

## Effekt av bitumensvällning i silo och BMA

Henrik von Schenck, Fredrik Bultmark  
Svensk Kärnbränslehantering AB

Januari 2014

**Svensk Kärnbränslehantering AB**

Swedish Nuclear Fuel  
and Waste Management Co

Box 250, SE-101 24 Stockholm  
Phone +46 8 459 84 00



ISSN 1402-3091

SKB R-13-12

ID 1331729

# **Effekt av bitumensvällning i silo och BMA**

Henrik von Schenck, Fredrik Bultmark  
Svensk Kärnbränslehantering AB

Januari 2014

# Sammanfattning

SSM (2011) gör bedömningen att SKB måste bevaka kunskapsutvecklingen rörande svällningen av bitumeninjutet avfall och hantera frågan med ett stort mått av konservatism i sina säkerhetsanalyser.

I denna rapport redovisas strukturmekaniska beräkningar utförda med mjukvaran COMSOL Multiphysics. Modelleringen syftar till att bättre förstå den påverkan som svällning av bitumeninjutet avfall kan ha på silodelen och på BMA i SFR. Ett grundläggande krav är att svällande avfall inte får skada de yttre barriärerna i förvaren.

Silon representerades i en beräkningsmodell av ett radiellt tvärsnitt genom konstruktionen. Bitumenkokiller och bitumenfat placerades i nio centralt placerade schakt. Svälltrycket visade sig kunna orsaka skador på kringgjutningsbruk, schaktväggar och avfallskollin, i första hand angränsande till schakten med bitumenkokiller. Placeras bitumenkokiller närmare silons periferi förväntas även här skador i hörnen av schaktväggarna. De lägre svälltryck som antas för bitumenfat väntas för samma konfiguration inte skapa skador i schaktväggarna. Den yttre siloväggen påverkades inte i något undersökt fall.

För BMA utfördes beräkningar för ett enskilt fack tänkt att innehålla bitumenkonditionerat avfall. Modellen utvärderade effekten av svällning på fackets armerade betongelement för ett fall då BMA inte återfyllts och ett fall då BMA återfyllts med betong. Utan återfyllnad beräknades skador uppstå i ytterväggar, innerväggar, golv och tak vid relativt måttliga svälltryck. Även om BMA återfylls med betong så kommer dess betonggolv fortsatt vara känsligt för svälltryck. Om fack i BMA innehållande bitumenkonditionerat avfall ska kringgjutats måste tillräcklig svällvolym säkerställas.

# Innehåll

<b>1</b>	<b>Silo</b>	7
1.1	Geometri och material	7
1.1.1	Kokiller med bitumeningjutet avfall – F.18	9
1.1.2	Fat med bitumeningjutet avfall – B.06	9
1.1.3	Kokiller med betongingjutet avfall	9
1.1.4	Fat med betongingjutet avfall	9
1.1.5	Kringjutningsbruk	9
1.1.6	Armerad betong	10
1.2	Matematisk Modell	10
1.2.1	Materialmodell	10
1.2.2	Randvillkor	10
1.2.3	Svälltryck	11
1.2.4	Skadekriterium	11
1.2.5	Mesh	11
1.3	Resultat	12
1.3.1	Skada i armerad betong	12
<b>2</b>	<b>BMA</b>	17
2.1	Geometri	17
2.1.1	Fat med bitumeningjutet avfall – B.05	18
2.1.2	Fat med bitumeningjutet avfall – B.05:2	18
2.1.3	Fat med bitumeningjutet avfall – F.05	18
2.1.4	Kokiller med bitumeningjutet avfall – F.17	18
2.1.5	Betongkokiller – F.15, R.99 och R.01	18
2.1.6	Tillgänglig svällvolym	19
2.2	Material	19
2.2.1	Armerad betong	19
2.2.2	Återfyllnadsmaterial	20
2.2.3	Utfyllnadsmaterial golv	20
2.3	Matematisk Modell	20
2.3.1	Materialmodell	20
2.3.2	Randvillkor	20
2.3.3	Svälltryck	20
2.3.4	Skadekriterium	21
2.3.5	Mesh	21
2.4	Resultat	21
<b>3</b>	<b>Slutsatser och Diskussion</b>	25
3.1	Silo	25
3.2	BMA	25
	<b>Referenser</b>	27
	<b>Bilaga 1</b>	29

# 1 Silo

Siloförvaret består av ett bergrum i vilket en fristående betongcylinder uppförts (se Figur 1-1). Cylinderns höjd är 52 m och dess diameter 27,6 m. I Silon deponeras medelaktivt avfall solidifierat i cement eller bitumen. Avfallskokiller och fat deponeras i vertikala schakt och kringgjuts efter hand med bruk. Efter förslutning av förvaret kommer inträngande grundvatten mätta betong och avfall. Tiden för vattenmättnad av Silon har uppskattats till 25 år (Holmén och Stigsson 2001). När vatten kommer i kontakt med jonbytarmassor och indunstarkoncentrat stabiliserade i bitumen kan dessa avfallspaket börja svälla och interna tryck uppstå.

## 1.1 Geometri och material

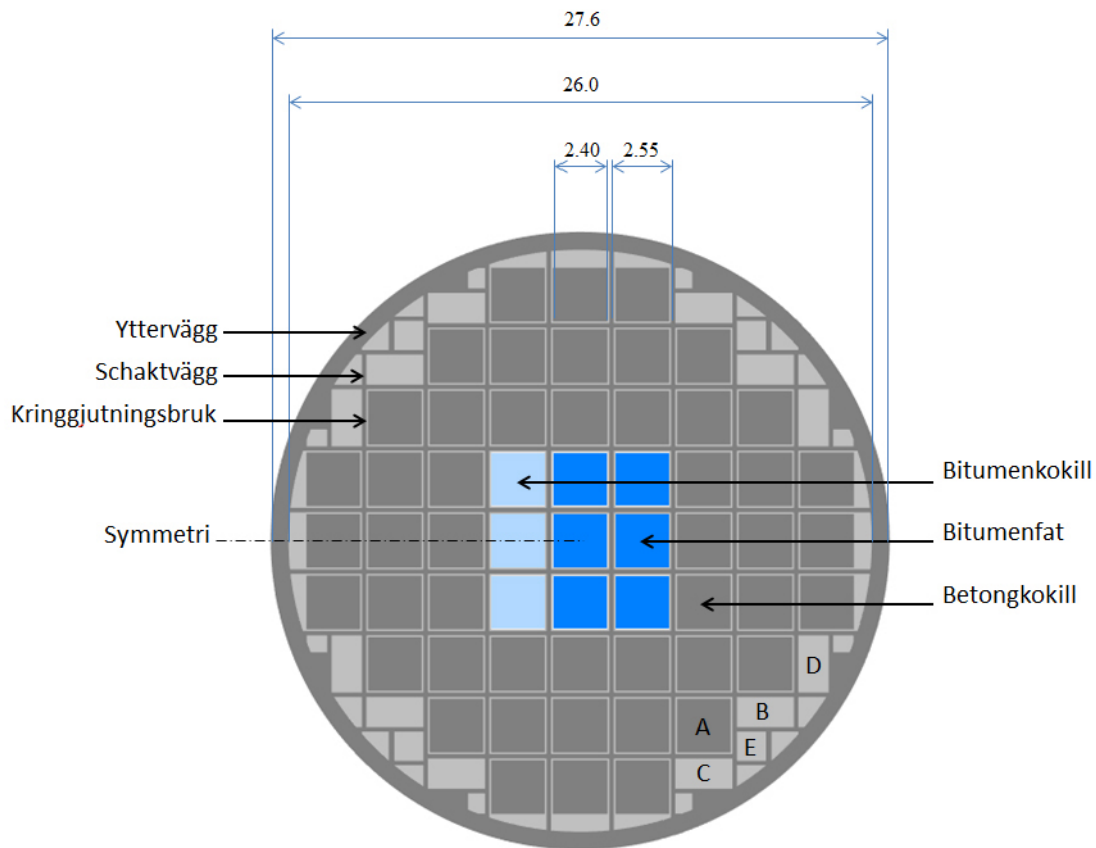
En modell av ett tvärsnitt av silokonstruktionen undersöker den mekaniska påverkan av svällning i radiell led. Tvärsnittsgeometrin med avfallstyper enligt rådande fördelning visas i Figur 1-2.

En teoretisk avfallsfördelning för vilken ytterligare beräkningar gjorts visas i Figur 1-3.

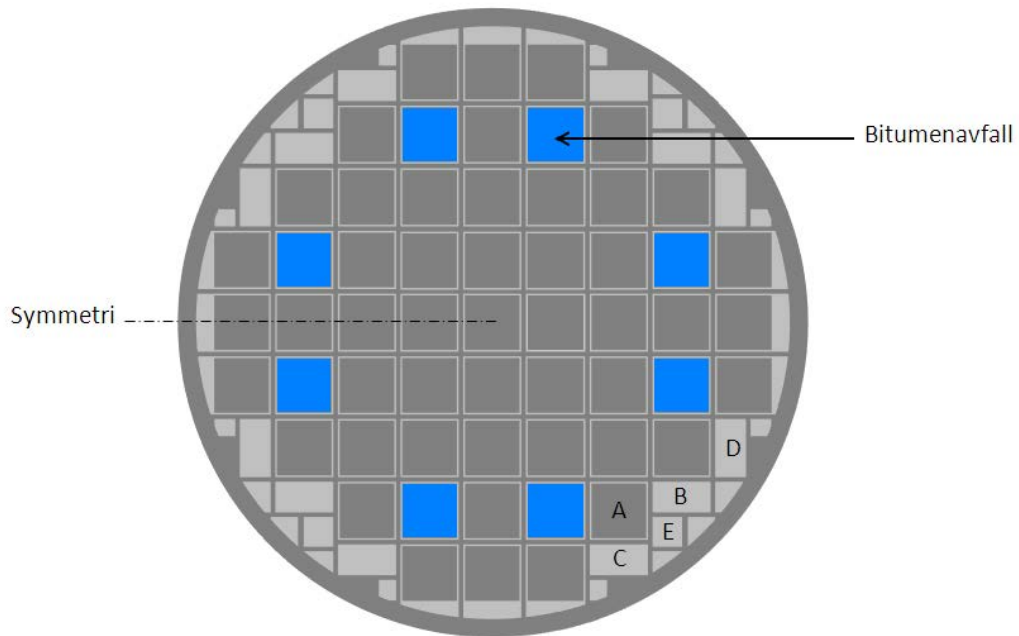
Schakt av typ A håller fyra betongkokiller (kokill med betong- eller cementkonditionerat avfall) eller fyra bitumenkokiller (kokill med bitumenkonditionerat avfall). Betongfat (fat med betong- eller cementkonditionerat avfall) och bitumenfat (fat med bitumenkonditionerat avfall) placeras också i dessa schakt. Fyra fatbrickor med fyra fat på varje bricka deponeras i varje lager.



*Figur 1-1. Förvarsdelen Silon i SFR.*



**Figur 1-2.** Skiss av ett radiellt tvärsnitt genom silon med rådande avfallsfördelning. Mått angivna i meter.



**Figur 1-3.** Skiss av ett radiellt tvärsnitt genom silon med teoretisk avfallsfördelning.

### 1.1.1 Kokiller med bitumeningjutet avfall – F.18

Jonbytarmassa torkas och värmebehandlas upp till 150 °C i 15 h, vilket leder till degradering av åtminstone anjonisk jonbytare. I ett andra steg homogeniseras avfallet med bitumen. Processen är satsvis. Produkten tappas i en kvadratisk plåtkokill med sidan 1200 mm. Fyllnadsgraden är 90 %. I ett schakt av typen A står fyra kokiller sida vid sida utan mellanrum. I modellen representeras en sådan grupp av en kvadrat med sidan 2400 mm. Gruppen kringgjuts med bruk i schaktet. Normalt blandningsförhållande för bitumeningjutet avfall är 40 % jonbytarmassa.

### 1.1.2 Fat med bitumeningjutet avfall – B.06

Varmt bitumen (135–140 °C) och avfall uppslammat i vatten pumpas in i en tunnfilmsindunstare (uppvärmd till 220 °C). Under transporten genom indunstaren förångas vatten och avfallet blandas med bitumen. Det uppmätta vatteninnehållet är normalt mindre än 2 %, baserat på torrsvikt (Nilsson et al. 1988). Processen är kontinuerlig. Fat med volymen 216 liter fylls med 185 liter bitumeningjutet avfall. Svällvolymen för ett enskilt fat är 17 %. Faten placeras i grupper om fyra på en fatbricka med yttermått 1200 × 1200 mm. Fatbrickan är försedd med en svällkropp vars tomvolym är 42 liter som syftar till att ta upp radiell svällning. Den tillgängliga svällvolymen tillåter då en volymexpansion på ca 22 % per fat.

Fyra fatbrickor placeras i en grupp i ett schakt av typ A, varefter de kringgjuts. I beräkningsmodellen representeras en fatgrupp av en kvadrat med sidan 2400 mm. Maximala viktsandelen jonbytarmassa i fat fyllda fram till 1992 är 40 %. Maximala viktsandelen jonbytarmassa i fat fyllda från 1993 är 30 %.

### 1.1.3 Kokiller med betongingjutet avfall

Huvuddelen av avfallet placerat i schakt av typ A utanför de nio centrala schakten är betongingjutet i armerade betongkokiller eller i plåtkokiller. Materialegenskaperna hos dessa kokiller antas vara desamma som redovisas under avsnittet Armerad betong, nedan.

I modellen representeras således alla fack utanför de nio centrala facken av samma armerade betongmaterial. En grupp om fyra kokiller ges av en kvadrat med sidan 2400 m. Gruppen kringgjuts med bruk i schaktet.

### 1.1.4 Fat med betongingjutet avfall

Fat med betongingjutet avfall kan förekomma i schakt av typ A. Faten placeras i grupper om fyra på en fatbricka med yttermått 1200 × 1200 mm. Fyra fatbrickor placeras i en grupp varefter de kringgjuts. I beräkningsmodellen representeras en fatgrupp av en kvadrat med sidan 2400 mm.

### 1.1.5 Kringjutningsbruk

Schakt av typen B-E är i beräkningsmodellen fyllda med enbart kringjutningsbruk. Kringjutningsbrukets tryckhållfasthet och densitet ges av specifikation, till exempel återgiven av Björkenstam (1997). E-modulen beräknades från dessa data med ledning av uttryck givna i Noguchi et al. (2009). Maximal påkänning på bruket orsakat av svällande avfall antas inträffa ca 25 år efter förslutning, då Silon mättats med vatten (Holmén och Stigsson 2001). Materialegenskaper hos bruket antas därför vara desamma som då driftskedet avslutats. Materialegenskaper har sammanställts i nedanstående tabell:

Tabell 1-1.

E-modul	12 GPa
Poissons tal	0,2
Densitet	2000 kg/m <sup>3</sup>
Draghållfasthet ( $f_{drag}$ )	0,5 MPa
Tryckhållfasthet ( $f_{tryck}$ )	4,5 MPa

### 1.1.6 Armerad betong

Schaktväggar samt silons yttervägg är gjorda av armerad K40 betong (Cederwall et al. 1990). Maximal påkänning på betongen orsakat av svällande avfall antas inträffa ca 25 år efter förslutning, då Silon mättats med vatten (Holmén och Stigsson 2001). Materialegenskaper antas därför vara desamma som då driftskedet avslutats. Följande materialegenskaper ansätts i modellen:

Tabell 1-2.

E-modul	33 GPa
Poissons tal	0,2
Densitet	2200 kg/m <sup>3</sup>
Draghållfasthet ( $f_{\text{drag}}$ )	1,95 MPa
Tryckhållfasthet ( $f_{\text{tryck}}$ )	28,5 MPa

## 1.2 Matematisk Modell

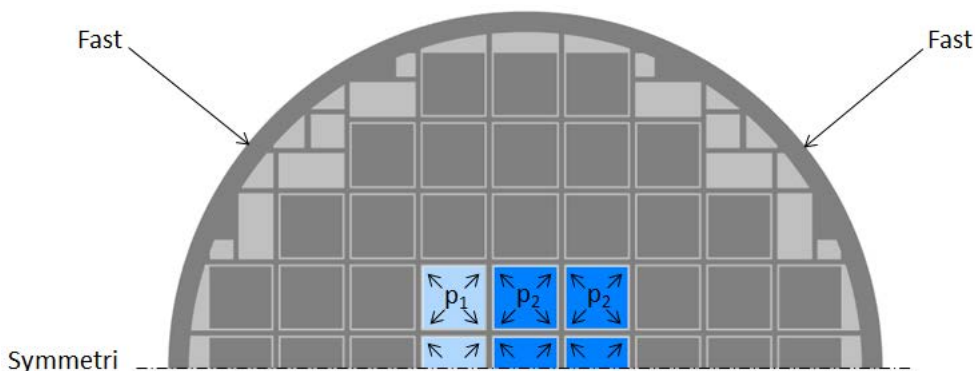
Hållfasthetsberäkningar genomfördes i finita elementprogrammet COMSOL Multiphysics, version 4.3.

### 1.2.1 Materialmodell

Samtliga material i beräkningsmodellen antas vara linjärt elastiska. Vid små laster beskrivs betong väl av en linjär materialmodell.

### 1.2.2 Randvillkor

Silons ytterväggar antas vara låsta. Halva tvärsnittet modelleras med symmetrivillkor på speglade randen. Tryckvillkor ansätts på väggar i schakt innehållande bitumenavfall. Trycken sätts som funktion av deformationen.



**Figur 1-4.** Randvillkor för beräkningsmodellens referensfall då svällande avfall placerat i de centrala schakten. Det inre trycket från bitumenkokiller ( $p_1$ ) är högre än från bitumenfat ( $p_2$ ).



### 1.2.3 Svälltryck

Jonbytarmassor ingjutna i bitumen sväller då materialet kommer i kontakt med vatten. I detta arbete antas att maximalt svälltryck uppnås då förvaret vattenmättats. För Silon uppskattas detta ta 25 år efter förslutning av förvaret (Holmén och Stigsson 2001). Graden av expansion beror på jonbytarmassans egenskaper (anjonisk, katjonisk, pulverform, eller partikelform) och förbehandling, samt på volymsandel och tillverkningsprocessen vid bitumeningjutningen.

Svälltrycket som funktion av volymsförändring ( $\Delta V$ ) har utvärderats inom SR-PSU (SKB 2014). För modelleringen utvalda data redovisas nedan:

Tabell 1-3.

	$\Delta V=0\%$	$\Delta V=10\%$	$\Delta V=20\%$	$\Delta V=30\%$
Svälltryck [MPa]	12	2,5	0,75	0,22

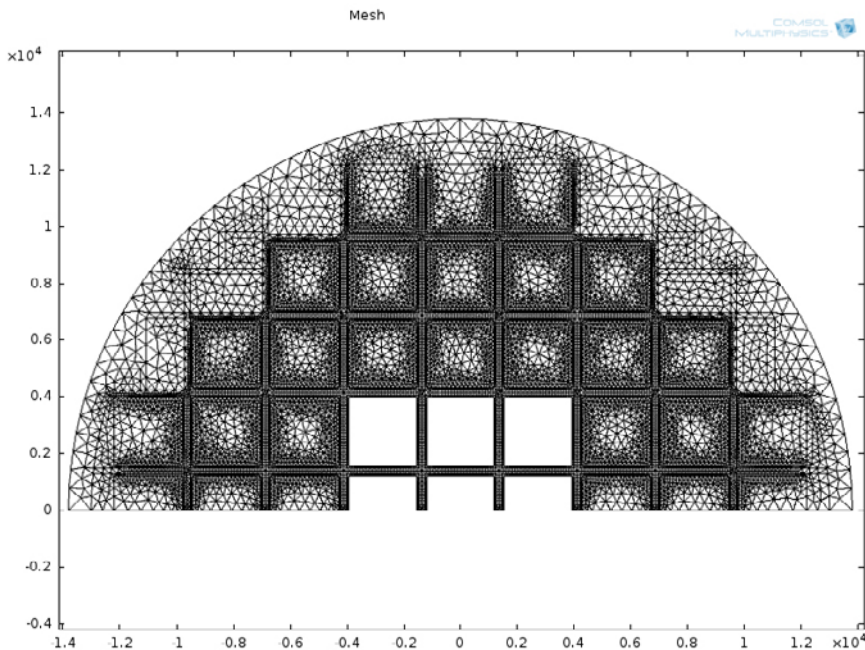
### 1.2.4 Skadekriterium

Skada i konstruktionen kan inträffa då huvudspänningen överstiger antingen materialets draghållfasthet ( $f_{\text{drag}}$ ) eller tryckhållfasthet ( $f_{\text{tryck}}$ ). En skadeparameter  $D$  definieras som största värdet av  $\sigma_1/f_{\text{drag}}$  och  $-\sigma_3/f_{\text{tryck}}$ , där  $\sigma_1$  är första huvudspänningen och  $\sigma_3$  är tredje huvudspänningen. Då  $D \geq 1$  finns risk att skada uppstår.

Skador i material löser upp spänningar i närområdet. Modelleringen tar inte hänsyn till detta. Området som indikerar risk för skada är större än området där skada uppstår.

### 1.2.5 Mesh

Geometrin diskretiseras i modellen av  $\sim 1,9 \cdot 10^4$  triangulära element. De nio centrala schaktens innerväggar utgör yttre ränder i modellen, varför deras inre tvärsnittsareor ej löses upp med ett mesh.



Figur 1-5. Modellen över Silons tvärsnitt diskretiseras med triangulära element.

## 1.3 Resultat

Resultat från sex beräkningsfall redovisas nedan:

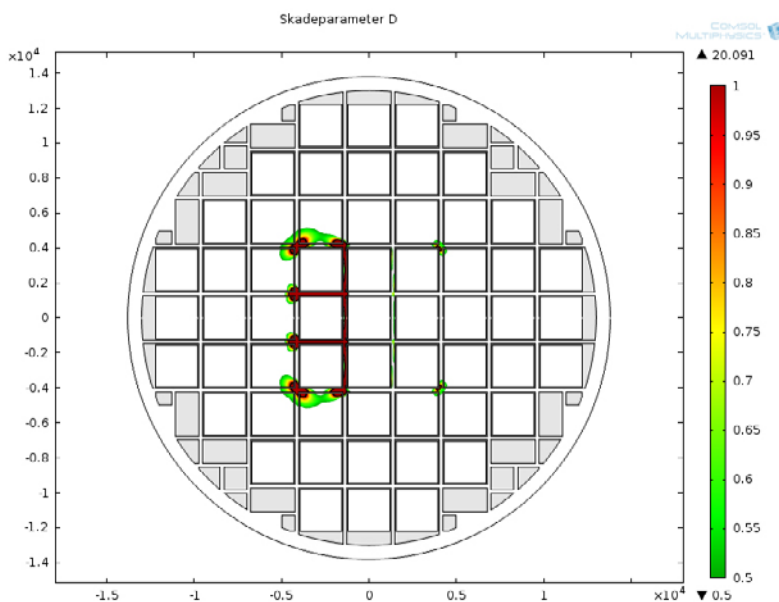
1. Referensfall. Bitumenkokiller placeras i tre schakt och bitumenfat placeras i sex schakt enligt Figur 1-2. Tillgänglig svällvolym  $\Delta V_{\text{fat}} = 22 \%$ ,  $\Delta V_{\text{kokill}} = 10 \%$ .
2. Voidvolym hos svällkropp ej tillgänglig. Bitumenkokiller placeras i tre schakt och bitumenfat placeras i sex schakt enligt Figur 1-2. Tillgänglig svällvolym  $\Delta V_{\text{fat}} = 17 \%$ ,  $\Delta V_{\text{kokill}} = 10 \%$ .
3. Ingen voidvolym tillgänglig. Bitumenkokiller placeras i tre schakt och bitumenfat placeras i sex schakt enligt Figur 1-2. Tillgänglig svällvolym  $\Delta V_{\text{fat}} = 0 \%$ ,  $\Delta V_{\text{kokill}} = 0 \%$ .
4. Enbart bitumenkokiller placeras i de nio centrala schakten. Tillgänglig svällvolym  $\Delta V_{\text{kokill}} = 10 \%$ .
5. Enbart bitumenkokiller i åtta ej centralt placerade schakt, enligt Figur 1-3. Tillgänglig svällvolym  $\Delta V_{\text{kokill}} = 10 \%$ .
6. Enbart bitumenfat i åtta ej centralt placerade schakt, enligt Figur 1-3. Tillgänglig svällvolym  $\Delta V_{\text{kokill}} = 22 \%$ .

Fall 1 representerar nuvarande fördelningen av deponerat bitumenkonditionerat avfall. Fall 2 och 3 utgör känslighetsfall för nuvarande avfallsfördelning, med avseende på tillgänglig svällvolym. Fall 4 representerar ett hypotetiskt fall med en fördelning av avfall i centrala schakt sådant att svälltrycket förväntas bli maximalt. Fall 5 och 6 representerar ytterligare fördelningar av avfallet vilka teoretiskt sett är möjliga då silodelen i SFR har ej ännu utnyttjad lagringsvolym.

### 1.3.1 Skada i armerad betong

Skada i konstruktionen antas inträffa då huvudspänningen överstiger antingen materialets draghållfasthet ( $f_{\text{drag}}$ ) eller tryckhållfasthet ( $f_{\text{tryck}}$ ). Figuren nedan visar en skadeparameter  $D$  definierad som största värdet av  $\sigma_1/f_{\text{drag}}$  och  $-\sigma_3/f_{\text{tryck}}$ . Mörkröd färg visar var skada inträffar i den armerade betong som utgör silons väggar och betongkokiller ( $D > 1$ ). Områdets utsträckning avgränsas av en svart kontur ( $D = 1$ ). Färgskalans nedre gräns är satt till  $D = 0,5$ .

Figur 1-6 visar skadeparametern för referensfallet, fall 1.



Figur 1-6. Skadeparameter fall 1.

Ytterligare figurer som beskriver skador i kringgjutningsbruk och betong i området kring de centrala schakten i beräkningsfall 1 återges i Bilaga 1.

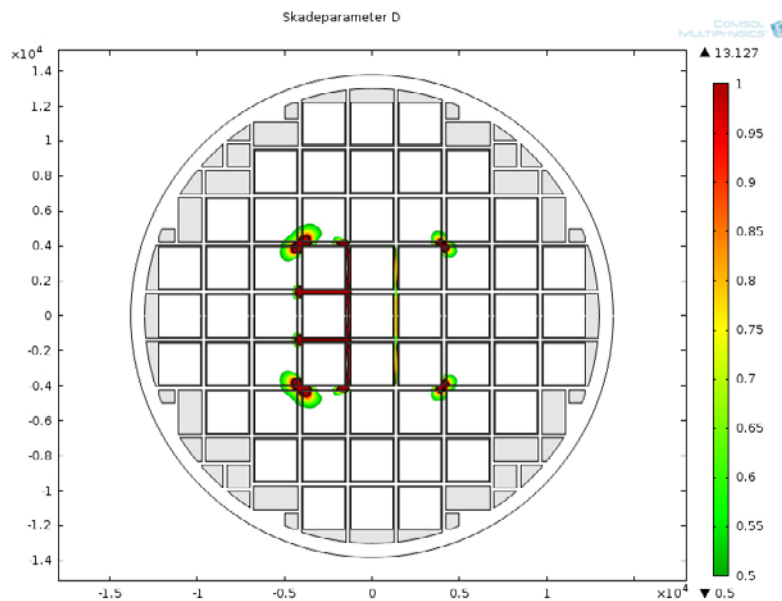
Skador uppstår i kringgjutningsbruk, schaktväggar och även avfallskollin, i första hand angränsande till schakten med bitumenkokiller.

Figur 1-7 visar skadeparametern för fall 2.

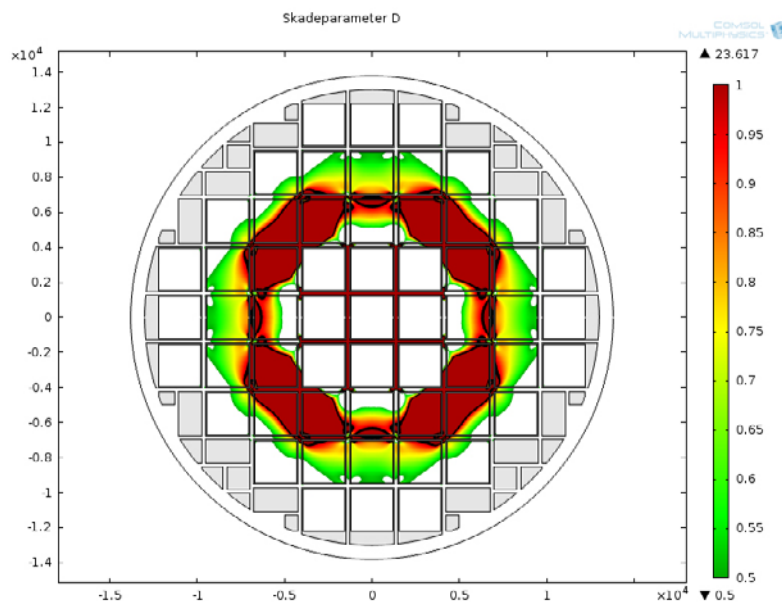
Ytterligare figurer som beskriver skador i kringgjutningsbruk och betong i området kring de centrala schakten i beräkningsfall 2 återges i Bilaga 1.

Om svällkropparnas fria volym är otillgänglig riskerar betongskador i hörn av schakt vilka håller bitumenfat att öka något.

Figur 1-8 visar skadeparametern för fall 3.



**Figur 1-7.** Skadeparameter fall 2.



**Figur 1-8.** Skadeparameter fall 3.

Ytterligare figurer som beskriver skador i kringgjutningsbruk och betong i området kring de centrala schakten i beräkningsfall 3 återges i Bilaga 1.

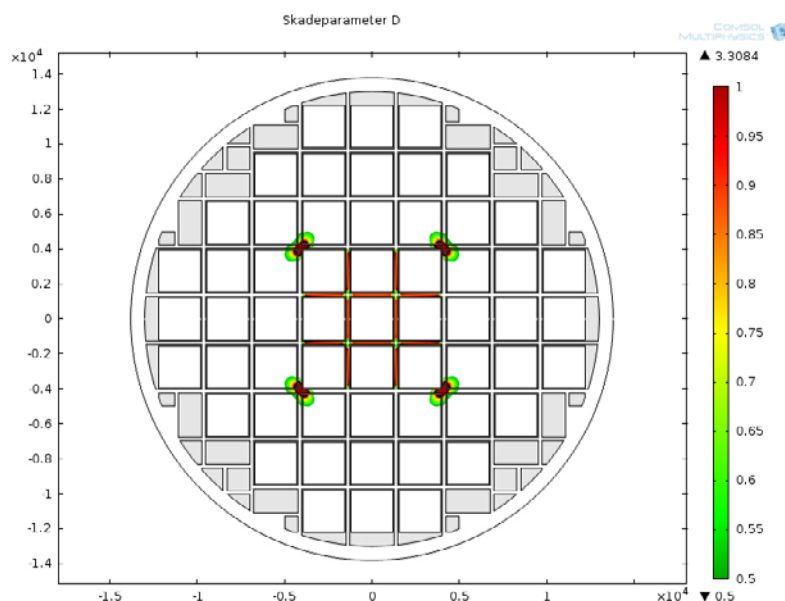
Då ingen svällvolym är tillgänglig riskeras utökade skador i väggar och betongkokiller i de schakt vilka angränsar till de nio centrala schakten.

Figur 1-9 visar skadeparametern för fall 4.

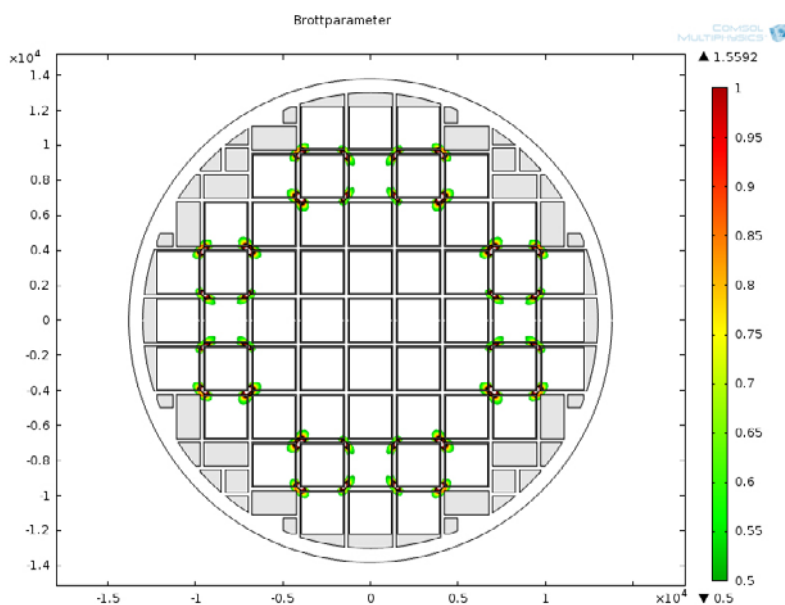
Ytterligare figurer som beskriver skador i kringgjutningsbruk och betong i området kring de centrala schakten i beräkningsfall 4 återges i Bilaga 1.

Skador uppstår i kringgjutningsbruk, schaktväggar och även avfallskollin angränsande till de nio centrala placerade schakten.

Figur 1-10 visar skadeparametern för fall 5.



**Figur 1-9.** Skadeparameter fall 4.



**Figur 1-10.** Skadeparameter fall 5.

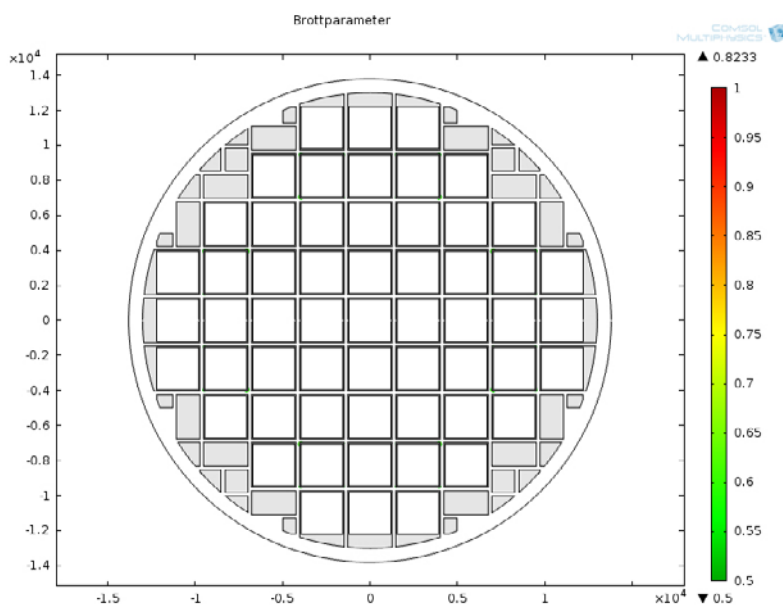
Ytterligare figurer som beskriver skador i kringgjutningsbruk och betong i området kring de centrala schakten i beräkningsfall 5 återges i Bilaga 1.

Skador uppstår främst i hörnen av schakten med bitumenkonditionerat avfall. Skador påverkar kringgjutningsbruk och schaktväggar.

Figur 1-11 visar skadeparametern för fall 6.

Ytterligare figurer som beskriver skador i kringgjutningsbruk och betong i området kring de centrala schakten i beräkningsfall 6 återges i Bilaga 1.

Skadeparameter är i detta fall  $< 1$  över hela tvärsnittet varför inga skador förväntas i schaktväggar eller betongkockiller.



**Figur 1-11.** Skadeparameter fall 6.

## 2 BMA

I bergsalen för medelaktivt avfall (BMA) deponeras kollin i en betongkonstruktion indelad i tretton större huvudfack och två mindre extrafack. Vid avslutad deponering täcks facken med prefabricerade betonglock. Vid förslutning av förvaret gjuts betong över locken och bergrummet utanför betongkonstruktionen återfylls med krossat stenmaterial. Efter förslutning av förvaret kommer inträngande grundvatten mätta betong och avfall. Tiden för vattenmättnad av BMA har uppskattats till ett fåtal år (Holmén och Stigsson 2001). När vatten kommer i kontakt med jonbytarmassor och indunstarkoncentrat stabiliserade i bitumen kan dessa avfallspaket börja svälla och interna tryck uppstå.

### 2.1 Geometri

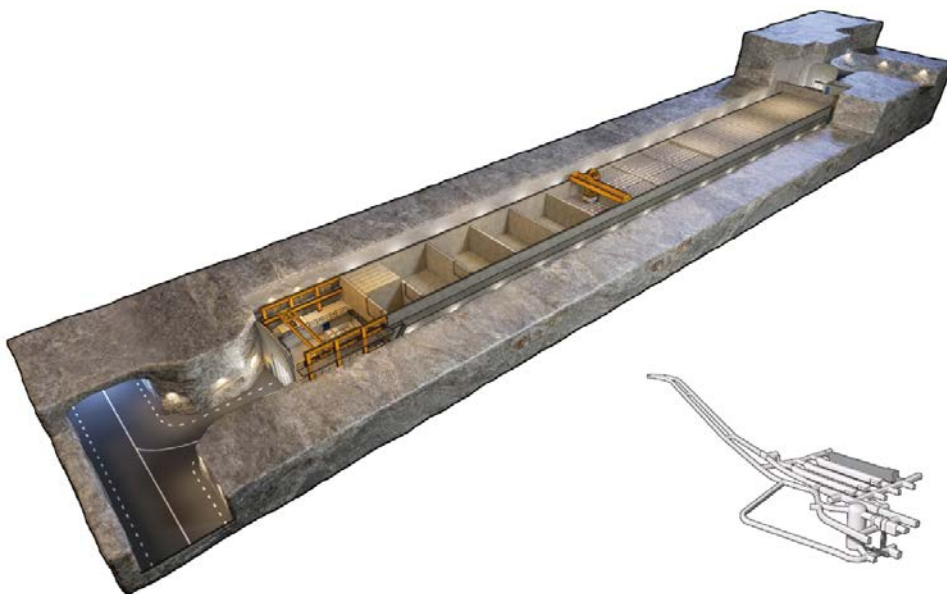
Betongkonstruktionen i BMA är 160 m lång och 19,6 m bred. Ett huvudfack är invändigt 14,8 m brett, 9,9 m djupt och 7,3 m högt. Betongelement i yttrevägg, innervägg, golv och lock är 40 cm tjocka. Ett schematiskt tvärsnitt av BMA visas i Figur 2-2.

Fack 2, 3, 5, 6 och 10 i BMA innehåller bitumenkonditionerat avfall. Fördelningen av avfall fram till 2012-12-31 i fack 2, 3, 5 och 6 återges i Tabell 2-1 (SKB 2013). Dessa fack är fulla eller näst intill fulla med avfall.

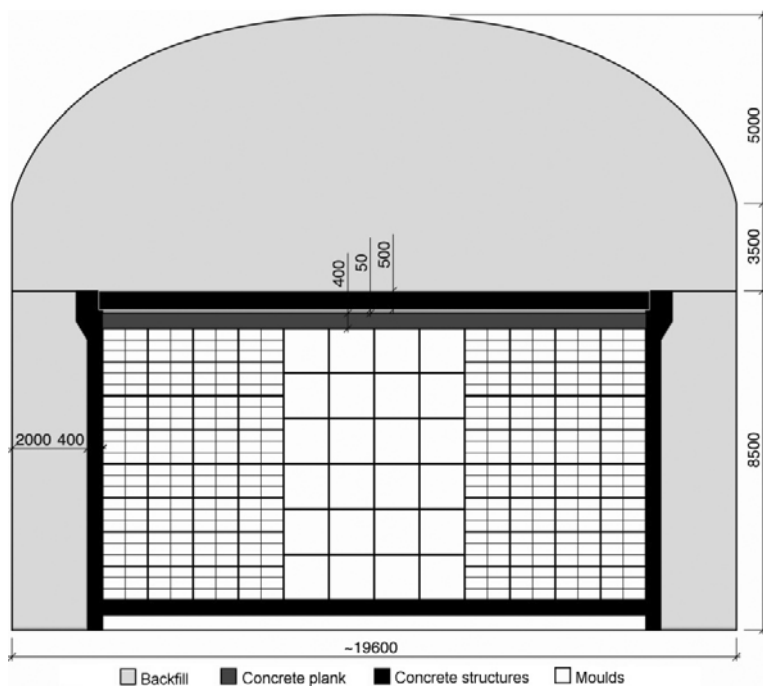
Tabell 2-1.

	B.05 på bricka	B.05 i fatlåda	F.05	F.17	F.15	F.99	R.01
Fack 2	–	382	1712	–	–	–	148
Fack 3	1168	270	–	144	–	–	144
Fack 5	2000	96	–	28	–	–	144
Fack 6	192	144	–	259	3	2	144

Fack 10 är endast till fyllt till del och innehåller ett begränsat antal kollin med bitumenkonditionerat avfall (16 stycken F.17). Detta fack behandlas ej i detalj i denna rapport.



Figur 2-1. Bergsalen för medelaktivt avfall i SFR.



Figur 2-2. Tvärsnitt av BMA. Mått angivna i mm.

### 2.1.1 Fat med bitumeningjutet avfall – B.05

Fat med volymen 216 liter fylls med 185 liter bitumeningjutet avfall. Halten jonbytarmassa kan variera upp till 40 % av vikten. Faten placeras utan svällkropp i grupper om fyra på en fatbricka med yttermått 1200 × 1200 mm. Fatens höjd är 882 mm. Fatbrickor staplas på varandra.

### 2.1.2 Fat med bitumeningjutet avfall – B.05:2

Fat av typ B05 vilka skadats mekaniskt, genom korrosion, eller som har för hög ytkontamination klassas B05:2. Fyra fat placeras vanligen i en fatlåda med yttermått 1200 × 1200 × 1200 mm. Fatlådorna betraktas som täta enheter, varför de bidrar till den totala fria volymen även om avfallet kringgjutts.

### 2.1.3 Fat med bitumeningjutet avfall – F.05

Fat med volymen 216 liter fylls upp med avfall upp till 90 % av volymen. Halten torr pulverformig jonbytarmassa kan variera upp till 60 %. Faten placeras utan svällkropp i grupper om fyra på en fatbricka med yttermått 1200 × 1200 mm. Fatens höjd är 882 mm. Fatbrickor staplas på varandra.

### 2.1.4 Kokiller med bitumeningjutet avfall – F.17

En plåtkokill är kubisk med sidan 1200 mm. Fyllnadsgraden är 95 %.

### 2.1.5 Betongkokiller – F.15, R.99 och R.01

Avfallet cementkonditioneras i kubiska kokiller med sidan 1200 mm. Denna avfallsklass förväntas inte svälla i kontakt med vatten.

### 2.1.6 Tillgänglig svällvolym

Med ledning av total fackvolym, mängden och typen av bitumenkonditionerat avfall (se Tabell 2-1) och avfallens typbeskrivningar beräknades fria fackvolymen i relation till volymen bitumenkonditionerat avfall,  $\Delta V$  %. Denna återges i Tabell 2-2 för icke kringgjutna och kringgjutna fack.

**Tabell 2-2.**

	$\Delta V$ % (ej kringgjutet avfall)	$\Delta V$ % (kringgjutet avfall)
Fack 2	97	28
Fack 3	63	23
Fack 5	93	16
Fack 6	67	7

## 2.2 Material

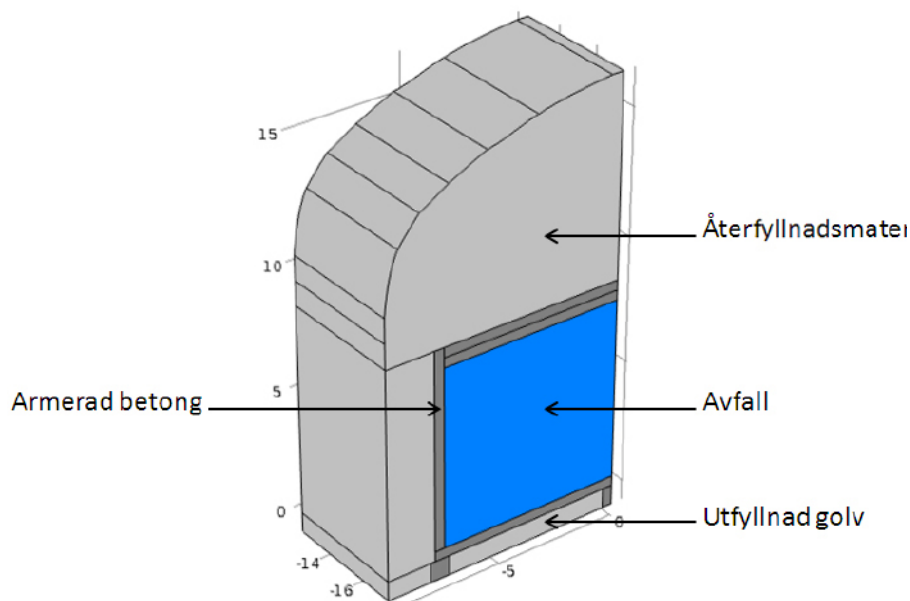
Beräkningsmodellen undersöker ett fack i BMA, med material enligt Figur 2-3.

### 2.2.1 Armerad betong

BMAs väggar, golv och takplattor är gjorda av armerad K30 betong (Cederwall et al. 1990). Maximal påkänning på betongen orsakat av svällande avfall antas inträffa ett fåtal efter förslutning, då BMA mätts med vatten (Holmén och Stigsson 2001). Materialegenskaper antas därför vara desamma som då driftskedet avslutats. Följande materialegenskaper antas:

**Tabell 2-3.**

<b>E-modul</b>	<b>31 GPa</b>
Poissons tal	0,2
Densitet	2200 kg/m <sup>3</sup>
Draghållfasthet ( $f_{drag}$ )	1,6 MPa
Tryckhållfasthet ( $f_{tryck}$ )	21,5 MPa



**Figur 2-3.** Material ansatta för ett fack i BMA. Symmetri gör att modellgeometrin kan reduceras till ett fjärdedels fack.



## 2.2.2 Återfyllnadsmaterial

I det beräkningsfall då BMA antas vara återfyllt antas materialet vara K30 betong med följande egenskaper:

Tabell 2-4.

<b>E-modul</b>	<b>31 GPa</b>
Poissons tal	0,2
Densitet	2200 kg/m <sup>3</sup>
Draghållfasthet ( $f_{drag}$ )	1,6 MPa
Tryckhållfasthet ( $f_{tryck}$ )	21,5 MPa

## 2.2.3 Utfyllnadsmaterial golv

Under golvplattan i BMA ansätts materialegenskaper för en kompakt grusbädd, enligt:

Tabell 2-5.

<b>E-modul</b>	<b>150 MPa</b>
Poissons tal	0,2
Densitet	2000 kg/m <sup>3</sup>

## 2.3 Matematisk Modell

Hållfasthetsberäkningar genomfördes i finita elementprogrammet COMSOL Multiphysics, version 4.3.

### 2.3.1 Materialmodell

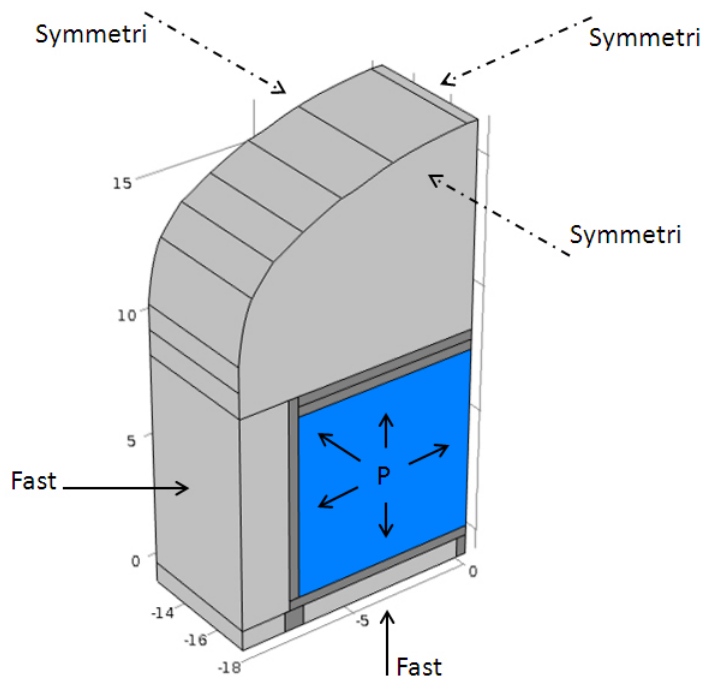
Samtliga material i beräkningsmodellen antas vara linjärt elastiska. Vid små laster beskrivs betong väl av en linjär materialmodell.

### 2.3.2 Randvillkor

Beräkningsmodellens randvillkor illustreras i Figur 2-4. Spegelsymmetri antas för ett enskilt fack. Vidare antas symmetri råda mellan fack. Avfallet inne i ett fack påverkar konstruktionen genom ett svälltryck som verkar på innerväggarna. Fackets gräns mot bergsalens golv antas vara fast. I beräkningsfallet där inget återfyllnadsmaterial beaktas antas att fackets ytterväggar är fria att röra sig. I det fall då återfyllnad kring facket utgörs av betong antas gränsen mellan återfyllnadsmaterial och bergvägg vara fast.

### 2.3.3 Svälltryck

Jonbytarmassor ingjutna i bitumen sväller då materialet kommer i kontakt med vatten. I detta arbete antas att maximalt svälltryck uppnås då förvaret vattenmättats. För BMA uppskattas detta ta ett fåtal år efter förslutning av förvaret (Holmén och Stigsson 2001). I beräkningsmodellen utvärderades påverkan av svälltryck av storleksordningen 50 kPa till 1,5 MPa på fackkonstruktionens hållfasthet.



Figur 2-4. Beräkningsmodellens randvillkor.

### 2.3.4 Skadekriterium

Skada i konstruktionen kan inträffa då huvudspänningen överstiger antingen materialets draghållfasthet ( $f_{\text{drag}}$ ) eller tryckhållfasthet ( $f_{\text{tryck}}$ ). En skadeparameter  $D$  definieras som största värdet av  $\sigma_1/f_{\text{drag}}$  och  $-\sigma_3/f_{\text{tryck}}$ , där  $\sigma_1$  är första huvudspänningen och  $\sigma_3$  är tredje huvudspänningen. Då  $D \geq 1$  finns risk att skada uppstår.

Skador i material löser upp spänningar i närområdet. Modelleringen tar inte hänsyn till detta. Området som indikerar risk för skada är större än området där skada uppstår.

### 2.3.5 Mesh

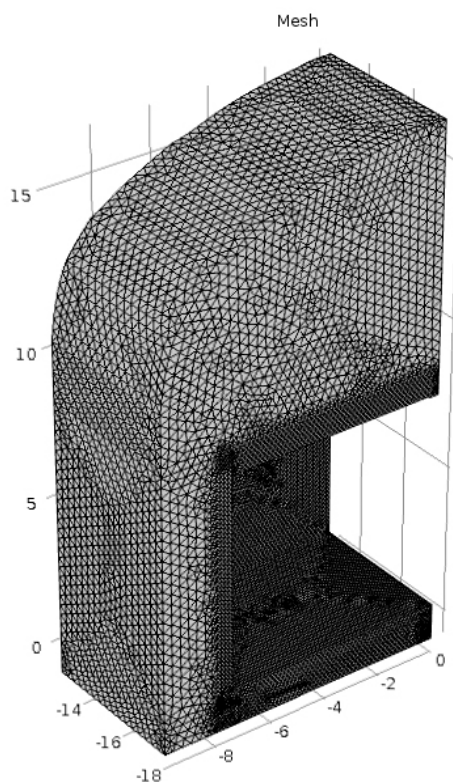
Geometrin diskretiseras i modellen av  $\sim 7,1 \cdot 10^5$  tetraederelement. Fackets innerväggar utgör yttre ränder i modellen, varför dess inre volym ej löses upp med ett mesh.

## 2.4 Resultat

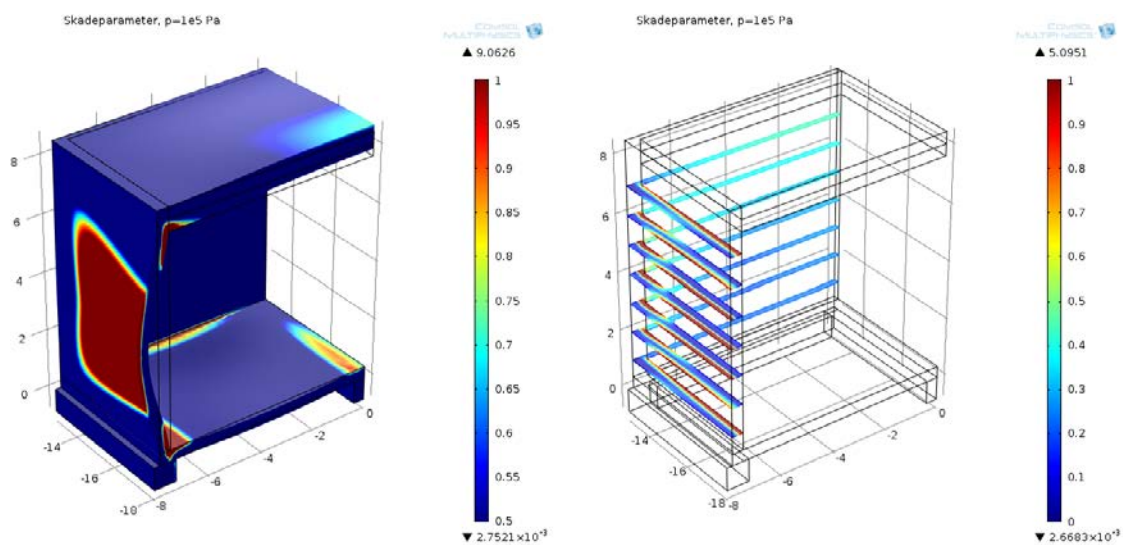
Beräkningarna undersöker risken för skada i BMAs betongbarriärer orsakat av svällning av bitumenkonditionerat avfall. Resultat från två beräkningsfall redovisas nedan:

1. Ingen återfyllnad av BMA.
2. Återfyllnad av BMA med K30 betong.

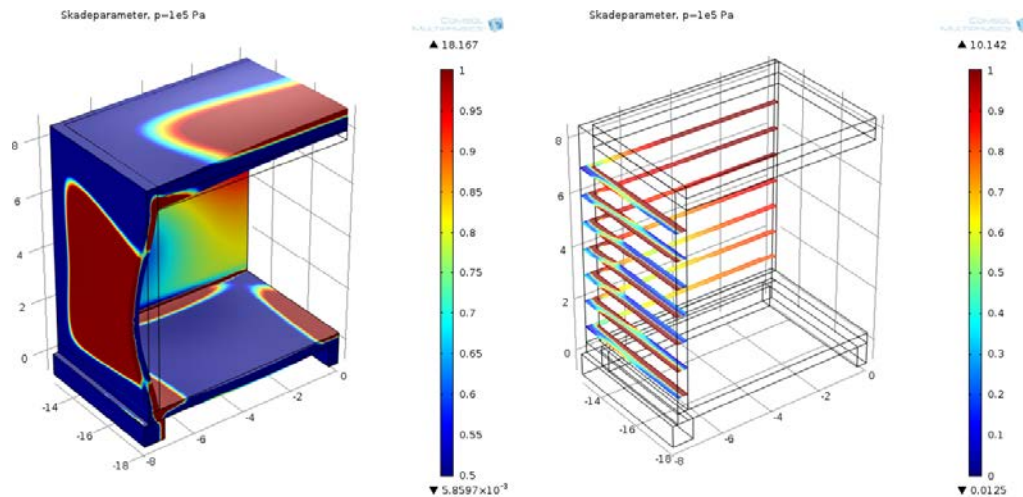
Dessa två fall utgör ytterligheter i konstruktion och relaterar fackets armerade betongkomponenter till det svälltryck som kan tänkas uppstå då bitumenkonditionerat avfall kringgjuts. Figur 2-7 till Figur 2-9 visar resultat för fall 1 då svälltrycket varierar mellan 50–500 kPa. Ytterligare figurer vilka visar en uppdelning av skador orsakade av dragspänningar och tryckspänningar återges i Bilaga 1.



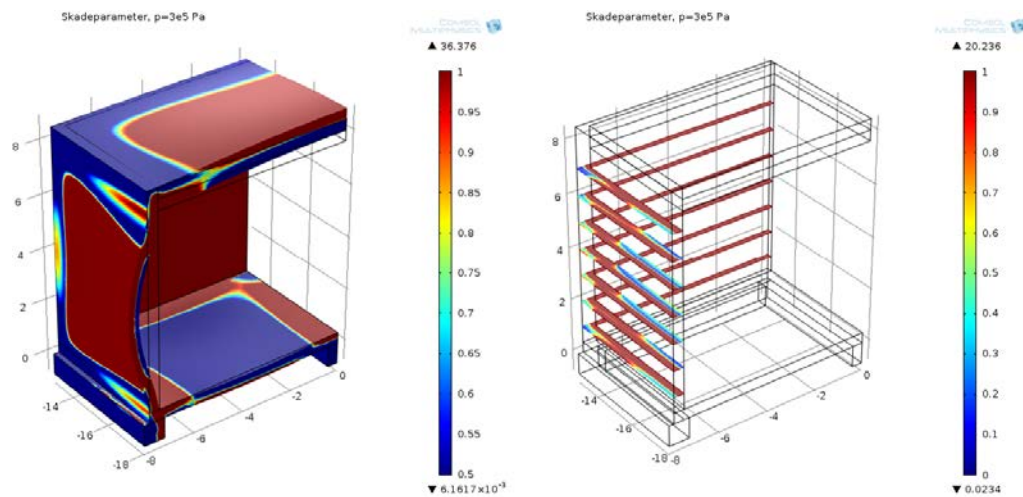
Figur 2-5. Beräkningsmesh för modellen av ett fack i BMA.



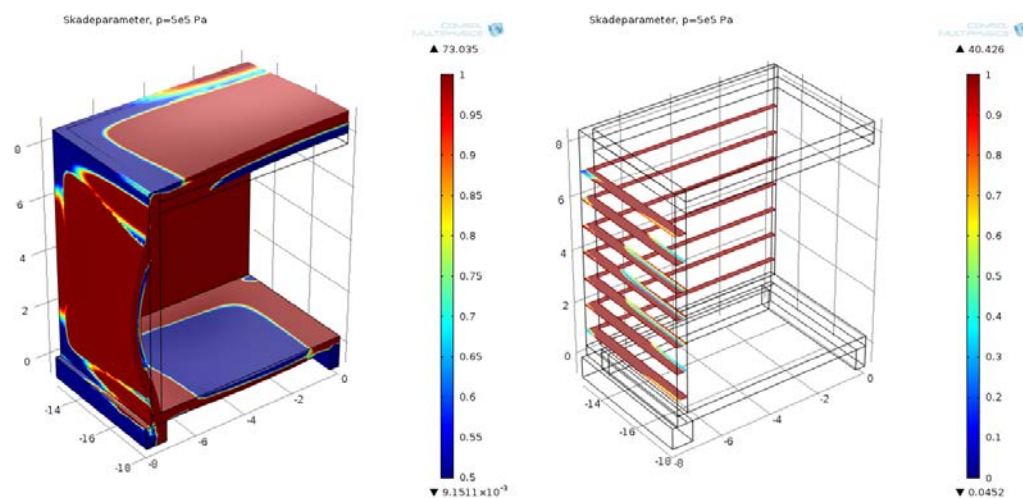
Figur 2-6. Skadeparameter utvärderad på armerade betongelement vid ett svälltryck på 50 kPa. Skada uppstår i mörkröda områden. Skada i väggarnas inre förtydligas i figuren till höger.



**Figur 2-7.** Skadeparameter utvärderad på armerade betongelement vid ett svälltryck på 100 kPa. Skada uppstår i mörkröda områden. Skada i väggarnas inre förtydligas i figuren till höger.



**Figur 2-8.** Skadeparameter utvärderad på armerade betongelement vid ett svälltryck på 300 kPa. Skada uppstår i mörkröda områden. Skada i väggarnas inre förtydligas i figuren till höger.

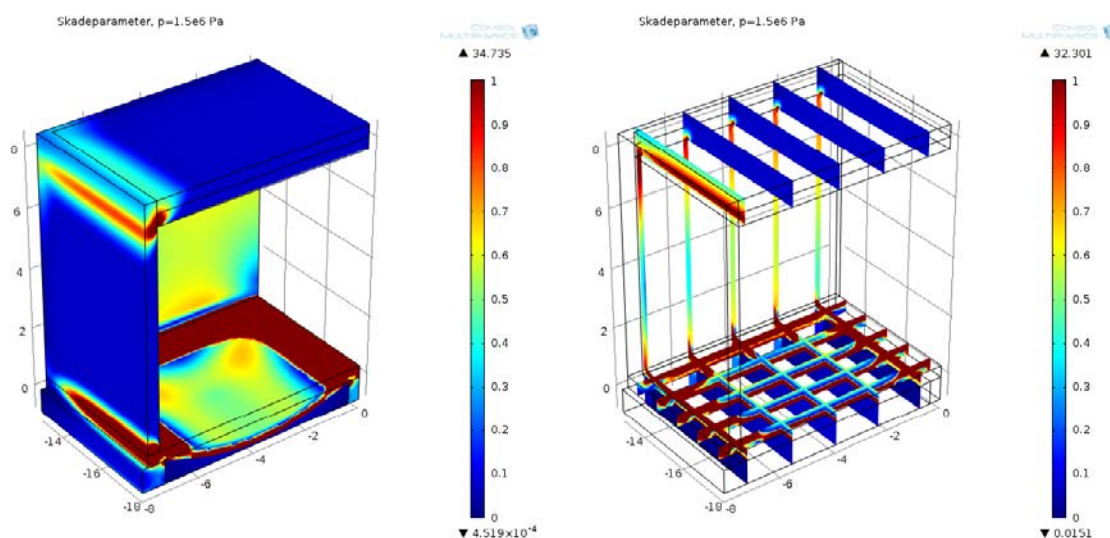


**Figur 2-9.** Skadeparameter utvärderad på armerade betongelement vid ett svälltryck på 500 kPa. Skada uppstår i mörkröda områden. Skada i väggarnas inre förtydligas i figuren till höger.

Vid 50 kPa svälltryck finns inga genomgående skador i facketets armerade betong. Vid 100 kPa har mellanväggen fått genomgående skador och vid 300 kPa har även ytterväggen gått sönder. Vid 500 kPa har golv och tak gått sönder. Ett inre svälltryck på 500 kPa ger en deformation av facket motsvarande en minskning av volymen mellan yttervägg och bergvägg på 0,5 %. Ett återfyllnads-material mellan bergvägg och BMA yttervägg vars syfte är att hjälpa hålla emot svälltrycket måste alltså vara i princip stumt och inte komprimeras.

Figur 2-10 visar resultat för fall 2, då BMA återfylls med betong.

Skadeparametern D visar att golvet fortfarande utgöra en svag punkt och går sönder vid ett svälltryck på ca 1,5 MPa. Att golvet klarar en något större belastning jämfört med fall 1 beror på att ytterväggarna inte tillåts deformera i samma utsträckning.



**Figur 2-10.** Skadeparameter utvärderad på armerade betongelement vid ett svälltryck på 1,5 MPa. Skada uppstår i mörkröda områden. Skador i det inre av väggar, tak och golv förtydligas i figuren till höger.

## 3 Slutsatser och Diskussion

### 3.1 Silo

Tryck resulterande från svällning kan orsaka skador på kringgjutningsbruk, schaktväggar och avfallskollin angränsande till de nio centrala schakt innehållande bitumeningjutet avfall. Påverkan är störst i anslutning till schakt innehållande bitumenkokiller. Silons yttervägg påverkas ej. En hypotetisk fördelning av bitumenkokiller i samtliga nio centrala schakt i silon förändrade inte dessa slutsatser. Placeras bitumenkokiller närmare silons periferi förväntas även här skador i hörnen på schaktväggarna. De lägre svälltryck som antas för bitumenfat väntas för samma konfiguration inte skapa skador i schaktväggarna.

Som följd av skador orsakade av svällning kan silons invändiga hydrauliska konduktivitet bli mer heterogen. Om fördelningen av bitumenkonditionerat avfall är densamma i varje deponerat lager i silon kan man tänka sig att det uppstår ”kanaler” med relativt hög hydraulisk konduktivitet i axiell led i silon. Om fördelningen alterneras från den nuvarande centrala placeringen till en mer perifer placering skulle kanaler vilka genomlöpte silons hela höjd kunna motverkas. Detta förutsätter att ett eller flera oskadade lager avfall skiljer de två fördelningsalternativen.

### 3.2 BMA

Beräkningarna indikerar att ett fack i BMA kan klara ett inre svälltryck på upp till 50 kPa innan genomgående skador uppkommer. Tabell 1-3 redovisar ett uppskattat svälltryck på 0,22 MPa vid en tillgänglig svällvolym på 30 %. Tabell 2-2 visar att alla fack med bitumenkonditionerat avfall (fack 2, 3, 5 och 6) har en maximal tillgänglig svällvolym på mindre än 30 % om avfallet kringgjuts och en maximal tillgänglig svällvolym väl över 30 % om avfallet inte kringgjuts. Sammantaget blir slutsatsen att om fack i BMA innehållande bitumenkonditionerat avfall ska kringgjutast måste tillräcklig svällvolym säkerställas.

Även om BMA återfylls med ett stumt material, som betong, så riskerar betonggolvet att tryckas sönder.

## Referenser

Publikationer utgivna av SKB (Svensk Kärnbränslehantering AB) kan hämtas på [www.skb.se/publikationer](http://www.skb.se/publikationer).

**Björkenstam E, 1997.** Utveckling av SFR-bruket. UC 97:4Ö, Vattenfall Utveckling AB.

**Cederwall K, Lorentsen M, Östlund L, 1990.** Betonghandbok. Konstruktion. 2. utg. Solna: Svensk Byggtjänst.

**Nilsson A-C, Högfeldt E, Muhammed M, Wingefors S, 1988.** Swelling of ion exchange resins used in the Swedish nuclear power plants. SKI TR 88:1, Statens kärnkraftinspektion.

**Noguchi T, Tomosawa F, Nemati K M, Chiaia B M, Fantilli A P, 2009.** A practical equation for elastic modulus of concrete. ACI Structural Journal 106, 690–697.

**Holmén J G, Stigsson M, 2001.** Modelling of future hydrogeological conditions at SFR. SKB R-01-02, Svensk Kärnbränslehantering AB.

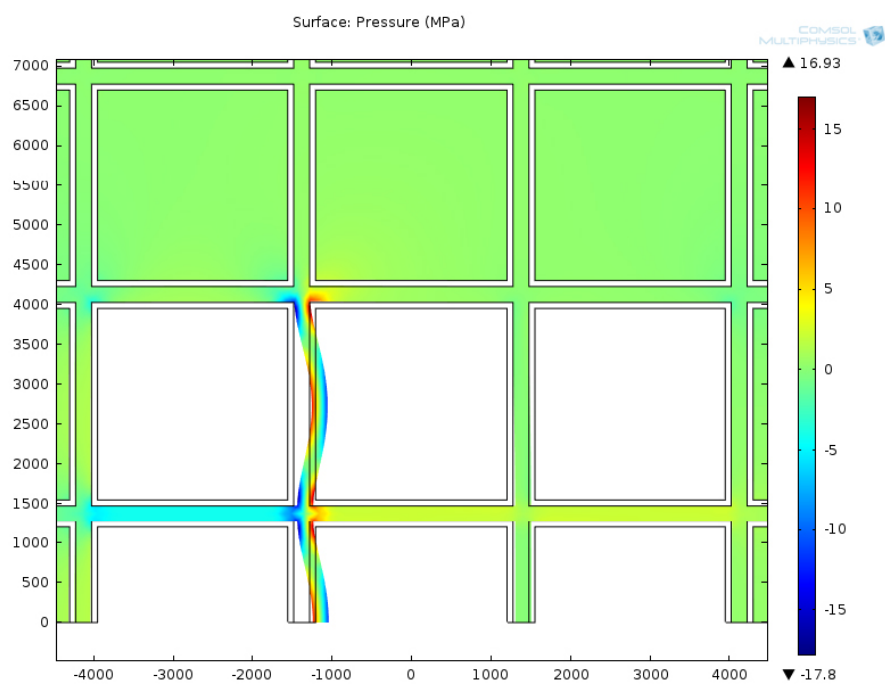
**SKB, 2013.** Låg- och medelaktivt avfall i SFR – Referensinventarium för avfall 2013. Svensk Kärnbränslehantering AB.

**SKB, 2014.** Data report for the safety assessment SR-PSU. SKB TR-14-10, Svensk Kärnbränslehantering AB.

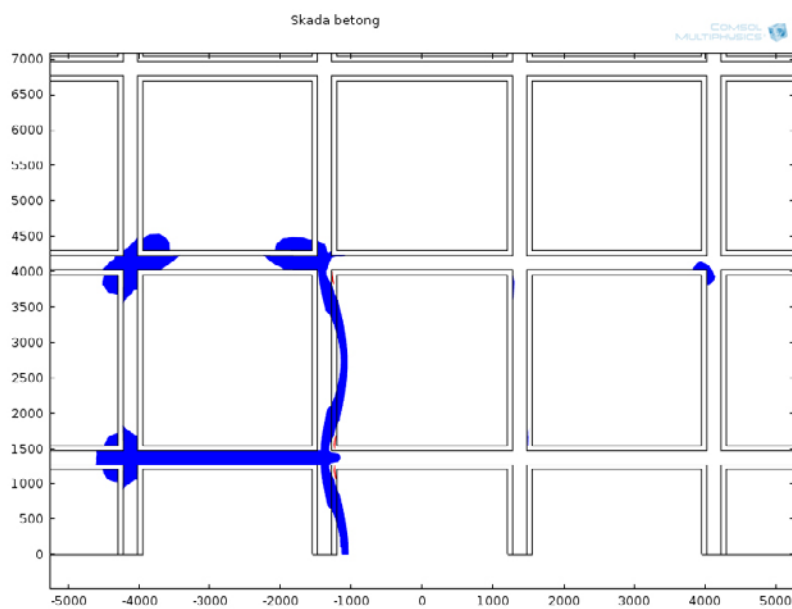
**SSM, 2011.** Granskning och utvärdering av SKB:s redovisning av Fud-program 2010. Rapport 2011:10, Strålsäkerhetsmyndigheten.

## Silo

## Beräkningsfall 1

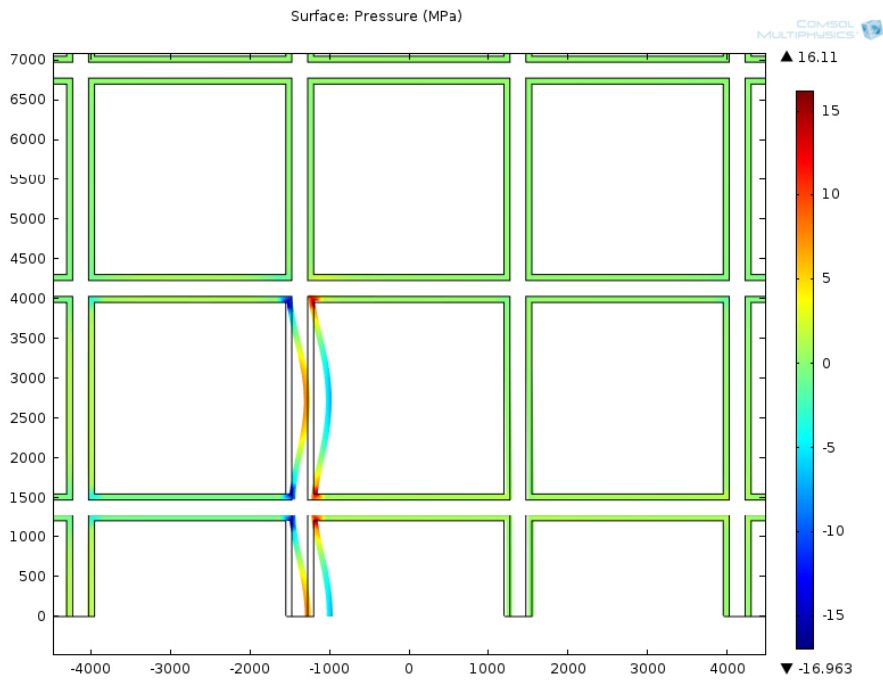


**Figur B1-1.** Tryck(MPa) och deformation i betongmaterial runt silos centrala schakt, beräkningsfall 1.

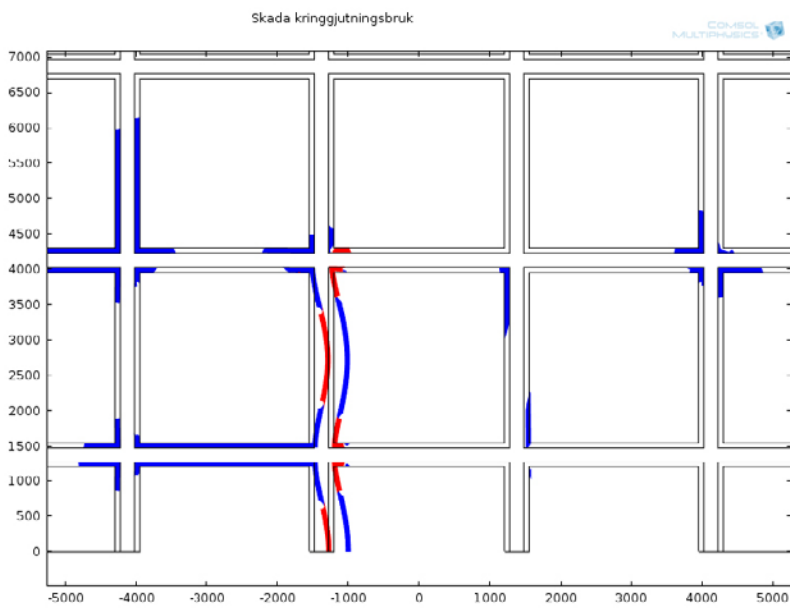


**Figur B1-2.** Skada och deformation i betongmaterial orsakad av dragspänning (blått) och tryckspänning(rött), beräkningsfall 1.



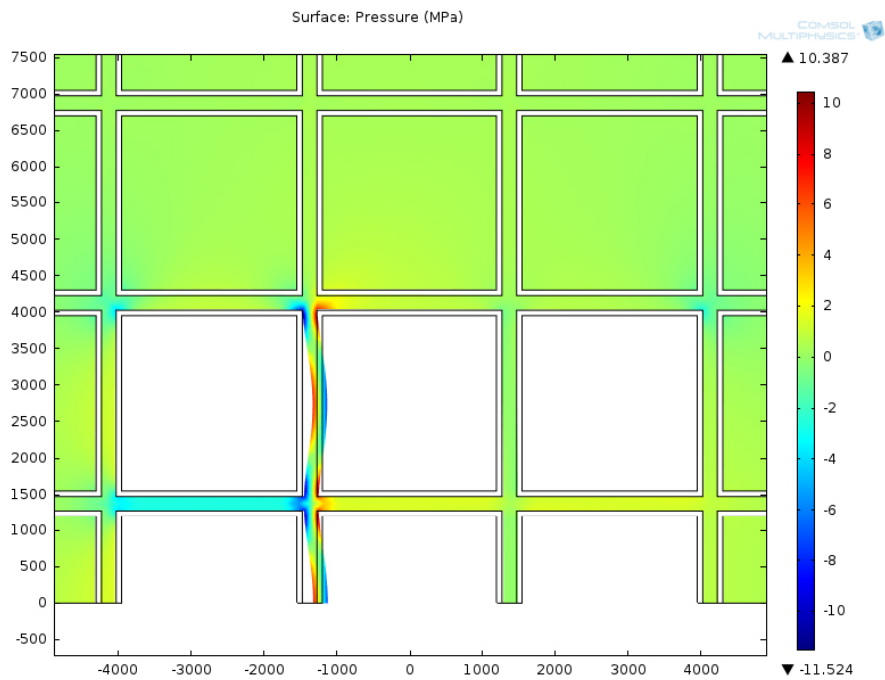


**Figur B1-3.** Tryck(MPa) och deformation i kringgjutningsbruk runt silons centrala schakt, beräkningsfall 1.

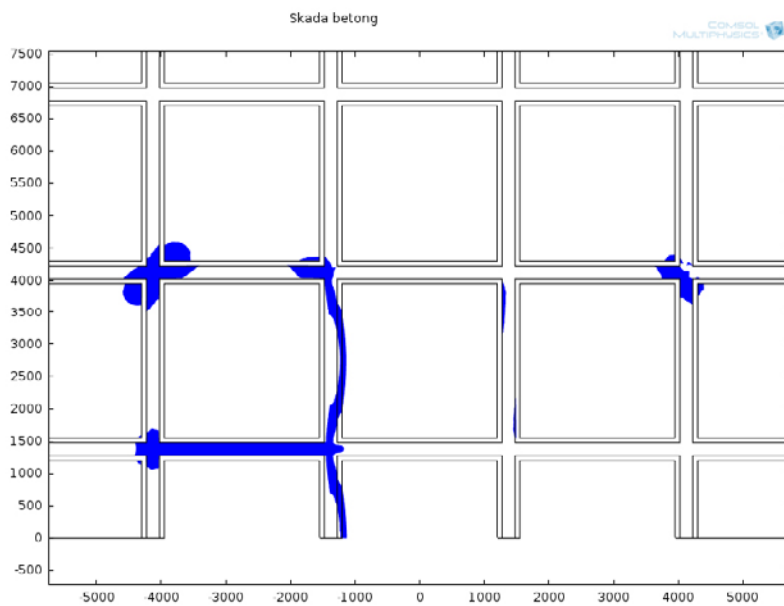


**Figur B1-4.** Skada och deformation i kringgjutningsbruk orsakad av dragspänning (blått) och tryckspänning(rött), beräkningsfall 1.

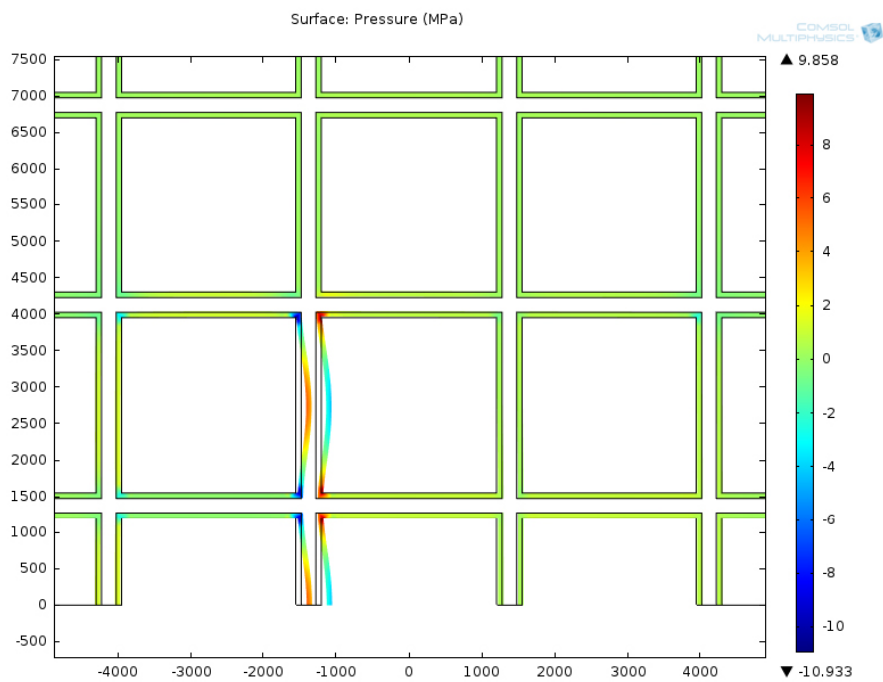
## Beräkningsfall 2



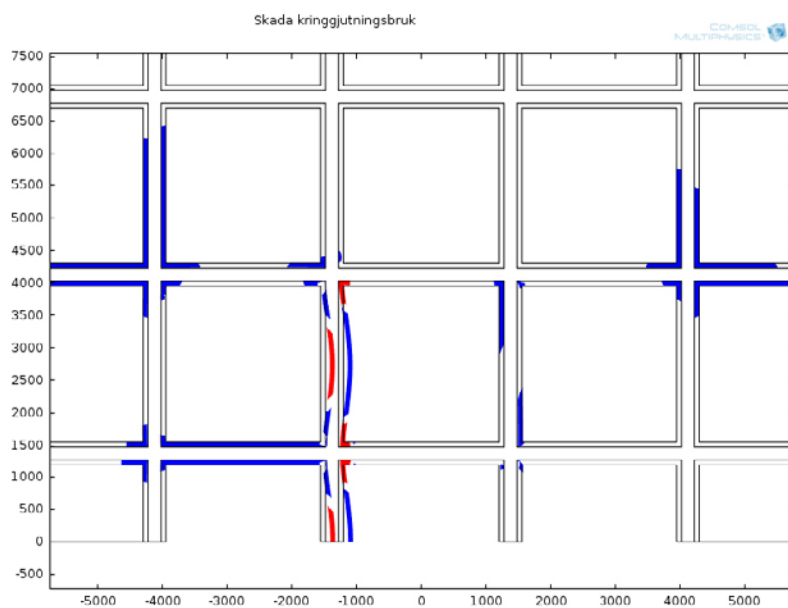
**Figur B1-5.** Tryck(MPa) och deformation i betongmaterial runt silons centrala schakt, beräkningsfall 2.



**Figur B1-6.** Skada och deformation i betongmaterial orsakad av dragspänning (blått) och tryckspänning(rött), beräkningsfall 2.

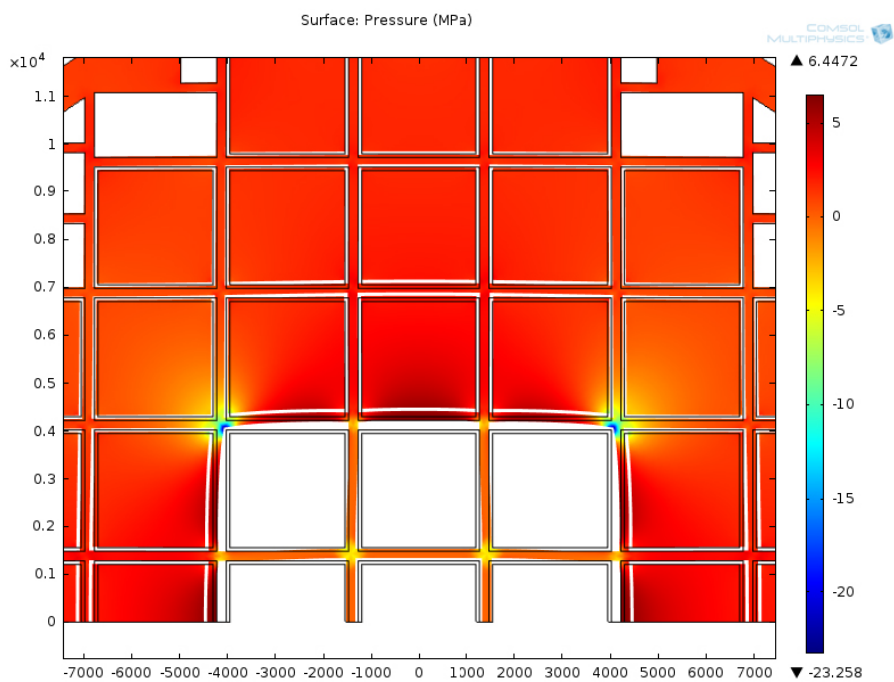


**Figur B1-7.** Tryck(MPa) och deformation i kringgjutningsbruk runt silons centrala schakt, beräkningsfall 2.

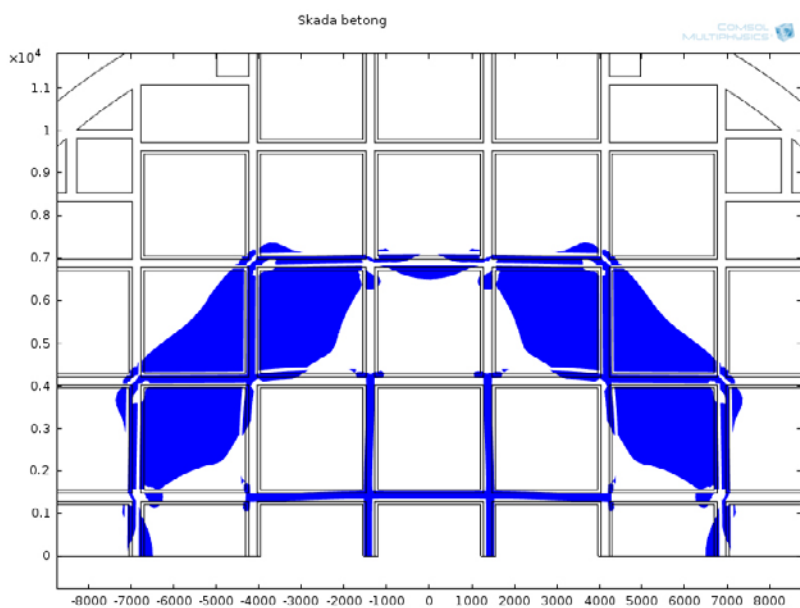


**Figur B1-8.** Skada och deformation i kringgjutningsbruk orsakad av dragspänning (blått) och tryckspänning(rött), beräkningsfall 2.

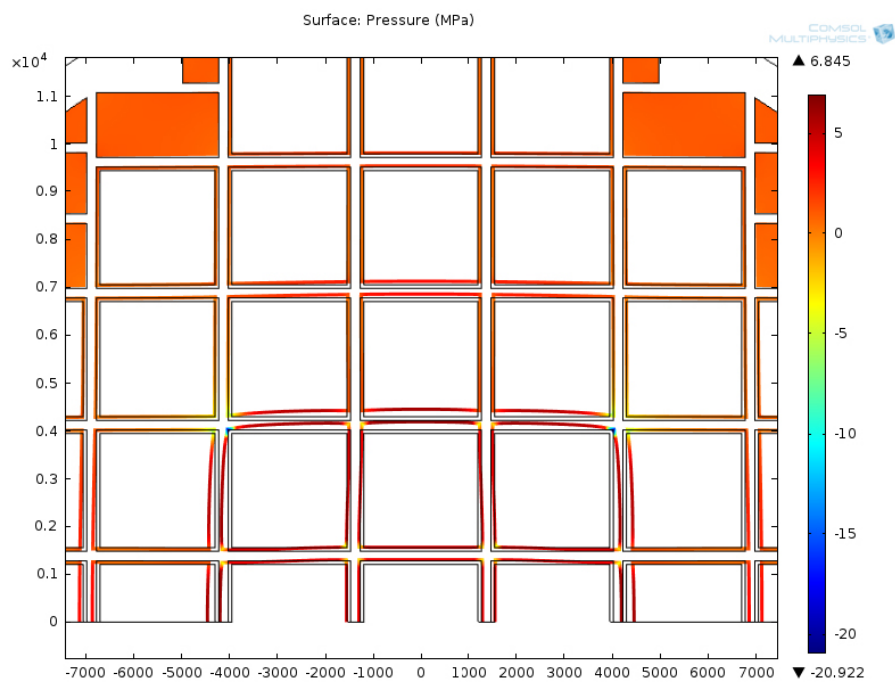
### Beräkningsfall 3



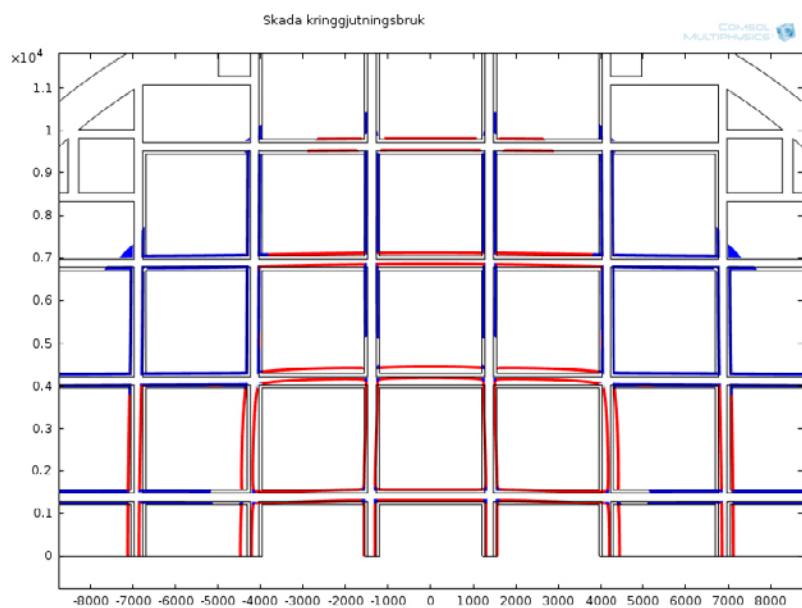
**Figur B1-9.** Tryck(MPa) och deformation i betongmaterial runt silons centrala schakt, beräkningsfall 3.



**Figur B1-10.** Skada och deformation i betongmaterial orsakad av dragspänning (blått) och tryckspänning(rött), beräkningsfall 3.

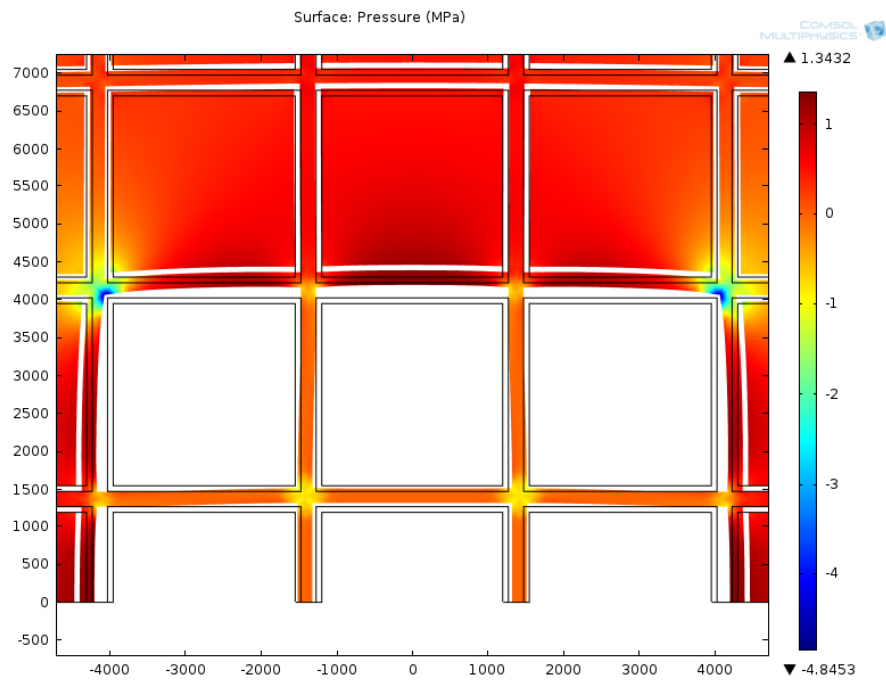


**Figur B1-11.** Tryck(MPa) och deformation i kringgjutningsbruk runt silons centrala schakt, beräkningsfall 3.

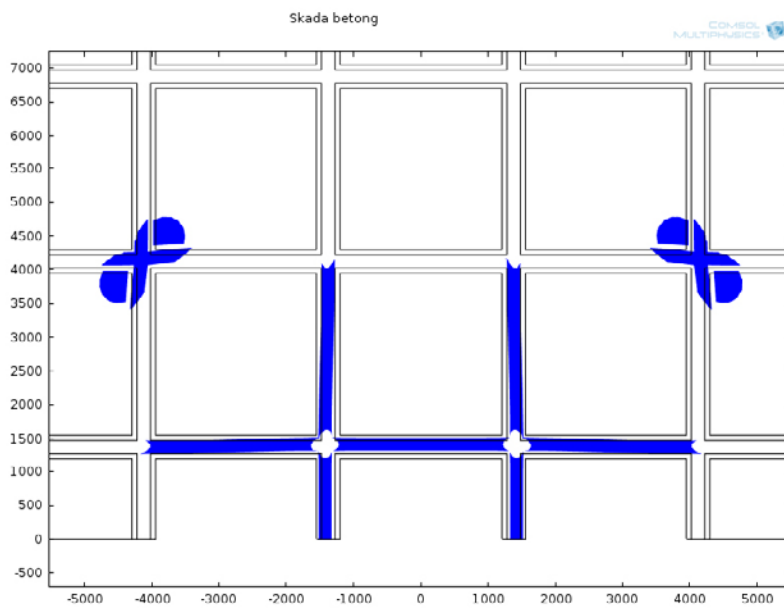


**Figur B1-12.** Skada och deformation i kringgjutningsbruk orsakad av dragspänning (blått) och tryckspänning(rött), beräkningsfall 3.

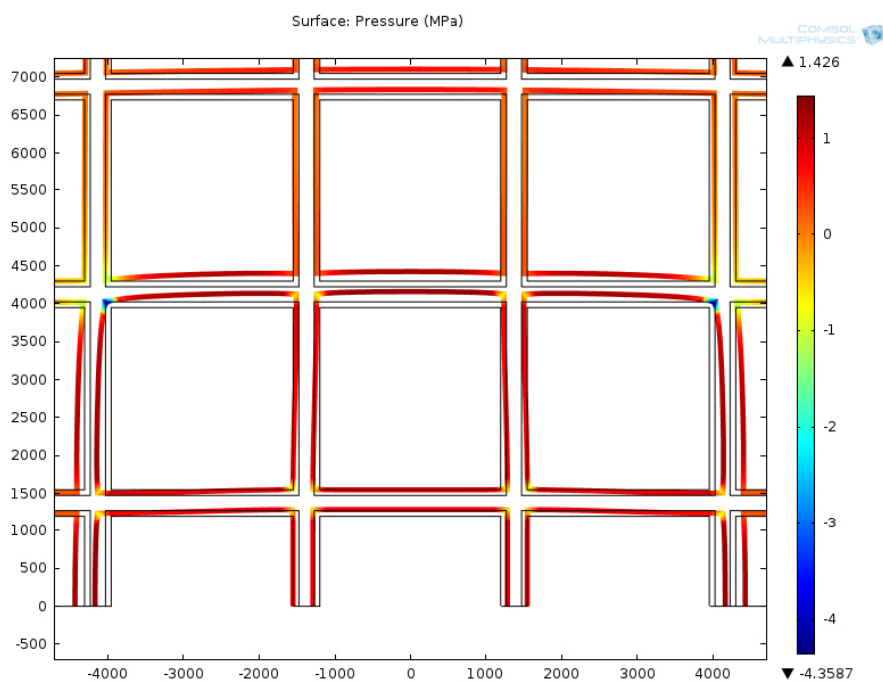
## Beräkningsfall 4



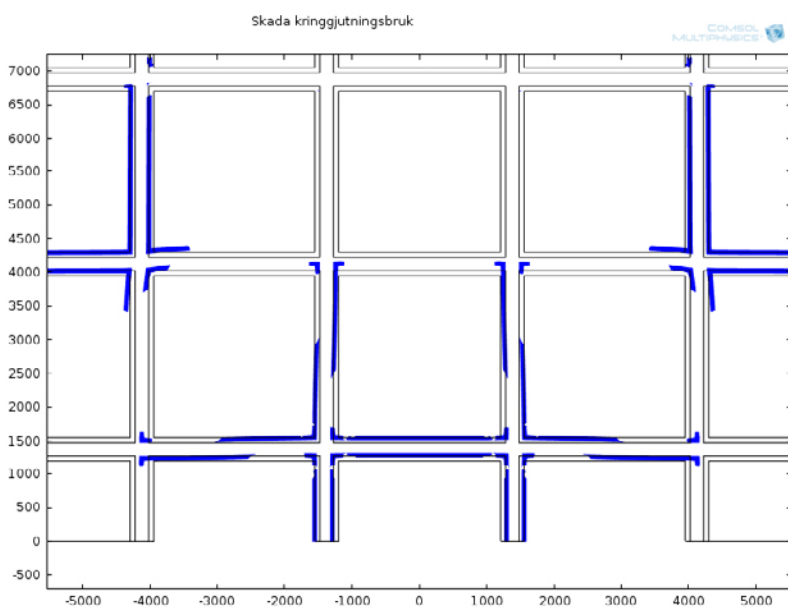
**Figur B1-13.** Tryck(MPa) och deformation i betongmaterial runt silons centrala schakt, beräkningsfall 4.



**Figur B1-14.** Skada och deformation i betongmaterial orsakad av dragspänning (blått) och tryckspänning(rött), beräkningsfall 4.

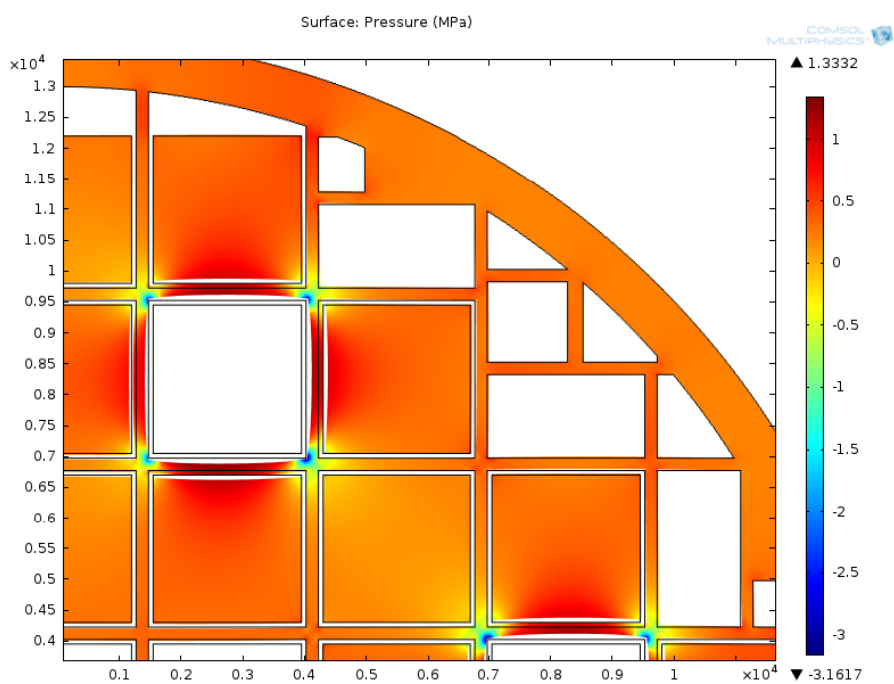


**Figur B1-15.** Tryck(MPa) och deformation i kringgjutningsbruk runt silons centrala schakt, beräkningsfall 4.

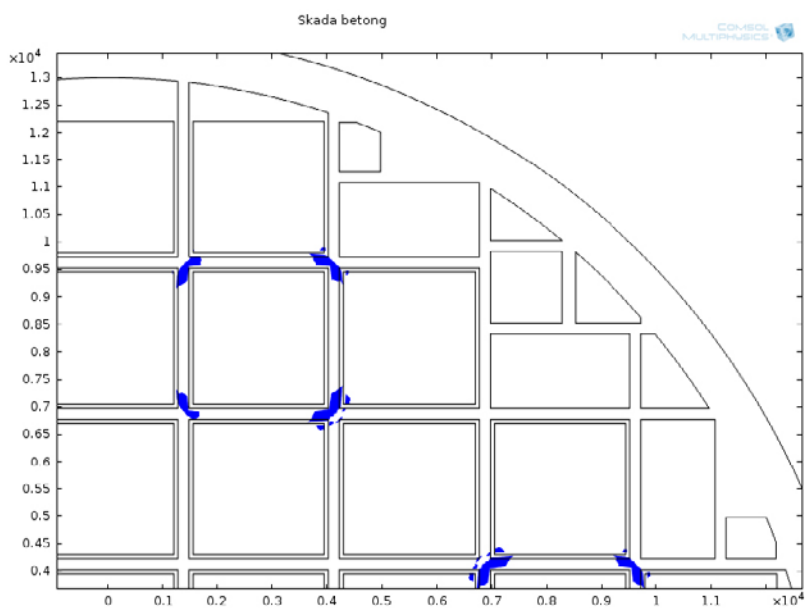


**Figur B1-16.** Skada och deformation i kringgjutningsbruk orsakad av dragspänning (blått) och tryckspänning(rött), beräkningsfall 4.

## Beräkningsfall 5

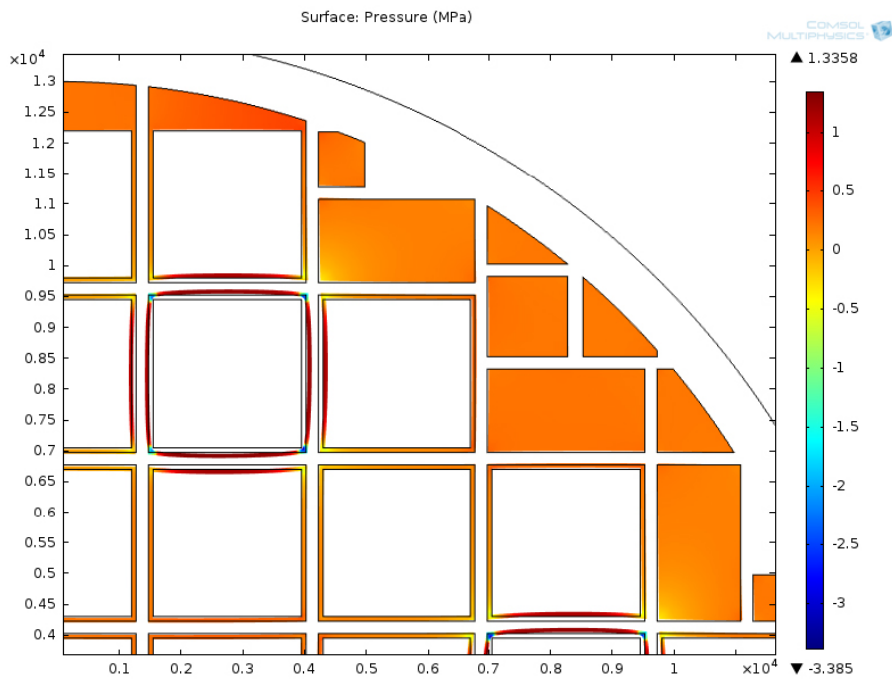


**Figur B1-17.** Tryck(MPa) och deformation i betongmaterial runt schakt i silons periferi, beräkningsfall 5.

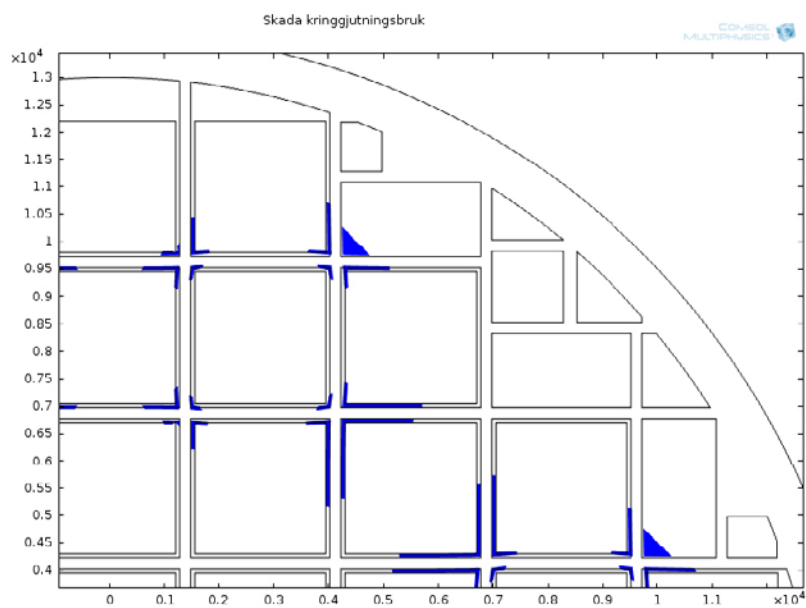


**Figur B1-18.** Skada och deformation i betongmaterial orsakad av dragspänning (blått) och tryckspänning(rött), beräkningsfall 5.



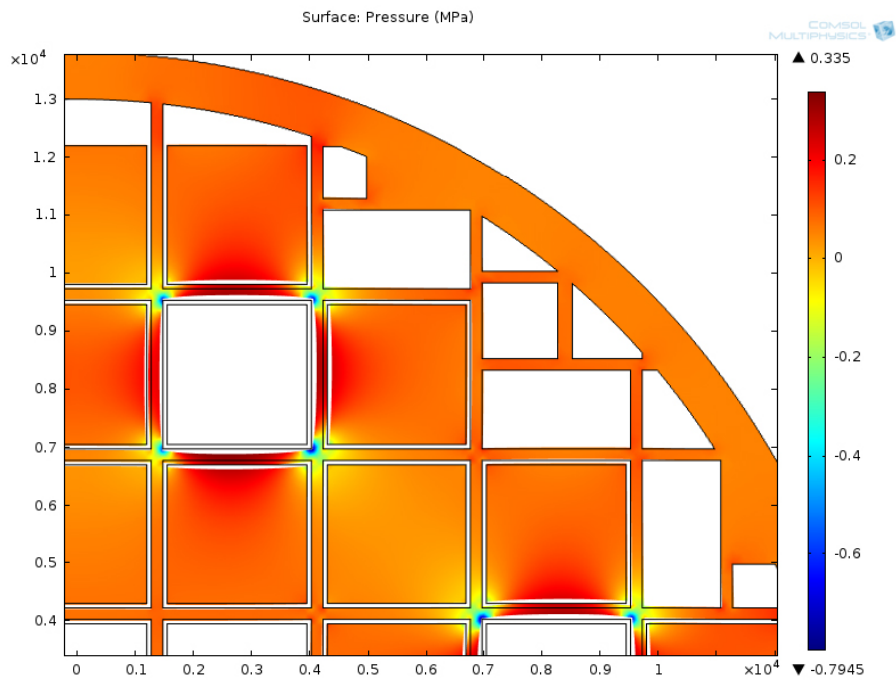


**Figur B1-19.** Tryck(MPa) och deformation i kringgjutningsbruk runt schakt i silons periferi, beräkningsfall 5.

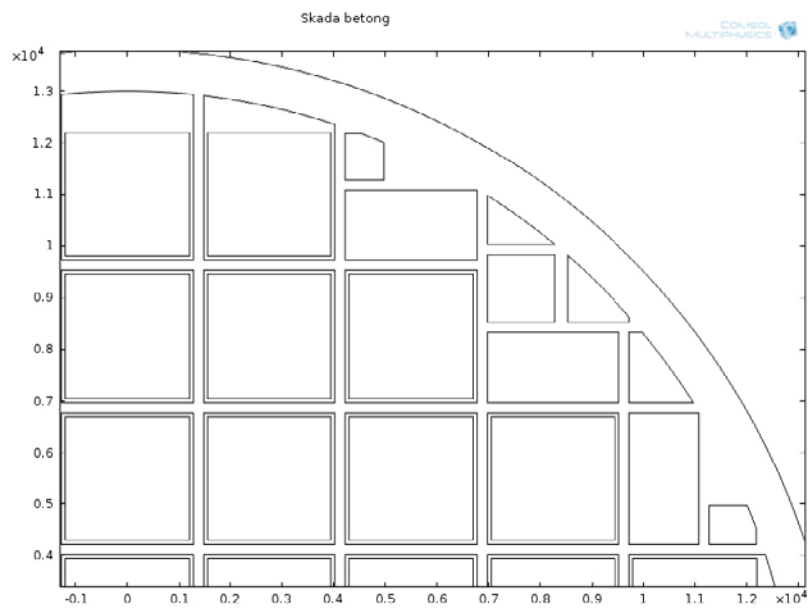


**Figur B1-20.** Skada och deformation i kringgjutningsbruk orsakad av dragspänning (blått) och tryckspänning(rött), beräkningsfall 5.

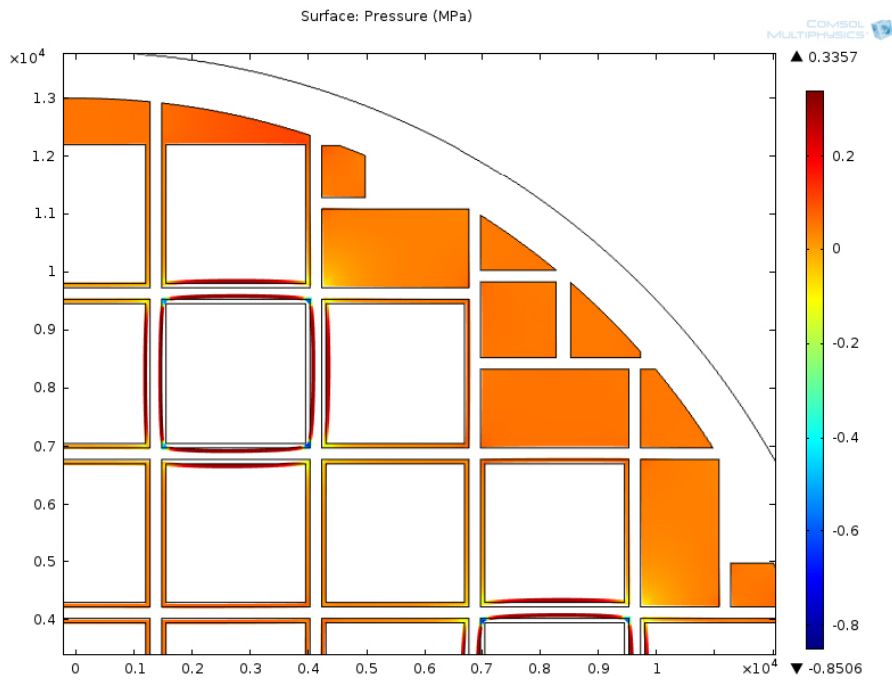
## Beräkningsfall 6



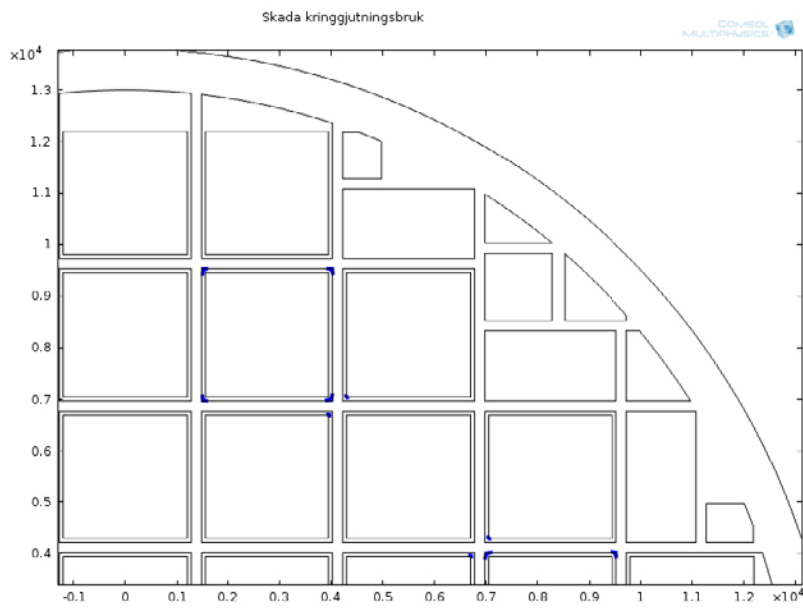
**Figur B1-21.** Tryck(MPa) och deformation i betongmaterial runt schakt i silons periferi, beräkningsfall 6.



**Figur B1-22.** Skada och deformation i betongmaterial orsakad av dragspänning (blått) och tryckspänning(rött), beräkningsfall 6.



**Figur B1-23.** Tryck(MPa) och deformation i kringgjutningsbruk runt schakt i silons periferi, beräkningsfall 6.

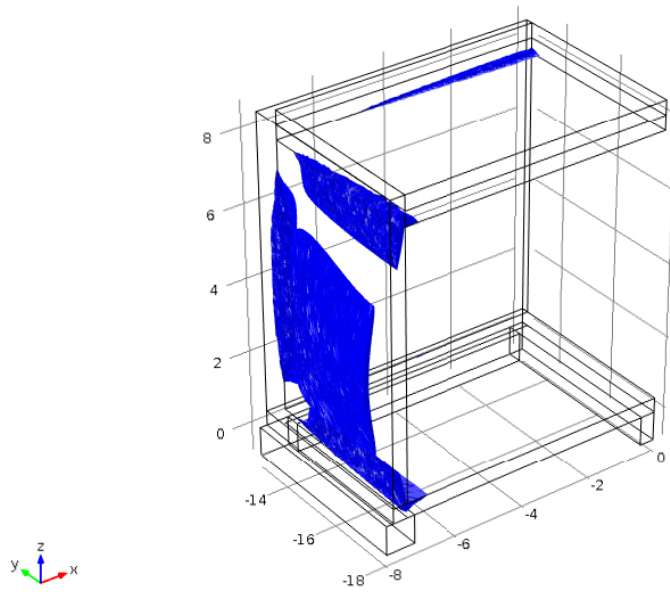


**Figur B1-24.** Skada och deformation i kringgjutningsbruk orsakad av dragspänning (blått) och tryckspänning(rött), beräkningsfall 6.

## BMA

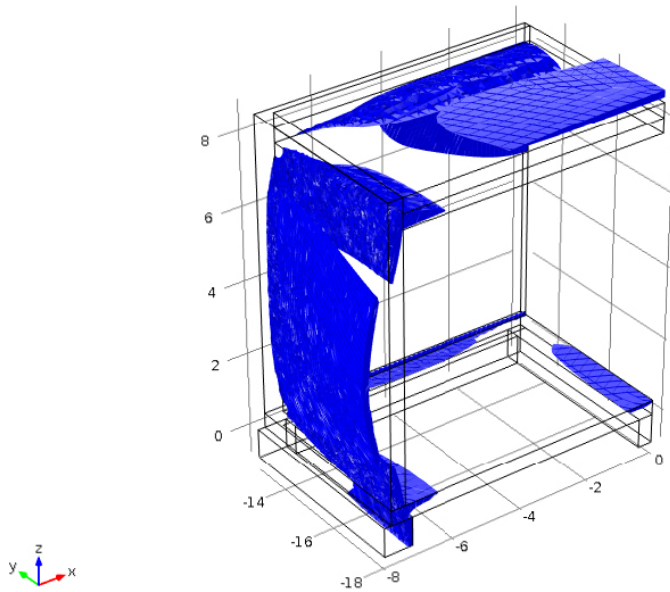
### Beräkningsfall 1 – Ingen återfyllnad

COMSOL  
MULTIPHYSICS

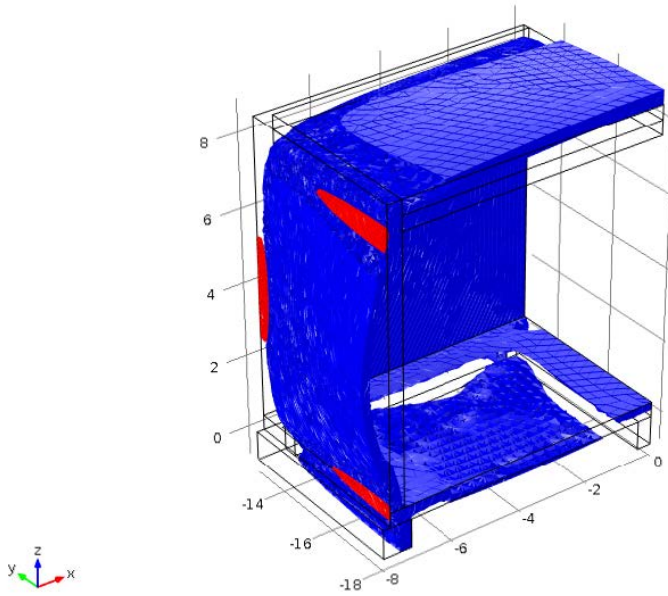


**Figur B1-25.** Skada i ett BMA facks betongbarriärer orsakad av dragspänning (blå fält) vid ett inre tryck på 50 kPa.

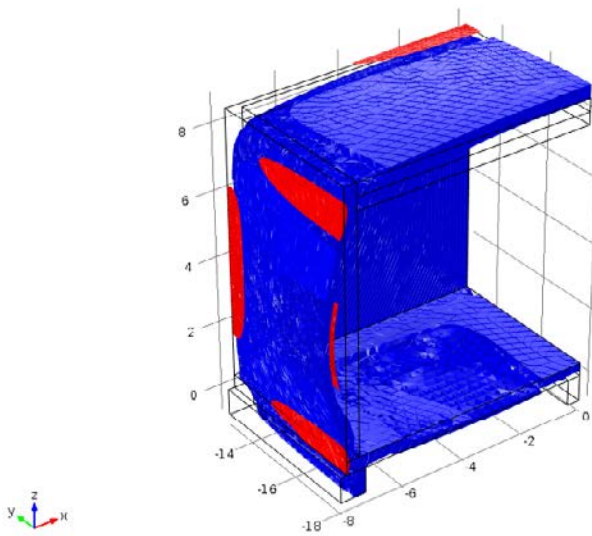
COMSOL  
MULTIPHYSICS



**Figur B1-26.** Skada i ett BMA facks betongbarriärer orsakad av dragspänning (blå fält) vid ett inre tryck på 100 kPa



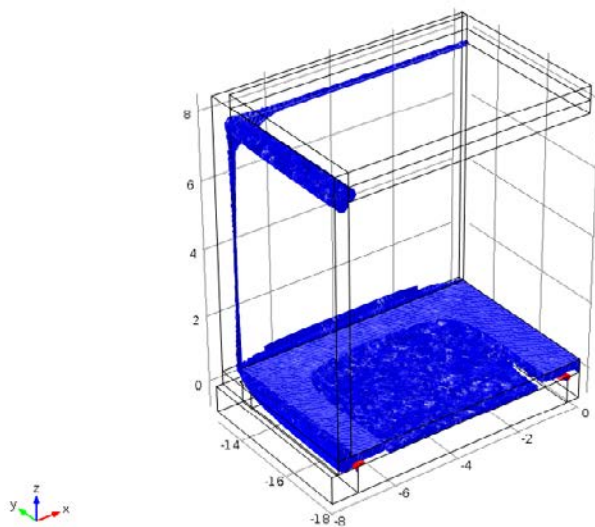
**Figur B1-27.** Skada i ett BMA facks betongbarriärer orsakad av dragspänning (blå fält) och tryckspänningar (röda fält) vid ett inre tryck på 300 kPa



**Figur B1-28.** Skada i ett BMA facks betongbarriärer orsakad av dragspänning (blå fält) och tryckspänningar (röda fält) vid ett inre tryck på 500 kPa

## Beräkningsfall 2 – Återfyllnad med betong

COMSOL  
MULTIPHYSICS



**Figur B1-29.** Skada i ett BMA facks betongbarriärer orsakad av dragspänning (blå fält) och tryckspänningar (röda fält) vid ett inre tryck på 1,5 MPa