

FÖRSPÄNNINGSSYSTEMEN I DE SVENSKA REAKTORINNESLUTNINGARNA

RAPPORT 2018:543



BETONGTEKNIK
KÄRNKRAFT

BETONGTEKNISKT PROGRAM
KÄRNKRAFT



Energiforsk

Förspänningssystemen i de svenska reaktorinneslutningarna

GABRIEL BARSLIVO

Förord

Spännarmering används inom både kärnkrafts- och vattenkraftsindustrin för att öka säkerheten hos ingående betongkonstruktioner. Inom kärnkraften är funktionen att bibehålla reaktorinneslutningens integritet avseende läckage av radioaktiva ämnen i händelse av en intern olycka i reaktorn.

Energiforsks betongprogram inom kärnkraft respektive vattenkraft har genomfört parallella projekt med fokus på spännkablar för att ställa samman den kunskap som finns och överföra erfarenheter mellan kärnkraften och vattenkraften inom området spännkablar.

Kartläggningen har utförts av Gabriel Barslivo, senior medarbetare på Vattenfall. Projektet ingår i Energiforsk Betongtekniskt program kärnkraft, som driver forskning kring betongkonstruktioner inom kärnkraftverk. Det övergripande målet med det betongtekniska programmet är att säkerställa avsedd livslängd och hög tillgänglighet för svenska kärnkraftverk med bibehållen säkerhet och för att kunna driva en effektiv förvaltning. Intressenterna bakom Betongtekniskt program kärnkraft är Vattenfall, Uniper, Fortum, Teollisuuden Voima Oy (TVO) i Finland, Skellefteå Kraft, Karlstads Energi samt Strålsäkerhetsmyndigheten (SSM).

Här redovisas resultat och slutsatser från ett projekt inom ett forskningsprogram som drivs av Energiforsk. Det är rapportförfattaren/-författarna som ansvarar för innehållet och publiceringen innebär inte att Energiforsk har tagit ställning till innehållet.

Sammanfattning

Samtliga inneslutningar i de svenska kärnkraftverken utgörs av förspända betongkonstruktioner. Förspänningen är i både vertikal- och horisontal led och är avsett att förhindra dragbelastningar i betongen till följd av de belastningar som kan uppträda vid ett stort inre haveri. Således är förspänningen en viktig förutsättning för funktionen hos en inneslutning.

Förspänningen är beroende av förändringsmekanismer hos såväl stål som betong. Därför måste under livstiden för respektive reaktorinneslutning eventuella förluster i kabelsystemet i hållas inom vissa tillåtna konstruktionsgränser.

Syftet med denna rapport är att utföra en sammanställning över spännarmeringen i de svenska reaktorinneslutningar, liknande den som gjorts i ett parallellt Energiforskprojekt för vattenkraften (Energiforsk rapport 2017:398). Sammanställningen kommer sedan att ligga till grund för vidare gemensamma utredningar/projekt gällande spännarmering.

Det kan konstateras att mätdata från inspektionerna av kabelsystemen i reaktorinneslutningarna i Forsmark 1-3 samt Ringhals 2-4 finns tillgängliga och har sammanställts. När det gäller reaktorinneslutningarna i Ringhals 1, Oskarshamn 1-3 samt Barsebäck 1 och 2 ligger kabelsystemen i foderrör igengjutna med cement, vilket gör att mätdata utöver ursprunglig förspänning saknas för dessa.

Summary

All reactor containments in the Swedish nuclear power plants (NPP) consist of post tensioned concrete structures. The containments are post tensioned in both the vertical and horizontal directions. The post tension, which is intended to prevent tensile loads in the concrete due to the loads arising from internal hazards resulting in large pressure loads in the containment, is achieved by the tendons consisting of steel wires. Thus, the post tension has to be maintained continuously, to the end life of the containments. However, due to the design of the tendons and the containments losses of the pretension force might occur. The mechanisms that could cause the losses of the pretension forces could, for instance, be due to the relaxation in the tendons steel materials, creep and shrinkages in the concrete materials.

This investigation forms part of future investigations to study possible losses in the tendons systems in the Swedish reactor containments. Therefore, in order to provide data for analyzes of the losses in the tendon systems, available measurement data from the inspections of the tendons systems have been compiled in this report.

It is noted that data from inspections of tendon systems in reactor containments in Forsmark 1-3 and Ringhals 2-4 are available and have been compiled. However, for the containment in NPP Ringhals 1, Oskarshamn 1-3 and Barsebäck 1 and 2, the tendon systems are grouted. Thus, no measurement data are available for these.

Innehåll

1	Förkortningar	7
2	Inledning	8
3	Inneslutningarnas principiella konstruktionen	9
3.1	Allmänt	9
3.2	Konstruktionsförutsättningar för kabelsystemen	9
3.3	Principiella konstruktionen av kabelsystemen i de olika reaktorinneslutningarna.	10
4	BESKRIVNING AV SPÄNNKABELSYSTEM I RESPEKTIVE INNESLUTNING	12
4.1	Ringhals 1	12
4.2	Ringhals 2, 3 och 4	12
4.3	Forsmark 1 och 2	13
4.4	Forsmark 3	15
4.5	Oskarshamn 1	15
4.6	Oskarshamn 2	16
4.7	Oskarshamn 3	17
4.8	Barsebäck 1 och 2	17
5	SPÄNNKRAFTER I KABLARNA	18
6	SLUTSATSER OCH KOMMENTARER	22
7	REFERENSER	23
8	Bilaga 1 - Sammanställning av vissa data	24

1 Förkortningar

Tabell 1 - Förkortningar.

Förkortningar	Beskrivning
BWR	Boiling Water Reactor
BBRV	Brandenstini, Brinkenmaier, Ros, post-Tensioning System V
LOCA	Loss of Coolant Accident
NPP	Nuclear Power Plants
SAR	Safety Analysis Report
VSL	Vorspann System Losinger
F123	Forsmark 1, 2 och 3
O123	Oskarhamn 1, 2 och 3
R234	Ringhals 2, 3 och 4

2 Inledning

Reaktorinneslutningen på ett svenskt kärnkraftverk utgörs av en betongkonstruktion vilken är försedd med spännarmering i både horisontell och vertikal led. Reaktorinneslutningens primära syfte är att förhindra spridningen av radioaktiva ämnen till omgivningen vid händelse av ett inre haveri i t.ex. reaktorn eller dess kylsystem. Den ska även skydda reaktorn och dess mest vitala komponenter mot yttre påverkan. Spännkabelsystemet utgör genom förspänningen en förutsättning för funktionen hos en reaktorinneslutning, genom att bibehålla en tryckspänning i betongen då den inducerade tryckspänningen säkerställer att betongen är sprickfri.

På grund av flertalet långtidseffekter, krypning och krympning i betongen samt relaxation av spännkablarna, minskar krafterna i spännkablarna. Vid en viss tidpunkt kommer de kvarvarande spännkrafterna att vara för låga för att förhindra sprickbildning i betongen.

Spännkrafterna i de tre inneslutningarna i Forsmark och Ringhals 2, 3 och 4 övervakas genom regelbundna mätningar med domkraft på ett visst antal kablar. När det gäller de övriga inneslutningarna, Oskarshamn 1-3, Barsebäck 1 och 2 samt Ringhals 1 är kabelsystemen ingjutna i foderrör, vilket gör att samma typ av mätningar som i Forsmark 1-3 och Ringhals 2-4 inte är möjliga. Således finns – utöver ursprunglig förspänningskraft – inga mätdata tillgängliga för de sist nämnda inneslutningarna.

Inom vattenkraften pågår ett projekt i flera delar för att skapa branschgemensamma riktlinjer för användningen av spännarmering inom vattenkraftsindustrin. Det första steget i det projektet var en sammanställning över installerade spännstag i de svenska vattenkraftsanläggningarna. Det finns flera gemensamma frågeställningar mellan kärnkrafts- och vattenkraftsbranschen, bl.a. avseende mätmetodiker och eventuell instrumentering. Syftet med denna rapport är att utföra en sammanställning över spännarmeringen inom kärnkraften liknande den för vattenkraften. Detta kommer sedan ligga som grund för vidare gemensamma utredningar/projekt inom området.

3 Inneslutningarnas principiella konstruktionen

3.1 ALLMÄNT

Samtliga inneslutningar i de svenska kärnkraftverken består av cylindriska efterspända betongkonstruktioner. Det cylindriska skalet står på en relativt tjock bottenplatta av slakarmerad betong. Efterspänningen, vilken är i både vertikal- och horisontell, har åstadkommit genom kabelsystem av stålstråd.

En viktig förutsättning för inneslutningarnas funktion utgör förspänningen, som är avsett att förhindra dragbelastningar i betongen till följd av de belastningar som kan uppträda vid ett haveri inne i en reaktorinneslutning. Således måste under livstiden för respektive reaktorinneslutning eventuella förluster, vilka kan bero på olika förändringsmekanismer hos såväl stål som betong, i kabelsystemet hållas inom vissa gränser.

Förspänningskablarna i inneslutningarna i Ringhals 2-4 och Forsmark 1-3 ligger i foderrör, [1]. I Ringhals 2-4 är foderrören injekterade med fettliknande produkter, medan Forsmark 1-3 är förspänningskablarna torrluftventilerade. I både Ringhals 2-4 och Forsmark 1-3 är kablarna åtkomliga för inspektioner och byten. Kontroller och provningar av kabelsystemen i dessa inneslutningar sker enligt föreskrift/norm.

I de övriga inneslutningarna, i Oskarshamn 1-3, Barsebäck 1-2 och i Ringhals 1, är däremot förspänningskablarna, vilka också ligger i foderrör, injekterade med cement och är inte på samma sätt åtkomliga för inspektioner. I Ringhals 1 ligger dock ett antal kablar (18st), som monterades som en extra förstärkning efter det att defekter upptäcktes i vissa av de ordinära kablarna efter montage, på utsidan av inneslutningen och är delvis åtkomliga för inspektion, [1].

Inneslutningarnas cylindriska vägg har gjutits i två koncentrisk delar med en total vägg tjocklek av 1.0 - 1.5 meter, beroende på reaktorinneslutning. Inre delens tjocklek är 0.2 till 0.3 m.

Alla inneslutningar har en ingjuten tätplåt med uppgift att hindra utsläpp från inneslutningen vid ett haveri. Tätplåten är belägen mellan de två koncentrisk delarna, och är 4-10 mm tjock, i en del fall av rostfritt material. Tätplåten i kokarvattenreaktorernas bottenplatta ligger på botten av kondensationsbassängen och är fritt exponerad. I vissa äldre anläggningar, Ringhals 1 och Oskarshamn 1, är i de övre delarna av inneslutningen tätplåten också fritt exponerat, och således ej skyddad. Även i det sfäriska taket i PWR-inneslutningarna är tätplåten fritt exponerat. Oftast har tätplåten använts som motgjutsform under byggnationen, [1].

3.2 KONSTRUKTIONSFÖRUTSÄTTNINGAR FÖR KABELSYSTEMEN

De händelser som inneslutningarna ursprungligen är dimensionerade för är det tryck som kan uppstå inne i inneslutningen vid ett stort rörbrott eller motsvarande,

s.k. LOCA- händelser – Loss of Coolant Accident. Konstruktionstrycket för inneslutningarna varierar enligt Safety Analysis Report (SAR) mellan 4.2 - 5 bar, beroende på anläggning, [1].

En övergripande konstruktionsförutsättning för kabelsystemen i inneslutningarna är således att upprätthålla erforderlig förspänning av inneslutningsskalet vid ett inre haveri (LOCA). Belastningarna vid ett haveri skall inte äventyra tätplåtens funktion att förhindra utsläpp av radioaktiva ämnen till omgivningen.

Kabelsystemet i Forsmark är dimensionerat för 30 år. För de övriga anläggningarna uppges att vid konstruktionsskedet satte man inte upp några explicita dimensioneringskriterier med hänsyn till tekniska livslängden, men antog därvid att inneslutningarna skulle hålla tillräckligt länge, för minst 40 år, genom att följa då aktuella byggnadsnormer, [1].

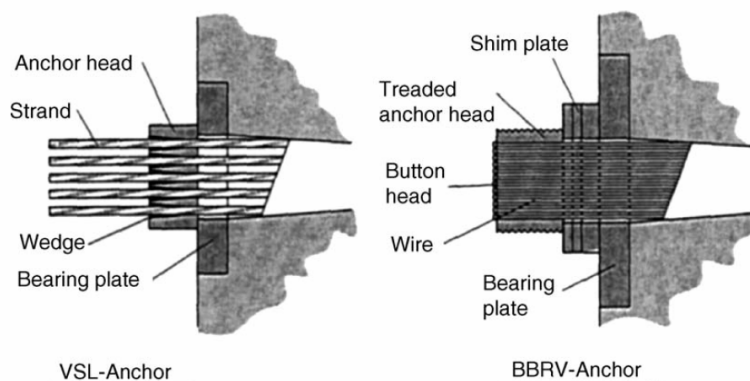
3.3 PRINCIPIELLA KONSTRUKTIONEN AV KABELSYSTEMEN I DE OLIKA REAKTORINNESLUTNINGARNA.

Kabelsystemen som förekommer i de svenska reaktorinneslutningar är av två typer av konstruktioner, BBRV respektive VSL. Av Tabell 2 framgår förekommande typ av kabelsystemen i respektive inneslutning.

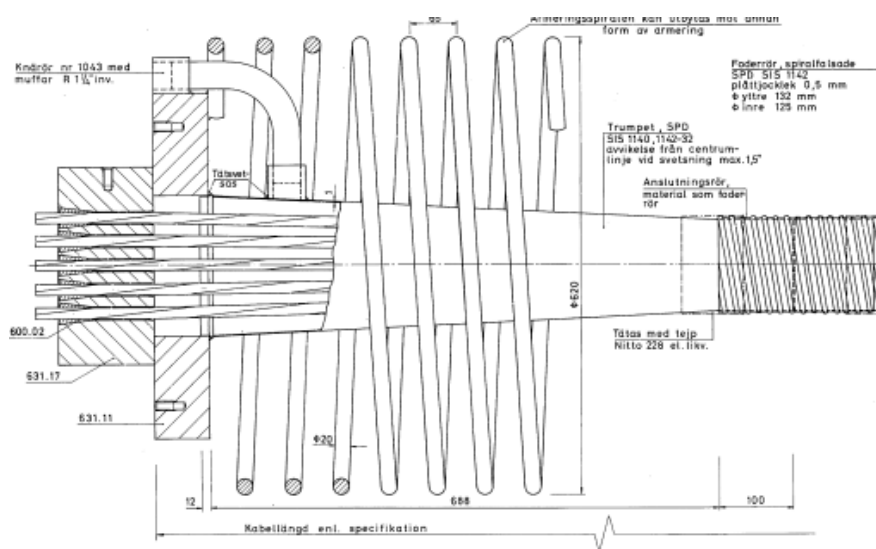
Tabell 2 – Konstruktionsutförande av kabelsystemen i de olika reaktorinneslutningarna i Sverige. Av tabellen framgår även huruvida kablarna är vidhäftande respektive icke, dvs huruvida de är ingjutna eller inte. Det bör noteras att reaktorerna Barsebäck 1 och 2 samt Oskarshamn 1 och 2 är tagna ur drift. Ringhals 2 och 1 planeras tas ur drift år 2019 respektive 2020.

Reaktor	Spännkabelsystem	Korrosionsskydd
Barsebäck 1	VSL	Cementinjektering
Barsebäck 2	VSL	Cementinjektering
Oskarshamn 1	BBRV	Cementinjektering
Oskarshamn 2	BBRV	Cementinjektering
Oskarshamn 3	VSL	Cementinjektering
Forsmark 1	VSL	Torrluftsventilerade
Forsmark 2	VSL	Torrluftsventilerade
Forsmark 3	BBRV	Torrluftsventilerade
Ringhals 1	BBRV	Cementinjektering
Ringhals 2	BBRV	Fettinjekterade
Ringhals 3	BBRV	Fettinjekterade
Ringhals 4	BBRV	Fettinjekterade

Utförandet av VSL respekt BBRV åskådliggörs i Figur 1 och 2



Figur 1 – De två typer av kabelsystem som förekommer i de svenska reaktorinneslutningarna, [4].



Figur 2 –Kabelförankring av typen VSL i Oskarshamn 3.

4 BESKRIVNING AV SPÄNNKABELSYSTEM I RESPEKTIVE INNESLUTNING

I detta kapitel beskrivs kabelsystemet i respektive reaktorinneslutning enligt nedan.

4.1 RINGHALS 1

På Ringhals 1 finns horisontella och vertikala spännkablar i cylinderväggen. Horisontellt finns 349 st. spännkablar, vilka är förspända vid fyra förankringsklackar på cylinderns utsida. Varje enskild kabel omfattar ett halvt varv. Förspänningen är sådan att alla membranspänningar av det inre övertrycket upptas av spännkablarna, [6].

Vertikalt finns 82 st. spännkablar, varav 62 st. är förankrade i bottenplattan. Resterande är förankrade i cylinderväggen på nivåer mellan +88,0 och +111,3. 36 st. kablar är uppdagna till bassängens överkant.

Spännkabelsystemet är av typen BBRV, som utvecklats av Bureau BBR i Zürich. Kabeln består av 55 stycken kalldragna trådar med diametern 6 mm. Trådarna har en 0,2-gräns av 1500 MPa och en brottgräns av 1750 MPa. Vid montage av de horisontella spännkablarna konstaterades ett materialfel i ett antal trådankare, vilket bland annat ledde till att spännkabelsystemet kompletterades med 18 stycken vertikala kablar. Dessa kablar är av samma typ som de andra spännkablarna med den skillnaden att trådtjockleken istället är 7 mm. De extra vertikalkablarnas nedre förankring är gjord i dränagetunneln och den övre i överkanten på bassängväggar. Kablarna ligger utanpå cylinderväggen och löper i gjutjärnsrör med 6 mm tjockt gods. De 18 extra kablarna är endast cementinjekterade vid ändpartierna, d.v.s. den del av kabeln som är i berg respektive bassängvägg. För att kablarna ska vara skyddade mot korrosion har de innan leverans försetts med ett permanent rostskydd (fett).

4.2 RINGHALS 2, 3 OCH 4

I reaktorinneslutningarna på Ringhals 2, 3 och 4 finns horisontella och vertikala spännkablar i cylinderväggen samt domkablar i kupolen.

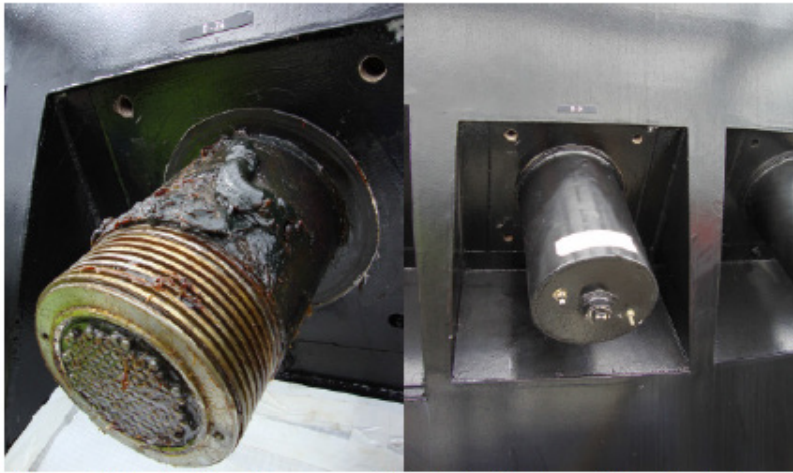
Kabelsystemet finns vidare beskrivet i [6].

Inneslutningen är som tidigare nämnts efterspänd med spännkablar. Spännkabelsystemet är av typ BBRV och levererat från AB Strängbetong. Varje kabel består av 139 trådar med diametern 6 mm. Antalet kablar är för Ringhals 2 totalt 548 st. varav 257 horisontal-, 153 vertikal- och 138 domkablar. För Ringhals 3 och Ringhals 4 är antalet kablar totalt 536 st. varav 245 horisontal-, 153 vertikal- och 138 domkablar. De horisontella kablarna går ett halvt varv runt byggnaden och är uppspända i pilastrarna.

Domkablarna ligger i ett rutnät i tre riktningar i domen och är uppspända i domringen.

De vertikala kablarna är uppspända mellan domringens ovansida och bottenplattans undersida.

Stålet som använts i kablarna, för Ringhals 2-4, består av stål med kvalitet 155/180 från Hjulsbro.



Figur 3- Infästningen av spännkabel i Ringhals 2, [6].

För att skydda spännkablarna från korrosionsangrepp är foderrören som kablarna finns i fettfyllda. Fettet tillverkades av Viscosity Oil och var från början Visconorust 2090P-2 på Ringhals 2 och Visconorust 2090P-4 på Ringhals 3 och Ringhals 4. Idag är fettet som finns på Ringhals 2 en blandning mellan dessa två då spännkabelsystemet fyllts på med Visconorust 2090P-4, [6].

4.3 FORSMARK 1 OCH 2

Spännkablarna i reaktorinneslutningarna i Forsmark löper, som det framgått inledningsvis, i foderrör, som ventileras med torrluft. I det följande avsnitten redogörs närmare för konstruktionen av kabelsystemen i Forsmark 1 och 2 samt Forsmark 3. Det bör noteras att inneslutningarna i Forsmark 1 och 2 är identiska.

I Forsmark 1 och 2 reaktorinneslutningar har spännkabelsystem från VSL (Vorspann System Losinger) använts. Respektive spännkabel består av 19 linor med en diameter på 13 mm och lina består av totalt 7 trådar där 6 trådar är tvinnade kring en rak tråd i centrum av linan, var och en av de 7 trådarna har en diameter på cirka 4,4 mm, [2].

Kablarna förankras i ankarstycket med kilar (2 kilar/lina) vilket för över kraften från kabeln till betongen via en ingjuten ankarplatta, se figur 2.

Stålkvaliteten i kablarna är SIS 1757-08 och tillverkades av Bridon Wire Ltd. Brottspänningen för trådarna uppgår till 1835 MPa med en 0,2-gräns på cirka 1600 MPa, karakteristiska värden. Tvärsnittsarean för en kabel är 1900 mm². Spännkablarna skyddas från korrosion genom torrluftsventilation.

Inneslutningarna är försedda med spännkablar i både vertikal och horisontell led i cylinderväggen. Totalt finns 140 vertikala kablar och 156 horisontella i cylinderväggen. 64 st. av de vertikala kablarna fortsätter upp i bassängväggarna och förankras i ovankanten av väggarna. De övriga 76 kablarna förankras i ringplattan. De långa vertikala spännkablarna sträcker sig ungefär mellan 55 gon - 145 gon samt mellan 250 gon – 330 gon.

Den nedre förankringen av de vertikala kablarna i cylinderväggen är belägen i ett schakt i underkant av bottenplattan. Det finns även 22 st. vertikala spännkablar i bassängväggarna placerade vid anslutningarna mellan bassängvägg och den förhöjda delen av cylinderväggen som även fungerar som bassängvägg. Endast 8 av dessa är dock tillgängliga för mätning av spännkraft, förankringarna på de övriga 14 är övergjutna.

Samtliga vertikala kablar spändes endast uppifrån.

De horisontella kablarna i cylinderväggen ligger i par med cirka 375 mm centrumavstånd mellan paren. Kablarna förankras på vertikala klackar och löper drygt ett varv runt inneslutningen, varannan kabelnivå är förskjuten 180° i ringsled.

De horisontella kablarna spändes upp från båda ändar samtidigt.

Vidare finns även 44 horisontella spännkablar i bassängväggarna samt 10 st. horisontella spännkablar i övre ringplattan som fortsätter in i ångrörsschaktet i reaktorbyggnaden och stabiliserar på så vis schaktet i händelse av ett ångledningsbrott. Spännkablarna i bassängväggarna ligger i par, fördelningen är samma som för Forsmark 3.

Spännkablarna i ringplattan ligger i två grupper med 5 st. kablar i varje. De spändes endast upp från förankringarna i själva plattan. I Tabell 3 sammanställs de olika typerna av spännkablar i Forsmark 1 och 2.

Tabell 3 - Sammanställning över spännkablarna i Forsmark 1 och 2

Kabelgrupp	Antal	Längd (m)
Korta vertikalkablar (Cylinderväggen)	76	41
Långavertikalkablar (Cylinderväggen)	64	50
Horisontalkablar (Cylinderväggen)	156	89
Vertikalkablar (Bassängvägg)	22	16
Horisontalkablar (Bassängvägg)	44	43
Ringplatta	10	28

4.4 FORSMARK 3

I inneslutningen i Forsmark 3 har spännkabelsystem av typen BBR-V, från BBR (Brinkenmaier, Brandestini och Ros), använts. Varje spännkabel består av 139 individuella trådar med en diameter på 6 mm, [2].

Kablarna förankras i ankarstycket via stukade ändar på trådarna vilket för över kraften från kabeln till betongen via en ingjuten ankarplatta.

Brottspänningen uppgår till 1800 MPa, med en 0,1- gräns på cirka 1600 MPa. Tvärsnittsarean för en kabel är 3930 mm², vilket ger en brottslast på 7074 KN.

Spännkablarna skyddas från korrosion genom torrluftsventilation av foderrören

Inneslutningen är försedd med spännkablar i både vertikal och horisontell led i cylinderväggen. Totalt finns 120 st. vertikala kablar och 88 st. horisontella i cylinderväggen. 48 st. av de vertikala kablarna fortsätter upp i bassängväggarna och förankras i ovankanten av väggarna. De övriga 72 kablarna förankras i ringplattan. Den nedre förankringen av de vertikala kablarna i cylinderväggen är belägen i ett schakt i underkant av bottenplattan.

Samtliga vertikala kablar spändes endast uppifrån.

De horisontella kablarna i cylinderväggen ligger i par med cirka 700 mm centrumavstånd mellan paren. Kablarna förankras på vertikala klackar och löper drygt ett varv runt inneslutningen. Varannan kabelnivå är förskjuten 180° i ringsled. De horisontella kablarna spändes upp från båda ändar samtidigt.

Vidare finns även 44 st. horisontella spännkablar i bassängväggarna samt 16 st. horisontella spännkablar i övre ringplattan. Kablarna i bassängväggarna samt ringplattan spändes växelvis från endast en ände, d.v.s. vartannat lager av kablar spändes från olika ändar.

I Tabell 4 sammanställs de olika typerna av spännkablar i Forsmark 3.

Tabell 4 - Sammanställning över spännkablarna i Forsmark 3

Kabelgrupp	Antal	Längd (m)
Vertikalkablar (Cylinderväggen)	72	34
Vertikalkablar (som fortsätter upp i bassängväggen)	48	42
Horisontalkablar (Cylinderväggen)	88	91
Horisontalkablar (Bassängvägg)	44	29
Ringplatta	16	29

4.5 OSKARSHAMN 1

Gjutning av reaktorinneslutningen i Oskarshamn skedde i huvudsak under 1967 och uppspänningen utfördes under 1967. Kabelsystemen i Oskarshamn 1 är injekterade med cementbruk, och är av typen BBRV, [5].

De horisontella kablarna i den cylindriska av väggen i inneslutningen har aktiva förankringar i båda ändar och utgörs totalt av 121 kabelvarv, varav 46 st. är halvvarvskablar kring sluss samt ång- och matarvattenledningar. Både hel- och halvvarvskablar har förskjutna förankringsställena.

En tredjedel av de vertikala kablar i den cylindriska har passiva förankringar i bottenplattans ringbalk. Totalt finns 60 st. vertikalkablar. I takplattan finns 80 st. kablar.

Möjligheterna för att mäta upp aktuella förspänningskrafter i de injekterade kablarna begränsade.

Tabell 5 - Sammanställning över spännkablar i Oskarshamn 1

Kabelgrupp	Antal
Vertikalkablar (Cylinderväggen)	60
Horisontalkablar (Cylinderväggen)	121
Takplatta	80

4.6 OSKARSHAMN 2

Liksom i Oskarshamn 1 är kabelsystemen i Oskarshamn 2 injekterad med cementbruk och av typen BBRV. Gjutning av reaktorinneslutningens betongdelar utfördes i huvudsak under 1970-71. Uppspänningen utfördes 1972.

Horisontella kablar i nedre cylinderväggen har aktiva förankringar i båda ändar och utgörs totalt av 344 halvvarvskablar med förskjutna förankringsställena (4 st. pilastrar). Horisontella kablar i pågjutning av nedre cylindervägg (efter brand) inkluderar 18 halvvarvskablar, medan den övre cylindervägg inkluderar 32 halvvarvskablar. De pågjutna kablarna har aktiva förankringar i båda ändar.

Det finns totalt 102 st. vertikala kablar i nedre cylinderväggen. Den nedre förankringen för dessa kablar är passiv. Vertikala kablar i övre cylinderväggen är totalt 46 st. Deras nedre förankring är av passiv typ. Radiella kablarna i koniska taket utgörs totalt 97 st. kablar med passiva ankare i den övre delen.

Tabell 6 - Sammanställning över spännkablar i Oskarshamn 2

Kabelgrupp	Antal
Vertikalkablar (Cylinderväggen)	102
Horisontalkablar (Cylinderväggen)	344
Takplatta	97

I övrigt har denna utredning inga närmare uppgifter om kabelsystemen i Oskarshamn 1-3. Det bör noteras att Oskarshamn 1 och 2, liksom Barsebäck 1 och 2, är numera tagna ur drift.

4.7 OSKARSHAMN 3

Gjutning av reaktorinneslutningen i Oskarshamn 3 utfördes under 1981 -82 och uppspänningen utfördes under 1982 -83. Spännkablarna i Oskarshamn 3 utgörs av system VSL med 0,2-gräns på ca 1600 MPa och med en brottgräns på ca 1750 MPa. Kablarna tillverkades i fabrik och monterades efter gjutning kort tid före uppspänning. Liksom i Oskarshamn 1 och 2 åstadkoms kablarnas permanenta rostskydd genom injektering av cementbruk i kablarnas foderrör. Kabelförankringarna skyddas med kring-gjutning av betong, [7].

De horisontella kablarna i Oskarshamn 3 har aktiva förankringar i båda ändar och utgörs totalt av 93 helvarvskablar med förskjutna förankringsställen i pilastrar. Det finns totala 128 st. vertikala kablar. Även de vertikala kablarna har aktiv förankring i båda ändar, men de spändes endast vid en förankring. I takplattan och i bassängväggarna finns 16 respektive 40 st. kablar.

Tabell 7 - Sammanställning över spännkablarna i Oskarshamn 3

Kabelgrupp	Antal
Vertikalkablar (Cylinderväggen)	128
Horisontalkablar (Cylinderväggen)	93
Takplatta	16
Bassäng	40

4.8 BARSEBÄCK 1 OCH 2

Liksom inneslutningarna i Oskarshamn 1-3 ligger kabelsystemet i inneslutningarna i Barsebäck 1 och 2 i foderrör och är injekterade med cement. Kabelsystem i Barsebäck 1 och 2 är av typ VSL, [5]. Denna utredning saknar närmare uppgifter om kabelsystemet i Barsebäck 1 och 2. Det är dock känt att konstruktionen av inneslutningarna i Barsebäck 1 och 2 respektive Oskarshamn 2 är identiska.

5 SPÄNNKRAFTER I KABLARNAS

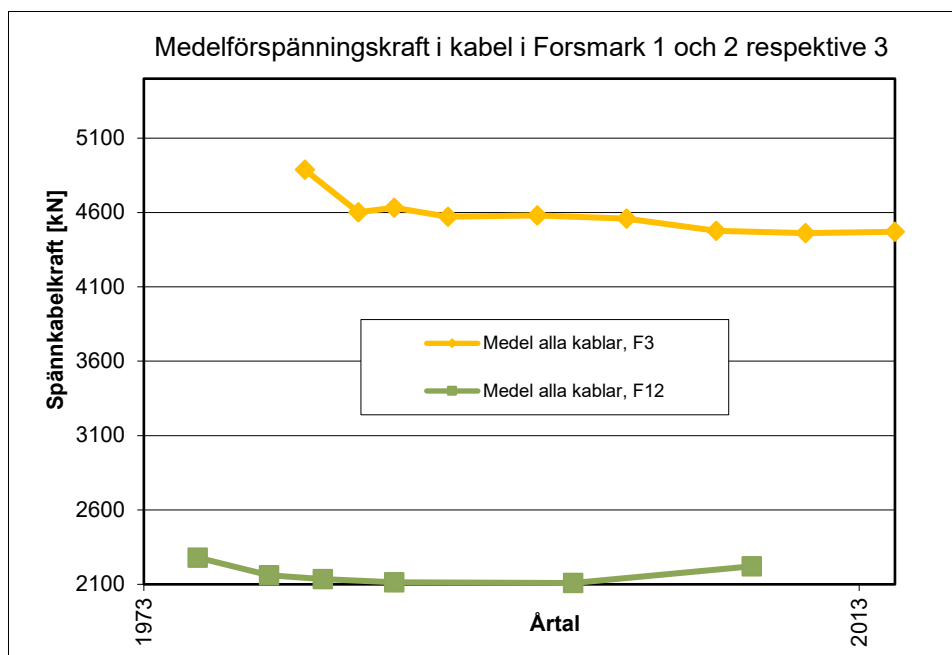
Vid konstruktionen har kablarna efterspänts med vissa marginaler, bl.a. med hänsyn till långtidseffekter hos såväl stål som betong och andra osäkerheter. Under de senaste två decennierna har man genom olika forskningsprojekt och utredningar försökt att fastställa rådande förspänning i kabelsystemen, se till exempel [1], [2] och [3].

I Ringhals 2-4 samt Forsmark 1-3 har man med framgång uppmätt förspänningen i kablarna och jämfört med predikterade förluster gjorda vid konstruktionens utförande. I de följande sammanställs kabelspännkrafterna i reaktorinneslutningarna i Ringhals 2-4 och Forsmark 1-3.

I de kabelsystemen som är ingjutna med cement, vilka finns i reaktorinneslutningarna i Barsebäck 1-2, Ringhals 1 och Oskarshamn 1-3, har motsvarande mätningarna som i Forsmark 1-3 och Ringhals 2-4 inte varit möjliga. Detta på grund av kabelsystemens ingjutna konstruktion. Några indirekta sätt, för att bestämma aktuell förspänning i dessa har vad denna utredning känner till, ej tillämpats.

Avsikten med denna sammanställningen är, som det har framgått inledningsvis, att ge en översiktlig beskrivning av spännkabelsystemen i de svenska reaktorinneslutningarna. Några fenomen som förlusterna av förspänningen huvudsakligen beror på är relaxation i kabelstålet samt krympning och krypning i betongmaterialet. Därför kan förspänningen i kablarna avta med tiden. Vidare kan det finnas osäkerheter kring faktiskt friktion mellan kabel och foderrör, som kablarna löper igenom, vilket kan medföra att belastningen på kablarna kan avvika från vad som avsetts vid dimensioneringen i vissa snitt.

För reaktorinneslutningarna i Forsmark 1-3 genomfördes en relativt omfattande utredning med syfte att genom bl.a. analyser av uppmätta värden fastställa tillståndet hos spännkablarna, se [2], [11] och [12]. De mätdata som redovisas i de följande avsnitten för Forsmark 1-3 är hämtade från dessa referenser. Mätningarna för Forsmark3 omfattar inspektionstillfällena fram till år 2015. För Forsmark 1 omfattar mätningarna, vilka redovisas i [2], perioden fram till 2010. Medelvärden på förspänningskrafterna i kablarna i inneslutningarna i Forsmark 1, 2 och 3 redovisas i Figur 4. I bilaga 1 till denna rapport redovisas förspänningskraften gruppvis i inneslutningarna för Forsmark 1, 2 och 3.

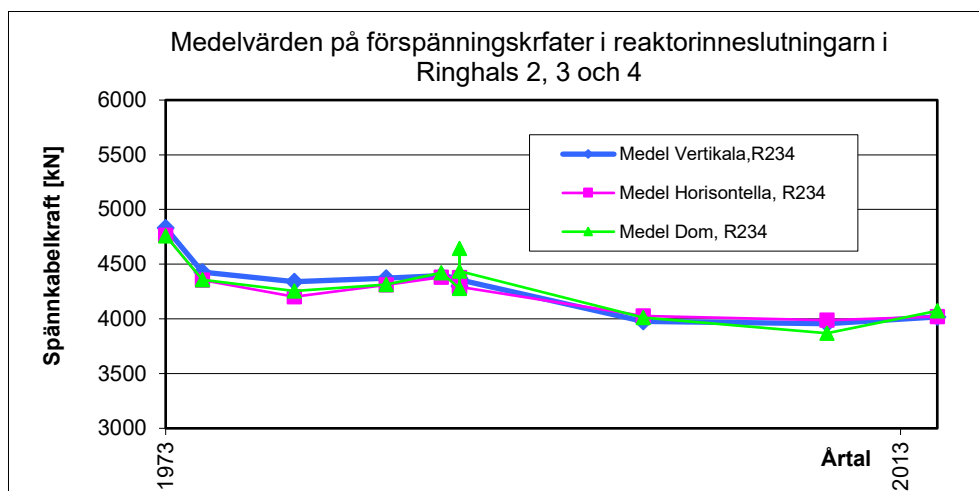


Figur 4. I grafen redovisas medelvärden av förspänningskraft i alla kablarna i reaktorinneslutningarna i Forsmark 1 och 2 (F12) respektive 3 (F3).

För inneslutningarna i Forsmark 1 och 2 omfattar mätdata fram till år 2007 respektive 2003. Det kan observeras av grafen i Figur 4 att medelvärdet på förspänningen det första året och år 2003/2007 ligger ungefär på samma nivå (2280 kontra 2222 kN). Perioden däremellan ligger medelvärdet på förspänningskraften något under den initiala förspänningen. Som mest är variationen ca 170 kN.

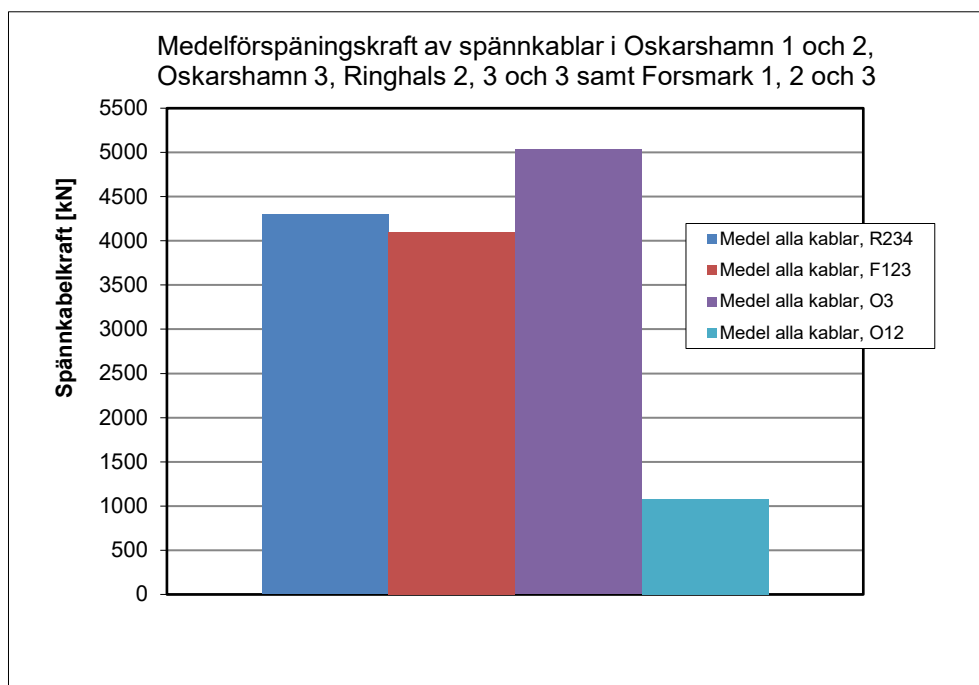
För Forsmark 3 kan noteras att medelförspänningskraften år 2015 ligger ca 300 kN (4887-4582) under den initiala förspänningen. En avtagande tendens av medelkraften under årenslopp kan observeras.

För Ringhals 2, 3 och 4 omfattar redovisade mätdata fram till år 2013, beroende på reaktorinneslutning. Mätvärdena är hämtade från [10]. I Figur 6 redovisas medelvärdet på förspänningskraften i inneslutningarna i Ringhals 2,3 och 4. Det kan noteras att förspänningskraften i de olika kabelgrupperna är av samma storleksordning. En svagt avtagande tendens av förspänningskraften kan noteras för samtliga grupper av förspänningskablarna. Aktuell förspänning är dock för respektive inneslutningsfunktion bedömd vara tillräcklig.



Figur 5. I grafen redovisas medelvärden av förspänningskrafterna i alla kablar i reaktorinneslutningarna i Ringhals 2, 3 och 4 (R234).

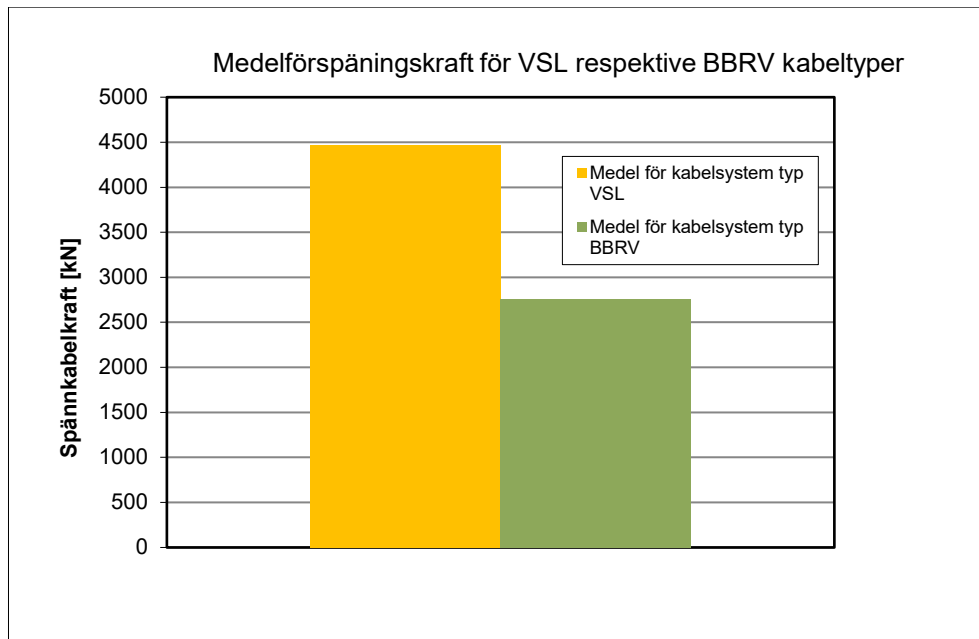
Underlaget gällande inneslutningarna i Oskarhamn 1, 2 och 3 är jämförelsevis mer översiktlig. Redovisade förspänningskrafterna avser drift efter 40 år. Medelvärdet av förspänningen i samtliga kablar framgår av Figur 6. Det noteras att förspänningskraften i medeltal ligger över medelvärdet för jämförbara inneslutningen i Forsmark 3.



Figur 6. I grafen redovisas medelvärdena av förspänningskrafterna i samtliga kablar, för vilka värden finns redovisade, i reaktorinneslutningarna Oskarhamn 1,2 och 3 (O123), Ringhals 2,3 och 3 (R234) samt Forsmark 1, 2 och 3 (F123).

Det bör noteras att förspänningskraften i kablarna i Oskarshamn 1 och 2 (O12) är markant lägre i jämförelse med motsvarande förspänning i de övriga reaktorinneslutningarna.

Slutligen kan redovisas i Figur 7 medelvärden på förspänningskraften i kabeltyp BBRV respektive VSL. Det noteras endast att förspänningen i medeltal är betydligt högre i kablarna av VSL-typ.



Figur 7. I grafen redovisa medelvärden av förspänningskraft i kablarna i av typ BBRV (R234, F3, O12) och VSL (F12, O3).

6 SLUTSATSER OCH KOMMENTARER

Inneslutningarna i de svenska kärnkraftverken består i princip av cylindriska betongkonstruktioner som är efterspända med kabelsystem. Funktionen hos de efterspända kabelsystemen är att förhindra överbelastningarna av betongkonstruktionen vid ett inre haveri. Efterspänningen (förspänning i mekanisk mening) är i både vertikal- och horisontelled. Den i betongen ingjutna tätplåten skall förbli tät vid ett inre haveri och inte släppa ut radioaktiva ämnen till omgivningen.

Således är förspänningen av betongkonstruktionen en viktig förutsättning för funktionen hos en inneslutning och denna behöver upprätthållas under anläggningens livstid. Dock kan förspänningen avta med tiden, främst på grund av mekanismerna relaxation i stålmaterialen i kabelsystemen och betongens krympning och krypning. I inneslutningarna i Forsmark 1-3 samt Ringhals 2-4 ligger kabelsystemen fritt i foderrör. I dessa inneslutningar är således kablarna inspekterbara och kan även vid behov bytas ut. Inspektion och mätning av förspänning i dessa sker efter program. Tillgängliga mätdata på förspänningskraft från dessa inspektioner har sammanställts i denna rapport.

I de övriga svenska inneslutningarna, i Ringhals 1, Barsebäck 1-2 och Oskarshamn 1-3, ligger kablarna också i foderrör, men de är återgjutna med cement, vilket omöjliggör byten och efterdragning. Ursprunglig förspänningskraft i kabelsystem i inneslutningar i Oskarshamn 1 och 2 finns att tillgå. Det kan dock konstateras att mätdata från återkommande inspektioner saknas för kabelsystem i inneslutningarna i Ringhals 1, Barsebäck 1-2 och Oskarshamn 1-3.

Av sammanställningen framgår att förspänningskraften i medeltal är lägre i inneslutningarna i de äldre reaktorerna. Orsaken till detta har inte klarställts i denna utredningen, men kan bero på skillnader i konstruktionen och dragningen av kabelsystemen. Kabelsystem i inneslutningarna i Forsmark 1, 2 och 3 samt i Ringhals 2, 3 och 4 är typen VSL respektive BBRV. Förspänningskraften i kablarna är dock i medeltal av samma storleksordningen i dessa inneslutningar. I bilaga 1 till denna redovisas vidare tillgängliga förspänningskraft gruppvis i respektive inneslutning.

7 REFERENSER

- [1] SKI-rapport 02:58 - Utredning kring reaktorinneslutningar – Konstruktion, skador samt kontroller och provningar.
- [2] Spännkabelsystemen i Forsmarks reaktorinneslutningar, Utvärdering, prognostisering samt förslag till fortsatt övervakning av spännkraftsförluster, Rapport NP-ECS-13-012, Version 2, Vattenfall AB, 2014-02-10
- [3] Structural Integrity of Prestressed Nuclear Reactor Containments, Report TVBK-1035, Lund 2007, Division of Structural Engineering Lund institute of Technology, Lund University.
- [4] Assessment of Long-Term Losses in Prestressed Concrete Structures Application for Nuclear Reactor Containments, Doctoral Thesis, Peter Lundqvist, 2012, Lund University.
- [5] SSM Rapport 2016:13 - Spännarmerade betongkonstruktioner vid kärntekniska anläggningar.
- [6] Strategisk Underhållsplan Bygg, Spännkabelsystem, Rapport med Darwin ID: 2077439 / 3, Ringhals AB.
- [7] Oskarshaman 3 – System 152 – Inneslutningen inre byggnadsstomme, Regnr 2014-02406, OKG.
- [8] Oskarshaman 2 – System 130/138 – Reaktorinneslutning/reaktorinneslutningskupol och servicekupol, Regnr 2009-07151, OKG.
- [9] Energiforsk Report 2016:244, Long term stability of tendons and post tensioning wires.
- [10] Ringhals 2-4, Spännkabelprovningar, Bilaga 2.
- [11] Spännkabelinspektionen i Forsmark 3 - 2015, Rapport VRD-R05-2017, R&D, Vattenfall AB
- [12] Spännkabelinspektionen i Forsmark 2 - 2014, Rapport NP-PE-15-016, Vattenfall AB
- [13] Oskarshamnsverket 3 - Uppspänning av inneslutningens spännkablar.
- [14] Oskarshaman, Utdrag ur dokument med beteckning UBR 2017-01-08.

8 Bilaga 1 - Sammanställning av vissa data

Grupp	Typ av kabel-system	Antal kablar (st)	Längd (m)	Uppspänningsår (Första året)	Kabelstål Sträckgräns (MPa) /Brottgräns (MPa)	Medelvärde av den första uppspänningskraften (kN)	Brottlast (kN)	Förspänningskraft / brottslast (%)	Korrosionsskydd
Oskarshamn 1									
Vertikala, cylindervägg	BBRV	60		1967	1600/1800 ¹⁾	1220	1800	67,8	Cementinjekterade
Horisontal kablar	"	121		"		846,5	"	47,0	"
Ringplatta	"	80		"		975	"	54,2	"

Not ¹⁾: Antagits

Grupp	Typ av kabel-system	Antal kablar (st)	Längd (m)	Uppspänningsår (Första året)	Kabelstål Sträckgräns (MPa) /Brottgräns (MPa)	Medelvärde av den första uppspänningskraften (kN)	Brottlast (kN)	Förspänningskraft / brottlast (%)	Korrosionsskydd
Oskarshamn 2 samt Barsebäck 1 och 2									
Vertikala, cylindervägg	BBRV	102		1972	1600/1800 ¹⁾	1257	2115	59,4	Cementinjekterade
Horisontal kablar	"	344		"		1010	"	47,7	"
Ringplatta	"	97		"		-			"

Not ¹⁾: Antagits.

Grupp	Typ av kabel-system	Antal kablar (st)	Längd (m)	Uppspänningsår (Första året)	Kabelstål Sträckgräns (MPa)/ Brottgräns (MPa)	Medelvärde av den första uppspänningskraften (kN)	Brottlast (kN)	Förspänningskraft / brottlast (%)	Korrosionsskydd
Oskarshamn 3									
Vertikala, cylindervägg	VSL 15-18/31	128		1982/1983	1600/1750	5800	8060	72,0	Cementinjekterade
Horisontal kablar	"	93		"	"	5900	"	73,2	"
Ringplatta	"	16		"	"	6000	"	74,4	"
Bassäng	"	40		"	"	5800	"	72,0	"

Grupp	Typ av kabel-system	Antal kablar (st)	Längd (m)	Uppspänningsår (Första året)	Kabelstål Sträckgräns (MPa) /Brottgräns (MPa)	Medelvärde av den första uppspänningskraften (kN)	Brottlast (kN)	Förspänningskraft / brottslast (%)	Korrosionsskydd
Forsmark 1									
Korta vertikala, cylindervägg	VSL 5-19	76	41	1976	1600/1835	2351		67,4	Torrluftsventilerade
Långa vertikala, cylindervägg	"	64	50			2321	"	66,5	"
Horisontella-cylinderväggen	"	156	89			1985	"	56,9	"
Vertikala-bassängväggen	"	22	16			2287,5	"	65,5	"
Horisontella-bassängväggen	"	44	43			2305	"	66,0	"
Ringplatta	"	10	28			2298	"	65,8	"

Grupp	Typ av kabel-system	Antal kablar (st)	Längd (m)	Uppspänningsår (Första året)	Kabelstål Sträckgräns (MPa) /Brottgräns (MPa)	Medelvärde av den första uppspänningskraften (kN)	Brottlast (kN)	Förspänningskraft / brottlast (%)	Korrosionsskydd
Forsmark 2									
Korta vertikala, cylindervägg	VSL 5-19	76	41	1978	1600/1835	2375	3490	68,1	Torrluftsentilerade
Långa vertikala, cylindervägg	"	64	50			2348	"	67,3	"
Horisontella-cylinderväggen	"	156	89			2049	"	58,7,	"
Vertikala-bassängväggen	"	22	16			2389	"	68,5	"
Horisontella-bassängväggen	"	44	43			2292	"	65,7	"
Ringplatta	"	10	28			2314	"	66,3	"

Grupp	Typ av kabel-system	Antal kablar (st)	Längd (m)	Uppspänningsår (Första året)	Kabelstål Sträckgräns (MPa)/ Brottgräns (MPa)	Medelvärde av den första uppspänningskraften (kN)	Brottlast (kN)	Förspänningskraft / brottslast (%)	Korrosionsskydd
Forsmark 3									
Korta vertikala-cylindervägg	BBRV	72	34	1982	1600/1835	4913	7074	69,5	Torrluftsentilerade
Långa vertikala, som fortsätter upp i bassängväggen	"	48	42		"	4913	"	69,5	"
Horisontella-cylindervägg	"	88	91		"	4824	"	68,2	"
Vertikala-bassängväggen	"				"	4934	"	69,7	"
Horisontella-bassängväggen	"	44	29		"	4934	"	69,7	"
Ringplatta	"	16	29		"	4813	"	68,0	"

Grupp	Typ av kabel-system	Antal kablar (st)	Längd (m)	Uppspänningsår (Första året)	Kabelstål Sträckgräns (MPa)/ Brottgräns (MPa)	Medelvärde av den första uppspänningskraften (kN)	Brottlast (kN)	Förspänningskraft / brottlast (%)	Korrosionsskydd
Ringhals 1									
Vertikala, cylindervägg	BBRV 6-55	82		1972 (?)	1500/1750	-	2720		Cementinjekterade
Horisontal kablar	"	349			"	-			"
Bassäng	"	36			"	-			"

Grupp	Typ av kabel-system	Antal kablar (st)	Längd (m)	Uppspänningsår (Första året)	Kabelstål Sträckgräns (MPa) /Brottgräns (MPa)	Medelvärde av den första uppspänningskraften (kN)	Brottlast (kN)	Förspänningskraft / brottlast (%)	Korrosionsskydd
Ringhals 2									
Vertikala, cylindervägg	BBRV-6-139	153		1973	1550/1800	4833	7074	68,3	Fettinjekterade
Horisontal kablar	"	257		"	"	4746		67,1	"
Dom	"	138		"	"	4731		66,9	"

Grupp	Typ av kabel-system	Antal kablar (st)	Längd (m)	Uppspänningsår (Första året)	Kabelstål Sträckgräns (MPa)/ Brottgräns (MPa),	Medelvärde av den första uppspänningskraften (kN)	Brottlast (kN)	Förspänningskraft / brottlast (%)	Korrosionsskydd
Ringhals 3									
Vertikala, cylindervägg	BBRV	153		1976	1550/1800	4830	7074	68,3	Fettinjekterade
Horisontal kablar	"	245		"	"	4754		67,2	"
Dom	"	138		"	"	4762		67,3	"

Grupp	Typ av kabel-system	Antal kablar (st)	Längd (m)	Uppspänningsår (Första året)	Kabelstål Sträckgräns (MPa)/ Brottgräns (MPa)	Medelvärde av den första uppspänningskraften (kN)	Brottlast (kN)	Förspänningskraft / brottlast (%)	Korrosionsskydd
Ringhals 4									
Vertikala, cylindervägg	BBRV	153		1978	1550/1800	4834		68,3	Fettinjekterade
Horizontal kablar	"	245		"	"	4790		67,7	"
Dom	"	138		"	"	4786		67,7	"

FÖRSPÄNNINGSSYSTEMEN I DE SVENSKA REAKTORINNESLUTNINGARNA

Samtliga inneslutningar i de svenska kärnkraftverken består av förspända betongkonstruktioner. Förspänningen är både vertikal och horisontell och ska förhindra dragbelastningar i betongen till följd av de påfrestningar som kan uppstå vid ett stort inre haveri.

Förspänningen är beroende av förändringar i stålet och betongen. Därför måste eventuella förluster i kabelsystemet övervakas under hela reaktorns livstid. Förspänningen måste hållas inom vissa tillåtna konstruktionsgränser. Här görs en sammanställning av de spännkabelsystem som finns i de svenska reaktorinneslutningarna.

Ett nytt steg i energiforskningen

Energiforsk är en forsknings- och kunskapsorganisation som samlar stora delar av svensk forskning och utveckling om energi. Målet är att öka effektivitet och nyttiggörande av resultat inför framtida utmaningar inom energiområdet. Vi verkar inom ett antal forskningsområden, och tar fram kunskap om resurseffektiv energi i ett helhetsperspektiv – från källan, via omvandling och överföring till användning av energin. www.energiforsk.se



Energiforsk