

ÖVERVAKNING AV STATUS PÅ VATTENKRAFTENS SPÄNNSTAG

RAPPORT 2018:545



 VATTENKRAFT

BETONGTEKNISKT PROGRAM
VATTENKRAFT



Övervakning av status på vattenkraftens spännstag

PETER LUNDQVIST
CHRISTIAN BERNSTONE
ANDERS MARKLUND
CARL-OSCAR NILSSON

Förord

Spännarmering används inom både kärnkrafts- och vattenkraftsindustrin för att öka säkerheten hos betongkonstruktioner. Inom vattenkraften används spännarmering främst som spännstag för att öka kraftverksdammars stabilitet mot yttre belastning, men även för att spänna fast lucklager eller för att motverka effekterna av uppkomna sprickor i betongen.

Gemensamt för de båda kraftslagen är att krav ställs på att kvarvarande spännkraft måste överstiga en viss kritisk nivå. Detta medför att kvarvarande spännkrafter måste kunna verifieras bl.a. genom direkta mätningar eller genom instrumentering. Energiforsk Betongtekniskt program vattenkraft genomför ett större projekt med inom området spännarmering, i denna rapport redovisas resultaten från det andra delprojektet.

Fokus i detta delprojekt ligger på mätning av kvarvarande spännkraft. En utvärdering av de mätmetoder som används ute på anläggningarna har gjorts och förslag till inspektionsprogram och acceptanskriterier har utarbetats. Rekommendationer ges också instrumentering för att kontinuerligt mäta spännkraften. Arbetet har utförts av Peter Lundqvist, Christian Bernstone och Anders Marklund, seniora experter på Vattenfall samt Carl-Oscar Nilsson, senior expert på Sydkraft Hydropower.

Intressenterna i Energiforsk Betongtekniskt program vattenkraft är Fortum Sverige AB, Jämtkraft AB, Jönköping Energi AB, Karlstads Energi AB, Skellefteå Kraft AB, Sollefteåforsens AB, Statkraft Sverige AB, Sydkraft Hydropower AB, Umeå Energi AB, Vattenfall AB Vattenkraft och Vattenfall Indalsälven AB.

Monika Adsten, Energiforsk

Sammanfattning

Spännarmering i form av s.k. spännstag används inom vattenkraftsindustrin som en metod för att bl.a. öka vattenkraftsdammars stabilitet mot yttre laster. I och med att de svenska vattenkraftsanläggningarna åldras och dess tekniska livslängd förlängs så kommer användandet av spännarmering att öka. Metoder för hantering av spännstagens status över tid är viktig för att säkerställa en anläggnings säkerhet och integritet, eftersom funktionen hos installerade spännstag direkt påverkar dammsäkerheten för en vattenkraftsanläggning. I dagsläget saknas dock branschgemensamma riktlinjer för hantering av spännstag. Som ett första steg i utvecklandet av en sådan riktlinje har en sammanställning av information om installerade spännstag i svenska vattenkraftsanläggningar utförts i ett tidigare projekt.

Föreliggande rapport utgör nästa steg i utformandet av en branschgemensam metod för hantering av spännstag inom vattenkraftsindustrin. Detta har innefattat att ta fram rekommendationer för utformning av följande:

- Utförande av mätning av kvarvarande spännkraft med domkraft och även riktlinjer för tolkning av den s.k. lift-off kraften, d.v.s. den kraft från en domkraft som får stagets ankarstycke att lyfta från ankarplattan. Ett förslag på en lämplig metod för sådan mätning presenteras. Både kraften från domkraften och ankarstyckets förskjutning ska mätas kontinuerligt med elektroniska givare under hela spännkraftsmätningen. Själva lift-off kraften bestäms med en föreslagen procedur ur ett diagram där kraften från domkraften plottas mot ankarstyckets förskjutning.
- Utformning av inspektionsprogram för spännstag installerade i vattenkraftsanläggningar baserat på normer/riktlinjer för spännstag för bergförankringar samt normer specifika för kraftindustrin. Två olika detaljeringsnivåer för inspektioner föreslås. En årlig inspektion som innefattar okulära inspektioner av samtliga spännstag samt en detaljerad inspektion som utförs vart femte år. Den detaljerade inspektionen innefattar förutom en okulär inspektion även mätning av kvarvarande spännkraft.
- Acceptanskriterier för kvarvarande spännkraft.
- Rekommendationer ges för instrumentering av spännstag med lastceller för kontinuerlig mätning av spännkraft. Detta innefattar beskrivning av lastcellers egenskaper och olika typer av lastceller samt riktlinjer för val av lämplig lastcell och datainsamlingssystem.

Arbetet baseras på en internationell genomgång av relevanta publikationer, fältarbeten, och avstämningar med både ägarorganisationer (vattenkraft) och utförare (tjänsteleverantörer).

Summary

Post-tensioning tendons are used within the hydropower industry to increase the stability of dams. Due to the ageing of the Swedish hydropower dams the usage of tendons will increase with time. Both the integrity and safety of a hydropower structure is directly related to the forces in the tendons, it is thus of great importance to have a management system regarding ageing and assessment of the installed tendons. Currently, no such common practice exists within the hydropower industry and it is up to each individual owner and contractor to incorporate their own strategy. As a first step towards a common practice for tendon management within the hydropower industry information regarding installed tendons in Swedish hydropower plants has been compiled in a previous study.

The work presented in this report is based on a review of e.g. internationally published reports, research papers, standards and recommendations regarding post-tensioning tendons. In addition, two workshops with representatives from the hydro power industry and entrepreneur from the prestressing industry, respectively, have been performed within the project. The results are recommendations for the development of an ageing management program for tendons in the hydro power industry regarding:

- A procedure for performing measurements of remaining tendon forces with hydraulic jacks is presented. In this procedure both the force applied by the jack and the movement of the anchor head should be recorded continuously. In addition, recommendations for the interpretation of the so-called lift-off force, i.e. the force applied by the jack that initiate a movement of the anchor head, are presented.
- Recommendations for the development of an inspection program for installed tendons are presented. The recommended program consists of two different types of inspections. A visual inspection which is performed annually on the entire tendon population and a more detailed inspection which is performed every fifth year and consists of both a visual inspection and measurements of remaining tendon forces.
- Acceptance criteria for remaining tendon forces.
- Recommendations for instrumentation of tendons with load cells for continuous measurements of tendon forces. The recommendations give guidance for choosing suitable type of load cells and data acquisition systems. Properties of different types of load cells are also discussed.

Innehåll

1	Introduktion	8
1.1	Bakgrund	8
1.2	Syfte	8
1.3	Spännstag i vattenkraftsanläggningar	9
1.3.1	Installation av spännstag	9
1.3.2	Olika typer av spännstagssystem	9
1.3.3	Korrosionsskydd	10
2	Metoder för mätning och analys av kvarvarande spännkraft	12
2.1	Nuvarande mätmetod	12
2.1.1	Lift-off mätning	12
2.1.2	Mätmetoder i olika normer/riktlinjer	14
2.2	Analys av nuvarande metodik	15
2.2.1	Styvhet hos spännstag	15
2.2.2	Styvhet i spännkraftsmätningar	17
2.2.3	Undersökningar av domkraftsmätningar	18
2.2.4	Kraft-förskjutningsdiagram	20
2.2.5	Inverkan av förankringszonen	21
2.3	Förslag på ny mätmetod	22
2.3.1	Utrustning	22
2.3.2	Utförande av lift-off mätning	22
2.3.3	Tolkning av lift-off kraften	25
2.3.4	Dokumentation från mätningen	26
3	Inspektionsprogram för spännstag	28
3.1	Svenska inspektionsprogram	28
3.2	Inspektionsprogram i olika normer	28
3.2.1	Kärnkraft	29
3.2.2	Normer för jord- och bergförankringar	30
3.2.3	Normer/riktlinjer för vattenkraft	33
3.2.4	Övriga rekommendationer	34
3.3	Sammanfattning av anvisningar för spännstag	35
3.4	Rekommendationer för utformning av inspektionsprogram för spännstag inom vattenkraften	39
3.4.1	Inspektionsprogram	39
3.4.2	Årlig okulär inspektion	39
3.4.3	Detaljerad inspektion	41
4	Instrumentering av spännstag	46
4.1	Allmänt	46
4.2	Lastceller	47
4.3	Erfarenheter från lastceller inom kraftindustrin	51

4.3.1	Kärnkraftsindustrin	51
4.3.2	Vattenkraftsindustrin	52
4.4	Rekommendationer för instrumentering av spännstag	53
4.4.1	Val av lastcell	53
4.4.2	Riktlinjer vid installation	56
4.4.3	Datainsamlingssystem	57
4.4.4	Installationens omfattning	58
5	Slutsatser och rekommendationer	59
6	Fortsatt arbete	61
7	Referenser	62

TERMER OCH DEFINITIONER

Ankarmutter: Mutter för överföring av spännkraft från spännstång till ankarplatta.

Ankarplatta: Stålplatta som överför spännkraften från ankarstycket till konstruktionen.

Ankarstycke: Stålcylinder i vilken linorna i ett spännstag fästs in med kilar. Överför därigenom spännkraften från spännstaget till ankarplattan.

Kilar: Förankrar linorna i ankarstycket.

Lina: Bestående av sju tvinnade trådar, sex av trådarna är tvinnade kring en centralt rak tråd.

Spännstag: Kabel bestående av linor alternativt en stång vilken kan förspännas med domkraft.

Tråd: Tråd av höghållfast stål, flera trådar tvinnas till en lina.

1 Introduktion

1.1 BAKGRUND

Spännarmering används inom vattenkraftsindustrin som en metod för att bl.a. öka vattenkraftsdammars stabilitet mot yttre laster. Enligt RIDAS, kraftföretagens riktlinjer för dammsäkerhet [1], kan befintliga betongdammar som ej uppfyller stabilitetskraven stabiliteten förbättras genom att installera spända förankringsstag. Dessa skall då utföras så att uppspänningskraften regelbundet kan kontrolleras genom provdragning¹.

I och med att de svenska vattenkraftsanläggningarna åldras och den tekniska livslängden förlängs så kommer användandet och betydelsen av spännarmering att öka. För tillfället saknas en branschgemensam metodik för design, installation och underhåll av spännkabelsystem. Då funktionen hos installerade spännkabelsystem direkt påverkar en anläggnings säkerhet så är ett standardiserat hanterande av design, såväl som installation och drift av spännkabelsystem en förutsättning för att bibehålla en hög säkerhet och integritet hos anläggningarna.

Föreliggande rapport utgör del 2 i ett projekt finansierat av Energiforsks betongtekniska program inom vattenkraft. Den första delen av projektet omfattade en sammanställning av information om installerade spännstag inom den svenska vattenkraften [1]. Totalt samlades information in om 1690 spännstag fördelat på 42 anläggningar. De ägare som bidrog med information var Statkraft, Vattenfall, Uniper samt Vattenregleringsföretagen. Den information som ingick för respektive anläggning var bl.a. vilken typ av spännstag som installerats, antal spännstag, uppspänningskrafter, staglängder, korrosionsskydd, installationsår, anledning till installationen, vilka konstruktionsdelar som försetts med spännstag och kontrollprogram för t.ex. mätning av spännkrafter. Även erfarenheter av installerade spännstag inkluderades, såsom observerade skador eller degraderingar.

1.2 SYFTE

Syftet med föreliggande rapport är bidra till förbättrad kvalitetssäkring av spännkablar. Målet med arbetet är att ta fram en för branschen rekommenderad metod för hantering av spännstag. Denna metod skall omfatta:

- Inspektion av installerade spännstag.
- Mätning av kvarvarande spännkraft med domkraft, samt tolkning av den s.k. lift-off kraften.
- Lämplig instrumentering för kontinuerlig mätning av kvarvarande spännkraft.

¹ I och med att RIDAS numera ställer krav på att ingjutna spännkablers spännkraft skall kunna kontrolleras, så likställs äldre installationer där kablarna har gjutits in med samma krav som gäller för slakarmering mot berg, dvs. att dessa för klass A-dammar inte får medräknas. Tidigare designfilosofi har varit att spännkablar ges ett fördelaktigt skydd genom ingjutning.

1.3 SPÄNNSTAG I VATTENKRAFTSANLÄGGNINGAR

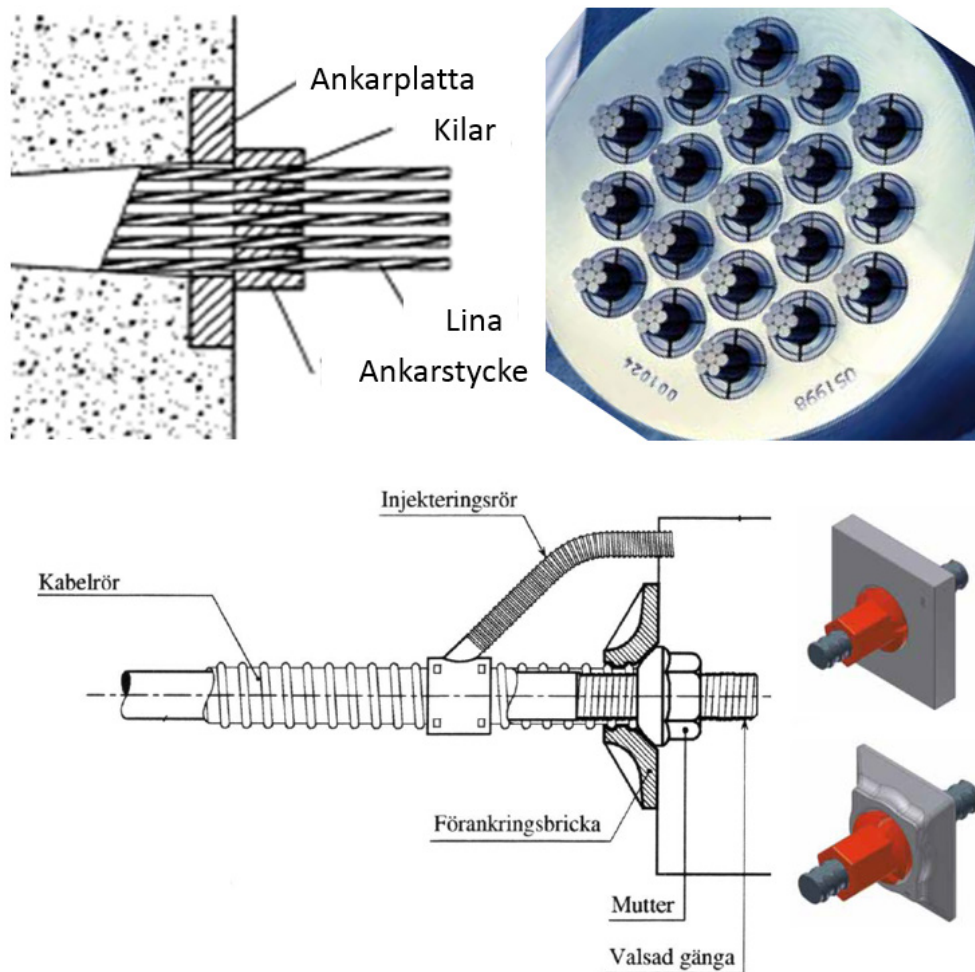
1.3.1 Installation av spännstag

Resultaten från delprojekt 1 visade att den vanligaste orsaken till installation av spännstag i kraftverksdammar har varit att öka dämmande konstruktionsdelars stabilitet gentemot yttre belastning avseende stjälpning och glidning. Installationen av spännstagen utförs i färdig konstruktion genom att hål för spännstagen borrar genom dammen och vidare ner i underliggande berg. Därefter installeras spännstagen i borrhålen och förankringen utförs genom cementinjektering av den del av staget som befinner sig i berget. Förankring av mekanisk utrustning såsom generatorring och lucklager är en annan vanlig orsak till installation av spännstag. Vanligen installeras sådana spännstag i samband med uppförandet av konstruktionen. Andra anledningar till installation av spännstag har varit att motverka sprickbildning och att överbygga redan befintliga sprickor för att på så vis öka eller bibehålla skadade konstruktioners bärförmåga.

1.3.2 Olika typer av spännstagssystem

I delprojekt 1 delades befintliga system för spännstag in i följande principiellt olika typer:

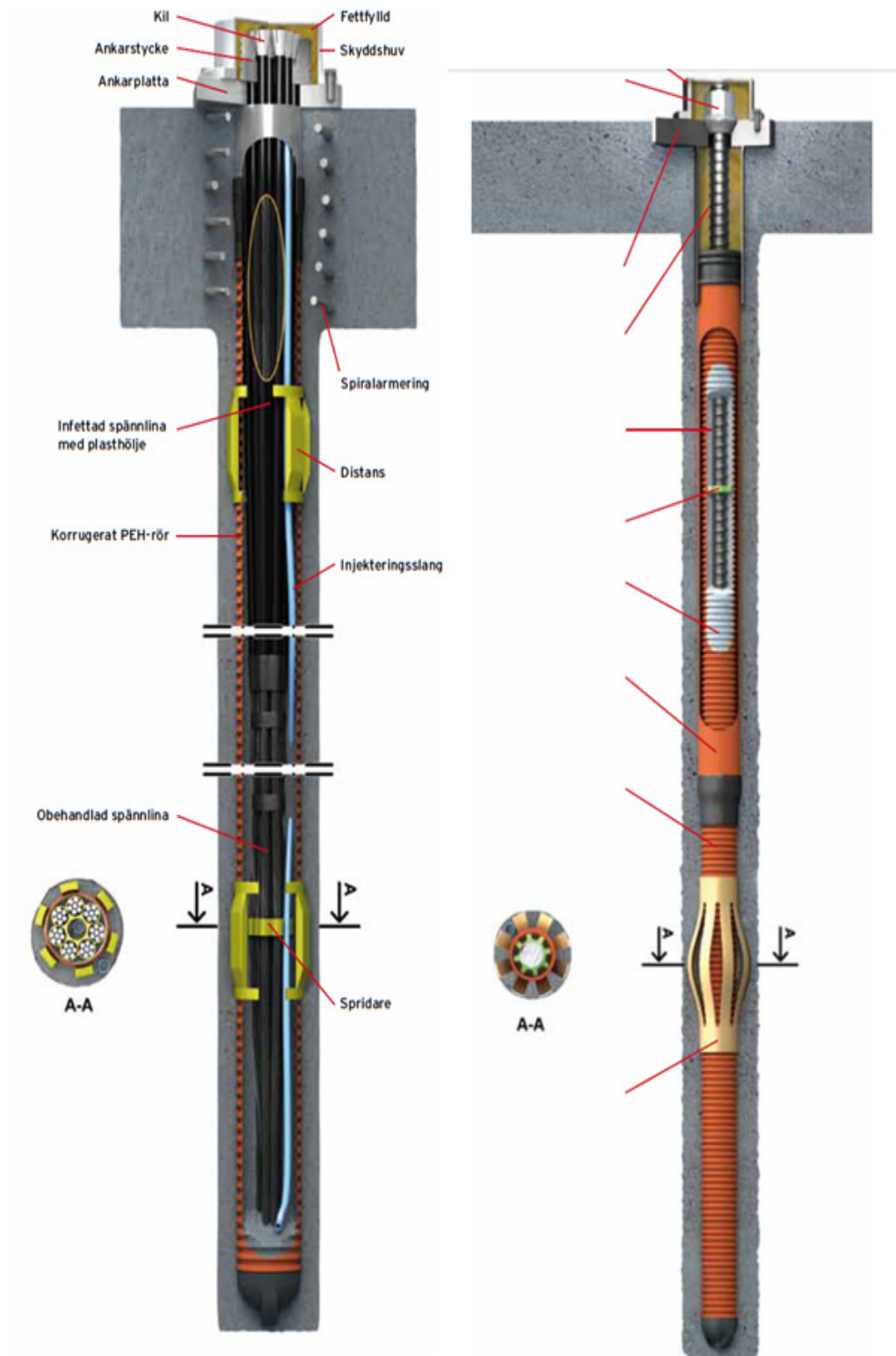
- Linbaserade system där varje spännstag består av ett antal linor som i sin tur består av ett antal trådar som tvinnats runt en centrumtråd. Varje lina förankras i hål i ankarstycket via minst två kilar, se Figur 1.1. Exempel på tillverkare av linbaserade system är VSL (Vorspann System Losinger), BBR (Brandenstini, Brinkenmaier, Ros), MK4 (Mekano4) samt Dywidag Systems International (DSI).
- Stångbaserade system där spännstaget består av enskilda gängade stänger. Förankringen utförs då via mutter som gängas på stängen. Exempel på stångbaserade system är WR och GEWI från DSI samt GWS-stång.



Figur 1.1. Utformning av linbaserade system (överst) från [3] samt VSL produktblad och stångbaserade system (nederst), från [4] samt Dywidag produktdatablad.

1.3.3 Korrosionsskydd

Sammanställningen i delprojekt 1 visade att sedan mitten av 1990-talet används s.k. dubbelt korrosionsskydd för spännstag som förankras i berg. Dubbelt korrosionsskydd innebär att spännstaget är skyddat av både ett yttre plaströr (foderrör) och cementbruk. Varje lina är dessutom infettad och skyddad med ett plasthölje. Spännstaget installeras i borrhålet och utrymmet kring det omgivande plaströret och borrhålet injekteras med cement. I den nedre delen av spännstaget är linorna inte inplastade utan kommer i direkt kontakt med cementbruket, detta utgör förankringslängden av spännstaget. Övrigt utrymme där linorna är inplastade utgör den s.k. fria längden av spännstaget och är den del som kommer spännas upp. I Figur 1.2 visas exempel på utformning för både lin- och stångbaserade bergförankringar med dubbelt korrosionsskydd.



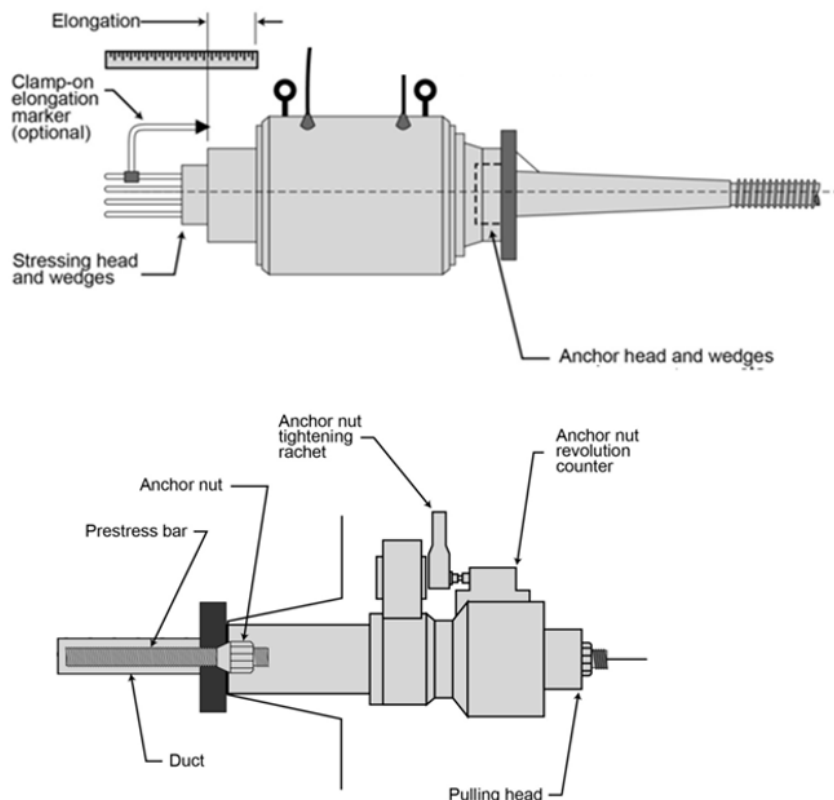
Figur 1.2. Utformning av bergförankringar för linbaserade system (vänster) och stångbaserade system (höger).
Från Skanskas produktkatalog för bergförankringar, VSL, respektive stångförankring.

2 Metoder för mätning och analys av kvarvarande spännkraft

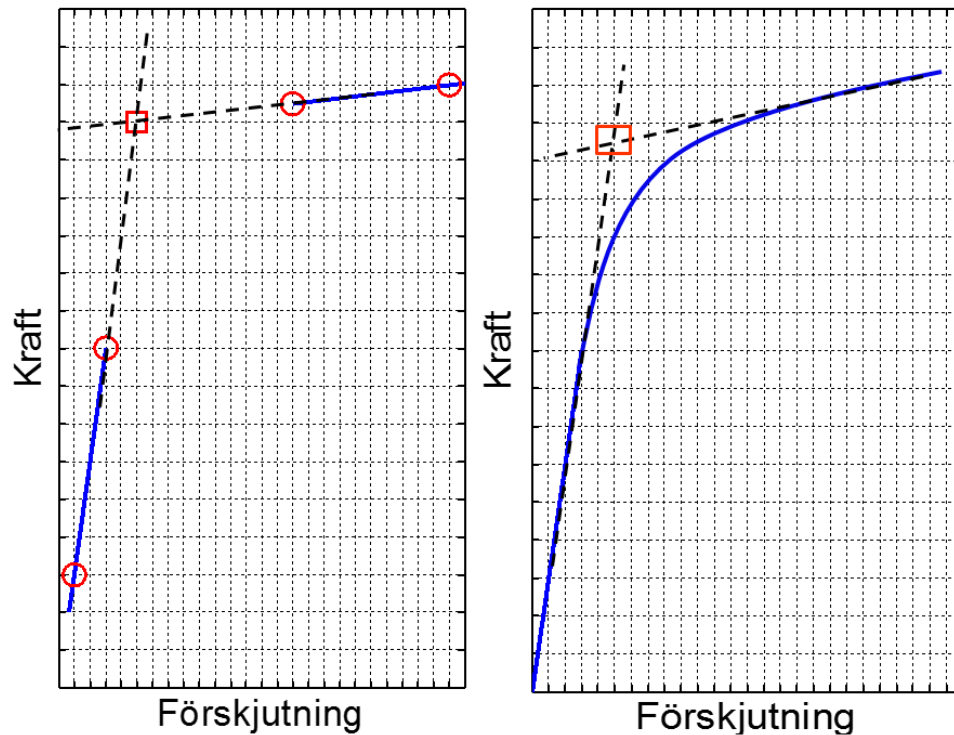
2.1 NUVARANDE MÄTMETOD

2.1.1 Lift-off mätning

Vid mätning av kvarvarande spännkraft i spännstag används samma typ av domkraft som vid uppspänningen. Denna kopplas till den aktiva änden på spännstaget, se Figur 2.1. Kraften i spännstaget ökas sedan till dess att ankarstycket tydligt har lyft från ankarplattan, s.k. lift-off. Kraften i spännstaget ansätts då att vara lika med den kraft som precis får ankarstycket att lyfta från ankarplattan, även kallad lift-off kraft, vilken antas vara lika med spännkraften i spännstaget. En vanlig procedur för att bestämma lift-off kraften är att mäta förskjutningen hos ankarstycket samtidigt med kraften som appliceras av domkraften. Ur ett kraft-förskjutningsdiagram syns en tydlig ändring i lutning efter det att ankarstycket lyft från ankarplattan. Lift-off kraften bestäms genom att interpolera linjerna före och efter lift-off för att på så sätt hitta deras skärningspunkt, se Figur 2.2. Delprojekt 1 visade att flera olika sätt att definiera lift-off kraften används och att det inte finns en standardiserad metod för bestämning av lift-off kraft utan det är upp till utföraren att använda sin egen metod.



Figur 2.1. Exempel på hur domkrafter kopplas till spännstag under uppspänning, linbaserade system (överst) och stångbaserade system (nederst), från [5].



Figur 2.2. Kraft-förskjutningsdiagram för att bestämma den s.k. lift-off kraften. Vänstra bilden visar den förenklade metoden och den högra visar standardmetoden att bestämma lift-off kraften.

I del 1 identifierades två principiellt olika metoder för att bestämma lift-off kraften:

- Standardmetoden innebär att både kraft och förskjutning mäts kontinuerligt under lift-off testet, vilket resulterar i ett diagram likt det i Figur 2.2. De två raka delarna av linjerna i diagrammet interpoleras och skärningspunkten av dessa sätt s då som lift-off kraften.
- Förenklad metod, där mätningen endast utförs vid ett antal fördefinierade kraftnivåer. Vanligast är att mätningen utförs med fyra olika kraftnivåer, två under ursprunglig spännkraft och två över. Detta genererar ett diagram med två raka linjer och därefter uppskattas lift-off kraften genom interpolering av dessa två linjer.
- En tredje metod som används direkt efter utförd uppspänning är att höja kraften i domkraften till dess att kilarna släpper från ankarstycket, d.v.s. lift-off. Då detta inträffar sker en tydlig minskning i tryckökningen i domkraften samt att ett klickande ljud hörs då kilarna dras ur ankarstycket. Domkraften stoppas, kraften läses av och förlängningen av spännstaget mäts manuellt t.ex. med en meterstock.

En av slutsatserna från del 1 var att metodiken för bestämning av lift-off kraften vid domkraftsmätningar bör standardiseras så att samma metod alltid används oavsett utförare. Liknande slutsatser presenteras i [6] gällande japanska spännstag för berg- och jordförankringar. Utan detta så är det svårt att jämföra resultat från olika utförare. Mätningarna blir dessutom personberoende och inte repeterbara över tid. Ett exempel på detta är att provningsresultatet för en av

vattenkraftsanläggningarna som ingick i del 1 så var skillnaden mellan två utförare cirka 20 % vid mätning på samma spännstag. Dessutom är det fritt för utförarna att ändra metod över tid, vilket kan medföra att resultat från olika mätningar med samma utförare i vissa fall inte är jämförbara. I ett projekt inom Energiforsks betongtekniska program kärnkraft utfördes mätningar under uppspänningen vilka visade att lift-off testerna överskattade de inlåsta spännkrafterna med runt 5 % [7]. Detta innebär att det finns risk för att spännkraftsförlusterna i ett spännstag underskattas, d.v.s. den verkliga spännkraften är lägre än vad testet visar.

2.1.2 Mätmetoder i olika normer/riktlinjer

Beskrivningar av hur mätning av kvarvarande spännkraft med domkraft ska utföras varierar mellan olika normer/riktlinjer. En genomgång visar att i majoriteten av dessa ges främst rekommendationer kring utförandet av tester före uppspänningen. Detta gäller främst s.k. godkännandeprov som enligt SS-EN 1537 [8] och EC 7 [9] måste utföras på samtliga spännstag innan uppspänningen för att kontrollera att spännstaget uppfyller dimensioneringskraven enligt normen. I ett godkännandeprov spänns spännstaget upp till en nivå, en s.k. provlast, som överskrider den slutliga låskraften. Även andra normer för bergförankringar ger liknande rekommendationer för godkännandeprov och andra tester som utförs före uppspänningen [10], [11], [12], [13]. Gemensamt för flertalet normer/riktlinjer är att de krav som ställs är begränsade till val av lämplig utrustning för både kraftmätning och mätning av förlängningen. Några detaljerade krav på utrustningens prestanda specificeras inte.

I regel så ges inte heller några rekommendationer för hur mätningar av kvarvarande spännkraft skall genomföras, och hur lift-off kraften ska bestämmas. De definitioner av lift-off kraften som förekommer är någon av följande [10], [14]:

- Den kraft då tryckökningen i domkraften minskar kraftigt,
- Då en separation från ankarplattan av antingen ankarstycke eller låsmutter kan upptäckas visuellt.
- Då ett tunt mellanlägg mellan ankarstycke och ankarplatta kan tas bort.
- Den kraft då en låsmutter kan vridas för ett stångbaserat system eller en separation mellan ankarstycke och ankarplatta för ett linbaserat system.

Enligt [14], [15] ska separationen mellan ankarstycke och ankarplatta vid lift-off vara förbestämd till mellan 0,1–1 mm. I den japanska normen för jord- och bergförankringar ges en beskrivning av hur mätningar av lift-off kraften ska utföras [12]. Mätningen ska utföras genom att både mäta kraften i domkraften och förskjutningen av ankarstycket. Kraften ska ökas i små steg om cirka 10 – 20 kN tills lift-off är uppnått varefter kraften ska höjas i ytterligare tre laststeg innan mätning avslutas. Den högsta kraft som får uppnås under mätningen är den lägsta av 90 % av spännstagets flytgräns alternativt 150 % av den ursprungliga spännkraften. Resultatet från mätningen ska presenteras i ett kraft-förskjutningsdiagram där lift-off kraften fås genom interpolation av det två kurvdelarna på samma sätt som i Figur 2.2.

2.2 ANALYS AV NUVARANDE METODIK

2.2.1 Styvhet hos spännstag

Styvheten, k , hos ett spännstag där inverkan av friktion mellan stag och foderrör är försumbar, vilket kan antas gälla alla raka spännstag som används inom vattenkraftsanläggningar, beskrivs enligt ekvation 1. Styvheten anger förhållandet mellan kraften i spännstaget och förlängningen av spännstaget orsakad av spännkraften, se ekvation 2. Grafiskt motsvarar k lutningen på linjen i ett kraft-förskjutningsdiagram från t.ex. uppspänningen av ett spännstag, se Figur 2.3. För spännstaget i Figur 2.3 är överensstämmelsen relativt god mellan den teoretiska styvheten beräknad enligt ekvation 1 och den styvhet som motsvaras av lutningen i diagrammet. Den teoretiska styvheten uppgår till 16,4 MN/m och lutningen hos kurvan i diagrammet är 16,9 MN/m.

$$k = \frac{E \cdot A}{L} \quad \text{Ekvation 1}$$

Där:

k = spännstagets styvhet, N/m.

E = Spännstålets elasticitetsmodul, Pa.

A = Tvärsnittsarean hos spännstaget, m².

L = Den fria längden hos spännstaget, m.

$$P = k \cdot \Delta L \quad \text{Ekvation 2}$$

Där:

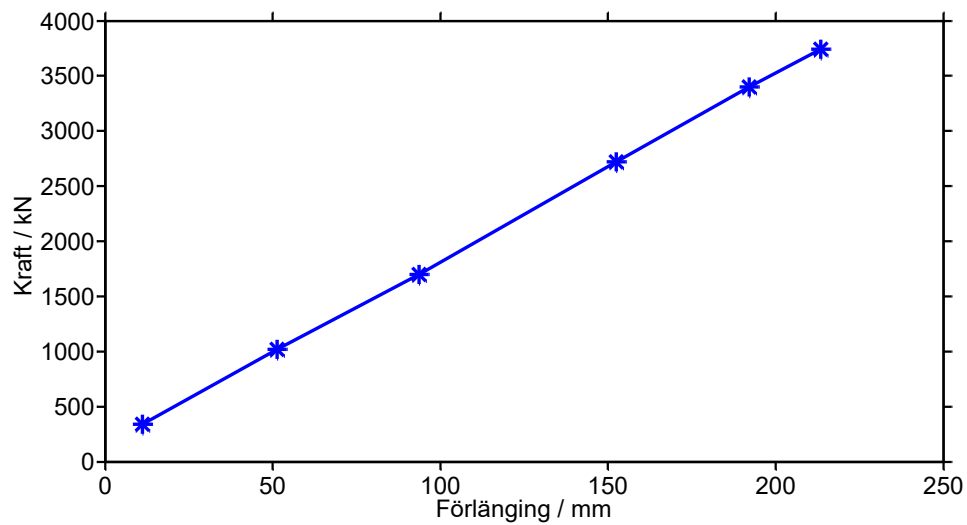
P = kraften i spännstaget, N.

k = spännstagets styvhet, se ekvation 1, N/m.

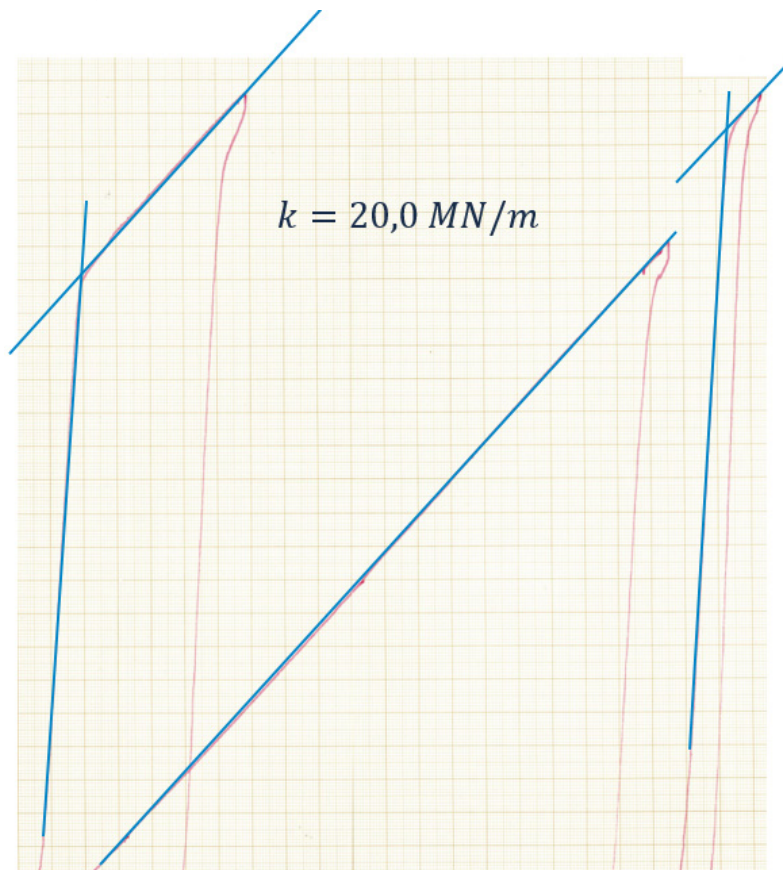
ΔL = förlängning av spännstaget orsakad av P , m.

Så länge som spännstaget belastas i sitt elastiska område beskrivs förhållandet mellan kraft och förlängning enligt ekvation 2. Vid en mätning av kvarvarande spännkraft med domkraft ska således, rent teoretiskt, styvheten vara densamma som vid uppspänningen efter att lift-off erhållits. Det betyder att lutningen på grafen i kraft-förskjutningsdiagrammet från uppspänningen ska vara samma eller liknande den i motsvarande diagram från en efterföljande kraftmätning. Detta kan ses i Figur 2.4 där uppspänning och direkt efterföljande lift-off test visas från en spännkabel i en reaktorinneslutning. Som framgår av diagrammet är lutningarna på kurvorna identiska.

Enligt den europeiska normen för utförande av förankringar i geokonstruktioner SS-EN 1537 [8] används spännstagets styvhet vid de kontroller, t.ex. godkännandeprov som utförs i samband med installationen. Kontrollen utförs genom att en teoretisk längd på spännstaget beräknas utifrån uppmätt förlängning då en given spännkraft appliceras med domkraft. Den beräknade längden på spännstaget får sedan inte avvika alltför mycket från den verkliga längden.



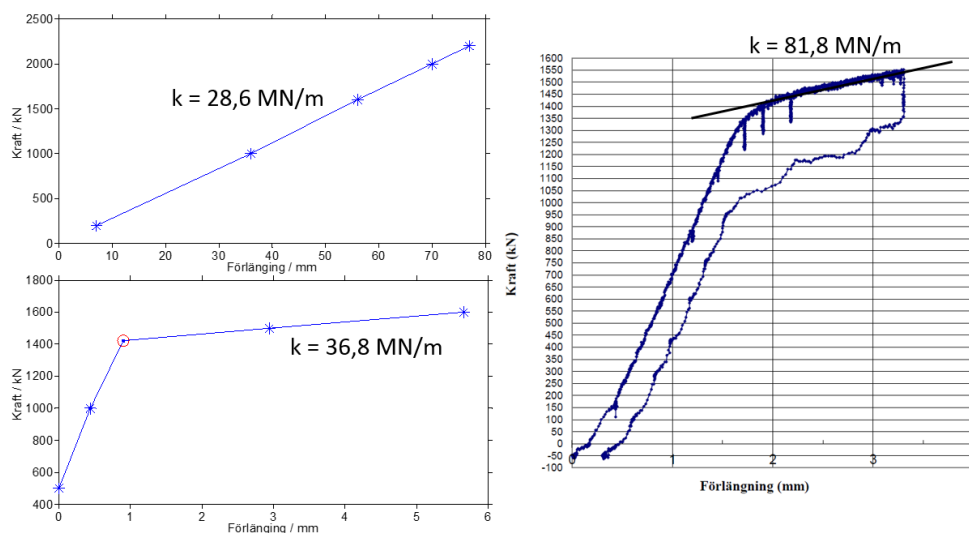
Figur 2.3. Kraft-förskjutningsdiagram från uppspänningen av ett spännstag. Styvheten motsvarar i detta fallet lutningen på kurvan.



Figur 2.4. Uppspänningsdiagram med efterföljande mätning av lift-off kraft för en spännkabel i en reaktorinneslutning. I detta fall är lutningen på kurvan vid uppspänningen och mätningen av lift-off kraft identisk. De två vänstra kurvorna är uppspänningen som utförts i två steg p.g.a. att slaglängden i domkraften var otillräcklig. Den högra kurvan visar mätningen av lift-off kraften.

2.2.2 Styvhet i spännkraftsmätningar

Vid ett fåtal av de anläggningar från vilka mätdata samlats in i del 1 av föreliggande projekt finns både information från uppspänningen samt från en eller flera efterföljande kraftmätningar. I dessa anläggningar har uppspänning och mätningar utförts av olika utförare. Skillnaderna i uppmätta spännkrafter har varierat uppemot 20 %, vilket framgick av resultaten från [1]. Även skillnaderna i styvhet hos spännstagen har varierat kraftigt vid jämförelse av kraft-förskjutningsdiagrammen. I Figur 2.5 samt Tabell 1 visas resultaten från uppspänningen samt två efterföljande mätningar av kvarvarande spännkraft på ett enskilt spännstag. Första mätningen utfördes fyra år efter uppspänningen och den andra mätningen utfördes fem år efter uppspänningen. Skillnaderna i spännkraft mellan uppspänning och första mätningen var en minskning med 28 %. Spännkraften vid andra mätningen uppvisade en minskning från uppspänningen på 27 %. I detta fall var således överensstämmelsen mellan de två utförare som utförde de efterföljande mätningarna väldigt god avseende kvarvarande spännkraft. Överensstämmelsen mellan den teoretiska styvheten och den uppmätta styvheten vid uppspänningen var relativt god, den teoretiska uppgick till 30,2 MN/m och den uppmätta till 28,6 MN/m. Skillnaderna i uppmätt styvhet på spännstaget varierade dock kraftigt mellan utförarna. Vid första mätningen uppgick styvheten till 81,8 MN/m och vid den andra till 36,8 MN/m. Även i det fall samma utförare har utfört uppspänning och efterföljande mätning av spännkraft är skillnaderna i uppmätt styvhet ofta stor. För spännkabeln i Figur 2.4 utfördes en mätning av spännkraften 37 år efter uppspänningen av samma utförare som spänt upp spännkabeln. Den uppmätta styvheten uppgick då till 50 MN/m att jämföra med styvheten från uppspänning och efterföljande mätning på 20 MN/m. Det bör påpekas att vid uppspänningen mättes både kraft och förskjutning kontinuerligt, vid efterföljande mätning användes den förenklade metoden enligt avsnitt 2.1.1.



Figur 2.5. Resultat från uppspänning samt två efterföljande mätningar av spännkraft i ett enskilt spännstag vid en svensk vattenkraftsanläggning. Uppspänning (överst till vänster), första mätningen av kvarvarande spännkraft (höger) samt andra mätningen av kvarvarande spännkraft (nederst till vänster).

Tabell 1. Sammanfattning av rekommendationer för utformning av inspektionsprogram för spännstag.

Tidpunkt	Spännkraftsförlust / %	Teoretisk styvhet / MN/m	Uppmätt styvhet MN/m
Anläggning 1			
Uppspänning	-	30,2	28,6
Första mätningen	28		81,8
Andra mätningen ¹	27		36,8
Anläggning 2			
Uppspänning	-	21,2	20,0
Första mätningen	-		20,0
Andra mätningen ²	-		50,0

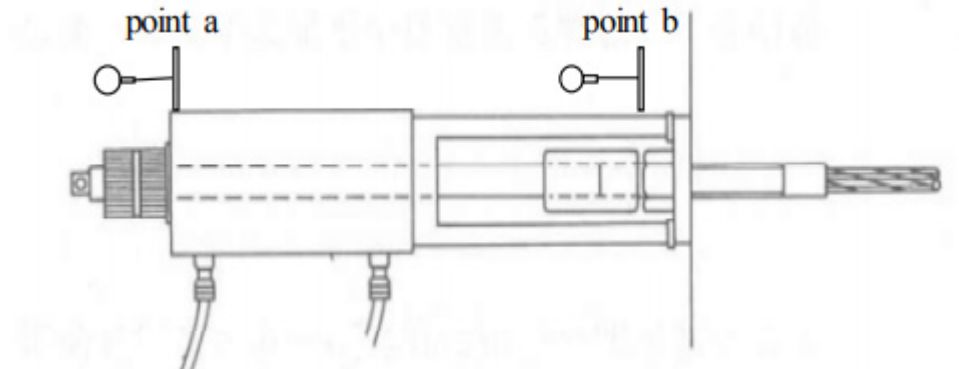
¹ Annan utförare vid första mätningen, samma utförare utförde både uppspänning och andra mätningen.

² Vid uppspänningen och första mätningen användes standardmetoden, vid andra mätningen den förenklade metoden. Samma utförare utförde uppspänning och samtliga mätningar.

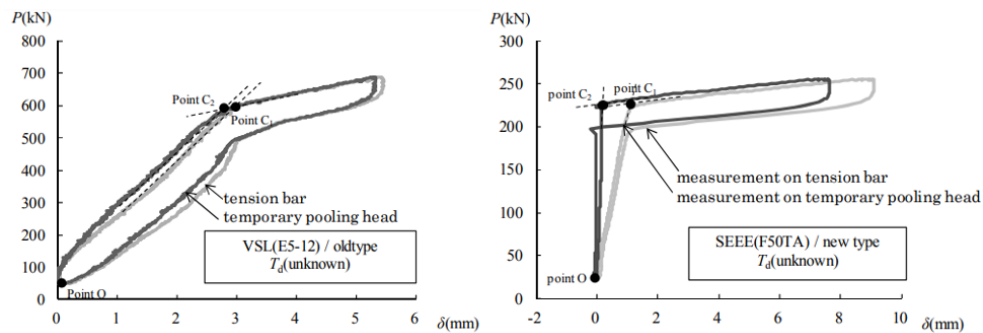
I den japanska normen för berg- och jordförankringar [12] jämförs kraft-förskjutningsdiagrammen från uppspänningen med samma diagram från efterföljande mätningar av kvarvarande spännkraft. Det är då lutningen på kurvorna som används som en indikation för spännstagets status. Är lutningen på kurvan i de båda diagrammen samma eller liknande är detta en indikation på att spännstagets status är god. Eftersom en standardiserad metod ges i denna norm blir en jämförelse mellan styvheterna vid olika mättillfällen möjlig. Dessutom möjliggörs även jämförelser mellan olika utförare då alla mätningar utförs med samma metod.

2.2.3 Undersökningar av domkraftsmätningar

Det finns relativt få publicerade undersökningar av hur mätningar med domkraft ska utföras på spännstag. I [6] har inverkan av flertalet olika faktorer på resultaten av domkraftsmätningar utförda på jord- och bergförankringar undersökts. De faktorer som undersöktes var bl.a. placeringen av lägesgivare, belastningshastighet samt olika samplingsfrekvenser. Två olika placeringar av lägesgivare provades, dels längst ut på dragstången i domkraften och dels på ankarstycket i domkraften som ansluts till de utstickande linorna från ankarstycket, se Figur 2.6. Resultaten visade att placeringen av lägesgivare inte påverkade tolkningen av lift-off kraften, båda placeringarna resulterade i liknande lift-off kraft. Skillnaden mellan placeringarna visade sig i den första delen av kurvan i kraft-förskjutningsdiagrammet som var betydligt brantare vid placering på ankarstycket jämfört med dragstången i domkraften, se Figur 2.7. Vid mätning på domkraftens dragstång kommer hela den elastiska deformationen i domkraft och tillhörande delar att inkluderas i kraft-förskjutningsdiagrammet. Hela systemet är då mindre styvt jämfört med mätning på ankarstycket då det i princip endast är spännstagets styvhet som mäts. Vid mätning på ankarstycket är det teoretiskt endast den elastiska återgången av deformation i ankarstycket som mäts före lift-off. Teoretiskt uppgår denna till cirka 0,2 mm för ett spännstag bestående av 19 linor med en diameter på 15,7 mm som har en spännkraft på cirka 3000 kN.



Figur 2.6. Test av olika placering av lägesgivare vid utförandet av lift-off test med domkraft [6].



Figur 2.7. Skillnad i kraft-förskjutningsdiagram för två olika typer av linbaserade system vid olika placering av lägesgivaren. I den vänstra figuren visas resultatet från ett VSL-system och i den högra figuren på ett typ av linbaserat system med gängat ankarstycke [6].

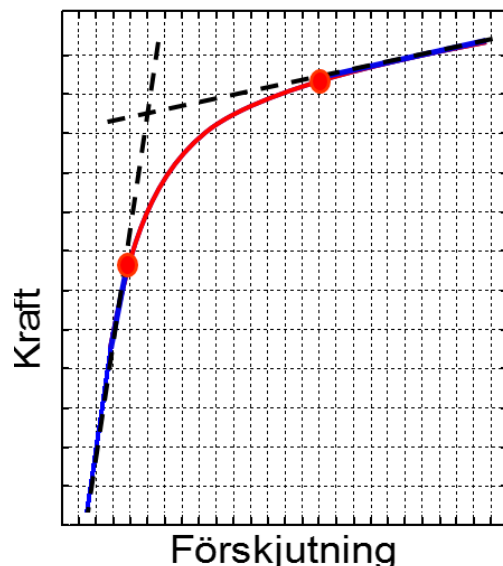
Försök med olika belastningshastigheter, mellan 10 – 60 kN/min, visade belastningshastigheten inte påverkade tolkningen av lift-off kraft från kraft-förskjutningsdiagrammen. Spännkraften i de undersökta spännstagen var i detta fall mellan 400 och 500 kN vilket innebär att belastningshastigheterna i de olika försöken ungefär motsvarade 2 % – 15 % av spännkraften per minut.

Effekten av olika samplingsfrekvenser på noggrannheten i bestämningen av lift-off kraften utvärderades även på tolv spännstag i [6]. De samplingsfrekvenser som testades var ett mätvärde per minut respektive ett mätvärde var tionde sekund. Resultaten visade att lift-off kraften varierade mellan cirka 2 % och 12 % mellan de båda samplingsfrekvenserna. Orsaken till detta är att ju lägre samplingsfrekvens desto större är risken att övergångszonen mellan de båda raka delarna i kraft-förskjutningsdiagrammet inte kan beskrivas på ett tillförlitligt sätt. Det anges dock inte vilken belastningshastighet som användes vid dessa försök, vilket medför att det blir svårt att dra några definitiva slutsatser från resultaten.

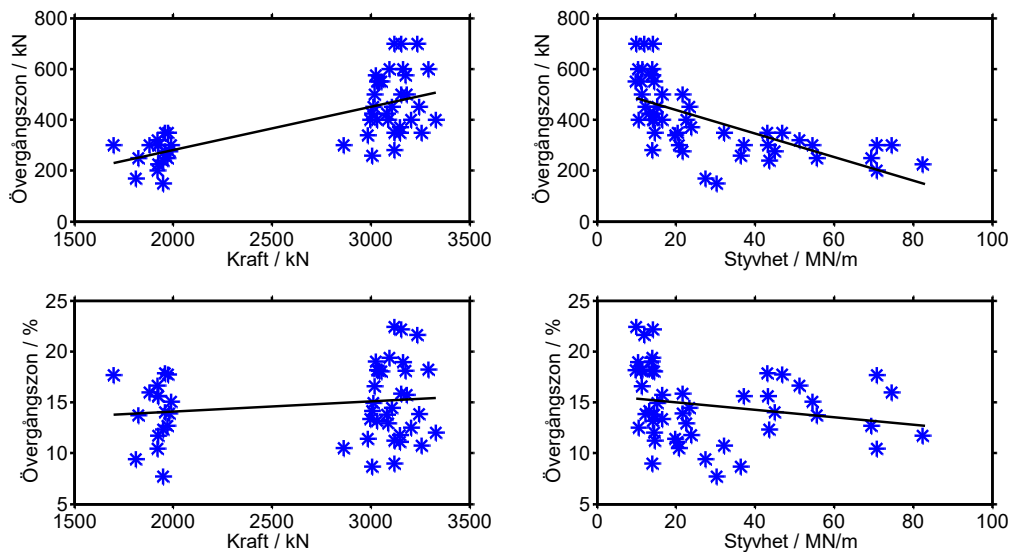
Belastningshastigheten kommer ha en stor inverkan på resultatet då det vid en långsam belastningshastighet är möjligt att beskriva övergångszonen i kurvan även vid lägre samplingsfrekvenser.

2.2.4 Kraft-förskjutningsdiagram

En av slutsatserna från del 1 i föreliggande projekt var att övergångszonen, se Figur 2.8, mellan de två linjära delarna av kurvan i ett kraft-förskjutningsdiagram måste inkluderas för att lift-off kraften ska kunna uppskattas med så hög noggrannhet som möjligt. Detta utförs i den s.k. standardmetoden med kontinuerlig mätning av både kraft och förskjutning. Skillnaden mellan olika metoder syns i Figur 2.2. Från den information om installerade spännstag i svenska vattenkraftsanläggningar som samlades in i del 1 av projektet finns data från ett antal spännkraftsmätningar som utförts med standardmetoden. Från kraft-förskjutningsdiagrammen från mätningar på 50 spännstag uppskattades övergångszonerna okulärt genom interpolation av de två raka linjerna i kraft-förskjutningsdiagrammen på samma sätt som i Figur 2.2. De fria längderna på spännstagen varierade mellan cirka 4 m till 55 m. I Figur 2.9 visas övergångszonens storlek plottad mot både den ursprungliga spännkraften och spännstagets styvhet. Övergångszonen för spännstagen har även relaterats till uppspanningskraften. Som framgår av resultaten ökar övergångszonens storlek med ursprungliga spännkraften, men sjunker med ökande styvhet. Vidare är övergångszonens relativa storlek oberoende av uppspanningskraften. Det finns dock ett samband mellan övergångszonens relativa storlek och spännstagets styvhet där övergångszonens storlek minskar något med spännstagets styvhet. Dessa resultat visar att det främst är spännstagets styvhet som påverkar övergångszonens storlek. Vidare visar även resultaten att övergångszonens storlek generellt uppgår till cirka 14 % av uppspanningskraften för samtliga spännstag oberoende av styvhet.



Figur 2.8. Definitionen av övergångszonen i ett kraft-förskjutningsdiagram från en domkraftsmätning



Figur 2.9. Storleken på övergångszonen mellan de två linjära delarna i ett kraft-förskjutningsdiagram. Överst till vänster: övergångszonens storlek i kraft mot uppspänningskraften. Överst till höger: övergångszonens storlek i kraft mot spännstagets styvhet. Nederst till vänster: övergångszonen relaterad till uppspänningskraften mot uppspänningskraft. Nederst till höger: övergångszonens storlek relaterad till uppspänningskraften mot spännstagets styvhet.

2.2.5 Inverkan av förankringszonen

Förankringen av spännstag utförs på samma sätt oavsett om staget är förankrat i underliggande berg eller i betongen i konstruktionen och utgörs av cementinjektering av den fasta delen av spännstaget, den s.k. förankringszonen, se Figur 1.2. Spännkraften i spännstaget förs över till cementbruket via vidhäftning mellan stål och bruk och sedan vidare till berget eller betongen via vidhäftningen mellan bruk och berg/betong. Ingjutningens och/eller bergets/betongens kvalitet kommer därför ha en inverkan på ett spännstags beteende. Bristande kvalitet på förankringszonen kan medföra ökade spännkraftsförluster orsakade av bl.a. krypning i injekteringsbruket eller uppsprickning av berg och/eller bruk. Det kan även påverka ett spännstags beteende under domkraftsmätningar. Undermålig kvalitet på förankringszonen kan ge upphov till deformationer eller rörelser av spännstaget i förankringszonen under en spännkraftsmätning. Detta kommer påverka spännstagets uppmätta styvhet, d.v.s. lutningen på kurvan i kraft-förskjutningsdiagrammet. Ju lägre kvalitet på förankringszonen desto flackare lutning på kurvan p.g.a. ökade rörelser i förankringszonen. En mätning av kvarvarande spännkraft i ett spännstag är således inte bara en kontroll av spännkraften utan indirekt även en kontroll av ingjutningens kvalitet. Det är ingjutningens kvalitet som kontrolleras vid de mätningar som utförs före uppspänningen för nyinstallerade spännstag t.ex. godkännandeprov där krypningen i förankringszonen mäts under en viss tidsperiod [8]. Förutsatt att samma metod för domkraftsmätningen används kan förankringszonens status uppskattas genom att jämföra kraft-förskjutningsdiagrammen från olika mätningar. En minskande uppmätt styvhet kan då vara en indikation på en degradering av förankringszonen.

2.3 FÖRSLAG PÅ NY MÄTMETOD

Resultaten från del 1 i projektet samt resultaten som presenteras i föregående avsnitt visar på ytterligare brister i nuvarande mätmetoder och att en standardiserad mätmetod bör tas fram. I föreliggande avsnitt presenteras en rekommendation på ny metod för mätning av spännkraft i spännstag med domkraft.

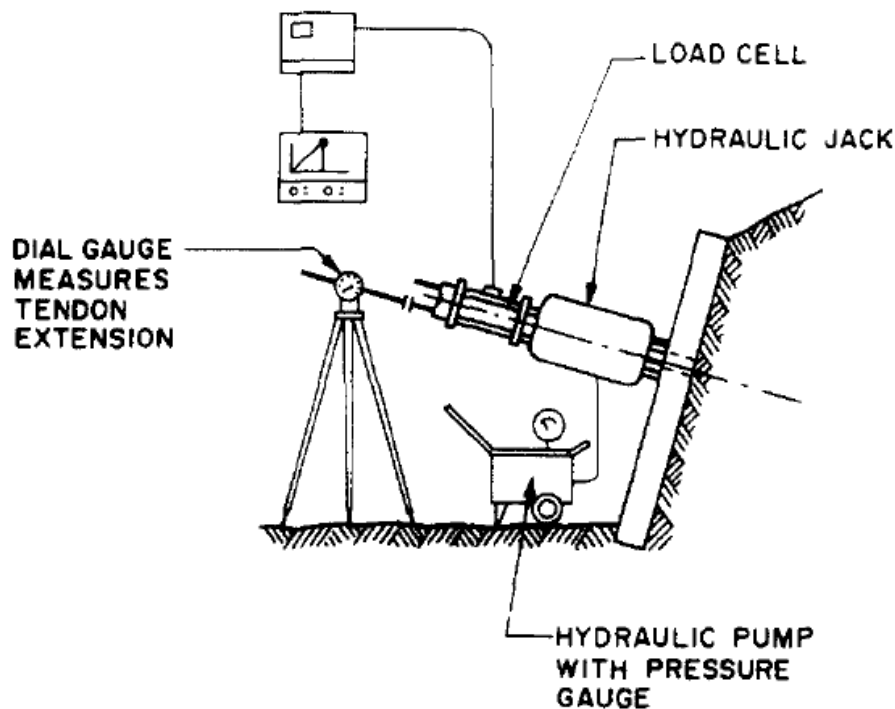
2.3.1 Utrustning

Samma utrustning som används under uppspänning och efterföljande kontroller i samband med uppspänningen, t.ex. lämplighetstest och godkännandeprov ska användas vid mätning av kvarvarande spännkraft. Det vill säga kalibrerad domkraft enligt kraven i [8] och utrustning för att mäta förskjutningen av ankarstycket. Dessutom ska utrustningen uppfylla följande krav:

- Domkraften ska vara försedd med en lastcell alternativt manometer med elektronisk avläsning som går att koppla till ett datainsamlingssystem för kontinuerlig mätning av kraften. Datainsamlingssystemet kan t.ex. utgöras av en bärbar dator. För att inte introducera ytterligare osäkerheter i mätningarna ska mätnoggrannheten understiga domkraftens noggrannhet på 1–2 %.
- Förskjutningen av ankarstycket ska mätas med en elektronisk lägesgivare, t.ex. LVDT-givare, med en mätnoggrannhet som är bättre än $\pm 0,1$ mm. Givaren ska kopplas till samma datainsamlingssystem som domkraften för kontinuerlig mätning av förskjutningen. Mätområdet för givaren bör vara minst ± 20 mm. I det fall mätningen utförs i direkt anslutning till en uppspänning av ett spännstag ska samma lägesgivare som användes vid uppspänning och godkännandeprov även användas för mätningen av spännkraft. Mätområdet ska då överstiga den maximala förlängning som förväntas under godkännandeprovet med minst 20 mm.

2.3.2 Utförande av lift-off mätning

Mätning av kvarvarande spännkraft ska utföras genom att koppla en för ändamålet lämplig domkraft till ankarstycket. Innan mätningen påbörjas ska en lägesgivare för mätning av ankarstyckets förskjutning monteras mot ankarstycket alternativt på domkraftens kolv. Förfarandet dokumenteras tillsammans med mätresultatet. Samma placering av lägesgivaren ska framgent användas vid alla efterföljande mätningar. För att undvika eventuella störningar på lägesgivaren p.g.a. själva kraftmätningen så bör lägesgivarens fasta del vid förskjutningsmätning på ankarstycket monteras på omkringliggande betong (ej mot ankarplattan). Vid mätning på domkraftens kolv bör givarens fasta del monteras på en separat ställning (ej på själva domkraften). Förfarandet illustreras i Figur 2.10.



Figur 2.10. Exempel på uppställning av mätutrustning vid mätning av lift-off kraft. Mätningen av ankarstyckets förskjutning utförs här på domkraftens kolv [15].

För att erhålla tillräcklig förlängning för att kunna bestämma lift-off kraften med tillräcklig noggrannhet ska kraften höjas till en nivå som överstiger uppspänningskraften. Den maximala kraft som appliceras på spännstaget under mätningen bör dock ej överstiga 120 % av den ursprungliga spännkraften². Mätningen bör stoppas då en förlängning som motsvarar en töjning på 0,1 % av spännstaget uppnås även om 120 % av uppspänningskraften inte uppnåtts. När maximal spännkraft uppnåtts ska det bekräftas visuellt att ankarstycket/ankarmuttern lyft från ankarplattan. Teoretiskt är det mer fördelaktigt att gå till en så hög kraft som möjligt under mätningen då detta ger en längre rak kurvdel efter lift-off, vilket underlättar uppskattningen av lift-off kraften. Dock ska kraften höjas med försiktighet så spännstaget under mätningen inte utsätts för kraftnivåer som överstiger de som det utsattes för i samband med uppspänningen, vilket t.ex. skulle kunna orsaka accelererade spännkraftsförluster [1]. Detta är speciellt viktigt för äldre spännstag där maximalt tillåten spännkraft under uppspänningen uppgick till 75 % av brottslasten. Eftersom spännstag i svenska vattenkraftsanläggningar spänts upp till cirka 60 % [1] motsvarar då 120 % av uppspänningslasten cirka 72 % av spännstagets brottslast. För de spännstag som vid uppspänningen spämdes till krafter överstigande 65 % av brottslasten kan maximala spännkraften som får uppnås under mätningen höjas till en spännkraft motsvarande 75 % av brottkraften. Den maximala förskjutning som får uppnås bör även för detta fall begränsas till 0,1 % töjning i spännstaget.

² Detta gränsvärde rekommenderas även i japanska riktlinjer [5]

Under mätningen ska både applicerad kraft från domkraften och ankarstyckets förskjutning mätas kontinuerligt med en samplingsfrekvens på cirka en sekund, d.v.s. två mätvärden (en kraft och en förskjutning) ska registreras varje sekund. Eftersom det är övergångszonen mellan de två raka delarna på kurvan i kraft-förskjutningsdiagrammet som är viktigast att kunna beskriva för att kunna uppskatta lift-off kraften med hög noggrannhet rekommenderas en belastningshastighet motsvarande en ökning på 10 % av ursprungliga spännkraften per minut. För ett spännstag med en ursprunglig spännkraft på 3000 kN blir då hastigheten på applicerad kraft 300 kN/min. Med en samplingsfrekvens på ett mätvärde per sekund ger detta totalt 1440 mätpunkter för en spännkraftsmätning (både kraft och förskjutning). Resultaten av utvärderingen av övergångszonerna i avsnitt 2.2.4 visade att övergångszonen ungefär motsvarar 15 % av den ursprungliga spännkraften. En belastningshastighet på 10 % av ursprunglig spännkraft kommer då resultera i cirka 90 mätpunkter för övergångszonen, vilket bör vara tillräckligt för att kunna bestämma lift-off kraften med tillräcklig noggrannhet. I det fall en annan samplingsfrekvens än den rekommenderade används ska belastningshastigheten modifieras enligt ekvation 3 så att tillräckligt antal mätpunkter erhålls under mätningen.

$$\alpha = \frac{0,1}{f} \quad \text{Ekvation 3}$$

Där:

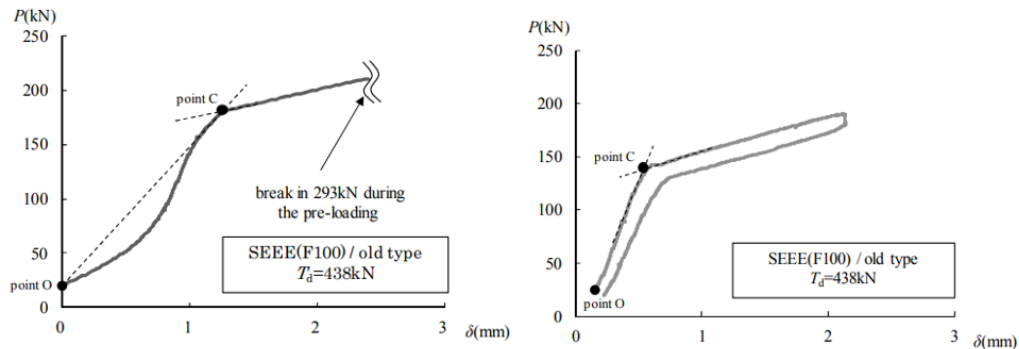
α = belastningshastighet relaterad till uppspänningskraften, α P/min.

f = samplingsfrekvens.

För gamla spännstag och/eller spännstag med en misstänkt skada/defekt ges i [6] rekommendationen att en förbelastning med låg belastningshastighet ska utföras före själva lift-off mätningen för att lättare kunna detektera t.ex. skador i spännstaget. I Figur 2.11 visas resultat från [6] från lift-off mätningar på ett korrosionsskadat spännstag och ett oskadat spännstag. Som framgår av resultaten är det skadade spännstaget mindre styvt och dessutom är den första delen av kurvan inte linjär. I [16] ges en liknande metod för äldre spännstag där det bedöms att det finns en risk för korrosionsskador. I denna metod utförs lift-off mätningen i tre steg samtidigt som både kraft och förskjutning mäts.

1. I första steget ökas kraften i steg om 5 % - 10 % av förväntad lift-off kraft till dess att lutningen på kurvan i kraft-förskjutningsdiagrammet kraftigt ökar. Att ankarstycket lyft ska bekräftas visuellt. Kraften sänks då till en nivå något under observerad lift-off kraft.
2. I steg 2 ökas kraften sedan igen i steg om 1 % - 2 % av den bedömda lift-off kraften från steg 1 till dess att ankarstycket lyft från ankarplattan. Syftet med steg 2 är att mer noggrant bestämma lift-off kraften. Kraften ska sedan sänkas under observerad lift-off kraft.
3. I steg 3 utförs ett "standard" lift-off test för att slutgiltigt bestämma lift-off kraften från ett kraft-förskjutningsdiagram. Syftet med att utföra mätningen i tre steg är att minska risken att skada spännstaget genom att gå till en för hög kraftnivå vid ett standard lift-off test.

Det rekommenderas att någon av dessa två metoder används för äldre spännstag eller om det bedöms, t.ex. genom en okulär inspektion, att det finns en risk för skador på spännstaget. Belastningshastigheten bör väljas till maximalt 5 % av uppspänningskraften per minut vid användning av någon av dessa metoder.

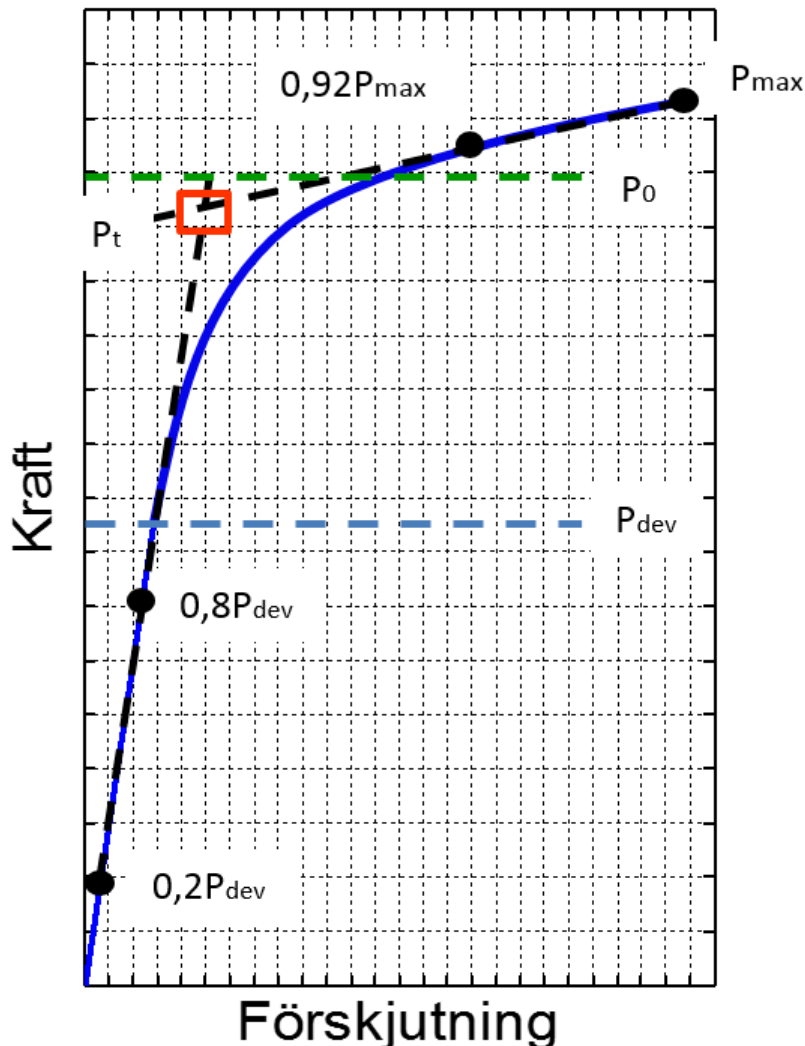


Figur 2.11. Skillnaden i beteende under ett lift-off test mellan ett spännstag med korrosionsskador (vänster) och ett oskadat spännstag (höger) [6]. Spännstagen är av typen SEEE, vilket är ett linbaserat system med gängade ankarstycken.

2.3.3 Tolkning av lift-off kraften

Lift-off kraften ska bestämmas genom interpolation av de två raka kurvdelarna i ett kraft-förskjutningsdiagram erhållet från en spännkraftsmätning utförd enligt rekommendationerna i avsnitt 2.3.2 enligt stegen nedan:

1. Kraft-förskjutningsdiagrammet tas fram genom att plotta kraften mot förskjutningen som uppmätts under lift-off testet. Värdena på både kraft och förskjutning ska nollas genom att subtrahera startvärdet från samtliga efterkommande värden. I t.ex. högra diagrammet i Figur 2.5 börjar första kraftvärdet på cirka -75 kN, vilket är en direkt felkälla vid bestämning av lift-off kraften om det inte korrigeras.
2. Kraften där den nedre kurvdelen börjar avvika från den första raka delen, kallad, P_{dev} , uppskattas visuellt, se Figur 2.12. Den nedre interpolationslinjen för bestämning av lift-off kraften ska sedan dras från punkten som motsvarar 20 % av P_{dev} upp till den punkt som motsvarar 80 % av P_{dev} . Anledningen till att linjen börjar vid 20 % av P_{dev} är för att utesluta den störning som ofta observeras i de första 10 % - 15 % i kraftförskjutningsdiagrammet, t.ex. i det högra diagrammet i Figur 2.5.
3. Den övre interpolationslinjen dras från slutpunkten på den övre raka kurvdelen, d.v.s. från den punkt som motsvarar maxkraften under mätningen, till den punkt som motsvarar 92 % av den maximala spännkraft som uppnåtts under mätningen, se Figur 2.12.
4. Den övre och undre interpolationslinjen interpoleras till en skärningspunkt som sätts lika med lift-off kraften och därmed spännkraften i spännstaget, se Figur 2.12.



Figur 2.12. Förslag på metod för att uppskatta lift-off kraften från ett kraft-förskjutningsdiagram från en domkraftmätning. Den röda kvadraten visar uppskattad lift-off kraft. $P_{\max}$ = Maximal kraft som uppnåts under mätningen, P_t = lift-off kraft, P_{dev} = den kraft då kurvan avviker från nedre linjära delen, P_0 = ursprunglig spännkraft.

2.3.4 Dokumentation från mätningen

Utförandet samt resultatet från mätningen ska dokumenteras där minst följande information ska ingå:

- Utförare av mätningen samt tidpunkt för mätningen.
- Temperatur i omgivande klimat vid mätningen.
- Typ av spännstag och ursprunglig uppspänningskraft.
- Utrustning:
 - × Typ av domkraft med aktuellt kalibreringsintyg.
 - × Typ av lägesgivare, mätområde och mätnoggrannhet.
- Placering av lägesgivare på spännstaget.
- Samplingsfrekvens och belastningshastighet.
- Maxkraft som uppnåts under mätningen.

- Samtlig mätdata i digitalt format, d.v.s. samtliga registrerade krafter och förskjutningar.
- Kraft-förskjutningsdiagram med tillhörande punkter enligt Figur 2.12 samt interaktionslinjer för tolkning av lift-off kraften.
- Spännkraften i spännstaget i form av lift-off-kraften.

3 Inspektionsprogram för spännstag

3.1 SVENSKA INSPEKTIONSPROGRAM

För majoriteten av de spännstag för vilka information samlades in i del 1 har det angetts att kvarvarande spännkrafter kontrolleras kontinuerligt efter installationen. Nedan ges en kortfattad beskrivning av de inspektionsprogram som olika anläggningsägare använder för att kontrollera och säkerställa spännkrafterna i sina anläggningar. Inspektioner och mätning av kvarvarande spännkraft utförs främst av externa entreprenörer/konsulter och sällan av anläggningsägarens egna personal.

- Inspektionsprogram 1: En anläggningsägare kontrollerar samtliga stag i en anläggning med ett intervall på 6 år. Acceptanskriterierna för den kvarvarande spännkraften är att den uppmätta spännkraften inte får understiga ursprunglig spännkraft med mer än 10 % eller överstiga ursprunglig spännkraft med mer än 5 %. Överskrids acceptanskriterierna justeras spännkraften till ursprunglig nivå.
- Inspektionsprogram 2: Inspektionsprogrammet består av att kontrollera spännkrafterna i ett antal slumpmässigt utvalda spännstag vart sjätte år, dock skall samtliga spännstag kontrolleras vart 10–15 år. Acceptanskriterierna för den kvarvarande spännkraften är en maximal avvikelse på ± 10 % från ursprunglig spännkraft. Överskridande av acceptanskriteriet rapporteras till ansvarig konstruktör alternativt anläggningsägaren som i varje enskilt fall beslutar om en eventuell åtgärd.
- Inspektionsprogram 3: Första inspektionen utförs efter 2 år och andra inspektionen efter 5 år (under garantitiden). Därefter utförs inspektioner var femte år.

I inspektionsprogram 1 och 2 som presenteras ovan ingår att höja eller sänka spännkrafterna till ursprunglig nivå i de fall acceptanskriterierna för spännkraft överskrids. För inspektionsprogram 3 har någon mer detaljerad information inte angetts. I samtliga inspektionsprogram ingår även okulära inspektioner av spännstagens status i samband med provningen.

3.2 INSPEKTIONSPROGRAM I OLIKA NORMER

Det finns ett flertal standarder, normer och rekommendationer som behandlar spännstag som ger rekommendationer för inspektion och testning av installerade spännstag. I föreliggande avsnitt presenteras en sammanställning av olika publicerade rekommendationer för spännstag inom kärnkrafts- och vattenkraftsindustrins samt generella rekommendationer för spännstag för berg- och jordförankringar.

3.2.1 Kärnkraft

Boiler and pressure vessel code section XI

Boiler and pressure vessel code section XI (BPVC) [18] reglerar inspektioner av spännkabelsystemen i reaktorinneslutningar med inspekterbara spännkablar. Fokus i BPVC är övervakning av spännkraftsförluster, d.v.s. mätning av kvarvarande spännkraft med domkraft. Spännkablar i en reaktorinneslutning delas in i olika grupper beroende på deras placering och funktion. Mätningar ska utföras ett, tre samt fem år efter det initiala täthetsprovet av reaktorinneslutningen som utförs innan reaktorn tas i drift. Därefter ska mätningar utföras vart femte år. Vid varje mättillfälle skall 4 % av det totala antalet spännkablar inom varje grupp testas, lägsta antalet som skall testas är dock fyra. Urvalet av spännkablar ska ske slumpmässigt, några anvisningar för hur urvalet ska utföras ges inte. En kabel inom varje spännkabelgrupp utgör en s.k. referenskabel och ska testas vid varje inspektion. Det totala antalet kablar som testas inom varje grupp behöver inte överstiga tio. I det fall de tre första mätningarna inte visar på någon onormal degradering av spännkabelsystemet kan antalet kablar som testas reduceras till 2 % eller maximalt fem inom varje grupp.

För varje mättillfälle ska kvarvarande spännkraft i spännkablar uppskattas med modeller för beräkning av betongens krypning och krympning samt spännstålets relaxation. Utifrån den ursprungliga uppspänningskraften kan sedan kvarvarande spännkraft uppskattas. Metoder för beräkning av spännkraftsförlusterna ges i BPVC. Den beräknade kvarvarande spännkraften är gränsvärdet för spännkraften i respektive spännkabelgrupp. Om spännkraften i en spännkabel uppgår till 90–95 % av gränsvärdet ska mätningar utföras på intilliggande spännkablar. Om spännkrafterna i dessa överstiger 90–95 % krävs inga ytterligare åtgärder. I annat fall ska orsaken till de stora spännkraftsförlusterna utredas. Understiger spännkraften 90 % av gränsvärdet i en enskild spännkabel ska orsaken till detta utredas. Särskild utredning krävs även i det fall flera mätningar på olika spännkablar visar större förluster än 90–95 % av gränsvärdet. Inga rekommendationer ges för hur utredningar ska genomföras eller för åtgärder såsom höjning av spännkrafter.

I samband med spännkraftsmätningarna ska även okulära inspektioner av förankring och omgivande betong utföras. En spännkabel per grupp ska spännas ner och inspekteras för skador/defekter. Ett antal av linorna i denna spännkabel ska dessutom testas i labb där de mekaniska egenskaperna hos spännstålet ska bestämmas. Rostskyddsfettet som används ska testas med avseende på bl.a. vatten och kloridinnehåll. Vid behov ska rostskyddsfettet bytas ut.

Forsmarks kärnkraftverk

I Forsmarks kärnkraftverk används en modifierad version av BPVC som främst skiljer sig med avseende på antal spännkablar som ska inkluderas, gränsvärden för spännkraften samt att rekommendationer ges för höjning av spännkrafter. Antalet spännkablar som ska testas vid varje inspektion är baserat på data från tidigare mätningar. Då både medelvärden och spridning är kända från samtliga spännkraftsmätningar bestäms antalet spännkablar som ska testas utifrån ett

konfidensintervall med förutbestämd bredd. Detta innebär att det rekommenderade antalet spännkablar som testas är sannolikheten 95 % att det förutbestämda intervallet kommer innefatta det verkliga medelvärdet på spännkraften i hela spännkabelgruppen. Gränsvärdet för kvarvarande spännkraft har satts lika med spännkraftsbehovet för respektive spännkabelgrupp för att bibehålla reaktorinneslutningens integritet och skyddsförmåga. För varje spännkabelgrupp beräknas en undre gräns för mätningen på en konfidensnivå på 95 %, d.v.s. sannolikheten är 95 % att denna lägre nivå på spännkraften understiger den verkliga medelkraften i spännkabelgruppen. Detta utförs för att ta hänsyn till spridningen i spännkrafter inom varje spännkabelgrupp. Vid understigande av gränsvärdet ska orsaken här till utredas och spännkabeln ska följas upp vid nästa inspektion. Höjning av spännkrafter ska endast utföras då det krävs för att säkerställa spännkraftsbehovet till nästa inspektion. I de fall spännkraften höjs ska detta ske till nivåer som understiger den ursprungliga uppspänningskraften.

3.2.2 Normer för jord- och bergförankringar

prEnISO 22477-5 Geotechnical investigation and testing

En ISO-standard [17] för undersökning och mätningar på geotekniska konstruktioner är under utveckling vilken kommer innehålla en del som behandlar tester av förankringar. Enligt de arbetsdokument som finns tillgängliga så kommer standarden endast behandla tester under uppspänningen, och således inte övervakning eller inspektion av spännstag över tid.

FIP: Design and construction of prestressed ground anchorages

Design and construction of prestressed ground anchorages [11] är rekommendationer avseende jord- och bergförankringar framtagna av FIP (Federation Internationale de la Precontrainte) 1996. Utformningen av ett inspektionsprogram avseende bl.a. mätning av spännkrafter ska tas fram av konstruktören i samband med designen av spännstagen. Detta ska bl.a. omfatta vilka spännstag som ska testas, intervallen för testerna och hur resultaten ska rapporteras. Användandet av lastceller rekommenderas. Rekommendationerna avseende inspektionsintervaller är olika beroende på syftet med inspektionen.

- Då syftet är att upptäcka korrosionsskador ska inspektioner utföras med maximalt sex månaders intervall under de tre första åren för att därefter utföras med ett maximalt intervall på fem år.
- Då syftet med inspektionen är att upptäcka mark- eller struktureller ska intervallet vara tre till sex månader i början av förankringarnas livslängd. Beroende på resultaten från inspektionerna kan intervallen ökas senare.
- I de fall då syftet med inspektionerna är att övervaka mark- eller struktureller i början av förankringens livslängd och senare för att upptäcka korrosion ska intervaller utföras med täta intervaller i början. Därefter kan inspektionerna utföras med minst fem års intervall.

Några specifika rekommendationer för inspektionsintervaller ges inte för det fall då spännkrafterna i spännstagen ska övervakas. Antalet spännstag som ska övervakas bestäms av konstruktören under designfasen. Som riktlinjer ges att då syftet med inspektionerna är att upptäcka korrosion ska det största av antingen 10

% av det totala antalet spännstag eller tre spännstag testas. För anläggningar med fler än 100 spännstag ska ytterligare 5 % av det antal som överstiger 100 ingå i inspektionerna. Är syftet med inspektionerna att endast övervaka markrörelser kan antalet reduceras till det största av 5 % av antalet spännstag eller tre spännstag. Variationer i spännkraften med ± 10 % är tillåtet. Om spännkraftsförlusterna överstiger 10 % ska orsaken till detta utredas. I det fall spännkraften har ökat till mer än 140 % av uppspänningskraften ska detta utredas.

BS8081: Code of practice for grouted anchors

Code of practice for grouted anchors, BS8081:2015 [13] är den brittiska normen för design och hantering av jord- och bergförankringar i form av spännstag. De generella kraven gällande övervakning av spännstag är att samtliga anläggningar där konsekvenserna av ett brott blir allvarliga ska inspektioner/övervakning av konstruktionen utföras. Detta ska antingen utföras genom rörelsemätningar på konstruktionen (vilket är den metod som rekommenderas) alternativt genom spännkraftsmätningar på installerade spännstag. Lastceller bör användas på spännstag där det är aktuellt att övervaka spännkraftsförluster. Rekommendationerna gällande antalet spännstag som skall ingå i en inspektion, intervall för inspektionerna samt acceptanskriterier för spännkraften är desamma som rekommenderas i FIP, se ovan.

PTI: Recommendations for prestressed rock and soil anchors

Recommendations for prestressed rock and soil anchors, utgiven av Post-tensioning Institute (PTI) [10], är de rekommendationer för spännstag för jord- och bergförankringar som används i Nordamerika. Rekommendationerna gällande inspektioner av installerade spännstag är väldigt begränsad. Ansvar för upprättande av ett inspektionsprogram bl.a. avseende inspektionsintervall, antalet spännstag som skall ingå och acceptanskriterier för spännkraft ligger på ingenjören som designar spännstagssystemet. Generella rekommendationer för inspektionsintervall är en till tre månader under den första tiden efter installationen därefter ska inspektionerna utföras med maximalt två års mellanrum.

Rekommendationerna för mätning av kvarvarande spännkraft är att det kan utföras både med domkraft eller genom installation av lastceller. Vidare bör ett system för övervakning av konstruktionens rörelser installeras. Konstruktionens rörelser över tid måste vara kända för att kunna härleda orsaken till eventuella ökningar av spännkrafterna samt för att kunna avgöra om eventuella åtgärder krävs.

JAA: Inspection and maintenance manual for ground anchors

Inspection and maintenance manual for ground anchors [12] utgiven av Japan Anchor Association är rekommendationer för inspektion av spännstag vars främsta syfte är att förankra geotekniska konstruktioner. Rekommendationerna är att underhåll av spännstag ska grundas på inspektioner, undersökning av spännstags integritet och vid behov åtgärder mot observerade skador/degraderingar. I normen delas en inspektion in i två delar, dels periodisk okulär inspektion av förankringen och dels en s.k. integritetsundersökning vilket

inkluderar mer detaljerad inspektion samt mätning av kvarvarande spännkraft. En integritetsundersökning ska utföras då resultaten från okulära inspektioner visar att detta är nödvändigt för att säkerställa spännstagets integritet. I de fall då det inte går att säkerställa spännstagets kondition enbart med okulära inspektioner ska integritetsundersökningar utföras kontinuerligt.

En inspektion för att undersöka installerade spännstags integritet sker i följande steg:

1. Förstudie. Innan en inspektion av spännstag genomförs ska en förstudie genomföras där all tillgänglig teknisk dokumentation om de installerade spännstagen samlas in och granskas. Detta innefattar bl.a. ritningar, tekniska handlingar såsom uppspänningsrapport och information om eventuella tidigare genomförda inspektioner.
2. Detaljerad okulär inspektion av synliga delar av spännstaget bl.a. ankarstykke, spännstål, omgivande betong och rostskyddsfett.
3. Lift-off test för att bestämma kvarvarande spännkraft i spännstaget.
4. Vid behov kan det vara aktuellt att spänna ner spännstaget och genomföra en inspektion främst med avseende på förekomst av korrosion under ankarstycket.
5. Prestandatest där draghållfastheten, låskraften samt den fria längden för spännstaget bestäms utifrån kraft-förskjutningsdiagrammet från en domkraftmätning.
6. Utvärdering av rostskyddsfettets egenskaper. Okulär inspektion av fett utförs med avseende på degraderingar av dessa korrosionsskyddande egenskaper. Vid behov ska prover tas för tester i laboratorium.
7. Ultraljudsundersökning för att detektera skador eller degraderingar.

Övriga undersökningar som kan bli aktuella är:

- Undersökning av omgivande mark och grundvatten. Kemisk analys ska utföras för att undersöka grundvattnets korrosivitet. Geotermiska värmekällor och eventuella risker för läckströmmar ska undersökas.
- Undersökning av konstruktionen i vilka spännstagen är installerade. Detta avser t.ex. rörelser och deformationer i konstruktionen.

Periodiska okulära inspektioner av spännstag ska utföras årligen under de tre första åren efter installationen, därefter ska de utföras med tre till fem års intervall. För spännstag som bedöms som extremt viktiga för konstruktionens integritet alternativt gamla spännstag ska inspektioner utföras årligen. Inspektioner som inkluderar mätningar av kvarvarande spännkrafter ska utföras inom fem år efter installation. För spännstag som bedöms som extremt viktiga för konstruktionens integritet ska spännkraftsmätningar utföras med två till tre års intervall. Antalet spännstag som ska inkluderas i en inspektion varierar beroende på syftet med inspektionen:

- I den första inspektionen som utförs efter installationen, första inspektionen för äldre spännstag (som inte tidigare inspekterats) samt för periodiska okulära inspektioner ska samtliga spännstag inkluderas.
- I en detaljerad okulär inspektion ska antalet spännstag som inkluderas vara det största av antingen 20 % av totala antalet spännstag eller fem stycken.

- Lift-off tester samt instrumentering med lastceller ska utföras på det största antalet av 10 % av totala antalet spännstag eller tre stycken.
- Inspektioner under ankarstycket i samband med ett lift-off test samt prestandatester ska utföras på det största antalet av 5 % av totala antalet spännstag eller tre stycken.

Acceptanskriterierna för kvarvarande spännkraft är att den ska överskrida 80 % av den ursprungliga spännkraften och understiga spännstagets dimensionerande bärförmåga. Spännstaget anses vara i god kondition om lutningen på kurvan (efter lift-off) i kraft-förskjutningsdiagrammet från lift-off testet är liknande lutningen från uppspänningen.

3.2.3 Normer/riktlinjer för vattenkraft

ICOLD Bulletin 158: Dam surveillance guide

ICOLD (International commission on large dams) bulletin 158 [19] ger generella rekommendationer för bl.a. inspektioner av vattenkraftsdammar. Det ges dock inga specifika rekommendationer för spännstag. Inspektioner delas upp i tre olika kategorier: rutininspektioner, periodiska inspektioner och formella inspektioner. Rutininspektioner utförs med korta intervall från några dagar upp till en gång om året och innefattar endast okulära inspektioner av delar som anses relevanta för anläggningens säkerhet. Syftet är att upptäcka relevanta förändringar och skador och degraderingar som påverkar anläggningen negativt. Periodiska inspektioner ska utföras med ett intervall på ett till två år. Syftet med de periodiska inspektionerna är att genomföra en genomgående bedömning av faktorer som påverkar anläggningens säkerhet baserat på resultat från mätningar och annan övervakning av anläggningen. Formella inspektioner ska utföras med ett intervall på fem år och innefattar bl.a. detaljerade tekniska utredningar.

Guidelines on dam safety management, ANCOLD

Guidelines on dam safety management [20] är de australiensiska riktlinjerna för dammsäkerhet och ges ut av ANCOLD (Australian national committee on large dams inc.). Riktlinjer ges för utformandet av inspektions- och övervakningsprogram för kraftverksdammar. Rekommendationerna för övervakning av spännstag avseende kvarvarande spännkraft är kortfattade och varierar beroende på dammens dammsäkerhetsklass. För dammar med en betydande risk för skador vid brott är frekvensen för inspektioner tio år, för dammar med en hög risk för skador och förlust av människoliv är frekvensen fem till tio år och för dammar i högsta dammsäkerhetsklassen är inspektionsfrekvensen fem år. För samtliga dammsäkerhetsklasser rekommenderas det att samtliga spännstag ska inkluderas vid varje inspektion alternativt att ett representativt antal väljs. Några acceptanskriterier för spännkraften anges inte.

General dam safety considerations DSC3G,

General dam safety considerations DSC3G [21] är den Nya Zeeländska dammsäkerhetsnormen som även nämner hantering av spännstag. Okulära inspektioner av förankringens status ska utföras med maximalt två års intervall. Inspektionen innefattar även byte av rostskyddsfettet i skyddshuven samt okulär

inspektion av betongen kring förankringen. I samband med den första mätningen av kvarvarande spännkraft som utförs ett år efter installationen ska spännkraften mätas i samtliga spännstag. Därefter ska mätningar utföras med fem års intervall. Beroende på dammsäkerhetsklass ska olika antal spännstag testas vid varje mätning. I den högsta och näst högsta dammsäkerhetsklassen ska 50 % respektive 33 % av alla spännstag testas vid varje mätning. För dammar i övriga dammsäkerhetsklasser ska spännkrafterna mätas i 10 % av antalet spännstag.

3.2.4 Övriga rekommendationer

Maintenance and monitoring of anchorages: guidelines

Denna artikel är en sammanställning av erfarenheter från spännstag för jord- och bergförankringar och ger riktlinjer och rekommendationer kring underhåll och övervakning av spännstag [14]. Även i dessa rekommendationer läggs en stor del av ansvaret för att utveckla ett inspektionsprogram på konstruktören av spännförankringarna. Detta omfattar bl.a. inspektionsintervaller, acceptanskriterier avseende både skador och kvarvarande spännkrafter samt hur resultaten ska dokumenteras. Relativt detaljerade riktlinjer för utformandet av inspektionsprogram ges dock i artikeln. Huvudsyftet med inspektioner ska vara att fastställa om några rörelser eller deformationer av den förankrade konstruktionen har skett samt att kontrollera att spännkraften i installerade spännstag uppfyller fastställda acceptanskriterier. Ett inspektionsprogram för en förankrad konstruktion rekommenderas därför att bestå av följande delar:

- Okulär inspektion av den förankrade konstruktionen avseende dess fysiska status.
- Övervakning av konstruktionens rörelser och deformationer.
- Okulär inspektion av samtliga installerade spännstag avseende deras fysiska status. Detta innefattar inspektion av hela förankringssystemet samt omkringliggande delar av konstruktionen som befinner sig i nära anslutning till spännstaget. För ett antal spännstag ska okulära inspektioner dessutom utföras av ankarstycket både över och under ankarplattan. Detta kan t.ex. utföras med fiberoptisk kamera. På ett antal spännstag ska rostskyddsfettet inspekteras vart femte år, detta kan utföras genom provtagning med efterföljande analys om det uppfyller kraven enligt standarder. I det fall vatten har trängt in i systemet ska vattenprover tas för att bestämma dess korrosivitet.
- Kvarvarande spännkrafter i ett antal spännstag ska bestämmas antingen genom installerade lastceller eller via mätningar med domkraft. I det fall installerade lastceller visar på stora variationer i spännkraft ska både okulära inspektioner samt mätningar av spännkraften med domkraft utföras.

Okulära inspektioner av installerade spännstag ska utföras årligen för konstruktioner utsatta för aggressiv miljö alternativt konstruktioner där ett eventuellt brott medför risk för förlust av liv eller stora materiella skador.

Antalet spännstag i en konstruktion där kvarvarande spännkrafter ska mätas bör uppgå till mellan 5 – 15 % av totala antalet spännstag. Mätningarna ska utföras med ett intervall mellan ett till fem år. För konstruktioner där ett eventuellt brott medför risk för förlust av människoliv och orsakar stora materiella skador bör 10 %

av spännstagen testas varje år. Alternativt kan samtliga spännstag i konstruktionen testas inom ett förbestämt tidsintervall, t.ex. tio år.

3.3 SAMMANFATTNING AV ANVISNINGAR FÖR SPÄNNSTAG

I Tabell 2 presenteras en översikt över anvisningarna kring inspektioner av spännstag som presenteras i normerna/riktlinjerna ovan avseende inspektionernas omfattning, inspektionsintervall samt acceptanskriterier. Som framgår av sammanställningen innefattar majoriteten av anvisningarna okulära inspektioner av spännstagens status och mätningar av kvarvarande spännkrafter. Intervallen för inspektioner skiljer sig relativt mycket åt beroende om spännkraftsmätningar eller okulära inspektioner avses. För spännkraftsmätningar är fem år det intervall som ges i de flesta av anvisningarna. För okulära inspektioner anges intervall mellan ett till fem år. Omfattningen av inspektionen varierar, för normer specifika för vattenkraften ska mellan 50 % till 100 % av spännstagen inkluderas i varje inspektion. För normer för generella jord- och bergförankringar anges att mellan 5 % till 15 % av totala antalet spännstag ska inkluderas i inspektionerna. I några av anvisningarna anges att första spännkraftsmätningen ska utföras tidigare än fem år, intervallen som då anges varierar mellan ett till tre år. Vanligaste acceptanskriterierna för lägsta tillåtna spännkraft är att uppmätta spännkrafter får avvika med 10 till 20 % från uppspänningskraften. I det fall ett spännstag inte uppfyller acceptanskriterierna justeras spännkraften till ursprunglig kraftnivå.

I majoriteten av anvisningarna ovan finns inte någon koppling till spännkraftsbehovet för att uppfylla konstruktionens bärförmåga eller integritet. I normerna för hantering av spännstag inom kärnkraftsindustrin är acceptanskriterierna kopplade till antingen konstruktionens integritet alternativt beräknade spännkrafter (som i sin tur är relaterade till konstruktionens integritet). Generella acceptanskriterier på spännkrafterna för en hel population av konstruktioner/spännstag (utan någon koppling till spännkraftsbehovet) medför en rad nackdelar jämfört med anläggnings-/spännstagspecifika acceptanskriterier:

- En justering av spännkraft är inte behovsstyrd för en enskild anläggning. En vanlig procedur är att samtliga spännstag spänns till samma nivå trots att spännkraftsbehovet i olika spännstag varierar. Behovet av den totala spännkraften kan då vara uppfyllt trots att spännkraften i enskilda spännstag underskrider de generella acceptanskriterierna.
- Höjningar av spännkraften kan om de utförs till nivåer som överskrider uppspänningskraften leda till att spännkraftsförlusterna accelererar, något som erfarenheter från kärnkraftsindustrin har indikerat. Det innebär att effekterna av höjningen kommer vara försvunna vid nästa mätning. Justeringar av spännkraften utifrån generella acceptanskriterier kan således få motsatt effekt då spännkraftsförlusterna ökar istället för minskar med tiden.
- Bidraget från spännstagen till den totala säkerhetsmarginalen mot brott för en enskild vattenkraftsanläggning blir svår att kvantifiera. Detta gäller speciellt för anläggningar med gamla spännstag där spännkraftsbehovet ofta inte är känt utan att utföra nya beräkningar av bärförmågan.
- Säkerheten mot brott kommer variera inom beståndet av vattenkraftsanläggningar såväl mellan olika anläggningsdelar inom samma

anläggning då marginalerna mellan applicerad spännkraft och spännkraftsbehovet är unik för varje anläggningsdel. Detta kan t.ex. medföra att dammar i samma dammsäkerhetsklass eller olika dammdelar inom samma anläggning kommer ha olika säkerhet mot brott. Dessutom kan säkerheten mot brott variera mellan dammar i olika dammsäkerhetsklasser, där dammar i högre dammsäkerhetsklass kan ha lägre säkerhet än dammar i högsta dammsäkerhetsklassen.

Det bör dock påpekas att även om spännkraften i ett spännstag överskrider spännkraftsbehovet vid en enskild spännkraftsmätning inte per automatik innebär att spännstagets funktion är uppfyllt fram till nästa mätningstillfälle. Spännkraftsförlusternas utveckling sedan tidigare utförda spännkraftsmätningar och hur väl den uppmätta spännkraften stämmer överens med en prognos över spännkraftsförlusterna är även viktiga att beakta.

Tabell 2. Översikt över anvisningar för spännstag i olika normer/riktlinjer.

Norm	Tester avser	Intervall	Antal spännstag	Acceptanskriterier för spännkraft
Kärnkraft				
ASME BPVC [18]	Spännkraftsmätning, okulär inspektion och tester av rostskyddsfett	1 respektive 3 år efter uppspanning, därefter 5 år	Sluppmässigt urval, 4 % av totala antalet, minst 4 / grupp	Spännkraften ska överstiga 90 % av beräknad spännkraftsförlust vid tidpunkten för inspektionen.
Forsmarks program	Spännkraftsmätning, okulär inspektion och tester av rostskyddsfett	5 år	Baserat på data över spännkrafter, olika antal för varje spännstagsgrupp. Urvalet sker slumpmässigt.	Spännkraften som krävs för att säkerställa strukturens integritet. Marginaler beräknas utifrån spridningen i uppmätta spännkrafter.
Berg- och jordförankringar				
Design and construction of ground anchorages, FIP [11]	Okulär inspektion, rörelsemätningar, spännkraftsmätningar	För korrosionsskador: 6 månader under första 6 åren, därefter vart femte år. Mark- eller konstruktionsrörelser: 3-6 månader. Både rörelser och korrosion: 5 år, tätare intervaller i början av spännstagens livslängd	10 % av totala antalet spännstag, dock minst 3 st. För anläggningar med fler än 100 stag ska 5 % av överstigande antalet inkluderas. Vid mätningar av spännkraft ska konstruktören bestämma antalet som ska övervakas.	Variationer ± 10 % av uppspanningskraften är tillåtet.
Code of practice for grouted anchors, BS8081 [13]	Samma som FIP	Samma som FIP	Samma som FIP	Samma som FIP
Recommendations for prestressed rock and soil anchors, PTI [10]	Okulär inspektion, spännkraftsmätning	1 till 3 månader första tiden efter installationen, därefter maximalt 2 år.	Bestäms av konstruktören vid dimensioneringen.	Bestäms av konstruktören vid dimensioneringen.
Inspection and maintenance manual for ground anchors, JAA [12]	Okulär inspektion, spännkraftsmätning	Okulär inspektion: årligen de första 3 åren efter installation, därefter 3 till 5 år. Spännkraftsmätningar: 5 år, för spännstag som är extremt viktiga för konstruktionens integritet: 2 - 3 år.	Första okulär inspektion: samtliga spännstag. Spännkraftsmätning: 10 % av totala antalet, dock minst 3 st.	Spännkraften ska överstiga 80 % av uppspanningskraften och understiga spännstagets dimensionerande bärförmåga.

Norm	Tester avser	Intervall	Antal spännstag	Acceptanskriterier för spännkraft
Maintenance and monitoring of anchorages: guidelines [14]	Okulär inspektion, spännkraftsmätning	Okulär inspektion av konstruktioner i aggressiva miljöer eller där brott innebär risk för förlust av människoliv ska utföras årligen. Spännkraftsmätningar: 1 - 5 år.	5 -15 % av totala antalet spännstag.	Inga
Vattenkraft				
ICOLD Bulletin 158: dam surveillance guide [19]	Okulär inspektion, periodiska inspektioner och formella inspektioner	Okulär inspektion: 1 år. Periodisk inspektion: 1-2 år. Formella inspektioner: 5 år.	Inga	Inga
General dam safety considerations, DSC3G [21]	Okulär inspektion, spännkraftsmätning	Okulär inspektion: maximalt 2 år. Spännkraftsmätning: 1 år efter installation, därefter 5 år.	Högsta dammsäkerhetsklassen: 50 % av totala antalet. Näst högsta dammsäkerhetsklassen: 33 % av totala antalet. Övriga dammsäkerhetsklasser: 10 % av totala antalet.	Inga
Guidelines on dam safety management, ANCOLD [20]	Spännkraftsmätning	Högsta dammsäkerhetsklass: 5 år. Näst högsta dammsäkerhetsklass: 5 - 10 år.	Samtliga spännstag alternativt ett representativt antal.	Inga
Svensk dammägare 1	Okulär inspektion, spännkraftsmätning	6 år	Samtliga spännstag.	Ursprungliga spännkraften får inte understigas med mer än 10% eller överstigas med mer än 5 %.
Svensk dammägare 2	Okulär inspektion, spännkraftsmätning	6 år.	Sluppmässigt antal spännstag, samtliga stag ska dock testas under en period på 10-15 år.	Variationer ± 10 % av uppspänningskraften är tillåtet.
Svensk dammägare 3	Spännkraftsmätning	Första mätning inom 2 år, därefter 5 år.	Inga	Inga

3.4 REKOMMENDATIONER FÖR UTFORMNING AV INSPEKTIONSPROGRAM FÖR SPÄNNSTAG INOM VATTENKRAFTEN

3.4.1 Inspektionsprogram

Baserat på den sammanställning av erfarenheter och rekommendationer i föregående avsnitt ges rekommendationer för utformning av inspektionsprogram för spännstag inom vattenkraftsindustrin i detta kapitel. Vid utformning av ett inspektionsprogram för spännstag i vattenkraftstillämpningar bör följande två olika inspektioner ingå, vilka beskrivs mer ingående i avsnitt 3.4.2 och 3.4.3.

- Årlig okulär inspektion.
- Detaljerad inspektion.

I det fall ett inspektionsprogram ska gälla för befintliga spännstag ska den första inspektion som utförs inom programmet vara en detaljerad inspektion som då utgör en referens för både framtida årliga okulära inspektioner och detaljerade inspektioner avseende spännstagens status.

I det fall ett inspektionsprogram ska utformas för en nyinstallation av spännstag ska den första okulära inspektionen utföras när samtliga spännstag är installerade alternativt direkt efter uppspänningen för varje enskilt spännstag. Den första detaljerade inspektionen rekommenderas att utföras inom garantitiden för installationsarbetet, oftast inom två år efter installationen. Det är i detta fall förhållandena efter uppspänningen som utgör referens för spännstagens status i kommande inspektioner.

I samband med upprättandet av ett inspektionsprogram bör följande information om spännstagen i anläggningen vara tillgänglig:

- Antal installerade spännstag.
- Installationsår.
- Ursprunglig spännkraft och spännkraftsbehov, d.v.s. lägsta spännkraft för att uppfylla syftet med installationen, t.ex. säkerställa anläggningens stabilitet mot yttre laster.
- Spännstagssystem: typ av system, tillverkare, förankringssystem, antal linor/trådar och diameter på spännstaget.
- Materialdata: flyt- och draghållfasthet och elasticitetsmodul.
- Spännstagens längd: totala längden samt fri- och förankringslängd.
- System för korrosionsskydd.
- Resultat från tidigare inspektioner eller mätningar av kvarvarande spännkraft.
- Eventuell instrumentering och tidigare mätdata.
- Kvalitet på ingjutningsbruk.
- Bergkvalitet i undergrunden

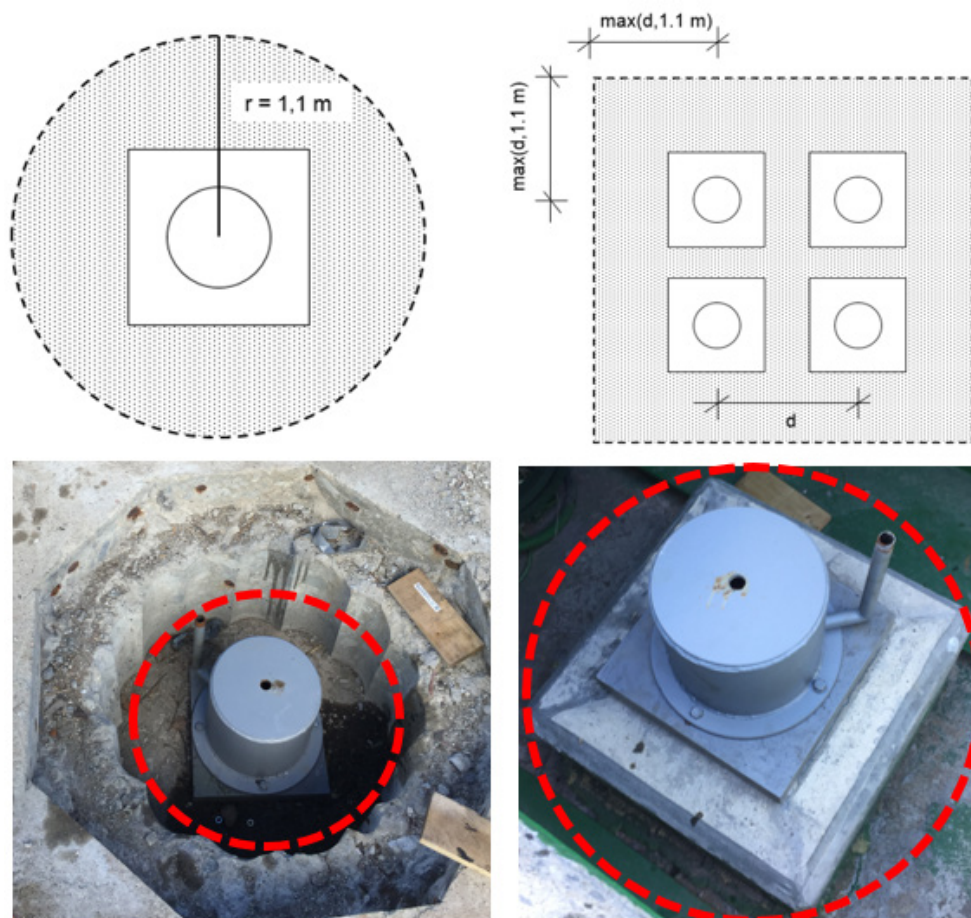
3.4.2 Årlig okulär inspektion

Detta innefattar en okulär inspektion över installerade spännstag där skyddshuv, synliga delar av övriga delar i förankringssystemet, t.ex. ankarplattan, och omkringliggande betong i förankringszonen inkluderas. Definitionen av förankringszonen varierar mellan olika fall, se även Figur 3.1

- I det fall en spännklack eller annan betongkonstruktion gjutits för installationen av spännstagen ska hela denna anses tillhöra förankringszonen.
- I det fall spännstaget är nedsänkt i förhållande till konstruktionens yta, tex. då hål borrats i betongen för placering av spännstag, är det den betongytan i nedsänkningen som utgör förankringszonen, se Figur 3.1
- För ett enskilt spännstag som installerats direkt i befintlig konstruktion definieras förankringszonen som det område som ligger inom en radie på 1,1 m från centrum av ankarstycket.
- För en grupp av spännstag definieras förankringszonen som det område som sträcker sig en sträcka utanför de yttre spännstagen som motsvarar centrumavståndet mellan de enskilda spännstagen, dock maximalt 1,1 m.

Den årliga okulära inspektionen avser att detektera synliga defekter och degraderingar av ingående komponenter såsom synliga sprickor i betong och stålkomponenter, läckage av rostskyddsfett och synliga korrosionsangrepp på stålkomponenter. Inspektionen ska även innefatta eventuell instrumentering och tillhörande kablage. Skyddshuven behöver inte monteras bort från spännstagets förankring, det är tillräckligt med utvändig översyn av skyddshuven. I samband med den första inspektionen ska samtliga spännstag, omgivande förankringszon samt konstruktionsdelen där spännstagen installerats fotograferas. Genom att fotografera hela konstruktionsdelen där spännstagen installerats kan eventuella sekundära effekter av spännstagen, framförallt eventuell sprickbildning dokumenteras och följas upp. Dessa foton ska sedan användas som referens under framtida inspektioner. I det fall som avvikelser från referensfotot upptäcks ska detta dokumenteras både i en inspektionsrapport och genom fotografering. Resultaten från varje inspektion ska föras in i ett inspektionsprotokoll alternativt i en databas över spännstagen som är installerade i anläggningen. Minimiinformation från varje inspektion som ska införas i inspektionsprotokollet är spännstagets namn/nummer, tidpunkt för inspektionen, vem som utfört inspektionen samt resultatet av inspektionen. I de fall en degradering eller skada noteras på ett spännstag ska orsaken till detta fastställas och lämplig åtgärd ska vidtas. Inspektionen ska då utökas och även omfatta demontering av skyddshuven för inspektion under denna.

Den årliga okulära inspektionen kan utföras t.ex. som en del av ronderingen/allmänna översynen av anläggningen och bör omfatta samtliga installerade spännstag. Efterföljande inspektioner bör utföras under ungefär samma tid nästföljande år. De år som en detaljerad inspektion, se avsnitt 3.4.3, utförs så ingår den okulära inspektionen i denna.



Figur 3.1. Definition av förankringszonen. Enskilt spännstag (överst vänster) och grupp av spännstag (överst höger) som är ytligt placerade i konstruktionen. Spännstag nedsänkta i konstruktionen (nederst vänster) samt spännstag med spännklack (nederst höger).

3.4.3 Detaljerad inspektion

Detaljerade inspektioner rekommenderas att utföras med ett intervall på fem år, för nyinstallerade spännstag ska första inspektionen ske inom garantitiden, vanligen inom två år från installationen, därefter är intervallet för inspektioner fem år. Avsteg från rekommendationen om ett intervall på fem år kan göras utifrån en anläggnings förutsättningar, då rekommenderas ett intervall på mellan fyra till sex år. Det kan t.ex. vara en äldre anläggning med kända problem där det bedöms att inspektionerna ska utföras med tätare intervall eller en anläggning där en nyinstallation nyligen utförts utan några kända problem. Ytterligare en anledning att utföra den detaljerade inspektionen med andra intervall än fem år kan vara av rent ekonomiska eller praktiska orsaker, t.ex. harmonisering med andra kontroller i anläggningen. Intervallet för en detaljerad inspektion ska dock aldrig överstiga sex år. Varje detaljerad inspektion ska utföras på samma tid på året, detta för att minimera inverkan av omgivande klimat på resultaten. En detaljerad inspektion består av följande tre delar.

1. Okulär inspektion. Den okulära inspektionen utförs enligt avsnitt 3.4.2. som då utökas att även inkludera demontering av skyddshuv och inspektion av synliga delar av spännstag och ankarplatta.

2. Inspektion av rostskyddsfettet i skyddshuven. Efter demontering av skyddshuven ska rostskyddsfettet inspekteras med avseende på dess korrosionsskyddande egenskaper, att rätt volym fett finns i skyddshuven samt att inget läckage av fett förekommer. Vid misstanke om eventuell degradering av fettets korrosionsskyddande egenskaper, t.ex. färgförändring av fett [22], ska prover tas för laboratorieanalys. Rostskyddsfettets egenskaper ska överensstämma med kraven i bilaga B till SS-EN-1537 [8]. Detta innefattar bl.a. att fastställa vattenhalten och förekomsten av nitrat, sulfider och vattenlösliga klorider i rostskyddsfettet. Eventuellt inläckande vatten ska noteras och orsaken till inläckaget ska utredas och åtgärdas.
3. Mätning av kvarvarande spännkraft med domkraft som ska utföras enligt metoden som presenteras i avsnitt 2.2. I de fall där den i avsnitt 2.2 föreslagna mätmetoden har använts vid tidigare detaljerade inspektioner rekommenderas det att kurvorna i kraft-förskjutningsdiagrammen jämförs med avseende på lutningen av de båda kurvdelen. Detta för att kunna uppskatta förändringar i förankringszonens status. Stora skillnader i uppmätt styvhet mellan olika mätningar kan vara en indikation på en degradering av förankringszonen.

Inspektionens omfattning

Det rekommenderade antalet spännstag som bör ingå i en inspektion är relaterat till vilken dammsäkerhetsklass som anläggningen tillhör. Nedan ges rekommendationer för andelen av det totala antalet spännstag som bör inkluderas i en detaljerad inspektion:

- Dammar i dammsäkerhetsklass A och B: 50 % av det totala antalet spännstag ingår i varje inspektion. Det exakta antalet spännstag som ska ingå i en enskild inspektion kan varieras, dock ska samtliga spännstag i en anläggning ha undergått en detaljerad inspektion under en period på tio år.
- Dammar i dammsäkerhetsklass C: 33 % av det totala antalet spännstag ingår i varje inspektion. Det exakta antalet spännstag som ska ingå i en enskild inspektion kan varieras, dock ska samtliga spännstag i en anläggning ha undergått en detaljerad inspektion under en period på femton år.
- Dammar i RIDAS-klass D: Dammägaren kan välja utifrån anläggningens förutsättningar att hantera spännstagen som för en anläggning i antingen dammsäkerhetsklass B, C eller RIDAS-klass E (se nedan).
- Dammar i RIDAS-klass E: 20 % av det totala antalet spännstag ingår i varje inspektion. Det exakta antalet spännstag som ska ingå i en enskild inspektion kan varieras, dock ska samtliga spännstag i en anläggning ha undergått en detaljerad inspektion under en period på tjugofem år.

Spännstag där det krävs stora insatser för att kunna mäta spännkraften, t.ex. spännstag till lucklager eller för spännstag som är försedda med lastceller eller annan utrustning för kraftmätning behöver inte inkluderas i den detaljerade inspektionen. Dessa spännstag ska dock inkluderas i den årliga okulära inspektionen. Fördelningen av utvalda spännstag ska vara sådan att avsedda antalet spännstag i varje s.k. spännstagsgrupp testas. Samtliga spännstag i en anläggning delas in i spännstagsgrupper baserat på följande:

- Spännstag inom en enskild konstruktionsdel, t.ex. pelare, skibord, monolit, ledmur, utskov eller mekanisk utrustning såsom generatorring eller lucklager, anses tillhöra en enskild spännstagsgrupp.
- Spännstagens avsedda funktion. I de fall en konstruktionsdel har försetts med spännstag som uppfyller olika funktioner ska dessa delas in i separata spännstagsgrupper. Detta kan t.ex. vara en konstruktionsdel där vissa av spännstagen installerats både för förankring i berg och vissa har enbart installerats i betongen för att motverka sprickbildning. Dessa bör då betraktas som två enskilda spännstagsgrupper trots att de ingår i samma konstruktionsdel.

I de fall antalet spännstag i en spännstagsgrupp är udda kan antalet spännstag som ska inkluderas i inspektionen rundas av neråt till närmaste hela antal spännstag. Anpassning av urvalet i övriga spännstagsgrupper ska då vara sådant att det rekommenderade antalet spännstag i anläggningen inkluderas i inspektionen. Övriga spännstag i spännstagsgruppen ska testas vid nästa detaljerade inspektion. Minst ett spännstag i varje spännstagsgrupp bör testas vid varje inspektion.

Observera att spännstag som är försedda med lastceller eller annan utrustning för kraftmätning kan exkluderas från spännkraftsmätning med domkraft i en detaljerad inspektion. De spännstag som ska ingå i spännkraftsmätningarna är då det rekommenderade totala antalet icke instrumenterade spännstag. Okulär inspektion samt inspektion av rosskyddsfettet ska dock alltid utföras även på instrumenterade spännstag. Då ingår även att inspektera samtliga delar av instrumenteringen. Vid misstanke om brister i systemet ska funktionskontroll av samtliga ingående delar i systemet utföras.

I de anläggningar som har relativt få spännstag installerade, mindre än cirka tio spännstag totalt, rekommenderas att samtliga spännstag testas vid varje detaljerad inspektion.

Acceptanskriterier för kvarvarande spännkraft

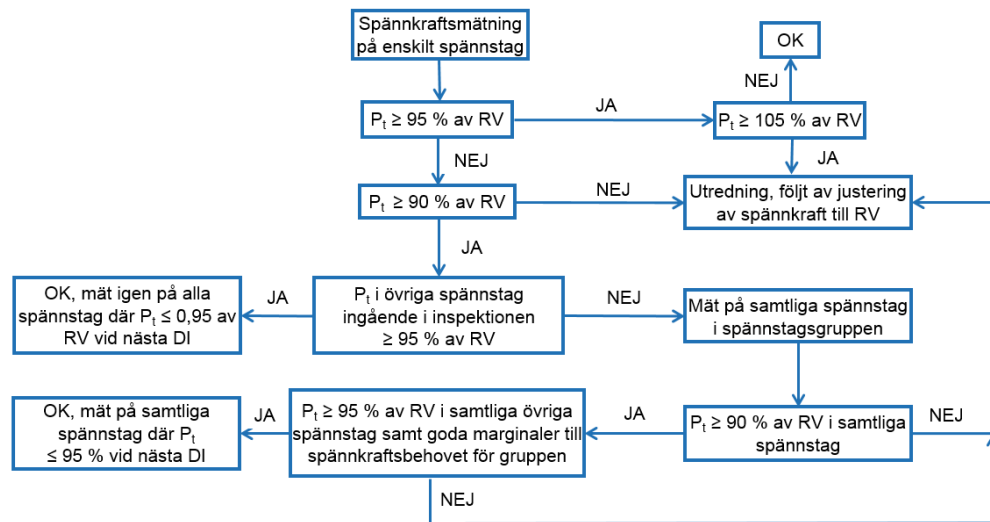
För nya spännstag som installeras ska tillräckliga marginaler mellan uppspänningskraften och spännkraftsbehovet fastställas så att någon justering av spännkrafterna inte krävs under spännstagens livslängd. Vidare ska utvecklingen av spännkraftsförlusterna prognosticeras, t.ex. genom beräkningar av spännkraftsförluster enligt EC2, för hela livslängden på spännstagen. Utifrån prognosen ska prognosticerad spännkraft tas fram för varje inspektionstillfälle, vilket är ett riktvärde för hur stor spännkraften teoretiskt bör vara vid varje inspektion. Riktvärdet för spännkraften ska alltid överskrida spännkraftsbehovet för varje spännstag, även då dess avsedda tekniska livslängd är uppnådd. För befintliga spännstag kan olika metoder användas för att ta fram riktvärden på spännkrafterna:

- Liknande analyser som vid nyinstallation av spännstag där sedan förlusterna prognosticeras från installationen och över hela den tekniska livslängden.
- Finns mätdata tillgänglig från både uppspänningen och efterföljande mätningar så kan framtida spännkrafter prognosticeras med en regressionsanalys av mätdata.

Rekommendationer och riktlinjer för hur marginaler mellan spännkraftsbehov och applicerad spännkraft samt uppskattning av spännkraftsförluster kommer tas fram i nästa del i föreliggande projekt. Detta innefattar även riktlinjer för framtagande av riktvärden på spännkraften.

Generellt är acceptanskriteriet för kvarvarande spännkraft att den uppmätta spännkraften i varje enskilt spännstag minst ska uppgå till 95 % av riktvärdet på spännkraften. Följande rekommendationer gäller då acceptanskriteriet inte uppfylls, en sammanfattning ges även i Figur 3.2:

- I det fall spännkraften i ett enskilt spännstag understiger 95 % av riktvärdet på spännkraften men spännkraften i övriga spännstag i samma spännstagsgrupp som ingår i inspektionen överstiger 95 % av respektive riktvärde krävs ingen ytterligare åtgärd. Spännstaget ska dock testas igen vid nästa detaljerade inspektion.
- I det fall spännkraften i ett eller fler av de övriga spännstag som ingår i inspektionen understiger 95 % av riktvärdet ska inspektionen utökas till att omfatta samtliga spännstag i gruppen. Överskrider spännkraften i övriga spännstag 95 % av respektive riktvärde samt att marginalen ner till spännkraftsbehovet för spännstagsgruppen är tillräcklig krävs inga ytterligare åtgärder. Spännstagen som inte uppfyller acceptanskriteriet på 95 % av riktvärdet ska testas vid nästa detaljerade inspektion. Om spännkrafterna i ett eller fler av de övriga spännstagen underskrider 95 % av riktvärdet alternativt att det bedöms vara en risk att spännkraftsbehovet inte uppfylls till nästa inspektion ska en noggrann undersökning av spännstagets status utföras för att utreda orsaken till spännkraftsförlusterna. Om möjligt bör spännstaget spännas ner för att kunna inspektera dess status under ankarstycket. Om inga uppenbara orsaker till de stora spännkraftsförlusterna kan identifieras ska spännstaget spännas upp till en kraftnivå som motsvarar riktvärdet för kvarvarande spännkraft för inspektionen. Spännstaget ska testas vid efterföljande detaljerade inspektion. Denna procedur ska även utföras i de fall spännkraften i ett enskilt spännstag understiger 90 % av riktvärdet alternativt understiger spännkraftsbehovet för det enskilda spännstaget.
- För spännstag där uppmätta spännkrafter vid två eller fler efterföljande detaljerade inspektioner understigit 95 % av riktvärdet för spännkraft bör spännkraften höjas till riktvärdet för inspektionen.
- I det fall spännkraften i ett spännstag har ökat får inte spännkraften överstiga uppspänningskraften med mer än 5 %. I annat fall ska orsaken till ökningen utredas. Orsaken till en ökning ska även utredas om spännkraften vid någon av de tidigare utförda inspektionerna underskridit uppspänningskraften, d.v.s. någon spännkraftsförlust ska inte tidigare ha konstaterats i spännstaget.



Figur 3.2. Flödesschema för utvärdering av uppmätta spännkrafter. P_t = uppmätt spännkraft vid inspektion, DI = detaljerad inspektion, RV = riktvärde på spännkraft för inspektionen.

I Tabell 3 redovisas en sammanfattning över rekommendationerna för utformning av inspektionsprogram för spännstag.

Tabell 3. Sammanfattning av rekommendationer för utformning av inspektionsprogram för spännstag.

Antal spännstag	Intervall	Acceptanskriterier för spännkraft
Dammsäkerhetsklass A, B: 50 % av totala antalet spännstag i anläggningen. 50 % av spännstagen i varje spännstagsgrupp ska ingå i inspektionen.	Befintliga spännstag: 5 år. Nya spännstag: första inspektion 2 år efter installation, därefter 5 år. Undantag kan göras utifrån en enskilds anläggnings förutsättningar. Intervallet kan då vara 4 – 6 år.	Kvarvarande spännkraft ska överstiga 95 % av ett riktvärde. Riktvärden ska tas fram vid dimensioneringen av spännstagen.
Dammsäkerhetsklass C: 33 % av totala antalet spännstag i anläggningen. 33 % av spännstagen i varje spännstagsgrupp ska ingå i inspektionen.	Dammsäkerhetsklass A, B: Samtliga spännstag ska testas inom en tioårsperiod. Dammsäkerhetsklass C: Samtliga spännstag ska testas inom en femtonårsperiod.	
RIDAS-klass D: Kan väljas som antingen klass B, C eller E.	RIDAS-klass D: Kan väljas som antingen klass B, C eller E.	
RIDAS-klass E: 20 % av totala antalet spännstag i anläggningen. 20 % av spännstagen i varje spännstagsgrupp ska ingå i inspektionen.	RIDAS-klass E: Samtliga spännstag ska testas inom en 25-årsperiod.	

4 Instrumentering av spännstag

4.1 ALLMÄNT

Instrumentering av spännstag är ett komplement till att utföra mätningar av kvarvarande spännkraft med domkraft. Absolut vanligast är att installera lastceller mellan ankarstycke och ankarplatta som direkt mäter kraften i spännstaget.

Instrumentering har flera fördelar gentemot mätningar med domkraft:

- Instrumenteringen ger, om den loggas, en kontinuerlig övervakning av spännkrafterna i spännstagen. Mätningen kan även larmsättas vilket medför att eventuella ändringar i spännkraften kan upptäckas då de inträffar och inte i samband med domkraftsmätningarna.
- Används ett system av mätningar med såväl lastcell som stödjande mätningar, t.ex. temperatur, rörelser, m.m., så kan variationer i spännkraft beroende på yttre faktorer lättare analyseras.
- Vid uppspänningen kan spännkraften i spännstagen bestämmas mer noggrant jämfört med domkraftsmätningar då bl.a. osäkerheterna med domkraftsmätningar elimineras vid uppspänningen. Detta ger även en uppfattning om noggrannheten i utförd domkraftsmätning.
- Vid uppspänningen kan låsförlusterna vid killåsningen kvantifieras för respektive spännstag.
- Instrumentering är kostnadseffektivt, särskilt för anläggningsägare med stort antal spännkabelinstallationer. Större anläggningsägare har dessutom infrastrukturen för mätdatahantering på plats, med färdiga rutiner för uppföljning och åtgärder. Denna fördel är än tydligare för svåråtkomligt monterade spännkablar.

Ett antal nackdelar med instrumentering jämfört med domkraftsmätningar är:

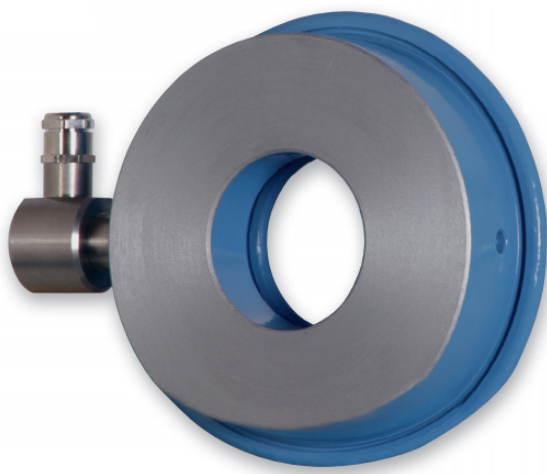
- Givarnas tillförlitlighet över tid, bl.a. orsakat av drift, kan inte kontrolleras då en tillförlitlig kalibrering av givarna är svår att utföra utan att spänna ner spännstaget och demontera lastcellen. En möjlighet är att utföra en verifiering av lastcellens mätnoggrannhet genom en domkraftsmätning. Dock visar erfarenheten att lastceller har lång livslängd och hög tillförlitlighet (se avsnitt 4.3)
- Mätningar utförs endast på instrumenterade spännstag.
- För loggning av lastceller krävs någon form av datainsamlingssystem.
- Utrymmet för att bibehålla en konkurrensutsatt högkvalitativ nivå på provningsföretag kommer att minska om behovet av deras tjänster minskar.

Ett möjligt alternativ är att installera töjningsgivare direkt på spännstaget i stångbaserade system eller på enskilda linor i linbaserade system. Instrumentering med töjningsgivare har flertalet nackdelar jämfört med lastceller:

- Töjningsgivare mäter inte kraften utan istället förändring i töjning. Kraften måste sedan beräknas från spännstagets mekaniska egenskaper. Rent teoretiskt kan därför inte spännstålets relaxation mätas med töjningsgivare då relaxation är förlust av spänning under konstant töjning. Detta medför att en del av spännkraftsförlusterna inte kan mätas med töjningsgivare.
- I linbaserade system mäts krafterna endast i de linor som instrumenteras och kraften i hela spännstaget måste räknas fram. Detta introducerar en osäkerhet då det sannolikt finns en viss spridning i kraft mellan de olika linorna.
- Priset för töjningsgivare är betydligt lägre än för lastceller. Installationsarbetet är dock betydligt mer tidskrävande då varje töjningsgivare ska monteras individuellt på spännstaget. Vid användande av lim måste dessutom limmet ges tillräcklig tid för härdning. Dessutom är kabeldragningen krångligare och kräver ofta specialanpassning av förankringssystemet då kablarna måste föras ut ur foderröret.
- Töjningsgivare är betydligt mer känsliga för mekaniska åverkan under montering, installation samt uppspänning. I en studie på spännstag inom kärnkraftsindustrin försågs totalt femton linor på tre olika spännstag med töjningsgivare. Endast två av dessa töjningsgivare överlevde uppspänningen och de gav otillförlitliga resultat [7].

4.2 LASTCELLER

Lastceller som används för att mäta krafter i spännstag är utformade som en ring vilket möjliggör placering av lastcellen mellan ankarstycke och ankarplatta. Spännstaget passerar då igenom hålet i mitten av lastcellen, se Figur 4.1. Spännkraften i spännstaget kan därmed mätas direkt av lastcellen.

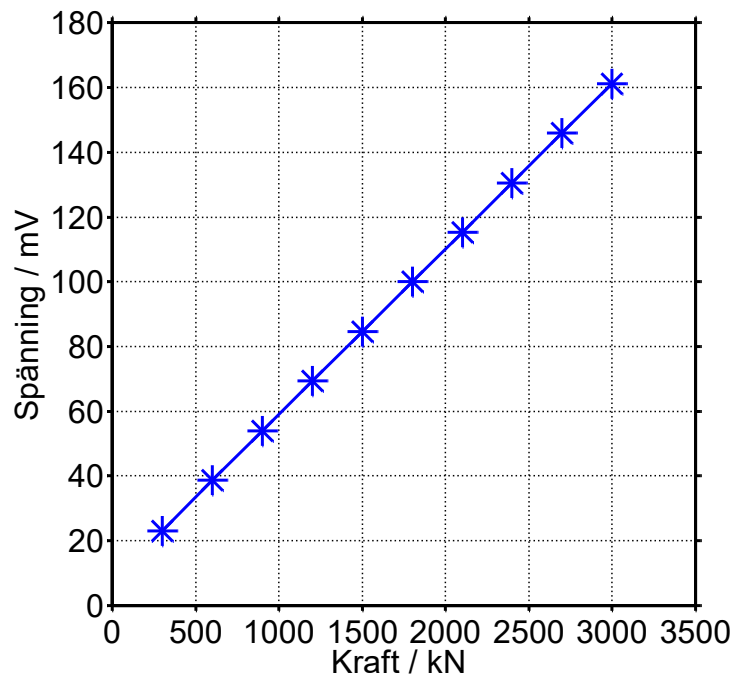


Figur 4.1. Lastcell för användning till spännstag, bild från Glötzl produktdatablad för lastcell Glötzl KK.

Principen för att mäta spännkraften varierar mellan olika typer av lastceller,

- Hydraulisk lastcell där kraften mäts genom att registrera trycket i en hydraulisk vätska. Dessa består normalt av två sammankopplade stålringar där utrymmet mellan stålringarna är fyllt med en hydraulisk vätska, vanligtvis olja. Detta tillåter en viss rörelse mellan ringarna i lastcellens riktning. När lastcellen utsätts för en yttre belastning rör sig stålringarna närmare varandra vilket ökar trycket i vätskan. Trycket i vätskan registreras vanligtvis med piezoelektrisk givare, manometer eller töjningsgivare med vibrerande sträng. Hydrauliska lastceller är den typ av lastcell som påverkas mest av förändringar i omgivande temperatur. För att kunna ta hänsyn till detta bör temperaturmätningar alltid utföras i anslutning till kraftmätningen.
- Lastcell med töjningsgivare där lastcellen består av en ring av höghållfast stål vilken är utrustad med töjningsgivare. Vanligast är trådtöjningsgivare eller givare med vibrerande sträng. Töjningsgivarna mäter töjningen i stålringen vilken sedan räknas om till en kraft via en s.k. kalibreringsfaktor. Antalet töjningsgivare som används varierar mellan olika tillverkare. Vanligast är mellan 8 och 16 stycken. Det relativt stora antalet givare möjliggör att kunna ta hänsyn till excentrisk belastning och temperaturvariationer.
- Lastceller med lägesgivare, t.ex. LVDT (Linear Variable Displacement Transducer) liknar principiellt lastceller med töjningsgivare. Skillnaden är att förskjutningen orsakad av den yttre kraften mäts av lägesgivare istället för töjningsgivare. Denna typ är ovanlig för applikation för bergförankringar, men nämns som ett alternativ i den japanska normen för jord- och bergförankringar [12]. En nackdel med denna typ är att den är betydligt dyrare än övriga typer av lastceller.
- En variant av lastcell är en s.k. elasto-magnetisk sensor vilken antingen kan monteras över enskilda linor alternativt hela spännstaget. Skillnaden mot en traditionell lastcell är att denna givare inte behöver belastas av spännstaget för att kunna mäta spännkraften. Mätningen av spännkraften i spännstaget utförs genom induktion där den magnetiska permeabiliteten i stålet mäts. Den magnetiska permeabiliteten är beroende av den mekaniska spänningen i stålet och därigenom kan spännkraften bestämmas.

För lastceller med elektriska givare är utsignalen inte en spännkraft utan en elektrisk signal som beror på typ av givare. För t.ex. hydrauliska lastceller med piezoelektrisk givare kan utsignalen vara en elektrisk spänning och för lastceller med vibrerandesträng-givare är utsignalen en frekvens. Det råder i princip ett linjärt förhållande mellan utsignalen och motsvarande kraft, vilket bestäms via en responskurva, se Figur 4.2. I praktiska mätningar är responskurvan detsamma som kalibreringskurvan för respektive lastcell, vilken beskriver förhållandet mellan utsignal och spännkraft vid kalibreringen.



Figur 4.2. Exempel på responskurva/kalibreringskurva för en lastcell som visar relationen mellan utsignalen i mV och kraft.

Lastcellers mätnoggrannhet

Vid mätningar på spännstag i fält kopplas lastcellerna till någon form av datainsamlingssystem som omvandlar lastcellens utsignal till en spännkraft. Omvandlingen sker via respektive lastcells kalibreringskurva, se Figur 4.2. Mätdata från en lastcell ska inte tolkas som ett absolutvärde på spännkraften utan är behäftad med en viss osäkerhet p.g.a. olika faktorer som påverkar lastcellens mätnoggrannhet. Ett antal av en lastcells egenskaper beskrivs i tillverkarens datablad för lastcellen. Nedan beskrivs de viktigaste egenskaperna för lastceller samt vad som påverkar en lastcells mätnoggrannhet.

- Lastcellens kapacitet anges oftast i kN och anger den maximala kraft som lastcellen kan mäta med angiven mätnoggrannhet.
- Överlastkapacitet anger hur mycket över lastcellens kapacitet som den tillfälligt kan belastas, t.ex. i samband med en uppspanning.
- Temperaturintervall som anger mellan vilka temperaturer som lastcellen ger tillförlitliga resultat. Påverkan på mätresultatet inom detta intervall är känt och genom att utrusta lastcellen med en temperatursensor kan mätningarna korrigeras för temperaturvariationerna.
- Känsligheten som anger hur stor förändring i utsignalen som motsvarar en förändring i uppmätt kraft. Till exempel visar känsligheten 5 mV/kN att en ökning i utsignalen på 5 mV motsvarar en ökning av spännkraften med 1 kN.
- Noggrannheten, d.v.s. hur väl uppmätt kraft överensstämmer med den riktiga kraften, anges ofta relaterat till lastcellens mätområde. Mätområdet benämns FS (Full Scale eller Fullt Skalutslag). En noggrannhet på $\pm 1.0\%$ FS anger t.ex. att en lastcell med kapaciteten 1000 kN har en noggrannhet på ± 10 kN.

Noggrannheten som anges av tillverkaren är en funktion av flertalet faktorer som var och en påverkar noggrannheten. Dessa faktorer är främst:

- × Linjäritet vilket anger avvikelser från en perfekt linjär kurva, d.v.s. förhållandet mellan insignal och kraft är aldrig helt linjärt.
- × Nollpunktsfel vilket innebär att kraften som lastcellen ger i obelastat läge skiljer sig från noll. Detta åtgärdas genom att subtrahera det avlästa värdet i obelastat läge från mätvärdena i belastat läge.
- × Temperaturkänsligheten vilken anger hur lastcellens mätvärde påverkas av förändringar i omgivande temperatur. Anges ofta i % FS/°C, t.ex. innebär 0,1%/°C att temperaturkänsligheten är 1 kN per grad som temperaturen förändras för en lastcell med kapaciteten 1000 kN.
- × Upplösningen är den minsta ändring som kan detekteras i utsignalen från lastcellen. Det är viktigt att ta hänsyn till lastcellens upplösning vid hantering av utdata. Utdata från en lastcell anges oftast med minst en decimal, för en lastcell med t.ex. upplösningen 1 kN bör således utdatan rundas av till närmaste heltal (i kN).
- × Reproducerbarheten anger överensstämmelsen mellan två mätningar av samma kraft under olika förhållanden, t.ex. vid olika tidpunkter.
- × Repeterbarheten är överensstämmelsen mellan två mätningar på samma kraftnivå och som utförs i direkt anslutning till varandra under samma förhållanden.
- × Hysteres innebär att förhållandet mellan utsignal och uppmätt kraft inte är samma vid ökande och minskande kraft, d.v.s. responskurvan ser annorlunda ut då kraften minskar.
- × Stabiliteten över lång tid även kallad drift är förändringen av den uppmätta kraften under konstanta yttre förhållanden och är något som påverkar alla elektriska givare.

Andra omgivande faktorer kan även påverka en lastcells noggrannhet antingen genom påverkan direkt på lastcellen eller på kablar och datainsamlingsenhet. I en vattenkraftsansläggning kan dessa faktorer t.ex. utgöras av störningar från elektriska fält eller vibrationer från mekanisk utrustning.

Vissa tillverkare anger inte den totala noggrannheten för lastcellen i produktdatabladet. Istället anges värden på en eller flera av ovanstående faktorer som påverkar noggrannheten och ska därför inte tolkas som lastcellens mätnoggrannhet. I sådana fall bör information rörande lastcellens noggrannhet efterfrågas från tillverkaren. De värden som anges i ett produktdatablad är det högsta värdet för respektive faktor, d.v.s. faktorns påverkan på noggrannheten är oftast lägre än vad som anges i produktdatabladet. Dessutom uppnår inte de olika faktorerna sina maximala värden vid samma punkt. Temperaturkänsligheten är t.ex. konstant i hela mätområdet samtidigt som avvikelserna i linjäriteten oftast är störst i mitten av lastcellens mätområde. Vid eller nära lastcellens maximala kapacitet är avvikelserna i lastcellens linjäritet i princip obefintliga.

Kalibrering av lastceller utförs av tillverkaren före leverans och syftar till att, under de yttre förhållanden som råder vid kalibreringen, bestämma lastcellens mätnoggrannhet. Resultatet från kalibreringen är den kurva som kommer användas under efterföljande mätningar för att bestämma förhållandet mellan

utsignalen och uppmätt kraft. Förhållandena under kalibreringen är sådana att inverkan av ovanstående faktorer på noggrannheten minimeras eller helt elimineras, vilket medför att en god mätnoggrannhet erhålles. Under en mätning på spännstag i fält kommer de yttre förhållandena skilja sig från förhållandena under kalibreringen och ovanstående faktorer kommer påverka noggrannheten på lastcellen. Enligt [14] kan man för lastceller i fältapplikationer förvänta sig en mätnoggrannhet på mellan 2 % - 10 % FS vid mätning av absolutvärdet på spännkraft. Det kan då vara lämpligt att anpassa kalibreringskurvan efter senaste domkraftsmätning av var enskild lastcell. Dock kan man förvänta sig en betydligt bättre relativ mätnoggrannhet, d.v.s. noggrannheten för att mäta en ändring i spännkraft över tid, på mellan 0,5 % - 1 % F.S.

4.3 ERFARENHETER FRÅN LASTCELLER INOM KRAFTINDUSTRIN

4.3.1 Kärnkraftsindustrin

Inom kärnkraftsindustrin används spännstag främst i reaktorinneslutningarna vilket är en cylindrisk betongkonstruktion som innesluter reaktorn. I ett antal av reaktorerna i Sverige utgörs korrosionsskyddet av spännstagen av antingen rostskyddsfett eller genom torrluftsventilation. I dessa reaktorinneslutningar utförs regelbundna mätningar av spännkrafterna i spännstagen på samma sätt som för spännstag inom vattenkraftsindustrin. I två av reaktorinneslutningarna i Forsmarks kärnkraftverk har ett antal spännstag försetts med hydrauliska lastceller och erfarenheterna av lastcellerna är goda. I båda dessa reaktorinneslutningar har VSL spännstagssystem använts där varje spännstag består av 19 linor med en diameter på 13 mm.

Forsmark 1

I reaktorinneslutningen till Forsmark 1 instrumenterades 13 spännstag med totalt 18 hydrauliska lastceller av fabrikat Glötzl i samband med uppspänningen i början av 1970-talet. Lastcellerna är utrustade med en analog manometer för utläsning av spännkraften. Lastcellerna har uppvisat god funktion, de uppmätta spännkraftsförlusterna visar god överensstämmelse med resultaten från mätningarna med domkraft. Funktionen över tid hos lastcellerna har varit god, undantaget en lastcell där manometernålen fastnat och därmed har uppvisat avvikande resultat.

Forsmark 2

I samband med spännkraftsmätningarna 2014 byttes tre spännstag ut och de nya instrumenterades med hydrauliska lastceller [7]. Totalt installerades fem lastceller, två av spännstagen instrumenterades i båda ändar då uppspänningen utfördes från båda ändar av spännstaget. Mätningar utfördes dels under uppspänningen och dels som långtidsmätningar och har varit pågående sedan uppspänningen [7]. Från mätningarna under uppspänningen kunde låsförluster och friktionsförluster kvantifieras för spännstagen. Långtidsmätningarna är pågående och planerade att utföras under återstoden av reaktorns drifttid och är ett komplement till mätningarna med domkraft.

Övriga erfarenheter

Det finns andra exempel på reaktorinneslutningar där övervakning av den kvarvarande spännkraften har utförts med lastceller [24], [25]. I [24] rapporterades resultatet från övervakning av kraften i 20 spännstag försedda med lastceller under en period av 19 år. Totala antalet lastceller som installerades var 30 då vissa av spännstagen försågs med lastceller i båda ändar. Lastcellerna var av en typ där trådtöjningsgivare användes för att mäta spännkraften i det instrumenterade spännstaget. Efter 7 år byttes 13 av lastcellerna ut p.g.a. osäkerheter i tillförlitligheten. De övriga 17 lastcellerna samt 12 av de nyinstallerade fungerade utan problem och gav tillförlitliga resultat. Positiva resultat rapporterades från övervakning av kraften i ett antal spännkablar i en reaktortank av spännarmerad betong med lastceller under en fyraårsperiod [25]. Kalibrering utfördes under mätperioden vilken visade på låg drift och hög tillförlitlighet hos lastcellerna, tyvärr anges inte vilken typ av lastceller som användes.

Hydrauliska lastceller användes i två olika studier finansierade av Energiforsks betongtekniska program inom kärnkraft för att övervaka spännkraftsförlusterna i ett antal spännarmerade betongbalkar [26]. Studierna varade i 1.5 respektive 3 år, givarna kalibrerades både före och efter mätningarna och uppvisade god tillförlitlighet. I den treåriga studien förvarades dessutom ett antal av givarna i förhöjd temperatur, ungefär 42°C, vilket inte påverkade deras tillförlitlighet jämfört med givare som förvarades i normalt inomhusklimat.

4.3.2 Vattenkraftsindustrin

Endast i ett fåtal svenska vattenkraftsanläggningar har spännstag instrumenterats med lastceller. Från den sammanställning av information som utfördes i del 1 av projektet [1] framgår att lastceller installerats i två anläggningar och att det planerades för installation i ytterligare två anläggningar. Generellt finns det få studier eller rapporter publicerade internationellt där instrumentering av spännstag beskrivs. I [27] utfördes en sammanställning över rapportering kring spännstag för bergsförankringar inom vattenkraftsindustrin i Nordamerika. Resultaten visade att det publicerats få rapporter kring spännstag i relation till det stora antal spännstag som installerats i Nordamerikanska kraftverksdammar. Någon rapportering kring installation av lastceller på spännstag nämndes överhuvudtaget inte.

Vattenkraftsanläggningar

I två anläggningar har samma typ av lastceller installerats på ett stort antal spännstag, totalt försågs 68 respektive 33 spännstag med lastceller. Det totala antalet spännstag i de båda anläggningarna var 154 respektive 91. Lastcellerna som installerades var försedda med trådtöjningsgivare, totalt åtta per lastcell. Lastcellerna fördelades jämnt över spännstagen i anläggningarna. Generellt installerades en lastcell per konstruktionsdel och majoriteten av konstruktionsdelarna ärr försedda med 2 till 3 spännstag. Lastcellerna är kopplade till ett datainsamlingssystem gemensamt för samtliga lastceller. Utläsning har även utförts manuellt p.g.a. i väntan på installation av det permanenta datainsamlingssystemet. Det bör även påpekas att ingen temperaturmätning utförs

manuellt parallellt med kraftmätningarna men är under installation i det permanenta datainsamlingssystemet. Temporär loggning av två av lastcellerna har utförts och visar på stabila mätningar.

Övriga erfarenheter

Det finns ett antal fall rapporterat där lastceller använts för att övervaka spännkraftsförluster i bergsförankringar och i spännstag för stabilisering av geokonstruktioner. I [27] rapporterades om övervakningen av spännkrafterna i tio spännstag för bergsförankring av väggarna till två torrdockor. Spännkrafterna övervakades med lastceller försedda med töjningsgivare av vibrerande sträng-typ under en period av drygt tre år. Resultaten visade att töjningsgivarna i tre av lastcellerna slutade fungera under mätningarna. Liknande undersökning utfördes under en fem år lång period i [29] där spännkraften i nio spännstag förankrade i berg mättes med lastceller. Erfarenheterna av lastcellerna var goda och de levererade stabila och vad som verkade vara rimliga resultat under mätningsperioden.

4.4 REKOMMENDATIONER FÖR INSTRUMENTERING AV SPÄNNSTAG

4.4.1 Val av lastcell

Den samlade erfarenheten som presenteras i föregående avsnitt kring olika typer av lastceller inom kraftindustrin indikerar att hydrauliska lastceller är mest lämpliga för användning inom vattenkraftsindustrin. Detta gäller främst i jämförelse med lastceller med trådtöjningsgivare, för lastceller med töjningsgivare av vibrerande sträng-typ är underlaget för jämförelse väldigt litet. Det bör även påpekas att det finns relativt lite resultat publicerade kring tillförlitligheten hos olika typer av lastceller vid installation i miljöer liknande de vid vattenkraftsanläggningar. Enligt den nordamerikanska normen för spännstag för bergförankringar [10] visar erfarenheter att hydrauliska lastceller eller lastceller med vibrerandesträng-givare är mest lämpliga för spännstag. Lastceller med töjningsgivare rekommenderas inte för användning till spännstag för bergförankringar. I den japanska normen för jord- och bergförankringar [12] nämns lastceller med töjningsgivare (typ av töjningsgivare nämns dock inte) som en lämplig typ av lastcell för spännstag. Vidare anges att noggrannheten hos hydrauliska lastceller är sämre än för lastceller med töjningsgivare, detta p.g.a. de påverkas mer av temperaturförändringar. För ett spännstag en vattenkraftsanläggning kan temperaturen i det omgivande klimatet variera med ungefär 60 °C under ett år. Därför är det viktigt att utföra temperaturmätningar samtidigt som kraftmätningarna och på så sätt ha möjligheten att korrigera för temperaturvariationerna. En fördel med hydrauliska lastceller jämfört med övriga typer är att de är betydligt mindre känsliga för excentriciteter i den applicerade kraften. Detta innebär att mätresultaten inte påverkas i samma utsträckning i det fall installationen inte utförts helt korrekt bl.a. avseende centrering av lastcellen eller parallelliteten mellan ankarplatta och ankarstycke. Lastceller med olika typer av töjningsgivare är väldigt känsliga för excentrisk belastning och det är därför viktigt att centrera lastcellen över spännstaget vid installationen samt att ankarstycke och ankarplattan är helt parallella.

Förutom vilken typ av lastcell som ska användas finns flera andra aspekter som bör tas i beaktande vid val av lastcell. Följande riktlinjer bör följas vid val av lastcell:

- En viss marginal mellan spännkraft och lastcellens kapacitet ska finnas, den bör dock inte vara för stor. Detta eftersom noggrannheten i absoluta tal minskar med ökande kapacitet hos lastcellen. Vid stora marginaler introduceras då större osäkerheter än nödvändigt i mätningarna då en liten andel av lastcellens mätområde nyttjas. En riktlinje är att den maximala spännkraft som uppnås under uppspänningen (högre än inlåsta kraften) bör uppgå till cirka 90 % av lastcellens kapacitet. Det bör observeras att vid godkännandeprov av spännstag som företas före uppspänningen kommer spännkraften ökas till högre nivåer än under själva uppspänningen. Det rekommenderas därför att lastcellen installeras först efter utfört godkännandeprov. I det fall lastcellen ska installeras före godkännandeprovet bör det kontrolleras att provbelastningen med marginal understiger lastcellens nominella överlastkapacitet.
- Arbetsmiljön vid installationen bör beaktas, vilket främst avser vikten på lastcellen samt att tillräckligt utrymme runt bl.a. ankarstycket finns för att installationsarbetet ska kunna genomföras.
- Om möjligt bör lastcellens överlastkapacitet inte utnyttjas. Om lastcellen installeras före godkännandeprovet kan överlastkapaciteten utnyttjas under godkännandeprovet. Mer än 70 % av överlastkapaciteten bör dock ej utnyttjas.
- Kontrollera med leverantör/tillverkare att lastfördelningsplattorna mellan lastcell och ankarstycke är tillräckliga. Är fördelningsplattorna för små eller för veka kan lasten verka på lastcellen på felaktigt sätt och därmed öka mätfelen. Vid behov ska det kompletteras med extra lastfördelningsplattor.
- Centrumhålet i lastcellen ska passa till diametern för både spännstaget och centrumhålet i ankarplattan. Överstiger diametern på lastcellens centrumhål det för ankarplattan bör extra lastfördelningsplattor (med samma håldiameter som ankarplattan) användas både mellan ankarplatta och lastcell (dessa lastfördelningsplattor ska ha minst samma storlek som lastcellen) samt mellan ankarstycke och lastcell. Viktigt är även att alla extra lastfördelningsplattor har minst samma styvhet som lastcellens egna lastfördelningsplattor. Detta för att maximera den kraftöverförande arean mellan ankarstycke och lastcell.
- Temperaturmätningar bör utföras parallellt med kraftmätningarna, detta är speciellt viktigt för hydrauliska lastceller och flera tillverkare erbjuder lastceller med integrerade temperaturgivare, detta alternativ bör väljas.

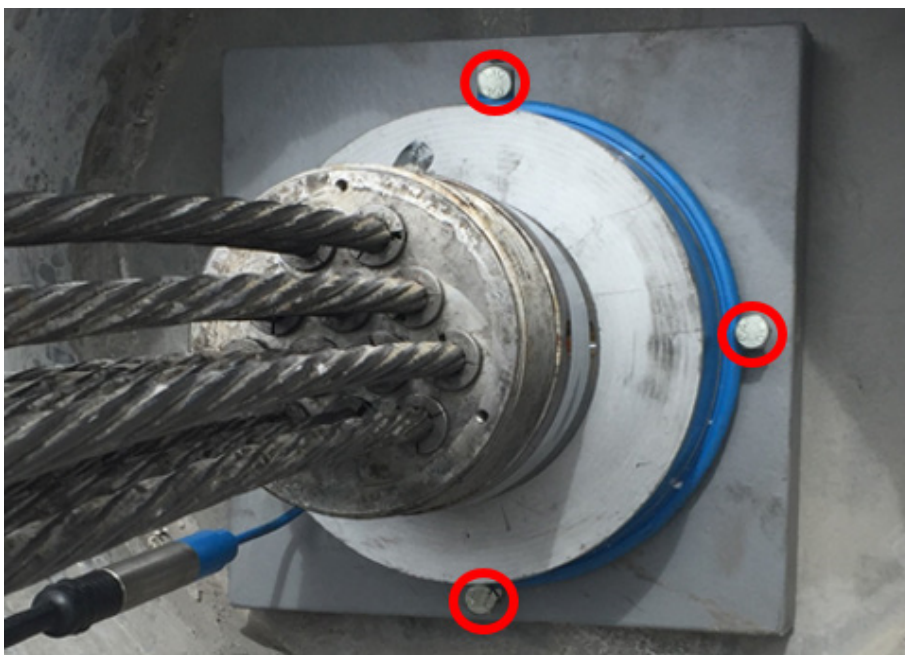
Det finns även följande praktiska aspekter som bör följas vid planeringen av en instrumentering med lastceller:

- Spännstag som instrumenteras med lastceller ska vara möjliga att spänna ner helt för att kunna ta bort eller ersätta lastcellen. Tjockleken på mellanlägggen ska överstiga förlängningen av spännstaget orsakad av spännkraften.
- Ankarplattan ska vid behov modifieras så att lastcellen med god marginal får plats. Vidare bör fyra styrpinnar monteras på ankarplattan vilka placeras med 90° förskjutning längs en cirkel med något större radie än lastcellens yttermått, se Figur 4.3. Syftet med dessa är att säkerställa att lastcellen centreras mitt över

hålet i ankarplattan. Dessutom bör styrpinnarna förses med gängor som möjliggör att lastcellen kan fixeras mot ankarplattan med mutter. Styrpinnarna kan också utgöras av skruvar som fästs i gängade hål i ankarplattan.

Styrpinnar är viktigt vid montering av lastceller på spännstag som inte är helt vertikala där monteringen av lastcellen försvåras av lutningen på ankarplattan.

- Skyddshuven bör inte innesluta lastcellen utan om möjligt bör skyddshuven modifieras så att den kan placeras mot lastcellens fördelningsplatta. Detta för att undvika att lastcellen täcks av rostskyddsfettet som skyddshuven fylls med. Vid fyllning av skyddshuven med rostskyddsfett hettas fettets upp till cirka 70°C för att bli flytande och det kan ha en negativ inverkan på lastcellen. En lösning som använts av Spännteknik AB vid Nämforsen kraftverk är att skruva fast skyddshuven i ankarstycket och sedan täta med silikon mellan skyddshuv och lastcellens fördelningsplatta, se Figur 4.4. Lastcell med tillhörande givare ska sedan i sin tur skyddas från påverkan av klimatet och mekanisk åverkan, t.ex. med en skyddshuv i stål.



Figur 4.3. Styrpinnar, markerade med röda cirklar, placerade i ankarplattan för centrering och fixering av lastcellen.



Figur 4.4. Förslag på modifiering av skyddshuv för placering på lastcell (av Spännteknik AB). Skyddshuvens fästs med skruv i gängade hål i ankarstycket, se röda cirklar i bilderna ovan. Tätning med silikon e.d. mellan skyddshuvens fläns och lastcellens fördelningsplatta.

4.4.2 Riktlinjer vid installation

Vid installation av lastceller bör nedanstående generella riktlinjer beaktas. Andra riktlinjer som är aktuella för den specifika lastcellen kan ges i produktdatabladet, dessa ska då följas före nedanstående riktlinjer.

- Iaktta försiktighet vid hantering av lastcell och tillhörande kablage, lyft t.ex. aldrig lastcellen i kabeln eller i givaren till vilken kabeln är ansluten. Skydda givaren på lastcellen från mekanisk åverkan.
- Lastcellen ska placeras direkt mot ankarplattan, mellanlägggen ska sedan placeras mellan lastcell och ankarstycke.
- Var noga med centrereringen av spännstaget över lastcellen för att undvika excentrisk belastning av lastcellen. Detta är särskilt viktigt vid användandet av lastceller med töjningsgivare.
- Se till att lastcellens kontaktytor, d.v.s. ankarplatta, lastcell samt eventuella lastfördelningsplattor, är helt plana och rena.
- Var noga med att skydda lastcellen samt kablarna mellan lastcellen och logger/datainsamlingssystem från mekanisk påverkan.

- Kablar som är placerade utomhus ska skyddas från direkt exponering av uteklimatet med kabelskydds rör eller liknande. Eventuella kabelskarvar och anslutningar ska skyddas från inträngande fukt.
- Placera inte kablarna mellan lastcellen och loggern/datainsamlingsenheten nära magnetfält eller elektrisk utrustning.
- Tillverkaren/leverantören av lastcellerna bör konsulteras om medföljande kablar till lastcellen behöver modifieras.
- Lastcellen bör förvaras i samma klimat som råder under installationen i minst 24 timmar. Detta för att minimera påverkan av temperaturskillnader på lastcellen under och direkt efter installationen.
- Starta mätningen med lastcellen FÖRE uppspänningen påbörjats, d.v.s. i det läge då kraften i spännstaget är noll, och kontrollera att mätvärde erhålls. Lastcellens startvärde är sällan lika med 0 kN och för att erhålla korrekt värde på spännkraften måste varje mätvärde justeras utifrån startvärdet. På så vis elimineras ett eventuellt nollpunktsfel i lastcellen.

4.4.3 Datainsamlingssystem

Val av datainsamlingssystem bör ske efter behov och efter omfattningen av installationen av lastceller. Utbudet av olika datainsamlingssystem och deras omfattning varierar. Nedan listas olika system för datainsamling med olika komplexitet.

1. Det enklaste datainsamlingssystemet är analoga alternativt digitala givare utan logger som läses av manuellt vid varje mätning. Mätdata får sedan föras in i en databas eller liknande manuellt.
2. Nästa steg är att installera digitala loggrar, se Figur 4.5. Utläsningen sker genom att koppla in en dator till loggern och föra över mätdata till datorn för vidare behandling.
3. Flera leverantörer erbjuder olika tjänster där loggrarna till lastcellerna är uppkopplade till en server och där lagras mätdata. Den kan då oftast läsas ut från distans genom leverantörens hemsida.
4. I det fall ett befintligt mätsystem för dammövervakning finns på plats i anläggningen för mätning av andra parametrar som t.ex. vibrationer, sättningar eller deformationer kan lastcellerna kopplas in till detta system. Tillgängligheten till mätdata från lastcellerna är beroende av utformningen av det lokala datainsamlingssystemet, d.v.s. om mätdata lagras lokalt eller på en webbserver. I princip samtliga typer av lastceller kräver t.ex. en drivspänning för utläsning av spännkraft. Utsignalen består t.ex. av en ström eller spänning. Dessa typer av insignal och utsignal är mer eller mindre standard för de flesta typer av givare och några hinder för att integrera installerade lastceller i befintliga datainsamlingssystem bör inte finnas.

I det fall ett befintligt datainsamlingssystem, i form av ett mätsystem för dammövervakning, finns i anläggningen bör lastcellerna kopplas till detta. Utläsning av mätdata från lastcellerna bör då ingå i det befintliga mätprogrammet för dammövervakningen. I det fall ett befintligt datainsamlingssystem inte finns i anläggningen får nyttan med alternativ 3 ovan jämföras mot den mindre kostnaden av alternativ 2 med en stationär logger. Serveruppkoppling av lastceller

till en tillverkares server medför oftast en abonnemangskostnad, dessutom bör det noteras att mätdata i det här fallet kommer att föras ut till en extern part.



Figur 4.5. Logger med åtta kanaler för lokal lagring av mätdata från lastceller.

4.4.4 Installationens omfattning

Vid nyinstallation av spännstag rekommenderas det att minst samma antal spännstag ska försees med lastceller motsvarande omfattningen av en detaljerad inspektion enligt avsnitt 3.4.3. Detta innebär att minst det antal rekommenderade spännstag som ska ingå i en detaljerad inspektion ska försees med lastceller. Fördelningen inom varje spännstagsgrupp ska vara sådan att det rekommenderade antalet spännstag som ska ingå i en detaljerad inspektion ska försees med lastceller. Det kan även noteras att installation i efterhand oftast är svårt om inte omöjligt, och mycket dyrare än vid nyinstallation vilket i sig kan motivera installation av lastcell även om den inte planeras att mätas frekvent. Lastcellens kostnad bör också sättas i relation till kostnaden för domkraftskontroll, speciellt bör man beakta åtkomst och arbetsmiljöfrågor.

Vid installation på befintliga spännstag rekommenderas att samma antal instrumenteras som vid nyinstallation. Problemet vid installation på befintliga spännstag i linbaserade system är att det oftast inte finns en möjlighet att spänna ner dessa helt p.g.a. otillräcklig mängd mellanlägg. Finns möjligheten att spänna ner spännstaget finns även ett tillräckligt utrymme för att installera en lastcell. För stångbaserade system finns i princip alltid möjligheten att spänna ner spännstagen. Den utstickande delen av spännstaget kan dock vara för kort för att en lastcell ska kunna installeras. Detta kan åtgärdas genom att skarva spännstaget så tillräcklig längd på spännstaget erhålls för placering av lastcell.

5 Slutsatser och rekommendationer

Följande slutsatser kan dras från resultaten i föreliggande rapport.

- Olika metoder för mätning av spännkraft med domkraft används av olika utförare vilket leder till osäkerheter i mätresultat och försvårar utvärderingar och analyser. Detta är också slutsatsen från del 1 i projektet vilken ytterligare har bekräftats. Resultaten visade att den uppmätta styvheten hos ett spännstag (lutningen på linjen i ett kraft-förskjutningsdiagram) varierar kraftigt mellan olika utförare av mätningen. Vid noggrann kontinuerlig mätning av kraft och förskjutning är överensstämmelsen i uppmätt styvhet väldigt god mellan uppspänningen och den efterföljande kraftkontrollen. Vidare så definieras lift-off kraften på flertalet olika sätt vilket ytterligare försvårar jämförelser mellan olika mätningar.
- Övergångszonen i ett kraft-förskjutningsdiagram definieras som den zon då den första linjära delen viker av och övergår i den andra linjära delen av kurvan och som innefattar då ankarstycket lyfter från ankarplattan, d.v.s. lift-off. Resultat från mätningar på 50 spännstag visar att övergångszonens storlek i relation till uppspänningskraften i princip är oberoende av både spännkraften och spännstagets styvhet.
- Detaljeringsgraden varierar mellan olika normer och riktlinjer för utformning av inspektionsprogram för spännstag avseende vilka tester/undersökningar som ska utföras, intervall för inspektionerna, omfattningen av inspektionen samt acceptanskriterier för kvarvarande spännkraft. För spännkraftsmätningar är vanligaste intervallet för testerna 5 år och för okulära inspektioner 1 – 5 år. Omfattningen varierar från att 5 % - 100 % av spännstagen ska inkluderas i varje inspektion.
- De normer som ger acceptanskriterier för kvarvarande spännkraft ger generella acceptanskriterier som inte är kopplade till spännkraftsbehovet hos ett enskilt spännstag för att säkerställa konstruktionens säkerhet eller integritet. Undantaget för detta är normerna för spännarmering inom kärnkraften. Generella acceptanskriterier har flera nackdelar jämfört med de som är kopplade till spännkraftsbehovet. Bland annat kan enskilda spännstag ha för låg spännkraft trots att de generella acceptanskriterierna uppfylls, höjning av spännkraft utförs baserat på felaktig information och säkerheten mot brott kommer sannolikt variera mellan olika dammar i samma dammsäkerhetsklass.
- Det finns få publikationer om erfarenheter av lastceller på spännstag inom vattenkraften. De resultat som finns tillgängliga indikerar att hydrauliska lastceller samt lastceller med töjningsgivare med vibrerande sträng är mest lämpliga för vattenkraftsapplikationer.

Baserat på resultaten och slutsatserna ovan togs rekommendationer fram för följande:

- Utförande av mätning av kvarvarande spännkraft med domkraft och även riktlinjer för tolkning av den s.k. lift-off kraften. Ett förslag på en lämplig metod för mätning av kvarvarande spännkraft med domkraft presenteras. Enligt denna ska lift-off kraften bestämmas, d.v.s. den kraft från domkraften som får ankarstycket att lyfta från ankarplattan. Både kraften från domkraften och ankarstyckets förskjutning ska mätas kontinuerligt med elektroniska givare under hela spännkraftsmätningen. Lift-off kraften bestäms med en föreslagen procedur ur ett diagram där kraften från domkraften plottas mot ankarstyckets förskjutning.
- Rekommendationer ges för utformning av inspektionsprogram för spännstag installerade i vattenkraftsanläggningar baserat på normer/riktlinjer för spännstag för bergförankringar samt normer specifika för kraftindustrin. Två olika detaljeringsnivåer för inspektioner föreslås. En årlig okulär inspektion som innefattar okulära inspektioner av samtliga spännstag samt en detaljerad inspektion som utförs vart femte år på hälften av spännstagen i en anläggning. Den detaljerade inspektionen innefattar förutom en okulär inspektion även mätning av kvarvarande spännkraft ingår. Rekommendationer ges även för att ta fram acceptanskriterier för kvarvarande spännkraft.
- Rekommendationer ges för instrumentering av spännstag med lastceller för kontinuerlig mätning av spännkraft. Detta innefattar beskrivning av lastcellers egenskaper och olika typer av lastceller samt riktlinjer för val av lämplig lastcell och datainsamlingssystem.

6 Fortsatt arbete

Följande frågeställningar har uppkommit under projektets gång och bör utredas vidare:

- Ytterligare studier bör utföras av lift-off metoden för mätning av spännkraft med domkraft. Detta gäller främst verifiering alternativt vidareutveckling av den metod som rekommenderas i föreliggande rapport. När metoden använts vid mätningar i fält bör erfarenheterna av metoden sammanställas. Vidare bör även utförare av spännkraftsmätningar informeras och instrueras i hur metoden ska användas vid mätningar i fält.
- Noggrannheten hos mätmetoden bör undersökas avseende vid vilken nivå den verkliga lift-off kraften ligger i ett kraft-förskjutningsdiagram.
- Eftersom flera olika metoder för att bestämma lift-off kraften används vid mätningar med domkraft bör riktlinjer tas fram för hur resultat mellan olika utförare ska jämföras. Detta innefattar även riktlinjer för hur jämförelser mellan den föreslagna metoden och tidigare använda metoder ska utföras.
- Samla in erfarenheter från användandet av föreslagen metod för utformning av inspektionsprogram för spännstag. Detta innefattar även att sammanställa erfarenheter från inspektionsprogram som använts baserat på rekommendationerna i föreliggande rapport.
- Majoriteten av befintliga spännstag i svenska vattenkraftsanläggningar är inte möjliga att spänna ner för att möjliggöra en instrumentering med lastcell. Möjligheterna att instrumentera sådana spännstag bör utredas. Detta kan t.ex. vara specialdesignade lastceller som inte kräver en nedspänning av spännstaget för montering.
- I takt med att fler spännstag instrumenteras med lastceller bör mätdata och erfarenheter från installationer vid uppspänning och långtidsmätningar sammanställas. Även erfarenheterna av olika typer av lastceller bör sammanställas och utvärderas.
- Rekommendationer för hur acceptanskriterier för spännkraften ska tas fram bör utvecklas. Främsta syftet är att ta fram riktvärden för kvarvarande spännkraft vid en detaljerad inspektion där spännkrafterna mäts i ett antal spännstag.
- Den mätdata över uppmätta spännkrafter i spännstag inom vattenkraften som finns tillgänglig bör sammanställas i en databas. Databasen kan bl.a. användas för att uppskatta spännkraftsförluster och nyttjas vid analyser av effekterna av höjningar av spännkrafter.
- Inverkan av kvaliteten på berget och ingjutningen i förankringszonen på ett installerat spännstag bör utredas vidare. Detta innefattar inverkan på bl.a. beständighet, brottbeteende, domkraftsmätningar och spännkraftsförluster. Även riktlinjer och acceptanskriterier för utvärdering av förankringszonens status från mätningar av kvarvarande spännkraft med domkraft bör tas fram.

7 Referenser

- [1] RIDAS - Kraftföretagens riktlinjer för dammsäkerhet, Energiföretagen, 2016.
- [2] Lundqvist P., Bernstone C., Sammanställning över spännstag inom vattenkraften, Energiforskrapport 2017:398, 2017.
- [3] Anderson P., Structural Integrity of Prestressed Nuclear Reactor Containments, Doktorsavhandling, Avd. för Konstruktionsteknik, Lunds Tekniska Högskola, 2007.
- [4] Petersson T., Sundquist H., Spännbetong, Brobyggnad, Kungliga Tekniska Högskolan, 2003.
- [5] Post-Tensioning Tendon Installation and Grouting Manual, U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration, FHWA-NHI-13-026, 2013.
- [6] Fujiwara Y., Sakai T., A study of a lift-off test method for ground anchors, Journal of the Japanese society of civil engineers, vol. 4, s.106-117, 2016.
- [7] Lundqvist P., Edin M., Persson P., Frisk A., Instrumentering av spännkablar i Forsmark 2, Energiforsk rapport 2016:243, 2016.
- [8] Utförande av geokonstruktioner – Förankringar, SS-EN 1537:2013, 2013.
- [9] Eurocode 7 - Dimensionering av geokonstruktioner – Del 1: Allmänna regler, Svensk standard SS-EN 1997-1, 2004.,
- [10] Post-tensioning institute, Recommendations for prestressed rock and soil anchors, PTI DC35.1-14, 2014.
- [11] Federation de la precontrainte, Design and construction of prestressed ground anchorages, 1996.
- [12] Japan anchor association, Inspection and maintenance manual for ground anchors, 2015.
- [13] British standard institute, BS8081:2015, Code of practice for grouted anchors, 2015.
- [14] Littlejohn S., Mothersille D., Maintenance and monitoring of anchorages: guidelines, Geotechnical engineering 161, s. 93-106, 2008.
- [15] Littlejohn G., Lardner W., Suggested method for rock anchorage testing, International society for rock mechanics, commission on testing methods, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., vol. 22, nr. 2, s. 71-83, 1985.
- [16] Hesslin G., Bruce D.A., Littlejohn G., Westover T., Performance of aging post-tensioned rock anchors in dams, ASDSO West regional conference 2009.
- [17] prEnISO 22477-5 Geotechnical investigation and testing - Testing of geotechnical structures – part 5: testing of anchorages.

- [18] American society of mechanical engineers, BPVC Section XI - Rules for inservice inspection of nuclear power plant components, 2017.
- [19] International committee of large dams, ICOLD Bulletin 158: Dam surveillance guide.
- [20] Australian national committee on large dams, Guidelines on dam safety management, 2003.
- [21] Dam safety committee, New south Wales, DSC3G General dam safety considerations, 2010.
- [22] Yamazaki, J., Kohashi H., Sawamatsu T., Integrity investigation of ground anchors, 13th Conference of the Road Engineering Association of Asia and Australasia, 2009.
- [23] Eurocode 2 - Dimensionering av betongkonstruktioner, del 1-1: Allmänna regler och regler för byggnader, 2008, Svensk standard SS-EN 1992-1-1:2005.
- [24] Stangenberg F., Borgerhoff M., Schimmelpfennig K., Prestress force monitoring of the THTR prestressed concrete reactor vessel during 19 years, Prestress loss in NPP containments – Joint WANO/OECD – NEA workshop, CSNI, Poitiers, France 25-26 Aug 1997.
- [25] Gunnerson R.A., Cheung K.C., Fort St. Vrain PCRV structural response monitoring and verification, Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology (SMIRT), Chicago, USA, 22-26 Aug, 1983.
- [26] Lundqvist P., Assessment of long-term losses in prestressed concrete structures – application for nuclear reactor containments, Doktorsavhandling, Konstruktionsteknik, Lunds Tekniska Högskola, 2012.
- [27] Bruce D.A., Wolfhope J.S., Wullenwaber J.D., Rock anchors for dams: a five year update, The challenge of managing aging infrastructure under a new financial reality, 2012.
- [28] Littlejohn G.S., Bruce D.A., Long-term performance of high capacity rock anchors at Davenport, Ground Engineering, October 1979.
- [29] Benmokrane B., Ballivy B., 1991, Five-year monitoring of load losses on prestressed cement grouted rock anchors, Canadian geotechnical journal, Vol 28, nr. 5, s. 668-677.

ÖVERVAKNING AV STATUS PÅ VATTENKRAFTENS SPÄNNSTAG

Spännarmering i form av så kallade spännstag används inom vattenkraftsindustrin som en metod för att öka vattenkraftsdammars stabilitet mot yttre laster bland annat.

I dagsläget finns inte någon vedertagen praxis för hantering av spännstag inom vattenkraftsindustrin. Här redovisas resultaten från det andra delprojektet om vattenkraftens spännstag, med fokus på mätning av kvarvarande spännkraft. De mätmetoder som används ute på anläggningarna har utvärderats och förslag till inspektionsprogram och acceptanskriterier har utarbetats.

Rapporten ger också rekommendationer för instrumentering för att kontinuerligt mäta spännkraften och anger bland annat att en viss marginal mellan spännkraft och lastcellens kapacitet ska finnas men bör inte vara för stor, att lastcellens överlastkapacitet inte bör utnyttjas, att arbetsmiljön bör beaktas så att det finns tillräckligt utrymme runt ankarstycket för att kunna genomföra installationsarbetet och att temperaturmätningar bör utföras parallellt med kraftmätningarna.

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