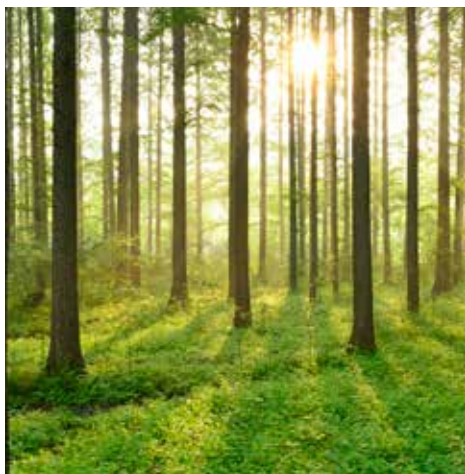


# MÖJLIGHETER TILL INSTRUMENTERING AV SPÄNNKABLAR AV SYSTEM BBRV

RAPPORT 2018:542



BETONGTEKNIK  
KÄRNKRAFT

BETONGTEKNISKT PROGRAM  
KÄRNKRAFT



Energiforsk



# Möjligheter till instrumentering av spännkablar av system BBRV

ANDERS ANSELL



## Förord

**För att säkerställa reaktorinneslutningens integritet är det av avgörande betydelse att kunna övervaka spännkraftsförlusterna i spännarmeringen. För reaktorinneslutningar med icke-injekterade spännkablar utförs detta genom periodiska kontroller där spännkrafterna i ett antal spännkablar mäts med domkraft. Ett alternativ eller eventuellt en komplettering till dessa mätningar är att instrumentera spännkablarna med t.ex. lastceller. I denna studie studeras spännkabelsystemet BBRV.**

Denna studie har utförts på KTH med Anders Ansell, professor i byggvetenskap/betongbyggnad, som huvudförfattare. Projektet ingår i Energiforsk Betongtekniskt program kärnkraft, som driver forskning kring betongkonstruktioner inom kärnkraftverk. Det övergripande målet med programmet är att säkerställa avsedd livslängd och hög tillgänglighet för svenska kärnkraftverk med bibehållen säkerhet och för att kunna driva en effektiv förvaltning. Intressenterna bakom Betongtekniskt program kärnkraft är Vattenfall, Uniper, Fortum, Teollisuuden Voima Oy (TVO) i Finland, Skellefteå Kraft, Karlstads Energi samt Strålsäkerhetsmyndigheten (SSM).

Här redovisas resultat och slutsatser från ett projekt inom ett forskningsprogram som drivs av Energiforsk. Det är rapportförfattaren/-författarna som ansvarar för innehållet.

## Sammanfattning

**Spännarmeringen i de betongkonstruktioner som omsluter kärnkraftreaktorer bidrar till att förhindra sprickbildning i betongen vid olycksfall. Då krafterna i spännkablarna med tiden relaxeras måste dessa övervakas och kontrolleras regelbundet.**

För inneslutningar som har icke-injekterade spännkablar görs detta genom provdragning och uppmätning av valda kablar. Om permanent instrumentering av spännkablar kan genomföras så fås en större möjlighet till kontinuerlig övervakning.

I ett tidigare projekt instrumenterades ett antal kablar i Forsmarksverket med lastceller för kontinuerlig avläsning, vilket har gett tillförlitlig mätdata. De kablar som har instrumenterats är av typen VSL och består av ett antal kraftiga, separata tvinnade linor, fastlåsta med ett kilsystem. Många av reaktorinneslutningarnas kablar är dock av typen BBRV som består av ett stort antal individuella trådar som samlas genom fast förankring i ett gemensamt ankarhuvud. Kabeltypen kan praktiskt instrumenteras med lastceller vid nyinstallation men för befintliga kablar är detta problematiskt då ankarhuvudets relativt stora diameter och kablarnas fixerade längd gör det svårt att montera in dessa bakom huvudena.

Projektet har kartlagt och sammanfattat tekniska beskrivningar av BBRV-systemet, och det har också gjorts en jämförelse med VSL-systemet. En sammanställning över spännkablars förekomst i svenska reaktorinneslutningar visar att Forsmark 1 och 2 är de enda svenska reaktorer där reaktorinneslutningarna har icke-injekterade spännkablar av VSL-typ. I övriga reaktorer är de av typen BBRV. En genomförd litteratursökning har dock inte hittat några tidigare, beskrivna och utprovade koncept för instrumentering av BBRV-kablar. Metoder som kan göra detta möjligt föreslås därför i föreliggande rapport. Som utgångspunkt för förslagen har de tidigare genomförda mätningarna och instrumenteringarna av VSL-system särskilt studerats.

Fyra olika möjliga metoder föreslås och beskrivs; losstagnning och återstukning av spänntrådarna, avvaxling av spännkraften, indirekt mätning av kraftförlusten samt direkt mätning av töjning i ankarhuvudet. Lämpligheten hos respektive metod beror av förutsättningarna vid varje aktuell kabelförankring, till exempel tillgängligt utrymme för installationer. För- och nackdelar med och förutsättningarna för respektive metod redovisas.

## Summary

**The pre-stressing steel reinforcement in the concrete structures that enclose nuclear reactors helps to prevent cracking of the concrete in the event of an accident. As the stresses of the steel cables relax with time, these must be monitored and checked regularly.**

For containments that have non-grouted pre-stressing cables, this is done by pull-testing and measuring of selected cables. If permanent instrumentation of cables can be carried out, the possibilities for a constant monitoring will increase.

In a previous project, a number of pre-stressing cables were instrumented at the Forsmark nuclear plant, with load cells for continuous reading which have provided reliable measurement data. The instrumented cables are of VSL-type and thus consist of a number of separate, twisted steel strands, locked in position with a wedge system. However, many of the cables in the reactor enclosures are of the BBRV type, consisting of a large number of individual steel wires rigidly connected to one anchor head at each cable end. During new installation, the cable type can be practically instrumented with load cells but for existing cables, this is problematic since the relatively large diameter of the anchor head and the fixed length of the cables make it difficult to mount these behind the heads.

Within the project, technical descriptions of the BBRV system are mapped and summarized, also in comparison with the VSL system. A summary of pre-stressing cables in Swedish reactor containments shows that Forsmark 1 and 2 are the only Swedish reactors where these concrete containments have non-grouted, VSL-type pre-stressing cables. Other reactors have cables of BBRV-type. However, a literature study within the project has not resulted in any previous, described and tested methods for instrumentation of BBRV cables. Methods that make this possible are therefore proposed in this report. As a basis for the proposals, the previously conducted measurements and instrumentation of VSL cables have been specifically studied.

Four different possible methods are suggested and described; uncoupling and re-coupling of each wire, re-distribution of the anchorage force, indirect measurement of loss in pre-stressing force and direct measurement of strain in the anchor head. The suitability of each method depends on the prerequisites on site for each individual cable anchorage, such as available space for installations. The pros and cons of, and the requirements for, each method are discussed.

# Innehåll

<b>1</b>	<b>Bakgrund</b>	<b>7</b>
<b>2</b>	<b>Spännkabelsystem</b>	<b>8</b>
2.1	Teknisk beskrivning av BBRV systemet	8
2.2	Jämförelse med VSL systemet	11
<b>3</b>	<b>BBRV i svenska kärnkraftverk</b>	<b>12</b>
<b>4</b>	<b>Tidigare mätningar och instrumenteringar</b>	<b>15</b>
4.1	Lift-off metoden	15
4.2	Permanent installerade givare	17
<b>5</b>	<b>Instrumentering av BBRV kablar</b>	<b>19</b>
5.1	Losstagning och återstukning	19
5.2	Avväxling	20
5.3	Indirekt mätning av kraft	21
5.4	Direkt töjningsmätning	24
<b>6</b>	<b>Sammanfattning</b>	<b>32</b>
<b>7</b>	<b>Tillkännagivanden</b>	<b>33</b>
<b>8</b>	<b>Referenser</b>	<b>34</b>



# 1 Bakgrund

**Spännarmeringen i de betongkonstruktioner som omsluter kärnkraftreaktorer bidrar till att förhindra sprickbildning i betongen vid olycksfall. Krafterna i spännkablar relaxeras dock med tiden och dessa måste därför övervakas.**

För att säkerställa reaktorinneslutningars integritet behöver spännkraftsförlusterna i betongkonstruktionernas spännarmering kunna kontrolleras regelbundet. För inneslutningar som har icke-injekterade spännkablar genomförs periodiska kontroller där spännkrafterna i ett antal spännkablar mäts med domkraft, se [1,2,3,4]. Genom att permanent instrumentera spännkablar med lastceller eller töjningsgivare kan en ökad grad av kontroll uppnås. Möjligheten finns också att sådan kontinuerlig mätning kan ersätta de periodiska kontrollerna som alltid innebär att någon form av ingrepp görs i konstruktionerna. För injekterade spännkablar är inte denna typ av provdragning eller mätning möjlig.

I ett tidigare Energiforskningsprojekt [5] instrumenterades ett antal kablar i Forsmark 2 med lastceller och trådtöjningsgivare för kontinuerlig avläsning. Särskilt installationen av lastceller anses vara lyckad och har vid kontroll visat sig ge tillförlitlig mätdata. Metoden hade också före detta använts i samband med uppspänning av kablar i Forsmark 1. De kablar som har instrumenterats är av typen VSL (Vorspann System Losinger), som består av ett antal kraftiga, separata tvinnade linor som efter uppspänning fastlåses med ett kilsystem.

Forsmark 1 och 2 är de enda svenska reaktorer där inneslutningarna har icke-injekterade spännkablar av VSL-typ. I övriga reaktorer är de av typen BBRV (Birkenmaier-Brandestini-Ros-Vogt), [1,3,6]. Systemet består av ett stort antal individuella, icke-tvinnade trådar som samlas genom förankring i ett gemensamt ankarhuvud. Den kraft som respektive tråd upptar överförs till ankarhuvudet genom att trådänden har stukats genom kallformning. Spännkabelsystemet får på detta sätt en fixerad längd innan uppspänningen vilken sker genom sträckning följt av förankring med distansmellanlägg så att den utsträckta längden och spännkraften bibehålls. Systemet är väl lämpat för att instrumenteras i samband med uppspänning men för befintliga system är detta problematiskt då ankarhuvudets relativt stora diameter kan medföra att en cirkulär lastcell inte går att föra över och inpassa bakom detta. Även om det vore möjligt att ersätta en del av distansmellanläggen med en lastcell skulle då varje spänntråd behöva losskopplas för att sedan kopplas tillbaka genom återstukning, vilket vore tidskrävande och kostsamt.

I föreliggande projekt undersöks och diskuteras olika möjligheter till att permanent instrumentera spännkablar av BBRV-typ. Målet är att presentera några olika förslag på konceptuella lösningar som också praktiskt värderas. Förutsättningarna för att respektive lösning ska kunna fungera ges, men inga detaljutformade anvisningar tas fram inom ramen för projektet.

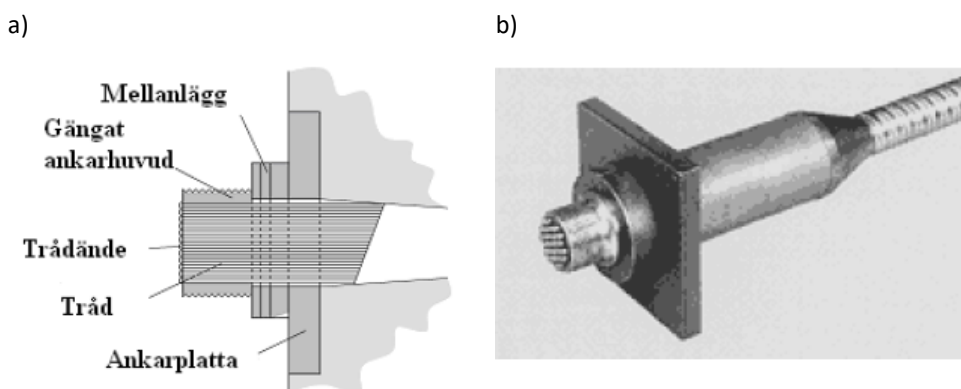
## 2 Spännkabelsystem

I det följande ges en beskrivande översikt av BBRV systemet. För jämförelse och som grund för beskrivningen av tidigare genomförda instrumenteringar ges även en kortfattad beskrivning av VSL systemet.

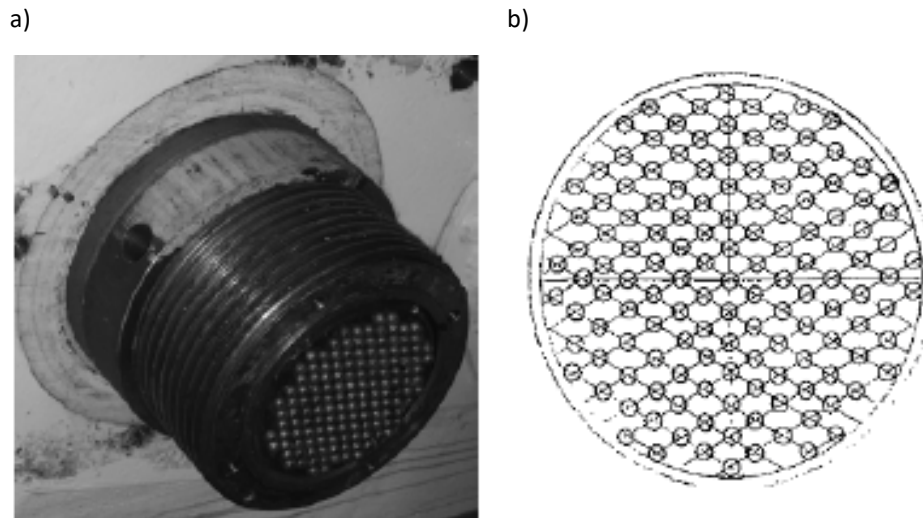
### 2.1 TEKNISK BESKRIVNING AV BBRV SYSTEMET

Som inledningsvis beskrivits består en spännkabel i BBRV systemet av flera parallella späntrådar utan annan inbördes koppling än via de kraftsamlande ankarhuvudena i respektive kabelände, [3,6]. Systemets huvudkomponenter är kabeln och ankaren, i vilket samtliga trådar förankras [3], se Figur 1. Respektive tråd i kabeln har en diameter som oftast ligger inom intervallet 4–12 mm. BBRV kablar tillverkas alltid så att de har en förutbestämd fixerad längd innan uppspanning sker. Detta kan ske genom prefabricering i fabrik eller i samband med installation på byggplatsen, [7].

Trådarna kapas först till rätt längd och sedan förs trådbunten genom de förtillverkade hålen i det ena av ankarhuvudena varefter trådarnas yttre ände kallstukas så att en kraftbärande förankring sker, se Figur 1 och 2. Ankarhuvudet dras sedan framåt varvid trådarna passerar genom en mall som ger trådarna en parallell linjeföring, se Figur 2. Därefter monteras övriga detaljer såsom ankarplatta, kabeltrumpet och kabelrör, se Figur 1. Om slutmontage av kabeln ska ske på byggarbetsplatsen monteras inte det andra ankarhuvudet, men om detta sker kommer även den andra ändens trådar att kallstukas varvid kabelns längd är fixerad före montage och innan kringgjutning med betong sker.



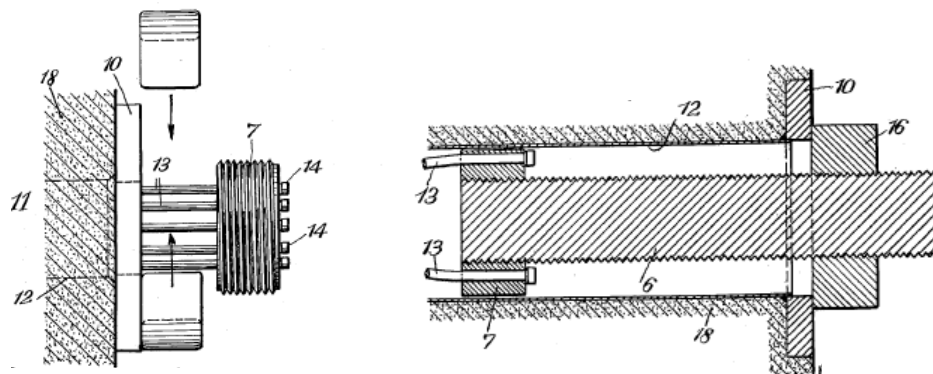
Figur 1. Ankare för BBRV kablar. Detaljbenämningar samt foto som även visar trumpet och kabelrör; (a) illustration och (b) foto från [3].



Figur 2. Ankarhuvud för BBRV system; (a) foto från [8] och (b) tvärsnittskiss från [3].

För att spänna kabeln fästs en domkraft i ankarhuvudets yttre gängade del varefter kabeln spänns genom att ankarhuvudet dras utåt, [2,3,4]. Då önskad spännkraft har uppnåtts fixeras ankarhuvudets läge genom att halvcirkelformade mellanlägg i stål av önskad tjocklek placeras mellan ankarhuvudet och ankarplattan, se Figur 1 och 3. Plattan består av en kvadratisk och med centriskt hål försedd stålplatta som överför spännkraften från kabeln till betongkonstruktionen. En typisk tjocklek hos stålplattan är ca 25 mm, [7].

I standardsortimentet för BBRV spännkablar finns oftast kablar med upp till 102 stycken trådar  $\phi 7$  mm, men kablar kan tillverkas med upp till 246 trådar, [3]. För reaktorinneslutningar förekommer internationellt ofta system med 121, 163 eller 187 trådar i varje kabel [7], men i svenska betonginneslutningar är kablar med 139 stycken trådar  $\phi 6$  mm vanligast (se beskrivning i följande avsnitt). Exempel på BBRV kablar med en karakteristisk hållfasthet på 1570 MPa ges i Tabell 1, med måttuppgifter, maximala krafter och typiska uppspänningskrafter.



Figur 3. Detaljskisser från patentbeskrivning av BBRV systemet, [6].

Tabell 1. Storlek och egenskaper på BBRV kablar och ankare. Exempel från [7].

Tendon reference		B16	B24	B34	C42	C55	L73	L85	L97	L109	L121
No. of wires (7 mm dia.)		16	24	34	42	55	73	85	97	109	121
Characteristic strength using 1570 N/mm <sup>2</sup> wire		967	1450	2054	2538	3323	4411	5136	5861	6586	7311
Jacking force (kN) at 80% of C.S.		773	1160	1643	2030	2659	3529	4109	4689	5269	5849
Jacking force (kN) at 75% of C.S.		725	1088	1540	1903	2492	3308	3852	4396	4939	5483
Jacking force (kN) at 70% of C.S.		677	1015	1438	1776	2326	3087	3595	4103	4610	5118
<i>Bearing plate</i> Side length (sq.)	A	178	220	250	280	300	335	360	385	405	425
Thickness	B	15	20	25	35	35	45	50	50	60	60
<i>Trumpet</i> Outside diameter	C	120	133	154	154	165	194	219	229	229	245
<i>Anchor Head</i> Thread diameter	D	100	115	130	90	98	125	130	145	150	155
Standard length	E	60	80	90	53	63	110	120	126	134	146
Overall diameter	F	—	—	—	—	—	160	165	185	190	200
<i>Pull Sleeve</i> Diameter	G	—	—	—	130	144	—	—	—	—	—
Standard length	H	—	—	—	118	138	—	—	—	—	—
<i>Lock Nut</i> Diameter	J	135	155	180	178	198	—	—	—	—	—
Thickness	K	30	40	50	45	53	—	—	—	—	—
<i>Chocks</i> Diameter	L	—	—	—	—	—	228	250	262	270	288
Min. thickness	M	—	—	—	—	—	48	52	55	59	62
Max. anchorage projection (Std. comps.)	N	67	87	97	118	138	205	219	228	240	255
<i>Sheathing</i> Internal diameter	O	40	50	60	65	75	85	95	100	105	110
External diameter		48	58	68	73	83	93	103	108	113	118

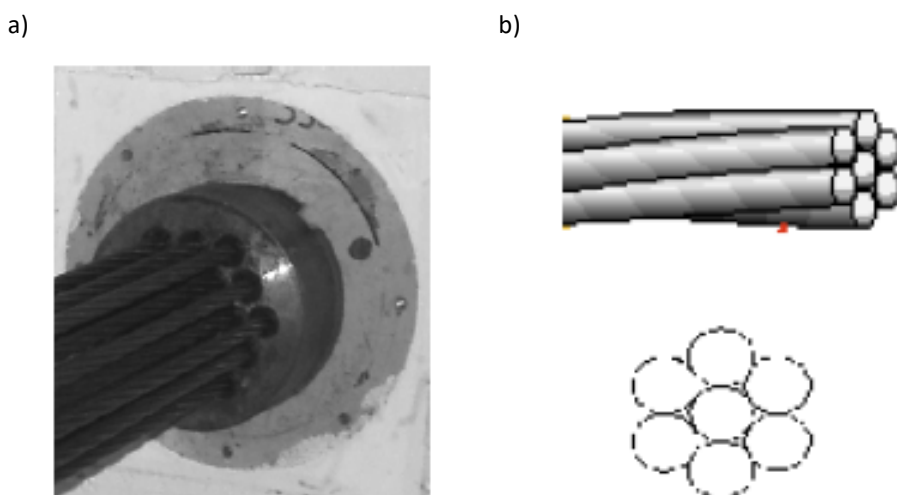
Length of trumpet 'p' → Extension + 105 mm (B type anchors)  
 Extension + 120 mm (C type anchors)  
 (L type anchors)

All dimensions are in millimetres.

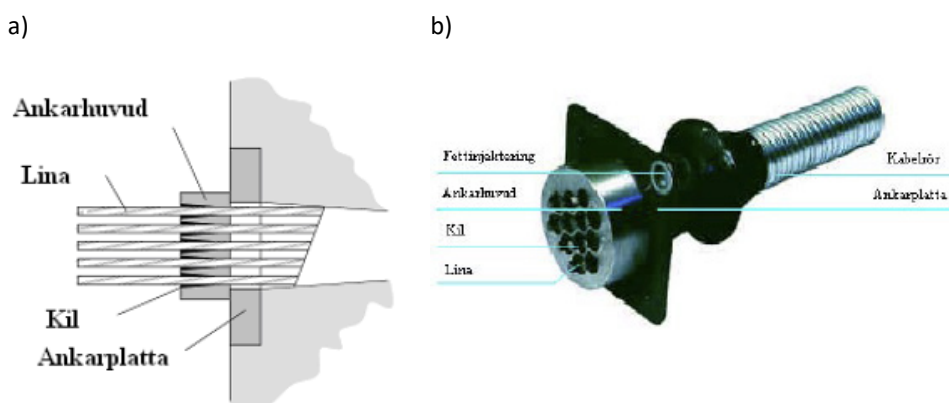
## 2.2 JÄMFÖRELSE MED VSL SYSTEMET

Utmärkande för VSL systemet är att det består av parallella tvinnade linor, se Figur 4. Innan uppspänning och låsning löper dessa fritt genom ankarhuvudet som för över kraften genom direkt anliggning mot ankarplattan [3], se Figur 5. En typisk kabel är den som använts i Forsmark 1 och 2 och som består av 19 stycken  $\phi 13$  mm ställinor, vardera sammansatt av sju trådar med en diameter på 4,4 mm, [5].

Då uppspänning sker fästs varje lina i en domkraft med kilar varefter linorna som löper fritt genom ankarhuvudet spänns och sträcks, [2,3,4]. Då önskad spännkraft har uppnåtts fixeras linorna genom fastkilning i ankarhuvudet varefter domkraften losskopplas. Under denna process kan dock kilarna släppa varvid glidning sker med viss förlorad spännkraft som följd, [3].



Figur 4. Ankarhuvud för VSL system. (a) foto från [8] och (b) tvärsnitt av spännlina från [3].



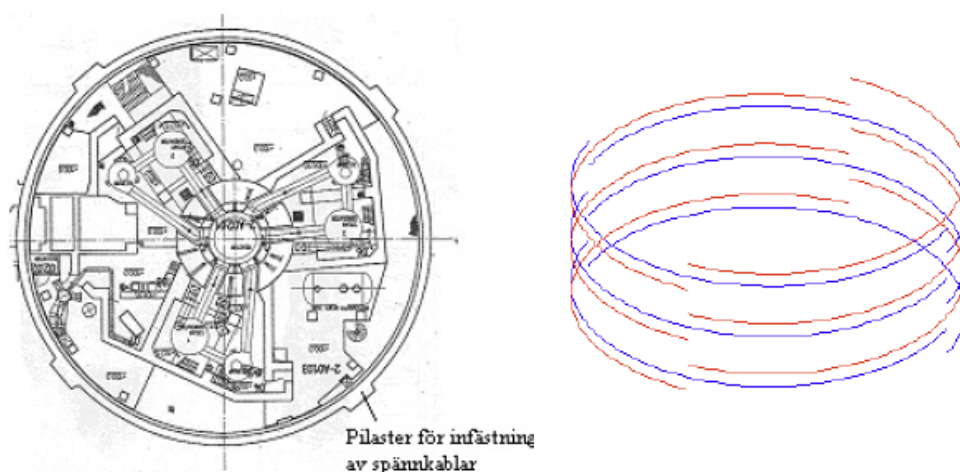
Figur 5. Ankare för VSL kablar. Detaljbenämningar samt foto som även visar trumpet och kabelrör. (a) illustration och (b) foto från [3].

### 3 BBRV i svenska kärnkraftverk

Här ges en översiktlig beskrivning av förekomsten av BBRV kablar i svenska reaktorinneslutningar. De sammanfattande tabellerna innehåller också beskrivning av motsvarande VSL kablar, där de förekommer.

Det som primärt avgör om kablarnas spännkrafter är mätbara är valet av system för att åstadkomma korrosionsskydd. Avgörande är om de omgivande kabelrören har cementinjekterats eller om kablarna har lämnats frilagda, [1,3]. I det senare fallet kan kabelrören vara injekterade med fett (Ringhals) eller hållas torra genom ventilation med torr, varm luft (Forsmark). Cementinjektering användes i Barsebäck, Oskarshamn och i Ringhals 1. Där kablarna löper fritt i kabelrören används olika system för kabelkontroll och utbyten av kablar för att säkerställa att rätt nivå på förspänningskrafterna bibehålls.

För spännarmering med kablar av BBRV-typ i svenska betonginneslutningar används kablar bestående av 139 stycken trådar à  $\phi 6$  mm. För till exempel Ringhals 2-4 är dessa av en stålqualität med spänningen 1500 MPa vid 0,2% sträckgräns och 1800 MPa i brotthållfasthet [3], motsvarande ca 5,9 MN och 7,1 MN per kabel. Vid den initiala uppspänningen spändes kablarna först till ca 70 % av brotthållfastheten, motsvarande ca 4,9 MN varefter kraften eftersläpptes till ca 4,7 MN. Ankarhuvudena har i detta fall diametern 210 mm och 100 mm tjocklek. Ankarplattorna är av 70 mm stål, kvadratiska med sidmättet 435 mm och ingjutna i betongen. Kabelrören (foderrör) är av 0,5 mm tjock plåt och med en diameter på 120 mm. Kablarnas trumpeter (se Figur 1a) har en diameter på 160 mm.



Figur 6. Principen för anordning av horisontell spännarmering i betonginneslutningarnas väggar i Ringhals 2-4. Från [3].

I inneslutningarnas takkupoler vid Ringhals 2-4 har kablarna med centrum-avstånden 700 mm lagts i tre lager som förskjutits 120° relativt varandra. Horisontellt i cylinderväggen finns kablar lagda i ring med radien 18,5 m vilka har spänts mot fyra pilastrar (spänklackar) på väggens utsida, se Figur 6. Antalet kabelvarv i en cylindervägg är 128, med ett centrumavstånd på 400 mm. Så som visas i Figur 6 har kablarna förskjutits så att överlapp fås vid pilastrarna. Cylinderväggarnas vertikala kablar har förankrats i bottenplattan och i den övre ovankant ringbalken, varifrån också den enkelsidiga uppspänningen har gjorts. De nedre förankringarna är inspekterbara från en underliggande tunnel. Kablarna är placerade i väggens mitt, 250 mm innanför de horisontella och med ett centrumavstånd på 750 mm. Utformningen av spännarmeringen i inneslutningarnas väggar och tak redovisas för samtliga svenska kärnkraftverk i Tabell 2-4, med ett utdrag från en relativt omfattande teknisk beskrivning från [1]. Tabellerna innehåller här information för kablarna av BBRV-typ men också för jämförelse de av VSL-typ. Det noteras särskilt i vilka fall kablarna är vidhäftande mot kabelrören (foderrören) på grund av cementinjektering. Kablarnas typ ges i vissa fall även med stålets flytspänning och brottspänning angiven.

**Tabell 2. Spännarmering i reaktorernas betonginneslutningar – i tak. Från [1].**

Reaktor	Typ	Antal x diam. (mm)	Brottlast (MN)	Uppspännings- kraft (MN)
Forsmark 1	VSL, Bridon Supa	10 st, 19x13	1800 N/mm <sup>2</sup>	1,9
Forsmark 2	VSL, Bridon Supa	10 st, 19x13	1800 N/mm <sup>2</sup>	1,9
Forsmark 3	BBRV	16 st, 139x6	1800 N/mm <sup>2</sup>	4,66
Ringhals 1	-	-	-	-
Ringhals 2	BBRV (1500/1800 MPa)	139x6	7,07	4,8
Ringhals 3	BBRV (1500/1800 MPa)	139x6	7,07	4,75
Ringhals 4	BBRV (1500/1800 MPa)	139x6	7,07	4,75
Barsebäck 1	-	-	-	-
Barsebäck 2	-	-	-	-
Oskarshamn 1	BBRV (1500/1700 MPa)*	44x6, 32x6		
Oskarshamn 2	BBRV (1500/1750 MPa)*	55x6, 44x6	2,2-2,8/kabel	1,2
Oskarshamn 3	VSL (1600/1750 MPa)*	31x6		Tot 35 MPa

\* Vidhäftande.

**Tabell 3. Spännarmering i reaktorernas betonginneslutningar – horisontellt i yttervägg. Från [1].**

Kraftverk	Typ	Antal x diam. (mm)	Brottlast (MN)	Uppspännings- kraft (MN)
Forsmark 1	VSL, Bridon Supa	156 st, 19x13	1800 N/mm <sup>2</sup>	2,3
Forsmark 2	VSL, Bridon Supa	156 st, 19x13	1800 N/mm <sup>2</sup>	2,3
Forsmark 3	BBRV	88 st, 139x6	1800 N/mm <sup>2</sup>	4,7 (5,2)
Ringhals 1	BBRV (1500/1850 MPa)*	55x6	2,72	1,9
Ringhals 2	BBRV (1500/1800 MPa)	139x6	7,07	4,8
Ringhals 3	BBRV (1500/1800 MPa)	122 st, 139x6	7,07	4,75
Ringhals 4	BBRV (1500/1800 MPa)	122 st, 139x6	7,07	4,75
Barsebäck 1	VSL*	c0,1 m, 12x12		1000 x area #
Barsebäck 2	VSL*	c0,1 m, 12x12		1000 x area #
Oskarshamn 1	BBRV (1500/1700 MPa)*	44x6	1,8	1,2
Oskarshamn 2	BBRV (1500/1700 MPa)*	55x6, 44x6	2,2-2,8/kabel	1,1-1,4/kabel
Oskarshamn 3	VSL (1600/1750 MPa)*	31x6, 28x6	Tot 285 MPa	Tot 285 MPa

\* Vidhäftande.

# Motsvarar 1,36 MN per kabel.

**Tabell 4. Spännarmering i reaktorernas betonginneslutningar – vertikalt i yttervägg. Från [1].**

Kraftverk	Typ	Antal x diam. (mm)	Brottlast (MN)	Uppspännings- kraft (MN)
Forsmark 1	VSL, Bridon Supa	140 st, 19x13	1800 N/mm <sup>2</sup>	2,3
Forsmark 2	VSL, Bridon Supa	140 st, 19x13	1800 N/mm <sup>2</sup>	2,3
Forsmark 3	BBRV	120 st, 139x6	1800 N/mm <sup>2</sup>	4,7 (5,2)
Ringhals 1	BBRV (1500/1850 MPa)*	55x6	2,72	1,9
Ringhals 2	BBRV (1500/1800 MPa)	139x6	7,07	4,8
Ringhals 3	BBRV (1500/1800 MPa)	153 st, 139x6	7,07	4,75
Ringhals 4	BBRV (1500/1800 MPa)	153 st, 139x6	7,07	4,75
Barsebäck 1	VSL*	56 st, 12x12		1000 x area #
Barsebäck 2	VSL*	56 st, 12x12		1000 x area #
Oskarshamn 1	BBRV (1500/1700 MPa)*	44x6	1,8	1,2
Oskarshamn 2	BBRV (1500/1700 MPa)*	55x6, 44x6	2,2-2,8/kabel	1,1-1,4/kabel
Oskarshamn 3	VSL (1600/1750 MPa)*	31x6, 28x6		Tot 540 MPa

\* Vidhäftande.

# Motsvarar 1,36 MN per kabel.



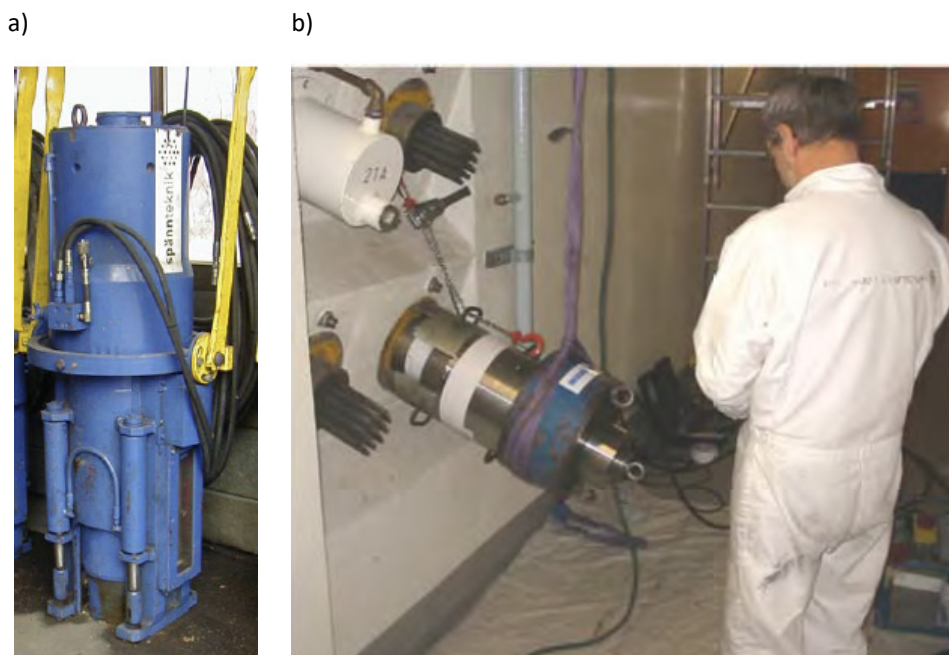
## 4 Tidigare mätningar och instrumenteringar

Här beskrivs kortfattat den vanligaste metoden för att mäta effektiv spännkraft i befintliga spännkablar. De fasta instrumenteringar som har gjorts i svenska kärnkraftverk sammanfattas också.

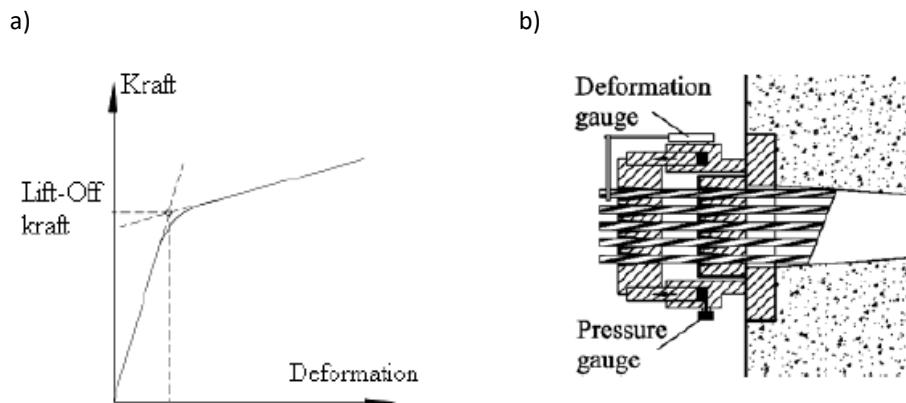
Mätningar av spännkraft i svenska reaktorinneslutningar har huvudsakligen gjorts genom periodiskt återkommande provdragningar, [1,2,3,4] och genom registrering med permanent monterade givare, vilka har installerats i Forsmark 1 och 2, [5,9]. Vid provdragning används den väletablerade så kallade "lift-off" tekniken, vilken kortfattat beskrivs i det följande. Vid till exempel Ringhals genomförs sådana kontroller oftare än vart tionde år, [3].

### 4.1 LIFT-OFF METODEN

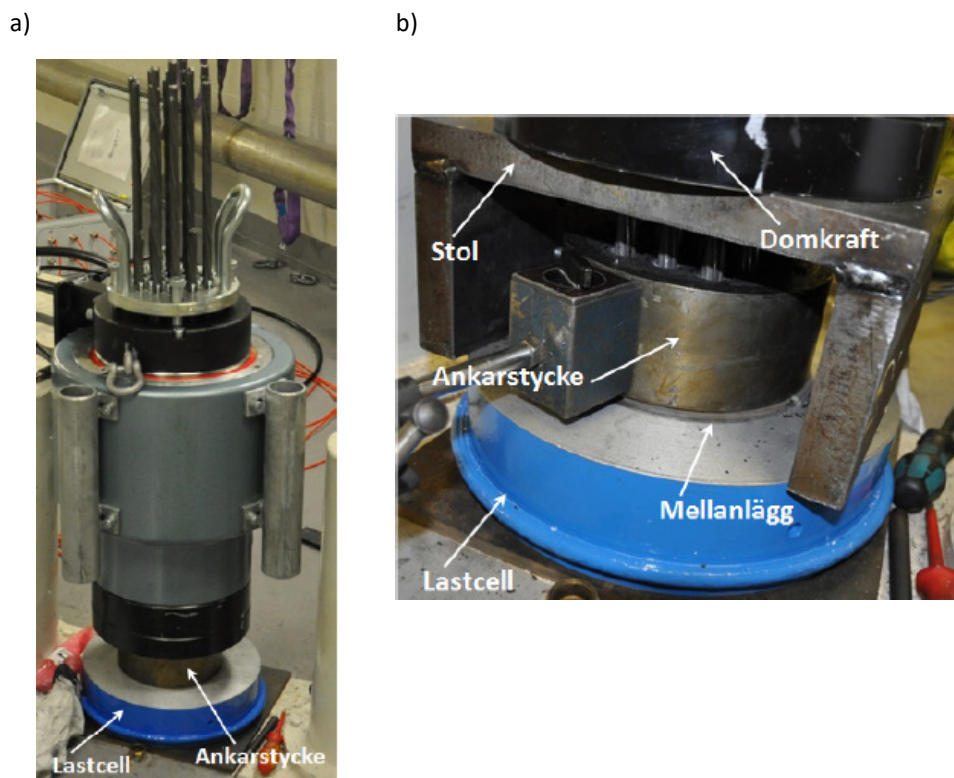
Mätning av kvarvarande spännkraft i befintliga spännkablar kan göras med den så kallade "lift-off" metoden där en domkraft kopplas till linorna på spännkabeln (VSL systemet), se Figur 7, eller direkt till ankarhuvudet (BBRV systemet). Kraften i domkraften ökas sedan i förbestämda steg till dess att ankarhuvudet lyfter från ankarplattan, [2,3,4]. Den kraft som fordras för detta är den så kallade "lift-off-kraften" vars definition visas i Figur 8a, som skärningspunkten mellan två tangenter till den uppmätta kraft-deformationskurvan. Kurvans första, branta del motsvarar expansionen av de av spännkraften belastade och hoptryckta betong- och ståldelarna i ankare och betongmothåll. Den andra, flackare delen motsvarar töjningen i enbart spännkablarna.



Figur 7. Domkraft för uppspanning av kablar (a), från [3] och domkraft under pågående lift-off provning (b), från [4].



Figur 8. Kraft-deformationssamband vid provdragning med domkraft (a), från [3] och principen för mätning av kraft och deformation vid dragning av kablar i ett VSL system (b), från [2].



Figur 9. Domkraft vid (a) uppspanning av vertikala kablar med domkraft direkt mot ankarstycke ovanpå lastcell samt (b) med stol vid lift-off provning för kraftöverföring till lastcell. Från [9].

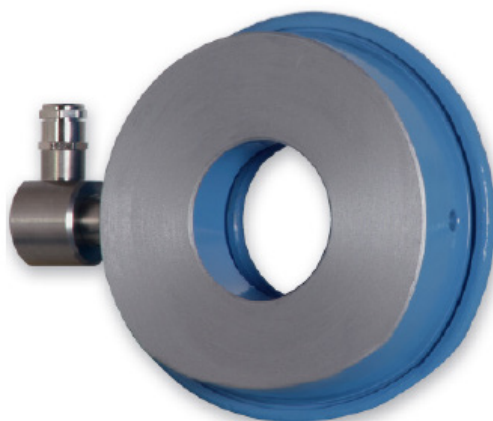
Beroende på typ av spännkabelsystem och domkraftens inkoppling kan kraft och förskjutning mätas på olika sätt. En principiell metod för VSL systemet visas i Figur 8b, där en deformationsgivare och en kraftgivare har monterats mellan ankarhuvudet, som här är frikopplat från kablarna och fortfarande i kontakt med ankarplattan, och domkraften. Vid uppspanning kan dragkraften direkt registreras som det tryck som uppstår i en lastcell placerad mellan ankarhuvud och ankarplatta, se Figur 9a. Det ska här noteras att de vertikala kablarna här spänns i endast

en ände medan övriga spänns från två ändar. Vid provning med "lift-off" metoden måste ankarhuvud och ankarplatta kunna separera och därför används i detta fall en kraftfördelare så kallad "stol" som för ned spännkraftens mothåll direkt till lastcellen som är i kontakt med ankarplattan, se Figur 9b. Förutom att avläsa "lift-off" kraften grafiskt ur kraft-deformationssambandet kan även mer direkta metoder användas för att avgöra när domkraften ensam bär lasten, det vill säga när separation sker mellan ankarhuvud och ankarplatta. Detta kan göras visuellt och genom att med hammare knacka på mellanläggsbrickorna varvid en övergång från ren klang till dovt ljud indikerar att separation har skett, [3].

#### 4.2 PERMANENT INSTALLERADE GIVARE

Med permanent installerade kraftgivare (lastceller) kan spännkrafterna registreras med betydligt kortare intervall, eller nära nog kontinuerligt, jämfört med vid besiktning och provdragnings med "lift-off" metoden, [4,5]. En fördel med de kvarsittande kraftgivarna är att dessa registrerar förändringar i och trender för enstaka kablar medan nya kablar brukar väljas för provdragnings vid de periodiska kontrollerna.

I samband med uppspänning av kablar i Forsmark 1 installerades lastceller på 8 vertikala och 5 horisontella spännkablar i inneslutningens cylindervägg, där de senare instrumenterades i bågö ändar. Lastceller av ringtyp och fabrikat Glötzl K 250 A135 placerades mellan ankarhuvud och ankarplatta, i princip så som tidigare visats i Figur 9a. Lastcellerna är av äldre typ men liknande de som visas i Figur 10 och har inte varit kontinuerligt inkopplade, utan avläsningen har skett med intervall om på ca 2 år, dock med tätare avläsning under de tre första åren efter uppspänningen, [4]. Erfarenheterna från utvärderingen av mätresultaten är positiva och överensstämmelsen med motsvarande data erhållen med "lift-off" metoden är mycket god, [8,9].



Figur 10. Lastcell av typ Glötzl KK3000 A135. Från [10].

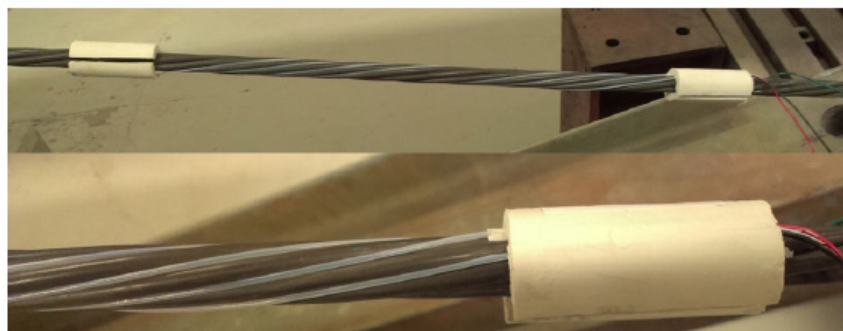
I samband med inspektion av inneslutningen i Forsmark 2 ersattes under hösten 2014 tre gamla spännkablar med nya, vilka då instrumenterades med lastceller, [5]. Installationen gjordes på i princip på samma sätt som tidigare i Forsmark 1 men nu användes lastceller av typ Glötzl KK3000 A135, se Figur 10. Även här monterades

de mellan ankarhuvud och ankarplatta [9], så som visas i Figur 11. De tre kablar som instrumenterades var en vertikalkabel och en horisontalkabel i inneslutningens vägg samt en horisontalkabel i bassängväggarna. En lastcell placerades i vardera änden av kablarna, utom i den vertikala kabeln som endast instrumenterades i den aktiva änden. I detta fall registreras spännkrafterna kontinuerligt via en datalogger av typ DL8 från Glötzl, [5]. Från utvärderingen av resultaten är slutsatsen att mätningar med lastceller är lämpliga i reaktorinneslutningar och ger rimliga resultat både under korttids- samt långtidsmätningar.



Figur 11. Lastcell monterad mellan ankarhuvud och ankarplatta i ett VSL-system. Från [8].

Som ett komplement försågs också fem linor i varje kabel med töjningsgivare. Dessa var av typen Tensmeg och specialanpassade för mätning av töjning i 7-trådiga spännlinor [5], se Figur 12. Vid uppspanning av kablarna skadades flertalet av töjningsgivarna och ytterligare möjlig inverkan av kablarnas krökning medförde att endast två av de planerade 15 linorna hade fungerande givare. Slutsatsen från försöket är att töjningsgivare av typen Tensmeg inte är lämpliga för att installeras på spännkablarna i reaktorinneslutningar, [5]. Detta har också observerats under laboratorieförsök med förspända betonginneslutningar i modellskala, [11].



Figur 12. Töjningsgivare monterade på spännlina. Från [5].

## 5 Instrumentering av BBRV kablar

**I följande fyra avsnitt beskrivs metoder som kan vara möjliga för att åstadkomma en permanent instrumentering av spännkablar av BBRV typ. Förutsättningarna för att respektive metod ska fungera beskrivs och kommenteras.**

Som en del av projektet har en litteratursökning genomförts med syfte att hitta eventuella föreslagna och utprovade metoder för att instrumentera spännkablar av BBRV-typ. Inga publicerade beskrivningar har hittats, varken i rapporter eller i internationella forskningsartiklar. Detta gäller i princip också övriga spännkabelsystem av liknande typ, och här är det främst de ovan beskrivna instrumenteringarna av kablar av VSL-typ [5] som framstår som relevanta och av intresse. Baserat på dessa tidigare erfarenheter, litteratursökningen och sammanställningen ovan avseende BBRV systemens utformning så ges i det följande beskrivningar av några möjliga metoder för instrumentering av BBRV kablar, samt förutsättningarna för hur och när dessa kan användas, med fokus på praktiska problem som måste lösas.

### 5.1 LOSSTAGNING OCH ÅTERSTUKNING

Om ankarhuvudet för en BBRV kabel kan kopplas loss är det möjligt att installera en lastcell på samma sätt som för en VSL kabel, se Figur 11. Detta är nödvändigt då den cirkulära lastcellen måste ha en inre diameter större än ankarhuvudet för att kunna trädas över detta. Om inre diametern är för liten måste änden på varenda spänntråd kapas, och så som framgår av Tabell 2-4 kan en spännkabel av BBRV-typ innehålla 139 st trådar. Då lastcellen har förts på plats skulle sedan ankarhuvudet kunna återkopplas genom att samtliga trådar återstukas, vilket skulle vara ett relativt omfattande arbete. Det är dock inte det största problemet med lösningen eftersom kabelns längd kommer att ge svårigheter. Dels har spänntrådarna kortats av och dels har en lastcell av till exempel typen Glötzl KK3000 A135 (se Figur 10) en tjocklek på 80 mm [10]. Det bör dock noteras att möjligen måste en större lastcell (KK5000 A160) användas för BBRV kablarna eftersom uppspanningskraften kan vara större, se Tabell 2-3. Utrymme mellan ankarhuvud och ankarplatta fås om mellanläggen tas bort, se Figur 1. Detta måste dock vara tillräckligt för att ge det avstånd på ca 80-100 mm som krävs, och det måste fortfarande vara möjligt att justera kabelns spännkraft genom att sätta in minst ett mellanlägg. I annat fall är det enda återstående sättet att frilägga mer kabellängd att flytta ankarplattan bakåt, till exempel om möjligt genom att korta de pilastrar som fungerar som mothåll, se Figur 6.

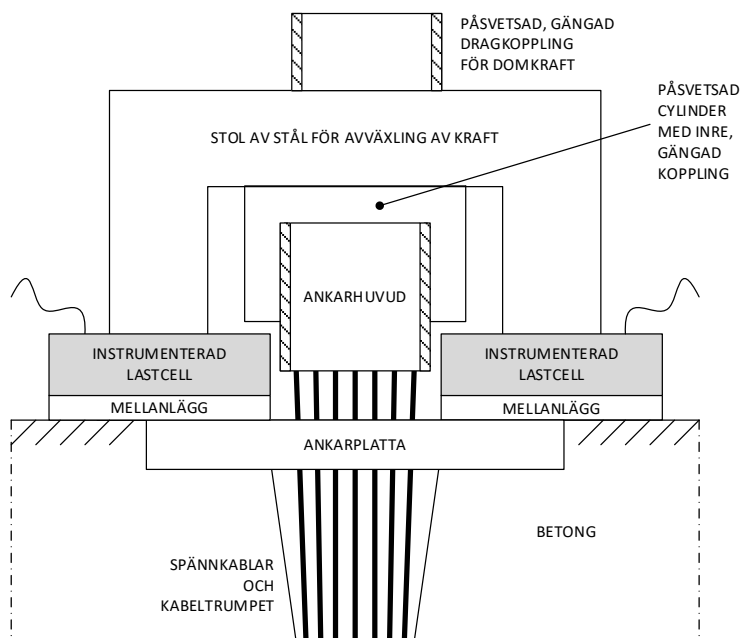
För att metoden ska kunna användas måste således följande vara uppfyllt:

- Det måste anses arbetsmässigt lönsamt att kapa och återstuka samtliga spänntrådar.
- Det måste gå att åstadkomma ytterligare ca 80-100 mm kabellängd genom att ta bort en del av mellanläggen och eventuellt flytta ankarplattan bakåt.

## 5.2 AVVÄXLING

Om lastcellen kan placeras bredvid ankarhuvudet behöver inte detta lösas från spännrådarna. Om kraften från ankarhuvudet kan föras vidare till ankarplattan via en eller flera lastceller, istället för genom mellanläggen, så är kontinuerlig instrumentering möjlig. Kraftfördelningen skulle kunna åstadkommas genom att använda en så kallad "stol", av den typ som visas i Figur 9b. Kraften från ankarhuvudet skulle tas genom en gängkoppling och dessutom finns en påsvetsad, gängad del där en domkraft kan anslutas, se Figur 13. Stolen som tillverkas av kraftiga stålstycken överför genom "gaffling" kraften från ankarhuvudet till förslagsvis två parallellkopplade lastceller som placeras bredvid huvudet och i kontakt med ankarplattan.

Om samma typ av cylindriska lastceller används kommer deras diametrar att vara ca 300-330 mm, beroende på typ [10]. Om lämpliga mer kompakta lastceller kan användas, till exempel av typen Glötzl KKLN 2000 AU6 (se Figur 14) utan genomgående hål så blir yttre diametern ca 240 mm. Det är viktigt att kraftresultanternas verkningslinje går genom lastcellens centrum och att denna punkt ligger inom ankarplattan. Annars behöver ankarplattan förses med en överliggande, tjock stålplatta, se Figur 13. Stol och lastceller monteras genom att en domkraft ansluts för en lift-off manöver varefter mellanläggen tas bort och lastcellerna placeras under stolen. Korrekt spännkraft fås genom att nya mellanlägg placeras mellan lastceller och stol då domkraften släpper kraften. Som mothåll för domkraften kan en andra stol behöva användas, beroende på hur området kring ankaret ser ut.



Figur 13. Principen för instrumentering av BBRV kabel genom avväxling via två lastceller.



Figur 14. Lastcell av typ Glötzl KKLN 2000 AU6. Från [12].

Den föreslagna metoden kan användas om:

- Det finns utrymme på sidorna om ankarhuvudet för att placera två lastceller.
- Och om det förutom detta också går att koppla en domkraft för lift-off operation under montage.

### 5.3 INDIREKT MÄTNING AV KRAFT

Om totala spännkraften reduceras (symmetriskt) kommer spänstrådarnas sammanlagda kraft på ankarhuvudet att minska eftersom trådarna förankras genom stukning på dess ytersida. Då den hoptryckande kraften reduceras kommer ankarhuvudets hoptryckning att minska och dess ytteryta röra sig utåt. Antag att ankarhuvudet är 146 mm långt och med en diameter på 155 mm (se Tabell 1) samt att en kabelkraft på 5 MN minskar med 5%, dvs 250 kN, så kommer ankarhuvudet att förlängas enligt:

$$\sigma = E\varepsilon \rightarrow \frac{\Delta P}{A} = E \frac{\Delta L}{L} \rightarrow \Delta L = \frac{\Delta PL}{EA} = \frac{250 \cdot 10^3 \cdot 146 \cdot 4}{210 \cdot 10^9 \cdot \pi \cdot 0,155^2} = 0,009 \text{ mm} = 9 \mu\text{m}$$

vilket motsvarar en töjning på  $\varepsilon = 0,06\%$ , eller  $60 \mu\varepsilon$ . För varje 1% minskning av spännkraften skulle då rörelsen i ankarhuvudet bli ca  $2 \mu\text{m}$  motsvarande ca  $10 \mu\varepsilon$ .

Möjliga metoder är då att installera lägesgivare eller lastceller som mäter ankarhuvudets rörelse utåt eller den kraft som detta kan ge på en annan elastisk volym i kontakt med huvudet. Deformationen är dock här för liten för att praktiskt kunna mätas tillräckligt noggrant. Om en elastisk "kloss" eller likande volym, med lastfördelande stålplattor på över och underytan, monteras mellan ankarhuvudet och ett tillräckligt fast mothåll så kommer hoptryckningen av denna också att ge den en jämt fördelad spänning. Om klossen är tillverkat av ett material som har en relativt låg elasticitetsmodul relativt stålets kommer klämkraften som verkar på denna att vara betydligt lägre än spännkraftförlusterna i spännkabeln. Därmed skulle ett mothåll kunna anordnas utan att kräva alltför kraftiga konstruktioner och en lastcell eller tryckmätare av mindre typ skulle kunna användas. Det bör

noteras att "mätklossens" klämkraft kommer att vara en motkraft mot spännkraft-förlusten och denna kraft måste också kunna tas av mothållet i klossens andra ände.

En möjlighet är här att använda taktila tryckgivare [13,14] som består av en yta som täckts av ett stort antal sensorer ordnade i en matris och skyddas av till exempel Polyuretan eller någon annan plastfilm. Från de mycket tunna (~0,1 mm) givarna kan genom samtidig mätning i rader och kolumner en belastnings position, storlek och fördelning registreras. Tryckregistreringen är dock olinjär och kan ha relativt dålig upplösning. Figur 15 visar en taktill tryckgivarplatta med kringutrustning och i Tabell 5 och 6 ges exempel på dimensioner och teknisk prestanda. Som framgår så opererar givarna inom tryckområden på 0,1 , 1,4 och 4,8 MPa (20, 200 och 700 PSI) och en lämplig storlek skulle här till exempel kunna vara 89×292 mm<sup>2</sup>. Givarnas motsvarande känslighet (noggrannhet) enligt Tabell 5 blir 0,3 , 2,8 och 9,8 kPa.



Figur 15. Taktill tryckgivare med kringutrustning. Från [13].

Tabell 5. Exempel på teknisk prestanda för taktila tryckgivare. Från [13].

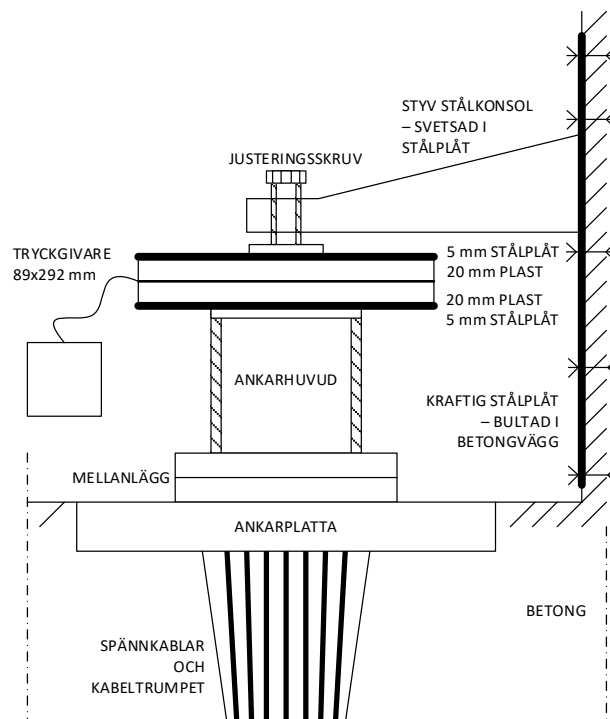
SENSOR CHARACTERISTICS AND PERFORMANCE <sup>1</sup>	
Pressure Range	20, 200 or 700 PSI
Pressure Sensitivity	0.2%
Signal to Noise Ratio (SNR)	667:1
Repeatability Error	0.4%
Linearity	99.8%
Accuracy Error <sup>2</sup>	<=5%
Contact Surface Material	Polyimide
Sensor Thickness	0.012 in (0.3 mm)
Cable Length	59 in (1.5m)
Operating Temperature	-40°C to 200°C



Tabell 6. Exempel på dimensioner hos taktila tryckgivare. Från [13].

SENSOR MODELS				
Model Number	5414	5415	5628	6390
Total Sensor Area	25mm x 324mm	102mm x 305mm	20mm x 84mm	84mm x 17mm
Active Sensing Area	10mm x 304mm	89mm x 292mm	12mm x 80mm	8mm x 80mm
Element Count	160 (10x16)	256 (16x16)	192 (6x32)	128 (8x16)
Spatial Resolution	1mm x 19mm	5.6mm x 18.3mm	2mm x 2.5mm	1.0mm x 5.0mm

En möjlig instrumentering skulle kunna utformas så som visas i Figur 16. En mätkloss sätts ihop, bestående av en taktil tryckgivare i mitten, omgiven av två ca 20 mm tjocka skivor av ett plastmaterial eller liknande vilka i sin tur har försetts med styva stålplattor på sina yttre ytor. Plastmaterialet ska vara relativt styvt och till exempel av Polypropylen eller Nylon-typ. Sådana plastmaterial har en elasticitetsmodul som ligger kring 2 GPa, vilket medför att de ger upphov till ca 100 gånger lägre spänningar vid deformation jämfört med stål. För att åstadkomma en relativt jämn spänningsfördelning används stålplattorna för lastfördelningen. Mellan stålplatta och ankarhuvud bör god anliggning anordnas, och likaså mellan stålplatta och mothåll. Det senare bör vara relativt styvt och kan lämpligen utformas som en konsol fastsvetsad i en stålplatta som till exempel bultas fast i en betongvägg så att även böjmomentmothåll ges. En viss liten, initial tryckspänning ska kunna ges mätklossen, till exempel via en justeringsskruv.



Figur 16. Principen för instrumentering av BBRV kabel genom indirekt mätning med mätkloss innehållande taktil tryckgivare.

För val av ett plastmaterial med elasticitetsmodulen  $E = 2 \text{ GPa}$  och den ovan föreslagna tjockleken på  $2 \times 20 \text{ mm}$  så blir kraften i mothållet vid en rörelse i ankarhuvudet på  $9 \text{ }\mu\text{m}$  (se ovan) följande:

$$\sigma = E\varepsilon \rightarrow P = AE \frac{\Delta L}{L} = 89 \cdot 292 \cdot 2000 \cdot \frac{9 \cdot 10^{-3}}{40} = 12000 \text{ N}$$

Här har användning av en taktill tryckgivare med ytan  $89 \times 292 \text{ mm}^2$  antagits. Den kraft på  $12 \text{ kN}$  som uppstår i mothållet är således ca 5% av den antagna spännkraftsförlusten på  $250 \text{ kN}$ . Om plastmaterialets tjocklek ökas kommer kraften att minska men detta bör anpassas till den valda taktilla givarens mätområde och den förväntade maximala spännkraftsförlusten.

Alltså, för att metoden ska fungera krävs att:

- Det är möjligt att ordna ett momentstyvt mothåll, till exempel genom att fästa en stålplatta i närliggande betongvägg.
- Att mothållet är tillräckligt starkt och odeformabelt för de krafter som uppstår.
- Att den taktilla tryckgivarens mätområde omfattar de förväntade tryckförändringarna.

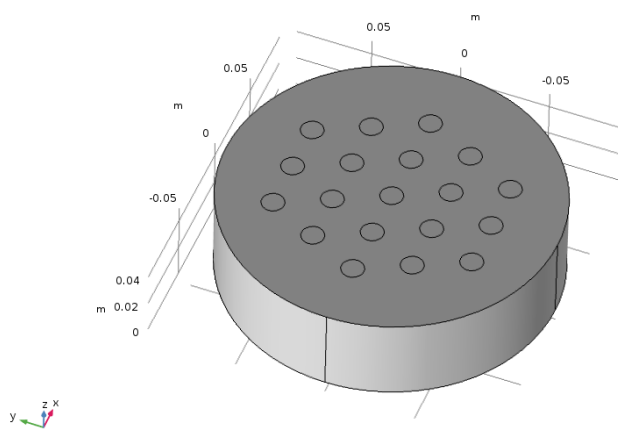
#### 5.4 DIREKT TÖJNINGSMÄTNING

Spännkablarna bör kunna övervakas genom att i belastat läge förse ankarhuvudet med ett antal trådtöjningsgivare på dess mantelyta, som registrerar ändring i töjningsmönster på grund av att kraften på ankarhuvudet ändras och/eller omfördelas. Det är rimligt att anta att såväl gradvis minskning av spännkraften som plötsligt trådbrott ska gå att registrera som en töjningsändring i ankarhuvudet.

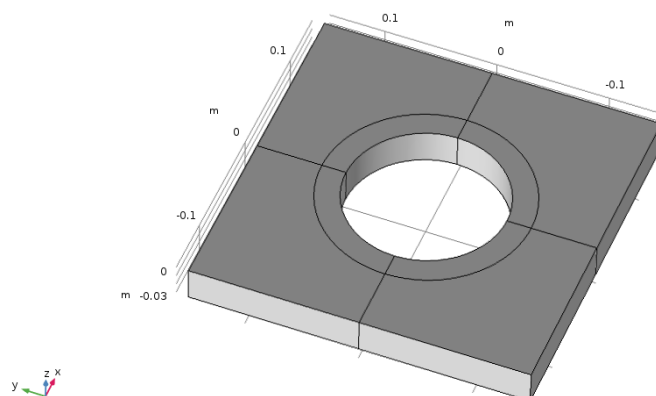
Registreringarna från flera trådtöjningsgivare kan möjligtvis användas för att fastställa vilken typ av påverkan på ankarhuvudet som har ägt rum. Med en givare är det endast möjligt att registrera en minskning av den totala spännkraften medan en jämförelse mellan flera givare möjligtvis också kan visa ungefär vilken eller vilka trådar som har brutit eller tappat spännkraft, vilket skulle kunna resultera i ett osymmetriskt töjningsmönster.

Dessa möjligheter har här undersökts genom en finit elementmodellering (FE) av ankarhuvudet, vilken beskrivs och sammanfattas i det följande. Genom studier av töjningen på ankarhuvudets mantelyta för några realistiska lastfall bör det gå att optimera placeringen av trådtöjningsgivarna där. För modellen har här en BBRV spännkabel (se Figur 1) med 19 trådar valts utifrån BBRs standardsortiment [15], som omfattar kablar med 7-61 trådar. Ett stort antal trådar skulle göra FE modellen mer komplex och försvåra utvärderingen av resultaten. Realistiska mått på ankarhuvudet är då en diameter på  $185 \text{ mm}$  och tjocklek på  $50 \text{ mm}$ . För ankarplattan gäller sidmått  $300 \text{ mm}$  och tjockleken  $32 \text{ mm}$ . Ankarplattan förutsätts vila på en halvrymd av betong med elasticitetsmodulen  $32 \text{ GPa}$ . Modellens geometri visas i Figur 17. I ankarplattan har ett hål för "trumpeten" gjorts i mitten av plattan, med en diameter på  $142 \text{ mm}$  i enlighet med den tekniska beskrivningen av spännsystemet [15]. Den använda geometrin visas i Figur 18 nedan. Betongen har modellerats med sidmått  $1 \text{ m}$  samt höjden  $1 \text{ m}$ , vilket visas i Figur 19.

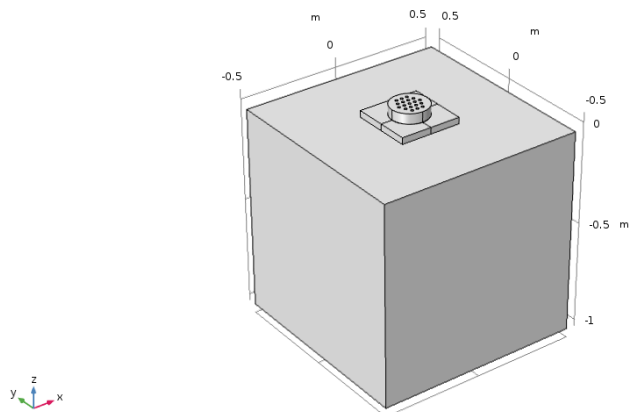
Samtliga material har modellerats som linjärelastiska, med  $E = 200$  GPa och  $\nu = 0,3$  för stålet samt  $E = 32$  GPa och  $\nu = 0,3$  för betongen. Lasterna från spänntrådarna fördelades inom en cirkel med en diameter på 75 % av ankarplattans sidmått. Den exakta placeringen bestämdes av elementindelningen och varje trådlast antas verka inom en cirkulär yta med 12,5 mm diameter. Dock har materialet i ankarhuvudets verkliga hål bibehållits i modellen och lasterna från respektive tråd har istället applicerats som tryck över cirklar med diametern 12,5 mm. Summan av trådlasterna när trådtöjningsgivarna visar noll sattes till 2,5 MN utifrån vilket en lastminskning med 5 % simulerades, orsakat av bortfall av en spänntråd i centrum av knippet och för bortfall av en perifer tråd.



Figur 17. Modellering av ankarhuvud.



Figur 18. Modellering av ankarplatta.



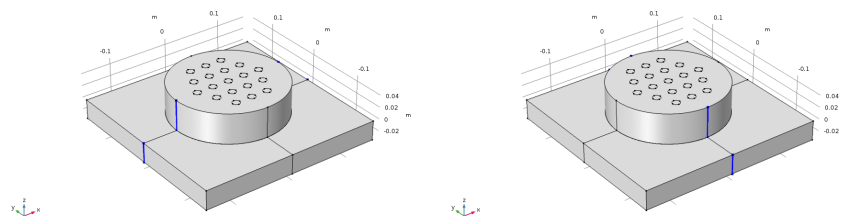
Figur 19. Modellering av det studerade systemet.

Kontaktvillkor används mellan ankarhuvudet och ankarplattan samt mellan ankarplattan och betongen. Friktionskoefficienten har satts till 0,5 i samtliga kontaktytor. I botten av betongen har samtliga frihetsgrader låsts. För att förhindra att ankarhuvud och ankarplatta driver iväg i simuleringen låses den frihetsgrad i  $xy$ -planet som är vinkelrät mot respektive låst rand i Figur 20.

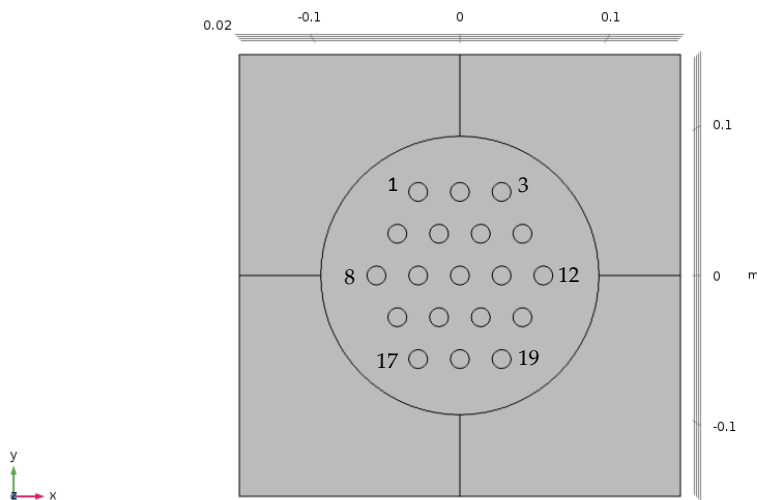
Trådarna numreras radvis med startnummer 1 och slutnummer 19 enligt Figur 21. Vinklar definieras i enlighet med koordinatsystemet placerat i centrum av tråd 10 i figuren. Det ytor som krafterna applicerats på indikeras också i Figur 22.

Följande lastfall har analyserats:

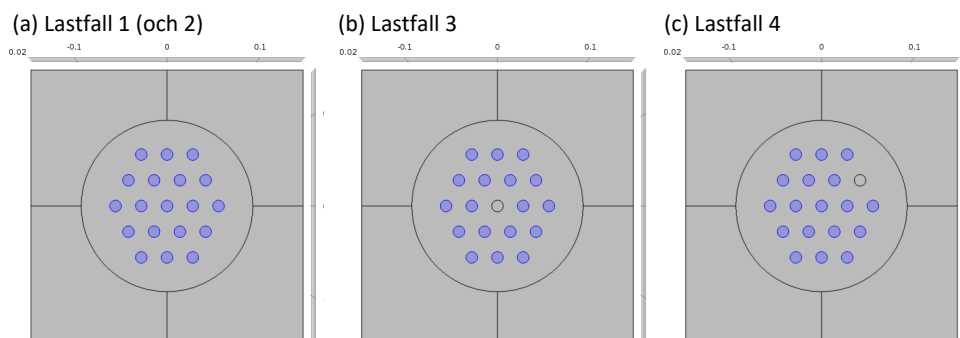
Lastfall	Last
1	Full kraft i alla trådar
2	95 % av full kraft i samtliga trådar
3	Bortfall av kraft i tråd 10
4	Bortfall av kraft i tråd 7



Figur 20. Låsning av frihetsgrader.



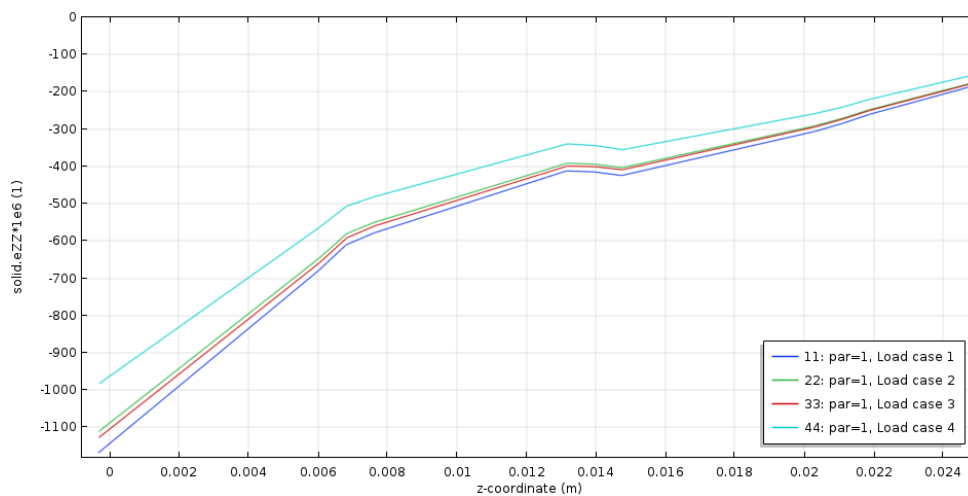
Figur 21. Numrering av trådar samt koordinatsystem.



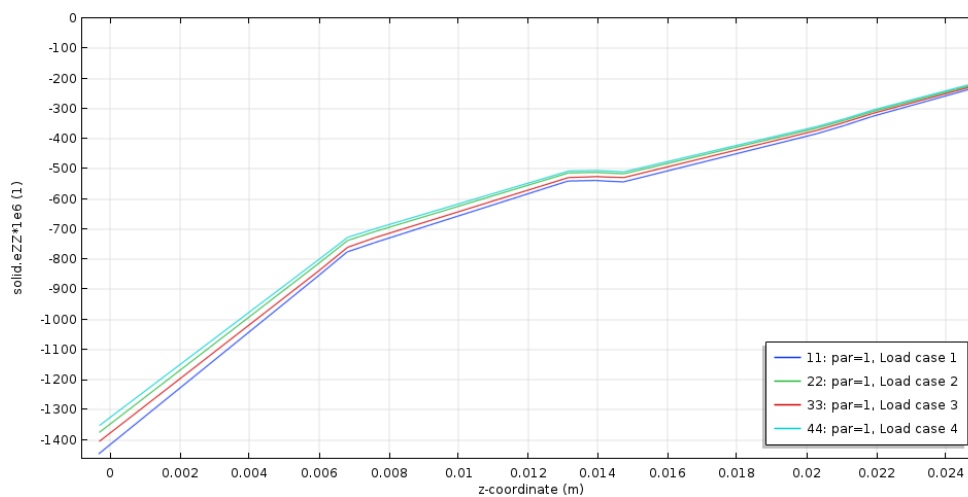
Figur 22. Belastade och obelastade kablar i de fyra beaktade lastfallen.

Töjningsändringarna i de olika lastfallen redovisas i det följande som töjningar i ett antal lägen runt ankarhuvudets periferi samt läge i ankarhuvudets tjockleksriktning ( $z$ -koordinat). Resultaten redovisas som töjning över höjden av ankarhuvudet i positionerna  $0^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $180^\circ$  och  $270^\circ$  (medurs rotation kring periferin) för de analyserade lastfallen, där  $z = 0$  mm motsvarar kontaktytan mellan ankarhuvud och ankarplatta.

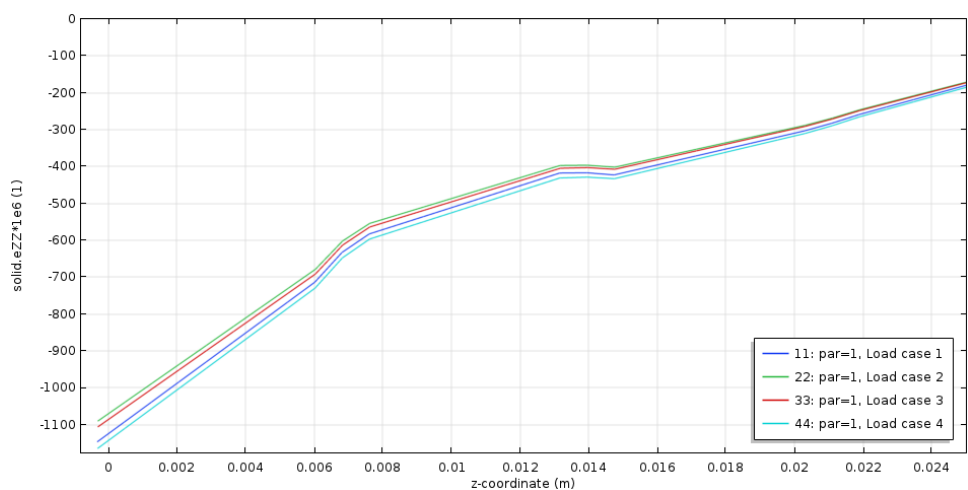
Figur 23–26 redovisar töjningar i  $z$ -led i fyra olika lägen runt ankarhuvudet för  $0 \leq z \leq 25$  mm och i Figur 27–30 redovisas tangentiella töjningar för samma lägen.



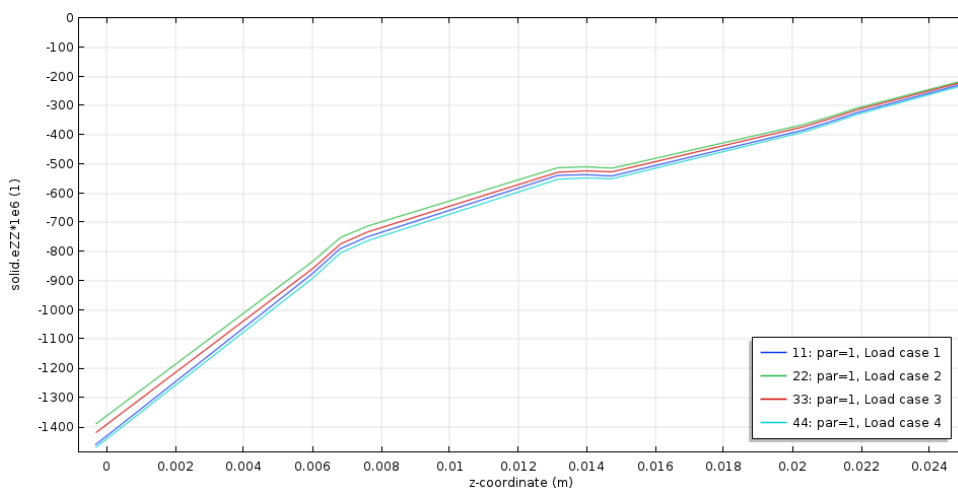
Figur 23. Töjningar ( $\mu\epsilon$ ) i z-riktningen för höjden  $0 \leq z \leq 25$  mm och läget  $0^\circ$ .



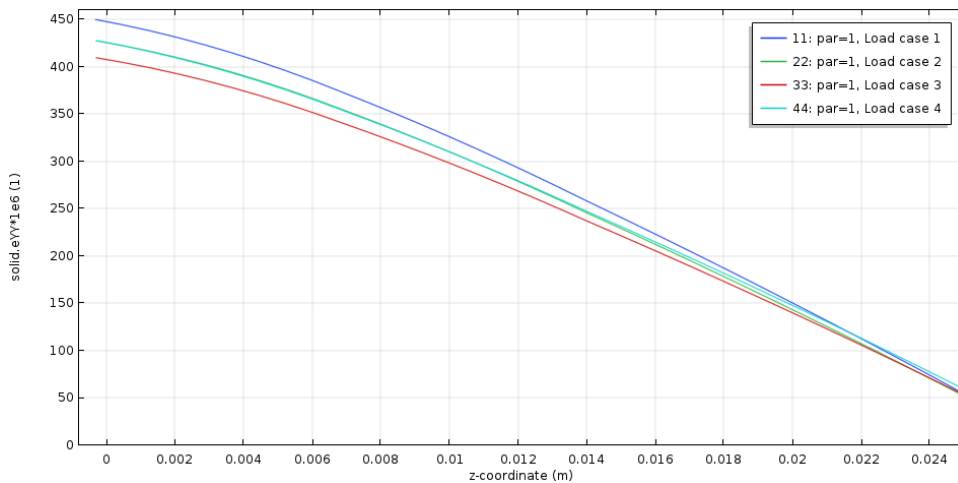
Figur 24. Töjningar ( $\mu\epsilon$ ) i z-riktningen för höjden  $0 \leq z \leq 25$  mm och läget  $90^\circ$ .



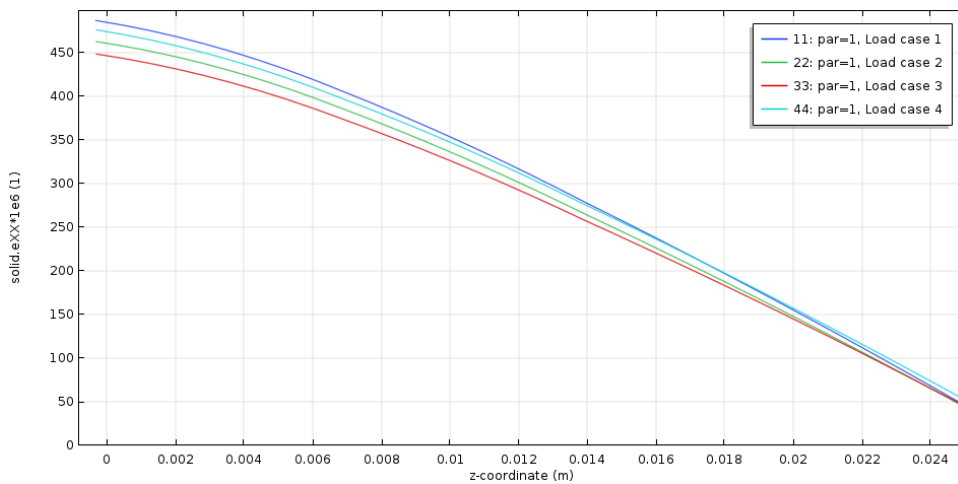
Figur 25. Töjningar( $\mu\epsilon$ ) i z-riktningen för höjden  $0 \leq z \leq 25$  mm och läget  $180^\circ$ .



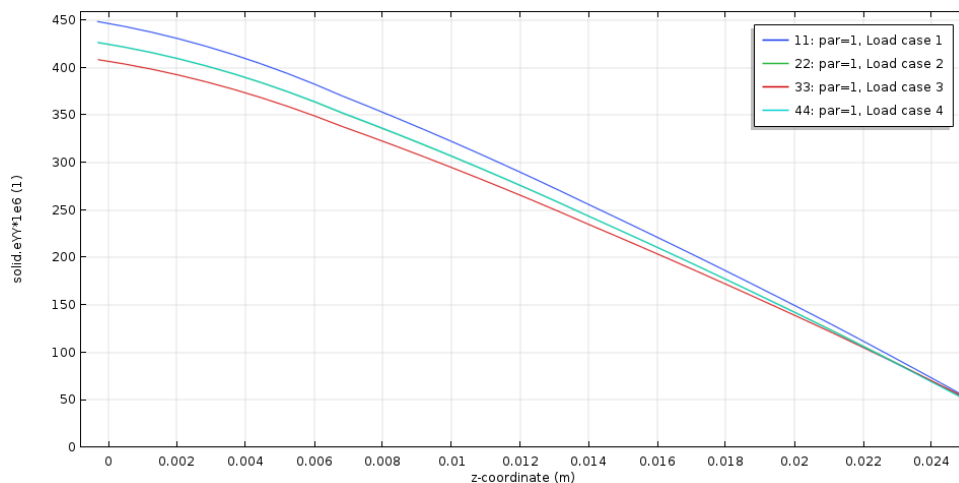
Figur 26. Töjningar ( $\mu\epsilon$ ) i z-riktningen för höjden  $0 \leq z \leq 25$  mm och läget  $270^\circ$ .



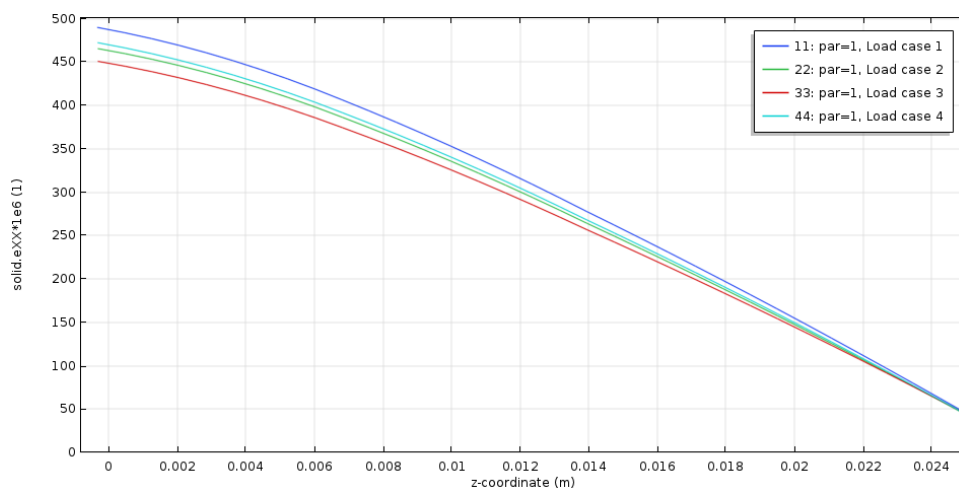
Figur 27. Tangentiella töjningar ( $\mu\epsilon$ ) för höjden  $0 \leq z \leq 25$  mm och läget  $0^\circ$ .



Figur 28. Tangentiella töjningar ( $\mu\epsilon$ ) för höjden  $0 \leq z \leq 25$  mm och läget  $90^\circ$ .



Figur 29. Tangentiella töjningar ( $\mu\epsilon$ ) för höjden  $0 \leq z \leq 25$  mm och läget  $90^\circ$ .



Figur 30. Tangentiella töjningar ( $\mu\epsilon$ ) för höjden  $0 \leq z \leq 25$  mm och läget  $270^\circ$ .

De beräknade töjningarna i den yttre delen av ankarhuvudet ( $z > 25$  mm) ger alltför små skillnader mellan lastfallen för att mätning av dessa ska vara praktiskt möjlig, vilket också är rimligt eftersom lastinföringen sker nära det partiet. Vidare så finns det skäl att anta att modellens approximationsavvikelser är större där på grund av den förenkling i lastinföringen från trådarna som har gjorts.

Ur kurvorna ovan har töjningsförändringarnas storlek skattats genom mätning. Det har inte ansetts viktigt att få exakta värden, eftersom modelleringen innefattar en del förenklingar samt att det studerade fallet innehåller färre trådar än i de installerade BBRV kablarna. Det väsentliga har varit att få en indikation på om metoden kan användas för övervakning av spännkablar, det vill säga om mätbara och signifikanta utslag på trådtöjningsgivarna kan förväntas med denna metod.



**Tabell 7. Sammanställning av töjningsändringar 2 mm från ankarhuvudets anliggningsyta mot ankarplattan.**

Lastfall		Töjningsändring, $\mu\epsilon$							
		Läge							
		z-riktning				Tangentiell riktning			
		0°	90°	180°	270°	0°	90°	180°	270°
2	95 % av full kraft	50	50	50	50	-21	-21	-21	-23
3	Bortfall av en central tråd	33	25	33	25	-39	-36	-39	-43
4	Bortfall av perifer tråd i c:a 30° läge	167	67	-16	-8	-21	-12	-21	-17

Av Tabell 7 framgår att ett bortfall av kraft på cirka 5 % borde gå att registrera med hjälp av trådtöjningsgivare längs ankarhuvudets generatriser. Symmetriska lastfall kan registreras av givare i valfritt läge runt ankarhuvudet, medan det krävs givare i flera lägen för att säkert kunna registrera bortfall av en mera perifer tråd, eftersom töjningsändringarna tycks bli ganska små på avstånd från den aktuella tråden. De tangentiella töjningarna förefaller inte ge lika påtagliga resultat, varför sådana bör kunna uteslutas i en vidare utveckling av metoden.

Det rekommenderas att en metod med korta trådtöjningsgivare i fyra eller åtminstone tre lägen runt ankarhuvudet bör studeras vidare med praktiska försök. Givarna ska sitta längs generatriser och placeras så nära ankarplattan som möjligt.

För att metoden ska fungera:

- Måste trådtöjningsgivarna kunna fästas på ankarhuvudet, vilket kan vara problematiskt om huvudet är gängat över hela sin längd.
- Kan möjligen ett alternativ med en tunn pågängad hylsa användas. Om denna kan fås att noggrant följa ankarhuvudets längdändring kan trådtöjningsgivarna fästas på denna istället för direkt på huvudet.
- Kan en instrumentering av mellanlägggen (se Figur 3) utprovas som alternativ. Deras ihoptryckning samverkar med ankarhuvudets.
- Kan trådtöjningsgivarna placeras såväl parallellt som vinkelrätt mot kabelns längdriktning, men det påverkar mätnoggrannheten (se Tabell 7).

## 6 Sammanfattning

**Förutsättningarna för de fyra föreslagna möjliga metoderna för instrumentering av BBRV kablar sammanfattas här, med kommentarer om för- och nackdelar för respektive metod.**

De fyra metoder för instrumentering som har föreslagits i avsnitt 5.1-5.4 är baserade på den kännedom om dimensioner och utföranden som redovisas i kapitlen 2-4. Inget tidigare, beskrivet och utprovat koncept för BBRV kablar har kunnat hittas i litteraturen. De beskrivna metoderna är därför oprövade förslag som behöver detaljutföras och anpassas till rådande omständigheter. I det följande sammanfattas fördelarna (+) och nackdelarna (-) med de fyra föreslagna metoderna.

### **Metod 1 - Losstagning och återstukning:**

- + En robust metod, som liknar tidigare genomförda instrumenteringar av spännkablar av VSL-typ.
- Losstagning och återstukning är mycket arbetskrävande.
- Det kan i vissa fall vara svårt att åstadkomma utrymme för en lastcell i kabelns längsriktning på grund av kabelns från början fixerade längd.

### **Metod 2 – Avväxling:**

- + Direkt mätning av dragkraften i kabeln genomförs.
- + Metoden liknar tidigare genomförda instrumenteringar av kablar av VSL-typ.
- Kräver gott om plats på ömse sidor om ankarhuvudet, dock endast i en riktning.
- Lasten från lastceller och mellanlägg måste kunna upptas av betongen, direkt eller via ankarplattan.

### **Metod 3 - Indirekt mätning av kraft:**

- + Ingen losskoppling eller avväxling av ankarhuvudet behöver göras.
- + Metoden kan relativt flexibelt anpassas efter geometrin hos tryckgivarna.
- Kräver stadigt anordnat mothåll av till exempel en styv stålkonsol.

### **Metod 4 - Direkt töjningsmätning**

- + Ingen losskoppling eller avväxling av ankarhuvudet behöver göras.
- + Indikationer om spännkraftsminskning har skett i en eller samtliga spänntrådar.
- Det kan vara svårt att fästa trådtöjningsgivare på grund av ankarhuvudets gängning. Eventuellt kan givare fästas på mellanläggen, eller alternativt på en pågängad hylsa.

## 7 Tillkännagivanden

Projektet har genomförts av KTH Byggvetenskap, avdelningen för Betongbyggnad, med Prof. Anders Ansell som projektutförare och projektledare.

Från avdelningen har Adj.prof Erik Nordström och Tekn.dr Richard Malm deltagit vid diskussioner kring konceptuella idéer för möjlig instrumentering och teknisk prestanda hos olika givare, mätsystem och kabelsystem.

Till beskrivningen av metoden med direkt töjningsmätning (avsnitt 5.4) har Prof.em Jonas Holmgren bidragit med metodförslag och som särskild utredare. Finita elementmodelleringen har genomförts av Tekn.lic Daniel Eriksson.

Rapporten har granskats av Richard Malm.

Rapportförfattaren riktar ett varmt tack till de ovan nämnda för värdefulla bidrag och insatser samt intressanta diskussioner.

KTH, Stockholm

Anders Ansell

## 8 Referenser

- [1] T Roth, J Silfwerbrand, H Sundquist. *Betonginneslutningar i svenska kärnkraftverk. En sammanställning över konstruktion och material*. SKI Rapport 02:59, 2002.
- [2] P Anderson, L-E Berglund, J Gustavsson. *The measurement of tendon forces in Swedish reactor containments*. Life Prediction and Aging Management of Concrete Structures, 2nd RILEM Workshop, Paris, 2003.
- [3] S Lindgren. *Analys av status hos spännsystem på Ringhals kärnkraftverk*. Examensarbete, Rapport TVBK – 5128. Avdelningen för Konstruktionsteknik, Lunds Tekniska Högskola, 2005.
- [4] P Anderson. *Evaluation of the prestress level in Swedish reactor containments*. Transactions, SMiRT 19, Toronto, 2007.
- [5] P Lundqvist, M Edin, P Persson, A Frisk. *Instrumentering av spännkablar i Forsmark 2*. Energiforsk rapport 2016:243, 2016.
- [6] M Birkenmaier, A Brandestini, MR Ros, K Vogt, *Method for pretensioning and anchoring reinforcements of concrete*, US Patent 2728978, United States Patent Office, Washington, 1956.
- [7] MYH Bangash. *Structures for nuclear facilities. Analysis, design, and construction*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2011.
- [8] P Lundquist, *Monitoring of tendon forces in Swedish Containments*, Presentation vid Energiforsk seminarium 2016-03-15.
- [9] P Lundqvist. *Instrumentation and monitoring of concrete structures in nuclear power plants. Summary of seminar*. Energiforsk report 2016:306, 2016.
- [10] Glötzl - Anchor load cell KK. <http://www.gloetzl.de/en/products/sensors/load-and-anchor-load.htm>
- [11] Hessheimer MF, Klamerus EW, Lambert LD, Rightley GS. *Overpressurization test of a 1:4-scale prestressed concrete containment vessel model*, NUREG/CR-6810, SAND2003-0840P, U.S. NRC, Washington, USA (2003).
- [12] Glötzl - Anchor load cell KKLN. <http://www.gloetzl.de/en/products/sensors/load-and-anchor-load.htm>
- [13] *Tactile pressure sensors*, PPS, Los Angeles, USA. <https://pressureprofile.com/applications>
- [14] F Johansson, R Malm, L Fransson. *Islaster mot betongdammar – fördjupad förstudie*, Elforsk rapport 14:57, Stockholm (2014).
- [15] *BBR Cables - Cables for external prestressing. Multi-strand system for external PT applications*. <http://www.bbrnetwork.com/technologies/post-tensioning/other-pt-systems.html>



# MÖJLIGHETER TILL INSTRUMENTERING AV SPÄNNKABLAR AV SYSTEM BBRV

Spännarmeringen i de betongkonstruktioner som omsluter kärnkraftreaktorer bidrar till att förhindra sprickbildning i betongen vid extrema händelser exempelvis olyckor.

Då krafterna i spännkablarna relaxeras med tiden måste de övervakas och kontrolleras regelbundet. Många av reaktorinneslutningarnas kablar är av typen BBRV som består av ett stort antal individuella trådar med fixerad längd, fast förankrade i ett gemensamt ankarstycke. Detta gör det problematiskt att montera in lastceller i befintliga kabelförankringar.

Resultaten visar här att det i dagsläget saknas beskrivna och utprovade koncept för instrumentering av BBRV kablar. Fyra olika möjliga metoder för att utveckla system för instrumentering av kablar av BBRV-typ föreslås.

## 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](http://www.energiforsk.se)