

SAMMANSTÄLLNING ÖVER SPÄNNSTAG INOM VATTENKRAFTEN

RAPPORT 2017:398



 VATTENKRAFT

BETONGTEKNISKT PROGRAM
VATTENKRAFT



Spännstag inom vattenkraften

Sammanställning av data för installerade spännstag

PETER LUNDQVIST, CHRISTIAN BERNSTONE

ISBN 978-91-7673-398-1 | © ENERGIFORSK Maj 2017 | Foto: Uniper

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

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.

I dagsläget saknas branschgemensamma rutiner för hur man ska arbeta med spännstag. Denna inventering av erfarenheter av spännstag utgör ett första steg mot att ta fram riktlinjer för detta arbete. Kartläggningen har genomförts av Peter Lundqvist och Christian Bernstone, seniora forskare på Vattenfall. Projektet ingår i Energiforsk Betongtekniskt program vattenkraft.

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 den tekniska livslängden förlängs kommer användandet av spännarmering att öka. Eftersom funktionen hos installerade spännstag direkt påverkar säkerheten för en vattenkraftsanläggning är en metodik för hantering av spännstagens status över tid viktig för att säkerställa en anläggnings säkerhet och integritet.

I dagsläget finns inte någon branschgemensam metodik för hantering av spännstag inom vattenkraftsindustrin. Som ett första steg i utvecklandet av en sådan metodik presenteras i föreliggande rapport en sammanställning över information som samlats in från ett antal anläggningsägare kring installerade spännstag i svenska vattenkraftsanläggningar. Den information som samlades in omfattade bl.a. allmän information om anläggningen och installationen av spännstag, data om spännstagssystem, erfarenheter från installation och drift, information om eventuell instrumentering samt utformning av eventuella inspektionsprogram. Totalt samlades information in från 42 anläggningar och innefattade information om 1690 spännstag.

Resultaten visar att de vanligaste leverantörsspecifika spännstagssystemen är linbaserade system från VSL samt stångbaserade system från Dywidag. Den dominerande orsaken till installation av spännstag är att öka stabiliteten hos anläggningen. Andra orsaker är att förankra mekanisk utrustning eller motverka sprickbildning i berg och/eller betong. Där så är möjligt så bestäms kvarvarande spännkrafter i spännstag genom domkraftsmätningar, och för ett fåtal spännstag på enstaka anläggningar genom lastceller.

Någon standardiserad eller allmänt vedertagen praxis finns inte inom branschen avseende följande, vilket således är områden för fortsatt utveckling:

- Metodik för att införa marginaler mellan teoretiskt erforderlig spännkraft och den spännkraft som appliceras i konstruktionen, t.ex. för att kompensera för spännkraftsförluster.
- Metodik för genomförande av domkraftsmätningar. Resultat från utförda mätningar indikerar att noggrannheten i nuvarande metodiker är behäftade med osäkerheter vilket kan medföra att den verkliga spännkraften i en konstruktion antingen över- eller underskattas.
- Inspektionsprogram för spännstag bl.a. avseende deras status och kvarvarande spännkraft.
- Riktlinjer för kravställande om livslängd i samband med design och upphandling.
- Rekommendationer för installationsarbeten, särskilt utifrån underhållsmässighet. Tekniklösningar för långtidsövervakning av spännkrafter i spännstag.

Summary

Prestressing tendons are used within the hydropower industry to increase the stability of dams and 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. The study presented in this report in which information regarding installed tendons in Swedish hydropower plants has been compiled is considered as a first step towards a common practice for tendon management within the hydropower industry.

The information compiled within the study regards e.g. general information for each power plant and the installed tendons, data regarding tendon systems, experiences from installation and operation, instrumentation of tendons and details regarding management systems.

The results from the study showed that the most common tendon systems were from VSL and bar systems from Dywidag. Mainly, tendons have been installed to increase the stability of dams; however, tendons have also been used for anchoring mechanical equipment and to mitigate the effects of cracking of both concrete and rock. Measurements using hydraulic jacks are performed in order to determine remaining tendon forces. Instrumentation of tendons using load cells has only been used on a very limited number of power plants.

From the results of the study the following areas have been identified where further work must be performed in order to develop methods for long-term management of tendons in the hydropower industry:

- Develop a methodology for determining sufficient levels of safety between the tendon forces applied on the structure and the tendon force requirements from design. This should e.g. include the effect of prestress losses on the tendons.
- Investigating and if needed improving the current methodology for hydraulic jack measurements of tendon forces. Results from performed measurements indicate that the accuracy of the current method can be questioned.
- Inspection programs for monitoring of e.g. the status of the systems and measurements of remaining tendon forces.
- Develop a proposal for an instrumentation system for tendons using e.g. load cells.

Innehåll

1	Introduktion	7
1.1	Bakgrund	7
1.2	Syfte och mål	7
1.3	Spännarmering	7
1.3.1	Allmänt	7
1.3.2	Spännarmering i vattenkraftsanläggningar	8
1.4	Insamling av information kring spännstag i svenska anläggningar	9
2	Spännarmering i vattenkraftsanläggningar	10
2.1	Olika typer av spännstagssystem	10
2.1.1	Installation av spännstag	11
2.1.2	Korrosionsskydd	13
2.2	Sammanställning av installerade spännstagssystem	15
2.3	Orsaker till installation	17
3	Spännkraft	18
3.1	Uppspänning	18
3.1.1	Uppspänning med domkraft	18
3.1.2	Begränsning av spännkraft	19
3.2	Spännkraftsförluster	19
3.2.1	Korttidsförluster	19
3.2.2	Långtidsförluster	20
3.2.3	Spännkraftsförluster i en konstruktion	21
3.3	Spännkrafter i installerade spännstag	21
3.3.1	Spännkraftsnivå	21
3.3.2	Spännkrafter vid dimensionering av spännstag	23
4	Kontroll- och inspektionsprogram	24
4.1	Spännkraftsmätningar	24
4.1.1	Lift-off test	24
4.1.2	Mätmetoder inom vattenkraften	25
4.1.3	Instrumentering för mätning av spännkraft	27
4.2	Inspektionsprogram	27
5	Erfarenheter från installation och drift	30
5.1	Erfarenheter från installation av spännstag	30
5.2	Erfarenheter från installerade spännstag under drift	30
6	Slutsatser	32
7	Förslag på vidare arbete inom området	33
8	Referenser	34
Bilaga A:	Sammanställning av insamlad information	35

1 Introduktion

1.1 BAKGRUND

Spännarmering 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 den tekniska livslängden förlängs så kommer användandet och betydelsen av spännarmering att öka. För tillfället finns ingen branschgemensam metodik för design, installation och underhåll av spännkabelsystem inom vattenkraftsindustrin. Då funktionen hos installerade spännkabelsystem direkt påverkar en anläggnings säkerhet så är ett standardiserat hanterande av design, såväl som installation och drift av spännkabelsystem inom vattenkraften en förutsättning för att bibehålla en hög säkerhet och integritet hos anläggningarna.

1.2 SYFTE OCH MÅL

Syftet med föreliggande projekt är att sammanställa och utvärdera grundläggande information om installerade spännkabelsystem i svenska vattenkraftsanläggningar. Projektet är ett första steg mot en utformning av ett förslag till riktlinjer för hanteringen av spännstag inom vattenkraftsindustrin. Målet med projektet är att så långt som det är praktiskt möjligt genomföra en komplett inventering av det installerade beståndet av spännstag.

1.3 SPÄNNARMERING

1.3.1 Allmänt

Syftet med användandet av spännarmering är att introducera tryckspänningar i en konstruktion och på så vis motverka negativa effekter av yttre belastningar, vanligtvis dragspänningar i konstruktionen. Detta uppnås genom att föra in spännkablar av höghållfast stål vilka spänns upp och via förankringar för in tryckkrafter i konstruktionen. Det absolut vanligaste användningsområdet är i olika typer av betongkonstruktioner, främst broar och bjälklag i byggnader, men även i t.ex. vattenkraftsdammar. Effekterna av de introducerade tryckspänningarna är följande:

- Minska eller helt motverka sprickbildning,
- Minska nedböjningar,
- Ökad stabilitet genom förankring av stora konstruktioner, såsom broar och dämmande konstruktionsdelar.

För betongkonstruktioner förekommer två olika metoder för att uppnå detta:

- förspänning, där spännarmeringen spänns före det att betongen gjuts,
- efterspänning, där spännarmeringen dras i foderrör och spänns upp efter det att betongen härdat.

Förspänning förekommer endast vid fabrikstillverkning av spännarmerade betongkonstruktioner och kommer inte behandlas mer i föreliggande rapport. Efterspänning används för stora konstruktioner där kraven på spännkraft är höga, d.v.s. för broar eller kraftverksdammar. I efterspända betongkonstruktioner installeras foderrör i formen tillsammans med den vanliga armeringen innan betong gjuts. Dessa foderrör gjuts sedan in i betongkonstruktionen och är anslutna till förankringssystem i båda ändar vilka överför kraften från spännkablarna till betongen. När betongen uppnått tillräcklig hållfasthet installeras spännkablarna i foderrören och spänns upp med hjälp av hydrauliska domkrafter. Foderrör kan även installeras i en färdig konstruktion, antingen genom att fästas på utsidan eller genom att borra hål i konstruktionen där foderrören kan installeras. I Figur 1 visas foderrör installerade i en form före betongen gjuts.



Figur 1.1. Foderrör installerade före betongen gjuts, bild från BBR produktblad.

Själva spännkablarna kan utformas på flera olika vis, vanligast är antingen gängade stänger vilka förankras genom mutter och bricka eller kablar bestående av ett antal tvinnade ställinor. Förankringssystemet består av en förankringsplatta ingjuten i konstruktionen samt ett s.k. ankarstycke i vilket spännkabeln är fäst. Spännkraften överförs sedan till konstruktionen via ankarstycket till ankarplattan. I avsnitt 2.1 beskrivs olika spännkabelsystem mer ingående. Spännkablarna spänns upp genom att en hydraulisk domkraft kopplas till ankarstycket och spänner upp linan till avsedd spännkraft, denna kraft låses sedan in i ankarstycket. På grund av de höga spänningarna är spännarmering väldigt känslig för korrosion. Korrosionsskyddet utformas på två principiellt olika vis, antingen via cementinjektering av foderrören eller via injektering av rostskyddsfett. För bergförankringar finns även en lösning med dubbelt korrosionsskydd där spännarmeringen även skyddas av ett plaströr.

1.3.2 Spännarmering i vattenkraftsanläggningar

Generellt är syftet med att installera spännarmering i vattenkraftsanläggningar att öka dämmande konstruktionsdelars stabilitet gentemot yttre belastning avseende stjälpning och glidning. Detta utförs genom att installera spännarmering i form av s.k. spännstag vilka vanligtvis löper vertikalt eller i vinkel genom konstruktionsdelen och förankras i underliggande berg. Andra anledningar till installation av spännstag kan t.ex. vara att motverka sprickbildning alternativt överbrygga redan befintliga sprickor och på så vis öka eller bibehålla

konstruktionens bärförmåga¹. I majoriteten av alla fall där spännstag installeras i efterhand i färdig konstruktion borras hålen för foderrören genom dammen och vidare ner i underliggande berg. Förankringen i berget utförs genom cementinjektering av den del av staget som befinner sig i berget.

1.4 INSAMLING AV INFORMATION KRING SPÄNNSTAG I SVENSKA ANLÄGGNINGAR

I föreliggande projekt har information om spännstag som installerats i svenska vattenkraftsanläggningar samlats in genom att skicka ut ett formulär till flera av de stora anläggningsägarna. De ägare som bidragit med information är Statkraft, Vattenfall, Uniper samt Vattenregleringsföretagen. Den information som efterfrågades var följande:

- Allmän information: anläggning, antal installerade spännstag, konstruktionsdelar där spännkablar installerats, orsak till installation samt installationsår,
- Information om spännkabelsystemet: typ av spännkabelsystem och korrosionsskydd, draghållfasthet för stålet, brottslast för stag, uppspänningskraft, kraven på lägsta spännkraft, marginal till lägsta spännkraft samt total längd och förankringslängd på spännstagen,
- Erfarenheter från installation och drift,
- Kontroll- och inspektionsprogram samt eventuell instrumentering av spännstagen.

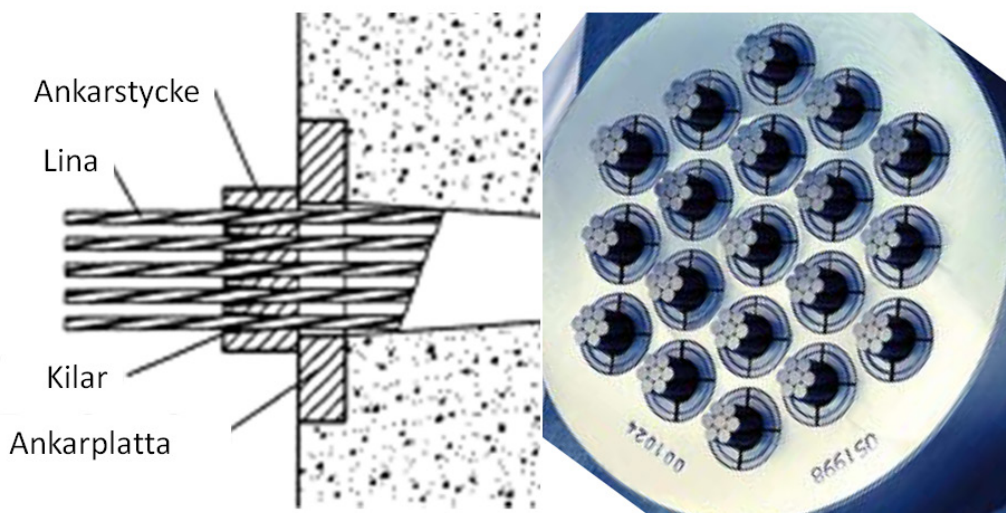
I bilaga 1 redovisas en sammanställning över den insamlade informationen, observera att i föreliggande rapport har anläggningarna avidentifierats och identifieras endast med ett löpnummer. Totalt samlades information in från 42 anläggningar och innefattade information om 1690 spännstag. Informationen i bilaga 1 redovisas separat och mer ingående i kommande avsnitt.

¹ För betong med låg hållfasthet så kan det finnas påtaglig risk för att pålagda spännkrafter kan leda till lokala spänningskoncentrationer med uppsprickning som följd.

2 Spännarmering i vattenkraftsanläggningar

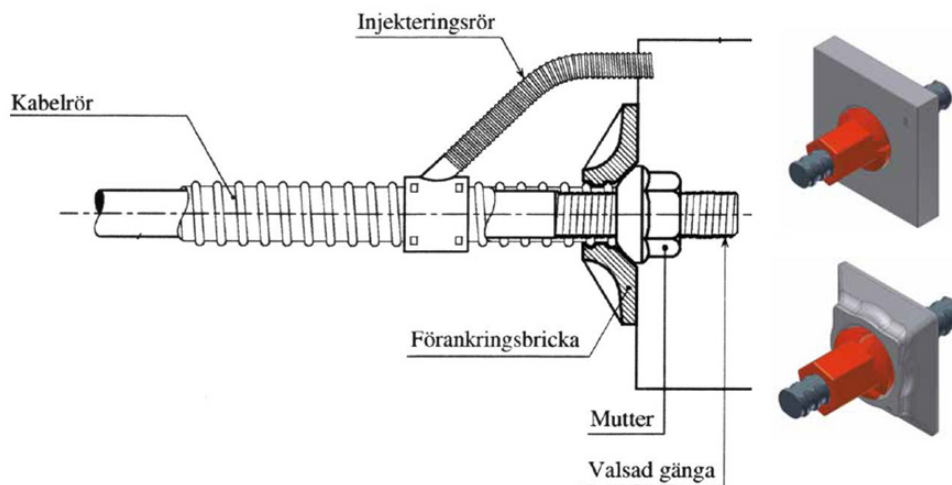
2.1 OLIKA TYPER AV SPÄNNSTAGSSYSTEM

Två principiellt olika typer av spännstag finns tillgängliga, dessa är linbaserade och stångbaserade system. Exempel på linbaserade system är VSL (Vorspann System Losinger), BBR (Brandenstini, Brinkenmaier, Ros) MK4 (Mekano4) samt Dywidag Systems International (DSI). Exempel på stångbaserade system är WR och GEWI från DSI samt GWS-stång. I de linbaserade systemen består varje spännstag 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 2.1. I Figur 2.1 visas även utformningen av förankringen till linbaserade system, vilket består av en ankarplatta ingjuten i betongen till vilken foderröret ansluter samt ankarstycket genom vilket spännkraften överförs från spännkabeln till ankarplattan. Då stora krafter införs lokalt i betongen direkt i anslutning till ankarplattan förses detta område med extra slakarmering för att ta upp dessa krafter. Linbaserade system betecknas genom att ange antalet linor samt linornas diameter. Den vanligast förekommande diametern på linor är 0,6", vilket motsvarar cirka 15,3 – 15,7 mm. Exempelvis betyder beteckning VSL 6-12 att spännkabeln består av 12 linor med en diameter på 0,6". En annan diameter som användes i stor utsträckning tidigare är 0,5" vilket motsvarar cirka 13 mm. Denna lina används dock i relativt liten omfattning i dagsläget främst av ekonomiska skäl då det krävs fler linor för att uppnå samma area på spännstålet jämfört med 0,6" linan.



Figur 2.1. Utformning av VSL-systemet från [1] samt VSL produktblad.

I de stångbaserade systemen består spännstaget av enskilda stänger med kallformade gängor. Förankringen utförs då via mutter som gängas på stången, se Figur 3. Då stångbaserade system endast består av en enskild stång betecknas de vanligtvis med tillverkarens namn och stångens diameter i mm, t.ex. Dywidag 36.



Figur 2.2. Utformningen av stångbaserade system, här exempel från Dywidag, bild från [2] samt Dywidag produktdatablad.

Stålet som används till spännstag är höghållfast stål som uppnås genom kallbearbetning av stål med normala hållfasthetsvärden. Ju tunnare stålet som bearbetas är desto högre hållfasthet kan erhållas. Enligt Eurocode 2 (EC2) [3] och europastandarden för spännstål [4] anges två värden för stålets hållfasthet, dels karakteristiskt värde på draghållfastheten vid brott, f_{pk} , samt 0,1 % gränsen, $f_{p0,1k}$, vilken anger den dragspänning som ger en kvarstående töjning på 0,1 % i spännstålet. Typiska värden på draghållfastheten, f_{pk} , hos trådar i linbaserade system är runt 1800 MPa till 1900 MPa och mellan 900 MPa till 1100 MPa för stänger i stångbaserade system.

2.1.1 Installation av spännstag

I de fall spännstag installeras i efterhand i redan färdig konstruktion måste hål borraras genom konstruktionen och ner i underliggande berg. I Figur 2.3 visas bilder från installation av spännstag i en befintlig konstruktion. När bormningen är avklarad täthetsprovas vanligen borrhålet och vid behov injekteras berg och/eller betong med cement för att uppnå tillräcklig täthet. Därefter installeras själva spännstaget i borrhålet. Förankringen för spännstag i berg utförs genom att den del av spännstaget som är i berget injekteras med expanderande cementbruk. När cementbruket uppnått tillräcklig hållfasthet kan spännstaget spännas upp. Avgörande för dimensioneringen av förankringslängden är bergets hållfasthet samt risken för brott i injekteringsbruket, vilket kan ske antingen mellan berg och bruk eller mellan spännstag och bruk.



Figur 2.3. Installation av spännstag i befintlig konstruktion. Borrhning av hål för foderrör (vänster), installation av foderrör (höger). Foto från Uniper.

Dimensioneringsregler för bergförankringar ges i Eurocode 7 (EC7) [5], vilken i sin tur hänvisar till SS-EN 1537:2013, Utförande av geokonstruktioner – Förankringar [6]. SS-EN 1537 behandlar mer detaljerat utförandet av bergförankringar, t.ex. krav på ingående komponenter och material, borrhning samt tester och övervakning av installerade spännstag. Följande tre provningsmetoder för installation av spännstag definieras i SS-EN 1537:

- Undersökningsprov, vilket utförs för att främst bestämma bärförmågan för en specifik förankring i specifika förhållanden. Detta utförs på temporära förankringar genom att en bergförankring av avsedd typ installeras och belastas till brott. Andra parametrar som kan bestämmas är krypningen i förankringszonen upp till brott eller spännkraftsförluster p.g.a. uppspänningskraften. Installerade spännstag som utsatts för undersökningsprov får efter avslutat prov inte användas som bergförankringar i konstruktionen utan ska betraktas som förbrukade.
 - Lämplighetsprov, vilket innebär en kontroll att vald bergförankring passar till de specifika markförhållanden som råder vid installationsplatsen. Syftet med lämplighetsprov är främst att verifiera att den installerade bergförankringen kan motstå en viss spännkraft utan alltför stora deformationer i förankringszonen under en viss tid. Även hur deformationerna utvecklas under en viss spännkraft kan vara av intresse. Skillnaden från ett undersökningsprov är att lämplighetsprov utförs på bergförankringar som sedan ska användas i konstruktionen och de belastas därför inte till brott.
1. Godkännandeprov, vilket måste utföras på samtliga installerade förankringar i en konstruktion. Syftet är att verifiera att förankringen uppfyller designkriterierna. Detta innebär att verifiera att förankringen kan motstå en

viss kraftnivå, att deformationerna under slutlig spännkraft inte är för stora samt att spännstaget spänts upp till avsedd spännkraft.

I samband med samtliga ovanstående provningsmetoder kan även den fria längden för spännstaget bestämmas utifrån bl.a. uppmätt spännkraft och materialparametrar för spännstålet. Den uppmätta fria längden ska sedan jämföras med den teoretiskt beräknade fria längden och får då inte avvika alltför mycket från denna. Samtliga provningsmetoder utförs med samma utrustning som vid uppspänningen, d.v.s. med domkraft kopplad till förankringens ankarstycke.

Vid varje av ovanstående provningsmetoder appliceras en av följande tre testmetoder:

1. I testmetod 1 spänns förankring upp till en fördefinierad kraftnivå. Spännkraften ökas cykliskt i förbestämda steg och vid slutet av varje steg bestäms ankarstyckets förskjutning som funktion av tiden.
2. I testmetod 2 spänns förankring upp till en fördefinierad kraftnivå. Spännkraften ökas cykliskt i förbestämda steg och vid maxkraften i varje steg bestäms spännkraftsförlusten som funktion av tiden.
3. I testmetod 3 spänns förankring upp till en fördefinierad kraftnivå. Spännkraften ökas monotont i förbestämda steg och vid slutet av varje steg bestäms ankarstyckets förskjutning som funktion av tiden.

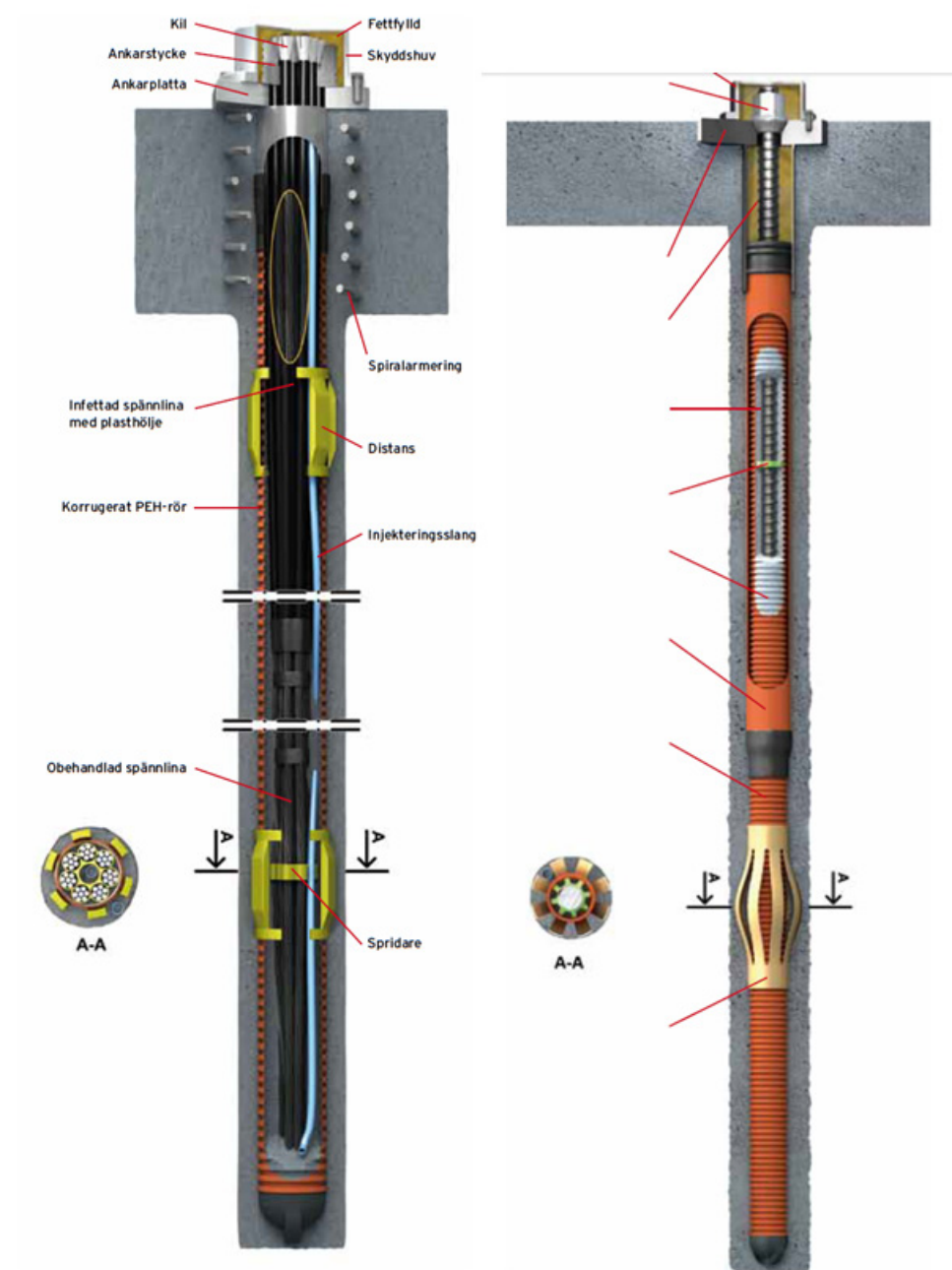
2.1.2 Korrosionsskydd

I dagsläget används två olika utformningar av korrosionsskyddet för spännstag beroende på spännstagets funktion. För spännstag vars funktion är att öka stabiliteten i dammen och som därmed förankras i underliggande berggrund används s.k. dubbelt korrosionsskydd. Dubbelt korrosionsskydd innebär att spännstaget är skyddat av både ett plaströr och antingen cementbruk eller rostskyddsfett. Spännstaget installeras i borrhålet och utrymmet kring det omgivande plaströret och borrhålet injekteras med cement. Utrymmet mellan spännstag och plaströr injekteras även det med cement för den del av spännstaget som är installerat i berget. Övrigt utrymme mellan plaströr och spännstag injekteras sedan med rostskyddsfett, detta utgör den s.k. fria längden av spännstaget och är den del som kommer förspännas. Korrosionsskyddet för ankarstycket och övriga delar i förankringen utförs vanligen av en stålhuvs vilken injekteras med rostskyddsfett. I Figur 2.4 visas exempel på utformning för både lin- och stångbaserade bergförankringar med dubbelt korrosionsskydd.

För spännstag vars funktion är att motverka sprickbildning i betongen utförs korrosionsskyddet av spännstaget oftast genom inplastning av den fria delen av staget samt injektering av foderrören med rostskyddsfett.

Det dubbla korrosionsskyddet infördes i mitten av 1990-talet, tidigare användes ofta s.k. enkelt korrosionsskydd. Detta var liknande det dubbla med undantag för att plaströr inte användes, d.v.s. i den fasta längden var injekteringsbruket i direkt kontakt med bergytorna i borrhålet och längs den fria längden var rostskyddsfettet i kontakt med bergytorna. Tidigare, främst under 1980-talet, injekterades ibland även den fria längden med cementbruk, d.v.s. i spännstag med detta korrosionsskydd kan spännkraften inte mätas efter injekteringen. Denna typ av

korrosionsskydd används inte längre då dagens branschgemensamma riktlinjer för dammsäkerhet (RIDAS) [7] inte medger tillgodoräknande av spännstag där spännkrafterna inte kan verifieras i efterhand vid bestämning av anläggnings bärförmåga [7].



Figur 2.4. Utformning av bergförankringar för linbaserade system (vänster) och stångbaserade system (höger). Från Skanskas produktkatalog för bergförankringar, VSL, respektive stångförankring.

2.2 SAMMANSTÄLLNING AV INSTALLERADE SPÄNNSTAGSSYSTEM

I Tabell 1 visas en sammanställning över insamlad information avseende spännkabelsystemen som installerats i svenska vattenkraftsanläggningar. Antalet installerade stag av respektive system och vilket korrosionsskydd som använts presenteras. Samma information redovisas även i bilaga 1. Som framgår av sammanställningen är linbaserade system den vanligaste typen av spännstag som installerats, där VSL 5-19 är det klart dominerande av linbaserade system. För stångbaserade system är det Dywidag, med varierande stångdiametrar, som är det mest använda. Dywidag är dessutom det näst mest använda spännstagssystemet efter VSL 5-19.

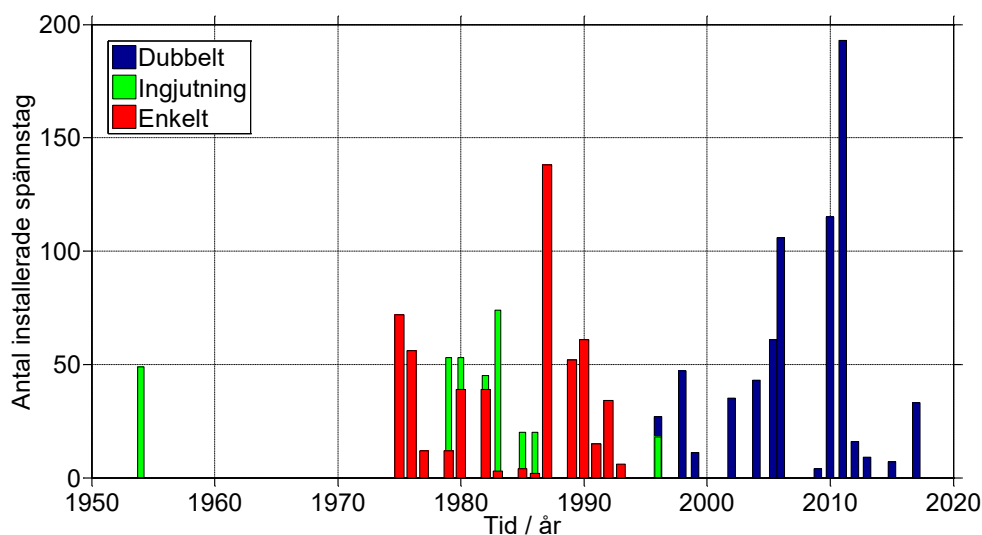
I Figur 2.5 redovisas antalet stag som installerats varje år för de olika spännstagsystemen. Som framgår användes enkelt korrosionsskydd och ingjutning med cementbruk fram till 1995. Därefter introducerades dubbelt korrosionsskydd och är från och med 1996 det enda korrosionsskyddet som används. Det bör påpekas att från sammanställningen i bilaga 1 så har uppgiftslämnarna inte angivit något årtal för installation för 82 spännstag med enkelt korrosionsskydd samt för 19 spännstag där ingjutning angetts som korrosionsskydd.

I Figur 2.6 redovisas samma information som i Figur 2.5, men utifrån respektive spännstagssystem. Stänger från Dywidag var det enda system som installerades under 1970-talet och dominerade under 1980-talet då även VSL systemet med 0,5" linor började användas. VSL med 0,5" linor var det enda system som installerades under 1990-talet och det var först 2004 som 0,6" linor från VSL installerades första gången. Anledningen till den sena introduktionen av 6" linor var att det tidigare var svårt att tillverka dessa linor med samma hållfasthet som 0,5" linor. Andra linbaserade system, MK4 och BBR Cona, började enligt sammanställningen att användas i vattenkraftsanläggningar år 2009.

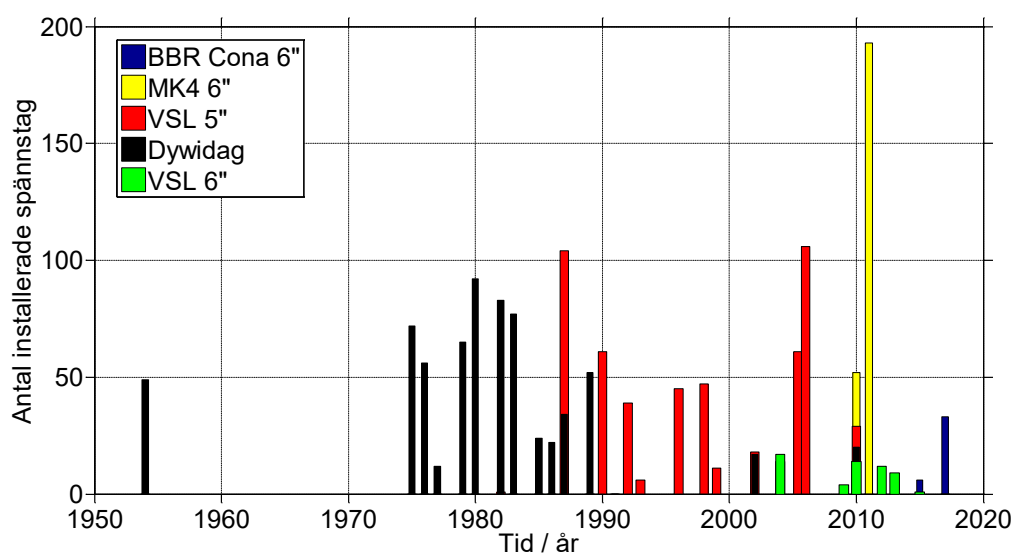
Tabell 1. Typ av spännkabelsystem som installerats i svenska vattenkraftsanläggningar.

Spännstagssystem	Antal installerade stag	Antal anläggningar	Korrosionsskydd
Linbaserade system	930		
VSL	642	26	Enkelt/dubbelt/Ingjutning
5-19	594	19	Enkelt/dubbelt/Ingjutning
6-7	7	2	Dubbelt
6-12	21	2	Dubbelt
6-19	20	3	Dubbelt
BBR	43	3	Dubbelt
6-7	4	1	Dubbelt
6-12	29	1	Dubbelt
6-15	6	1	Dubbelt
MK4	245	2	Dubbelt
6-12	52	2	Dubbelt
6-19	193	2	Dubbelt

Spännstagssystem	Antal installerade stag	Antal anläggningar	Korrosionsskydd
Stångbaserade system	760		
Dywidag	756	22	Enkelt/Dubbelt/Ingjutning
26	7	1	Enkelt/Ingjutning
27	118	5	Enkelt/Dubbelt
32	258	7	Enkelt/Ingjutning
36	349	8	Enkelt/Ingjutning
40	12	1	Dubbelt
Okänt	12	1	Enkelt
HJS80	4	1	Enkelt



Figur 2.5. Antalet installerade spännstag per år för de olika systemen för korrosionsskydd.



Figur 2.6. Antalet installerade spännstag per år för olika spännstagsystem.

2.3 ORSAKER TILL INSTALLATION

I Tabell 2 redovisas en sammanställning över orsakerna till att spännstag installerats i vattenkraftsanläggningar baserat på den information som samlats in i under projektets gång. Det bör påpekas att för drygt hälften av de spännstag och anläggningar som information har samlats in från har någon anledning till installationen av spännstag inte angetts. Den absolut vanligaste orsaken till installation av spännstag är att åtgärda stabilitetsproblem för dammen. Andra orsaker till installation som angivits är att motverka sprickbildning i betong och berg samt att förankra mekanisk utrustning i betongen, t.ex. generatorring och lucklager. Det bör påpekas att spännstag som installeras för att motverka sprickbildning även kan vara en åtgärd för att motverka stabilitetsproblem då sprickor i betongen kan medföra att t.ex. monolitisk verkan i en konstruktion går förlorad.

För spännstag med vilka syftet är att åtgärda stabilitetsproblem är linbaserade spännstagssystem vanligast, där VSL är det system som installerats på flest anläggningar. MK4 har endast installerats på två anläggningar, dock har ett stort antal spännstag installerats på vardera anläggning. Även för att åtgärda problem med sprickbildning har endast linbaserade system använts. Förklaringen till detta är med stor sannolikhet att det för stabilitetsåtgärder krävs relativt långa spännstag och höga spännkrafter. Det är praktiskt betydligt enklare att installera linbaserade spännstag med stora längder. Dessutom är hållfastheten högre för linbaserade system vilket medför att en mindre mängd spännstål krävs för att uppnå samma spännkraft. Stångbaserade system, d.v.s. Dywidag, har använts för att förankra mekanisk utrustning och är för denna applikation det klart dominerande systemet.

Tabell 2. Sammanställning av orsaker till installation av spännstag.

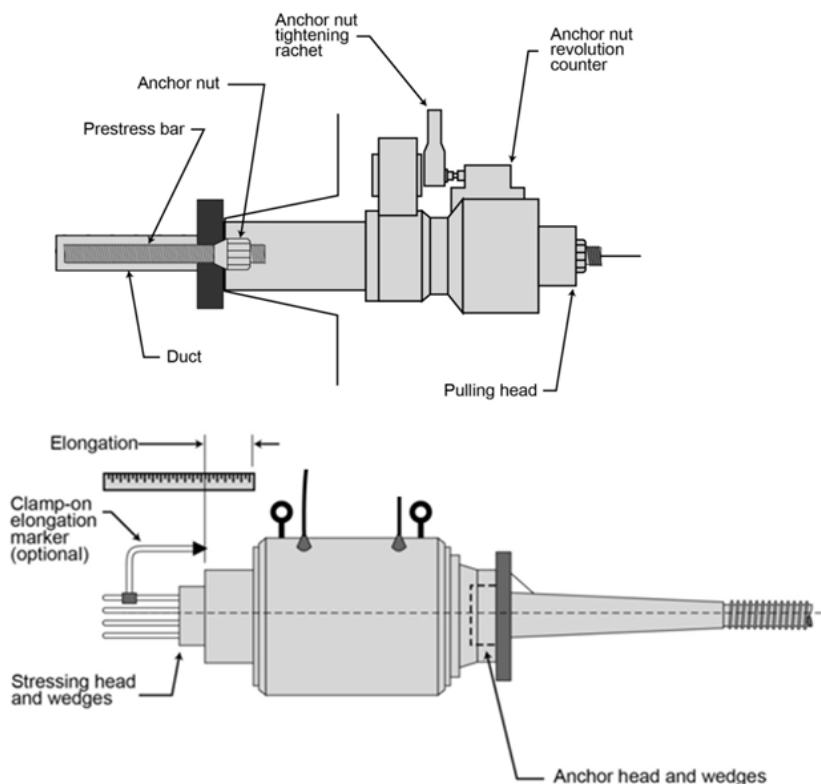
	Stabilitetsvillkor	Mekanisk utrustning	Sprickor betong/berg
Antal stag	413	229	58
Antal anläggningar	9	8	3
Spännstagssystem			
VSL	132	8	
BBR Cona	33		6
MK4	193		52
Dywidag		221	
Korrosionsskydd			
Dubbelt	413	8	58
Enkelt		218	

3 Spännkraft

3.1 UPPSPÄNNING

3.1.1 Uppspänning med domkraft

Under uppspänningen kopplas en hydraulisk domkraft till ankarstycket på det installerade spännstaget. För linbaserade system kan domkraften kopplas antingen till linorna via ett ankarstycke i domkraften alternativt används ett gängat ankarstycke till vilken domkraften ansluts, se Figur 3.1. I stångbaserade system kopplas domkraften till spännstaget via en skarvmuff som gängas på spännstagets ände. Kraften i spännstaget höjs sedan kontinuerligt under hela uppspänningen till dess att avsedd spännkraft uppnåts då låsning sker. Vid låsningen förs kraften över från domkraften till spännstagets ankarstycke. För linbaserade system utförs detta genom att kilarna förs in i ankarstycket varefter domkraften släpper kraften. För stångbaserade system gängas ankarmuttern mot ankarplattan och därefter släpper domkraften kraften i spännstaget. Efter låsning utförs ofta ett s.k. lift-off test, vilket är en kontroll av att korrekt spännkraft har uppnåts (se avsnitt 4.1.1 för mer detaljerad beskrivning). I det fall en korrigering av spännkraften är nödvändig utförs detta för linbaserade system genom att placera tunna stålplattor, s.k. mellanlägg, mellan ankarstycke och ankarplatta och för stångbaserade system genom att dra åt ankarmuttern.



Figur 3.1. Exempel på hur domkrafter kopplas till spännstag under uppspänning, stångbaserade system (vänster) och linbaserade system (höger), från [8].

3.1.2 Begränsning av spännkraft

I EC2 [2] anges begränsningar för spännkraften under både uppspänning samt för inlåst spännkraft. Den spänning som får appliceras på ett spännstag under uppspänning får maximalt uppgå till det lägsta av 80 % av f_{pk} och 90 % av $f_{p0,1k}$. I det fall noggrannheten i domkraften är minst $\pm 5\%$ av spännkraftens slutvärde får den maximala spänningen uppgå till 95 % av $f_{p0,1k}$. Spänningen i spännstaget direkt efter uppspänning får inte överskrida lägsta värdet av 75 % av f_{pk} och 85 % av $f_{p0,1k}$. Dessutom bör tryckspänningen i betongen inte överskrida 60 % av betongens tryckhållfasthet under uppspänningen. Efter låsning bör tryckspänningarna i betongen vara lägre än 45 % av betongens tryckhållfasthet för att minska långtidsförluster i spännstaget.

3.2 SPÄNNKRAFTSFÖRLUSTER

Det stora problemet med spännarmering i betongkonstruktioner är att spännkraften minskar dels p.g.a. effekter vid uppspänningen och dels med tiden p.g.a. långtidseffekter i ingående material. De mekanismer som ger upphov till spännkraftsförluster i en efterspänd betongkonstruktion kan delas in i korttidsförluster som sker vid uppspänningen samt långtidsförluster som utvecklas långsamt under i princip hela konstruktionens livstid.

3.2.1 Korttidsförluster

Korttidsförluster uppkommer i samband med uppspänningen och innefattar:

- Förluster p.g.a. låsglidning sker främst i linbaserade system då kraften överförs från domkraften till ankarstycket vid låsningen. Kilarna kommer då följa med linorna en bit in i ankarstycket innan kraften kan överföras helt från linorna via kilarna till ankarstycket. Denna glidning innebär en förkortning av spännkabeln och därmed en förlust av spännkraft. Förluster p.g.a. låsglidning kompenseras för genom att före låsning spänna upp kabeln till en nivå som motsvarar avsedd spännkraft plus beräknad förlust p.g.a. låsglidning. För stångbaserade system kan låsförluster i princip elimineras genom att ankarmuttern kontinuerligt gängas mot ankarplattan under hela uppspänningen.
- Elastisk deformation i betongen p.g.a. de inducerade tryckspänningarna.
- Friktionsförluster p.g.a. friktionen mellan foderrör och spännstag. Denna typ av förlust uppkommer främst i spännstag som har en vinkeländring längs kabelföringen och därmed kontakt mellan spännstag och foderrör. Detta medför då att spännkraften sjunker längs spännstagets längd och kraften i hela staget kan bli betydligt lägre än den spännkraft som påfördes vid förankringen. Spännstag inom vattenkraften är i samtliga fall som omfattas av denna rapport raka och avståndet mellan foderrör och spännstag är så pass stort att kontakt mellan spännstag och foderrör inte uppkommer. Inverkan av friktion mellan spännstag och foderrör är således i princip försumbar för spännstag inom vattenkraftsanläggningar.

3.2.2 Långtidsförluster

Långtidsförluster är tidsberoende förluster av den ursprungliga spännkraften och beror på långtidseffekter i de ingående materialen, d.v.s. krympning och krypning i betongen samt relaxation av spännstålet.

Krympning hos betong

Krympning av betong definieras som den tidsberoende volymminskning/töjning som sker vid konstant temperatur i en obelastad betongkonstruktion vars rörelser inte förhindras av yttre påverkan. Ur konstruktionssynpunkt brukar krympning hos betong delas in i följande två delar:

- Självuttorkningskrympning som sker p.g.a. kemiska reaktioner mellan cement och vatten då blandningsvattnet binds till cementet och därmed minskar i volym med 25 %.
- Uttorkningskrympning som sker p.g.a. betongens uttorkning till omgivande klimat.

Av dessa två är uttorkningskrympningen den klart dominerande. Efter tillräckligt lång tid antas att krympningen uppnår ett slutvärde, d.v.s. när betongen uppnår fuktjämvikt med omgivningen och inget utbyte av fukt längre sker. Storleken på slutkrympningen beror på ett flertal faktorer, främst omgivande klimat (både relativ fuktighet och temperatur) och betongens egenskaper och sammansättning.

Krypning i betong

Definitionen av krypning är den tidsberoende ökning av töjning som sker under konstant belastning. Krypningen delas in i två delar, grundkrypning samt uttorkningskrypning. Grundkrypning är den krypning som sker utan något fuktutbyte med omgivande klimat d.v.s. utan någon uttorkning.

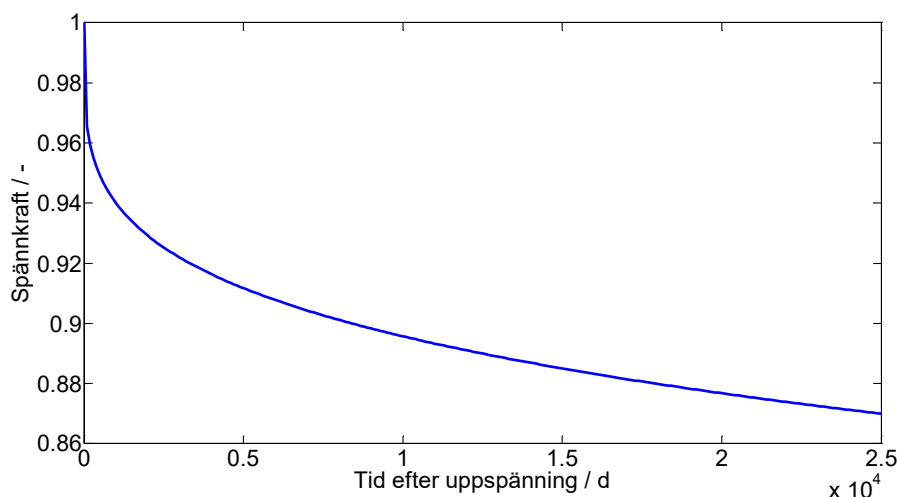
Uttorkningskrypning är den extra krypning som tillkommer p.g.a. att betongen torkar. Uttorkningskrypningen är den mest dominerade av de två och är cirka 2 – 3 ggr så stor som grundkrypningen. Krypning i betong påverkas av flera olika faktorer främst spänningsnivån i betongen i relation till hållfastheten, betongens ålder vid belastning samt omgivande klimat (både relativ fuktighet och temperatur).

Relaxation i spännstålet

Relaxation definieras som den tidsberoende förlusten av spänning under konstant töjning. Storleken på relaxationen beror i princip på två faktorer: spänningsnivån samt omgivande temperatur. Relaxationen ökar med spänningsnivån, d.v.s. hur stor spänningen i stålet är i relation till stålets draghållfasthet. Den omgivande temperaturen påverkar även relaxationen, ju högre denna är desto högre förluster p.g.a. relaxation. För att minimera spännkraftsförlusterna p.g.a. relaxation används s.k. låg-relaxerande stål i spännstål. Låg-relaxerande stål uppnås genom värmebehandling av stålet vilket kraftigt minskar förlusterna av relaxation jämfört med obehandlat stål.

3.2.3 Spännkraftsförluster i en konstruktion

I Figur 3.2 visas principiellt hur spännkraftsförluster utvecklas i en spännarmerad betongkonstruktion där förlusterna utvecklas snabbast i början för att sedan minska med tiden.



Figur 3.2. Principiell utveckling av spännkraftsförluster med tiden.

Vid dimensionering av spännarmerade betongkonstruktioner används empiriska modeller för att kvantifiera de mekanismer som beskrivs i avsnitt 3.2.2 och på så sätt uppskatta den totala spännkraftsförlusten under konstruktionens livslängd. För att kompensera för dessa förluster ökas sedan spännkraften med de beräknade förlusterna. Den spännkraft som ska appliceras på konstruktionen är således lika med den spännkraft som krävs för att klara belastningen på konstruktionen plus den uppskattade spännkraftsförlusten under konstruktionens livstid. Om konstruktionens livslängd inte är specificerad beräknas spännkraftsförluster för en period på 500 000 h d.v.s. cirka 57 år enligt riktlinjerna i den europeiska byggnormen för betongkonstruktioner, Eurocode 2 [3].

3.3 SPÄNNKRAFTER I INSTALLERADE SPÄNNSTAG

3.3.1 Spännkraftsnivå

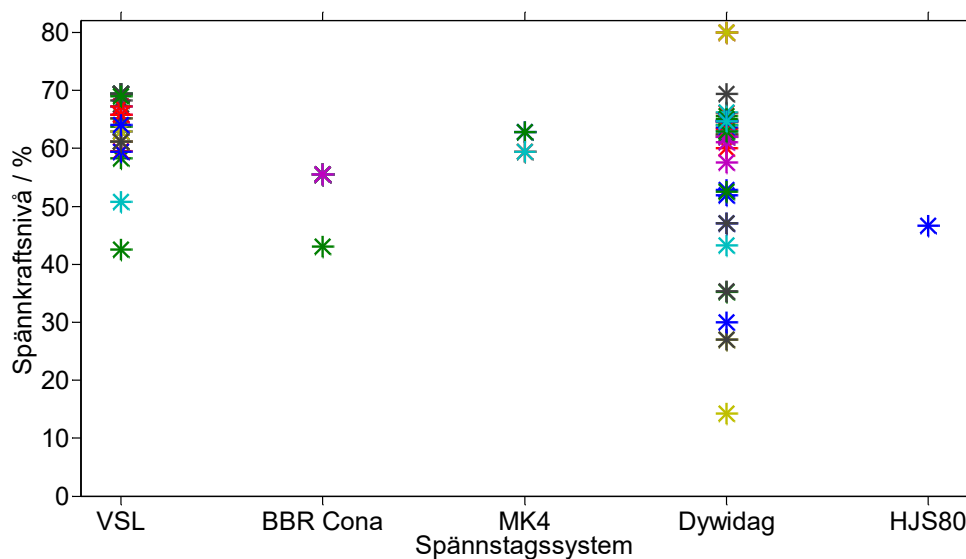
I Tabell 3 sammanställs angivna spännkrafter som spännkraftsnivån i procent av brotthållfastheten. Medelvärde, standardavvikelse samt variationsbredd på spänningsnivån presenteras tillsammans med antal stag för respektive spännstagssystem. I Figur 3.3 redovisas spännkraftsnivåer för respektive spännstagsystem och i Figur 3.4 visas samma information dock baserat på syftet med installationen, t.ex. om de installerats för ökad stabilitet eller för att motverka sprickbildning.

Resultaten visar att medelvärdet för spännkraftsnivån uppgår till 60 %. En spännkraftsnivå på 60 % är det som eftersträvas vid uppspänningen av berg- och jordförankringar då det bl.a. leder till lägre spännkraftsförluster p.g.a. relaxation. Spridningen i spännkraftsnivå är stor och varierar mellan 14 % till 80 % av

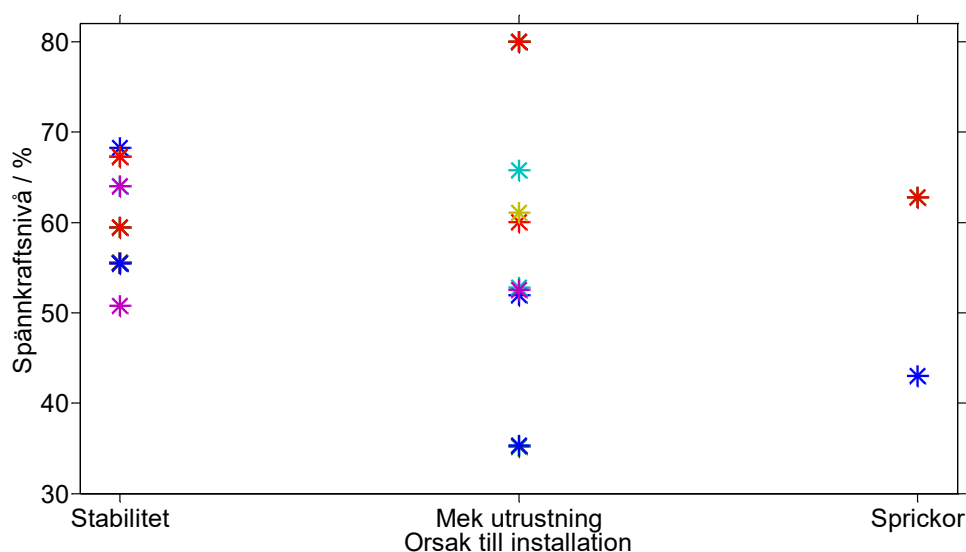
brottslasten. Spännstag från Dywidag är de som har störst spridning i spännkraftsnivå och är även de spännstag som både spänts till högsta respektive lägsta nivåer. För VSL-systemen är spridningen i spännkraftsnivå betydligt lägre. Detta beror sannolikt på att spännstag från VSL främst används för att motverka stabilitetsproblem och då eftersträvas som tidigare nämnts en spännkraftsnivå på 60 %. För spännstag som förankrar mekanisk utrustning kan t.ex. utrymmen vara begränsade för installation och en högre utnyttjandegrad av spännstålet kan då vara nödvändig.

Tabell 3. Sammanställning över spännkraftsnivåer i procent av brottslasten för installerade spännstag.

Kraftnivå	Totalt	VSL	BBR Cona	MK4	Dywidag	HJS 80
Medel / %	60	64	54	61	58	47
Standardavvikelse / %	11,0	5,8	3,8	1,9	14,5	
Max / %	80	69	56	63	80	47
Min / %	14	42	43	59	14	47
Variationsbredd / %	66	27	13	3	66	0
Antal spännstag	1690	642	43	245	744	4



Figur 3.3. Spännkraftsnivåer för olika spännstagssystem.



Figur 3.4. Spännkraftsnivåer för olika orsaker till installation av spännstag.

3.3.2 Spännkrafter vid dimensionering av spännstag

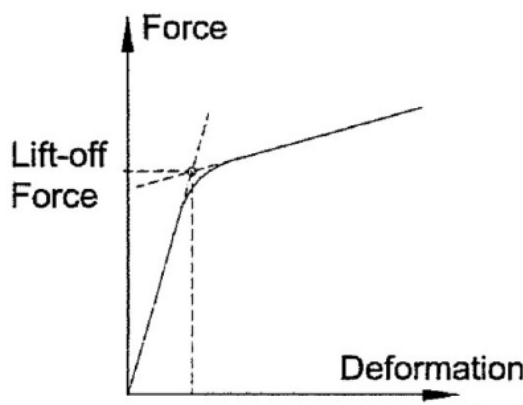
Från arbetet med sammanställningen utförd i detta projekt framgår det att det vid dimensionering för spännstag till vattenkraftsanläggningar inte finns något formellt krav att spännkraftsförluster ska tas i beaktan. Det har dock förekommit i enstaka projekt att spännkraftsförluster predikterats och inkluderats i beräkningen av behovet av spännkraft. Den dimensionerande spännkraft som ska appliceras har i vissa fall varit lika med den som krävs för att uppfylla säkerhetskraven, t.ex. för att uppnå avsedd säkerhetsfaktor för en brottmod. I vissa fall har en marginal införts vid dimensioneringen av spännstagsinstallationen, vilka antaganden som legat bakom införda marginaler har dock inte framkommit av det material som legat till grund för denna rapport. I de fall införda marginaler är små kan spännkraftsförlusterna, främst långtidsförluster, men även korttidsförluster, medföra att säkerhetskravet inte uppfylls. Vid installation av spännstag i en vattenkraftsanläggning bör det därför vara ett krav att spännkraftsförluster ska beaktas vid bestämning av dimensionerande spännkraft. Alternativt kan en form av "standardiserad" marginal införas t.ex. för olika spännstagssystem eller beroende på syftet med spännstagen. Denna marginal ska då bestämmas utifrån mätdata över spännkraftsförluster i befintliga anläggningar. En god marginal mellan spännkraft och kravet på erforderlig spännkraft enligt dimensionering är fördelaktigt ur andra perspektiv. Det medför en extra säkerhet om inte avsedd spännkraft uppnås vid uppspänningen samt att en viss redundans införs i systemet då t.ex. brott på enstaka spännstag kan tillåtas utan att totala spännkraften i konstruktionen underskrids.

4 Kontroll- och inspektionsprogram

4.1 SPÄNNKRAFTSMÄTNINGAR

4.1.1 Lift-off test

För spännstag som inte är cementinjekterade kan spännkraften mätas med ett s.k. lift-off test. Detta innebär att samma typ av domkraft som används vid uppspänningen kopplas till den aktiva änden på spännstaget. Kraften i spännstaget ökas sedan till dess att ankarstycket lyfter från ankarplattan, d.v.s. lift-off. Kraften i spännstaget, även kallad lift-off kraft, ansätts att vara lika med den kraft som precis får ankarstycket att lyfta från ankarplattan. Det finns flera olika sätt att definiera lift-off kraften. En vanlig metod är att kontinuerligt mäta både kraften och ankarstyckets rörelse och genom att plotta applicerad kraft mot rörelsen hos ankarstycket erhålls en kurva enligt Figur 4.1. I denna kurva kan man tydligt se en ändring i kurvans lutning efter att ankarstycket lyft från ankarplattan. Lift-off kraften bestäms sedan genom interpolering av de två kurvdelarna. Det finns för närvarande ingen standardiserad mätmetodik för bestämning av lift-off kraft utan det är upp till utföraren att använda sin egen metodik.



Figur 4.1. Kraft-förskjutningsdiagram för att bestämma den s.k. lift-off kraften [1].

Andra metoder som kan användas för att bestämma lift-off kraften är att visuellt bedöma när en separation av ankarstycke och ankarplatta sker alternativt att lyfta ankarstycket till en förbestämd nivå, t.ex. vid ett visst mått på avståndet mellan ankarstycke och ankarplatta. Båda dessa metoder för bestämning av lift-off kraften kommer överskatta den kvarvarande spännkraften. Det bör dock påpekas att om samma metod har använts för bestämning av lift-off kraften både vid uppspänningen och efterföljande mätningar så kommer sannolikt absolutvärdet på spännkraftsförlusterna att vara korrekt eftersom endast skillnaden mellan två mätpunkter är av intresse. Dock finns fortfarande osäkerheterna kvar om avsedd spännkraft verkligen uppnåddes vid uppspänningen. En annan osäkerhet i metodiken är mättelet i domkrafterna (t.ex. tryckgivaren som mäter trycket i hydrauloljan) som används, vilket normalt anges till mellan 1 till 2 %.

4.1.2 Mätmetoder inom vattenkraften

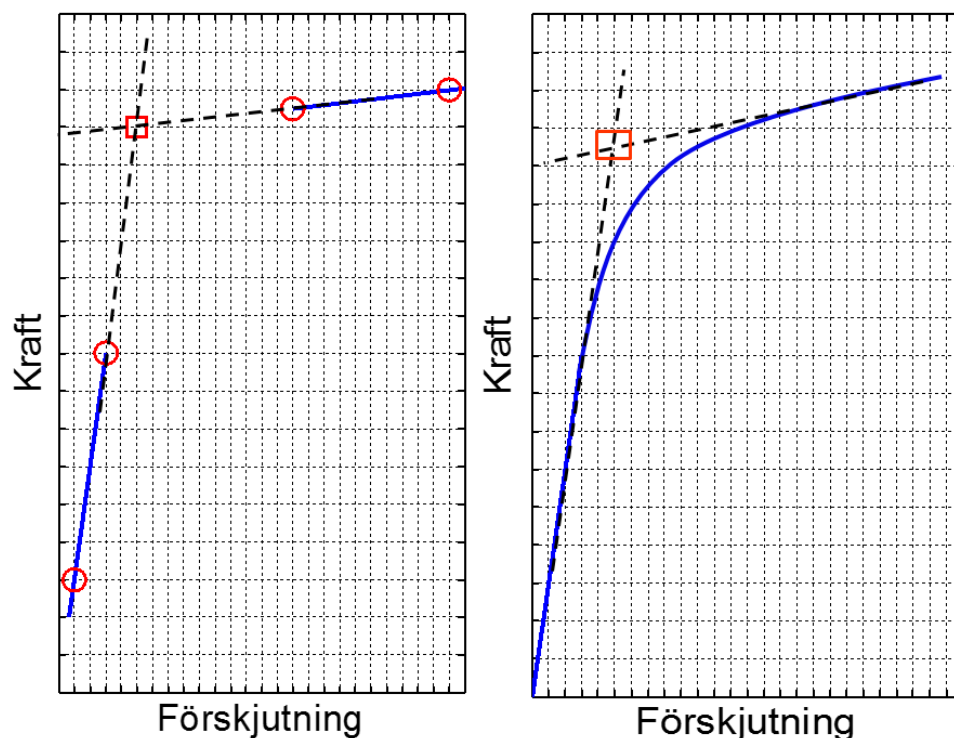
Sammanställningen av data kring spännstag visar att samtliga mätningar utförs genom att bestämma lift-off kraften utifrån ett kraft-förskjutningsdiagram. Dock används några olika metoder för att bestämma själva lift-off kraften, vilka beskrivs nedan. I föreliggande rapport används benämningarna förenklad metod och standardmetod. Principen för dessa båda metoder visas i Figur 4.2.

Förenklad metod

En förenklad metod baserad på metodiken i Figur 4.1 som används relativt ofta är att endast utföra mätningen i ett antal fördefinierade kraftnivåer, se Figur 4.2. Ett antal kraftnivåer som med marginal ligger under ursprungliga spännkraften i spännstaget samt ett antal kraftnivåer över den ursprungliga spännkraften. I vissa fall används endast fyra kraftnivåer, två under ursprunglig spännkraft och två över. I Figur 4.2 visas principen för denna metod, de fyra röda cirkarna motsvarar de fyra kraftnivåerna. Detta genererar ett diagram med två raka linjer och därefter uppskattas lift-off kraften genom interpolering, den streckade linjen i Figur 4.2, den röda kvadraten visar den uppskattade lift-off kraften. Nackdelen med denna procedur är att risken är stor att den verkliga kraft-förskjutningskurvan inte fångas upp, d.v.s. kraftnivån när kurvan ändrar riktning, eftersom de första kraftnivåerna måste ligga under den inlåsta spännkraften och de sista måste ligga över.

Standardmetoden

Den mer noggranna standardmetod som använts för ett antal anläggningar är att mäta både kraft och förskjutning kontinuerligt under lift-off testet, vilket resulterar i ett diagram likt det i Figur 4.1 och Figur 4.2. Ett problem som ofta är förknippat med denna metod är att testerna avbrutits för tidigt, d.v.s. en tillräcklig förlängning efter lift-off har inte uppnåtts. Detta medför att den andra linjära delen av kurvan efter lift-off inte är tillräckligt lång för att på ett tillförlitligt vis kunna anpassa en tangent till denna del av kurvan. I vissa fall har det t.o.m. varit svårt att särskilja när kurvaturen i samband med lift-off övergår till den linjära delen efter lift-off. En följd av detta är att den inlåsta kraften i spännstaget underskattas.



Figur 4.2. Exempel på de olika metoderna för bestämning av lift-off kraft. Förenklade metoden till vänster och standardmetoden till höger. De röda kvadraterna visar den uppskattade lift-off kraften.

Osäkerheter i mätmetoderna

I en av anläggningarna så har både den förenklade metoden och standardmetoden använts för att bestämma lift-off krafter på samma spännstag vid olika tillfällen. Generellt visade den förenklade metoden högre spännkraft än standardmetoden. I detta fall utfördes den förenklade metoden endast i fyra fördefinierade kraftnivåer, d.v.s. samma metodik som i Figur 4.2. Vid i princip samtliga fall avbröts mätningarna med kontinuerlig mätning för tidigt, d.v.s. en tillräcklig förlängning erhöles inte. För vissa spännstag var skillnaderna mellan de båda metoderna upp emot 20 %.

I ett tidigare projekt inom Energiforsks betongtekniska program kärnkraft instrumenterades ett antal spännkablar i inneslutningen till Forsmark 2 med lastceller. Mätningar under uppspänningen visade att lift-off testerna överskattade de inlåsta spännkrafterna med runt 5 % [9]. Metoden som användes för att bestämma lift-off kraften i detta fall var den förenklade metoden baserad på fyra fördefinierade steg. Detta innebär att då lift-off tester används för att bestämma kvarvarande spännkraft finns risken att spännkraftsförlusterna i spännstaget underskattas, d.v.s. den verkliga spännkraften är lägre än vad testet visar.

Då säkerheten för en dämmande konstruktion är direkt beroende av spännkrafterna i spännstagen så är ovan nämnda osäkerheter i mätmetodiken med domkraft faktorer som påverkar säkerheten för anläggningen negativt. Noggrannheten hos mätmetodiken bör undersökas vidare och vid behov förbättras. Själva metodiken vid bestämningen av lift-off kraften bör även standardiseras så att samma metodik alltid används. Detta medför även att

mätningar av olika utförare kan jämföras med varandra. Det kan dock introducera osäkerheter då ett byte av mätmetodik kan medföra att jämförelser med tidigare mätningar kan bli svåra att genomföra p.g.a. att olika mätmetoder använts.

4.1.3 Instrumentering för mätning av spännkraft

Instrumentering av spännstag är ett alternativ eller 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. Ett alternativ är att installera töjningsgivare direkt på spännstaget i stångbaserade system eller på enskilda linor i linbaserade system. Nackdelen med töjningsgivare är att kraften inte mäts direkt utan måste räknas fram från töjningen samt att för linbaserade system så mäts endast kraften i enskilda linor och inte i hela spännstaget. Fördelen med instrumentering jämfört med mätningar med domkraft är att instrumenteringen ger en kontinuerlig övervakning av spännkrafterna i spännstagen. Detta medför att eventuella ändringar i spännkraften kan upptäckas då de inträffar och inte i samband med domkraftsmätningarna. Vidare kan även variationer i spännkraft p.g.a. temperaturvariationer bestämmas. Dessutom kan spännkraften i spännstagen bestämmas mer noggrant jämfört med domkraftsmätningar då bl.a. osäkerheterna med domkraftsmätningar elimineras vid uppspänningen.

En utförd studie angående instrumentering av spännkablar har visat att omgivande temperatur och då främst variationer i denna är en viktig parameter som påverkar resultaten från mätningar med lastceller och som därför måste beaktas [9].

Lastceller inom vattenkraften

I den insamlade informationen finns endast uppgifter om att lastceller installerats på ett antal spännstag i två anläggningar. För tillfället utförs ingen kontinuerlig loggning av spännkrafterna utan endast manuella mätningar utförs. Erfarenheterna av mätningarna med lastcellerna visar på relativt god överensstämmelse med domkraftsmätningarna avseende spännkraftsförluster. Det bör påpekas att inga mätningar med domkraft utförts på spännstag med lastcell. Dock har flera av lastcellerna visat konstiga resultat, t.ex. ökande spännkrafter och flera lastceller har vid några tillfällen inte fungerat. Orsaken till dessa felaktigheter har inte utretts.

Det planeras för installation av lastceller i ytterligare en anläggning under 2017.

4.2 INSPEKTIONSPROGRAM

För majoriteten av de spännstag för vilka information har samlats in 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.

- Inspektionsprogram 1: En anläggningsägare kontrollerar samtliga stag i en anläggning med ett intervall på 6 år. Metodiken som för tillfället används i

majoriteten av fallen för att bestämma lift-off kraften i spännstagen är den förenklade metoden enligt avsnitt 4.1.2 utifrån fyra fördefinierade kraftnivåer. Acceptanskriterierna för den kvarvarande spännkraften är att den uppmätta spännkraften inte får understiga ursprunglig spännkraft med mer än 10 % eller överstiga ursprunglig spännkraft med 5 %. Överskrids acceptanskriterierna justeras spännkraften till ursprunglig nivå.

- Inspektionsprogram 2: Inspektionsprogrammet för spännstag hos en annan anläggningsägare 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 $\pm 10\%$ från ursprunglig spännkraft. Överskridande av acceptanskriteriet rapporteras till ansvarig konstruktör alternativt anläggningsägaren som i varje enskilt fall beslutar om en eventuell åtgärd.
- Inspektionsprogram 3: En anläggningsägare anger att första inspektionen utförs efter 2 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. Generella acceptanskriterier för justering spännkraften för en hel population av dammkonstruktioner medför att justeringen av spännkraft inte är behovsstyrd för en enskild anläggning. I vissa fall kan t.ex. samtliga spännstag spänts 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. I detta fall är det således inte motiverat att justera spännkrafterna i enskilda spännstag. Mätningar på spännkablar i reaktorinneslutningar har visat att höjningar av spännkraft kan medföra accelererade spännkraftsförluster. I vissa fall har hela höjningen gått förlorad på fem år och i vissa fall har spännkrafterna efter fem år t.o.m. legat på lägre nivåer än före höjningen. Orsaken till de accelererade spännkraftsförlusterna är ännu inte klarlagd [10]. Effekterna av höjningarna av spännkraft inom vattenkraften bör utvärderas för att undersöka om samma fenomen kan observeras även här och i så fall även undersöka orsaken till fenomenet.

En standardiserad utformning på inspektionsprogram för bl.a. inspektion av spännstags status och mätning av kvarvarande spännkraft bör tas fram. Detta bör t.ex. omfatta följande:

- Intervallen för inspektionerna,
- Antalet spännstag som mätningar ska utföras på vid varje inspektion,
- Acceptanskriterier för uppmätt spännkraft,
- Vilka åtgärder som ska vidtas vid avvikelse från acceptanskriterierna,
- Rekommendationer för höjning av spännkraft,
- Okulär besiktning av spännstagens status,

Ytterligare en fråga som bör utredas är den tekniska utformningen av spännstag för installationsarbeten samt mätning av kvarvarande spännkraft. Ett exempel är utformningen av spännstag som sänks ner i betongen/konstruktionen. I sådana fall

placeras ofta spännstaget i en brunn. Denna placering medför en risk ur arbetsmiljösynpunkt både vid installation av spännstaget samt vid spännkraftsmätning då det begränsade utrymmet kring ankarstycket medför att personalen måste befinna sig bakom domkraften vid uppspänning/mätning.

5 Erfarenheter från installation och drift

5.1 ERFARENHETER FRÅN INSTALLATION AV SPÄNNSTAG

Erfarenheter från installation av spännstag som rapporterats till underlaget för föreliggande rapport är följande:

- Problem vid borrning har rapporterats för tre anläggningar. Orsakerna har varit både berg och betong av dålig kvalitet. Andra orsaker har varit problem med inläckande vatten i borrhålen samt väldigt låga utomhustemperaturer i samband med borrningen.
- Entreprenören för spännstagsinstallationen utförde inte samtliga kontroller som krävs vid installation. Bl.a. utfördes inte kontrollmätning av längden på borrarat hål, vilket medförde att avsedd förankringslängd inte uppnåddes.
- Krossning av uppgjutna fundament i samband med uppspänningen av ett antal spännstag. Orsaken var att fundamenten under ankarplattorna var feldimensionerade.
- Brott på enstaka linor i fyra spännstag inträffade i samband med uppspänningen på en anläggning. Orsaken till brotten är okända.
- En dammdel kunde inte spännas fast p.g.a. uppsprucket berg

5.2 ERFARENHETER FRÅN INSTALLERADE SPÄNNSTAG UNDER DRIFT

De erfarenheter som rapporterats är spännkraftsförluster ä följande:

- I två anläggningar har uppmätta förluster av spännkraft överstigit toleransnivåerna på $\pm 10\%$. I båda anläggningarna har det installerats spännstag både som stabilitetshöjande åtgärd och för att överbrygga sprickor i betongen. Mätningar av kvarvarande spännkraft har utförts med både domkraft och med lastceller som installerats på ett antal av spännstagen. I båda anläggningen uppgick medelvärdena på spännkraftsförlusterna under de första fyra åren efter uppspänningen till 7,5 % respektive 7 %, vilket är inom toleranserna. För de spännstag som installerats som stabilitetshöjande åtgärd var det endast i ett fåtal spännstag som toleranserna överskreds och i knappt hälften av dessa var spännkrafterna lägre än de teoretiskt erforderliga. För de spännstag som installerats för att motverka sprickbildning hade mer än hälften av spännstagen förluster som överskred toleransnivån, dock var det bara ett spännstag som underskred den teoretiskt erforderliga spännkraftsnivån. Mätningar med lastceller under efterföljande år visade att spännkraftsförlusterna i princip hade avtagit. Vad som även bör noteras är att för den ena anläggningen var överensstämmelsen avseende spännkraftsförluster mellan mätningarna med lastceller och domkraft relativt god. För den andra anläggningen visade lastcellerna generellt lägre spännkraftsförluster jämfört med mätningar med domkraft. Det bör noteras att mätningar med domkraft inte utförts på spännstag med lastceller.
- I en anläggning har senaste spännkraftsmätningen visat indikationer på att spännkraften har ökat i relation till tidigare mätningar.

- Problem med igensatta dränage till foderrören har rapporterats för en anläggning. Några skador p.g.a. det inträngande vattnet har dock ej rapporterats.
- I en anläggning har en monolit där spännstag installerats rört sig efter uppspänningen av spännstagen.

6 Slutsatser

Följande slutsatser kan dras från resultaten i föreliggande rapport.

- De spännstagssystem som är vanligast inom vattenkraftsanläggningar är linbaserade system från VSL samt stångbaserade system från Dywidag. Dywidag var dominerande under 1970 och 1980-talet. VSL-systemet började användas under slutet av 1980-talet.
- Tre olika typer av korrosionsskydd har använts i vattenkraftsanläggningar, ingjutning med cementbruk, s.k. enkelt korrosionsskydd med injektering med rostskyddsfett samt dubbelt korrosionsskydd med både injektering av rostskyddsfett och plaströlje kring spännstaget. Enkelt korrosionsskydd och ingjutning med cementbruk användes fram till mitten på 1990-talet. Dubbelt korrosionsskydd infördes i mitten av 1990-talet och har uteslutande använts sedan dess.
- Den dominerande orsaken till installation av spännstag i vattenkraftsanläggningar är att öka stabiliteten hos dammen. Det är även vanligt att spännstag används för att förankra mekanisk utrustning eller motverka sprickbildning i berg och/eller betong.
- Medelvärde på spännkrafterna i installerade spännstag uppgår till 60 % av spännstagets brottlast. Variationen i spännkraftsnivåer är dock stor och varierar mellan 14 % till 80 %, störst spridning är det för spännstag som förankrar mekanisk utrustning.
- Någon standardiserad metod för att införa marginaler mellan teoretiskt erforderlig spännkraft och den spännkraft som appliceras i konstruktionen finns inte inom branschen, t.ex. med syfte att kompensera för spännkraftsförluster. Det är upp till respektive utförare/anläggningsägare att själva bestämma marginalerna ner till den teoretiskt erforderliga spännkraften.
- Kvarvarande spännkraft bestäms i befintliga spännstag genom mätning med domkraft. Någon standardiserad metodik för domkraftsmätningar finns ej och olika metoder används av olika utförare. Vidare indikerar resultat från utförda mätningar att noggrannheten i nuvarande metodiker är behäftade med osäkerheter vilket kan medföra att den verkliga spännkraften i en konstruktion antingen över- eller underskattas.
- Olika inspektionsprogram för inspektion av spännstagssystem och mätning av kvarvarande spännkraft används av de olika anläggningsägarna.

7 Förslag på vidare arbete inom området

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

- Noggrannheten hos mätmetodiken med domkraft för bestämning av kvarvarande spännkraft är behäftad med osäkerheter och bör därför undersökas vidare och vid behov förbättras. Metodiken för bestämning av själva lift-off kraften bör även standardiseras så att samma metodik alltid används oavsett utförare.
- En standardiserad metod för att bestämma marginalen mellan teoretiskt erforderlig spännkraft och den spännkraft som appliceras vid uppspänningen bör utvecklas. Hanterandet av spännkraftsförluster ska även inkluderas i denna metod.
- Undersöka om samma fenomen som observerats inom kärnkraften där höjningar av spännkraften kan leda till accelererade spännkraftsförluster kan upptäckas från mätningar på vattenkraftens spännstag. Om detta även förekommer inom vattenkraften bör fenomenet undersökas vidare för att hitta den bakomliggande orsaken. Vidare bör även en rutin tas fram för höjning av spännkraft för de fall där spännkraften i konstruktionen måste höjas av säkerhetsskäl.
- Inspektionsprogram för besiktning av spännstagssystem samt mätning av kvarvarande spännkraft bör vidareutvecklas. Ett sådant program ska bl.a. inkludera hur spännkraftsmätningar ska utföras, antalet spännstag som ska inkluderas i varje inspektion, acceptanskriterier för uppmätt spännkraft, rutiner för överskridande av acceptanskriterier och vid höjning av spännkraft samt intervaller för inspektionerna. Delar av inspektionsprogrammet ska baseras på data från uppmätta spännkrafter i befintliga anläggningar.
- Ta fram ett förslag på hur instrumentering av spännstag med t.ex. lastceller ska utformas samt vilka parametrar som ska övervakas i ett sådant mätsystem.
- Riktlinjer för kravställande om livslängd i samband med design och upphandling.
- Rekommendationer för installationsarbeten, särskilt utifrån underhållsmässighet. Tekniklösningar för långtidsövervakning av spännkrafter i spännstag.

8 Referenser

- [1] Anderson P., Structural Integrity of Prestressed Nuclear Reactor Containments, Doktorsavhandling, Avd. för Konstruktionsteknik, Lunds Tekniska Högskola, 2007.
- [2] Petersson T., Sundquist H., Spännbetong, Brobyggnad, Kungliga Tekniska Högskolan, 2003.
- [3] Eurocode 2 - Dimensionering av betongkonstruktioner, del 1-1: Allmänna regler och regler för byggnader, 2008, Svensk standard SS-EN 1992-1-1:2005.
- [4] Prestressing steels – part 1-4, EN 10138-2006.
- [5] Eurocode 7 - Dimensionering av geokonstruktioner – Del 1: Allmänna regler, Svensk standard SS-EN 1997-1, 2004.
- [6] Utförande av geokonstruktioner – Förankringar, SS-EN 1537:2013, 2013.
- [7] RIDAS 2016 - Kraftföretagens riktlinjer för dammsäkerhet, Energiföretagen Sverige, 2016.
- [8] Post-Tensioning Tendon Installation and Grouting Manual, U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration, FHWA-NHI-13-026, 2013.
- [9] Lundqvist P., Edin M., Persson P., Frisk A., Instrumentering av spännkablar i Forsmark 2, Energiforsk rapport 2016:243, 2016.
- [10] Lundqvist P., Edin M., Persson P., Frisk A., Prestressed Containments – Prestress Losses and the Effects of Re-tensioning of Tendons, Fontevraud 8, Avignon, 15-18 September 2014.

Bilaga A: Sammanställning av insamlad information

Nedan anges den information som samlats in angående spännstag i svenska vattenkraftsanläggningar. Samtliga anläggningar har avidentifierats och identifieras endast med numret längst till vänster i tabellen.

Tabell B1. Sammanställd information kring spännstag i svenska vattenkraftsanläggningar.

#	Konstruktionsdel	Spännstags-system	$f_{p0,1k}/f_{puk}$ / MPa	Diameter / mm	Uppspännings-kraft / kN	Brottlast / kN	Kraftnivå / %	Förankrings-längd / m	Total längd / m	Installations-år	Antal stag	Korrosions-skydd	Orsak till installation
1	Ledmur	Dywidag	835/1030	27	150	1050	14	3,0	7,0	2002	17	Dubbelt	
1	Intag	VSL 5-19	1640/1860	180	2450	3530	69	6,0	41,0	2002	18	Dubbelt	
2	Utskov	Dywidag	835/1030	36	684	1050	65	4,0	18,7	1986	2	Enkelt	
2	Utskov	Dywidag	835/1030	36	663	1050	63	4,0	7,4	1986	20	Ingjutning	
3	Generatorring	Dywidag	80/105	32	446	844	53	-	1,5	1980	30	Enkelt	Generator
3	Generatorring	Dywidag	80/105	32	444	844	53	-	0,8	1980	2	Enkelt	Generator
3	Pelare	VSL 5-19	1640/1860	180	2450	3530	69	4,0	-	1982	1	Enkelt	
3	Vingmur	Dywidag	835/1030	36	689	1050	66	4,0	19,7	1982	7	Ingjutning	
3	Pelare	Dywidag	835/1030	36	694	1050	66	4,0	17,3	1982	5	Ingjutning	
3	Pelare	Dywidag	835/1030	36	696	1050	66	4,0	17,0	1982	20	Ingjutning	
4	Brobana	VSL 5-19	1640/1860	180	2450	3530	69	6,0	30,7	1991	15	Enkelt	
5	Flottningsränna	VSL 5-19	1640/1860	180	2160	3530	61	6,0	18,0	-	10	Enkelt	
6	Generatorfundament	Dywidag	835/1030	36	653	1069	61	2,5	-	1982	24	Enkelt	Generator
6	Reservutskov	Dywidag	835/1030	36	681	1050	65	4,4	24,3	1983	3	Enkelt	
6	Reservutskov	Dywidag	835/1030	36	673	1050	64	4,4	25,3	1983	18	Ingjutning	
6	Pelare	Dywidag	835/1030	36	678	1050	65	4,2	13,1	1983	10	Ingjutning	

#	Konstruktionsdel	Spännstags-system	$f_{p0,1k}/f_{puk}$ / MPa	Diameter / mm	Uppspännings-kraft / kN	Brottlast / kN	Kraftnivå / %	Förankrings längd / m	Total längd / m	Installations -år	Antal stag	Korrosions-skydd	Orsak till installation
6	Pelare	Dywidag	835/1030	36	671	1050	64	4,2	13,4	1983	46	Ingjutning	
7	Fisktrappa	Dywidag	850/1050	32	530	850	62	5,0	-	1979	5	Enkelt	
7	Utskov	Dywidag	850/1050	32	530	850	62	5,0	-	1979	12	Ingjutning	
7	Utskov	Dywidag	850/1050	32	530	850	62	5	-	1979	20	Ingjutning	
7	Aggregat	Dywidag	850/1050	32	680	850	80	5,0	15,0	1982	5	Enkelt	Aggregat
7	Aggregat	Dywidag	850/1050	26	300	850	35	3,0	13,0	1982	5	Enkelt	Aggregat
7	Fisktrappa	Dywidag	850/1050	32	400	850	47	5,0	-	1982	4	Enkelt	
7	Aggregat	Dywidag	850/1050	26	680	850	80	5,0	15,0	1982	2	Ingjutning	Aggregat
7	Aggregat	Dywidag	850/1050	32	680	850	80	5,0	15,0	1982	1	Ingjutning	Aggregat
7	Fisktrappa	Dywidag	850/1050	32	400	850	47	5,0	-	1982	10	Ingjutning	
8	Utskov	VSL 5-19	1640/1860	180	2450	3530	69	6,0	29,6	2004	11	Dubbelt	
8	Utskovskanal	Dywidag	1080/1230	36	720	1250	58	-	10,0	-	20	Enkelt	
9	Pelare	VSL 5-19	1640/1860	180	2450	3530	69	6,0	20,0	2006	3	Dubbelt	
10	Utskov	Dywidag	1080/1230	36	670	1080	62	5,0	25,0	1980	7	Enkelt	
10	Utskov	Dywidag	1080/1230	36	670	1080	62	5,0	13,9	1980	53	Ingjutning	
10	Dammkrön	VSL 5-19	1640/1860	180	2250	3530	64	6,0	25,2	1987	104	Enkelt	
11	Monolit	VSL 5-19	1640/1860	180	2300	3530	65	6,0	37,0	2005	5	Dubbelt	
11	Lucklager	VSL 5-19	1640/1860	180	2300	3530	65	6,0	37,0	2005	13	Dubbelt	
12	Utskov	VSL 5-19	1640/1860	180	2450	3530	69	6,0	19,4	1996	27	Dubbelt	
12	Pelare	VSL 5-19	1640/1860	180	2450	3530	69	5,1	15,1	1996	18	Ingjutning	
13	Pelare	VSL 5-19	1640/1860	180	2450	3530	69	6,0	23,8	1998	29	Dubbelt	
13	Monolit	VSL 5-19	1640/1860	180	2450	3530	69	6,0	35,6	1999	11	Dubbelt	
13	Lucklager	VSL 6-19	1640/1860	200	3500	5320	66	-	-	2010	8	Dubbelt	Lucklager
14	Utskov	Dywidag	1080/1230	40	750	1080	69	5,0	13,0	2004	12	Dubbelt	

#	Konstruktionsdel	Spännstags-system	$f_{p0,1k}/f_{puk}$ / MPa	Diameter / mm	Uppspännings-kraft / kN	Brottlast / kN	Kraftnivå / %	Förankrings längd / m	Total längd / m	Installations -år	Antal stag	Korrosions-skydd	Orsak till installation
15	Intag	VSL 5-19	1640/1860	180	2450	3530	69	6,0	39,0	2004	3	Dubbelt	
16	Intag	Dywidag	850/1050	36	550	850	65	3,5	-	1985	2	Enkelt	
16	Intag	Dywidag	850/1050	36	540	850	64	3,5	-	1985	2	Enkelt	
16	Intag	Dywidag	850/1050	36	550	850	65	3,5	-	1985	16	Ingjutning	
16	Intag	Dywidag	850/1050	36	540	850	64	3,5	-	1985	4	Ingjutning	
17	Anfang	HJS 80	800	32	300	643	47	-	12,0	-	4	Enkelt	
18	Kanalmur	VSL 5-19	1640/1860	150	1500	2230	67	5,0	13,5	2005	43	Dubbelt	Stabilitetsvillkor
18	Kanalmur	VSL 5-19	1640/1860	150	1500	2230	67	5	12	2006	38	Dubbelt	Stabilitetsvillkor
19	Djuputskov	BBR Cona CMI 6-15	1640/1860	-	1800	4185	43	10	14,4	2015	6	Dubbelt	Bärförmåga berg samt sprickor i betong
20	Utskov	VSL 5-19	1640/1860	180	2410	3530	68	6,0	20,0	1998	18	Dubbelt	Stabilitetsvillkor
21	Utskovspelare	VSL 6-7	1640/1860	-	-	-	-	5	15,9	2015	1	Dubbelt	Stabilitetsvillkor
22	Utskovspelare	BBR Cona 6-7	1770/1860	-	-	-	-	-	11	2012	4	Dubbelt	Stabilitetsvillkor
23	Monolit	VSL 5-19	1640/1860	180	2160	3530	61	6,0	38,6	2006	16	Dubbelt	
23	Betongbalk	VSL 5-19	1640/1860	180	2160	3530	61	6,0	12,0	2006	34	Dubbelt	
23	Ledmur	VSL 5-19	1640/1860	180	2160	3530	61	6,0	-	2006	9	Dubbelt	
24	Utskov	Dywidag	1080/1230	36	670	1080	62	5,0	14,1	1989	52	Enkelt	
24	Dammkrön	VSL 5-19	1640/1860	180	2160	3530	61	6,0	25,0	1990	43	Enkelt	
24	Bottenutskov	VSL 5-19	1640/1860	180	2160	3530	61	6,0	25,0	1990	8	Enkelt	
24	Intag	VSL 5-19	1640/1860	180	2160	3530	61	6,0	25,0	1990	6	Enkelt	
24	Dammkrön	VSL 5-19	1640/1860	180	2160	3530	61	6,0	22,0	1990	4	Enkelt	
24	Dammkrön	VSL 5-19	1640/1860	150	1300	2230	58	5,0	25,0	1992	34	Enkelt	
25	Skibord	BBR Cona 6-12	1770/1860		1860	3348	56	6,5	14	2017	6	Dubbelt	Stabilitetsvillkor

#	Konstruktionsdel	Spännstags-system	$f_{p0,1k}/f_{puk}$ / MPa	Diameter / mm	Uppspännings-kraft / kN	Brottlast / kN	Kraftnivå / %	Förankrings längd / m	Total längd / m	Installations -år	Antal stag	Korrosions-skydd	Orsak till installation
25	Skibord	BBR Cona 6-12	1770/1860		1860	3348	56	6,5	13,5	2017	4	Dubbelt	Stabilitetsvillkor
25	Skibord	BBR Cona 6-12	1770/1860		1860	3348	56	6,5	14	2017	6	Dubbelt	Stabilitetsvillkor
25	Pelare	BBR Cona 6-12	1770/1860		1860	3348	56	6,5	23,5	2017	2	Dubbelt	Stabilitetsvillkor
25	Pelare	BBR Cona 6-12	1770/1860		1860	3348	56	6,5	22,5	2017		Dubbelt	Stabilitetsvillkor
25	Pelare	BBR Cona 6-12	1770/1860		1860	3348	56	6,5	21,5	2017	1	Dubbelt	Stabilitetsvillkor
25	Brobana	BBR Cona 6-12	1770/1860		1860	3348	56	5	12,3	2017	5	Dubbelt	Stabilitetsvillkor
25	Brobana	BBR Cona 6-12	1770/1860		1860	3348	56	5	13,4	2017	5	Dubbelt	Stabilitetsvillkor
25	Pelare	BBR Cona 6-19	1770/1860		2940	5301	55	8,6	24	2017	2	Dubbelt	Stabilitetsvillkor
25	Pelare	BBR Cona 6-19	1770/1860		2940	5301	55	8,6	24	2017	2	Dubbelt	Stabilitetsvillkor
26	Utskov	VSL 6-19	1640/1860	212	3500	5320	66	10,5	-	2004	8	Dubbelt	
27	Dammkrön	Dywidag	1080/1230	36	680	1080	63	5,0	12,0	1987	34	Enkelt	
27	Pelare	VSL 5-19	1640/1860	180	2100	3530	59	6,0	14,5	1993	6	Enkelt	
27	Dammkrön	VSL 5-19	1640/1860	180	1500	3530	42	6,0	14,5	2010	29	Dubbelt	
27	Dammkrön	Dywidag	835/1030	32	540	835	65	5,0	12,0	-	2	Enkelt	
27	Dammkrön	Dywidag	1080/1230	36	680	1080	63	5,0	12,0	-	4	Enkelt	
27	Dammkrön	Dywidag	835/1030	32	540	835	65	5,0	12,0	-	19	Ingjutning	
28	Generaterring	Dywidag	80/105	32	438	844	52	-	-	1975	72	Enkelt	Generator
28	Pelare	VSL 5-19	1640/1860	180	2450	3530	69	6,0	15,0	2006	6	Dubbelt	
29	Horisontalkablar, monolit	MK4 6-12	1550/1770		2000	3185	63	-	-	2009-2010	31	Dubbelt	Sprickor betong
29	Vertikalkablar, monolit	MK4 6-19	1550/1770		3000	5045	59	-	-	2010-2012	60	Dubbelt	Stabilitetsvillkor
30	Generaterring	Dywidag	80/105	32	297	844	35	-	-	1976	32	Enkelt	Generator
31	Generaterring	Dywidag	80/105	32	507	844	60	-	-	1976	24	Enkelt	Generator
32	Fundament	Dywidag	80/105		92	195	43		3,0	1977	12	Enkelt	

#	Konstruktionsdel	Spännstags-system	$f_{p0,1k}/f_{puk}$ / MPa	Diameter / mm	Uppspännings-kraft / kN	Brottlast / kN	Kraftnivå / %	Förankrings-längd / m	Total längd / m	Installations-år	Antal stag	Korrosions-skydd	Orsak till installation
33	Vertikalkablar, monolit	VSL 6-7	1640/1860		990	1950	51	5	17	2010	6	Dubbelt	Stabilitetsvillkor
34		VSL 6-19	1590/1770		3000	5045	59	-	-	2009	4	Dubbelt	Stabilitetsvillkor
34		Horisontalkablar, monolit	MK4 6-12		2000	3185	63	-	-	2009-2010	21	Dubbelt	Sprickor betong
34		Vertikalkablar, monolit	MK4 6-19		3000	5045	59	-	-	2010-2012	133	Dubbelt	Stabilitetsvillkor
35	Utskov	VSL 5-19	1640/1860	180	2220	3530	63	6,0	23,0	1992	5	Dubbelt	
35	Monolit (lamelldamm)	VSL 5-19	1640/1860	180	2220	3530	63	6,0	23,0	-	18	Enkelt	
36	Generatorring	Dywidag	80/105	27	-	-	-	-	-	-	24	Enkelt	Generator
37	Spont	Dywidag	950/1050	32	250	840	30	4	13	2010	20	Dubbelt	
38	Anfang	Dywidag	80/105	27				-		1954	49	Ingjutning	
39	Damm, tröskel	Dywidag	80/105	27	225	840	27	-	9,0	1979	7	Enkelt	
39	Damm, tröskel	Dywidag	80/105	27	225	840	27	-	9,0	1979	21	Ingjutning	
40	Damm	VSL 5-19	1640/1860		2450	3530	69	-	32,5	2004	9	Dubbelt	
41	Ledmur	VSL 6-12	1640/1860		-	-	-	6	30,5	2013	9	Dubbelt	Stabilitetsvillkor

SAMMANSTÄLLNING ÖVER SPÄNNSTAG INOM VATTENKRAFTEN

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

I dagsläget finns inte någon vedertagen praxis för hantering av spännstag inom vattenkraftsindustrin. Som ett första steg i utvecklandet av en sådan metodik presenteras här en sammanställning över information som samlats in från ett antal anläggningar kring installerade spännstag i svenska vattenkraftsanläggningar.

Resultaten från sammanställningen visar bland annat de mest använda spännstagssystem inom vattenkraften och hur de används. Det visar sig också att det i dagsläget inte finns någon gemensamt vedertagen metodik för att göra spännkraftsmätningar med domkraft, att bestämma marginaler mellan teoretiskt erforderlig spännkraft och applicerad spännkraft. Detta skulle behövas för att få en tillräcklig säkerhet och för att kunna utforma inspektionsprogram för att fastställa spännstagens status hos installerade spännstag. Rapporten ger också ett antal förslag på vidare arbete inom området.

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