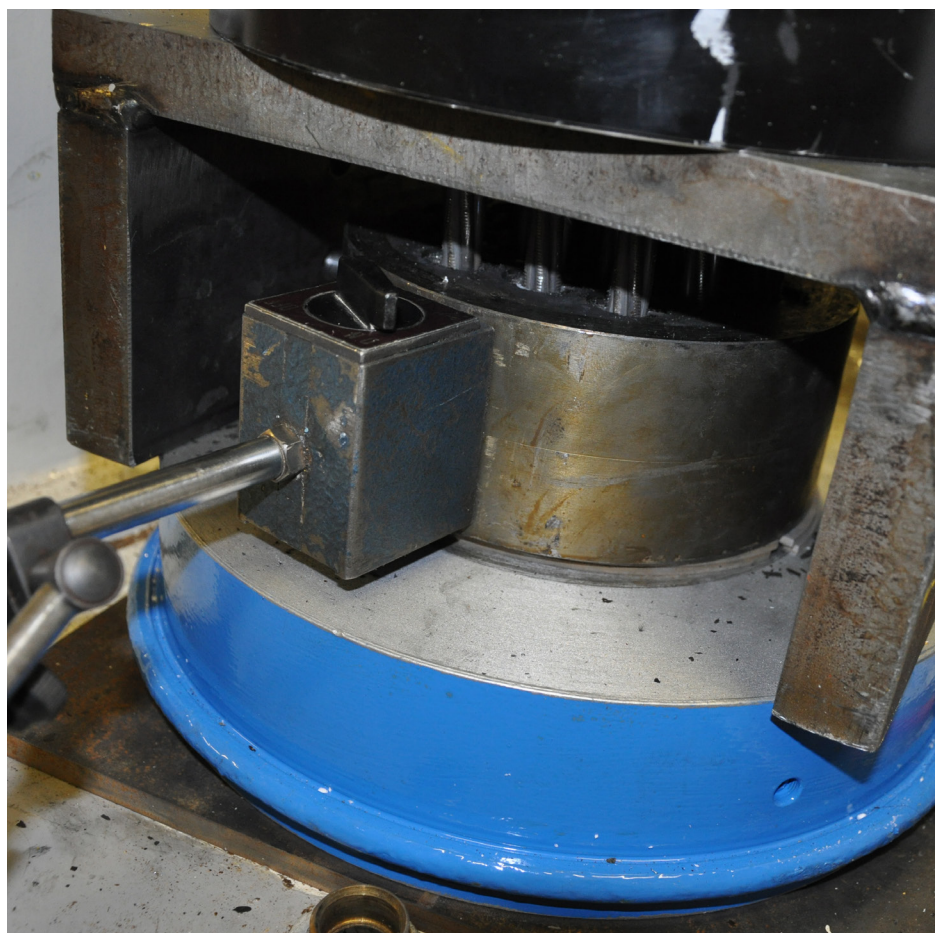


INSTRUMENTERING AV SPÄNNKABLAR I FORSMARK 2

RAPPORT 2016:243



BETONGTEKNISKT PROGRAM
KÄRNKRAFT



Instrumentering av spännkablar i Forsmark 2

PETER LUNDQVIST – VATTENFALL AB

MARCUS EDIN – VATTENFALL AB/FORSMARKS KRAFTGRUPP AB

PHILIP PERSSON – VATTENFALL AB/FORSMARKS KRAFTGRUPP AB

ANDERS FRISK – VATTENFALL AB/ ANDERS FRISK KONSULT AB/FORSMARKS KRAFTGRUPP AB

ISBN 978-91-7673-243-4 | © 2016 ENERGIFORSK

Energiforsk AB | Telefon: 08-677 25 30 | E-post: kontakt@energiforsk.se | www.energiforsk.se

Förord

Spännkablar används i samtliga Nordiska kärnkraftverk för att förstärka betonginneslutningens förmåga att behålla tätheten om en olycka skulle uppstå. Kunskap om hur spännkablar spännkraft förändras under konstruktionens livslängd och i samband med återuppspanning är mycket viktig för att säkerställa inneslutningens funktion.

I detta projekt så har ett antal spännkablar instrumenterats för att kunna mäta spännkraften längs med spännkabelns längd och för att kontinuerligt kunna mäta spännkraften i kabelns infästning. Mätningar har gjorts både i samband med uppspanning och över cirka ett års tid efter uppspanning.

Detta projekt ingår i Energiforsks betongtekniska 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).

Sammanfattning

En reaktorinneslutning är den viktigaste säkerhetsbarriären i ett kärnkraftverk och är för svenska verk utformad som en cylindrisk spännarmerad betongkonstruktion. Reaktorinneslutningens spännkabelsystem är ett viktigt säkerhetssystem då spännkrafterna förhindrar sprickbildning i betongen och därmed spridning av radioaktiva ämnen vid en olycka i t.ex. reaktorns kylsystem. Spännkrafterna minskar med tiden p.g.a. långtidseffekter i materialen. Därför övervakas spännkraftsförlusterna vid särskilda inspektionstillfällen då mätningar av kvarvarande spännkraft i ett antal spännkablar utförs.

I samband med inspektionen i Forsmark 2 hösten 2014 ersattes tre gamla spännkablar, en vertikal- och en horisontalkabel i cylinderväggen samt en horisontalkabel i en av bassängväggarna. Under de aktiva förankringarna på de nya kablarna installerades lastceller och ett antal av linorna instrumenterades med töjningsgivare. Mätningar utfördes under uppspänningen samt kontinuerligt under drift. Långtidsmätningarna som presenteras i denna rapport utfördes under cirka ett år efter uppspänningen.

Mätningarna under uppspänningen gav följande resultat:

- Förlusterna vid killåsning samt effekten av efterföljande överkompensation kunde bestämmas.
- Friktionsförlusterna mättes för horisontalkablarna genom att i ett första steg endast spänna upp kablarna från ena änden. Utifrån detta kunde friktionsegenskaperna för kablarna bestämmas.
- Mätningarna indikerar att spännkraftsmätningar med domkraft överskattar spännkraften i kablar påverkade av friktion. Skillnaden var cirka 5 %. För den raka vertikalkabeln var överensstämmelsen mellan domkraft och lastcell relativt god.
- Långtidsmätningarna under det första året visar på större spännkraftsförluster än vad som kan uppskattas teoretiskt. Majoriteten av förlusterna utvecklades under de första 20-30 dagarna efter uppspänningen.
- Omgivande temperatur påverkar lastcellerna under långtidsmätningar och är en parameter som måste mätas tillsammans med spännkraften.
- Endast två av femton töjningsgivare överlevde uppspänningen. Det har därför varit svårt att dra några slutsatser från dessa mätningar.

Resultaten från friktionsmätningarna samt låsförluster och överkompensation är viktiga vid uppspänning av nya kablar då informationen underlättar att uppnå avsedd spännkraft. Resultaten indikerar att domkraftsmätningar överskattar kvarvarande spännkraft, detta behöver därför studeras vidare. Erfarenheten av töjningsgivarna visar att denna typ av givare inte är lämpliga att installera på linor i reaktorinneslutningar.

Summary

The most important safety barrier in a nuclear power plant is the reactor containment enclosing the reactor. In Forsmark the design of the reactor containment is that of a prestressed concrete cylinder. The main purpose of the prestressing system in the containment is to maintain the structural integrity of the containment in the event of an internal accident. Due to long term effects the tendon forces and thus the safety of the structure will decrease with time. To monitor these so-called prestress losses the remaining tendon forces are measured at regular intervals.

During the inspection in Forsmark 2 in 2014 three old tendons were de-tensioned and replaced with new ones; one vertical and one horizontal tendon in the cylinder wall and one horizontal tendon in the wall of the spent fuel pool. The new tendons were instrumented with load cells in the active ends and five strands in each tendon were instrumented with strain gauges. Measurements were performed during the entire post-tensioning process. Long-term measurements are currently being performed.

From the measurements the following results were obtained:

- The anchor set losses and the subsequent tensioning in order to compensate for the anchor set losses were measured and thus quantified for this post-tensioning system.
- In order to estimate the friction properties of the ducts for the horizontal tendons the post-tensioning of these tendons were initially only performed from one of the anchorages while measurements were conducted at both ends. From these measurements the friction coefficients could be calculated.
- The measurements with the load cells during the post-tensioning indicated that the tendon force measurements with hydraulic jacks tend to overestimate the tendon forces in the horizontal tendons by approximately 5 %. For the vertical tendon the measurement with the hydraulic jack was in relatively good agreement with the results from the load cells.
- Long-term measurements of the prestress losses during the first year after the tensioning of the tendons showed that the prestress losses were somewhat higher than those estimated theoretically. More than 85 % of the losses developed during the first 20 to 30 days after tensioning.
- The ambient temperature affects the load cells during long-term measurements and is thus an important parameter to measure along with the tendon forces.
- Only two of a total of fifteen strain gauges remained functional after the tensioning of the tendons. It is thus difficult to assess the results from these measurements.

The results from the short-term measurements of the anchor set losses, the compensation for these losses and the frictional properties of the ducts, provide valuable information for the tensioning of new tendons. Further, the accuracy of the measurements with hydraulic jacks must be further investigated.

Innehåll

1	Inledning	9
1.1	Bakgrund	9
1.2	Spännkabelsystemets utformning	9
1.3	Inspektionen 2014	9
1.3.1	Mätning av kvarvarande spännkraft	9
1.3.2	Byte av spännkablar	11
1.3.3	Uppspänning av nya kablar	12
2	Instrumentering	13
2.1	Givare	13
2.2	Tester av givarna	14
2.2.1	Lastceller	14
2.2.2	Töjningsgivare	15
2.3	Instrumentering i forsmark 2	16
2.3.1	Vertikalkabeln	16
2.3.2	Horisontalkabeln	17
2.3.3	Bassängkabeln	17
3	Resultat från mätningar	19
3.1	Vertikalkabeln	19
3.1.1	Mätningar under uppspänning	19
3.1.2	Långtidsmätning	21
3.2	Horisontalkabeln	22
3.2.1	Mätningar under uppspänningen	22
3.2.2	Långtidsmätning	26
3.3	Bassängkabeln	27
3.3.1	Mätning under uppspänning	27
3.3.2	Långtidsmätningar	31
4	Sammanfattning och diskussion av mätresultat	34
4.1	Låsförluster	34
4.2	Överkompensation	34
4.3	Jämförelse mellan domkraft och lastcell	35
4.4	Friktionsegenskaper	36
4.5	Långtidsmätningar	36
4.6	Töjningsgivarna	38
4.6.1	Mätning under uppspänning	38
4.6.2	Långtidsmätningar	38
5	Slutsatser	40
6	Förslag till vidare utredningar	41
7	Referenser	42

1 Inledning

1.1 BAKGRUND

Reaktorinneslutningen till Forsmark 2 består av en cylindrisk efterspänd betongkonstruktion. Syftet med spännkabelsystemet är att bibehålla en tryckspänning i betongen och därmed förhindra sprickbildning och spridning av radioaktiva substanser vid en olycka i t.ex. reaktorn eller dess kylsystem. Spännkrafterna kommer dock att minska med tiden p.g.a. långtidseffekter i materialen vilket betyder att vid en viss tidpunkt kommer de kvarvarande krafterna inte vara tillräckliga för att förhindra sprickbildning. Vid denna tidpunkt krävs någon form av åtgärd för att säkerställa inneslutningens integritet. Spännkraftsförlusterna övervakas genom särskilda inspektionstillfällen då mätningar av den kvarvarande spännkraften i ett antal spännkablar utförs. I samband med inspektionen på inneslutningen till Forsmark 2 hösten 2014 ersattes tre gamla spännkablar med nya. De nya spännkablar som installerades instrumenterades med lastceller och töjningsgivare med syftet att mer noggrant kunna övervaka spännkrafterna i dessa kablar. Föreliggande rapport behandlar resultaten från denna instrumentering.

1.2 SPÄNNKABELSYSTEMETS UTFORMNING

Spännkabelsystemet i Forsmark 2 är indelat efter kablarnas utformning i 6 olika grupper, se Tabell 1. Spännkablar är av fabrikat VSL (Vorspann System Losinger), typ 19x13, d.v.s. varje kabel består av 19 linor med en diameter på 13 mm. Varje 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. Kablarna förankras i ankarstycket med kilar (2 kilar/lina) vilka för över kraften från kabeln till betongen via en ingjuten ankarplatta. Stålkvaliteten i kablarna är SIS 1757-08 och tillverkades av Bridon Wire Ltd. Karakteristiska värden på brottspänningen för trådarna är 1835 MPa med en karakteristisk 0,2-gräns på cirka 1600 MPa. Tvärsnittsarean för en kabel är 1900 mm². Spännkablar skyddas från korrosion genom torrluftsventilation av foderrören.

Tabell 1. Sammanställning av spännkablar i Forsmark 2.

Kabelgrupp	Antal	Längd/m
Korta vertikalkablar, (cylindervägg)	76	41
Långa vertikalkablar, (cylindervägg)	64	50
Horisontalkablar, (cylindervägg)	156	89
Vertikalkablar, (bassängvägg)	22	16
Horisontalkablar, (bassängvägg)	44	43
Ringplatta	10	28

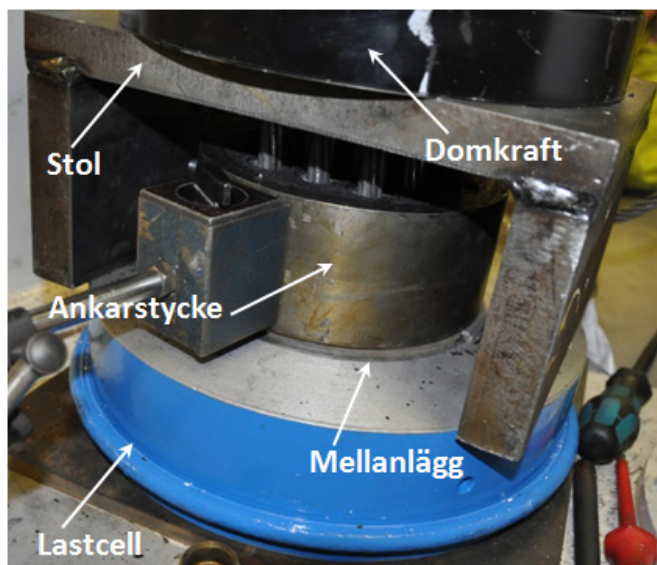
1.3 INSPEKTIONEN 2014

1.3.1 Mätning av kvarvarande spännkraft

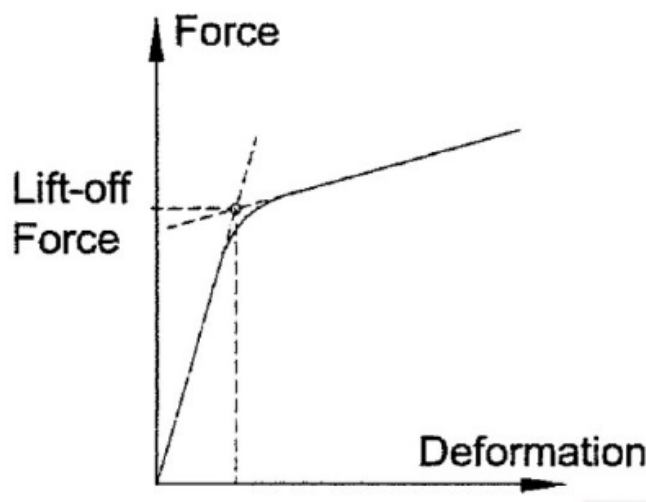
Mätning av de kvarvarande spännkrafterna i befintliga spännkablar utfördes med ett s.k. lift-off test där en domkraft kopplas till linorna på kabeln. Mellan domkraften och ankarplattan placeras en s.k. stol som domkraften verkar mot, se Figur 1. Stolen medför att ankarstycket kan lyfta från ankarplattan, den kraft som krävs för detta är den s.k.

lift-off kraften och antas vara lika med spännkraften i kabeln. Kraften i domkraften ökades i förbestämda steg till dess att ankarstycket lyft från ankarplattan. Vid varje kraftsteg mättes även förskjutningen av domkraftens kolv manuellt med en mätklocka. Förskjutningen plottades mot kraften i domkraften i ett kraft-förskjutningsdiagram ur vilken spännkraften i kabeln bestämdes, i Figur 2 visas en principfigur för denna procedur. Kurvan i diagrammet ändrar kraftigt riktning efter att ankarstycket lyft från ankarplattan. I detta fall antas att kraften i kabeln är lika med den kraft där kurvan byter riktning.

Två domkrafter av typen VSL ZPE-19 med en kapacitet på 270 ton användes vid mätning på befintliga kablar samt vid uppspänning av de nya kablarna. Båda domkrafterna hade före mätningarna kalibrerats för krafter upp till 2660 kN.



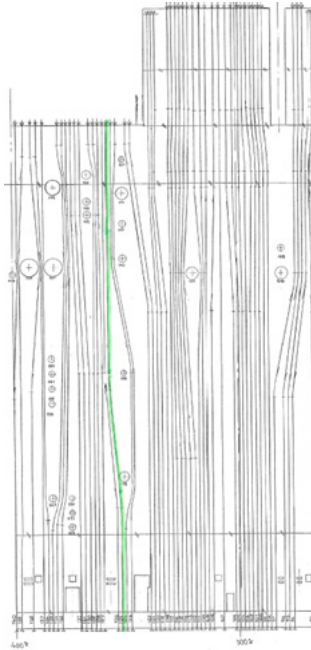
Figur 1. Stol används vid lift-off test och möjliggör en rörelse av ankarstycket. Här placerad mellan lastcell och domkraft.



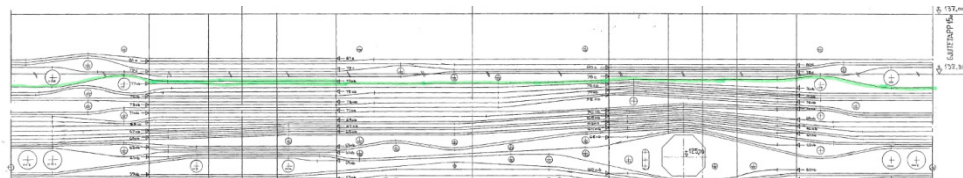
Figur 2. Kraft-förskjutningsdiagram för att bestämma lift-off kraften [1].

1.3.2 Byte av spännkablar

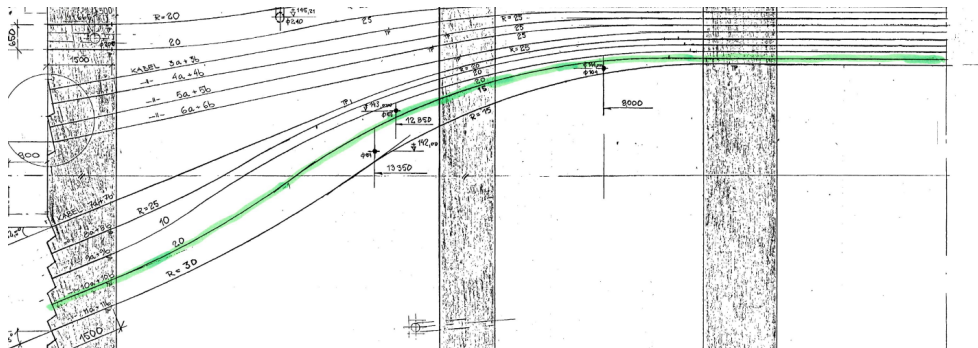
I samband med mätningen av kvarvarande spännkraft ersattes tre kablar med nya, en kort vertikalkabel och en horisontalkabel i cylinderväggen samt en horisontell bassängkabel. Kablarnas placering i inneslutningen visas i Figur 3 till Figur 5.



Figur 3. Positionen av den korta vertikalkabeln i cylinderväggen (grönmarkerad).



Figur 4. Positionen av den horisontalkabeln i cylinderväggen (grönmarkerad).



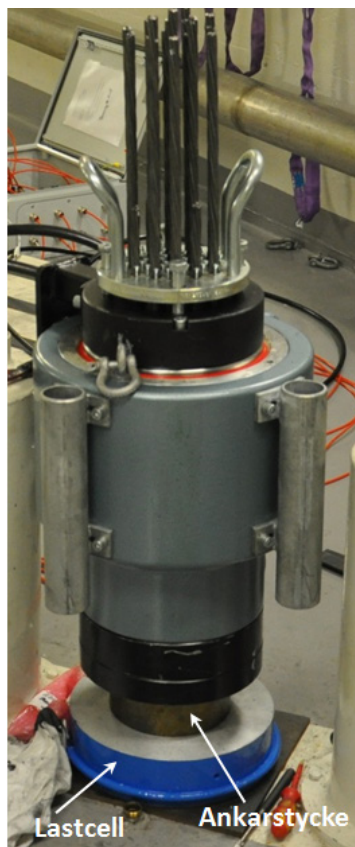
Figur 5. Positionen av den horisontella bassängkabeln i en av bassängväggarna (grönmarkerad).

1.3.3 Uppspänning av nya kablar

Uppspänningen av kablarna utfördes i följande tre steg:

1. Själva uppspänningen då kabeln spändes upp till erforderlig kraft varefter kilarna fördes in. Uppspänningen utfördes genom direkt kontakt mellan ankarstycke och domkraft, se figur 6.
2. Direkt efter uppspänningen ökades kraften i kabeln igen för att kompensera låsförlusterna. Detta utfördes med direkt kontakt mellan ankarstycke och domkraft.
3. Lift-off test och inläggning av mellanlägg. För att ytterligare kompensera för låsförlusterna utfördes först ett lift-off test för att bestämma kraften i kabeln. Därefter placerades ett eller flera mellanlägg mellan ankarstycke och ankarplatta. Detta steg utfördes med en s.k. stol som placerades mellan ankarstycke och domkraft, se Figur 1. Användandet av stol möjliggör en rörelse av ankarstycket samt inläggning av mellanlägg.
4. Slutligt lift-off test med stol för att bestämma den inlåsta kraften i kabeln.

Båda lift-off testerna utfördes på samma sätt som beskrivits i avsnitt 1.3.1. ovan.



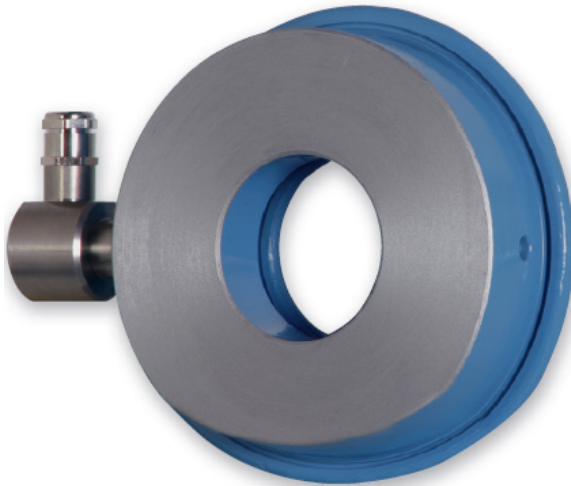
Figur 6. Uppspänning av vertikal cylinderkabel, domkraften verkar här direkt mot ankarstycket. Den blågrå ringen under ankarstycket är en lastcell.

2 Instrumentering

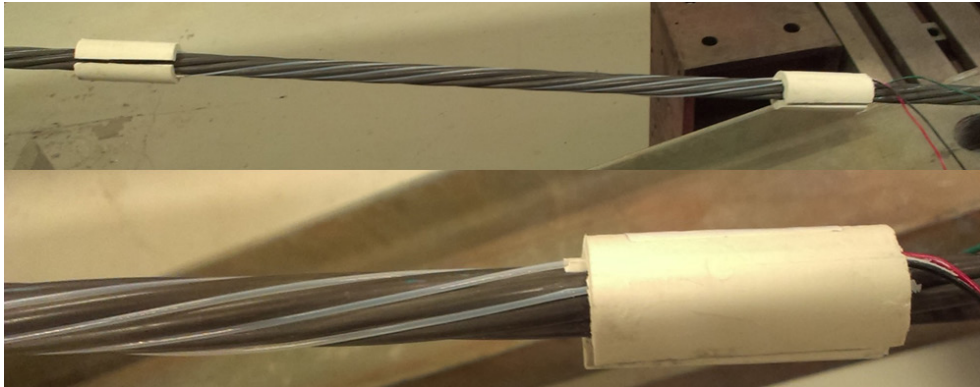
2.1 GIVARE

I samband med bytet av de tre spännkablarna instrumenterades de nya kablarna med lastceller och töjningsgivare. Lastcellerna, KK3000 A135 från Glötzl, som installerades är av liknande typ som de befintliga i Forsmark 1. Detta är hydrauliska lastceller som placeras mellan ankarstycke och ankarplatta och därmed direkt mäter spännkraften i kabeln, se Figur 7. Lastcellerna består av två sammankopplade stålringar där utrymmet mellan stålringarna är fyllt med olja, vilket medför att ringarna kan röra sig i lastcellens riktning. När lastcellen utsätts för en belastning rör sig stålringarna närmare varandra vilket ökar trycket i oljan. En piezoelektrisk givare omvandlar sedan oljetrycket till en elektrisk spänning. Lastcellerna är dessutom försedda med temperaturgivare för att kunna ta hänsyn till inverkan av temperaturvariationer. Varje lastcell kopplades till en datalogger av typ DL8 från Glötzl. Utläsningen av mätdata utfördes med en bärbar dator av typen Panasonic Toughbook.

Töjningsgivarna, s.k. Tensmeg, tillverkas av det kanadensiska företaget RST Instruments och är specialanpassade för mätning av töjning i 7-trådiga spännlinor. Utformningen av töjningsgivaren visas i Figur 8. De består av en tråd som kopplas mellan två ankare (de två vita cylindrarna i Figur 8), det är töjningen i denna tråd som sedan mäts av givaren. För att säkerställa att givarna följer linornas deformation förspäns de till en viss nivå under monteringen. Töjningsgivarna för varje instrumenterad kabel kopplades till en enskild datalogger, en s.k. Geologger tillverkad av RST instruments. Samma bärbara dator som användes till DL8-loggrarna användes för att läsa ut data från Geologgrarna.



Figur 7. Lastcell från Glötzl, bild från Glötzl produktblad.



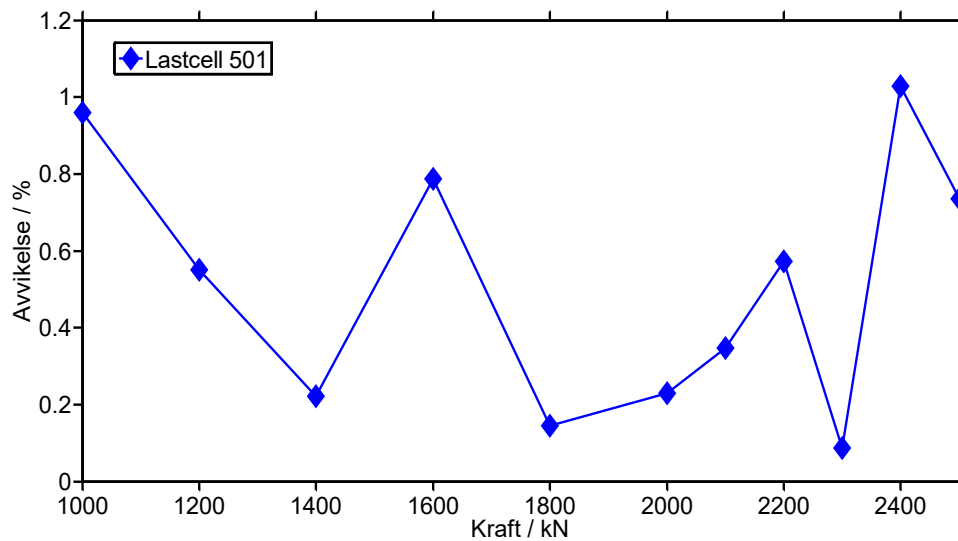
Figur 8. Den övre bilden visar töjningsgivaren monterad på spännlinan. Den nedre bilden visar ankaret som kopplas till dataloggern (på bilderna är givaren inte fastlimmad eller tillräckligt förspänd).

2.2 TESTER AV GIVARNA

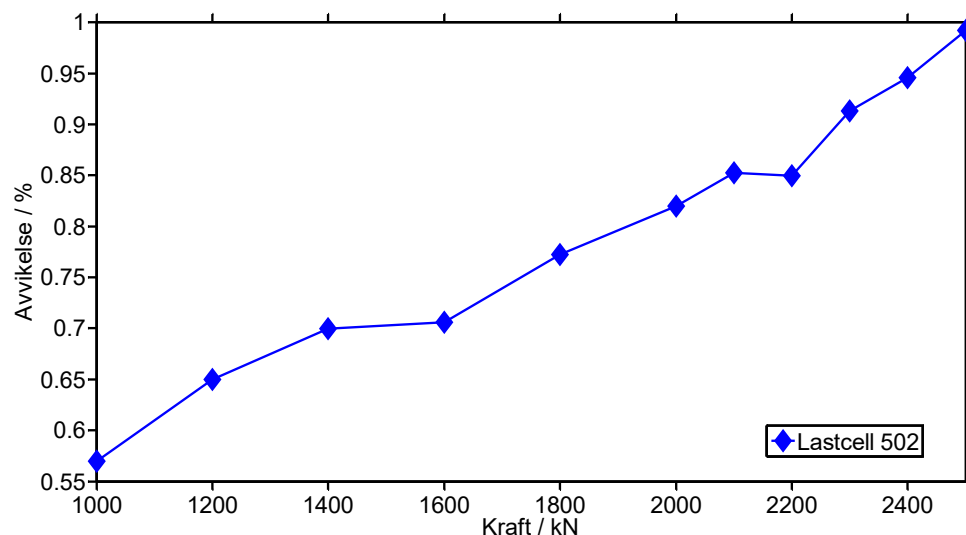
Före givarna installerades i inneslutningen utfördes tester i Vattenfalls laboratorium i Älvkarleby bl.a. för att kontrollera töjningsgivarnas noggrannhet.

2.2.1 Lastceller

Två av lastcellerna, nedan benämnda nr. 501 och 502, placerades i en betongpress av fabrikat Seidner med en maxtryckkapacitet på 3000 kN. Lastcell 501 installerades sedan på vertikalkabeln och lastcell 502 installerades inte utan förvaras inuti reaktorbyggnaden och kan vid behov testas igen för att kontrollera eventuell drift i lastcellerna. Kraften höjdes i steg om 200 kN upp till 2000 kN, därefter höjdes kraften i steg om 100 kN upp till 2500 kN. Resultaten från de båda mätningarna visas i Figur 9 till 10. Som framgår av resultatet stämmer värdena från lastcellerna väl överens med provmaskinen, avvikelsen är mindre än 1 %, vilket är något större än den angivna noggrannheten för lastcellerna på 0,5 %. Som även framgår ökar avvikelsen linjärt för lastcell 502 medan den varierar med ökande last för lastcell 501. Temperaturgivarna på lastcellerna visade under testerna på 20,6°C och temperaturen i labbhallen uppgick till 20,5°C.



Figur 9. Resultat från test av lastcell nr. 501.



Figur 10. Resultat från test av lastcell nr. 502.

2.2.2 Töjningsgivare

Tre töjningsgivare var planerade att testas, men p.g.a. diverse problem under testerna blev endast en givare testad på ett tillförlitligt vis. En av de tre givarna var defekt (trådarna mellan ankarna var felmonterade) och gick därför inte att montera på linan. Den andra givaren testades först enskilt och genom ett missförstånd loggades inte data från provmaskinen under testet. Under testet överskreds dessutom givartrådens flytgräns och efterföljande mätningar (vid en omspänning) blir då ej tillförlitliga p.g.a. den kvarstående töjningen i tråden. Töjningen i givaren i början av omspänningen kommer då inte vara proportionell mot töjningen i linan. Viktigt att påpeka är att under en normal mätning där kraften inte sänks till noll utan hålls kvar på en hög nivå påverkas inte mät noggrannheten om tråden plastiserar.

Under testet spändes linan upp till 145 kN, vilket motsvarar cirka 75 % av draghållfastheten, samtidigt som både töjning och kraft registrerades. Resultatet från mätningarna visade att töjningsgivarna underskattade töjningen i linan med cirka 400 $\mu\epsilon$ (ppm), vilket motsvarar en avvikelse med 5 %. Töjningen i provningsmaskinen mättes med en lägesgivare över en sträcka av 2 m. Töjningen vid 145 kN var enligt på provningsmaskinen 7700 $\mu\epsilon$, enligt Tensmeggivaren var den 7320 $\mu\epsilon$.

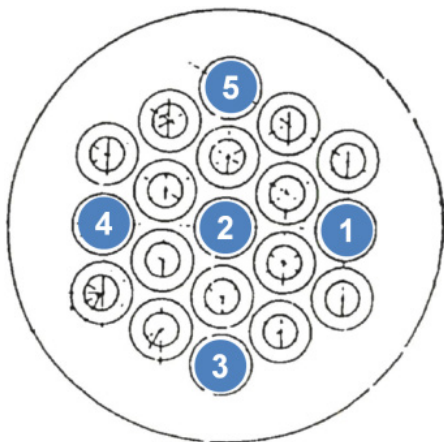
2.3 INSTRUMENTERING I FORSMARK 2

2.3.1 Vertikalkabeln

Uppspänningen av vertikalkabeln utfördes den 14 oktober 2014. Lastcellen installerades i den aktiva änden och töjningsgivarna installerades på centrumlinan samt fyra av de yttre linorna i kabeln cirka 500 mm in från den aktiva förankringen, se Figur 11. För att möjliggöra monteringen av töjningsgivarna drogs de fem linor som skulle instrumenteras ut cirka 1,5 meter från den aktiva förankringen. Efter att töjningsgivarna installerats fördes samtliga linor ner till samma nivå som de övriga. Endast den töjningsgivare som installerades på centrumlinan, nr 2 i Figur 11, överlevde uppspänningen. Detta berodde sannolikt på att samtliga töjningsgivare monterades helt parallellt med varandra och att töjningsgivarna på de yttre linorna fastnade mot foderröret. Detta medförde sannolikt att förankringarna på givarna försköts under uppspänningen.

Mätningar utfördes under hela uppspänningsskedet. Systemet för töjningsgivarna registrerade ett mätvärde var tionde sekund (s.k. samplingsfrekvens) och för lastcellerna var sjunde sekund (förinställt värde i dataloggern vid direktmätning). För att utesluta påverkan av temperaturvariationer förvarades lastcellen inne i reaktorbyggnaden cirka en månad före uppspänningen samt minst 1 dygn i det utrymme där den sedan installerades. Detta gällde för samtliga lastceller.

Långtidsmätningarna med lastcell respektive töjningsgivare utfördes i denna studie mellan 14/10 2014 och 17/11 2015. För både lastcellen och töjningsgivarna användes en samplingsfrekvens på 6 h.



Figur 11. De linor där töjningsgivare installerades på vertikalkabeln.

2.3.2 Horisontalkabeln

Uppspänningen utfördes den 14 november 2014. Två lastceller installerades, en i var ände. För att uppskatta friktionsegenskaperna för kabeln spändes den delvis upp endast från änden vid förankring 1 samtidigt som mätningar utfördes med båda lastcellerna. Samma samplingsfrekvens som för mätningarna på vertikalkabeln användes. Avsikten var att förse en av linorna i kabeln med 5 töjningsgivare samt 5 temperaturgivare fördelade jämnt längs kabelns längd. De första 18 linorna trycktes in med en s.k. push-maskin och lades mot innersidan av foderröret, på detta vis skapades största möjliga utrymme för den instrumenterade linan att föras genom foderröret. Den sista linan matades in och givarna installerades på linan vid avsedd position innan den fördes vidare in i foderröret. Spännkabeln fastnade när cirka 5 m återstod av genomföringen och trots upprepade försök gick den inte att få igenom. Detta berodde antagligen på de installerade givarna eftersom de föregående linorna utan problem kunde tryckas igenom foderröret. Kabeln drogs ut igen och samtliga givare plockades av då inte någon av elkablarna till töjningsgivarna överlevde den långa dragningen. En reservgivare installerades sedan 10 m in från mataränden. Tyvärr skadades denna givare under uppspänningen och gav endast rimliga resultat under början av uppspänningen.

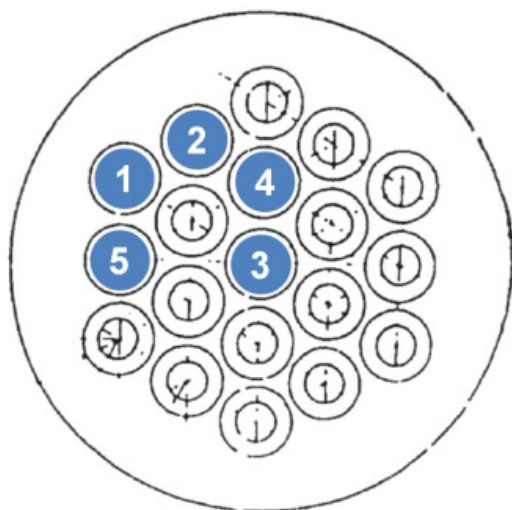
Temperaturgivarna var tyvärr försedda med en grövre elkabel än vad som framgick vid beställningen och beslutet togs därför att inte installera dessa då alla kablar helt enkelt inte skulle få plats i foderröret. Dock mäts temperaturen genom lastcellerna vid ändarna av spännkabeln och då foderröret är ventilerat med luft så kan temperaturen längs kabeln uppskattas utifrån resultaten från dessa två mätpunkter.

Långtidsmätningarna med lastcellerna utfördes i denna studie mellan 14/11 2014 och 17/11 2015. En samplingsfrekvens på 6 h användes.

2.3.3 Bassängkabeln

Uppspänningen utfördes den 24 november 2014. Två lastceller installerades, en i var ände. Samma procedur som för horisontalkabeln användes för att uppskatta friktionsegenskaperna för kabeln, d.v.s. den spändes delvis upp endast från ena änden samtidigt som mätningar utfördes med båda lastcellerna. Vid ena förankringen (förankring 2) installerades töjningsgivare på 5 av linorna i kabeln. Placeringen av givarna visas i Figur 12, denna placering valdes för att minska påverkan från friktion mot foderröret på givarna. För att skapa tillräckligt utrymme monterades givarna med en förskjutning på 500 mm i kabelns riktning. Givaren som placerades längst från förankringen (nr. 1 i Figur 12) placerades 3 m in från förankringen, den näst längst bort placerades 2,5 m från förankringen o.s.v. till den sista som placerades 1 m in från förankringen. Då krökningsen av kabeln är relativt liten var det möjligt att föra in de instrumenterade linorna för hand genom foderröret, vilket minimerade risken för skador på elkablarna. Samma samplingsfrekvens som för mätningarna på vertikalkabeln användes.

Långtidsmätningarna med lastcellerna utfördes i denna studie mellan 24/11 2014 och 17/11 2015. En samplingsfrekvens på 6 h användes.



Figur 12. De linor där töjningsgivare installerades på bassängkabeln.

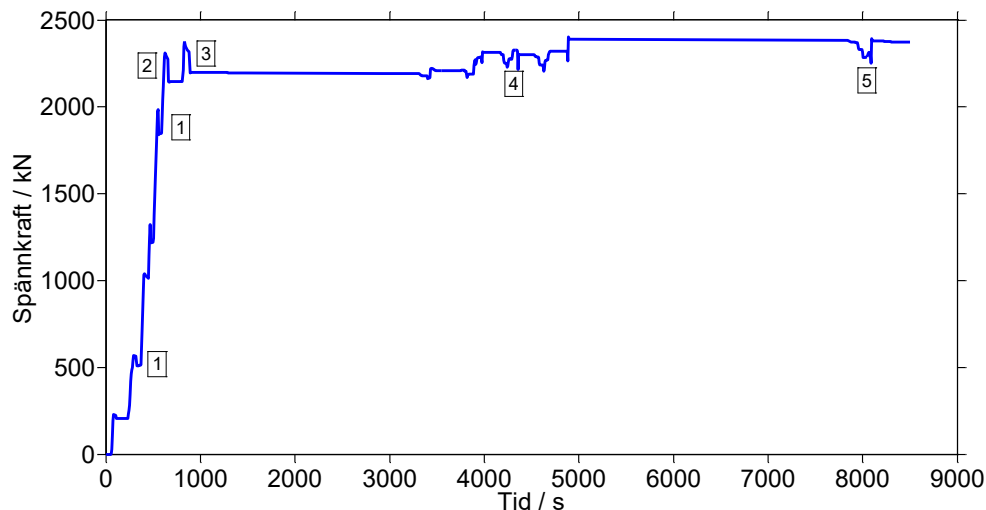
3 Resultat från mätningar

3.1 VERTIKALKABELN

3.1.1 Mätningar under uppspänning

Mätning med lastcell

Spännkabeln spändes endast upp från den övre förankringen. Enligt mätning med domkraft till 2357 kN och enligt mätning med lastcell till 2374 kN. Resultatet från mätningen med lastcellen redovisas i Figur 13 där kraften som registrerades av lastcellen är plottad mot tiden från början av uppspänningen. Platåerna markerade med 1 i Figur 13 visar på omtag i domkraften. Kolven i domkraften kan endast röra sig 100 mm och när den nått maximalt utslag måste kolven föras tillbaka för att kunna ta nytt tag. Dippen vid 2 är låsförlusterna som sker när kraften från domkraften överförs till kilarna. Ökningen och dippen vid 3 är en överkompensation som utförs efter låsningen för att kompensera för låsförlusterna. Därefter placeras en stol mellan ankarplattan och domkraften vilken möjliggör rörelse av ankarstycket. Vid 4 sker det första lift-off testet för att mäta inlåsta spännkraften. Om spännkraften visar sig vara för låg placeras shims (mellanlägg) mellan ankarstycke och ankarplatta (i detta fall ankarstycke och lastcell) för att erhålla avsedd spännkraft. De små störningar som syns runt 4 är orsakade av stötar i hydrauloljesystemet till domkraften då ventilen regleras. Den sista variationen i spännkraft vid 5 är det slutliga lift-off testet för att kontrollera den justerade inlåsta spännkraften. Medelvärdet på den omgivande temperaturen under uppspänningen var enligt termoelementet i lastcellen 28,5 °C.



Figur 13. Resultat från mätningen med lastcell under uppspänning av vertikalkabeln.

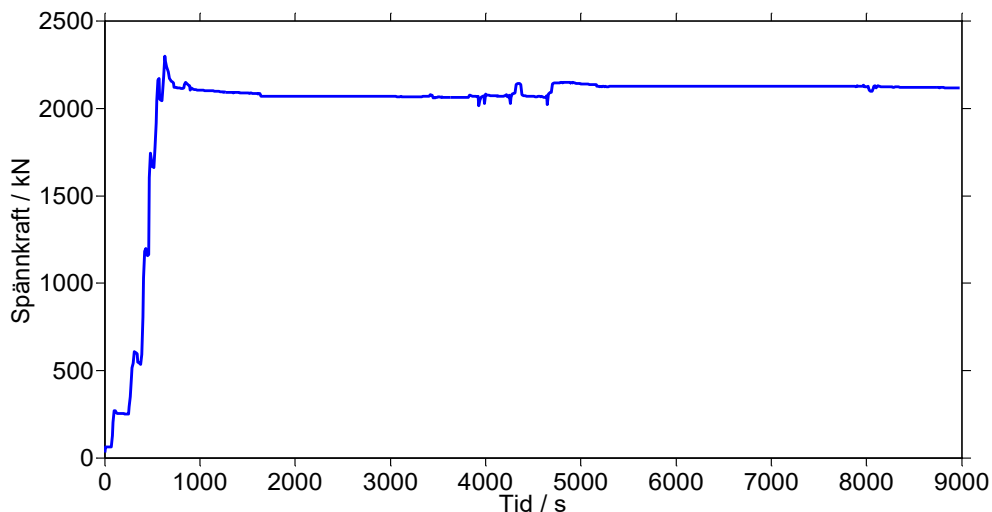
Resultaten från mätningen med lastcell under uppspänningen är:

- Låsförlusten (2 i Figur 13) är 165 kN motsvarande 7,1 %. Före låsning var kraften i kabeln 2310 kN, efter låsning 2145 kN.

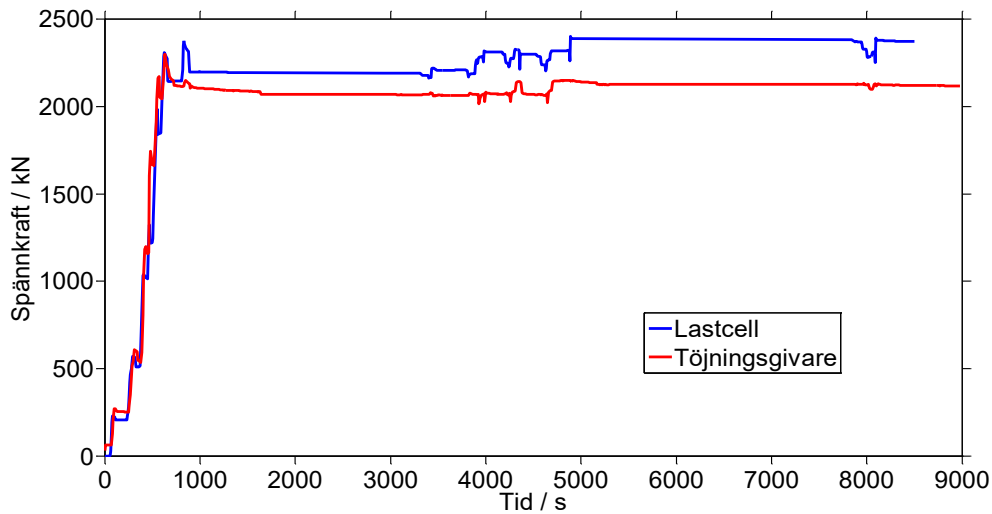
- Effekten av överkompensationen (3 i Figur 13) var en kvarstående ökning av spännkraften med 54 kN motsvarande 2,5 %. Under överkompensationen höjdes spännkraften med 232 kN upptill 2377 kN motsvarande 10,8 %, när domkraften släppte sjönk kraften ner till 2199 kN.
- Skillnaden mellan domkraft och lastcell vid första lift-off testet (4 i Figur 13) var 43 kN (enligt domkraft 2363 kN och enligt lastcell 2320 kN).
- Vid det slutliga lift-off testet (5 i Figur 12) var skillnaden 17 kN (enligt domkraft 2357 kN och enligt lastcell 2374 kN).

Mätning med töjningsgivare

I Figur 14 redovisas resultatet från töjningsgivaren placerad på centrumlinan. Töjningarna har här räknats om till spännkraft baserat på en elasticitetsmodul på 200 GPa för spännstålet och kabelns tvärsnittsarea på 1900 mm². En jämförelse mellan resultaten från lastcell och töjningsgivare visas i Figur 15. Som framgår av figur 14 stämmer resultaten från töjningsgivare och lastcell väl överens fram till låsningen av kilarna då kraften sjunker mer enligt töjningsgivaren. Kraftnivån är sedan enligt töjningsgivaren något lägre jämfört med lastcellen under resten av uppspänningen.



Figur 14. Resultat från mätningarna med töjningsgivare under uppspänning av vertikalkabeln.

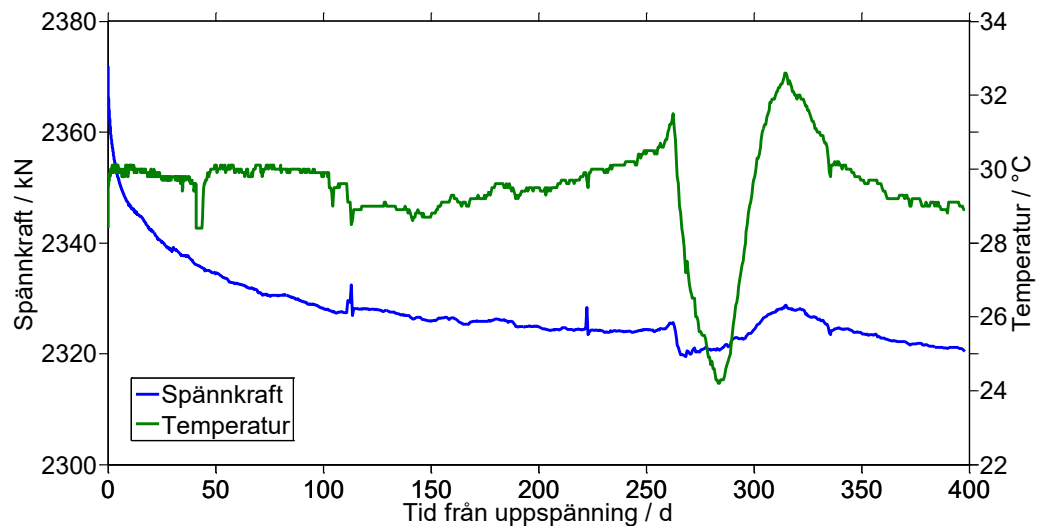


Figur 15. Jämförelse mellan resultaten från mätningarna med töjningsgivare samt lastcell under uppspänningen av vertikalkabeln.

3.1.2 Långtidsmätning

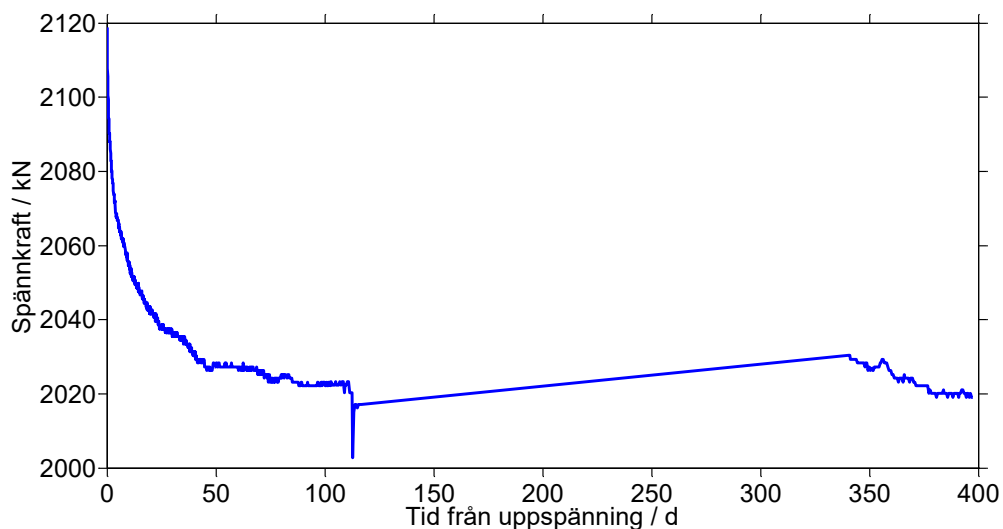
I Figur 16 och Figur 17 visas resultaten från långtidsmätningarna med lastcell respektive töjningsgivare mellan 14/10 2014 och 17/11 2015. I Figur 16 redovisas även resultaten från temperaturgivaren i lastcellen. Temperaturen i utrymmet var relativt konstant under större delen av mätperioden med ett medelvärde på 29,6°C och varierade mellan 24,2°C och 32,6°C. Mellan cirka 260 till 290 dagar efter uppspänningen ses en temporär minskning i temperaturen i Figur 16. Vid denna tidpunkt stängdes reaktorn av för den årliga revisionen, vilket medför en minskning av temperaturen i hela inneslutningen och reaktorbyggnaden. Vidare ses även temperaturens inverkan på lastcellen tydligt under denna period. Vid minskningen i temperatur minskar även kraften i lastcellen och vid den efterföljande ökningen av temperatur ökar även kraften i lastcellen. Enligt specifikationen till lastcellerna är temperaturkänsligheten maximalt 3 kN/K.

Resultatet från lastcellen visar att spännkraftsförlusten under de första 398 dygna efter uppspänningen var 52 kN, vilket motsvarar en förlust på 2,2 %. Då skillnaden i temperatur mellan början och slutet av mätningarna är cirka 0,5°C krävs inte någon korrektion för temperaturpåverkan på lastcellerna vid utvärdering av totala långtidsförlusten.



Figur 16. Resultat från långtidsmätning med lastcell på vertikalkabeln.

Resultatet från töjningsgivaren visar på en betydligt större kraftförlust jämfört med lastcellerna, 100 kN motsvarande 4,7 %, se Figur 17. Dock utvecklas förlusterna på ett liknande sätt, d.v.s. initialt samma form på kurvorna i figurerna där större delen av förlusterna sker under de första 20 - 30 dygna efter uppspanningen. Den raka delen av kurvan mellan 117 till 349 dygn efter uppspanningen beror på avsaknad av mätdata p.g.a. problem med batterierna i dataloggern.



Figur 17. Resultat från långtidsmätning med töjningsgivare på vertikalkabeln.

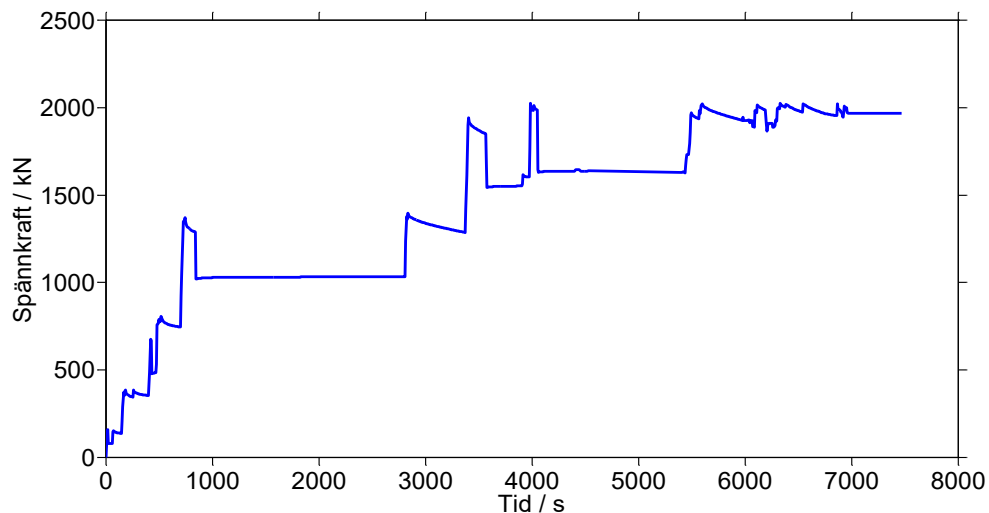
3.2 HORIZONTALKABELN

3.2.1 Mätningar under uppspanningen

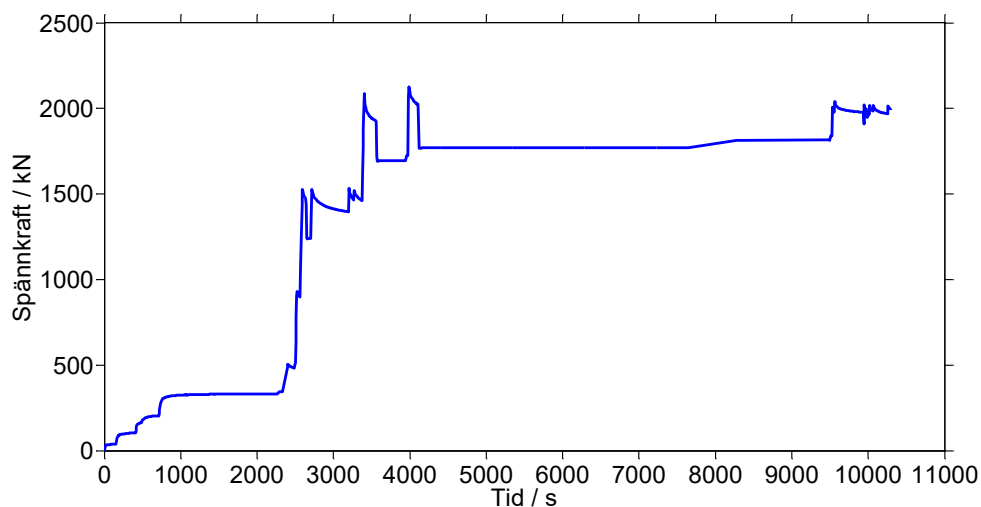
Spännkabeln spändes upp från båda ändar samtidigt, enligt domkraft till 2078 kN vid förankring 1 och 2086 kN vid förankring 2 och enligt lastcell till 1968 kN respektive 1992 kN. Medelvärdet på den omgivande temperaturen under uppspanningen var enligt temperaturgivarna i lastcellerna vid 1 28,5 °C samt 28,5 °C vid 2.

Mätning med lastceller

Resultaten från mätningarna med lastcellerna redovisas i Figur 18 och Figur 19. Den första toppen vid cirka 900 s i Figur 18 är p.g.a. friktionstestet då kabeln endast spändes från denna ände (förankring 1). Den första ökningen fram till cirka 900 s vid 2 i Figur 19 är orsakad av uppspänningen i 1. Skillnaden mellan de båda ändarna är förlusterna p.g.a. friktion längs kabeln. Vid de tillfällen då spännkraften hålls konstant sker en kontinuerlig minskning av kraften, t.ex. vid cirka 2850 s i Figur 18. Detta beror på att kompressorn till domkraften inte jobbar aktivt för att hålla kraften konstant och då sker en glidning i själva domkraften. Den andra ökningen av spännkraften upp till cirka 1500 kN vid förankring 2 är en höjning för att erhålla samma kraftnivå i båda ändar. Själva uppspänningen återupptas sedan vid cirka 3400 s i båda ändar. Totalt utfördes 3 lift-off tester i varje ände, under de 2 första placerades shims mellan lastcell och ankarstycke för att erhålla avsedd spännkraft, det sista lift-off testet var en kontroll av den inlåsta kraften.



Figur 18. Resultat från mätningar med lastcell vid förankring 1 under uppspänning av horisontalkabeln.



Figur 19. Resultat från mätningar med lastcell vid förankring 2 under uppspänning av horisontalkabeln.

Resultaten från mätningarna med lastcellerna under uppspänningen är följande:

- Låsförlusterna var i båda ändar 396 kN motsvarande 20,4 % vid förankring 1 samt 19,0 % vid förankring 2. Före låsning var krafterna vid förankring 1 och 2 1944 kN respektive 2086 kN. Efter låsning var krafterna 1548 kN respektive 1690 kN.
- Effekten av överkompensationerna var vid förankring 1 en kvarstående ökning av spännkraften med 88 kN motsvarande 5,7 % samt 80 kN motsvarande 4,7 % vid förankring 2. Under överkompensationen höjdes spännkraften vid förankring 1 med 477 kN upptill 2025 kN motsvarande 30,5 %, när domkraften släppte sjönk kraften ner till 1636 kN. Vid förankring 2 höjdes spännkraften med 436 kN motsvarande 25,8 %, vilken sedan sjönk till 1770 kN.
- Skillnaden mellan domkraft och lastcell vid första lift-off testet var vid förankring 1 12 kN, enligt domkraft 2014 kN och enligt lastcell 2002 kN. Vid förankring 2 var skillnaden 40 kN, 2001 kN enligt domkraft samt 2041 kN enligt lastcellen.
- P.g.a. ett fel vid avläsningen i uppspänningsdiagrammet kunde kraften i domkraften inte bestämmas vid det andra lift-off testet vid förankring 1. Vid förankring 2 var skillnaden mellan domkraft och lastcell 2 kN, 2023 kN enligt domkraft samt 2021 kN enligt lastcellen.
- Vid det slutliga lift-off testet var skillnaden mellan domkraft och lastcell vid förankring 1 110 kN, enligt domkraft 2078 kN och enligt lastcell 1968 kN. Vid förankring 2 var skillnaden 94 kN, enligt domkraft 2086 kN och enligt lastcell 1992 kN.

Friktionsmätning

I Figur 20 visas krafterna i båda ändar under friktionsmätningen och i Figur 21 är de uppmätta krafterna i passiv och aktiv ände plottade mot varandra. Fem krafthöjningar utfördes i aktiva änden (förankring 1) med efterföljande ökning i passiva änden, vid 20 s, 150 s, 400 s, 470 s samt 700 s. Vid dessa krafthöjningar varierar kraften i passiva änden mellan 20 % till 25 % av kraften i aktiva änden. De oavsiktliga sänkningarna av kraften (p.g.a. regleringen av kompressorn till domkraften) ger ingen påverkan i passiva änden. Detta skedde vid cirka 20 s, 420 s samt vid 850 s och beror på att sänkningarna inte är stora nog att övervinna friktionen längs kabeln. Vidare visar resultaten att kraften i den passiva änden ökar långsamt även efter det att kraften i den aktiva änden sjunker, detta syns främst i Figur 21. Detta beror antagligen på glidning längs kabeln som orsakar den försenade ökningen i passiva änden.

Kraftvariationen längs en spännkabel påverkad av friktion beskrivs av två parametrar. Den ena är friktionskoefficienten, μ , som beskriver friktionen mellan kabel och foderrör. Den andra är vobblingkoefficienten, k , som tar hänsyn till oavsiktliga vinkeländringar längs foderröret. En helt rak kabel kommer alltså teoretiskt även påverkas av friktion via vobblingkoefficienten. Enligt Eurocode 2 (EC2) [2] beräknas friktionsförluster enligt följande ekvation:

$$\Delta P_{\mu}(x) = P_{\max} (1 - e^{-\mu(\phi+kx)})$$

Formel 1

Där:

$P_{\max}$ = kraften vid den aktiva änden, N

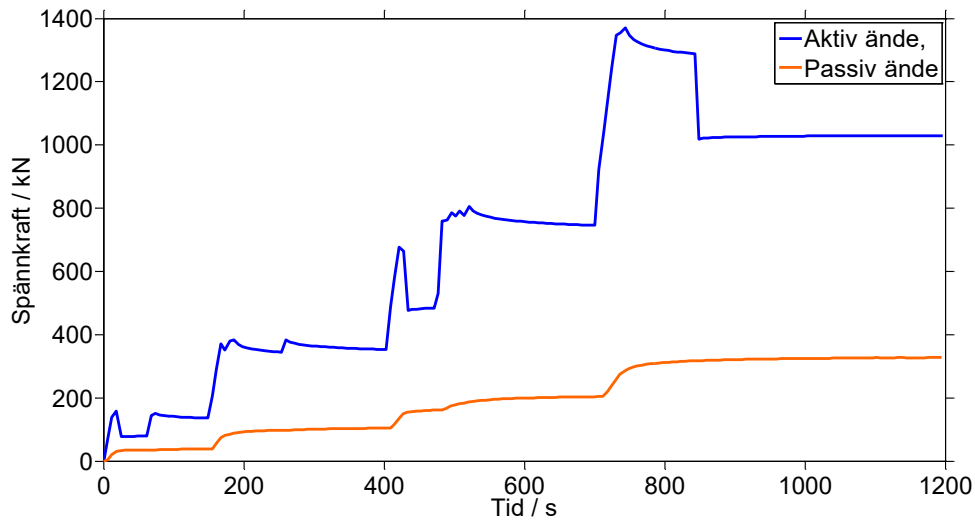
Φ = summan av vinkeländringar över sträckan x , -

μ = friktionskoefficient mellan spännkabel och foderrör, -

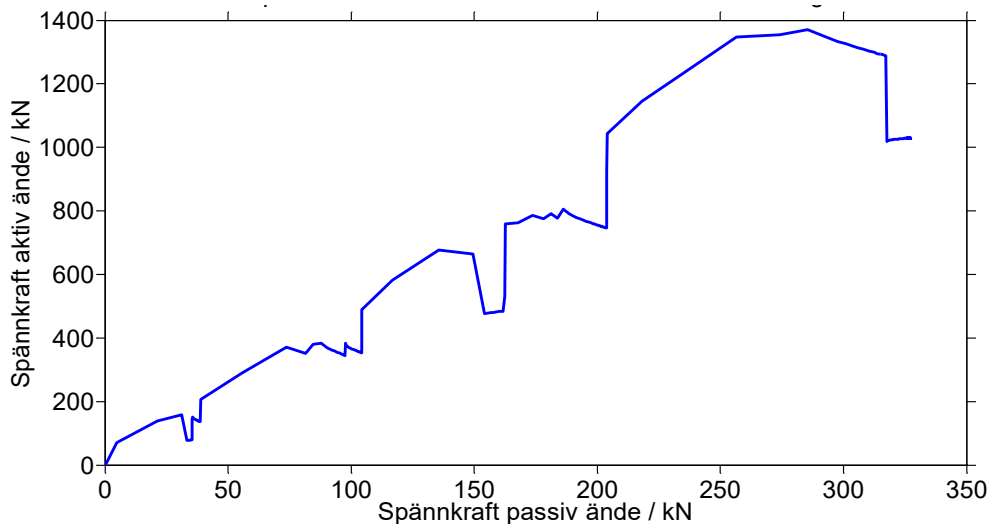
k = oavsiktliga vinkeländringar per meter kabel, %

x = avstånd från aktiva änden, m

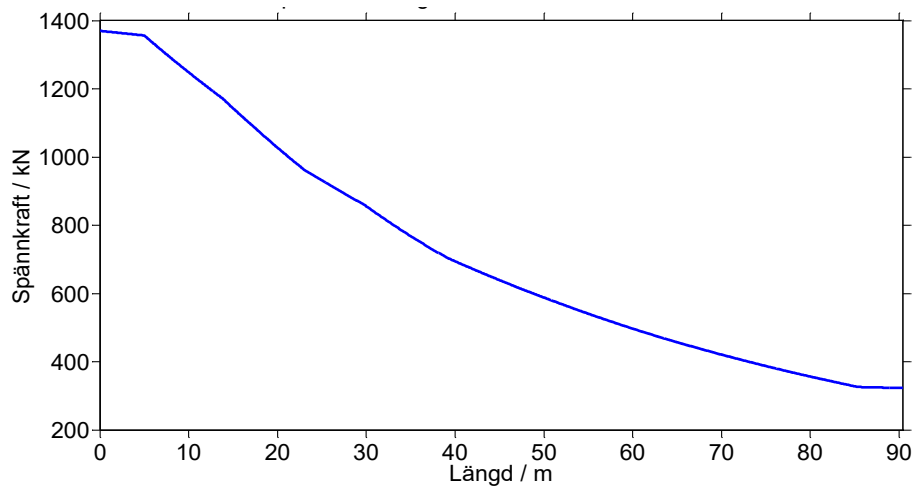
För spännkablar i Forsmark 1 utfördes friktionsmätningar i samband med uppspänningen, resultaten från dessa visade på en friktionskoefficient på 0,15 samt ett värde på k till 0,15 %. Utifrån antagandet att $k = 0,15$ % ger resultaten från de olika krafthöjningarna i Figur 20 ett medelvärde på friktionskoefficienten på 0,35. I Figur 22 visas den beräknade kraftfördelningen längs kabeln då kraften i aktiva änden är 1370 kN, en friktionskoefficient på 0,35 ger en kraft på 323 kN i passiva änden, enligt lastcell var kraften 325 kN.



Figur 20. Resultat från mätningar med lastcell under friktionsmätningen i början av uppspänningen.



Figur 21. Resultat från mätningar med lastcell i både passiv och aktiv ände under friktionsmätningen.

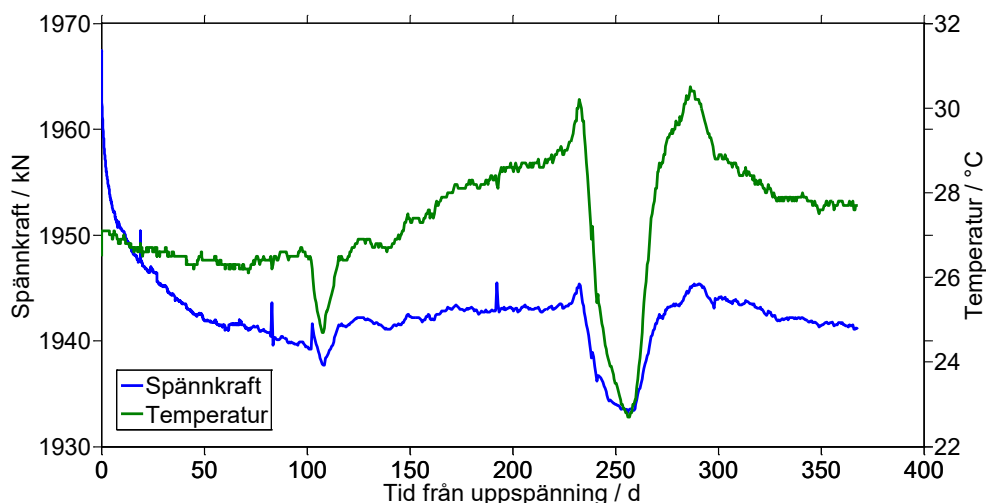


Figur 22. Beräknad variation i spännkraft längs horisontalkabeln baserad på uppmätt maxkraft i aktiva änden under friktionstestet.

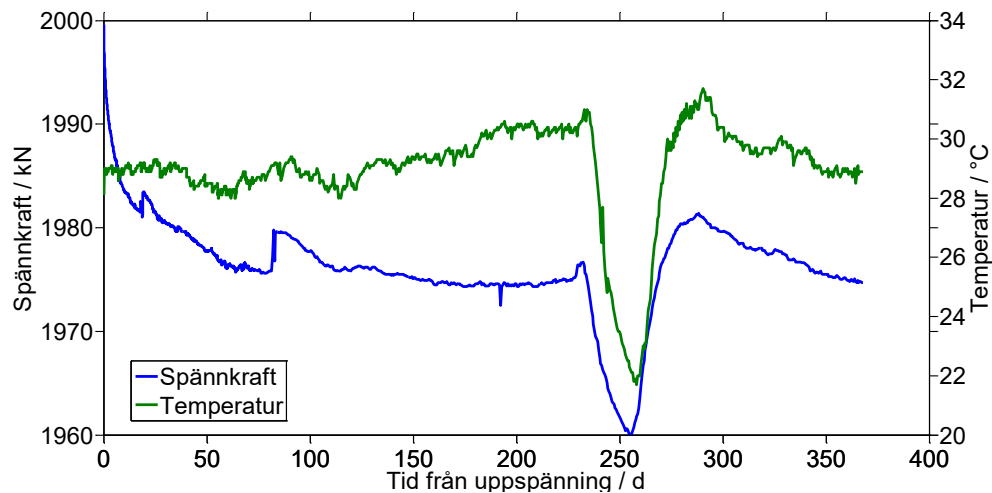
3.2.2 Långtidsmätning

I Figur 23 och 24 visas resultaten från långtidsmätningarna med lastcellerna. I samma figur redovisas även resultaten från temperaturgivarna i lastcellerna. Temperaturen i utrymmena var under större delen av mätperioden relativt konstanta med ett medelvärde på 26,9°C vid 1 och 28,8°C vid 2 och varierade mellan 22,7°C och 30,5°C respektive 21,7°C och 31,7°C. De stora variationerna i temperatur uppträdde under revisionen. Från figurerna kan även inverkan av den omgivande temperaturen på lastcellerna tydligt ses då en sänkning av temperaturen ger en sänkning av krafterna i lastcellen. Detta är speciellt tydligt under sänkningen av temperaturen i samband med revisionen. Även ökningen i temperatur som sker före revisionen påverkar krafterna som registreras av lastcellerna.

Resultaten från lastcellerna visar att spännkraftsförlusterna under de första 368 dygna efter uppspänningen var 26 kN vid förankring 1 samt 25 kN vid förankring 2, vilket motsvarar en förlust på 1,3 % respektive 1,2 %. Då skillnaderna i temperatur mellan början och slutet av mätningarna är cirka 1°C krävs inte någon korrektion för temperaturpåverkan på lastcellerna vid utvärdering av totala långtidsförlusterna.



Figur 23. Resultat från långtidsmätning med lastcellen vid förankring 1.



Figur 24. Resultat från långtidsmätning med lastcellen vid förankring 2.

3.3 BASSÄNGKABELN

3.3.1 Mätning under uppspänning

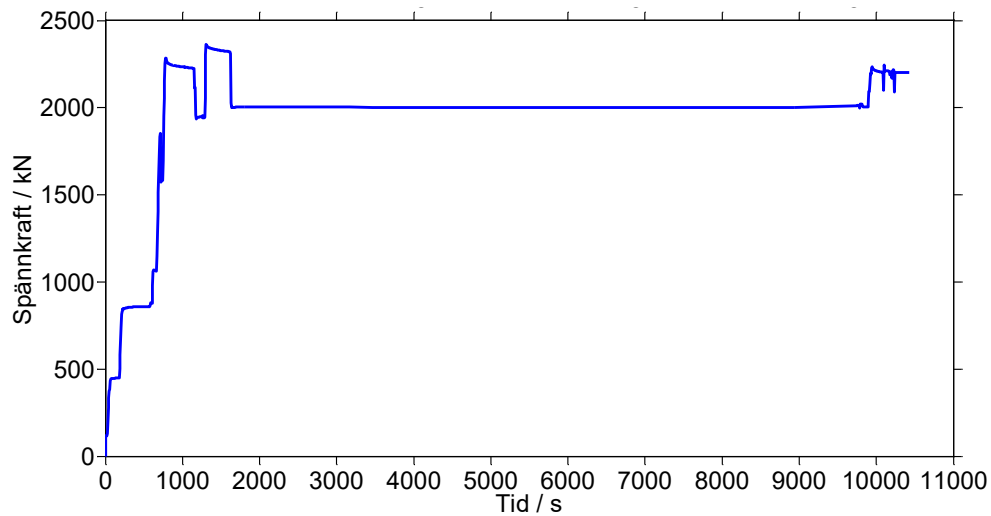
Uppspänningen utfördes den 24 november 2014. Spännkabeln spändes upp från båda ändar, enligt domkraft till 2327 kN vid förankring 1 och enligt lastcell till 2202 kN. Vid förankring 2 spändes kabeln upp till 2347 kN enligt domkraft och enligt lastcell till 2316 kN. Under uppspänningen skadades antagligen de 4 töjningsgivarna som installerades längst från förankringen vid förankring 2 (nr. 1-4 i Figur 12) eftersom de inte gav några rimliga resultat. Den som fungerade (nr. 5 i Figur 12) gav resultat som visserligen följer lastcellen som installerades i samma ände av kabeln, men ger inte överensstämmande resultat.

Medelvärde på den omgivande temperaturen under uppspänningen var enligt temperaturgivarna i lastcellerna vid förankring 1 20,8 °C samt 22,3 °C vid förankring 2.

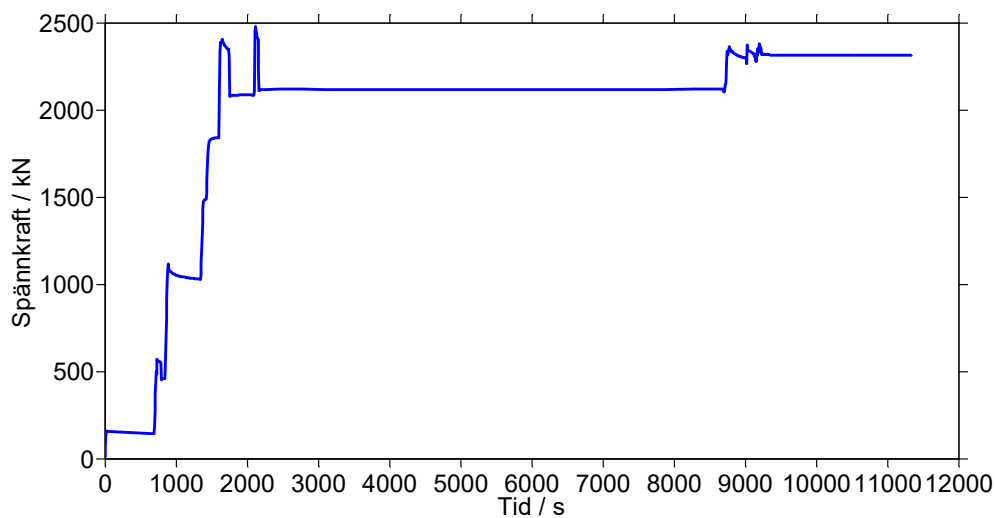
Mätning med lastceller

Resultaten från mätningarna med lastcellerna redovisas i Figur 25 och 26. Platån vid cirka 200 s i Figur 25 är p.g.a. friktionstestet då kabeln endast spändes från denna ände, förankring 1. Den motsvarande platån i Figur 26 vid cirka 200 s beror då på dragningen med domkraft vid förankring 1. Skillnaden mellan de båda ändarna är förlusterna p.g.a. friktion längs kabeln. Anledningen till att kraften börjar vid 118 kN vid förankring 1 är att en första uppspänning utfördes i denna ände för att erhålla kontakt mellan ankarstycke och ankarplatta. Under denna uppspänning utfördes tyvärr ingen mätning med lastcellen. Detta medför tyvärr att dessa resultat inte är helt tillförlitliga då startvärdet för lastcellerna sällan utgår från exakt 0 kN, oftast överstiger startvärdet 0 kN. Vilket betyder att den verkliga kraften i denna ände antagligen är lägre än 118 kN.

Totalt utfördes 2 lift-off tester i varje ände, under den första placerades shims mellan lastcell och ankarstycke för att erhålla avsedd spännkraft, det andra lift-off testet var en kontroll av den inlåsta kraften. Under första lift-off testet placerades 3 mm tjocka shims mellan ankarstycke och lastcell i varje ände.



Figur 25. Resultat från mätningar med lastcell vid förankring 1 under uppspänning av bassängkabeln.



Figur 26. Resultat från mätningar med lastcell vid förankring 2 under uppspänning av bassängkabeln.

Resultaten från mätningarna under uppspänningen är följande:

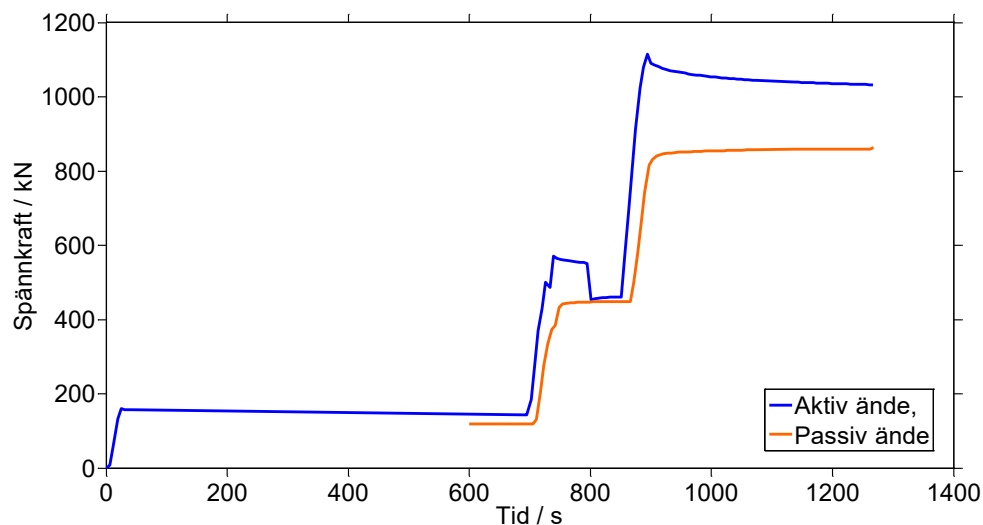
1. Låsförlusterna var vid förankring 1 351 kN motsvarande 15,3 % samt 330 kN motsvarande 13,7 % vid 2. Före låsning var krafterna vid förankring 1 och 2 2286 kN respektive 2408 kN. Efter låsning var krafterna 1935 kN respektive 2078 kN.
2. Effekten av överkompensationerna var vid förankring 1 en kvarstående ökning av spännkraften med 67 kN motsvarande 3,5 % samt 32 kN motsvarande 1,5 % vid förankring 2. Under överkompensationen höjdes spännkraften vid förankring 1 med 429 kN upptill 2364 kN motsvarande 18,1 %, när domkraften släppte sjönk kraften ner till 2002 kN. Vid förankring 2 höjdes spännkraften med 402 kN motsvarande 19,3 % till 2480 kN, vilken sedan sjönk till 2110 kN.
3. Skillnaden mellan domkraft och lastcell vid första lift-off testet var vid förankring 1 265 kN, enligt domkraft 2265 kN och enligt lastcell 2000 kN. Vid förankring 2 var skillnaden 128 kN, 2249 kN enligt domkraft samt 2121 kN enligt lastcellen.

4. Vid det slutliga lift-off testet var skillnaden mellan domkraft och lastcell vid förankring 1 125 kN, enligt domkraft 2327 kN och enligt lastcell 2202 kN. Vid förankring 2 var skillnaden 32 kN, enligt domkraft 2347 kN och enligt lastcell 2315 kN.

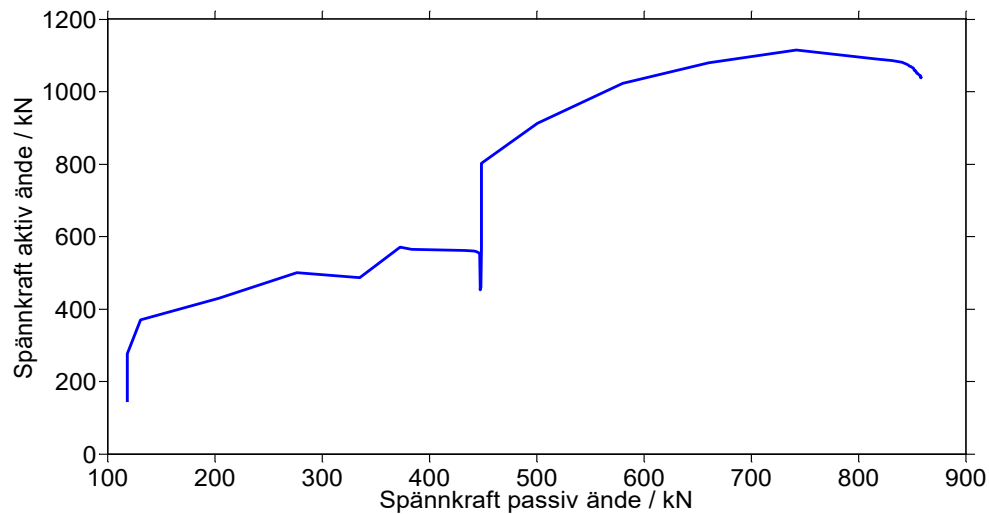
Friktionsmätning

I Figur 27 visas krafterna i båda ändar under själva friktionsmätningen och i Figur 28 är krafterna i båda ändar plottade mot varandra. Två krafthöjningar utfördes i aktiva änden (förankring 1) som ger en ökning i passiva änden (förankring 2), vid 750 s samt 890 s. Vid dessa krafthöjningar uppgår kraften i passiva änden till 76 % av kraften i aktiva änden. Vidare ger den efterföljande sänkningen av kraften vid 800 s ingen påverkan i passiva änden vilket beror på att sänkningarna inte är stora nog att övervinna friktionen längs kabeln. Utifrån ett antagande att värdet på k är 0,15 % ger dessa resultat en friktionskoefficient på 0,12 enligt Formel 1. I Figur 29 visas den beräknade variationen i spännkraft längs med horisontalkabeln baserad på en friktionskoefficient på 0,12. Beräkningen är utförd med en spännkraft på 1115 kN i aktiva änden, d.v.s. maxkraften under friktionstestet. Kraften i den passiva änden blir då 855 kN, enligt mätning med lastcell var den 849 kN.

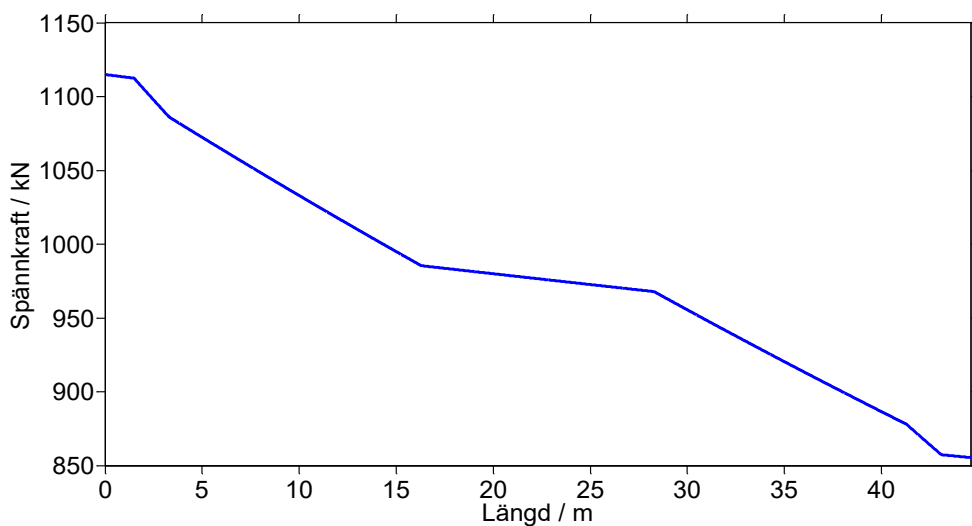
Som framgår av Figur 28 sker det även för denna kabel en viss glidning som orsakar en långsam ökning av kraften i passiva änden samtidigt som kraften i aktiva änden är konstant eller sjunker motsvarande det som sker för horisontalkabeln.



Figur 27. Krafterna i båda ändar under friktionsmätningen i början av uppspänningen.



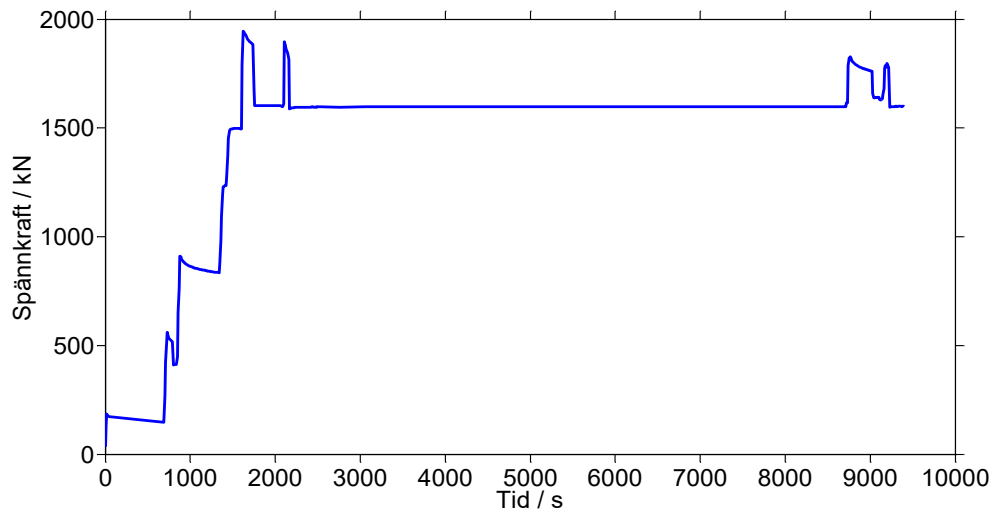
Figur 28. Resultat från mätningar med lastcell i både passiv och aktiv ände under friktionsmätningen.



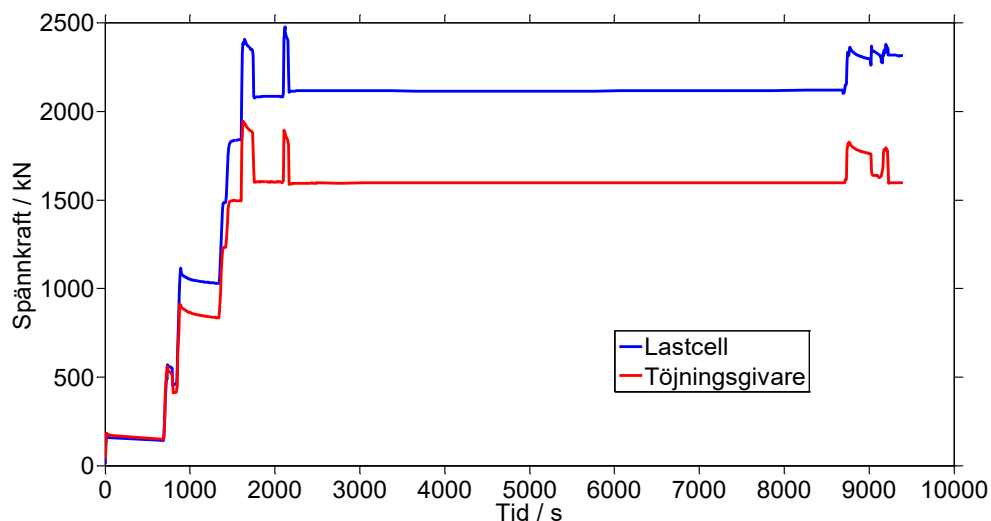
Figur 29. Beräknad variation i spännkraft längs bassängkabeln vid maxkraft i aktiva änden under friktionstestet.

Mätning med töjningsgivare

Resultatet från mätningarna med töjningsgivaren redovisas i Figur 30, precis som för vertikalkabeln har töjningen räknats om till en spännkraft. I Figur 31 är både resultaten från mätningarna med lastcellen och töjningsgivaren plottade. Som framgår av resultaten stämmer resultaten väldigt väl överens under de första 900 s av uppspänningen, därefter ligger kraften enligt töjningsgivaren konstant lägre än lastcellen. Före låsning visar töjningsgivaren mellan 200 kN - 300 kN lägre kraft, efter låsning är skillnaden cirka 500 kN.



Figur 30. Resultaten från mätningar med töjningsgivare vid förankring 2 under uppspänning av bassängkabeln.



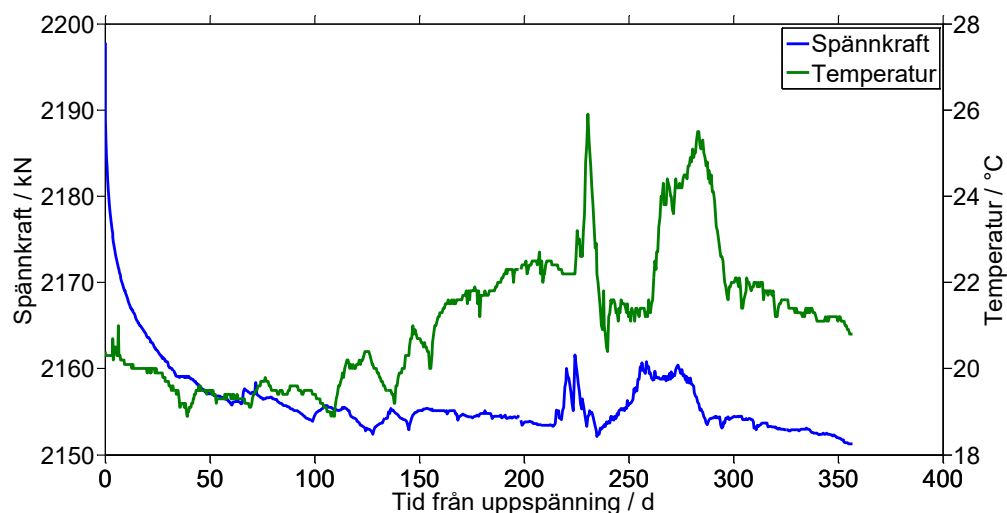
Figur 31. Resultaten från mätningar med lastcell och töjningsgivare vid förankring 2 under uppspänning av bassängkabeln.

3.3.2 Långtidsmätningar

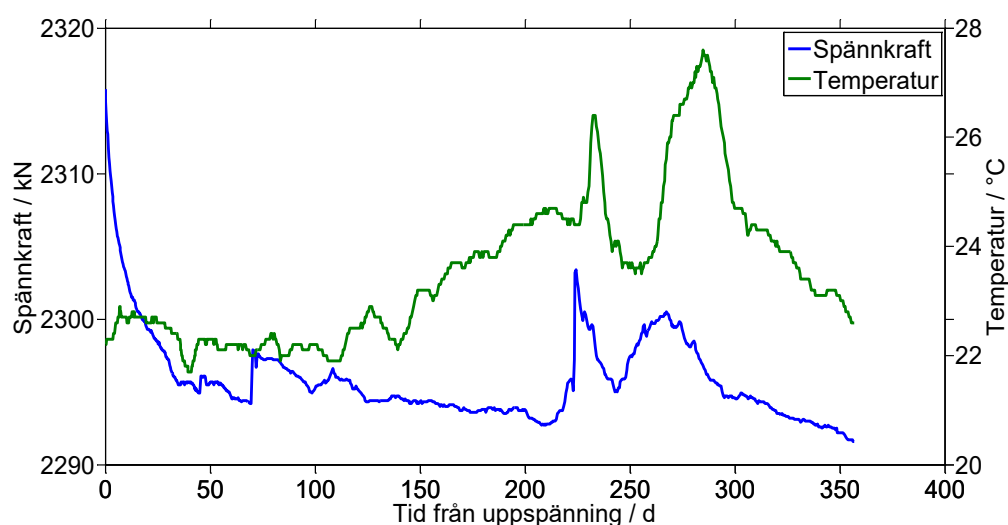
I Figur 32 samt 33 visas resultaten från långtidsmätningarna med lastcellerna mellan 24/11 2014 och 17/11 2015. I samma figurer redovisas även resultaten från temperaturgivare i lastcellen. Temperaturerna i utrymmena var relativt konstanta under större delen av mätperioden med ett medelvärde på 20,9°C vid förankring 1 och 23,4°C vid förankring 2 och varierade mellan 18,9°C och 25,9°C respektive 21,7°C och 27,6°C. De stora variationerna i temperaturen var i samband med revisionen.

Resultatet från lastcellerna visar att spännkraftsförlusten under de första 357 dyggen var 47 kN vid förankring 1 samt 24 kN vid förankring 2, vilket motsvarar en förlust på 2,1 % respektive 1,0 %. Då skillnaderna i temperatur mellan början och slutet av mätningarna är mindre än 0,5°C krävs inte någon korrektion för temperaturpåverkan på lastcellerna vid utvärdering av de totala långtidsförlusterna.

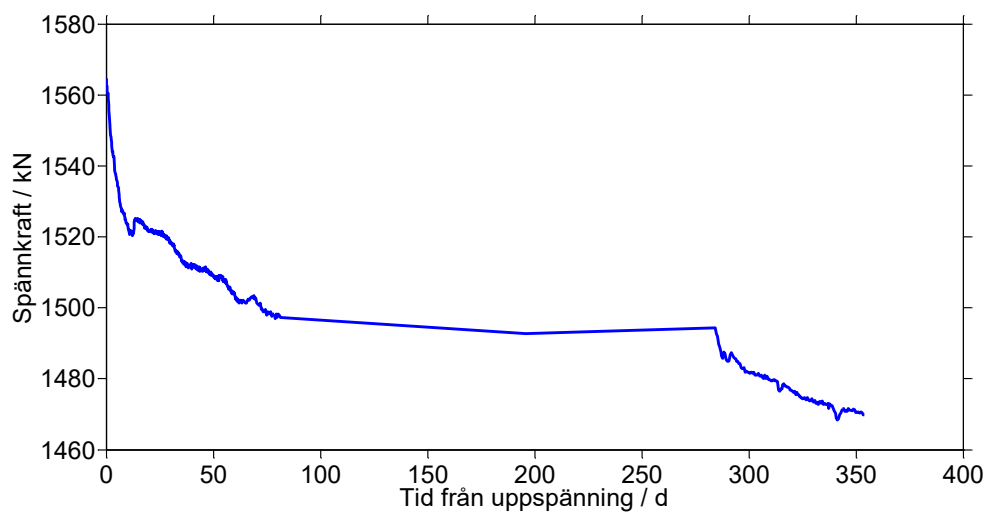
I Figur 34 visas resultaten från långtidsmätningarna med töjningsgivaren, spännkraftsförlusten är här 95 kN, d.v.s. en förlust på 6,1 %.



Figur 32. Resultat från långtidsmätningar med lastcell vid förankring 1.



Figur 33. Resultat från långtidsmätningar med lastcell vid förankring 2.



Figur 34. Resultat från långtidsmätningar med töjningsgivare vid förankring 2.

4 Sammanfattning och diskussion av mätresultat

4.1 LÅSFÖRLUSTER

I Tabell 2 nedan sammanställs förlusterna i samband med killåsningen för kablarna. Som framgår av resultaten är låsförlusterna större för horisontalkablarna och bassängkablarna vilket beror på att man vid uppspänningen av dessa medvetet spänner till en högre nivå för att kompensera friktionsförlusterna. Låsförlusterna är generellt relativt stora (speciellt för horisontal- och bassängkabeln) jämfört med värden på låsglidning enligt det Europeiska tekniska godkännandet (ETA) som där anges till 6 mm [2]. Detta skulle motsvara en låsförlust på runt 2 %. Dock är det en normal procedur att medvetet spänna till högre nivåer och därefter sänka kraften mer än själva låsförlusten, speciellt för kablar påverkade av friktion.

Tabell 2. Låsförluster i spännkablarna.

Kabel	Låsförlust / kN	Låsförlust / %
Vertikalkabeln	165	7,1
Horisontalkabeln, förankring 1	396	20,4
Horisontalkabeln, förankring 2	396	19,0
Bassängkabeln, förankring 1	351	15,3
Bassängkabeln, förankring 2	330	13,7

4.2 ÖVERKOMPENSATION

I Tabell 3 sammanställs effekten av överkompensationerna. Både ökningen av spännkraften under själva överkompensationen samt den kvarstående ökningen av spännkraften efter domkraften släppts redovisas. Som framgår av resultaten krävs det en större ökning av spännkraften för de kablar som är påverkade av friktion jämfört med vertikalkabeln. Störst effekt har överkompensationen på vertikalkabeln där en ökning av 11 % ger en kvarstående ökning av kraften på 2,5 %. Detta beror på inverkan av friktionen, en krafthöjning i änden på horisontalkablarna kommer endast påverka kraften i en del av kabeln. För vertikalkabeln kommer en krafthöjning i princip påverka kraften i hela kabeln. Överkompensation är en vanlig åtgärd för att kompensera låsförlusterna och som framgår av resultaten har överkompensationen den önskade effekten då krafthöjningen lite drygt motsvarar den nominella låsförlusten enligt ETA [3].

Tabell 3. Effekten av överkompensationerna.

Kabel	Ökning / kN	Ökning / %	Kvarstående ökning / kN	Kvarstående ökning / %
Vertikalkabeln	232	10,8	54	2,5
Horisontalkabeln, förankring 1	477	30,5	88	5,7
Horisontalkabeln, förankring 2	436	25,8	80	4,7
Bassängkabeln, förankring 1	429	18,1	67	3,5
Bassängkabeln, förankring 2	402	19,3	32	1,5

4.3 JÄMFÖRELSE MELLAN DOMKRAFT OCH LASTCELL

I Tabell 4 jämförs skillnaderna i spännkraft från lift-off testerna med domkraft med resultaten från lastcellerna (kraften enligt domkraft minus kraften enligt lastcellen). Det var endast för horisontalkabeln som 3 lift-off tester genomfördes. Det resultat som är mest tillförlitligt är det från det slutliga lift-off testet eftersom domkraften under de två första testerna verkar direkt mot lastcellen under avläsning. Under de första lift-off testerna varierade kraften i lastcellerna en del, vilket kan ses i samtliga figurer som den sista störningen innan kraften är konstant. Direkt efter det slutliga lift-off testerna släpptes domkraften och resultatet från lastcellen har tagits efter domkraften avlägsnats, då det är den inlåsta kraften som är av intresse. Som framgår av resultaten är det relativt stor variation i skillnaderna både mellan olika kablar men även mellan de olika lift-off testerna på samma kabel. För vertikalkabeln är kraften från lastcellen högre än den enligt lift-off test, för de övriga kablarna överstiger kraften enligt lift-off testet kraften i lastcellen. Då kraften i lastcellen får anses motsvara den verkliga spännkraften i kablarna indikerar dessa resultat att lift-off testerna överskattar den verkliga kraften i spännkablarna påverkade av friktion. Denna överskattning är dock relativt liten, som mest runt 5,5 % för horisontal- och bassängkabeln. Viktigt att påpeka är att friktionsförlusterna i själva domkraften även påverkar resultatet, dessa uppgår dock enligt utföraren till 1 %, d.v.s. inte tillräckligt för att förklara skillnaden mellan lastcell och domkraft.

För att kunna dra några säkra slutsatser om noggrannheten i mätning med domkraft bör metodiken undersökas under mer kontrollerade former. Detta skulle t.ex. kunna utföras på ett antal mindre spännarmerade provkroppar i labbmiljö där flertalet lift-off tester kan utföras samtidigt som kraften mäts med lastceller. Ett annat alternativ är att i samband med nästa inspektion mäta krafterna i de instrumenterade kablarna på nytt. Exempelvis kan det då utföras flera lift-off tester på samma kabel för att undersöka om resultatet skiljer sig mellan olika lift-off tester på samma kabel.

Tabell 4. Skillnaderna mellan lift-off test och lastcell.

Kabel	Skillnad lift-off 1 / kN	Skillnad lift-off 2 / kN	Skillnad slutlig lift-off / kN
Vertikalkabeln	-43	-	-17
Horisontalkabeln, förankring 1	12	-	110
Horisontalkabeln, förankring 2	40	2	94
Bassängkabeln, förankring 1	265	-	125
Bassängkabeln, förankring 2	128	-	32

4.4 FRIKTIONSEGENSKAPER

I Tabell 5 redovisas uppskattade friktionskoefficienter för foderrören, μ , beräknade från mätresultaten från lastcellerna. En del av den stora skillnaden på μ mellan kablarna kan förklaras genom osäkerheterna i mätningen i den passiva änden på bassängkabeln. Förutom en viss skillnad i friktionsegenskaper mellan foderrören är det även möjligt att det kan vara relativt stora variationer i de oavsiktliga vinkeländringarna, d.v.s. värdet på k då horisontalkabeln sträcker sig mer än ett helt varv runt inneslutningen samt att dess kurvatur även varierar i höjddled, se Figur 4. Enligt EC 2 är normala värden på k mellan 0,05 % och 1 % [3]. En ökning av värdet på k till 0,3 % för horisontalkabeln ger t.ex. en minskning av μ till 0,3. Ekvation 1 är dessutom teoretisk och förutsätter perfekta förhållanden, den tar t.ex. inte hänsyn till friktion mellan linorna som i praktiken påverkar förlusterna. För horisontalkabeln kommer dessutom linorna att vara tvinnade runt varandra längs kabelns längd eftersom det är omöjligt att få de att ligga i perfekt linjeföring längs med varandra. Detta är ytterligare en effekt som kan öka friktionen längs kabeln. Denna hoptvinning av linorna kommer inte ske i samma utsträckning i bassängkabeln då den dels är hälften så lång och dels har en betydligt mindre total krökning.

Från de tidigare mätningarna i Forsmark 1 uppgick kraften i den passiva änden till 33 % av den i aktiva änden. Avvikelse i uppmätta friktionskoefficienter kan till största del förklaras av att både kablar och foderrör var infettade vid ursprungliga uppspänningen vilket minskar friktionen betydligt. Värdena i Tabell 5 är således inte applicerbara på befintliga spännkablar i inneslutningen. Värdena kan istället tas hänsyn till vid uppspänning av nya kablar och på så vis bidra till att avsedd spännkraft erhålls.

Tabell 5. Uppskattade friktionskoefficienter.

Kabel	μ
Horisontalkabeln	0,35
Bassängkabeln	0,12

4.5 LÅNGTIDSMÄTNINGAR

I Tabell 6 redovisas spännkraftsförlusterna uppmätta med lastcellerna från uppspänningen av kablarna fram till den 17/11 2015. Gemensamt för samtliga kablar är att större delen av förlusterna utvecklas under de första 20 - 30 dygnen efter uppspänningen, därefter utvecklas förlusterna betydligt långsammare. Under de sista cirka 300 dygnen efter uppspänningen utvecklas förlusterna så pass långsamt att variationen i omgivande temperatur påverkar lastcellerna mer än förlusten av spännkraft. Detta visar att temperaturen är en viktig parameter att mäta samtidigt som spännkraften då en ändring av omgivande temperatur annars skulle kunna misstolkas som en ökning/minskning av spännkraft.

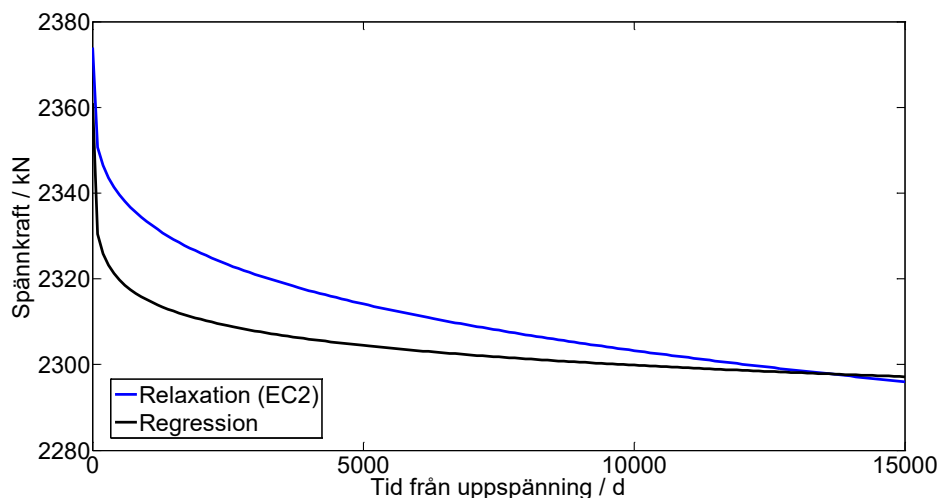
De uppmätta förlusterna ska endast bero på relaxation då bidragen från betongens krypning och krympning är försumbara. Enligt uppskattning från beräkningar i [4] kan förlusterna under detta år p.g.a. krypning och krympning uppskattas till en kraftförlust på cirka 1 kN. Som en jämförelse har relaxationen enligt EC2 [3] beräknats för samma tidsperiod med antagande om lågrelaxerande spännstål d.v.s. att ρ_{1000} är 2,5 %. Av resultaten i Tabell 6 är det endast för bassängkabeln vid förankring 2 som stämmer överens med beräkningarna enligt EC2. För övriga kablar/förankringar underskattar beräkningarna de uppmätta förlusterna i vissa fall med mer än 100 %. En möjlig

förklaring är att det skett någon form av glidning i linorna den första tiden efter uppspänningen, något som friktionsmätningarna indikerar kan ske. En annan faktor som påverkar resultaten är att temperaturen är högre än 20°C, vilket är den temperatur vid vilken $\rho 1000$ bestäms. En ökad temperatur medför en ökad relaxation. I samband med byggandet av Forsmark 1 utfördes relaxationsförsök vid olika temperaturer på linor av samma typ som de som installeras i inneslutningen. Resultaten visade att för kablar som utsattes för en temperatur på 50 °C uppgick $\rho 1000$ till 3,2 % [4], jämfört med 2,5 % vid 20°C.

I Figur 35 visas resultaten från beräknade relaxationsförluster för vertikalkabeln över en tidsperiod på 15 000 dygn, tillsammans med en prognos över framtida förluster utifrån en regressionsanalys av uppmätta spännkrafter. R²-värdet för regressionsanalysen uppgick till 0,93, vilket tyder på god överensstämmelse med mätvärdena. Utifrån antagandet att förlusterna uppskattade med regressionsanalys motsvarar de verkliga förlusterna indikerar detta att de beräknade förlusterna p.g.a. relaxation eventuellt kommer närma sig de verkliga förlusterna efter lång tid. Dock ska det påpekas att förlusterna p.g.a. krypning och krympning under denna tidsperiod uppgår till cirka 20 kN enligt uppskattning från beräkningar i [4]. Detta visar på den osäkerhet som finns i befintliga modeller för att uppskatta spännkraftsförluster under lång tid och resultaten stämmer överens med tidigare studier som visar att modellerna överskattar de verkliga förlusterna i konstruktionen [4]. För att kunna dra mer säkra slutsatser om förlusternas utveckling och storlek krävs således mätdata från en betydligt längre mätperiod.

Tabell 6. Spännkraftsförluster under första tiden efter uppspänningen.

Kabel	Tid / d	Förlust / kN	Förlust / %	Relaxation EC2 / %
Vertikalkabeln	398	52	2,2	1,4
Horisontalkabeln, förankring 1	368	26	1,3	0,6
Horisontalkabeln, förankring 2	368	25	1,2	0,6
Bassängkabeln, förankring 1	357	47	2,1	0,9
Bassängkabeln, förankring 2	357	24	1,0	1,2



Figur 35. Spännkraftsförluster prognostiserade för den vertikala spännkabeln över en tid på 15 000 dygn.

4.6 TÖJNINGSGIVARNA

4.6.1 Mätning under uppspänning

Då endast två töjningsgivare överlevde uppspänningen samt att resultaten från dessa skiljer sig från resultaten från lastcellerna är det svårt att dra några slutsatser från dessa mätningar. En möjlig förklaring till att de 4 töjningsgivarna på bassängkabeln samt den på horisontalkabeln ger konstiga resultat kan vara krökningen på kablarna. Den givare som överlevde på bassängkabeln sitter i den första helt raka delen av foderröret, de övriga sitter i delen som är krökt. Krökningen kan leda till att förlängningen av trådarna mellan de båda förankringarna på töjningsgivarna varierar beroende på trådarnas position i förhållande till foderrörets inneryta.

Krafterna som registrerats av de fungerande töjningsgivarna är lägre än de från lastcellerna. Under båda uppspänningarna följer krafterna enligt töjningsgivarna de från lastcellerna upp till en viss kraftnivå, cirka 2150 kN för vertikalkabeln och cirka 950 kN för bassängkabeln. Därefter sjunker krafterna enligt töjningsgivarna men följer fortfarande kraftutvecklingen enligt lastcellerna.

För töjningsgivaren på vertikalkabeln är det först efter låsningen av kilarna som den uppmätta spännkraften avviker från lastcellen. En möjlig förklaring till skillnaden mellan de båda givarna efter låsningen kan vara att låsförlusterna skiljer sig mellan olika linor inom kabeln. I detta fall är då låsförlusten större för den instrumenterade linan jämfört med låsförlusten för hela kabeln, vilket resulterar i en variation i spännkraft mellan de olika linorna. En annan möjlig förklaring till skillnaden är att det efter låsningen sker en glidning i en eller båda av töjningsgivarens förankringar, vilket förklarar att kraften i töjningsgivaren sjunker kontinuerligt efter låsningen. Precis efter överkompensationen är kraften i töjningsgivaren cirka 6 % lägre jämfört med lastcellen och efter det slutliga lift-off testet är skillnaden cirka 12 %. Ytterligare en möjlig förklaring är att det efter låsning blir en ojämn kraftfördelning i ankarstycket, vilket kan ge upphov till en kraftexcentricitet. Då den instrumenterade linan sitter i mitten av ankarstycket kan denna excentricitet bidra till att kraften i denna lina minskar något. Den verkliga orsaken till skillnaden mellan de båda givarna är svår att fastställa då tillförlitlig mätdata endast finns från en töjningsgivare.

För töjningsgivaren på bassängkabeln avviker den uppmätta spännkraften från lastcellens redan före låsningen. En möjlig förklaring till skillnaderna är att det under uppspänningen har skett en förskjutning av en eller båda förankringar till mättrådarna, vilket hoppen i kraftdiagrammen indikerar. Ytterligare indikationer på detta är att kraften enligt töjningsgivaren på vertikalkabeln långsamt sjunker efter hoppet i spännkraft. Andra förklaringar som nämnt ovan är ojämn kraftfördelning mellan olika linor inom kabeln och kraftexcentricitet i ankarstycket. Då det endast finns en fungerande töjningsgivare är det svårt att avgöra orsaken till skillnaden mellan lastcell och töjningsgivare även för töjningsgivaren på bassängkabeln.

4.6.2 Långtidsmätningar

Långtidsmätningarna med töjningsgivarna visar för både vertikalkabeln och bassängkabeln på större förluster än lastcellerna, 4,7 % respektive 6,1 %. Utvecklingen av förlusterna är dock lika de för lastcellerna, där majoriteten av förlusterna utvecklas under första 20 – 30 dygnet för att sedan kraftigt avta. Teoretiskt ska inte töjningsgivaren ge någon förlust över tiden om förlusterna enbart beror på relaxation då den per definition inte innebär någon töjningsändring utan endast en kraftförlust.

En möjlig förklaring till förlusterna kan vara att förankringarna till töjningsgivarna kontinuerligt glider längs linan, vilket resultaten från mätningarna under uppspänningen även indikerade. En annan möjlig förklaring är att det sker någon form av glidning i kilarna till den instrumenterade linan. Då endast en töjningsgivare per kabel överlevde är det dock svårt att fastställa någon orsak till töjningsgivarens beteende.

5 Slutsatser

Slutsatser som kan dras från resultaten i denna rapport är följande:

- Mätningar med lastceller är lämpliga i reaktorinneslutningar och ger rimliga resultat både under korttids- samt långtidsmätningar.
- De korttidsförluster som uppmätts, friktions- samt låsförluster, ger värdefull information som bidrar till att säkerställa att avsedd spännkraft uppnås vid installation av nya spännkablar.
- Töjningsgivare av Tensmeg-typ är inte lämpliga att installera på spännkablar i reaktorinneslutningar. Ett eventuellt undantag är helt vertikala spännkablar, där det finns en möjlighet att de skulle kunna fungera tillfredsställande.
- Resultaten från mätningar med lastceller indikerar att mätning med domkraft överskattar kvarvarande spännkraft i horisontella spännkablar. För vertikala spännkablar indikerar resultaten på en god överensstämmelse.
- Långtidsmätningarna visade att majoriteten av spännkraftsförlusterna utvecklades under de första 20-30 dygnet efter uppspanningen. Därefter utvecklas förlusterna såpass långsamt att variationen i omgivande temperatur påverkar lastcellerna mer än förlusten av spännkraft.
- Då den omgivande temperaturen påverkar mätresultaten från lastceller och är en parameter som måste mätas och tas i beaktande för att erhålla tillförlitliga resultat.

6 Förslag till vidare utredningar

- Noggrannheten i den befintliga mätningstekniken med domkraft bör utredas ytterligare under mer kontrollerade former. Resultaten från mätningarna i denna rapport indikerar en viss överskattning av kvarvarande spännkrafter för spännkablar påverkade av friktion.
- Den interna kraftfördelningen mellan olika linor inuti en spännkabel samt kraftfördelningen mellan olika trådar inom en lina bör utredas. Detta gäller för både VSL-systemet som används i Forsmark 1 och 2 samt BBRV-systemet som används i Forsmark 3 samt Ringhals. Teoretiskt kan en ojämn kraftfördelning ge upphov till att vissa linor spänns till för höga nivåer vilket som kan leda till ökade spännkraftsförluster.
- Vid framtida spännkraftsmätningar bör en liknande instrumentering med lastceller utföras på de spännkablar som byts ut. På så vis kan ytterligare information om kort- och långtidsförluster samt noggrannheten i domkraftsmätningar erhållas.

7 Referenser

- [1] Anderson P., Structural Integrity of Prestressed Nuclear Reactor Containments, Doktorsavhandling, Avd. För Konstruktionsteknik, Lunds Tekniska Högskola, 2007.
- [2] Eurocode 2 - Dimensionering av betongkonstruktioner, del 1-1: Allmänna regler och regler för byggnader, 2008, Svensk standard SS-EN 1992-1-1:2005
- [3] European Technical Approval No. ETA-06/0006, VSL Post-Tensioning System, 2011.
- [4] Lundqvist P., Assessment of Long-Term Losses in Prestressed Concrete Structures – Application for Nuclear Reactor Containments, Doktorsavhandling, Avd. För Konstruktionsteknik, Lunds Tekniska Högskola, 2012.

INSTRUMENTERING AV SPÄNNKABLAR I FORSMARK 2

Reaktorinneslutningen är en av de viktigaste säkerhetsbarriärerna i ett kärnkraftverk. Inneslutningarna i de svenska reaktorerna består av en spännarmerad betongkonstruktion som innesluter reaktorn och vissa interndelar. I majoriteten av de svenska inneslutningarna är spännkablarna inte ingjutna och därmed tillgängliga för mätningar med domkraft. För att övervaka spännkraftsnivåerna mäts därför spännkrafterna vid särskilda inspektionstillfällen.

Tre spännkablar i Forsmark 2 har utrustats med lastceller och töjningsgivare. Mätningar utfördes under uppspänningen av kablarna samt kontinuerligt under drift. Genom mätningarna under uppspänningen kunde korttidsförluster uppskattas, d.v.s. förluster som uppkommer vid killåsning samt p.g.a. friktion mellan kabel och foderrör. Vid uppspänning av nya kablar kan denna information användas för att mer noggrant kunna uppnå avsedd spännkraft. Vidare indikerade mätningarna att mätning med domkraft överskattar spännkraften i spännkablar påverkade av friktion.

Långtidsmätningarna visade att majoriteten av spännkraftsförlusterna utvecklas under de första 20-30 dygnen efter uppspänningen för att därefter avta kraftigt. Vidare visade långtidsmätningarna med lastceller även att den omgivande temperaturen är en viktig parameter som påverkar mätningar och således måste mätas tillsammans med spännkraften.

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