84.00
0.6	26.85	43.10	60.52
0.8	26.19	31.84	21.57

**Tabell 15.** Gränslasttryck för semielliptiska omkretssprickor utan tryck på sprickytan för  $R/t = 20$

$a/t$	$P_a$ [MPa]		Skillnad [%]
	Fleraxligt spänningstillstånd	Enaxligt spänningstillstånd	
0.2	11.26	20.49	81.97
0.4	11.24	20.18	79.54
0.6	11.19	18.96	69.44
0.8	11.09	16.00	44.27

**Tabell 16.** Gränslasttryck för semielliptiska omkretssprickor med tryck på sprickytan för  $R/t = 20$

$a/t$	$P_a$ [MPa]		Skillnad [%]
	Fleraxligt spänningstillstånd	Enaxligt spänningstillstånd	
0.2	11.26	20.49	81.97
0.4	11.24	19.92	77.22
0.6	11.12	18.48	66.19
0.8	10.90	15.29	40.28

Det kan ses att spänningstillståndet har stor betydelse för gränslasttrycket vid semielliptiska omkretssprickor.

## 5. Slutsatser och diskussion

Inverkan av tryck på sprickytan kan ha en förhållandevis stor inverkan för stora sprickor medan det för små sprickor har en obetydlig inverkan. Detta är naturligt då dess inverkan är direkt kopplad till sprickytans storlek. I och med den inverkan som setts för större sprickor kan det vara lämpligt att ta fram en metod för att få med inverkan av tryck på sprickytan i gränslastanalyser.

Det finns flera möjliga metoder för att beakta tryck på sprickytan vid gränslastberäkningar. I R6 dokumentet [2] har på senare tiden inre tryck på sprickytan inkluderats som ytterligare en komponent i vissa gränslastlösningar, exempelvis en global gränslastlösning för semielliptisk omkretsspricka.

I [6] föreslås att tryck på sprickytan kan approximeras som en del av den globala böjspänningen som verkar på en cylinder med en begränsad omkretsspricka. På liknande sätt kan tryck på sprickytan approximeras som en membrankomponent för runtomgående omkretssprickor.

Tillåtna inre tryck blir betydligt lägre för fleraxliga spänningstillstånd än för enaxliga. Detta är en följd av att omkretsspänningar i en cylinder är omkring dubbelt så höga som de axiella som enbart beaktas för det enaxliga spänningstillståndet.

För grunda sprickor i det fleraxliga spänningstillståndet beror den uppnådda gränslasten mer på omkretsspänningar än sprickans inverkan. För djupare och längre sprickor får sprickan mer betydelse för gränslasten och det kan ses att för djupa runtomgående omkretssprickor fås liknande resultat för enaxligt och fleraxligt spänningstillstånd då

gränslasten där är helt beroende av sprickan och de axiella spänningarna.

Ett indirekt resultat av denna studie är vikten av att beakta fleraxliga spänningstillstånd för omkretssprickor i cylindrar har framkommit. Detta sker inte nödvändigtvis vid skadetålighetsanalyser där normalt bara de laster som bidrar till öppnande av sprickan brukar beaktas. Lämpligen bör en metod för att hantera detta på ett praktiskt sätt tas fram.

## 6. Referenser

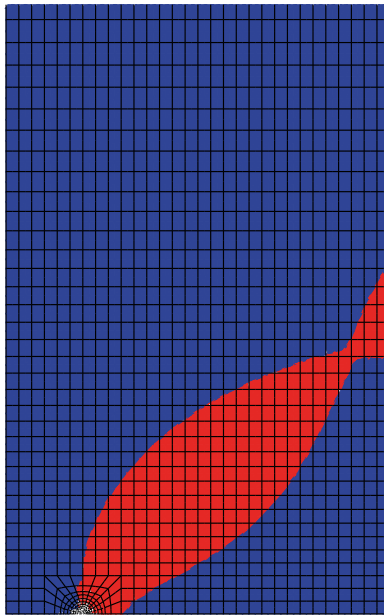
- [1] Dillström, P. et al, (2008), *A combined deterministic and probabilistic procedure for safety assessment of components with cracks – Handbook*, SSM Research Report 2008:01, Swedish Radiation Safety Authority
- [2] –, (2013), *Assessment of the Integrity of Structures Containing Defects*, R6 – Revision 4, EDF Energy Nuclear Generation Ltd.
- [3] Kayser, Y., et al, (2015), *BENCH-KJ: Benchmark on Analytical Calculation of Fracture Mechanics Parameters  $K_I$  and  $J$  for Cracked Piping Components – Final Results and Conclusions*, CEA
- [4] Abaqus, 2014, User's Manual Version 6.14, Dassault Systèmes
- [5] Dillström, P., Sattari-Far, I., (2003), *Limit load solutions for surface cracks in plates and cylinders*. RSE R&D Report No. 2002/01. Det Norske Veritas, Stockholm, Sweden
- [6] Wilkowski, G., et al, (2007), *Critical Crack Size Evaluations for Circumferential Cracks in Dissimilar Metal Welds*, Engineering Mechanics Corporation of Columbus



## Bilaga 1. Gränslasttryck för enaxligt spänningstillstånd och runtomgående omkretssprickor

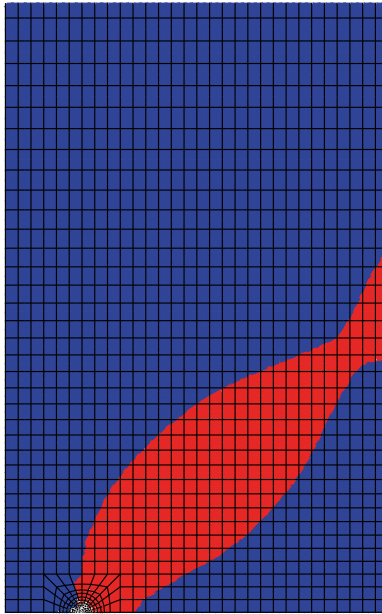
I Figur 1 - Figur 16 visas de tidsteg då gränslasten uppnås vid enaxligt spänningstillstånd för en runtomgående omkretsspricka. De röda områdena visar var plastisk deformation skett.

Det inre trycket,  $p$ , är pålagt linjärt från 0 till 100 MPa vid tiden (*Step Time*) 1.0. Därav fås gränslasttrycket,  $P_a$ , genom att multiplicera det i figuren angivna *Step Time* med 100.



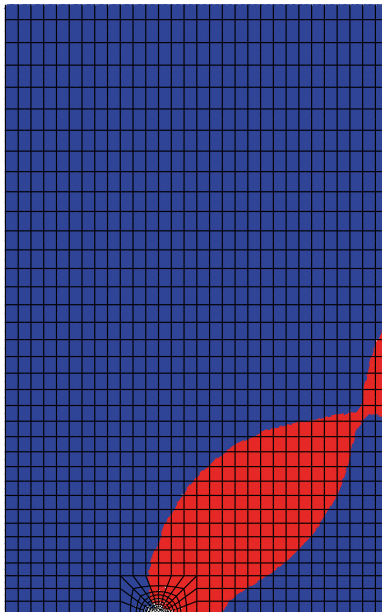
Step: Loading Step  
Increment 37: Step Time = 0.4577  
Primary Var: PEEQ

**Figur 1.** Uppnådd gränslast för  $R/t = 8$  och  $a/t = 0.2$  utan tryck på sprickytan.



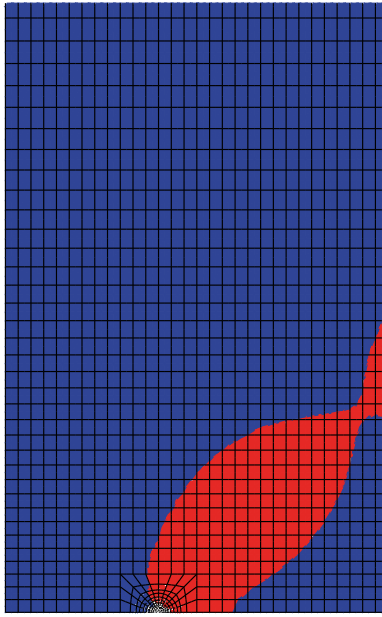
Step: Loading Step  
Increment 47: Step Time = 0.4363  
Primary Var: PEEQ

**Figur 2.** Uppnådd gränslast för  $R/t = 8$  och  $a/t = 0.2$  med tryck på sprickytan.



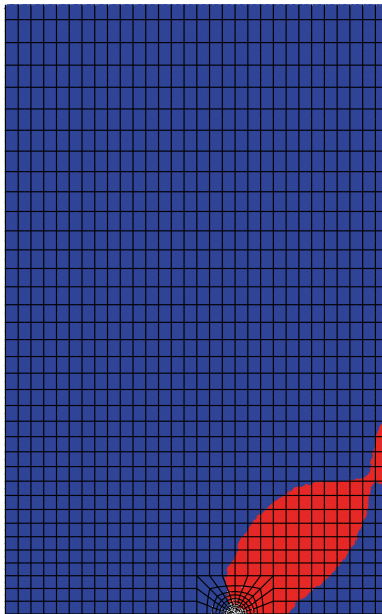
Step: Loading Step  
Increment 47: Step Time = 0.3405  
Primary Var: PEEQ

**Figur 3.** Uppnådd gränslast för  $R/t = 8$  och  $a/t = 0.4$  utan tryck på sprickytan.



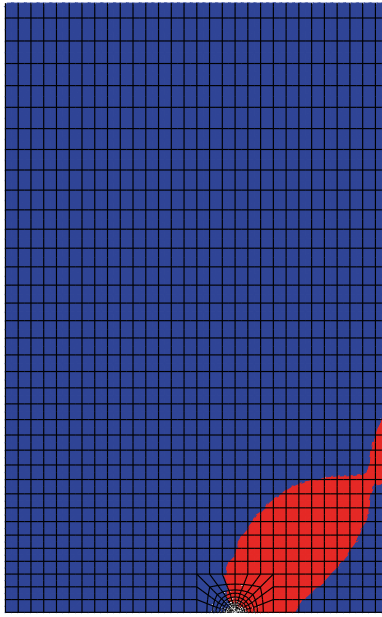
Step: Loading Step  
Increment 48: Step Time = 0.3067  
Primary Var: PEEQ

**Figur 4.** Uppnådd gränslast för  $R/t = 8$  och  $a/t = 0.4$  med tryck på sprickytan.



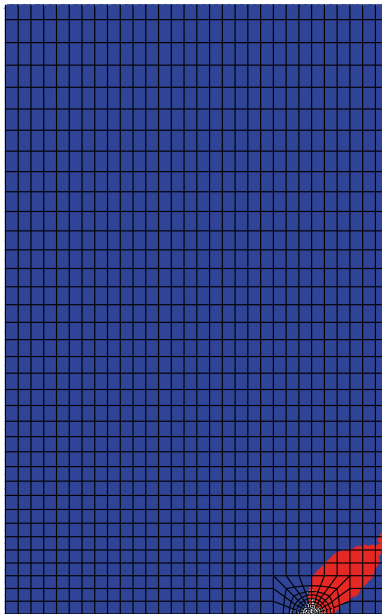
Step: Loading Step  
Increment 53: Step Time = 0.2271  
Primary Var: PEEQ

**Figur 5.** Uppnådd gränslast för  $R/t = 8$  och  $a/t = 0.6$  utan tryck på sprickytan.



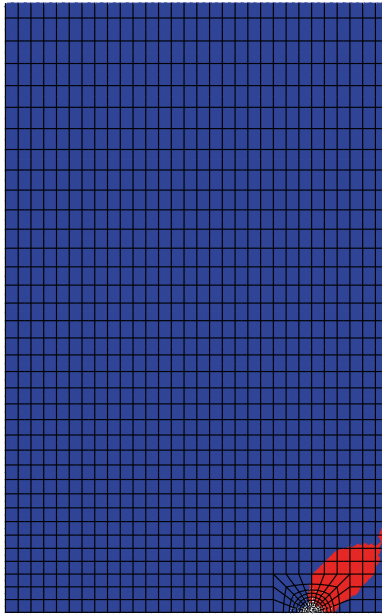
Step: Loading Step  
 Increment 42: Step Time = 0.1957  
 Primary Var: PEEQ

**Figur 6.** Uppnådd gränslast för  $R/t = 8$  och  $a/t = 0.6$  med tryck på sprickytan.



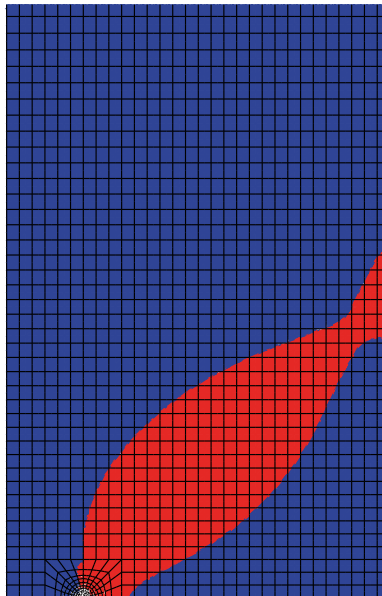
Step: Loading Step  
 Increment 40: Step Time = 0.1176  
 Primary Var: PEEQ

**Figur 7.** Uppnådd gränslast för  $R/t = 8$  och  $a/t = 0.8$  utan tryck på sprickytan.



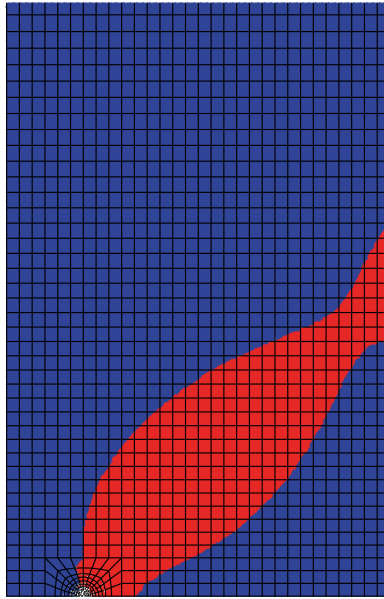
Step: Loading Step  
 Increment 45: Step Time = 9.6710E-02  
 Primary Var: PEEQ

**Figur 8.** Uppnådd gränslast för  $R/t = 8$  och  $a/t = 0.8$  med tryck på sprickytan.



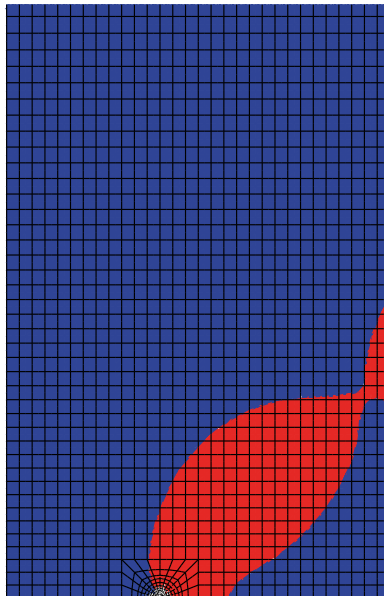
Step: Loading Step  
 Increment 48: Step Time = 0.1769  
 Primary Var: PEEQ

**Figur 9.** Uppnådd gränslast för  $R/t = 20$  och  $a/t = 0.2$  utan tryck på sprickytan.



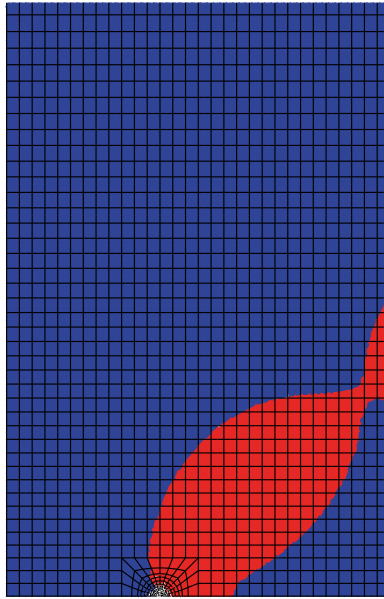
Step: Loading Step  
 Increment 45: Step Time = 0.1740  
 Primary Var: PEEQ

**Figur 10.** Uppnådd gränslast för  $R/t = 20$  och  $a/t = 0.2$  med tryck på sprickytan.



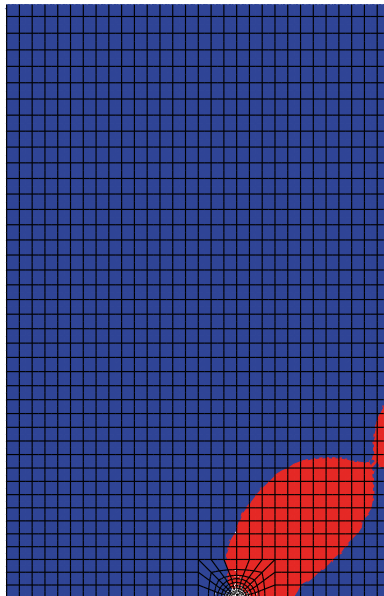
Step: Loading Step  
 Increment 73: Step Time = 0.1290  
 Primary Var: PEEQ

**Figur 11.** Uppnådd gränslast för  $R/t = 20$  och  $a/t = 0.4$  utan tryck på sprickytan.



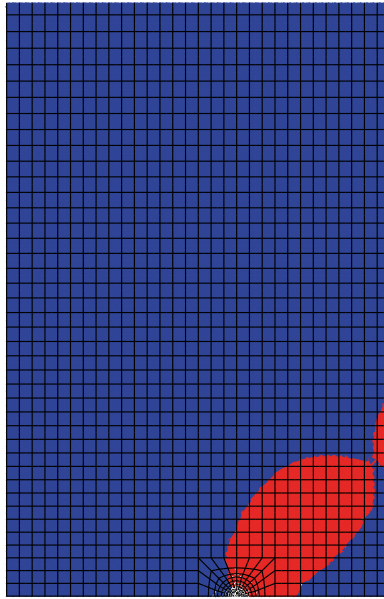
Step: Loading Step  
 Increment 51: Step Time = 0.1234  
 Primary Var: PEEQ

**Figur 12.** Uppnådd gränslast för  $R/t = 20$  och  $a/t = 0.4$  med tryck på sprickytan.



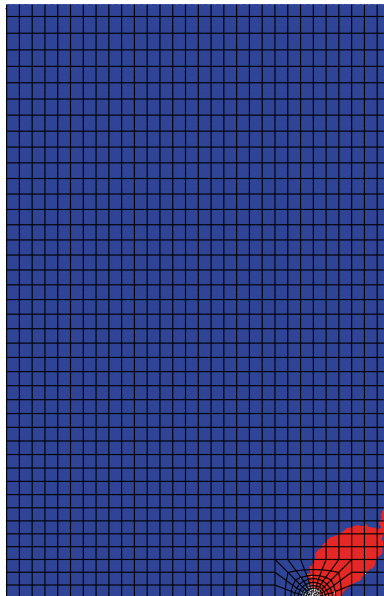
Step: Loading Step  
 Increment 54: Step Time = 8.3789E-02  
 Primary Var: PEEQ

**Figur 13.** Uppnådd gränslast för  $R/t = 20$  och  $a/t = 0.6$  utan tryck på sprickytan.



Step: Loading Step  
 Increment 47: Step Time = 7.8654E-02  
 Primary Var: PEEQ

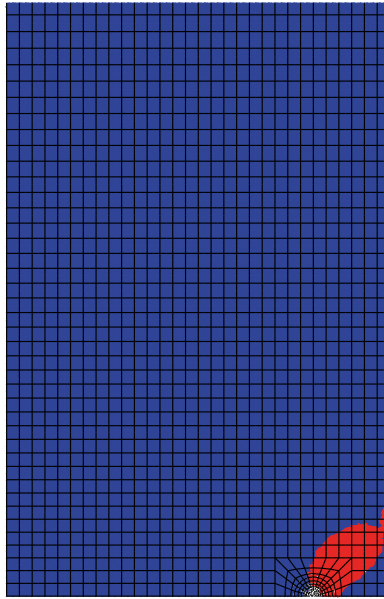
**Figur 14.** Uppnådd gränslast för  $R/t = 20$  och  $a/t = 0.6$  med tryck på sprickytan.



Step: Loading Step  
 Increment 42: Step Time = 4.3222E-02  
 Primary Var: PEEQ

**Figur 15.** Uppnådd gränslast för  $R/t = 20$  och  $a/t = 0.8$  utan tryck på sprickytan.





Step: Loading Step  
Increment 49: Step Time = 3.9859E-02  
Primary Var: PEEQ

**Figur 16.** Uppnådd gränslast för  $R/t = 20$  och  $a/t = 0.8$  med tryck på sprickytan.

## Bilaga 2. Gränslasttryck för fleraxligt spänningstillstånd och runtomgående omkretsspricka

I Figur 1 - Figur 16 visas de tidsteg då gränslasten uppnås vid fleraxligt spänningstillstånd för en runtomgående omkretsspricka. De röda områdena visar var plastisk deformation skett.

Vid grunda sprickor (Figur 1 till Figur 4) kan det ses att sprickans betydelse är liten och att genomplastisering snarare sker en bit bort från sprickan. Detta då det inre trycket skapar höga spänningar i omkretsled som bidrar till genomplastisering i större utsträckning än sprickan.

Det inre trycket,  $p$ , är pålagt linjärt från 0 till 100 MPa vid tiden (*Step Time*) 1.0. Därav fås gränslasttrycket,  $P_a$ , genom att multiplicera det i figurerna angivna *Step Time* med 100.



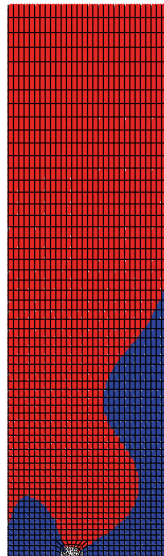
Step: Loading Step  
Increment 23: Step Time = 0.2716  
Primary Var: PEEQ

**Figur 1.** Uppnådd gränslast för  $R/t = 8$  och  $a/t = 0.2$  utan tryck på sprickytan.



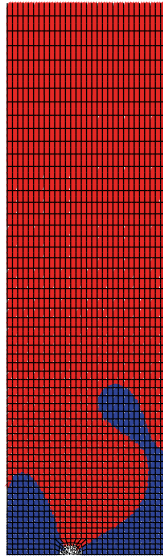
Step: Loading Step  
Increment 27: Step Time = 0.2716  
Primary Var: PEEQ

**Figur 2.** Uppnådd gränslast för  $R/t = 8$  och  $a/t = 0.2$  med tryck på sprickytan.



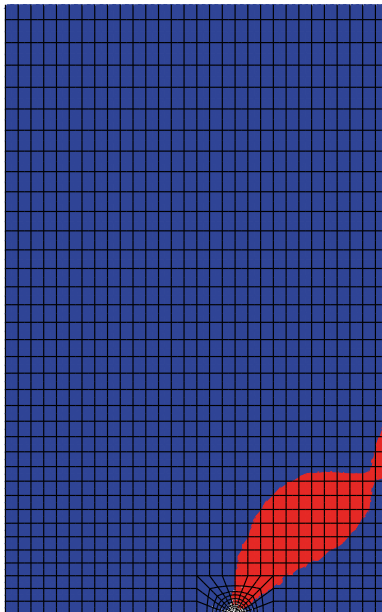
Step: Loading Step  
Increment 29: Step Time = 0.2702  
Primary Var: PEEQ

**Figur 3.** Uppnådd gränslast för  $R/t = 8$  och  $a/t = 0.4$  utan tryck på sprickytan.



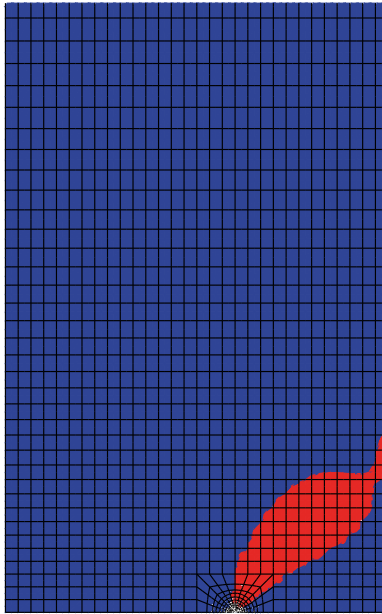
Step: Loading Step  
Increment 35: Step Time = 0.2688  
Primary Var: PEEQ

**Figur 4.** Uppnådd gränslast för  $R/t = 8$  och  $a/t = 0.4$  med tryck på sprickytan.



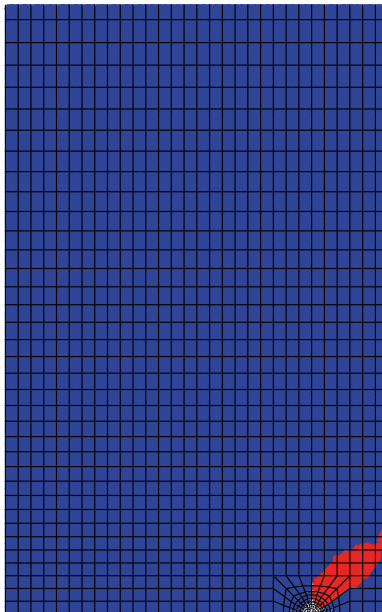
Step: Loading Step  
Increment 52: Step Time = 0.2305  
Primary Var: PEEQ

**Figur 5.** Uppnådd gränslast för  $R/t = 8$  och  $a/t = 0.6$  utan tryck på sprickytan.



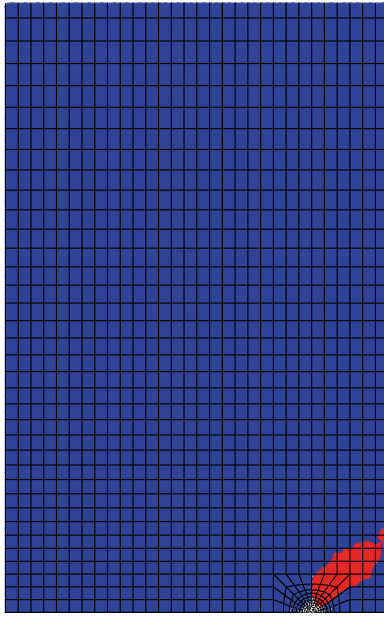
Step: Loading Step  
 Increment 62: Step Time = 0.1997  
 Primary Var: PEEQ

**Figur 6.** Uppnådd gränslast för  $R/t = 8$  och  $a/t = 0.6$  med tryck på sprickytan.



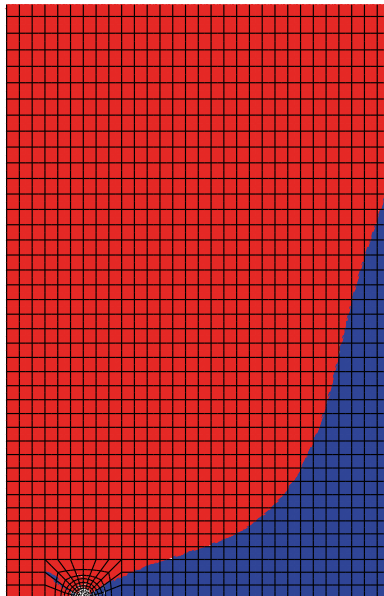
Step: Loading Step  
 Increment 60: Step Time = 0.1196  
 Primary Var: PEEQ

**Figur 7.** Uppnådd gränslast för  $R/t = 8$  och  $a/t = 0.8$  utan tryck på sprickytan.



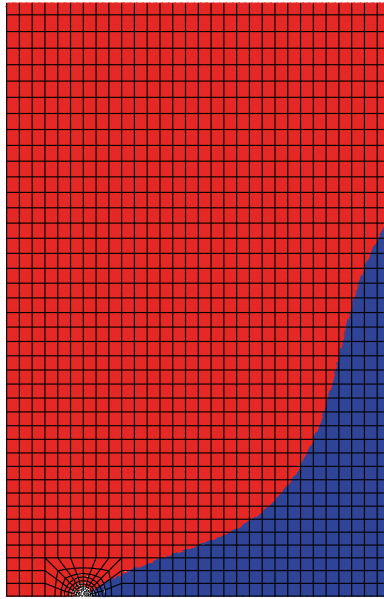
Step: Loading Step  
 Increment 63: Step Time = 9.8388E-02  
 Primary Var: PEEQ

**Figur 8.** Uppnådd gränslast för  $R/t = 8$  och  $a/t = 0.8$  med tryck på sprickytan.



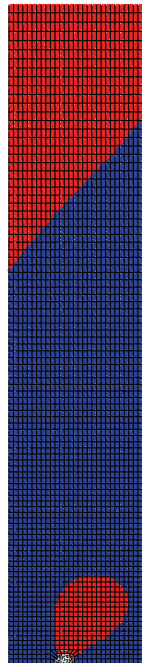
Step: Loading Step  
 Increment 20: Step Time = 0.1126  
 Primary Var: PEEQ

**Figur 9.** Uppnådd gränslast för  $R/t = 20$  och  $a/t = 0.2$  utan tryck på sprickytan.



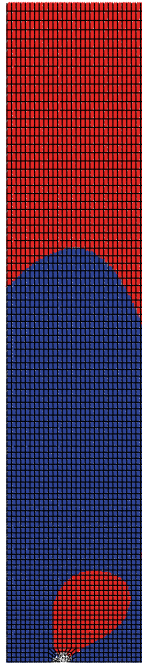
Step: Loading Step  
 Increment 22: Step Time = 0.1126  
 Primary Var: PEEQ

**Figur 10.** Uppnådd gränslast för  $R/t = 20$  och  $a/t = 0.2$  med tryck på sprickytan.



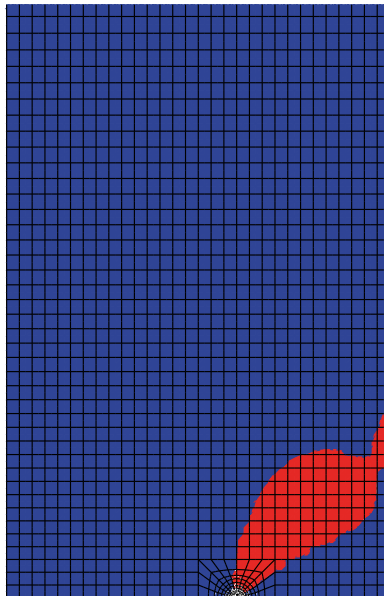
Step: Loading Step  
 Increment 40: Step Time = 0.1118  
 Primary Var: PEEQ

**Figur 11.** Uppnådd gränslast för  $R/t = 20$  och  $a/t = 0.4$  utan tryck på sprickytan.



Step: Loading Step  
Increment 36: Step Time = 0.1115  
Primary Var: PEEQ

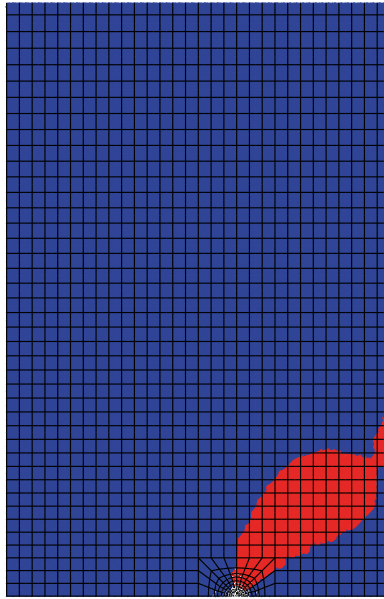
**Figur 12.** Uppnådd gränslast för  $R/t = 20$  och  $a/t = 0.4$  med tryck på sprickytan.



Step: Loading Step  
Increment 60: Step Time = 8.5926E-02  
Primary Var: PEEQ

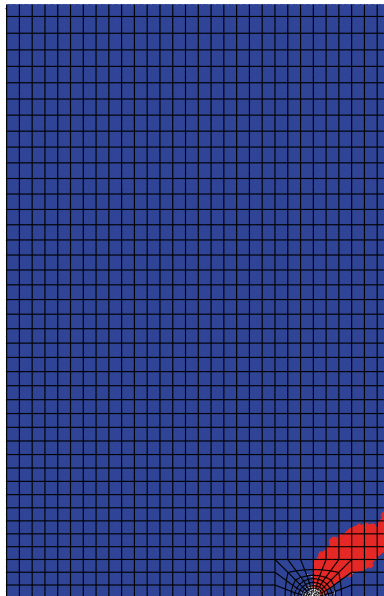
**Figur 13.** Uppnådd gränslast för  $R/t = 20$  och  $a/t = 0.6$  utan tryck på sprickytan.





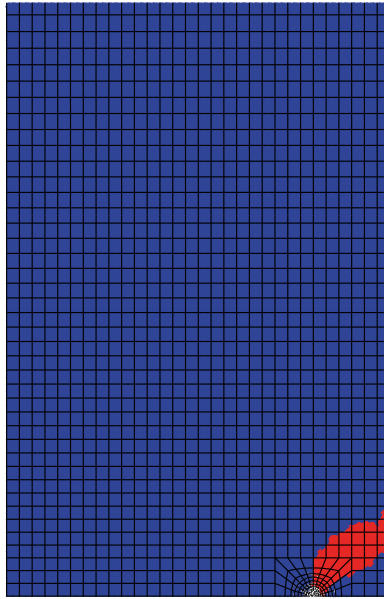
Step: Loading Step  
Increment 58: Step Time = 8.0612E-02  
Primary Var: PEEQ

**Figur 14.** Uppnådd gränslast för  $R/t = 20$  och  $a/t = 0.6$  med tryck på sprickytan.



Step: Loading Step  
Increment 62: Step Time = 4.3852E-02  
Primary Var: PEEQ

**Figur 15.** Uppnådd gränslast för  $R/t = 20$  och  $a/t = 0.8$  utan tryck på sprickytan.



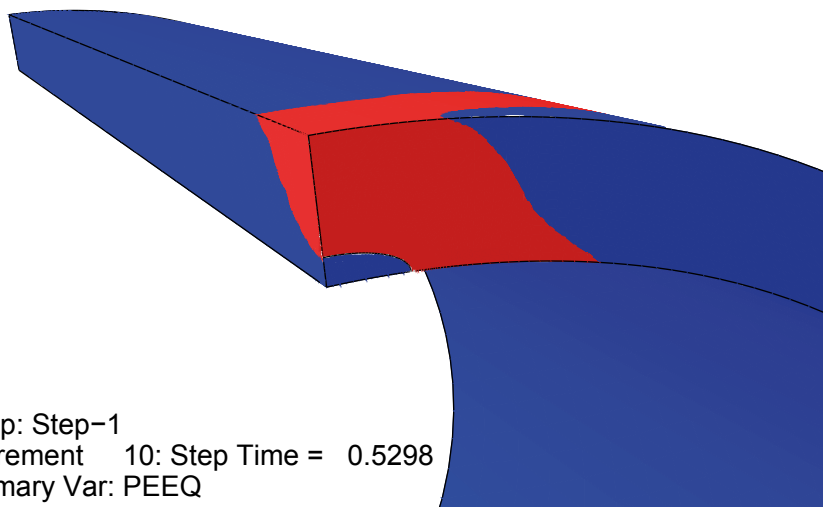
Step: Loading Step  
Increment 70: Step Time = 4.0426E-02  
Primary Var: PEEQ

**Figur 16.** Uppnådd gränslast för  $R/t = 20$  och  $a/t = 0.8$  med tryck på sprickytan.

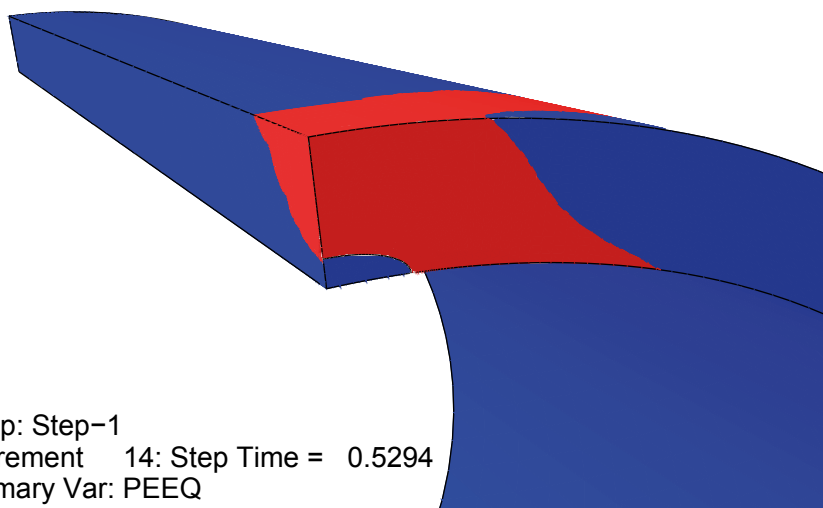
### Bilaga 3. Gränslasttryck för enaxligt spänningstillstånd och semielliptiska omkretssprickor

I Figur 1 till Figur 16 visas de tidsteg då gränslasten uppnås vid enaxligt spänningstillstånd för en semielliptisk omkretsspricka. De röda områdena visar var plastisk deformation skett.

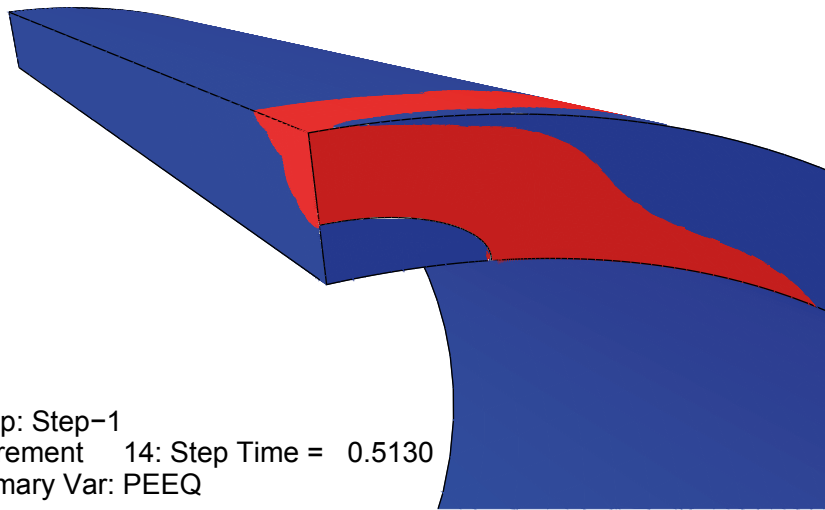
Det inre trycket,  $p$ , är pålagt linjärt från 0 till 100 MPa vid tiden (*Step Time*) 1.0. Därav fås gränslasttrycket,  $P_a$ , genom att multiplicera det i figurerna angivna *Step Time* med 100.



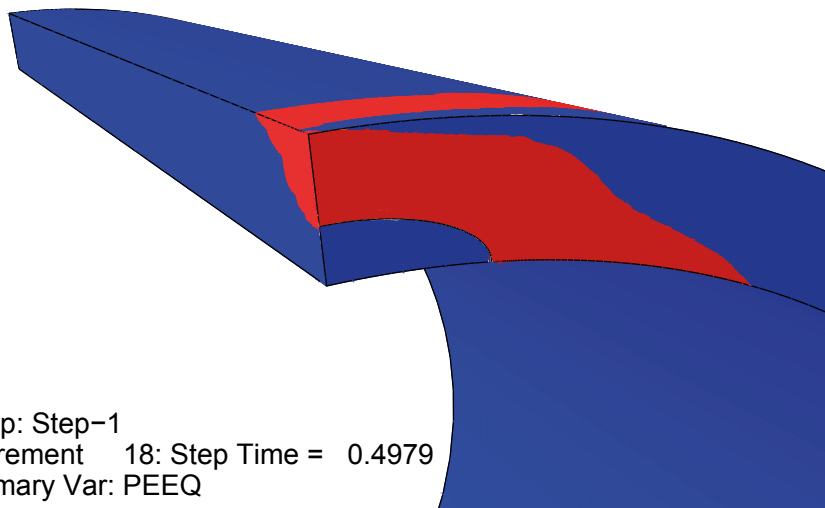
**Figur 1.** Uppnådd gränslast för  $R/t = 8$  och  $a/t = 0.2$  utan tryck på sprickytan.



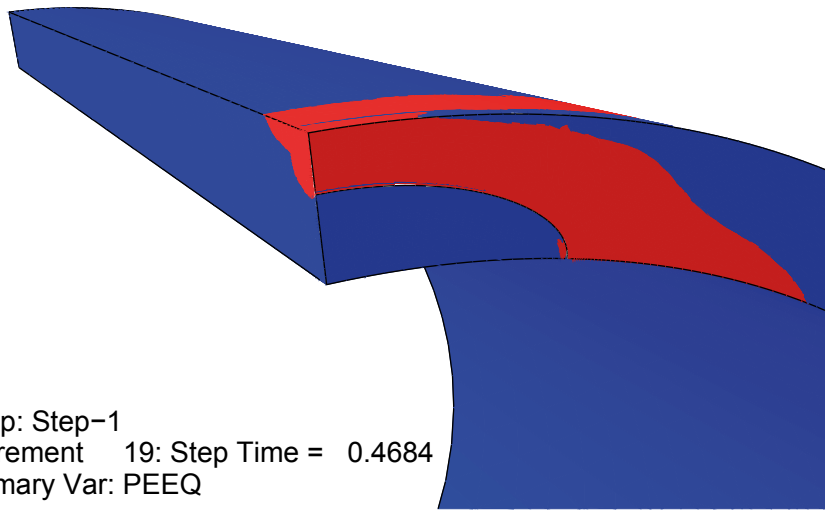
**Figur 2.** Uppnådd gränslast för  $R/t = 8$  och  $a/t = 0.2$  med tryck på sprickytan.



**Figur 3.** Uppnådd gränslast för  $R/t = 8$  och  $a/t = 0.4$  utan tryck på sprickytan.

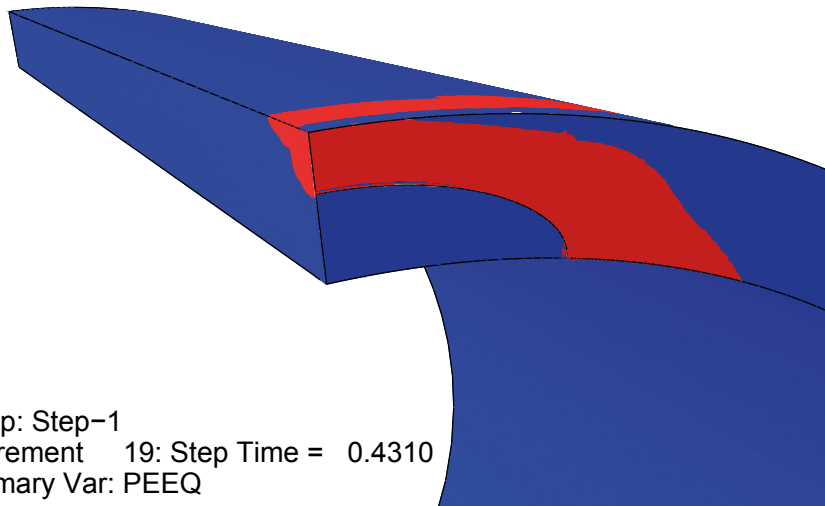


**Figur 4.** Uppnådd gränslast för  $R/t = 8$  och  $a/t = 0.4$  med tryck på sprickytan.



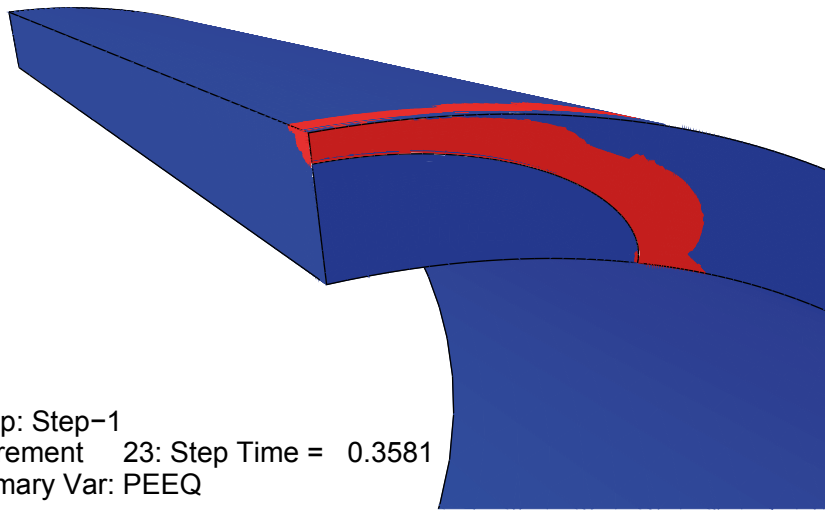
Step: Step-1  
 Increment 19: Step Time = 0.4684  
 Primary Var: PEEQ

**Figur 5.** Uppnådd gränslast för  $R/t = 8$  och  $a/t = 0.6$  utan tryck på sprickytan.

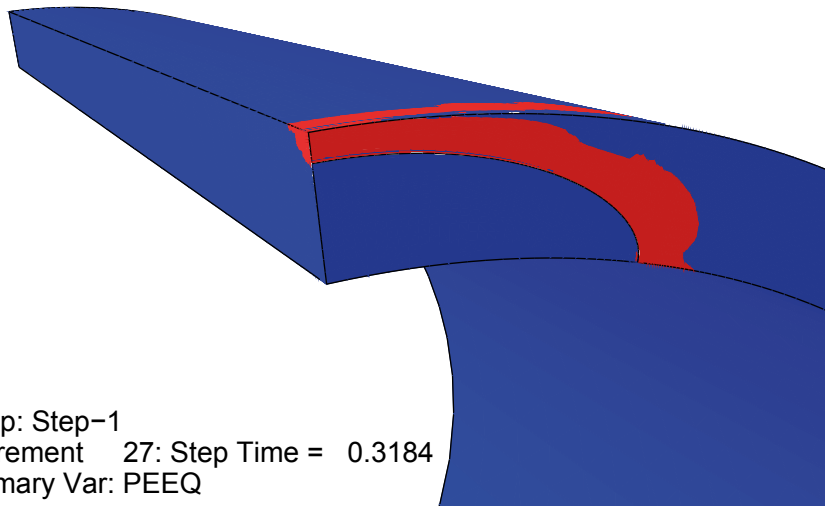


Step: Step-1  
 Increment 19: Step Time = 0.4310  
 Primary Var: PEEQ

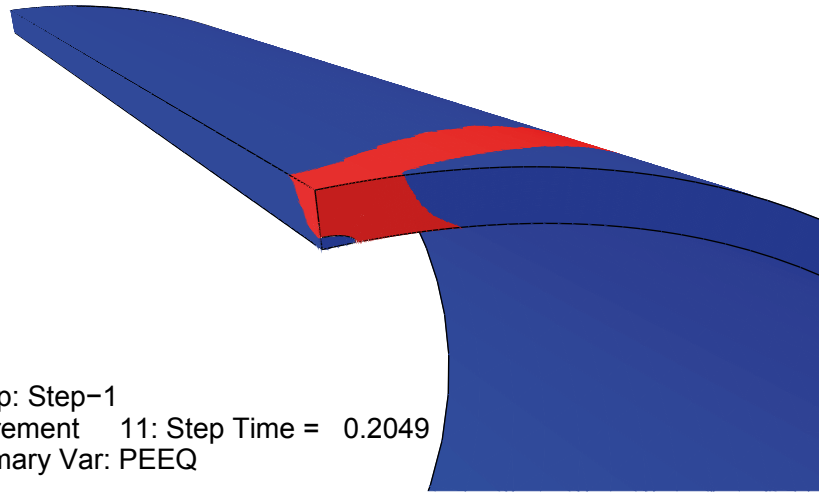
**Figur 6.** Uppnådd gränslast för  $R/t = 8$  och  $a/t = 0.6$  med tryck på sprickytan.



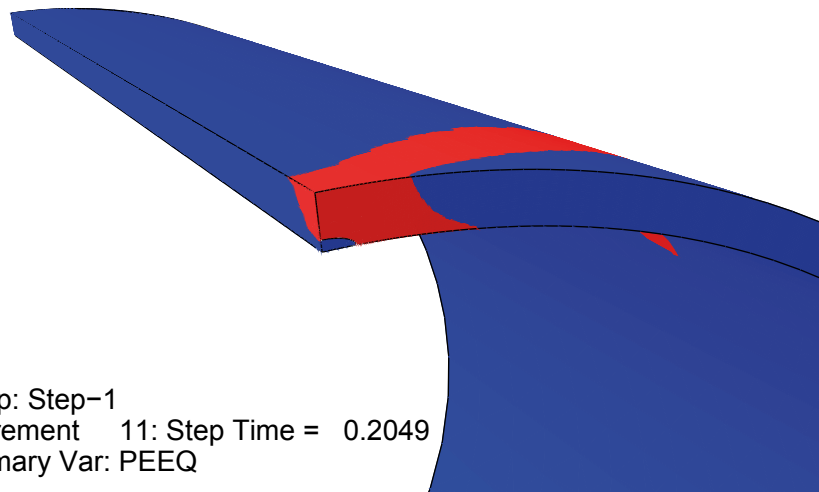
**Figur 7.** Uppnådd gränslast för  $R/t = 8$  och  $a/t = 0.8$  utan tryck på sprickytan.



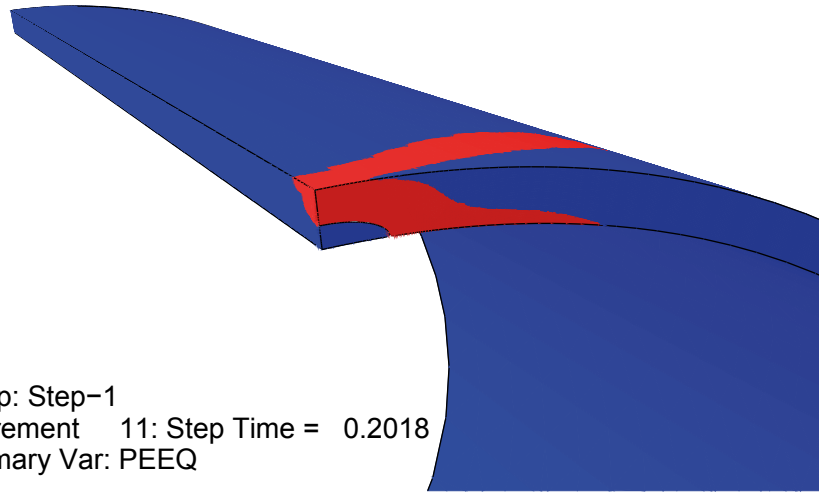
**Figur 8.** Uppnådd gränslast för  $R/t = 8$  och  $a/t = 0.8$  med tryck på sprickytan.



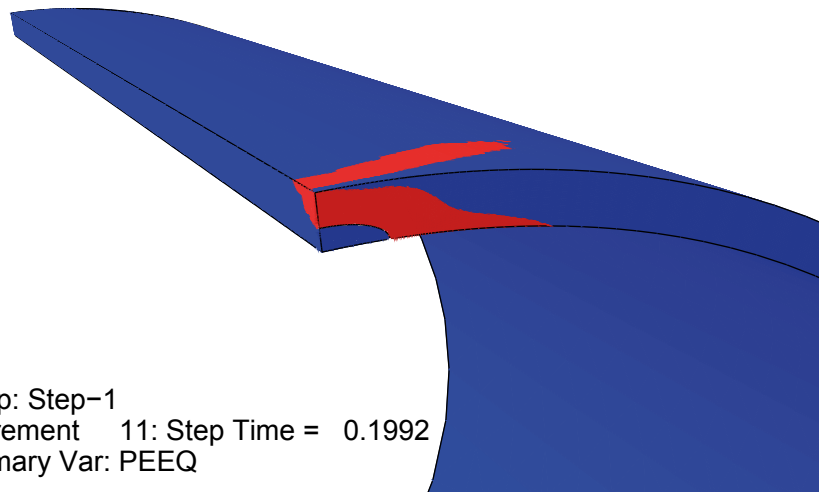
**Figur 9.** Uppnådd gränslast för  $R/t = 20$  och  $a/t = 0.2$  utan tryck på sprickytan.



**Figur 10.** Uppnådd gränslast för  $R/t = 20$  och  $a/t = 0.2$  med tryck på sprickytan.

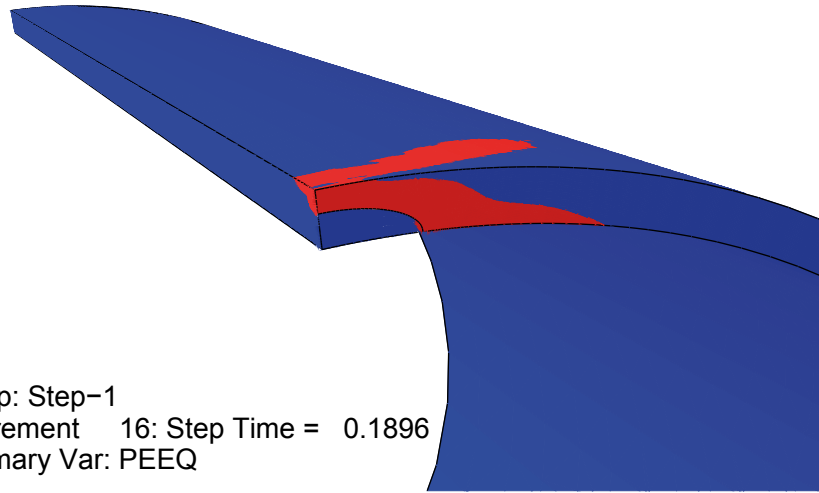


**Figur 11.** Uppnådd gränslast för  $R/t = 20$  och  $a/t = 0.4$  utan tryck på sprickytan.

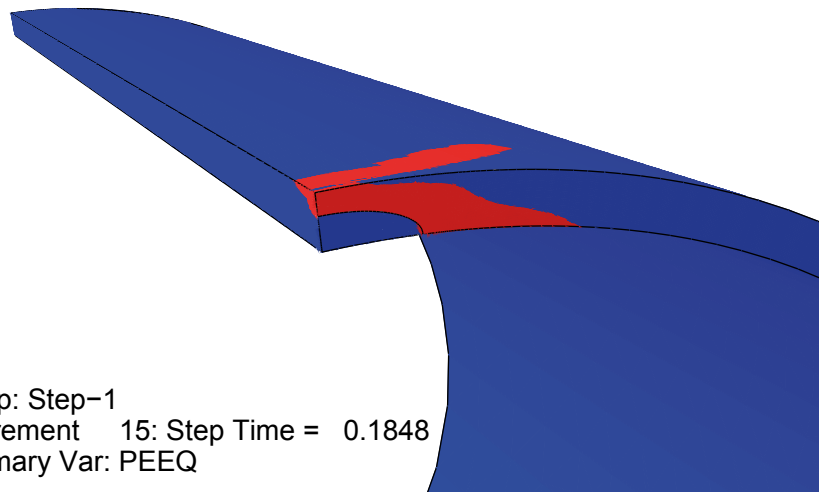


**Figur 12.** Uppnådd gränslast för  $R/t = 20$  och  $a/t = 0.4$  med tryck på sprickytan.

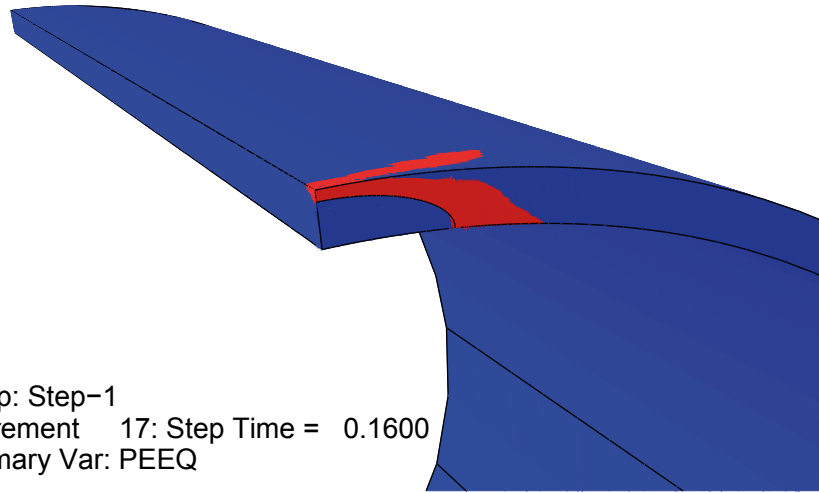




**Figur 13.** Uppnådd gränslast för  $R/t = 20$  och  $a/t = 0.6$  utan tryck på sprickytan.

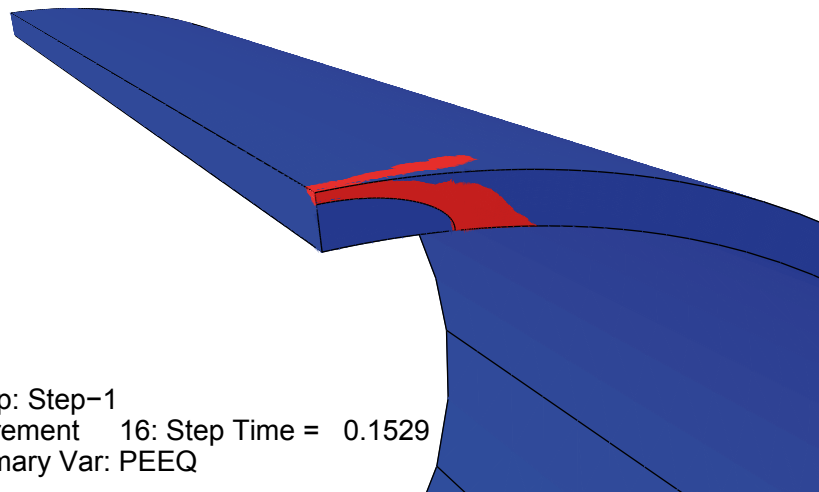


**Figur 14.** Uppnådd gränslast för  $R/t = 20$  och  $a/t = 0.6$  med tryck på sprickytan.



Step: Step-1  
 Increment 17: Step Time = 0.1600  
 Primary Var: PEEQ

**Figur 15.** Uppnådd gränslast för  $R/t = 20$  och  $a/t = 0.8$  utan tryck på sprickytan.



Step: Step-1  
 Increment 16: Step Time = 0.1529  
 Primary Var: PEEQ

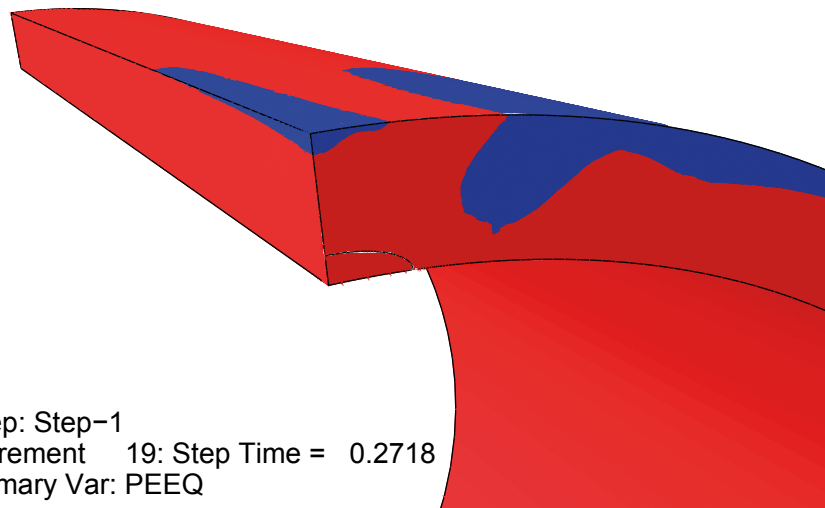
**Figur 16.** Uppnådd gränslast för  $R/t = 20$  och  $a/t = 0.8$  med tryck på sprickytan.

## Bilaga 4. Gränslasttryck för fleraxligt spänningstillstånd och semielliptiska omkretssprickor

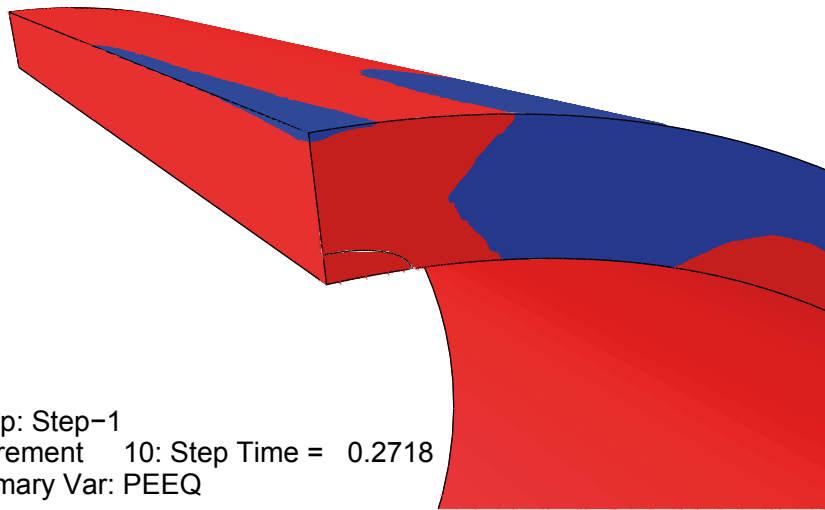
I Figur 1 till Figur 16 visas de tidsteg då gränslasten uppnås vid fleraxligt spänningstillstånd för en semielliptisk omkretsspricka. De röda områdena visar var plastisk deformation skett.

Vid grunda sprickor kan det ses att sprickans betydelse är liten och att genomplastisering sker en bit bort från sprickan före dess att det sker i sprickans plan. Detta då det inre trycket skapar höga spänningar i omkretsled som bidrar till genomplastisering i större utsträckning än sprickan.

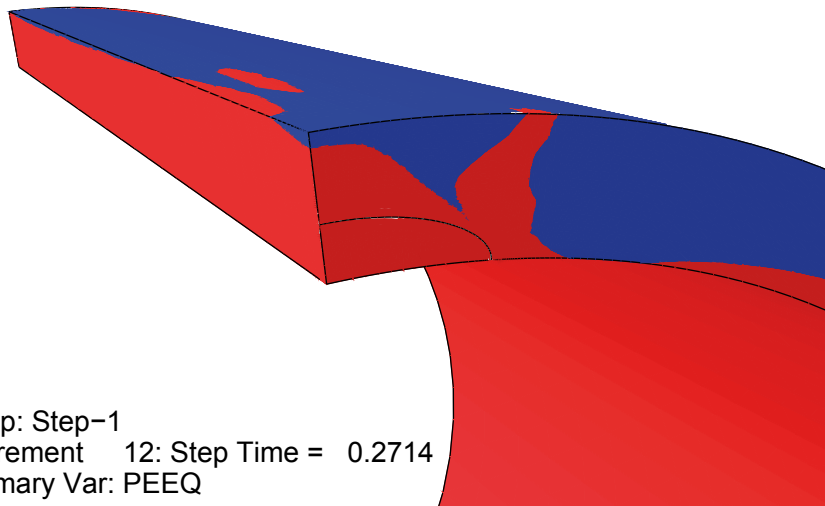
Det inre trycket,  $p$ , är pålagt linjärt från 0 till 100 MPa vid tiden (*Step Time*) 1.0. Därav fås gränslasttrycket,  $P_a$ , genom att multiplicera det i figurerna angivna *Step Time* med 100.



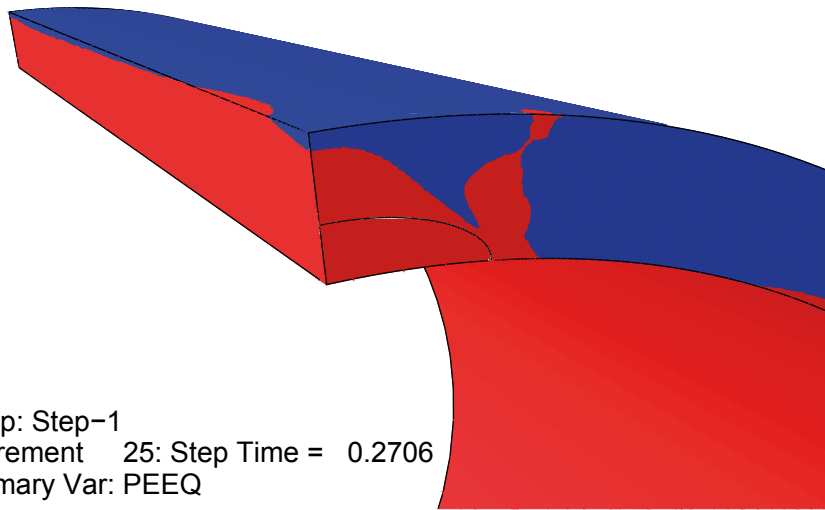
**Figur 1.** Uppnådd gränslast för  $R/t = 8$  och  $a/t = 0.2$  utan tryck på sprickytan.



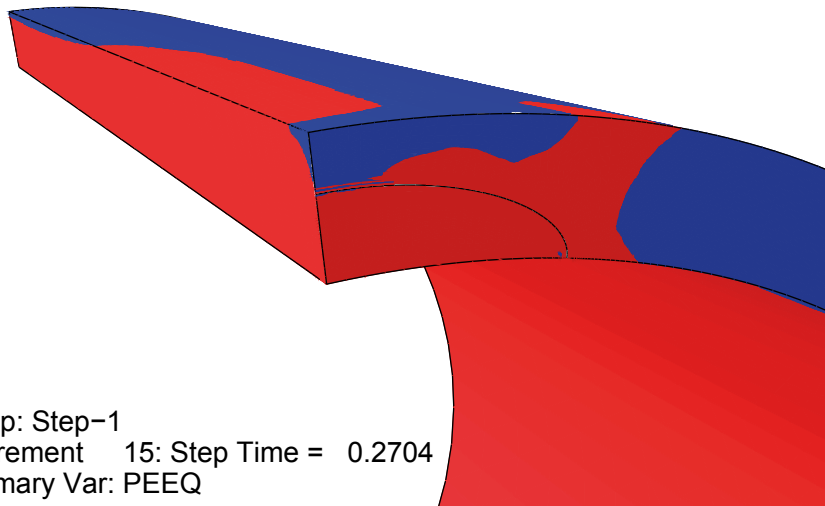
**Figur 2.** Uppnådd gränslast för  $R/t = 8$  och  $a/t = 0.2$  med tryck på sprickytan.



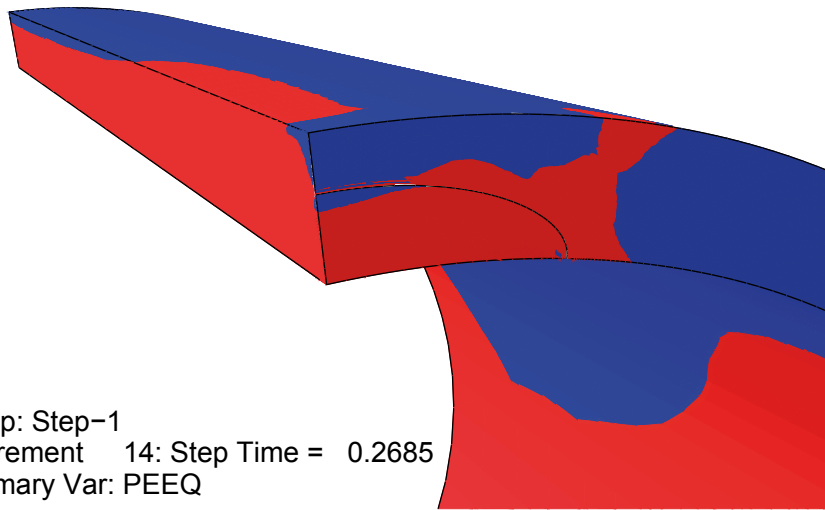
**Figur 3.** Uppnådd gränslast för  $R/t = 8$  och  $a/t = 0.4$  utan tryck på sprickytan.



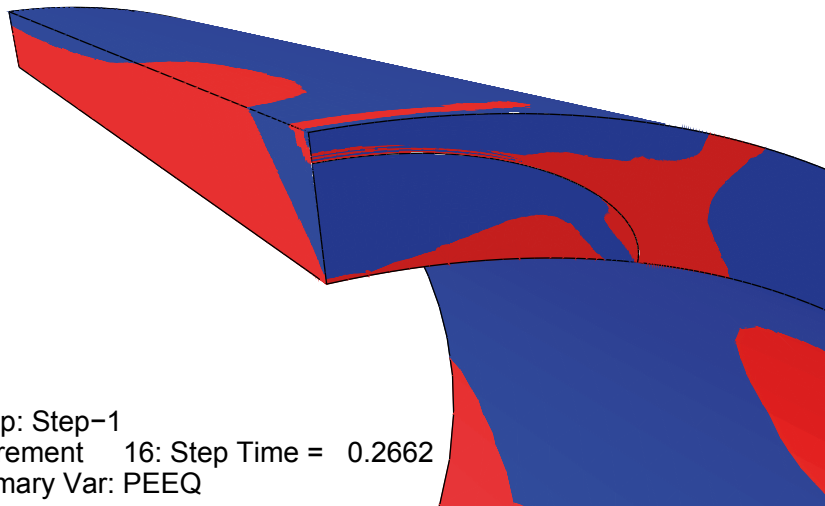
**Figur 4.** Uppnådd gränslast för  $R/t = 8$  och  $a/t = 0.4$  med tryck på sprickytan.



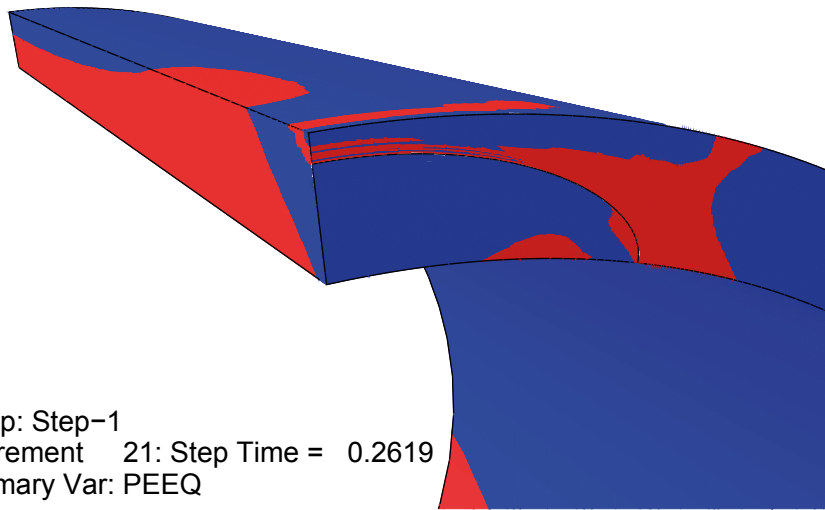
**Figur 5.** Uppnådd gränslast för  $R/t = 8$  och  $a/t = 0.6$  utan tryck på sprickytan.



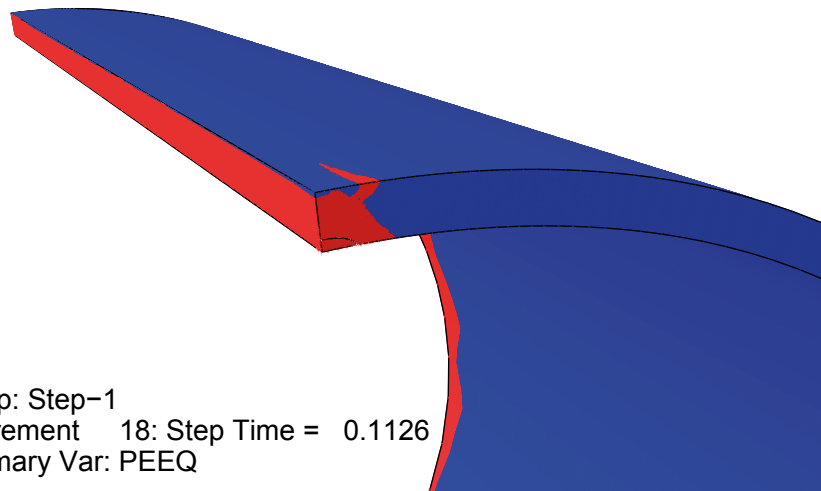
**Figur 6.** Uppnådd gränslast för  $R/t = 8$  och  $a/t = 0.6$  med tryck på sprickytan.



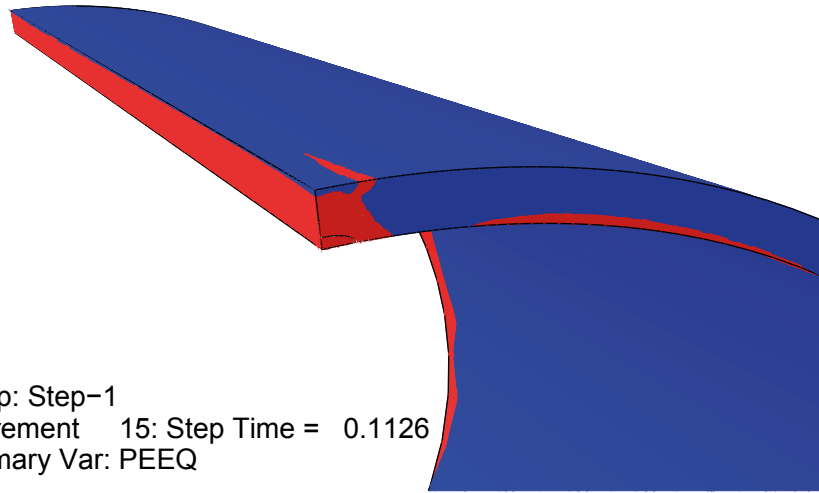
**Figur 7.** Uppnådd gränslast för  $R/t = 8$  och  $a/t = 0.8$  utan tryck på sprickytan.



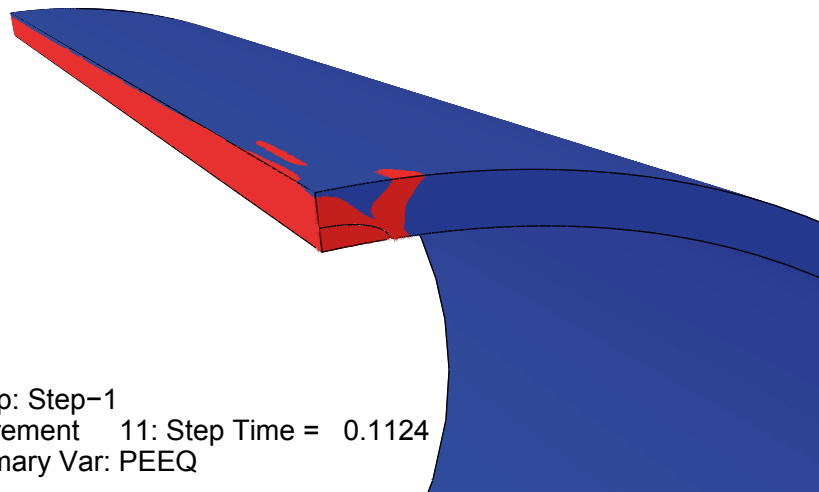
**Figur 8.** Uppnådd gränslast för  $R/t = 8$  och  $a/t = 0.8$  med tryck på sprickytan.



**Figur 9.** Uppnådd gränslast för  $R/t = 20$  och  $a/t = 0.2$  utan tryck på sprickytan.

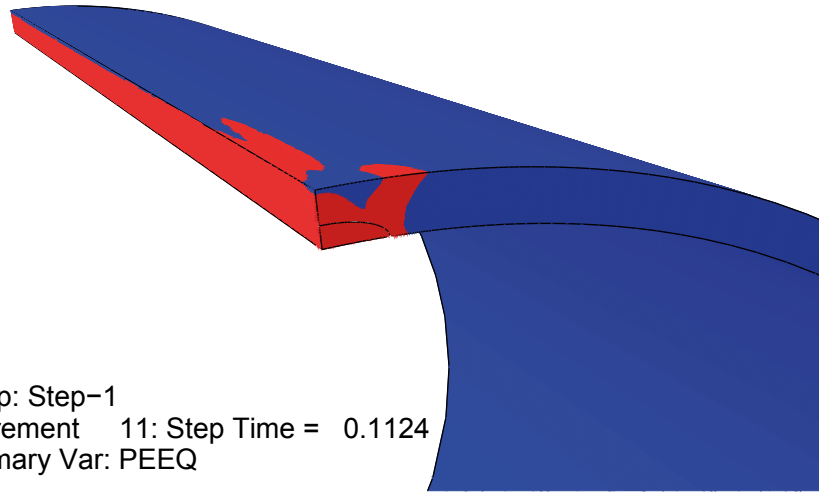


**Figur 10.** Uppnådd gränslast för  $R/t = 20$  och  $a/t = 0.2$  med tryck på sprickytan.



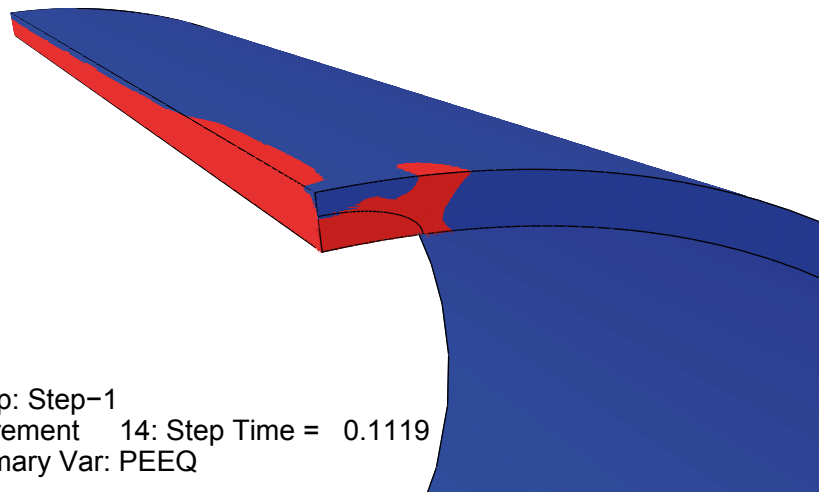
**Figur 11.** Uppnådd gränslast för  $R/t = 20$  och  $a/t = 0.4$  utan tryck på sprickytan.





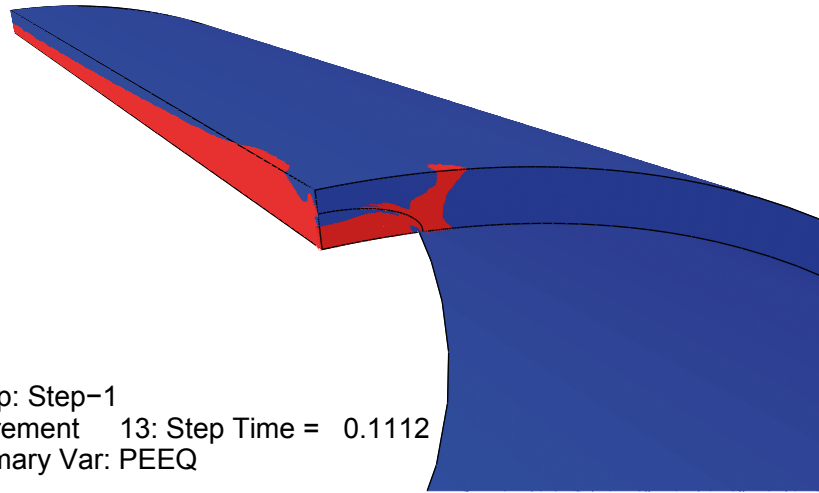
Step: Step-1  
 Increment 11: Step Time = 0.1124  
 Primary Var: PEEQ

**Figur 12.** Uppnådd gränslast för  $R/t = 20$  och  $a/t = 0.4$  med tryck på sprickytan.



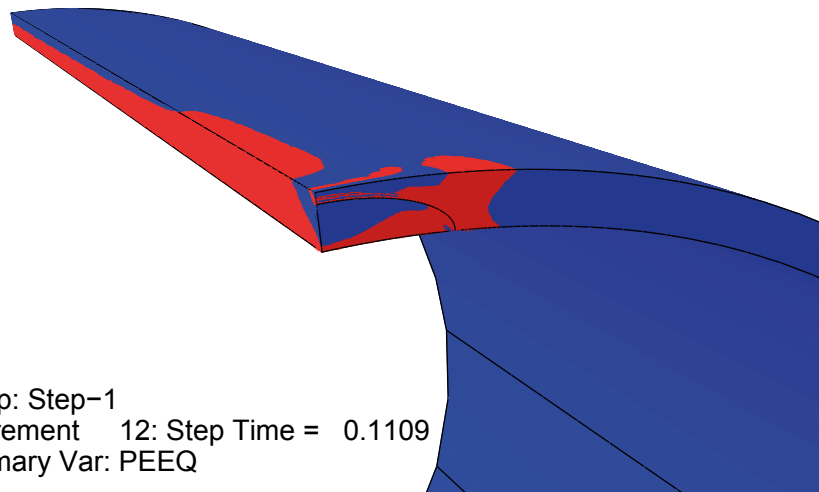
Step: Step-1  
 Increment 14: Step Time = 0.1119  
 Primary Var: PEEQ

**Figur 13.** Uppnådd gränslast för  $R/t = 20$  och  $a/t = 0.6$  utan tryck på sprickytan.



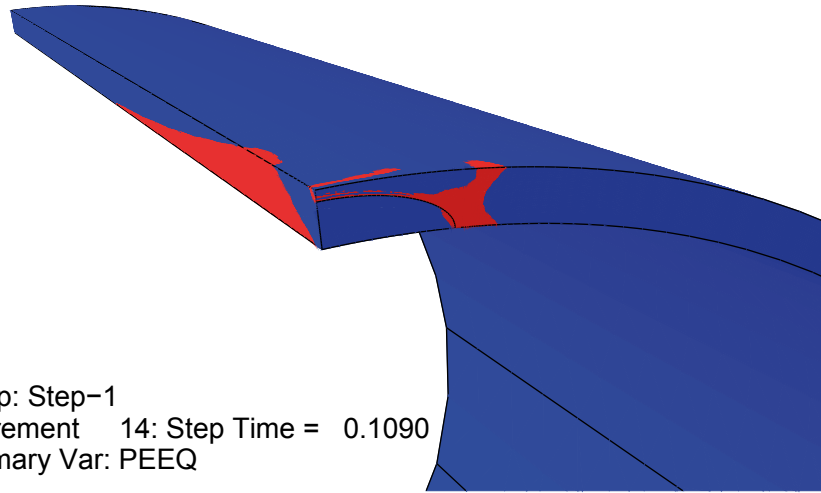
Step: Step-1  
 Increment 13: Step Time = 0.1112  
 Primary Var: PEEQ

**Figur 14.** Uppnådd gränslast för  $R/t = 20$  och  $a/t = 0.6$  med tryck på sprickytan.



Step: Step-1  
 Increment 12: Step Time = 0.1109  
 Primary Var: PEEQ

**Figur 15.** Uppnådd gränslast för  $R/t = 20$  och  $a/t = 0.8$  utan tryck på sprickytan.



Step: Step-1  
Increment 14: Step Time = 0.1090  
Primary Var: PEEQ

**Figur 16.** Uppnådd gränslast för  $R/t = 20$  och  $a/t = 0.8$  med tryck på sprickytan.



2017:03

Strålsäkerhetsmyndigheten har ett samlat ansvar för att samhället är strålsäkert. Vi arbetar för att uppnå strålsäkerhet inom en rad områden: kärnkraft, sjukvård samt kommersiella produkter och tjänster. Dessutom arbetar vi med skydd mot naturlig strålning och för att höja strålsäkerheten internationellt.

Myndigheten verkar pådrivande och förebyggande för att skydda människor och miljö från oönskade effekter av strålning, nu och i framtiden. Vi ger ut föreskrifter och kontrollerar genom tillsyn att de efterlevs, vi stödjer forskning, utbildar, informerar och ger råd. Verksamheter med strålning kräver i många fall tillstånd från myndigheten. Vi har krisberedskap dygnet runt för att kunna begränsa effekterna av olyckor med strålning och av avsiktlig spridning av radioaktiva ämnen. Vi deltar i internationella samarbeten för att öka strålsäkerheten och finansierar projekt som syftar till att höja strålsäkerheten i vissa östeuropeiska länder.

Strålsäkerhetsmyndigheten sorterar under Miljödepartementet. Hos oss arbetar drygt 300 personer med kompetens inom teknik, naturvetenskap, beteendevetenskap, juridik, ekonomi och kommunikation. Myndigheten är certifierad inom kvalitet, miljö och arbetsmiljö.

Strålsäkerhetsmyndigheten  
Swedish Radiation Safety Authority

SE-17116 Stockholm  
Solna strandväg 96

Tel: +46 8 799 40 00  
Fax: +46 8 799 40 10

E-mail: [registrator@ssm.se](mailto:registrator@ssm.se)  
Web: [stralsakerhetsmyndigheten.se](http://stralsakerhetsmyndigheten.se)