LUND UNIVERSITY

Reaktorinneslutningarnas respons vid höga inre tryck och reducerad förspänning

Hassanzadeh, Manouchehr; Malm, Richard; Åhs, Magnus

2018

Document Version:
Förlagets slutgiltiga version

Link to publication

Citation for published version (APA):
Hassanzadeh, M., Malm, R., & Åhs, M. (2018). *Reaktorinneslutningarnas respons vid höga inre tryck och reducerad förspänning*. Swedish Radiation Safety Authority.

Total number of authors:
3

General rights
Unless other specific re-use rights are stated the following general rights apply:
Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.
• Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
• You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
• You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal

Read more about Creative commons licenses: https://creativecommons.org/licenses/

Take down policy
If you believe that this document breaches copyright please contact us providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

LUND UNIVERSITY

PO Box 117
221 00 Lund
+46 46-222 00 00

Download date: 05. Sep. 2026

Strål
säkerhets
myndigheten
Swedish Radiation Safety Authority

Författare: Manouchehr Hassanzadeh, SWECO, Stockholm
Richard Malm, KTH, Stockholm
Magnus Åhs, LTH, Lund

2018:26

Reaktorinneslutningarnas respons vid höga inre tryck och reducerad förspänning

Rapportnummer: 2018:26 **ISSN:** 2000-0456
Tillgänglig på www.stralsakerhetsmyndigheten.se

SSM perspektiv

Sammanfattning

I föreliggande studie har det genom numerisk modellering undersökts huruvida tillämpning av alternativ B enligt Regulatory Guide 1.90 (R.G. 1.90) är ett tillförlitligt sätt att bedöma reaktorinneslutningens integritet. Vid genomförandet har två olika numeriska modeller använts, en global 3D-modell respektive en ringmodell. Resultaten pekar på att tillämpning av alternativ B enligt R.G. 1.90 ger små möjligheter att detektera eventuella spännkraftsförluster eller mindre skador i spännkablar. Överensstämmelsen mellan de tillämpade modellerna var dock inte fullständig huvudsakligen beroende på begränsningar i projektets omfattning. För en bättre överensstämmelse mellan modellerna krävs, dels noggrannare analyser med den globala modellen och dels vidare utveckling av ringmodellen där den globala effekten på ringens spänningstillstånd och deformationsegenskaper beaktas vid beräkningarna.

Bakgrund

Samtliga reaktorinneslutningar i Sverige är både horisontellt och vertikalt förspända i den cylindriska delen av konstruktionen. Vissa är förspända med ingjutna spännkablar medan övriga är förspända med icke ingjutna spännkablar. Förspänningsnivån avtar över tid p.g.a. olika faktorer, t.ex. krypning och krympning eller areareduktion orsakad av korrosion. Ingjutna spännkablar är inte åtkomliga utifrån vilket gör det svårt att mäta spännkrafterna och kontrollera deras tillstånd.

Återstående förspänning i ingjutna spännkablar kan dock predikteras med användning av olika metoder. Den amerikanska Regulatory Guide 1.90 (R.G. 1.90) ger två alternativa metoder för att kontrollera spännkablarnas tillstånd, alternativ A och alternativ B. Alternativ A omfattar övervakning av reaktorinneslutningens förspänningsnivå genom instrumentering och tryckprov medan alternativ B omfattar övervakning av reaktorinneslutningens deformation under tryckprov.

Syfte

Syftet med projektet är att genom numerisk modellering undersöka huruvida tillämpning av alternativ B enligt R.G. 1.90 är ett tillförlitligt sätt att bedöma reaktorinneslutningens tillstånd. Detta görs genom att studera konstruktionens respons på inre tryck då konstruktionens egenskaper förändras samt hur spänningarna omfördelas när spännkablarna förlorar delar eller hela sin förspänning.

Resultat

I projektet har två olika numeriska modeller använts, en global 3D-modell respektive en ringmodell. I den globala 3D-modellen har det endast varit möjligt att studera större skador p.g.a. av modellens storlek och begränsningar i projektets omfattning. Ringmodellen som representerar ett genomsnittligt horisontellt segment av cylindervägen har använts för att studera inverkan av lokala skador på spännkablarna. Med ringmodellen var det möjligt att utföra flera beräkningar på en kortare tid med ökad komplexitet i materialmodellen. Inverkan av den omgivande konstruktionen modellerades dock inte i ringmodellen eftersom detta var utanför

ramen för projektet. Resultaten pekar på att tillämpning av alternativ B enligt R.G. 1.90 ger små möjligheter att detektera eventuella spännkraftsförluster eller mindre skador i spännkablar.

En bättre överensstämmelse mellan modellerna kräver, dels noggrannare analyser med den globala modellen där inverkan av lokala skador på den globala konstruktionsresponsen studeras och dels vidare utveckling av ringmodellen där den globala effekten på ringens spänningstillstånd och deformationsegenskaper beaktas vid beräkningar.

Slutsatser

Resultaten från båda tillämpade modeller bl.a. visar att

1. den relativa radiella deformationen vid ett normalt tryckprov är av sådan storlek att kravet på minsta deformation enligt R.G. 1.90 uppfylls med god marginal,
2. de analyserade skadorna i spännkablar ger små förändringar i deformationer under ett tryckprov,
3. det krävs relativt stora skador i spännkablar för att dessa ska kunna detekteras vid jämförelse av deformationer mellan två olika tryckprov, och
4. möjligheten att detektera skador i spännkablar förutsätter att mätinstrument är placerade i omedelbar närhet till skadeområdet.

Projekt information

Kontaktperson SSM: Kostas Xanthopoulos
Referens: SSM2017-2661

Strål
säkerhets
myndigheten
Swedish Radiation Safety Authority

Författare: Manouchehr Hassanzadeh, SWECO, Stockholm
Richard Malm, KTH, Stockholm
Magnus Åhs, LTH, Lund

2018:26

Reaktorinneslutningarnas respons vid höga inre tryck och reducerad förspänning

Datum: December 2018
Rapportnummer: 2018:26 **ISSN:** 2000-0456
Tillgänglig på 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.

Innehåll

1. Introduktion 4
1.1. Bakgrund 4
1.2. Syfte 6
1.3. Genomförande 6
1.4. Avgränsningar 7
2. Modell 9
2.1. Geometri 9
2.2. Betonginneslutningen 10
2.3. Tätplåt 11
2.4. Armering 12
2.5. Spännarmering 14
2.5.1. Spännkablar i cylinderväggen 15
2.5.2. Spännkablar i kupolen 16
2.6. Laster 18
2.6.1. Egenvikt 18
2.6.2. Förspänning av spännkablar 18
2.6.3. Inre övertryck 21
2.7. Randvillkor 22
3. Ringmodell 23
3.1. Geometri 23
3.2. Elementindelning 25
3.3. Randvillkor 26
3.4. Belastningsfall 27
3.4.1. Belastningssekvens 27
3.4.2. Trycktest 28
3.5. Defekter på spännkabel 28
3.6. Resultat 30
3.6.1. Egenvikt och förspänning 30
3.6.2. Normalt trycktest 30
3.6.3. Trycktest när horisontell spännkabel är defekt 32
3.6.4. Trycktest när vertikala spännkablar är defekta 36
4. Global 3D modell 39
4.1. Egenvikt och förspänning 40
4.2. Resultat från ett normalt trycktest 44
4.3. Inverkan från defekter på horisontella spännkablar 47
4.3.1. En horisontell spännkabel förutsätts vara defekt 48
4.3.2. Var fjärde horisontell spännkabel inom ett område förutsätts vara defekt 51
4.4. Inverkan från defekter på en vertikal spännkabel 55
5. Diskussion och slutsatser 59
6. Förslag till vidare studier 61
7. Erkännanden 62
8. Referenser 63

Sammanfattning

En reaktorinneslutnings (RI) betongkonstruktion är förspänd med spännkablar, som är placerade i ingjutna foderrör. I vissa reaktorinneslutningar injekteras foderröret med cementbruk efter genomförd förspänning. Cementbruket skyddar spännarmeringen mot korrosion och har möjlighet att omfördela spänningarna i en spännkabel när linbrott inträffar. Nackdelen med injekterade foderrör är att kabelns spänningsnivå inte kan kontrolleras, och att kabeln inte kan spännas igen vid behov.

För att kunna bedöma spännkablarnas spänningsnivå anger den amerikanska Regulatory Guide 1.90 två metoder (Alternativ A och B) för kontroll av spännkablarnas prestanda: Alternativ A) Övervakning av reaktorinneslutningens förspänningsnivå genom instrumentering och trycktest, Alternativ B) Övervakning av reaktorinneslutningens deformation under trycktest.

Detta projekt har genom numerisk modellering simulerat olika trycktest med och utan förekomst av defekter som lin- och kabelbrott både före och under trycktesten. Avsikten var att verifiera Alternativ B, genom att kontrollera om de inträffade lin- och kabelbrott ger några detekterbara deformationer i konstruktionen. För att genomföra detta, togs en fallstudie fram baserat på en typisk PWR (Pressurized Water Reactor) inneslutning som fysikaliskt och mekaniskt efterliknar typiska svenska PWR-inneslutningar.

Två olika strukturmodeller användes: 1) en global 3D modell som inkluderade samtliga väsentliga konstruktionsdelar i reaktorinneslutningen för att studera större defekter så som att hela spännkablar är påverkade, 2) en ringmodell för att kunna studera inverkan av lokala defekter på spännkablarna och undersöka hur stora de kvarstående deformationerna blir.

Simuleringarna visar att det krävs omfattande defekter hos linor/spännkablarna för att detta ska vara möjligt att detektera vid mätning av deformationsförloppet under ett trycktest. För att det ens ska vara möjligt att kunna detektera någon skada krävs att väldigt känsliga sensorer placeras i direkt anslutning till den skadade spännkabeln, inom någon meter från skadeområdet.

Summary

The concrete structure of a reactor containment is pre-stressed with tendons placed in ducts. In some reactor containments, these ducts are injected with cement grout after pre-stressing. The cement grout protects the tendons against corrosion and has the potential to redistribute the stresses in a tendon in the case of wire failure. The disadvantage of injected ducts is that the tendons pre-stressing level cannot be directly assessed and that the cable cannot be re-stressed if necessary.

In order to assess the of the pre-stressed cables, the US Regulatory Guide 1.90 provides two methods (Alternative A and B) for assessing the pre-stressing level of cables: Alternative A) Monitoring the pre-stressing level of the reactor containment by means of instrumentation and pressure tests, Alternative B) Monitoring of the reactor containments deformation under pressure tests.

This project has simulated different pressure tests by means of numerical modelling, which included development of defects such as wire and cable failure both before and during the pressure tests. The intention was to verify Alternative B by determining whether a tendon failure would cause any detectable deformations in the structure or not. To carry out this, a case study was analysed based on a typical PWR (Pressurized Water Reactor) containment that physically and mechanically was similar to typical Swedish PWR containment.

Two different structural models were used: 1) A global 3D model that included all the essential components of the reactor containment to study the influence of major defects such as a complete tendon failure, 2) a ring model to study the effect of local defects on the pre-stressing tendons and to determine the extent of the irreversible deformations.

The simulations show that extensive damages on the wires/tendons are required in order to be possible to detect any measurable changes during the pressure tests. In order to be possible to detect any damages, very sensitive sensors are required, and they must be placed directly adjacent to the damaged wire/tendon and within a few meters from the damaged area.

1. Introduktion

1.1. Bakgrund

Reaktorinneslutningarna i de svenska kärnkraftsreaktorerna är förspända betongkonstruktioner. Spännkraften, tryckande kraft mot betongkonstruktionen, utövas av spända (dragna) kablar som är monterade i konstruktionens ingjutna foderrör. Efter applicering av spännkraften fylls foderrören antingen med cementbruk eller fett, eller lämnas ofyllda. I det senare fallet cirkuleras torr luft i foderrören för att, liksom fallet med cementbruk och fett, skydda kablarna mot korrosion.

Spännkraften avtar p.g.a. momentana och tidsberoende effekter. Tidsberoende spännkraftsförluster orsakas av följande faktorer:

1. Spänningsrelaxation av spännkablar
2. Töjningar (stukning) i betong orsakad av krypning och uttorkningskrympning
3. Differentiell termisk expansion eller kontraktion mellan kabel, bruk och betong, förekommer i injekterade kabelrör.
4. Sektionsförändring i kablar orsakad av korrosion eller brott i wirar, linor eller kablar.

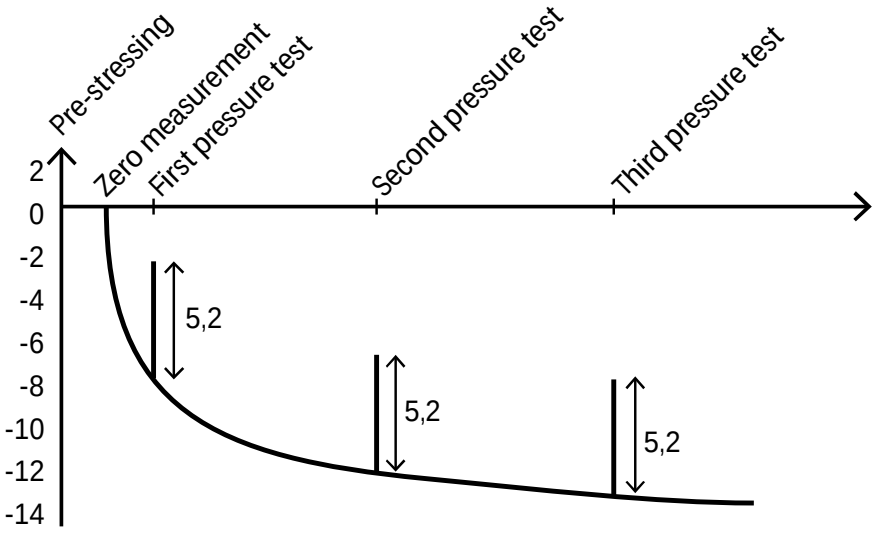
Spännkraften hos de spännkablar som finns i de foderrör som inte är injekterade med cementbruk kan kontrolleras, och kan återspännas om det är nödvändigt. När det gäller kablar i injekterade foderrör saknas både kontroll- och uppspänningsmöjligheter. Spännkraften hos kablar i injekterade foderrör kan bestämmas/kontrolleras på ett indirekt sätt. Den amerikanska Regulatory Guide 1.90 anger två metoder för kontroll av spännkablarnas prestanda enligt nedan:

A. Övervakning av reaktorinneslutningens förspänningsnivå genom instrumentering och trycktest (Alternativ A)
   - Övervakning av töjningar i spännkablarnas linor, d.v.s. kontinuerlig mätning av linornas töjning genom, vid byggandet, påmonterad töjningsgivare.
   - Evaluering av förspänningsnivå genom påmonterade deformations-/töjningsgivare på en sektion av konstruktionen.

B. Övervakning av reaktorinneslutningens deformation under trycktest (Alternativ B)
   - Trycksättning av RI och utvärdering av dess elastiska respons. Den elastiska responsen under trycksättning är primärt en funktion av konstruktionens styvhet. Spännarmeringens uppgift är att styra sprickbildningens omfattning och sprickornas bredd under olycksbelastning. En betydande minskning av konstruktionens styvhet på grund av reducerad förspänning kan resultera i sprickbildning i konstruktionen.

Ett exempel på hur uppmätt variation i radiell deformation skulle kunna se ut på en typisk reaktorinneslutning utan inverkan från defekter illustreras i Figur 1. Givare installeras normalt en viss tid efter förspänning och tidpunkten för installation av givaren definieras som nollmätningen. Efter denna tidpunkt kommer den radiella deformationen att variera med tiden orsakat av långtidseffekter från betongens krympning och krypning samt relaxation av spännkablar. Vid jämna tidsintervall, var femte år enligt Regulatory Guide, genomförs trycktester där ett övertryck byggs upp i inneslutningen i syfte att verifiera inneslutningens status.

En eventuell skillnad i deformation precis före och efter ett trycktest skulle kunna vara ett resultat av en spännkabel som har förlorat sin bärförmåga under provningen eller eventuell skillnad i relativ deformation mellan olika trycktester skulle kunna vara ett resultat av att en kabel förlorat sin bärförmåga mellan två trycktester.



Figur 1 Illustration av typiskt deformationsbeteende hos en reaktorinneslutning under lång tid och inverkan av genomförda trycktester. (enhet mm)

Det förekommer att man även monterar läges- och töjningsgivare på reaktorinneslutningens mantelyta för att bestämma töjningarna i tangentiell och axiell riktning på reaktorinneslutningens mantelyta. Den här typen av mätningar behandlas inte i denna rapport, eftersom läges- och töjningsgivare registrerar enbart lokala förändringar och bör monteras där förändringarna uppstår.

Alternativ B i Regulatory Guide 1.90 är ett acceptabelt sätt att bedöma inneslutningens integritet. Det finns, dock, inga experimentella data eller beräkningar som på ett systematiskt sätt visar hur omfattande reduktionen av förspänningen och/eller sprickbildningen får vara innan en signifikant förändring av konstruktionens styvhet kan detekteras. Detta projekt avser att analysera Alternativ B genom numerisk modellering för att beskriva konstruktionens beteende

1. under trycktest när konstruktionens egenskaper förändras p.g.a. bland annat defekter som uppstår före provning, och/eller
2. under provningen.

Resultaten kommer att ge information om RI:s respons på lin-/kabelbrott. Responsen mätts genom att studera förändringar i konstruktionens deformationer under och efter ett trycktest. Deformationernas storlek bestämmer den känslighet och lokalisering som olika mätutrustningar bör ha för att kunna upptäcka förändringarna.

Projektet går ut på att utveckla en numerisk modell av en del av en RI och studera konstruktionens respons på inre tryck när spännkablarna förlorar delar av eller hela sin förspänning. Projektet avser att svara på hur spänningarna omfördelas när en eller flera linor/kablar förlorar delar av eller hela sin förspänning.

Regulatory Guide 1.90 rekommenderar att deformationerna ska mätas på de ställen som uppvisar förändringar som överstiger 1,5 mm, vid ett internt tryck som motsvarar dimensioneringstrycket (design-basis accident). I praktiken mäts även RI:s respons under trycktest genom mätningar av radiella och axiella deformationer samt töjningar i betongens yta (eller några centimetrar under ytan). Utvärderingen går ut på att genom beräkningar ta fram samma typ av storheter som används vid verkliga trycktester och bestämma hur omfattande en viss skada/förändring måste bli innan en signifikant förändring kan noteras. Inom ramen för projektet kommer en hypotetisk RI att utsättas för olika övertryck som orsakar deformationer och töjningar i olika delar av konstruktionen. Inverkan av kabel-/linbrott både före och under trycktest på de deformationerna och töjningarna analyseras. Resultaten kommer att visa möjligheten att detektera kabel-/linbrott.

1.2. Syfte

Syftet är framförallt att fastställa den teoretiska marginal som finns mellan möjligheten att detektera eventuell funktionsförsämring och det gränsvärde som gäller för funktionen. Resultatet ökar tillståndsbedömningens tillförlitlighet. Resultatet verifierar också ”Alternative B” enligt RG 1.90, vilken kan underlätta kravställandet vid trycktester.

1.3. Genomförande

Projektet har genomförts genom ett samarbete mellan två svenska högskolor, vilket ombesörjer kompetensutvecklingen i landet. Uppdraget har genomförts enligt nedan:

1. Framtagning av en numerisk modell för en RI som är representativ för svenska kärnkraftverk. Den omfattar dels en global 3D modell för en generell analys av konstruktionens beteende och dels en 3D ring modell med begränsad höjd för detaljerade icke linjära analyser av konstruktionens beteende vid uppkomsten av olika defekter.
2. Bestämning av instrumentering och lokalisering av mätpunkter.

3. Simulering av trycktest och bestämning av tillämpade storheter i svenska reaktorinneslutningar med ingjutna spännkablar.
4. Simulering av trycktest till trycknivåer som leder till signifikant kvarstående deformationer.
5. Bestämning av den lägsta skadenivå som kan medföra mätbara förändringar hos av de Regulatory Guide 1.90 B föreskrivna parametrarna.
6. Inverkan av linbrott före och under trycktest på RI:s elastiska respons undersöks.

1.4. Avgränsningar

Beräkningar har utförts för

1. enbart ingjutna spännkablar,
2. en hypotetisk reaktorinneslutning, och
3. två modeller, dels en global linjärelastisk 3D modell som inkluderar hela inspända delen av reaktorinneslutningen och dels en lokal icke linjär 3D modell som analyserar en ring sektion långt ifrån konstruktionens bottenplatta och kupol.

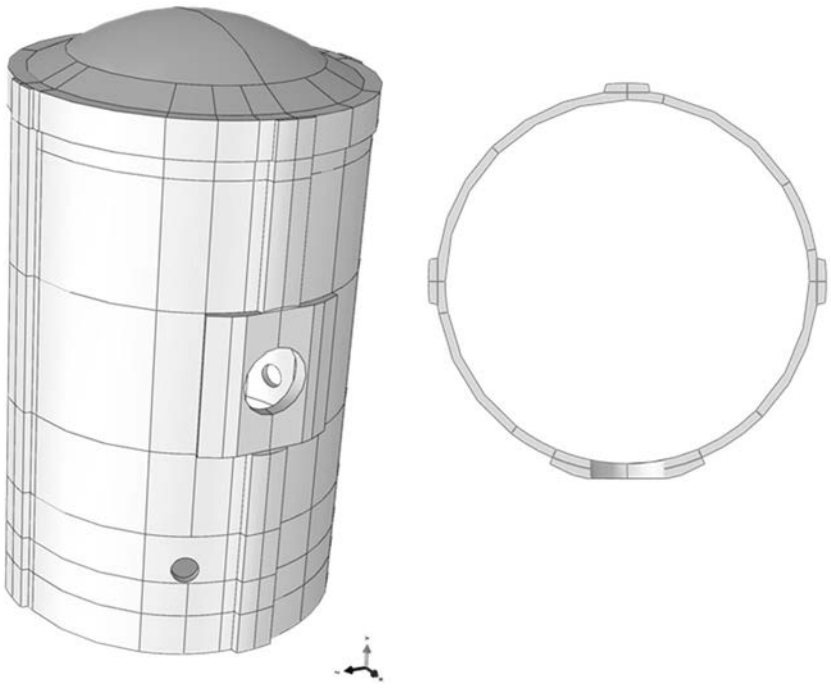
2. Modell

Inom ramen för denna studie avses att analysera en reaktorinneslutning och värdera inverkan från eventuella defekter vid ingjutna spännkablar vid trycktester. Målet är att bedöma om metod B i Regulatory Guide 1.90 kan användas för att observera dessa typer av defekter.

För att genomföra detta, har en fallstudie tagits fram baserat på en typisk PWR (Pressurized Water Reactor) inneslutning som fysikaliskt och mekaniskt ska efterlikna typiska svenska PWR-inneslutningar. Denna inneslutning, är därmed inte baserad på någon verklig inneslutning utan är att anse som ett referensfall. Programvaran Abaqus v. 6,14 (ABAQUS, 2014) har använts för att definiera den globala 3D modellen och för samtliga analyser på den globala 3D modellen.

2.1. Geometri

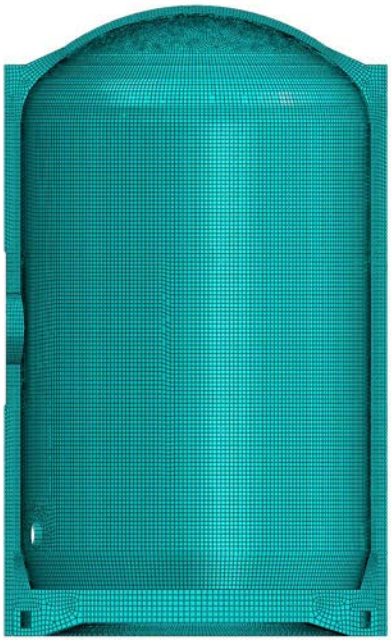
Den totala höjden av inneslutningen är 66,40 m med en ytterdiameter på 38,80 m. Tjockleken av inneslutningens väggar är 0,9 m. I Figur 2 illustreras inneslutningen samt de genomföringar som har beaktats i modellen, dels den stora transportgenomföringen (φ7,5 m) samt två stycken mindre personslussar (φ3,0 m).



Figur 2 Illustration av 3D geometri av inneslutningen (vänster) och dess tvärsnitt vid en genomskärning vid nivån för den stora transportgenomföringen (höger).

2.2. Betonginneslutningen

Betonginneslutningens geometri i 3D modellen är definierad med 8-nodiga solida volymselement med reducerad integration och timglas kontroll och benämns som C3D8R i Abaqus. Modellen är definierad så att det minst ska vara fyra element i tjockleksriktningen på inneslutningens väggar eller i kupolens tak. Antalet element i tjockleksriktningen ökar vid kontreforerna och vid ringbalken vid kupolen samt vid grundplattan. Elementen har en längd av 0,45 m i vertikal och horisontella riktningar.



Figur 3 Inneslutningen vid vertikal genomskärning, i nivå med stora genomföringen och kontreforerna.

Betongen förutsätts motsvara betong C40/50 med medelvärden enligt tabellen nedan.

Tabell 1 Sammanställning av materialegenskaper för betongen

Parameter	Värde	Notation	Enhet
Densitet	2500	ρ	kg/m^3
E-modul	35	E	GPa
Tvärkontraktion	0,2	ν	-
Tryckhållfasthet	48	f_{cm}	MPa
Draghållfasthet	3,5	f_{ctm}	MPa
Brottenergi	140	G_f	N/m
Termisk expansion	1e-5	α	1/K

2.3. Tätplåt

Tätplåten sitter monterad på inneslutningens insida med direktkontakt mot betongen och har en tjocklek motsvarande 6 mm. I Figur 4 illustreras tätplåtens geometri och elementnätsindelning. Tätplåten antas vara 40 mm tjock på i anslutning till genomföringarna i betonginneslutningen och själva öppningen i betongcylindern är täckt med ett 40 mm tjockt lock av stålplåt avsett för att fördela trycket vidare till betongkonstruktionen.

Tätplåten är modellerad med 4-nodiga skalelement med reducerad integration och timglas kontroll och benämns som S4R i Abaqus. Alla element i tätplåten är definierade för att ha en elementstorlek som överensstämmer med insidan av betonginneslutningen, dvs där elementstorleken typiskt är 0,45 m.

Figur 4 Geometri för tätplåt och elementnätsindelning

På tätplåten sitter även L-formade avstyvningar monterade. I modellen har dock tätplåten definierats som en slät yta och inverkan från avstyvningarna har inkluderats genom att skalelementet har förstyvats med hjälp av armeringslager. Varje ”armeringsjärn” har definierats så att den har en area, tyngdpunkt, avstånd or riktning som fullständigt motsvarar den L-formade avstyvningen. Detta leder till att tätplåtens böjstyvhet därmed stämmer överens med en verklig utformning, även om det modelleras på ett förenklat sätt. En sammanställning av avstyvningarnas egenskaper definieras i tabellen nedan.

Tabell 2 Dimensioner och avstånd för avstyvningarna på tätplåten

Placering	Riktning	Profil	Avstånd
Avstyvningar på cylindern	Horisontell	L120x80x10	1,89 m
Avstyvningar på cylindern	Vertikal	L70x50x6	0,76 m
Avstyvningar på kupolen	Horisontell	L200x100x10	1,89 m
Avstyvningar på kupolen	Vertikal	L70x50x6	0,76 m

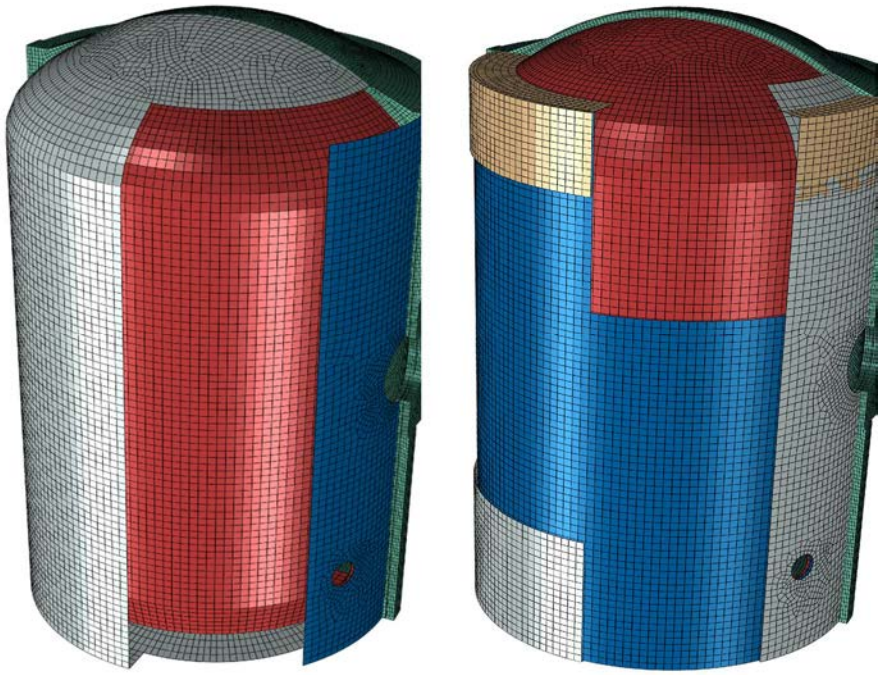
Hela tätplåten förutsätts motsvara materialkvalitet P275NL2 där använda materialegenskaper finns sammanställda i tabellen nedan.

Tabell 3 Materialegenskaper för tätplåten

Parameter	Värde	Notation	Enhet
Densitet	7850	ρ	kg/m^3
E-modul	212	E	GPa
Tvärkontraktion	0,3	ν	-
Flytspänning	275	f_{yk}	MPa
Termisk expansion	1,19e-5	α	1/K

2.4. Armering

Inneslutningen består av tre lager med horisontella och vertikala armerings-järn i cylinderväggarna och två lager armering i kupolen. Samtliga av dessa har inkluderats i modellen som armeringslager i membranelement. De olika armeringslagren illustreras i Figur 5, där membranelementen har färgkodats för att beskriva olika armeringslager. I Tabell 4 sammanställs informationen om de olika armeringslagren.



Figur 5 Illustration av olika armeringslager i modellen. Inre armeringslagret är illustrerad med röd färg, armeringslagret i mitten av tvärsnittet är illustrerat med blå färg och det yttre armeringslagret är illustrerat med grå färg. Dessutom finns ytterligare armeringslager kring ringbalken i underkant av kupolen som illustreras med gul färg.

Tabell 4 Inkluderade armeringslager i modellen.

Placering	Lager	Riktning	Diameter [mm]	Avstånd [mm]
Armering i cylinderväggen	Inre	Horisontell	25	200
Armering i cylinderväggen	Inre	Vertikal	25	200
Armering i cylinderväggen	Mitten	Horisontell	16	1000
Armering i cylinderväggen	Mitten	Vertikal	20	58,8
Armering i cylinderväggen	Yttre	Horisontell	25	200
Armering i cylinderväggen	Yttre	Vertikal	32	200
Armering i kupolen	Inre	Horisontell	25	200
Armering i kupolen	Inre	Vertikal	25	200
Armering i kupolen	Yttre	Horisontell	25	200
Armering i kupolen	Yttre	Vertikal	25	200

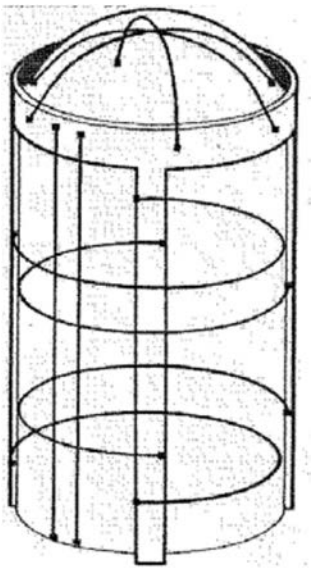
Materialkvaliteten för armeringen har förutsatts motsvara S500. Materialbeteendet har definierats baserat på Eurokod 2 (EN 1992-1-1 (2010)) där armeringen förutsätts motsvara klass B. Materialegenskaperna som använts i analyserna presenteras i Tabell 5.

Tabell 5 Materialegenskaper för armeringsjärn

Parameter	Värde	Notation	Enhet
Densitet	7850	ρ	kg/m^3
E-modul	200	E	GPa
Tvärkontraktion	0,3	ν	-
Brotttöjning	5	ε_{uk}	%
Flytspänning	500	f_{yk}	MPa
Förhållande brottspänning & flytspänning	1,08	$k = \left(\frac{f_t}{f_y}\right)_k$	-

2.5. Spännarmering

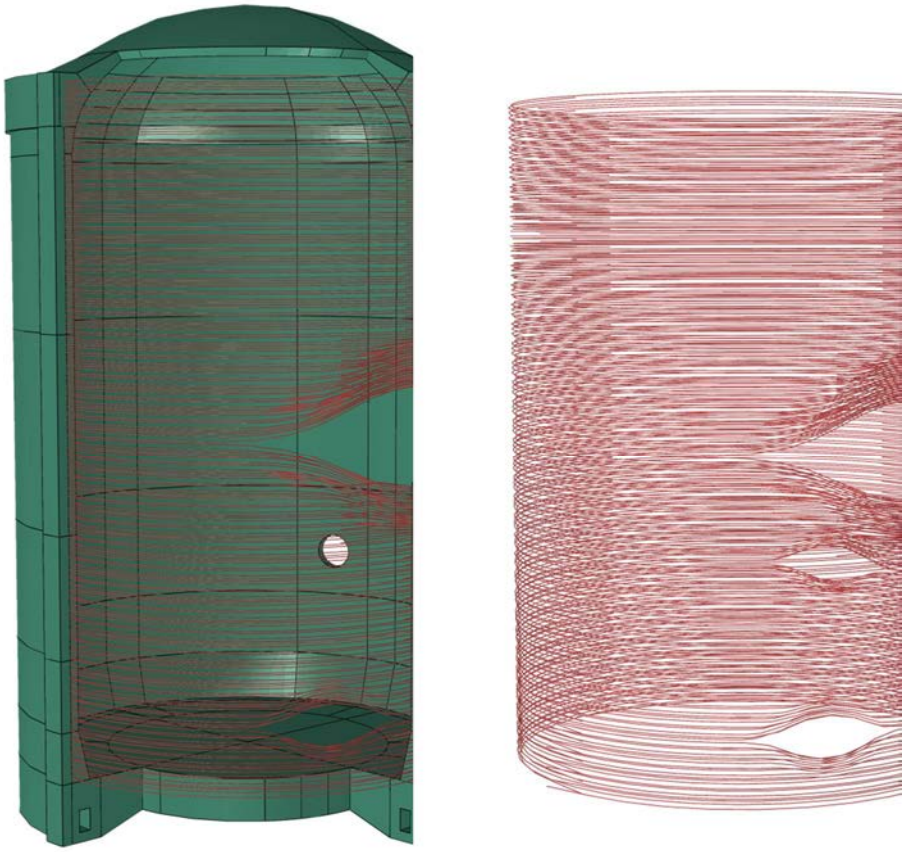
Reaktorinneslutningen är förspänd med injekterade spännkablar där, inneslutningens cylindervägger är förspända med horisontella ¾-dels varvs kablar samt med vertikala spännkablar från kupolens ringbalk ner till grundplattan. I kupolen är spännkablarna uppspända vid kupolens ringbalk. I Figur 6 illustreras anordningen av spännkablar och i efterföljande avsnitt beskrivs anordningen av spännkablarna mer utförligt. Spännkablarna har beaktats i enlighet med metodiken föreskriven i Malm (2016).



Figur 6 Illustration av anordning av spännkablar i inneslutningen.

2.5.1. Spännkablar i cylinderväggen

De horisontella spännkablarna är arrangerade i två lager med en radie på 19,03 m eller 19,23 m. Varje av dessa kablar sträcker sig ¾-dels varv runt inneslutningen och är förankrade vid kontreforerna, där kablarna spänns från varje ände. Det vertikala avståndet mellan kablarna vid radie 19,03 m respektive 19,23 m är 400 mm, där inre och yttre varvs kablar är förskjutna 200 mm i förhållande till varandra. Detta innebär att det vertikala avståndet mellan inre och yttre kabel är 200 mm. Kring genomföringarna så avlänkas spännkablarna vilket illustreras i Figur 7.



Figur 7 Anordning av horisontella spännkablar i cylinderväggen.

De vertikala spännkablarna är placerade på en radie motsvarande 18,88 m och består av totalt 212 spännkablar. På liknande sätt som för de horisontella spännkablarna så avlänkas dessa kring genomföringarna vilket illustreras i Figur 8.

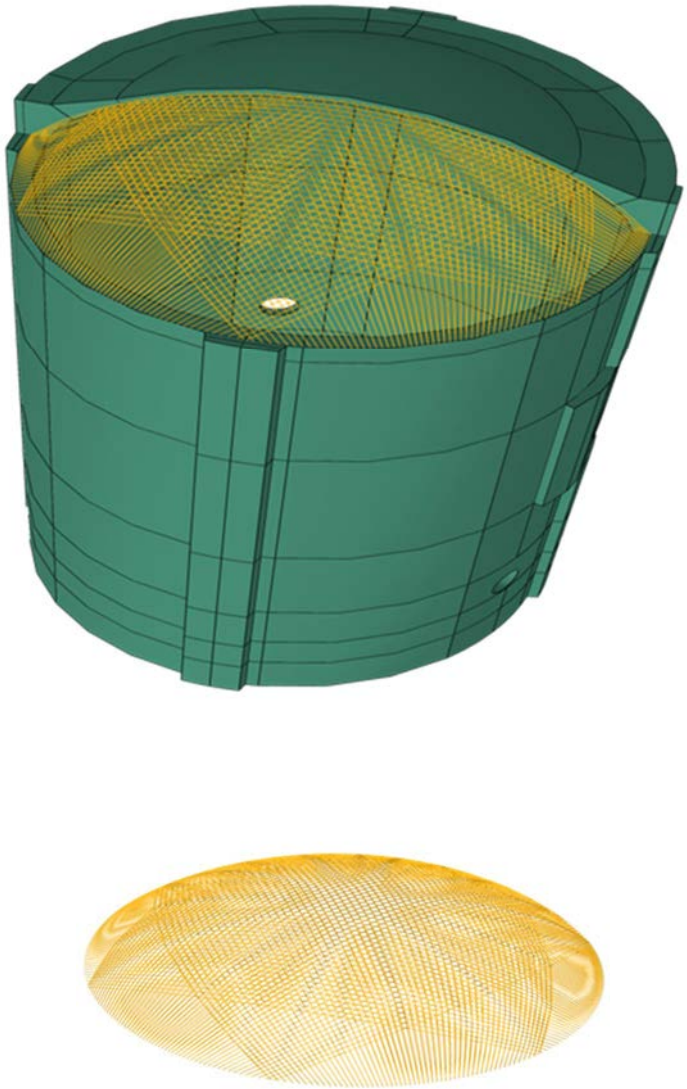
Samtliga spännkablar har modellerats individuellt och består av 2-nodiga stångelement för 3D appliceringar som benämns T3D2 i Abaqus. Elementlängden för spännkablarna är vald för att överensstämma med elementindelningen hos betonginneslutningen, dvs med en typisk elementlängd på 0,45 m.

Figur 8 Anordning av vertikala spännkablar i cylinderväggen.

2.5.2. Spännkablar i kupolen

Spännkablarna i kupolen är arrangerade i tre lager med en radie som motsvarar 23,8 m och 54 stycken spännkablar per lager. Varje lager täcker 1/3 av omkretsen av kupolen, där varje lager är förskjutet 120° i förhållande till föregående, se Figur 9.

Alla spännkablar i kupolen är modellerade individuellt, bestående av 2-nodiga 3D stångelement benämnda T3D2 i Abaqus. Elementlängden är anpassad till betonginneslutningens elementnät med en typisk elementlängd motsvarande 0,45 m.



Figur 9 Anordning av spännkablar i kupolen

2.6. Laster

I efterföljande avsnitt beskrivs de laster som beaktas i den globala 3D modellen.

2.6.1. Egenvikt

Egenvikten beräknas i beräkningsprogrammet baserat på respektive materialens egenvikt, dess volym samt gravitationskonstanten 9,82 m/s^2.

2.6.2. Förspänning av spännkablar

Spännkraftsfördelning i en spännkabel

En beräkning av spännkraftsfördelningen längs med de horisontella spännkablarna i cylinderväggen har genomförts. Spännkablarna är arrangerade i två rader (radie 19,03 respektive 19,23), och för att illustrera kraft av i dessa kablar har en beräkning genomförts för medelvärdet av dessa radier, dvs 19,13 m.

Spännkraften längs med spännkablarna varierar på grund av spännkraftsförluster orsakade av friktion på grund av kabelns krökning. Vid uppspänning, används hydrauliska förspänningsdon för att spänna kabeln och därmed förlänga kabeln så att den glider mot den aktiva förankringen (där man förspänner). Detta resulterar i att friktionskrafter utvecklas längs med kabeln där kraften sjunker från sitt maximum vid uppspänningspunkten. Vid detta fall så spänns kablarna från båda förankringarna vilket leder till en symmetrisk spännkraftsfördelning längs med kabeln där minimum uppnås i mitten av kabeln. Enligt Eurokod 2 (EN 1992-1-1, 2010) kan spännkraftsfördelningen beräknas enligt Ekv. 1.

$$F(\mathrm{x}) = F_{\max} e^{-\mu(\theta + kx)} \qquad \textit{Ekv. 1}$$

där,

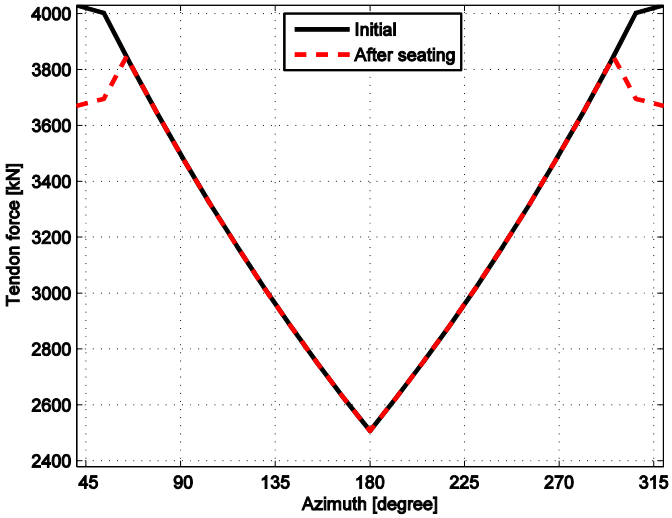
$F(\mathrm{x})$ = variationen i spännkraft från den aktiva förankringen [N]
$F_{\max}$ = maximal spännkraft, typisk vid den aktiva förankringen [N]
θ = den kumulativa vinkelförändringen längsmed kabeln [rad]
μ = friktionskoefficienten mellan spännkabel och spännkabelrör [-]
k = oavsiktlig vinkeländring per längdenhet som beror på toleranser [-]

Materialegenskaper enligt Tabell 6 har förutsatts i analyserna.

Tabell 6 Indata till analysen av spännkraftsförluster

Parameter	Beskrivning	Värde
μ	Friktionskoefficient	0,17
k	Ofrivillig krökning	0,0088
R	Radie	19,13 m
F_0	Spännkraft vid uppspänning	4,03 MN
F_1	Spännkraft efter eftersläpp	3,67 MN
A	Spännkabelarea	0,002641 m^2
E	E-modul för spännkablar	195 GPa

Den första delen av spännkabeln, dvs närmast förankringen, är rak vilket innebär att friktionsförlusterna för denna del är signifikant mycket lägre än för övriga delar av spännkabeln. Beräknad spännkraftsvariation längs med en spännkabel illustreras i Figur 10 för både fallet med initial uppspänning och efter ett eftersläpp. För att utjämna spännkraftsfördelningen i cylinderväggen, överspänns normalt spännkablarna och därefter görs ett eftersläpp. I och med detta så inträffar den maximala spännkraften på ett visst avstånd från själva förankringen istället för den aktiva förankringen. Beräkningen av eftersläpp genomförs enligt Andersson et al (2005) och i detta fall är den maximala spännkraften ca 3,85 MN efter eftersläpp och inträffar ca 8,4 m ifrån den aktiva förankringen. Spännkraften vid förankringen är 3,67 MN efter eftersläppet vilket motsvarar en glidning på 4,1 mm. Den genomsnittliga spännkraften längs med spännkabeln motsvarar 3,23 MN men på grund av relativt stor friktion och en lång kabel fås en stor variation i spännkraft där minimala spännkraften som erhålls vid mitten av spännkabeln. Detta motsvarar en genomsnittlig spännkraftsförlust på 4,6 %.

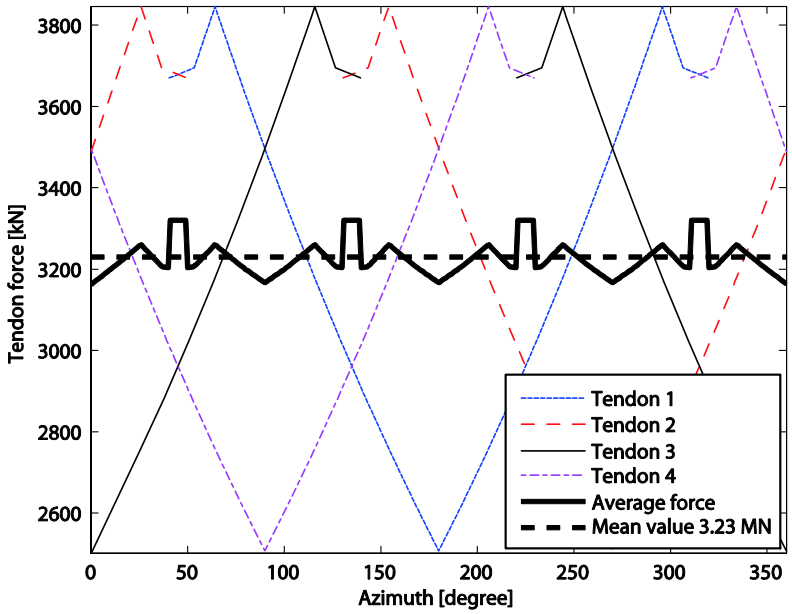


Figur 10 Beräknad spännkraftsvariation längsmed en spännkabel.

Spännkraftsfördelning i cylinderväggen

På grund av den stora variationen i spännkraft längsmed en kabel, så placeras spännkablarna med en viss förskjutning i förhållande till varandra. Eftersom en spännkabel utgör ¾ av inneslutningens omkrets så kommer spännkablarna att överlappa varandra. Detta leder till att den genomsnittliga spännkraftsvariationen i cylinderväggen blir avsevärt mycket mindre. För att illustrera överlappen mellan spännkablarna har en representativ sträcka av inneslutningen valts ut som motsvarar fyra stycken spännkablar. I Figur 11 illustreras hur fyra stycken spännkablar överlappar varandra och den resulterande genomsnittliga spännkraften i väggen. I figuren framgår det att spännkraften är relativt konstant i cylinderväggen och varierar mellan 3,16 MN och 3,32 MN.

Eftersom den genomsnittliga spännkraftsfördelningen är relativt kontant så är det rimligt att anta en konstant spännkraft i spännkablarna vid en global 3D modell av en inneslutning. Detta särskilt med tanke på att elementstorleken typiskt är 0,45 m vilket innebär att betongelementen kommer vara kopplade till två spännkablar. Den spännkraft som har ansatts i 3D globala modellen är sammanställd i Tabell 7. I den detaljerade 3D ringmodellen har istället den verkliga spännkraftsfördelningen ansatts enligt Figur 11.



Figur 11 Genomsnittlig spännkraft och spännkraftsfördelning i cylinderväggen

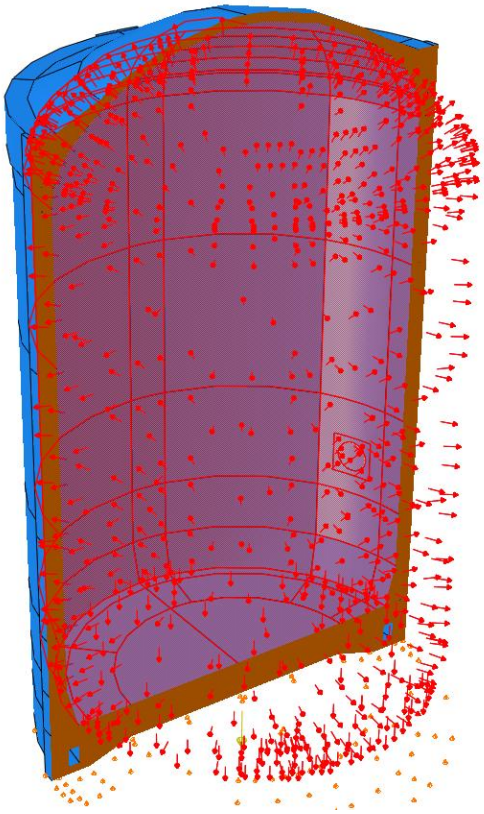
Tabell 7 Sammanställning av antagen spännkraft i 3D globala modellen.

Del av inneslut-ningen	Riktning på spännkabeln	Genomsnittlig kraft [MN]	Genomsnittlig spänning [MPa]
Cylinder vägg	Horisontell	3,23	1223
Cylinder vägg	Vertikal	3,77	1427
Kupol	Meridian	3,67	1390

2.6.3. Inre övertryck

Vid trycktesten appliceras ett övertryck i inneslutningen som motsvarar 460 kPa. Övertrycket appliceras på tätplåten i modellen. Ett typiskt trycktest genomförs under 24 timmar, där tryckökning genomförs de första sex timmarna, därefter bibehålls trycket konstant under 12 timmar och under de sista sex timmarna reduceras trycket igen.

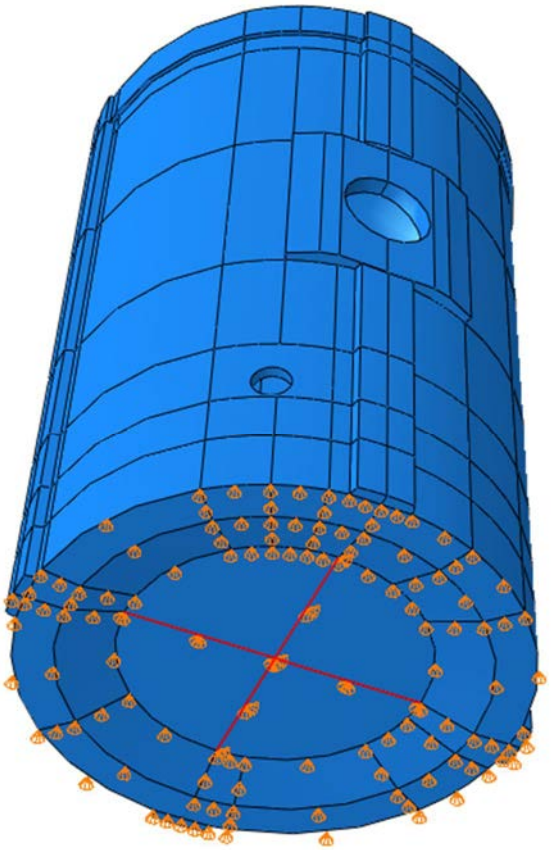
Trycket appliceras på samtliga invändiga ytor av inneslutningen vilket illustreras i Figur 12.



Figur 12 Illustration av applicerat övertryck på tätplåten.

2.7. Randvillkor

Randvillkor har applicerats i botten av geometrimodellen på bottenplattan. Samtliga noder på bottenplattan är förhindrad att röra sig i vertikal riktning. Utöver detta har även symmetrilinjerna i x- respektive y-led förhindrats att deformeras i tangentiell riktning. Detta randvillkor appliceras för att förhindra att eventuell stelkroppsrotation av reaktorinneslutningen. Randvillkoren som applicerats i modellen illustreras i Figur 13.



Figur 13 Illustration av applicerade randvillkor på bottenplattan.

3. Ringmodell

I det här avsnittet presenteras en modell för att analysera skador som uppstår på en begränsad del av en reaktorinneslutning under ett trycktest. Programvaran som har använts för att modellera ringmodellen är COMSOL Multiphysics (COMSOL, 2017). I modellen har olika typer av skador på spännkablar simulerats genom att minska spännkabelns area under trycktestet. Detta innebär att den lastbärande förmågan minskas gradvis med minskande armeringsarea så att allt mindre last bärs av den skadade kabeln. Genom att jämföra deformationerna i skadad och oskadad konstruktion blir det möjligt att bedöma om deformationsskillnaden är detekterbar genom gängse metoder för mätning av deformationer och töjningar. En sådan jämförelse ger också möjlighet att bedöma på vilket avstånd från skadan som den är detekterbar, d.v.s. hur snabbt avklingar skadans detekterbarhet med ökat avstånd från skadeområdet.

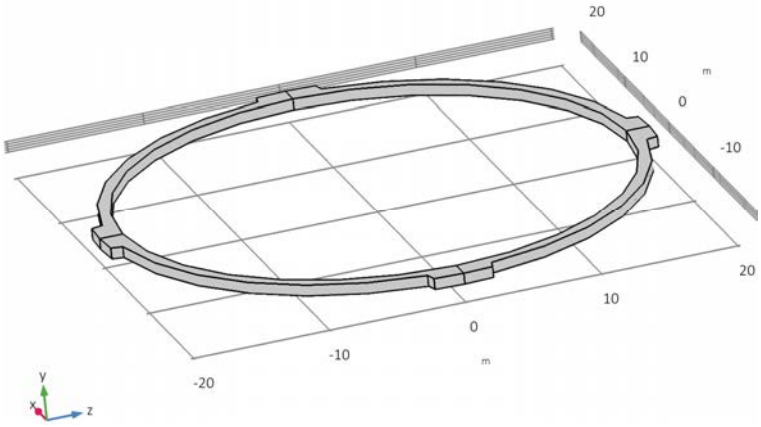
Den geometri som definieras här motsvarar en utskuren ring av cylinderväggen inklusive kontreforer. I denna ringmodell har horisontella och vertikala spännkablar arrangerats på ett sätt som motsvarar en verklig reaktorinneslutning. Även mängden spännkablar motsvarar mängden i en verklig konstruktion. Genom att studera ett utsnitt av geometrin är det möjligt att studera deformationer som lokala skador på spännkablar ger upphov till och utföra beräkningar på flera olika lin- och kabelbrott. Det möjliggör också att förfina elementindelningen och utföra analysen med en icke-linjär beräkningsmodell.

3.1. Geometri

Det geometriska utsnittet består av en ring lokaliserad 50 meter över bottennivån och cirka 10 meter under cylinderväggens övergång till kupolen, se Figur 14.

Ringen i Figur 14 har en inre radie av 18,5 m och en höjd av 800 mm och innehåller inga hål eller genomföringar och har fyra kontreforer/förstyvningar för inspänningsdon för spännkablarna. Betongväggen mellan kontreforerna har en tjocklek av 900 mm.

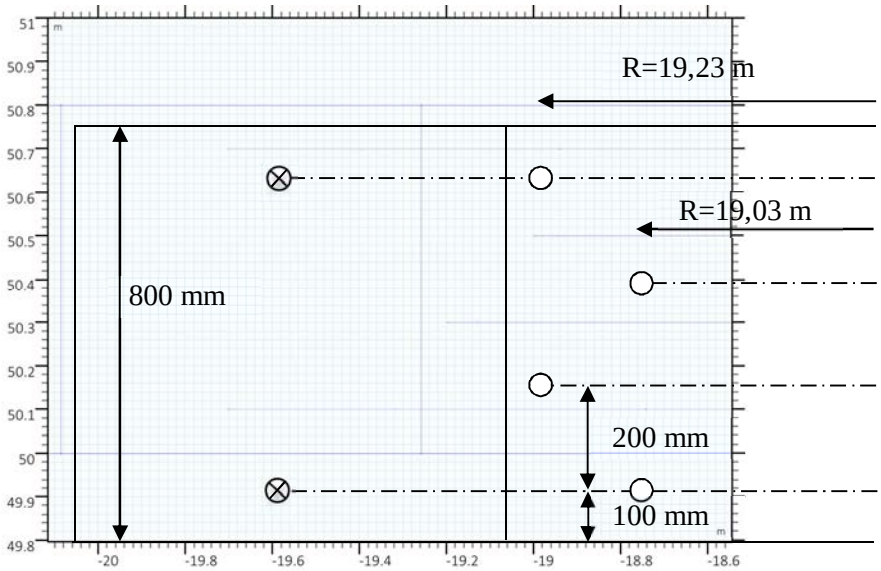
Höjden på ringen är vald så att den horisontella armeringskonfigurationen är symmetrisk. De horisontella spännkablarna sträcker sig tre fjärdedelar runt omkretsen. Mellan varje lager roteras spännkabelns infästningspunkter 90 grader runt y-axeln, se Figur 6, så att de hamnar på kontreforer som är ett kvarts varv förskjutna mot föregående lager. Det innebär att fyra kabellager minst måste inkluderas i ringmodellen för att utgöra en minsta representativ enhet. Eftersom kablarnas infästningspunkt roteras en fjärdedelsvarv för varje lager så kommer fyra lager att innebära att varje infästningspunkt inkluderas en gång. Om fem kabellager inkluderas så kommer trefjärdedelar av ringen få en högre spänning på grund av två lager spännkablar med samma inspänningspunkter.



Figur 14 Geometrisk modell för detalj av reaktorinneslutning.

Totalt finns det 274 stycken horisontella spännkablar i höjdled på en verklig konstruktion. Den vertikala spännarmeringen består av 212 stycken spännkablar som är jämnt fördelade längs omkretsen i radie av 18,8 m alltså 0,3 m från innerkant ring.

Både horisontella och vertikala spännkablar har modellerats som stångelement. Avståndet i höjdled för de horisontella spännkablarna är 200 mm för varje skikt, där det första skiktet är placerat 100 mm från den undre kanten av ringen. Armeringskablarnas läge i radiell led är 19,03 m för de inre kablarna och 19,23 m för de yttre kablarna, se Figur 15.

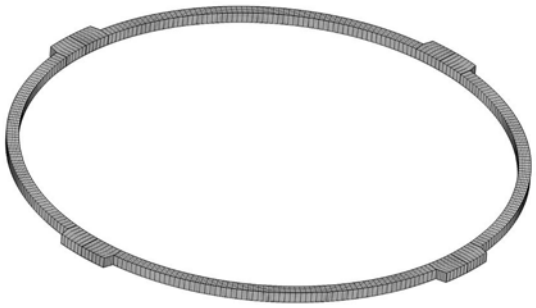


Figur 15 Tvärsnitt för ringmodellen med horisontella spännkablar, heldragen linje motsvarar geometrins begränsning och den streckprickade linjen motsvarar spännkablarna. Ringar motsvarar det radiella läget för respektive kabel och ring med kryss motsvarar infästning/läge i kontrefor.

3.2. Elementindelning

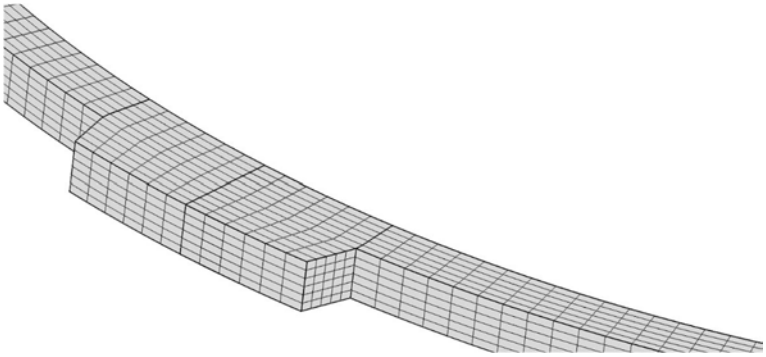
Solidkroppen som representerar cylinderväggen och kontreforerna är indelad i hexaeder-element, se Figur 16

.



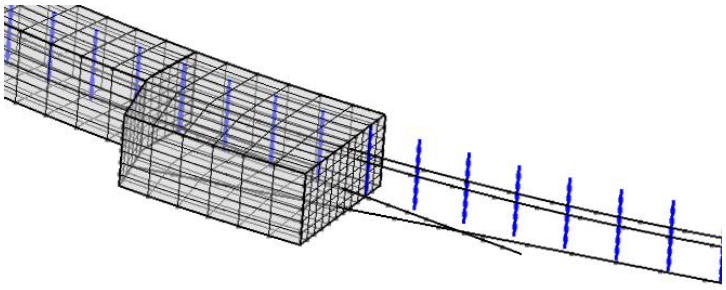
Figur 16 Elementindelning för den använda ringmodellen.

Cylinderväggens hexaederelement har en höjd av 0,133 m, ett djup av 0,15 m och en längd av cirka 0,6 m. Vid kontreforerna är solidkroppen indelad i 11 element i radiell ledd där sidan i radiell ledd är 0,15 m och i omkretsens utsträckning är elementen cirka 0,6 m långa, se Figur 17.



Figur 17 Detalj av elementindelning i kontrefor och vägg.

Spännkablarna har elementindelats så att de ungefär motsvarar elementindelningen i solidkroppen, Figur 18.

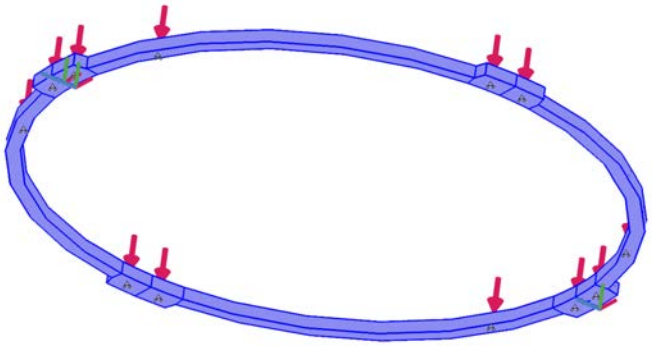


Figur 18 Detalj av elementindelning av spännkablar där de vertikala spännkablarna är blåa med nodpunkter markerade och de horisontella spännkablarna är svarta med markerade nodpunkter.

3.3. Randvillkor

Ringmodellen är tänkt att representera responsen hos endast en del av reaktorinneslutningen. Utsnittet befinner sig på en viss höjd från bottenfundamentet. I den här analysen är den tänkta höjden 50 meter från bottennivån. Modellen exkluderar bidrag av styvhet från bottenfundament, kupoltaket och cylinderväggen över och under ringen. Inverkan av bottenfundamentet och kupolen minskar med avståndet från ringen till bottenfundament och kupol. Inverkan försvinner dock inte helt. Den förenkling som införs genom att enbart betrakta ringen påverkar beräkningsresultaten. Den största inverkan är på den radiella deformationen och den tangentiella töjningen. Resultatet blir dock konservativt, d.v.s. de deformationer och töjningar som analyserna leder till är större än dito om beräkningen hade utförts på hela konstruktionen i stället för ringmodellen.

Randvillkoret har formulerats så att ringens bottenytas vertikala rörelse är förhindrad men ringen är fri att röra sig i horisontalled. Men för att motverka att ringen börjar rotera när lasten läggs på, förhindras rörelsen vinkelrätt mot två horisontella axlar, x- och z-axel, som skär centrum av modellen, så att rörelse i radiens riktning är fri, se Figur 19.



Figur 19 Randvillkor för ringmodellen sedd underifrån. De röda pilarna motsvarar trycket av egenvikten från den ovenligande konstruktionen.

Ovanpå ringen läggs en belastning som motsvarar egenvikten från den ovanliggande konstruktionen vilket beräknats till c:a 720 kPa. Taket har beräknats vara 0,5 m tjockt, väggtjockleken i genomsnitt 1,0 m, höjden ovanför ringen har antagits till 10 m, och egenvikten för betong har antagits till 2350 kg/m^3.

3.4. Belastningsfall

3.4.1. Belastningssekvens

Den oskadade konstruktionen spänns först upp med de horisontella spännkablarna sedan spänns de vertikala spännkablarna upp. Därefter simuleras ett trycktest med oskadad konstruktion, enligt Tabell 8. Varje händelse är numrerad men representerar inte ett verkligt tidsförlopp utan visar bara ordningsföljden, eftersom tiden i sig inte är relevant för de analyser som presenteras här. Dessa nummer återfinns på x-axeln i diagrammen som visar radiella deformationer i tiden.

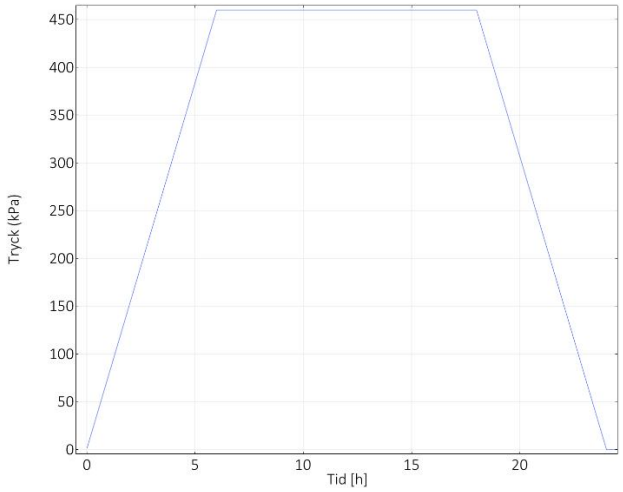
Tabell 8 Händelser i belastningssekvens

Nummer	Händelse
1	Inledning av uppspänning av horisontella spännkablar.
2	Inledning av uppspänning av vertikala spännkablar.
3	Inledning av trycktest
4	Start av konstant tryckbelastning, mätning av läckage. Eventuell skada börjar.
5	Eventuell skada fullständigt utvecklad.
6	Slut av trycktest.

Denna sekvens följs sedan i samtliga simulerade skador på spännkablarna. Skadorna simuleras genom att minska tvärsnittsarean från skadefri spännkabel till fullt utvecklad skada under 7 timmars tid med början vid maximal belastning under trycktestet.

3.4.2. Trycktest

Trycktestet som har belastat reaktorinneslutningen följer en viss sekvens vilken åskådliggörs Figur 20.



Figur 20 Trycktest av reaktor inneslutning.

Maximalt övertryck är 460 kPa och detta tryck belastar konstruktionen under 12 timmar. Det maximala övertrycket uppnås efter 6 timmar. Trycket stiger konstant under de 6 första timmarna för att under de 6 sista timmarna sjunka konstant.

3.5. Defekter på spännkabel

I ringmodellen har påverkan av förluster i vidhäftning mellan spännkablar och injekteringsbruk modellerats genom att tvärsnittsarean för spännkabeln minskats från 100 % ner till 0 % under 7 timmars tid.

Följande fall som analyserad defekt har studerats:

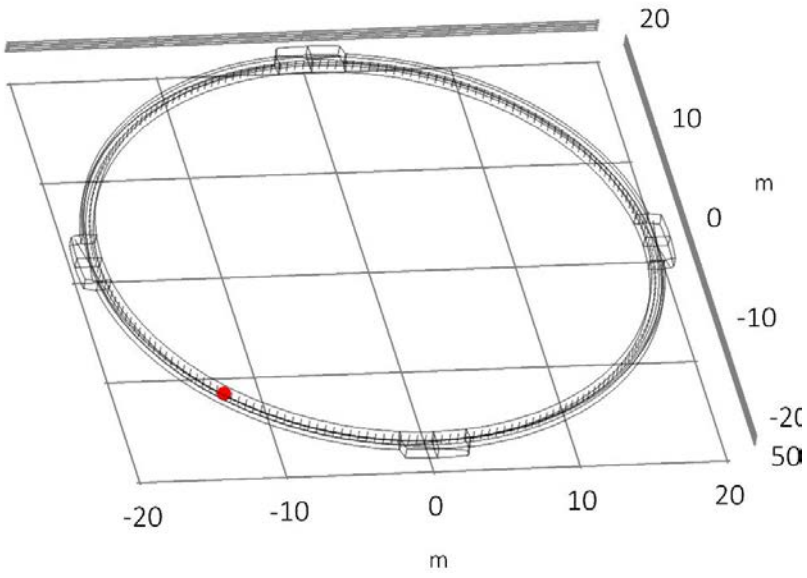
1. En horisontell spännkabels area reduceras gradvis längs med hela dess längd med början under den konstanta tryckfasen vid trycktestet. Detta simulerar en spännkabel som från början har full vidhäftning med injekteringsbruket till att inte ha någon vidhäftning alls med injekteringsbruket.

2. Arean reduceras längs olika båglängd med centrum i fältmitt mellan två kontreforer. Detta simulerar en spännkabel som har god vidhäftning men som under trycktestet får lokalt sämre vidhäftning till injekteringsbruket. Den lokala förlusten i bärförmåga/spännkraft överförs till övriga linor i samma kabel och även till den skadade linan längre bort från skadeområdet. Båglängden är 3 respektive 14,5 m, som jämförelse är sträckan längs omkretsen mellan två kontreforer 29 meter. Arean på spännkabeln reduceras gradvis från 0 % till 100 % under 7 timmars tid. Om en defekt simuleras på en horisontell

spännkabel i ringmodellen så innebär det att denna defekt upprepas var 0,8 meter i höjdled i en global modell av en reaktorinneslutning, eftersom ringmodellen är 0,8 meter hög. En sådan defekt på en horisontell spännkabel var 0,8 meter har analyserats i den globala modellen, se kapitel 4.

3. Defekter simuleras för 1 respektive 10 stycken vertikala spännkablar centrerade kring fältmitt mellan två kontreforer. Detta skadefall innebär att vidhäftningen för de vertikala spännkablarna från början är fullständig för att gradvis sänkas så mycket att ingen vidhäftning kvarstår efter trycktestet. Även i detta fall reduceras arean gradvis med start vid den konstanta tryckfasen under trycktestet. Styvheten från omgivande konstruktion kommer inte att påverka resultatet från ringmodellen så mycket om skador sker på vertikala spännkablar. Detta skiljer sig från skador på de horisontella spännkablarna där styvheten från omgivande konstruktion har större betydelse.

Referenspunkten för undersökningen är visad i Figur 21, detta är en intressant position och den sammanfaller med centrum för en vertikal spännkabel (-13,489, -13,095, 50,4) m.

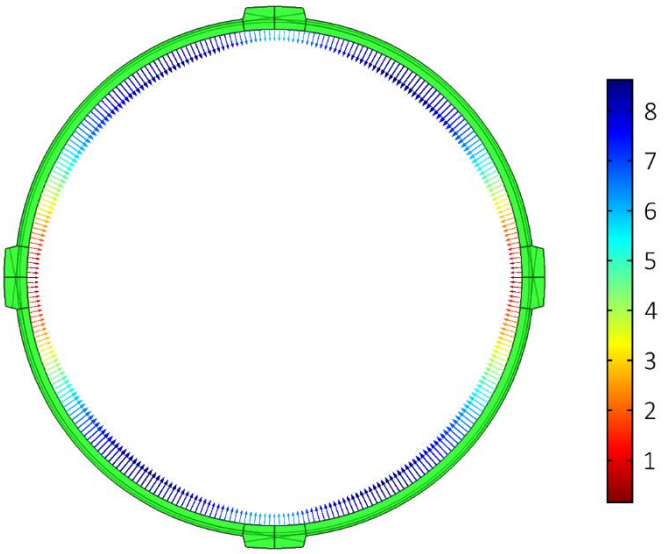


Figur 21 Placering av referenspunkt i fältmitt

3.6. Resultat

3.6.1. Egenvikt och förspänning

Deformationer från referensläget när spännkablarna är uppspända och oskadda. Deformationerna avbildas som pilar och är riktade med spetsen i den positiva riktningen. Uppspänningen av reaktorinneslutningen gör att radien minskar se Figur 22.

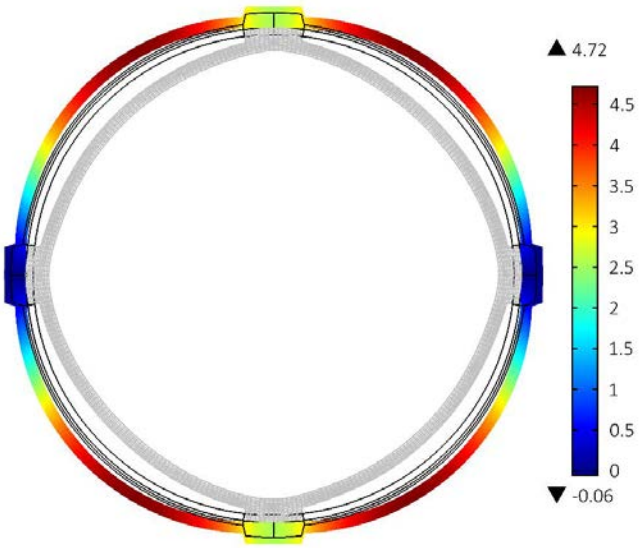


Figur 22 Radiella deformationer i referensfallet när alla spännkablar är intakta

Den radiella deformationen är cirka 8,5 mm in mot centrum i fältmitt mellan två kontreforer. Vid kontreforerna är de radiella deformationerna mellan 1 och 6 mm. De radiella deformationerna vid kontreforerna klockan 3 och 9 inte är lika stora som deformationerna vid kontreforerna klockan 12 och klockan 6. Det beror på att den horisontella armeringen är placerad med olika radie vilket innebär att spännkraften blir olika stor i olika riktningar, se Figur 15.

3.6.2. Normalt trycktest

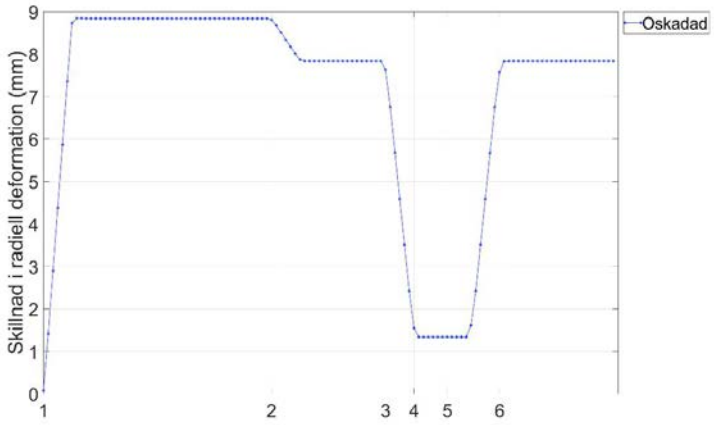
I Figur 23 visas deformationen från icke trycksatt konstruktion till läget vid maximalt inre tryck när alla spännkablar är intakta. Deformationerna är uppförstorade cirka 200 gånger, så att 1 mm deformation ser ut som 200 mm. Ursprungsläget när spännkablar inte bär någon last visas som tunna svarta linjer. När full last bärs av spännkablarna visas som den gråa ringen och skillnaden mellan den uppspända icke trycksatta konstruktionen och den trycksatta konstruktionen visas med färgskalan.



Figur 23 Skillnad i radiell deformation mellan den uppspända konstruktionen och maximalt i inre tryck.

Maximal skillnad i radiell deformation när det inre trycket är 460 kPa är drygt 4,7 mm och uppstår i närheten av kontreforerna.

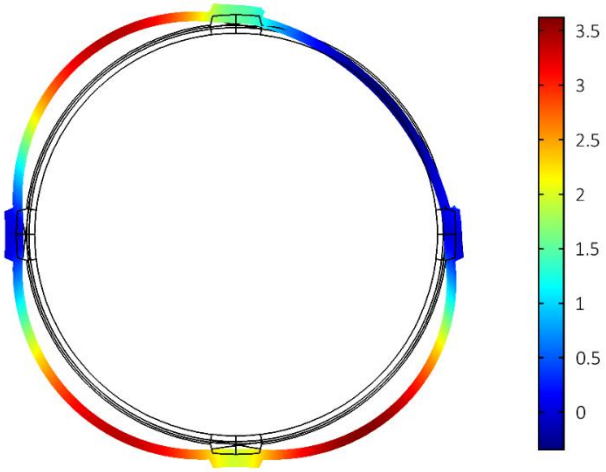
Figur 24 visar deformationer som uppstår i referenspunkten i fältmitt, för ett fall där inga skador uppstår under testet. Från ursprungsläget när spännkablarna inte är uppspända så kommer radien att minska med cirka 9 mm när de horisontella spännkablarna spänns upp. När de vertikala spännkablarna spänns upp kommer radien att öka något. En radiell deformation mot centrum är angiven med positivt tecken. När trycktestet påbörjas kommer radien gradvis att öka och nå en platå för att sedan gradvis minska i slutskedet av trycktestet och återgå till det uppspända läget. Siffrorna på x-axeln motsvarar en händelse enligt Tabell 8.



Figur 24 Radiell deformation i en punkt i fältmitt vid oskadade spännkablar.

3.6.3. Trycktest när horisontell spännkabel är defekt

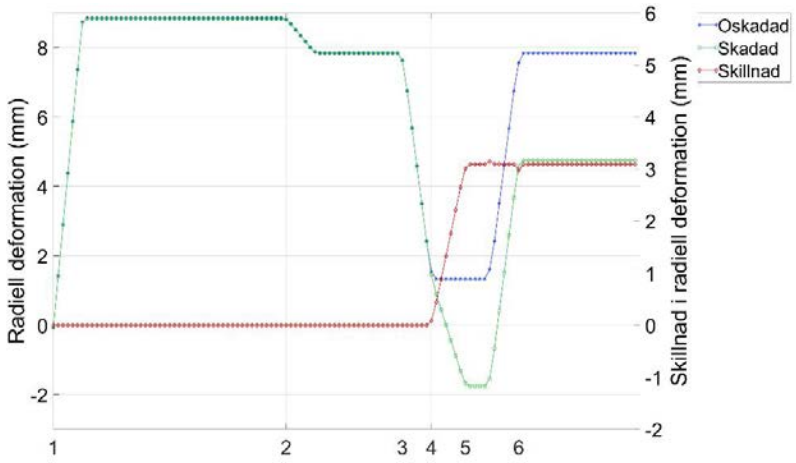
Figur 25 visar radiella deformationer när en horisontell kabel, lokaliserad från klockan 3 till klockan 12, har förlorat all lastbärande förmåga längs hela dess längd. Färgskalan till höger visar den radiella deformationen, som är störst vid fältmitt, cirka 3,5 mm. Snittet som visas är taget vid 50,4 m höjd dvs mitt i ringmodellen.



Figur 25 Radiella deformationer när en horisontell spännkabel helt saknar vidhäftning skalan är i millimeter.

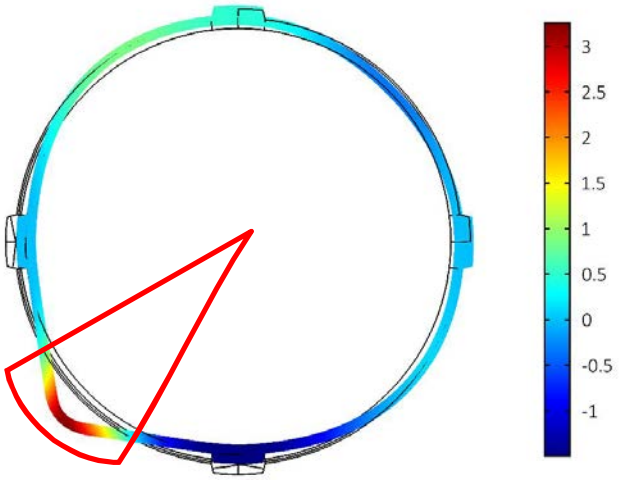
De radiella deformationerna i fältet mellan klockan 12 och klockan 3 är mindre än 1 mm. Om skadan inte är fullständig reduceras den kvarstående deformationen vid samtliga fältmitt. Storleken på kvarstående deformation vid kontreforerna beror på läget i förhållande till den skadade spännkabeln och uppgår till mellan 0,5 och 2 mm vid fullständigt utvecklad skada.

Figur 26 visar radiell deformation för en punkt i fältmitt på en höjd av 50,4 m. Tre olika linjer representetar radiell deformation dels med oskadad kabel(blå heldragen linje) och dels med en horisontell spännkabel som skadas under trycktestet (grön heldragen linje) (vänster y-axel) och skillnaden mellan dessa (röd heldragen linje) (höger y-axel). Siffrorna på x-axeln motsvarar en händelse enligt Tabell 8. Där kan utläsas att de kvarstående deformationerna är cirka 3 mm vid fullständigt utvecklad skada på en spännkabel längs hela dess längd.



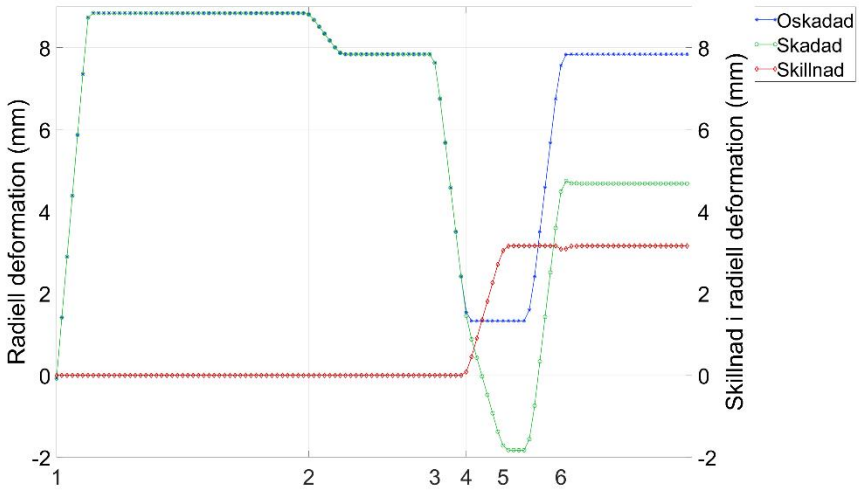
Figur 26 Radiell deformation i en punkt om arean på en horisontell spännkabel gradvis minskas längs hela dess längd.

Om en skada uppstår under trycktestet, så att bärförmågan för en horisontell spännkabel helt saknas längs en sträcka av 3 m i fältmitt, så blir den kvarstående deformationen cirka 3 mm vid skadeområdet, se Figur 27. Den begränsade skadeutbredningen innebär att kvarstående deformation i oskadade delar av konstruktionen maximalt blir cirka 1 mm.



Figur 27 Kvarstående radiell deformation i mm när en horisontell spännkabel saknas längs en bågvinkel på 10 grader i fältmitt, den röda cirkelsektorn är endast en illustration av vinkeln.

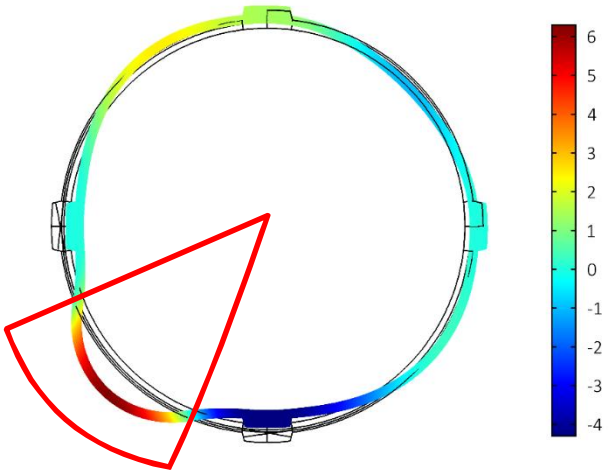
Figur 28 visar radiell deformation i en punkt i fältmitt på en höjd av 50,4 m. Tre olika linjer representetar radiell deformation dels med oskadad kabel (blå heldragen linje) och del med en spännkabel som får en skada med begränsad utbredning (10 graders vinkel) (grön heldragen linje) (vänster y-axel) och skillnaden mellan dessa (röd heldragen linje) (höger y-axel). Siffrorna på x-axeln motsvarar en händelse enligt Tabell 8.



Figur 28 Radiell deformation i en punkt om arean på en horisontell spännkabel längs en båglängd av cirka 3 m med centrum i fältmitt gradvis minskas.

Kvarstående deformation vid referenspunkten är cirka 3 mm vid referenspunkten om spännkabeln förlorar hela sin bärförmåga längs en båglängd av 3 m.

Figur 29 visar kvarstående radiell deformation mellan det oskadade fallet och fullständig skada vid en vinkel av 45 grader motsvarande en båglängd av cirka 14 meter. Resultatet ska tolkas så att ett positivt värde innebär att konstruktionens radie har ökat efter tryck-testet. Ett negativt värde motsvarar således att radien för konstruktionsdelen har minskat efter trycktestet.

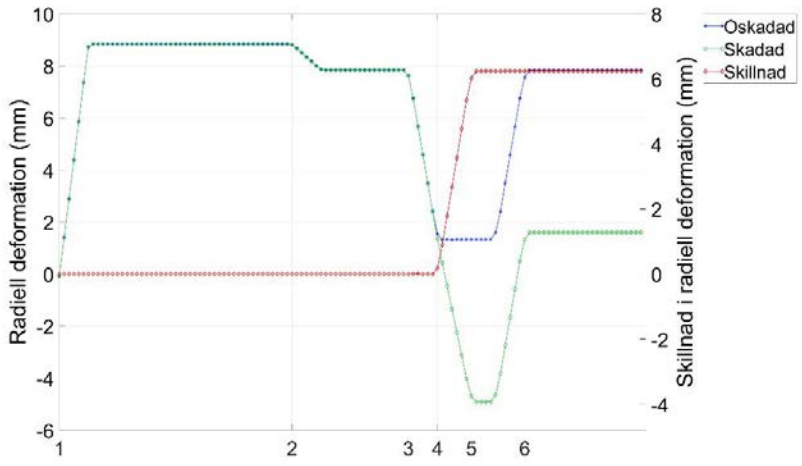


Figur 29 Skillnad i radiella deformationer mellan det oskadade fallet och när en horisontell spännkabel skadas helt i fältmitt längs en bågvinkel av 45 grader under trycktestet.

När skadan får en större utbredning, så att bärförmågan för en horisontell spännkabel helt saknas längs en sträcka av 14 m i fältmitt, blir den kvarstående deformationen cirka 6 mm vid skadeområdet, se Figur 29. Det här fallet jämfört med fallet med tre meter båglängd, 3 mm deformation, innebär att kvarstående deformation i övriga delar av konstruktionen också blir större. Den största kvarstående deformationen blir cirka 4 mm vid en kontrefor (klockan 6).

Kvarstående deformationer uppgår till cirka 6 mm längs en betydande sträcka i skadeområdet. Diagrammet visar också att kontreforen som är lokaliserad klockan 6 i figuren får en radiell deformation av cirka 4 mm. Övriga delar av konstruktionen har inte lika stora deformationer.

Figur 30 visar radiell deformation i en punkt i fältmitt på en höjd av 50,4 m när 14 m båglängd i fältmitt gradvis förlorar sin bärförmåga under trycktestet (från punkt 4 till punkt 5 på x-axeln). Tre olika linjer representetar radiell deformation dels med oskadad kabel (blå heldragen linje) och dels med en spännkabel som får en skada (grön heldragen linje) (45 graders vinkel)(vänster y-axel) och skillnaden mellan dessa (röd heldragen linje) (höger y-axel).



Figur 30 Radiell deformation i en punkt om arean på en horisontell spännkabel längs en båglängd av 14 m med centrum i fältmitt gradvis minskas.

Kvarstående deformation i referenspunkten är drygt 6 mm om spännkabeln efter tryck-testet helt saknar bärförmåga längs en båglängd av 14 m.

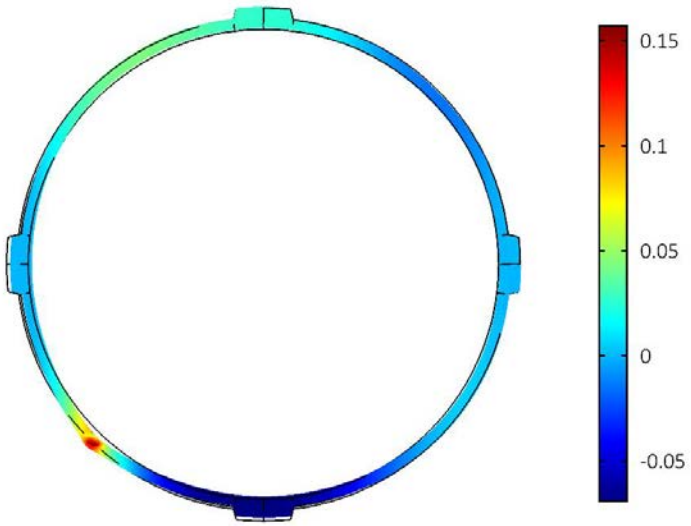
Sammantaget innebär resultatet att deformationsmätningar borde ske i fältmitt, eftersom där återfinns den största deformationen. Då styvheten från omgivande konstruktion inte är inkluderad i modellen kommer därför deformationerna i verkligheten vara betydligt mindre. Resultatet innebär också att skillnader i deformationer endast kan upptäckas om mätning sker i skade-

områdets omedelbara närhet, ungefär 1,0 m från det skadade området är deformationerna obetydliga. Om skadans omfattning är större ökar deformationerna och möjligheten att detektera detta ökar således.

3.6.4. Trycktest när vertikala spännkablar är defekta

Resultaten nedan visar radiella deformationer när en respektive tio vertikala spännkablar gradvis förlorar lastbärande area längs hela dess längd (800 mm) i ringmodellen. Ringmodellen kan också användas för att studera hur defekter på vertikala spännkablar påverkar konstruktionen lokalt. Inverkan av hur övriga konstruktionens styvhet påverkas av denna lokala defekt är inte tagen i beaktande.

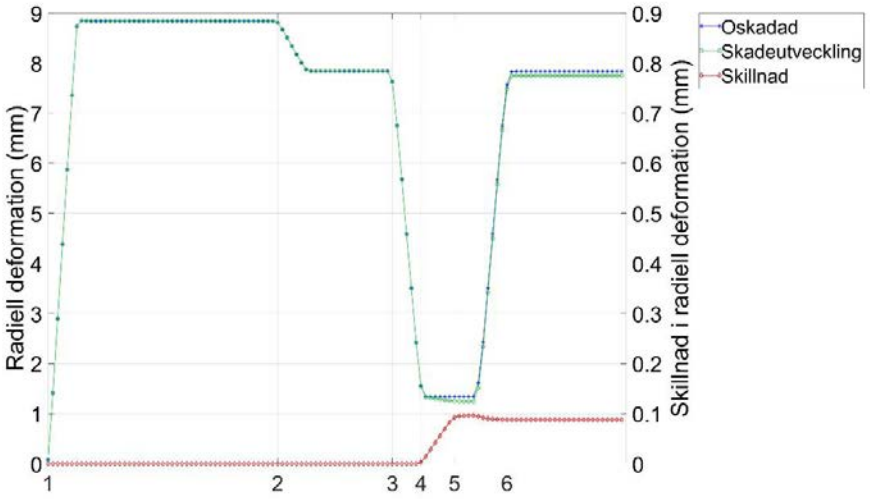
Figur 31 visar skillnaden i radiella deformationer när en vertikal spännkabel skadas helt under trycktestet. Färgskalan motsvarar storleken på de radiella deformationerna i mm.



Figur 31 Kvarstående radiell deformation i konstruktionen när en vertikal spännkabel i fältmitt skadas helt under trycktestet.

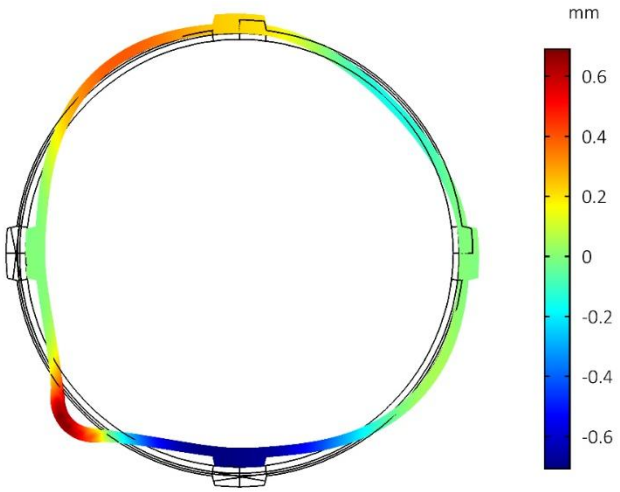
Skador som uppstår på en vertikal spännkabel under ett trycktest ger små kvarstående deformationer längs hela konstruktionens omkrets, se Figur 31. Deformationerna blir maximalt 0,15 mm precis intill den spännkabel vars bärförmåga helt saknas efter tryck-testet. I övriga delar av konstruktionen är de kvarstående deformationerna mycket mindre.

Figur 32 visar radiell deformation i en punkt i fältmitt på en höjd av 50,4 m när en vertikal spännkabel skadas gradvis under trycktestet (från punkt 4 till punkt 5 på x-axeln). Tre olika linjer representetar radiell deformation dels med oskadad kabel (blå heldragen linje) och dels med en spännkabel med skada (grön heldragen linje)(10 graders vinkel)(vänster y-axel) och skillnaden mellan dessa (röd heldragen linje) (höger y-axel). Kvarstående deformation i referenspunkten är cirka 0,1 mm om en vertikal spännkabel förlorar all sin vidhäftning under trycktestet.



Figur 32 Radiell deformation i en punkt om arean gradvis minskas på en vertikal spännkabel i fältmitt.

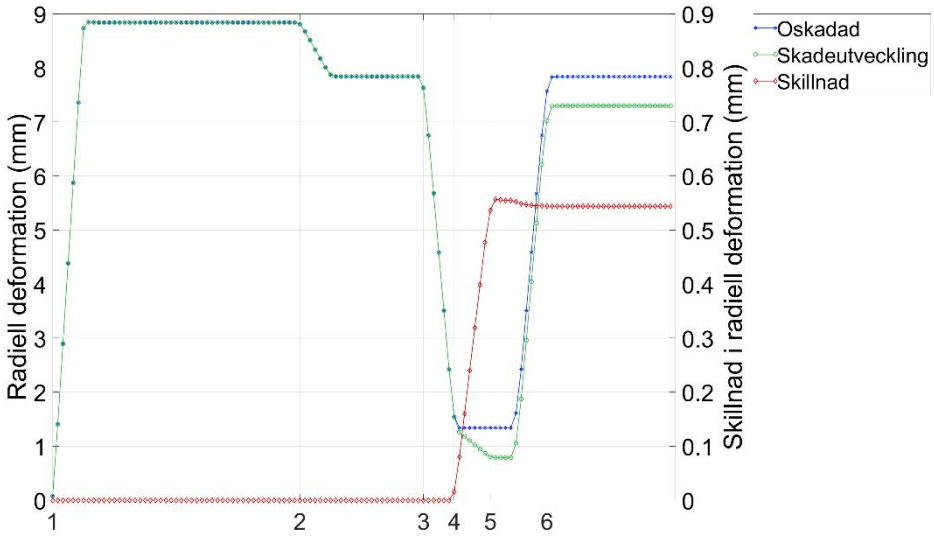
Figur 33 visar kvarstående radiella deformationer när tio vertikala spännkabla skadas helt under trycktestet. Färgskalan motsvarar storleken på de radiella deformationerna i mm.



Figur 33 Kvarstående radiell deformation i konstruktionen när tio vertikala spännkablar som sitter bredvid varandra i fältmitt skadas helt under trycktestet.

Om skadan som uppstår under trycktestet omfattar tio vertikala spännkablar i bredd utmed konstruktionens omkrets blir de kvarstående deformationerna, i skadeområdet, maximalt cirka 0,6 mm. För övriga delar av konstruktionen blir de kvarstående deformationerna inte så stora förutom vid en kontrefor i nära anslutning till skadeområdet (klockan 6).

Figur 34 visar radiell deformation i en punkt i fältmitt på en höjd av 50,4 m när tio vertikala spännkablar gradvis förlorar sin bärförmåga under trycktestet (från punkt 4 till punkt 5 på x-axeln). Tre olika linjer representerar radiell deformation dels med oskadad kabel (blå heldragen linje) och dels med tio vertikala spännkablar med skada (grön heldragen linje) (vänster y-axel) och skillnaden mellan dessa (röd heldragen linje) (höger y-axel).



Figur 34 Radiell deformation i en punkt om arean gradvis minskas på tio vertikala spännkablar som sitter bredvid varandra i fältmitt.

Kvarstående deformation i referenspunkten är cirka 0,5 mm om 10 vertikala spännkablar förlorar all sin bärförmåga under trycktestet.

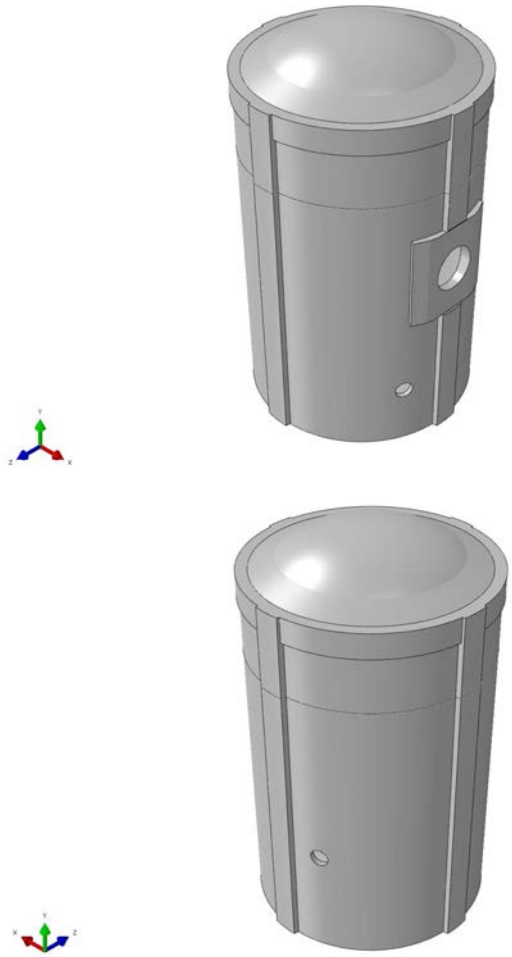
Sammantaget innebär detta att möjligheten att detekterar skador på enstaka vertikala spännkablar är mycket små. Deformationerna vid fältmitt är mindre än 1 mm styvheten är mindre än vid en kontrefor. Skadornas omfattning måste vara betydligt större för att kunna detekteras.

4. Global 3D modell

Med 3D modellen studeras det globala beteendet hos en inneslutning vid trycktest. På grund av att den globala 3D modellen är så pass stor (ca 1,7 miljoner frihetsgrader) så är det inte möjligt att genomföra alltför detaljerade analyser med tanke på omfattningen av detta projekt. Syftet med 3D modellen är att studera den globala påverkan från skadade spännkablar och inte inverkan från lokala effekter, så som att spännkraften förloras på en viss del av spännkabeln.

Utav denna orsak så genomförs några analyser i 3D globala modellen, där antingen en horisontell eller en vertikal spännkabel tas bort från modellen i syfte att analysera hur reaktorinneslutningens beteende under trycktest förändras. Resultaten går därmed att använda för att utvärdera inverkan från eventuella defekter på deformationer och töjningar i närbelägna och avlägsna snitt på konstruktionen. I den detaljerade 3D ringmodellen som beskrivs i Kapitel 3 kan istället olika detaljerade fall där eventuella defekter i spännkablarna studeras.

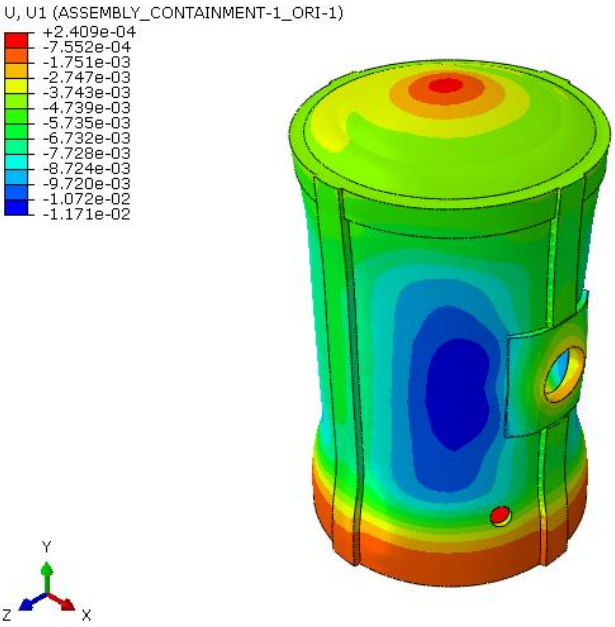
Vid framtagande av figurerna för 3D modellen har ett ostört snitt valts ut för reaktorinneslutningen vid nivå +47 m. Orsaken till att detta snitt valdes i 3D modellen var att detta snitt ansågs vara det snitt som ger minst inverkan från genomföringar och inverkan från kupol etc. Snittet vid +47 m är illustrerat i Figur 35. I ringmodellen valdes istället nivån +50 m för att representera ett ostört snitt i väggen. Skälet till detta är att; för ringmodellen har höjdnivån ingen praktisk inverkan eftersom ovan eller underliggande delar av inneslutningen inte beaktas och att inneslutningens spännkabelföring är symmetrisk. Därmed blir det ingen skillnad vid jämförelse mellan resultaten av dessa två modeller även om olika elevationer har valts.



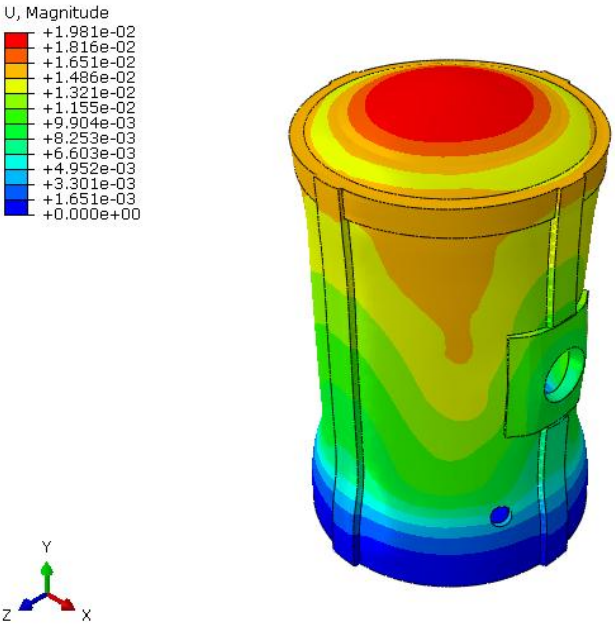
Figur 35 Illustration av höjdnivå +47 m som används som representativt snitt för ett ostört tvärsnitt.

4.1. Egenvikt och förspänning

I Figur 36 illustreras de globala deformationerna i radiell riktning för reaktorinneslutningen efter applicering av egenvikt och förspänning. Detta fall motsvarar referensfallet då samtliga kablar förutsätts vara oskadade. Från figuren går det tydligt att se att de större genomföringarna har inverkan på inneslutningens globala deformation och att deformationerna är något större än för ringmodellen, 11,7 mm jämfört mot 8,5 mm. De största radiella deformationerna uppkommer i den globala 3D modellen i närheten av transportgenomföringen. För att förtydliga deformationsbilden ytterligare visas även den totala deformationen för hela inneslutningen i Figur 37. Här framkommer att de största deformationerna förväntas i kupolen motsvarande ca 20 mm. Radiell förskjutning definieras som negativ vid minskad radie och positiv vid ökad radie.



Figur 36 Radiell förskjutning efter applicering av egenvikt och förspänning av spännkablar. (enhet: m)



Figur 37 Totalförskjutning från egenvikt och förspänning av spännkablar. (enhet: m)

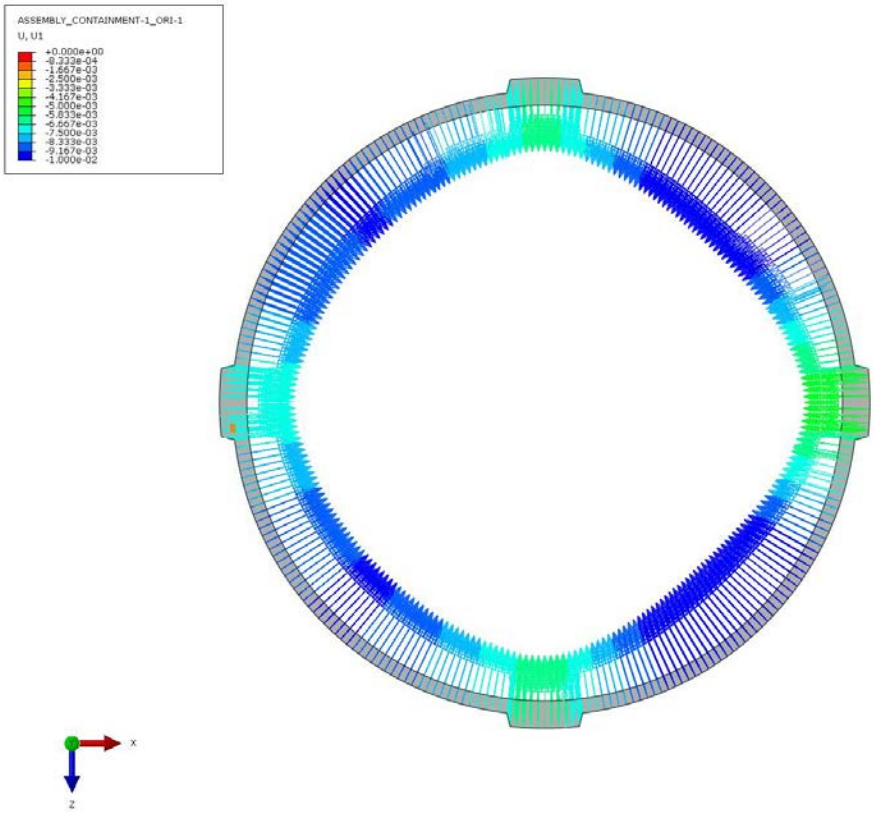
För att kunna tydligare jämföra resultaten från den globala 3D modellen med ringmodellen har ett horisontellt snitt tagits ut av inneslutningen vid nivå + 47 m som motsvarar en ostörd del av cylinderväggen, se Figur 38.

Vid jämförelse av Figur 38 från 3D modellen med Figur 22 från ringmodellen framgår att den radiella deformationen i områden emellan kontreforer är snarlik båda modellerna, ca 8,5 mm. Däremot så är det en stor skillnad i

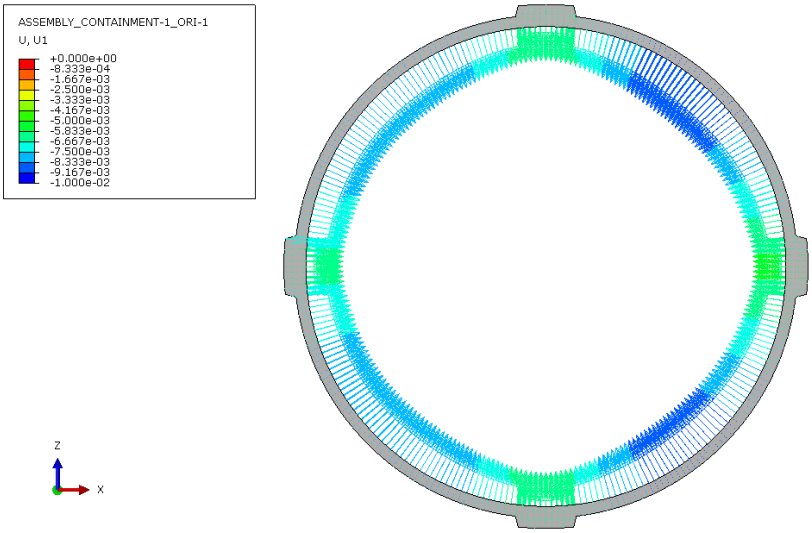
hur stor deformation som sker vid kontreforerna. I 3D modellen fås ungefär lika stor radiell deformation vid samtliga kontreforer motsvarande ca 5 mm, vilket även erhålls i kontreforerna klockan 6 och 12 i ringmodellen medan ringmodellen ger ca 1 mm i deformation vid kontreforerna som är placerade klockan 3 och 9. Detta nämndes redan i avsnitt 3 och beror på att spännkablarna går i inre respektive yttre varv och vilket leder till att ringmodellens spänningstillstånd inte fullständigt kan beskriva det globala beteendet.

För jämförelse illustreras även deformationerna för snittet vid nivå +50,4 m vilket motsvarar nivån för ringmodellen, se Figur 39. Som det framgår vid jämförelse av resultatet vid dessa två nivåer fås något lägre deformationer vid nivån +50,4 m vilket beror på att kupolens styvhet leder till något lägre deformationer.

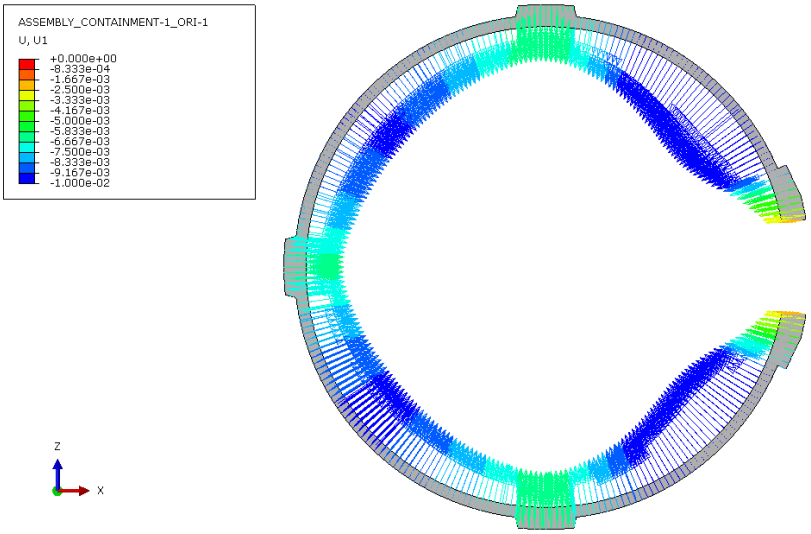
För att illustrera hur inneslutningen deformeras i närheten av genomföringar så visas även motsvarande figur för nivå +31 m som motsvarar centrum för transportgenomföring och nivå +24 m som är precis under transportgenomföringen, se Figur 40 och Figur 41.



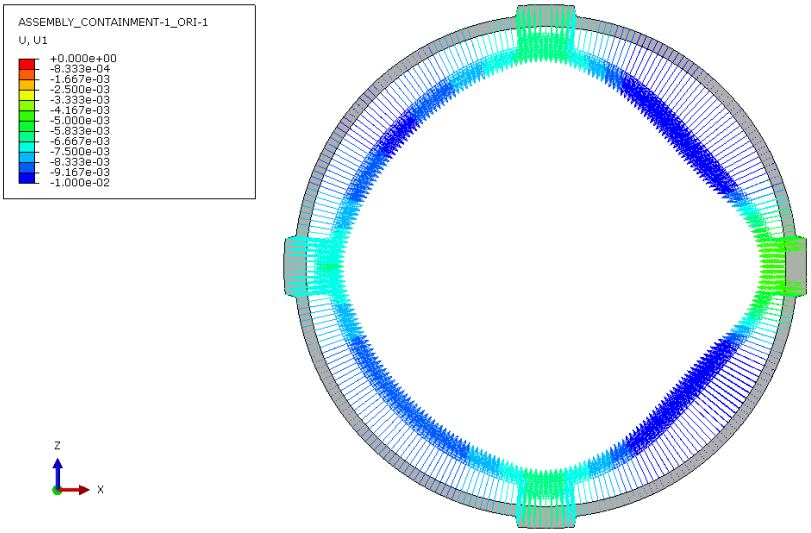
Figur 38 Illustration av radiell deformation från egenvikt och förspänning, nivå +47 m (ostörd del av cylinderväggen utan genomföringar). (enhet: m)



Figur 39 Illustration av radiell deformation från egenvikt och förspänning, nivå +50,4 m (ostörd del av cylinderväggen utan genomföringar). (enhet: m)



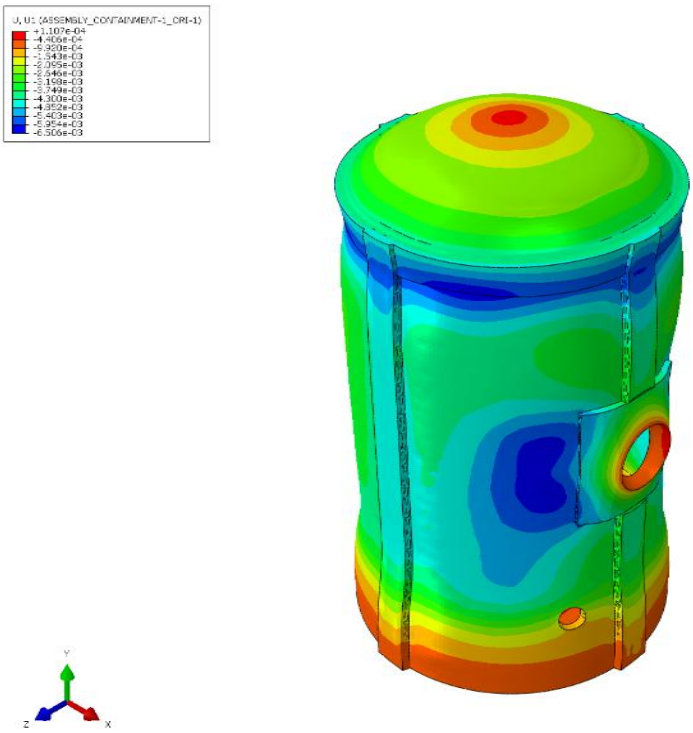
Figur 40 Illustration av radiell deformation från egenvikt och förspänning, nivå +31 m (i centrum av transportgenomföringen). (enhet: m)



Figur 41 Illustration av radiell deformation från egenvikt och förspänning, nivå +24 m (precis under transportgenomföringen). (enhet: m)

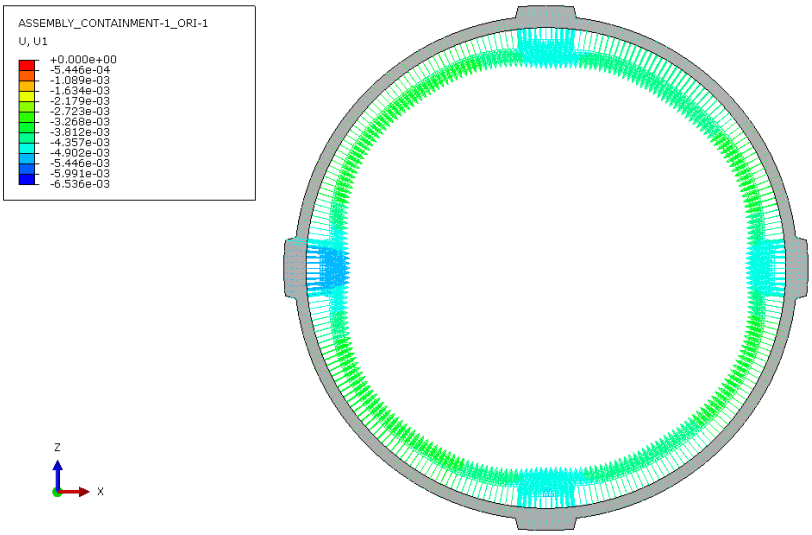
4.2. Resultat från ett normalt trycktest

Vid ett normalt trycktest appliceras ett inre övertryck som orsakar en expansion av reaktorinneslutningen relativt deformationen orsakad av förspänningen. Deformationen under trycktestet är dock inte tillräckligt stor för att övervinna den radiella inåtgående deformationen. I Figur 42 illustreras den globala deformationen av reaktorinneslutningen mitt under ett trycktest (dvs vid trycket 460 kPa). I figuren framgår det tydligt att den radiella deformationen fortsatt är inåtriktad under trycktestet. Radiell förskjutning definieras som negativ vid minskad radie och positiv vid ökad radie.

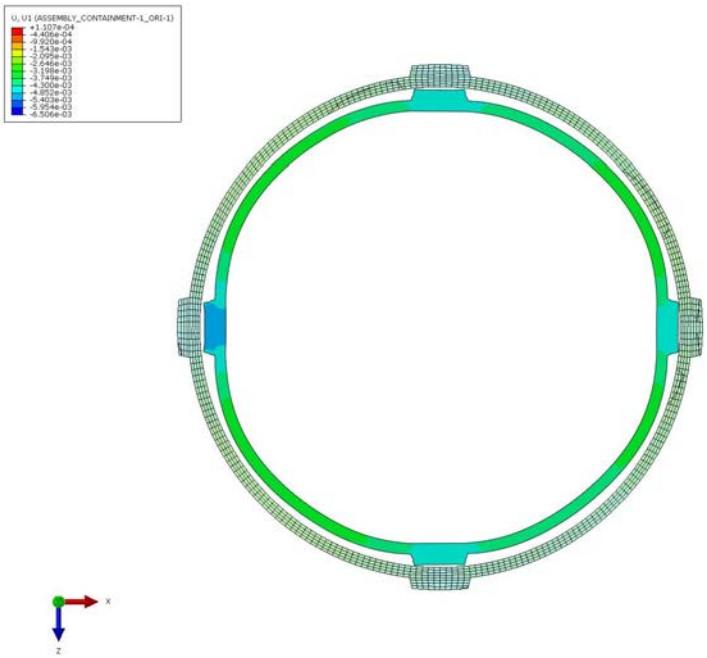


Figur 42 Radiell förskjutning under trycktestet, skalfaktor 400. (enhet: m)

Maximal radiell deformation är ca 6,5 mm i området intill den stora transportgenomföringen. I det ostörda tvärsnittet fås en deformation i områden mellan kontreforerna, fältmitt, på ca 3 mm, se Figur 43 och Figur 44. I Figur 44 illustreras dels den initiala geometrin av inneslutningen samt en 400 gånger förstorad deformationsfigur av geometrin efter uppspänning.



Figur 43 Illustration av radiell deformation vid trycktest, nivå +47 m (ostörd del av cylinderväggen utan genomföringar). (enhet: m)

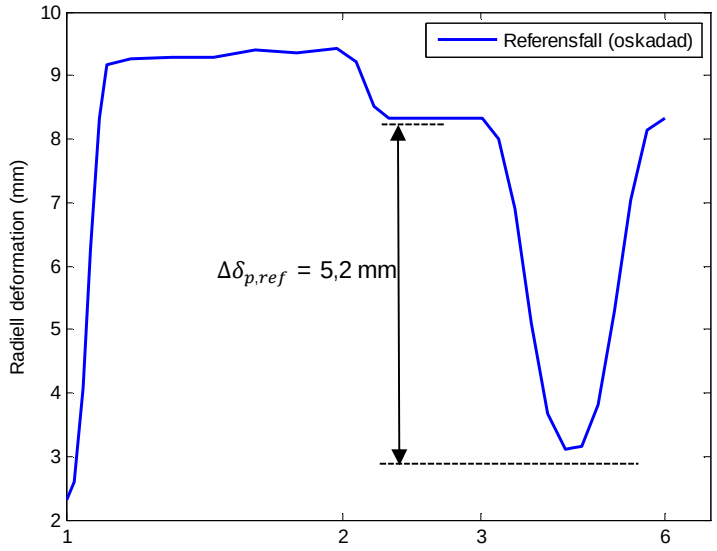


Figur 44 Illustration av radiell deformation vid trycktest, nivå +47 m (ostörd del av cylindervägg utan genomföringar), skalfaktor 400. (enhet: m)

I Figur 45 illustreras deformationen av en punkt i fältmitt av cylinderväggen, dvs mitt emellan två kontreforer. Punkten är utvald så att den motsvarar samma läge som redovisas från ringmodellen. Dessutom, för att göra det enhetligt så redovisas även samma händelser i belastningssekvensen som redovisades i Tabell 8, där numreringen motsvarar:

1 Inledning av uppspänning av horisontella spännkablar
2 Inledning av uppspänning av vertikala spännkablar
3 Inledning av trycktest
6 Slut av trycktest

I Figur 45 har den radiella deformationen presenterats som positiv för deformation in mot centrum, för att resultatet därmed ska vara lättare att jämföra mot resultatet från ringmodellen.



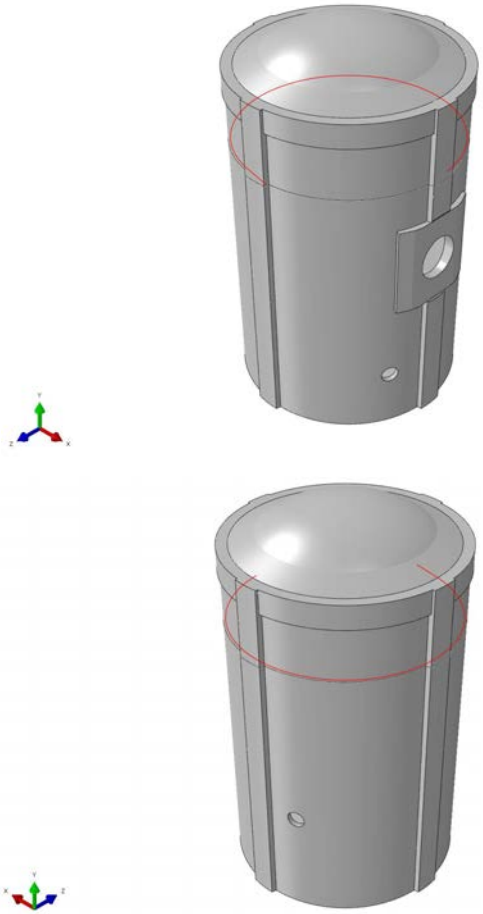
Figur 45 Radiell deformation i en punkt i fältmitt vid referensfallet (oskadade spännkablar) enligt globala modellen.

Från figuren ovan framgår tydligt att deformationen vid uppspänning av horisontella och vertikala spännkablar är nästintill identisk med resultatet från ringmodellen (se Figur 24). Däremot så fås en något större deformation av själva trycktestet i ringmodellen än vad som fås i den globala 3D modellen, där den kvarvarande deformationen under trycktestet enligt den globala modellen är ca 3 mm enligt tidigare. Den relativa deformationen under trycktestet motsvarar därmed ca 5,2 mm.

4.3. Inverkan från defekter på horisontella spännkablar

I den globala 3D modellen har inverkan av defekter studerats genom att enstaka eller flera spännkablar ej spänns upp under uppspänningsskedet. Eftersom reaktorinneslutningens beteende är linjärelastiskt under belastningssekvensen, så spelar det i dessa beräkningar ingen roll när i belastningssekvensen som avlastningen från en spännkabel simuleras, utan effekten i deformation blir lika stor.

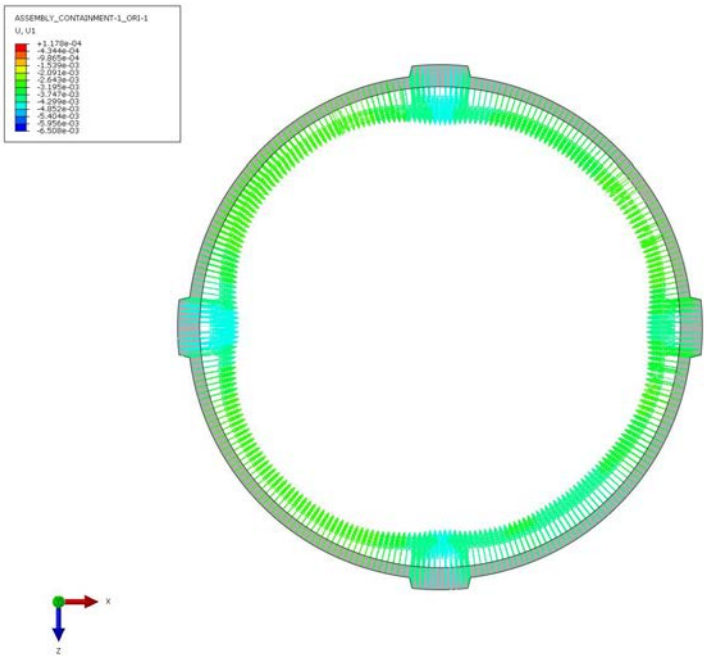
Fördelen med att denna metod tillämpas är att det går att avläsa både för ett fall om ett kabelbrott inträffar mellan två stycken trycktester men även genom att tillämpa superponering så kan inverkan av vad som händer om ett kabelbrott inträffar under ett trycktest att bestämmas.



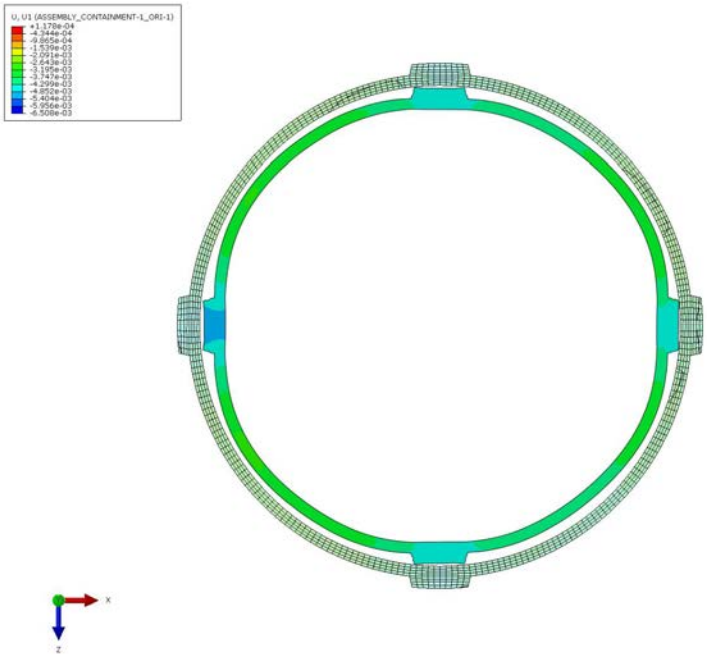
Figur 46 Illustration av placering av spännkabel som är inaktiv, dvs ej är lastbärande.

4.3.1. En horisontell spännkabel förutsätts vara defekt

I den globala modellen har simuleringen genomförts så att en av de horisontella spännkablarna inte längre bär någon last. Detta motsvarar fallet att hela den spännkabeln är overksam. Beräkningsresultatet visar att det finns viss skillnad i deformationsbeteende under ett trycktest om så mycket som en spännkabel är overksam jämfört mot fallet då samtliga spännkablar bär last som avsett, se Figur 47 och Figur 48. Skillnaden i deformation jämfört mot referensfallet, se Figur 43 och Figur 44, är dock relativt liten, typiskt mindre 0,3 mm. I figurerna har en horisontell spännkabel som spänns vid kontreforerna placerade klockan 12 och klockan 3 (motsols) antagits vara inaktiv.



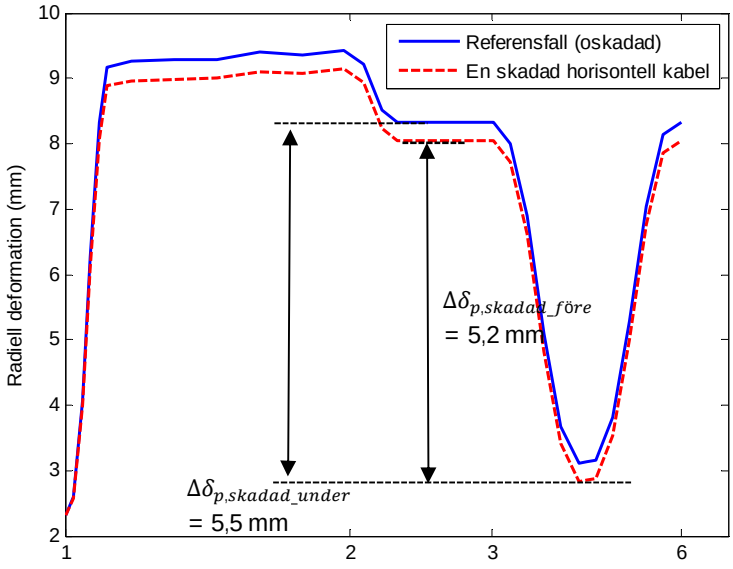
Figur 47 Illustration av radiell deformation vid trycktest, nivå +47 m (ostörd del av cylinder-väggen utan genomföringar) om en spännkabel ej bär last. (enhet: m)



Figur 48 Illustration av radiell deformation vid trycktest, nivå +47 m (ostörd del av cylinder-väggen utan genomföringar) då en spännkabel är inaktiv, skalfaktor 400. (enhet: m)

I Figur 49 illustreras dels den radiella deformationen för referensfallet samt från fallet där en horisontell spännkabel är inaktiv. Från nedanstående graf framgår det tydligt att detta skulle resultera en mätbar skillnad i beteende

mellan dessa fall. En skillnad motsvarande 0,3 mm går att avläsa från grafen. Detta betyder att om det sker ett kabelbrott före trycktestet så kommer det inte vara möjligt att utläsa någon skillnad i relativ deformation under själva trycktestet, då den även för fallet om en spännkabel är skadad motsvarar 5,2 mm. Däremot, om en horisontell spännkabel går sönder under själva trycktestet så kommer den relativa deformationen under trycktestet vara 5,5 mm (dvs + 0,3 mm jämfört mot referensfallet).



Figur 49 Radiell deformation i en punkt i fältmitt vid fallet då en horisontell spännkabel är inaktiv, dvs ej är lastbärande.

Det är viktigt att poängtera att denna skillnad på 0,3 mm är den maximala skillnad som skulle kunna observeras om en hel spännkabel är defekt och att mätningen därmed görs precis i vid läget där spännkabeln gått sönder. Detta innebär att om en hel horisontell spännkabel skulle gå sönder under ett trycktest skulle en maximal deformationsförändring på 0,3 mm kunna observeras. Detta beror dock på känslighet hos givare och inverkan från brus och dessutom är det inte rimligt att förvänta sig att man ska kunna mäta precis i anslutning till där kabelbrottet sker. Om givaren skulle sitta placerad på en annan nivå, eller på t.ex. motstående sida av inneslutningen skulle ingen mätbar skillnad kunna observeras.

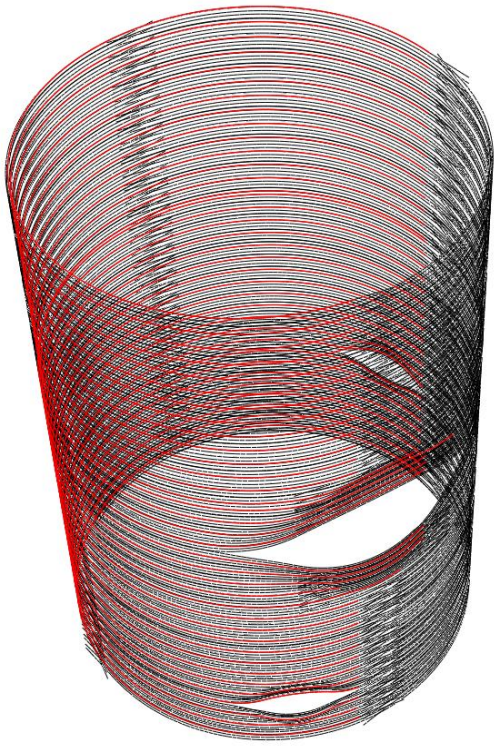
Som påpekades ovan, om kabeln är overksam före ett trycktestet skulle denna förändring/förlust av kabeln inte upptäckas under själva trycktest. Vanligtvis sker dessa trycktester med jämna intervaller och det är visserligen teoretiskt möjligt att man skulle kunna se skillnad mellan ett tidigare trycktest och ett efterföljande trycktest om ett kabelbrott har skett däremellan. Däremot så visade simuleringarna ovan att den relativa rörelsen under trycktestet är mer eller mindre identisk så detta är inte möjligt för fallet om en horisontell spännkabel går sönder. Dessutom, så kommer inneslutningen mellan dessa trycktester utsättas för tidsberoende effekter så som krympning, krypning och relaxation, och dessutom förväntas inverkan från brus att dölja en eventuell skillnad mellan två trycktester.

Därmed, det är ej sannolikt att man kommer kunna urskilja någon skillnad under ett trycktest om en hel horisontell spännkabel går sönder mellan två trycktest eller under ett trycktest. Dessutom så är det viktigt att poängtera att enligt Regulatory Guide 1.90 så ska givare placeras så att de mäter en deformation under ett trycktest av minst 1,5 mm, vilket uppfylls med marginal i detta fall då deformationen under trycktestet är större än 5 mm. Trots att detta kriterium är uppfyllt så bedöms det således som osannolikt att defekter i denna omfattning på horisontella spännkablar kommer att kunna observeras.

Till skillnad från ringmodellen så visar därmed den globala modellen att det skulle vara omöjligt att detektera att en horisontell spännkabel är defekt vid ett trycktest. Det är dessutom, högst osannolikt att hela spännkabeln skulle bli inaktiverad om det uppstår spännkabelbrott någonstans längsmed kabeln med tanke på att spännkablarna är cementinjekterade. En viktig orsak till skillnaden mellan ringmodellen och den globala 3D modellen är att ringmodellen inte får med styvhetsbidrag från ovan eller underliggande del av cylinderväggen. Detta innebär att om en försvagning definieras på en horisontell kabel så innebär detta att mothållande kraft från snitt ovan eller underliggande betong ej beaktas. Med andra ord, i ringmodellen förutsätts därmed att detta är den genomsnittliga försvagningen på hela inneslutningens höjd. För att illustrera detta har ytterligare en modell skapats där var fjärde horisontell spännkabel som spänns inom ¾ av inneslutningen har antagits vara overksamma, vilket beskrivs i efterföljande avsnitt.

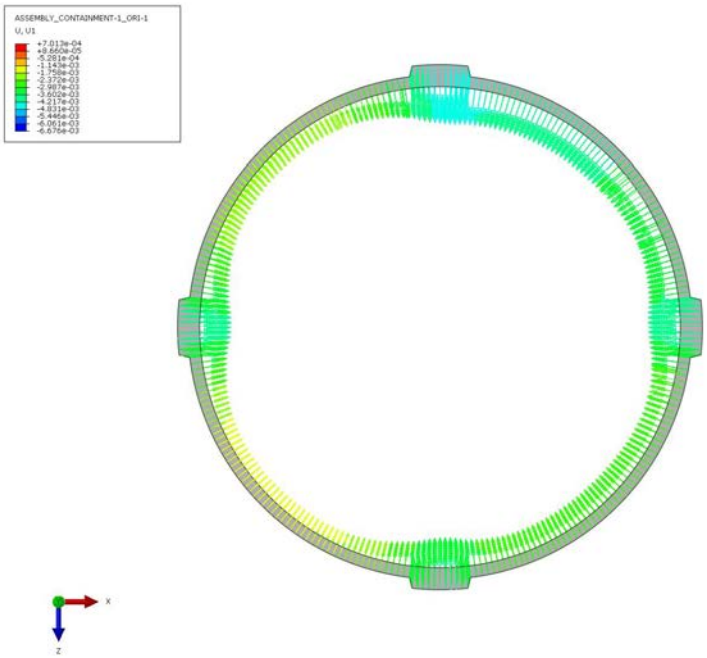
4.3.2. Var fjärde horisontell spännkabel inom ett område förutsätts vara defekt

I denna analys förutsätts var fjärde horisontell spännkabel som spänns inom ¾ av inneslutningen vara overksam, dvs den saknar förspänning. Detta motsvarar att totalt 35 spännkablar (utav 212) har inaktiverats. Detta är illustrerat i Figur 50, där de overksamma spännkablarna är markerade med röd färg.

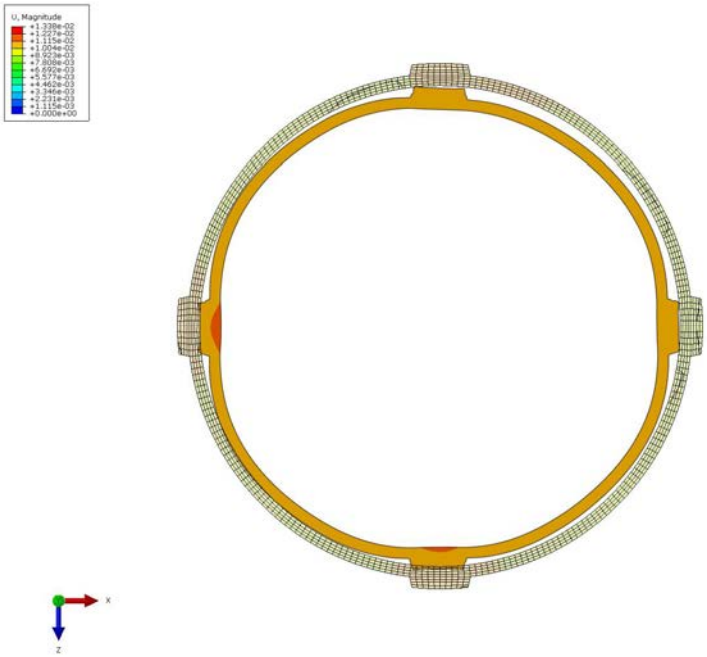


Figur 50 Illustration av overksamma kablar (röd färg) för fallet då var fjärde horisontell spännkabel är overksam.

I detta fall fås en signifikant skillnad mellan referensfallet då inga spännkablar förutsätts vara defekta, se Figur 51 och Figur 52. Skillnaden i radiell deformation i fältmitt jämfört mot referensfallet motsvarar ca 1,1 mm. I figurerna har var fjärde horisontell spännkabel som spänns vid kontreforerna placerade klockan 12 och klockan 3 (motsols) antagits vara inaktiv.



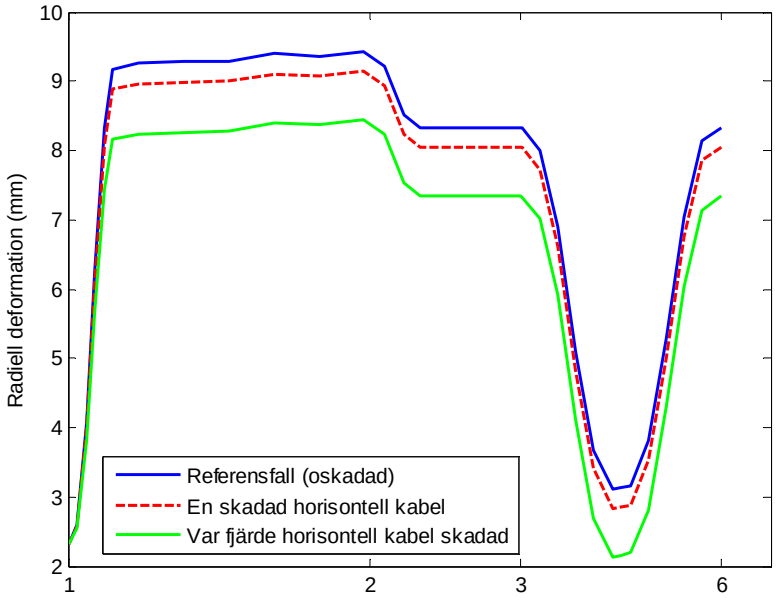
Figur 51 Illustration av radiell deformation vid trycktest, nivå +47 m (ostörd del av cylinder-väggen utan genomföringar) om en spännkabel ej bär last. (enhet: m)



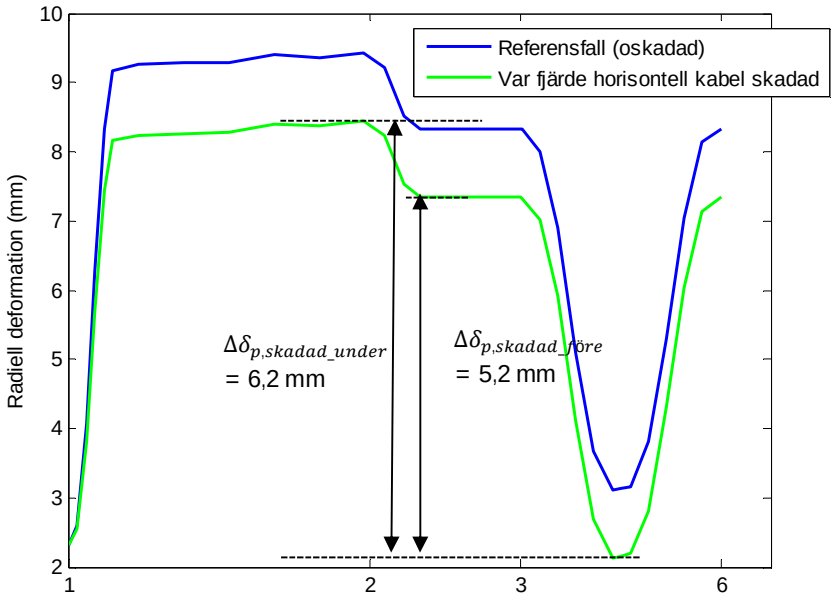
Figur 52 Illustration av radiell deformation vid trycktest, nivå +47 m (ostörd del av cylinder-väggen utan genomföringar) då en spännkabel är inaktiv, skalfaktor 400. (enhet: m)

I Figur 53 redovisas en graf där skillnaden i respons under hela belastnings-sekvensen illustreras för referensfallet (oskadad), fallet med en inaktiv hori-sontell spännkabel och fallet där var fjärde horisontell spännkabel är inaktiv. I likhet med det tidigare fallet i kapitel 4.3.1, så genomfördes simuleringen där var fjärde horisontell spännkabel inte spänns upp i uppspänningsskedet

vilket resulterar i att skillnaden i deformation på grund av ett kabelbrott uppträder redan vid uppspänningen och denna avvikelse återfinns genom hela belastningssekvensen. I Figur 54, illustreras skillnaden i relativ deformation under ett trycktest för fallet om spännkablarna går till brott före testet respektive under själva trycktestet. Från figuren framgår det att inte ens i detta fall skulle det vara möjligt att jämföra skillnaden i deformation från ett trycktest med ett annat för att kunna detektera eventuella spännkabelbrott som inträffat mellan dessa trycktester. Däremot om spännkabelbrottet inträffar under själva trycktestet så fås en relativ deformation på 6,2 mm för fallet där var fjärde kabel går sönder (+ 1,0 mm jämfört mot referensfallet).



Figur 53 Radiell deformation i en punkt i fältmitt vid fallet då var fjärde horisontell spännkabel är inaktiv, dvs ej är lastbärande.



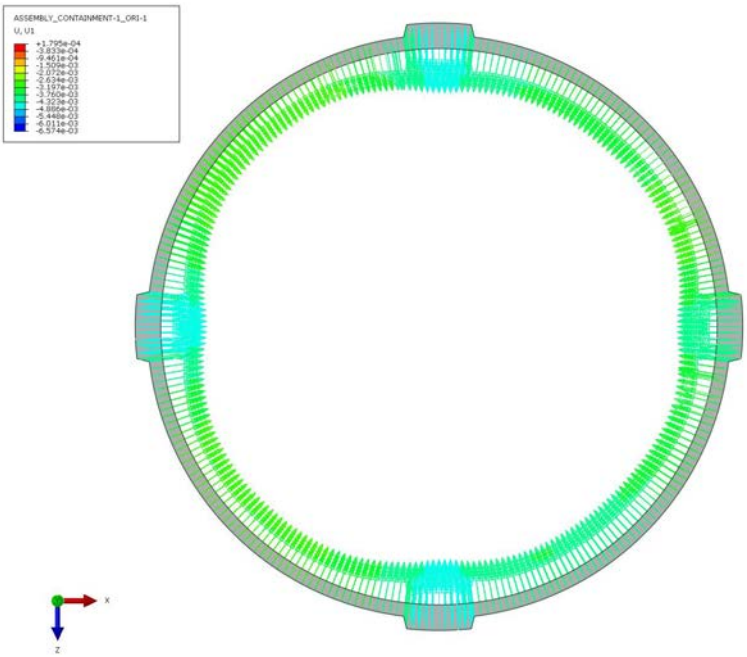
Figur 54 Radiell deformation i en punkt i fältmitt vid fallet då var fjärde horisontell spännkabel är inaktiv, dvs ej är lastbärande

4.4. Inverkan från defekter på en vertikal spännkabel

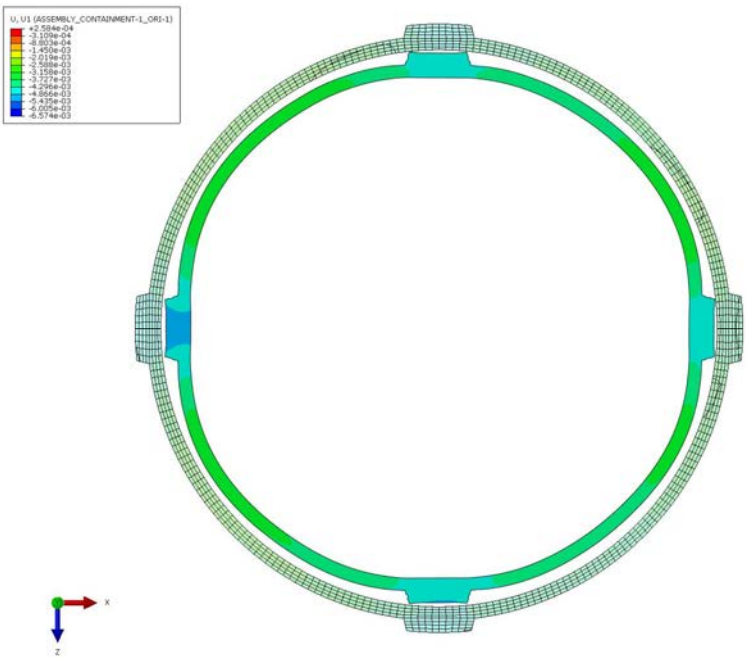
För att studera den globala effekten av en defekt vertikal spännkabel så har en analys genomförts där en av de vertikala spännkablarna förutsätts vara utan förspänning. I Figur 55 illustreras den spännkabel som förutsatts vara inaktiv.

Figur 55 Illustration av placeringen av spännkabeln som förutsätts vara inaktiv (illustrerad med röd färg)

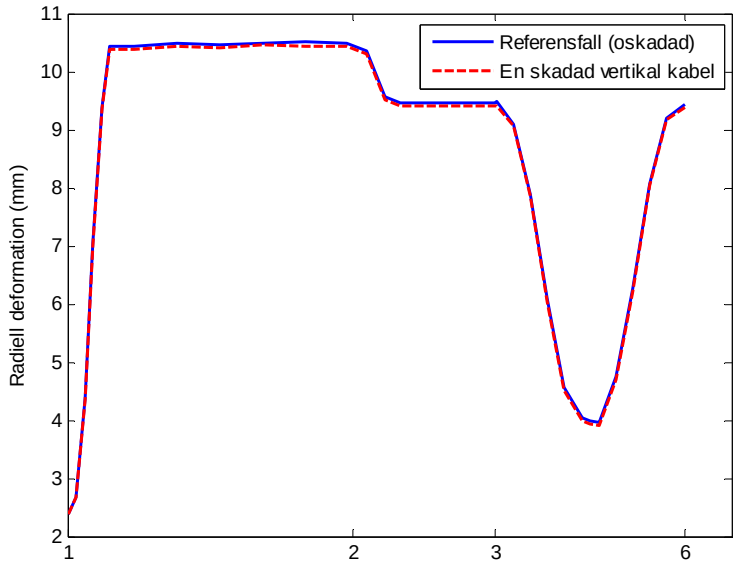
I Figur 56 och Figur 57illustreras beräknad deformation vid trycktestet för fallet då en vertikal spännkabel antas vara inaktiv. Det är dock inte möjligt att observera någon skillnad i deformation vid jämförelse av resultatet från referensfallet (se Figur 43). I Figur 58 presenteras en graf för radiell deformation under hela belastningsförloppet vid nivå +47 m och precis i närheten av den defekta spännkabeln. Observera därmed att placeringen av punkten som används för att göra denna graf inte är densamma som för fallet med en defekt horisontell spännkabel. Skillnaden mellan resultatet vid en defekt vertikal spännkabel och referensfallet motsvarar endast 0,06 mm i detta fall.



Figur 56 Illustration av radiell deformation vid trycktest, nivå +47 m (ostörd del av cylinder-väggen utan genomföringar) om en vertikal spännkabel ej bär last. (enhet: m)



Figur 57 Illustration av radiell deformation vid trycktest, nivå +47 m (ostörd del av cylinder-väggen utan genomföringar) om en vertikal spännkabel ej bär last, skalfaktor 400. (enhet: m)



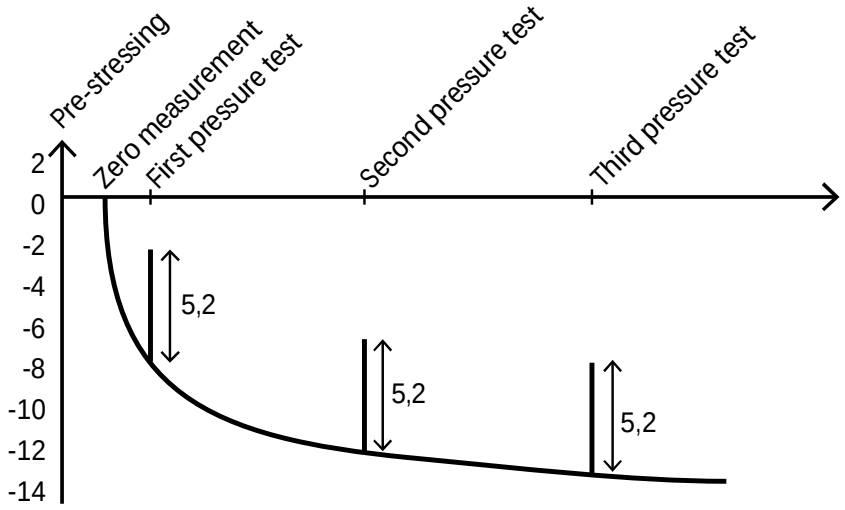
Figur 58 Radiell deformation i en punkt i fältmitt vid fallet då var en vertikal spännkabel är inaktiv, dvs ej är lastbärande.

5. Diskussion och slutsatser

Reaktorinneslutningar är vanligtvis instrumenterade med olika givare såsom pendelgivare avsedda för att mäta variationen i t.ex. radiell deformation. I detta projekt har simuleringar genomförts av trycktester på en typisk reaktorinneslutning i syfte att analysera inverkan från eventuella defekter på spännkablar som resulterar i att de får reducerad bärförmåga. I Figur 59 illustreras ett exempel på hur en mätning av radiell deformation på en reaktorinneslutning skulle kunna se ut för ett fall där det inte finns inverkan av defekter som skulle kunna leda till reducerad bärförmåga hos spännkablarna.

Skillnad i deformation precis före och efter ett trycktest skulle kunna vara ett resultat av att en spännkabel förlorar sin bärförmåga under provningen. Alternativt om olika trycktester visar på skillnader i relativ deformation skulle detta kunna vara ett resultat av reducerad bärförmåga hos spännkablar.

I detta projekt har defekter på horisontella och vertikala kablar simulerats genom att reducera dess lastbärande förmåga och analysera inverkan på en reaktorinneslutnings deformationer. Detta har gjorts i syfte att analysera huruvida dessa defekter skulle kunna observeras vid fältmätningar av en reaktorinneslutning.



Figur 59 Exempel på förväntad radiell deformation hos en reaktorinneslutning. (enhet mm)

För detta ändamål har två olika numeriska modeller tagits fram, en global 3D modell samt en ringmodell.

Den globala 3D modellen inkluderar samtliga väsentliga konstruktionsdelar i reaktorinneslutningen, men på grund av modellens storlek och begränsningar i projektets omfattning så har det endast varit möjligt att studera större defekter så som att hela spännkablar är påverkade. I den globala 3D modellen

har därför fall där en horisontell spännkabel eller en vertikal spännkabel är inaktiv studerats.

För att kunna studera inverkan av lokala defekter på spännkablarna så istället har en begränsad geometrisk modell, ringmodellen, skapats som representerar ett genomsnittligt horisontellt segment av cylinderväggen. I ringmodellen har fokus varit att undersöka hur stora de kvarstående deformationerna blir om skadeutbredningen längs en (1 st) horisontell spännkabel varierar, men också om en respektive tio vertikala kablar vid fältmitt skadas utmed hela dess längd.

Med en ringmodell är det möjligt att utföra flera beräkningar på en kortare tid och dessutom är det möjligt att både öka komplexiteten i materialmodellen och definiera olika utbredning av skadan. Därför har en ringmodell använts i det här projektet. Inverkan av den omgivande konstruktionen blir däremot mer komplex att modellera och randvillkoren har satts så att den omgivande konstruktionen inte har någon inverkan i form av styvhet. För att få en överensstämmelse med en global modell måste ytterligare analyser utföras och det ryms inte i det här projektet. Överensstämmelsen mellan en ringmodell och den globala modellen ökar om höjden på ringmodellen ökar om den skadade spännkabeln antas ligga i ett ostört tvärsnitt. Påverkan av genomföringar är en typisk störning i tvärsnittet som påverkar beräkningsresultatet.

Resultatet från både den globala 3D modellen och från ringmodellen visar att den relativa radiella deformationen vid ett normal tryckbelastningstest blir av storleksordningen 5 mm i fältmitt (mitt emellan två kontreforer) jämfört med läget när reaktorinneslutningen är uppspänd. Så pass stora deformationer är definitivt fullt mätbara. Frågan i projektet har varit dock att studera hur mycket denna deformation förändras om det uppstår defekter på spännkablarna. Närmare bestämt, hur mycket irreversibel deformation uppstår när lin-/kabelbrott sker under trycktesten.

Simuleringarna visar dock att det krävs omfattande defekter hos linor/spännkablarna för att detta ska vara möjligt att detektera vid mätning av deformationsförloppet under ett trycktest. Även i de fall då en hel spännkabel (horisontell eller vertikal) förväntas att vara inaktiv så fås små förändringar i deformationerna. För att det ens ska vara möjligt att kunna detektera något av de olika skadefallen så krävs att en väldigt känslig sensor placeras i direkt anslutning till den skadade spännkabeln, inom någon meter från skadeområdet. Dessa förändringar i deformationer bedöms därmed vara för små för att kunna detekteras vid verkliga trycktester. Detta eftersom avvikelsen rimligtvis är i en storleksordning som motsvarar intervallet för mätfel eller till och med noggrannheten hos sensorerna. Det är viktigt att poängtera att enligt Regulatory Guide 1.90 så ska givare placeras så att de mäter en deformation under ett trycktest av minst 1,5 mm, vilket uppfylls med marginal i detta fall då deformationen under trycktestet är större än 5 mm. Trots att detta kriterium är uppfyllt så bedöms det således som osannolikt att defekter i samma storleksordning som de som analyserats på horisontella eller vertikala spännkablar kommer att kunna observeras.

Det bör även påpekas att variation i omgivande klimat (temperatur, fukt) kommer även att leda till viss variation i deformation vilket ytterligare kommer att försvåra möjligheten att detektera en eventuell förlust i spännkraft genom jämförelse av deformationsresponsen från olika trycktester. Enligt beräkningarna krävs relativ stora skador i kablar/linor för att skadorna skall kunna detekteras vid jämförelse mellan två olika trycktesters deformationer. Dessutom krävs att mätinstrumenten skall vara placerade nära de ställen där skadan uppstår. Ibland instrumenteras reaktorinneslutningen lång tid efter den har tagits i bruk. Instrumenteringen kan därmed inte detektera effekterna av eventuella skador som uppkom före instrumenteringen genomfördes.

Det är dessutom vanligt att deformationer mäts i närheten av kontreforerna, detta eftersom dessa områden oftare är mer lättillgängliga då kvarvarande plattformar finns placerade för att tillåta åtkomst till spännkabelförankringarna. Möjligheten att detektera en skada som lokaliserad i fältmitt på en enskild spännkabel genom att ha sensorer vid kontreforer måste anses som mycket små. Om skadeområdet har liten utbredning och skadan är begränsad minskar möjligheterna ytterligare att upptäcka skadan. Det är inte möjligt att på förhand veta vart en skada ska uppstå på en spännkabel och ännu mindre var denna spännkabel är skadad och i vilken utsträckning den är skadad.

6. Förslag till vidare studier

1. Noggrannare analyser med den globala modellen där inverkan av lokala defekter på den globala konstruktionsresponsen studeras.
2. Vidareutveckling av ringmodellen där den globala influensen på ringens deformationsegenskaper och spänningstillstånd beaktas vid beräkningar.
3. Tillämpning av modellerna för både Regulatory Guide 1.90 A och Regulatory Guide 1.90 B. Där studeras detekterbarheten av spännings- och deformationsomfördelningar i kablar/linor. I Regulatory Guide A instrumenteras några kablar med töjningsgivare och lastceller, där lastceller används för de kablar som inte har injekterats. Analyserna kommer att visa hur omfattande skadorna bör vara för att bli detekterade av lastcellerna och töjningsgivarna. Vidare visar resultatet hur konstruktionens axiella och radiella deformationer förändras vid eventuella kabel-/linbrott vid normalt bruk och under trycktester.
4. Tillämpning av modellerna för reaktorinneslutningar med icke injekterade kablar. Analysen kommer att visa hur spänningarna omfördelas mellan spännkablarna om enskilda kablar/linor uppnår brott. Vidare visar resultatet hur konstruktionens axiella och radiella deformationer förändras vid eventuella kabel/linbrott vid normalt bruk och under trycktester.
5. Modellerna (tankesättet) kan utvecklas för att studera responsen av en reaktorinneslutning under jordbävningsförhållandena, d.v.s. studera beteendet när kablar/linor bryts av under jordbävning.

7. Erkännanden

Denna rapport är finansierad av Strålsäkerhetsmyndigheten (SSM). Projektet vill tacka SSM för förtroendet att genomföra studien.

8. Referenser

ABAQUS, 2014, Online documentation version 6.14, Dassault Systèmes, Providence, USA

Andersson P, Berglund LE och Gustavsson J. (2005) Average force along unbonded tendons: a field study at nuclear reactor containments in Sweden. Nuclear Engineering and Design, Volume 235, Issue 1, pp 91-100.

COMSOL 2017, COMSOL Multiphysics reference manual, Version 5.3a

EN 1992-1-1, 2010. Eurocode 2: Design of concrete structures – Part 1-1: General rules and rules for buildings.

Malm R. (2016) Guideline for FE analyses of concrete dams, Energiforsk report 2016:270

2018:26

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-171 16 Stockholm
Solna strandväg 96

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

E-mail: registrator@ssm.se
Web: stralsakerhetsmyndigheten.se