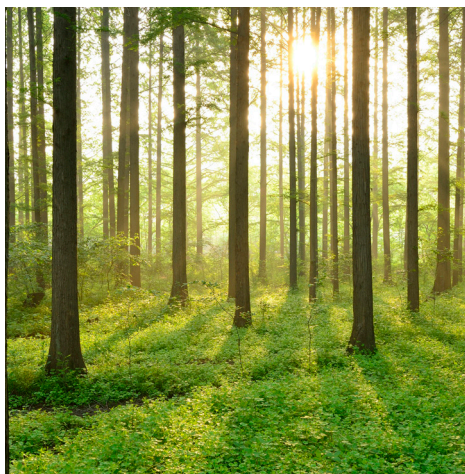


LAGERINBYGGNAD FÖR SEGMENTLUCKOR

RAPPORT 2021:721



 VATTENKRAFT

TILLÄMPAD VATTENKRAFTTEKNIK



Lagerinbyggnad för segmentluckor

Metoder för kontroll och övervakning

PETER BERGKVIST

GRANSKARE:

PEDER EKLUND

ANDERS MARKLUND

HENNING FØSKER

ISBN 978-91-7673-721-7 | © Energiforsk januari 2021

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

Förord

Med ökad reglering av vattenkraften och med förändrade flödessituationer som resultat av klimatförändringen är det viktigt att avbördningssäkerheten på våra vattenkraftanläggningar bibehålls. Den här rapporten är en pusselbit för arbetet med att säkerställa en hög avbördningssäkerhet.

Segmentluckor är mycket vanligt förekommande vid dammar och vattenkraftstationer och i den här rapporten beskrivs de metoder som används idag av branschen för kontroll av luckornas lager. En ökad friktion i lager kan medföra att en utskovslucka inte kan öppnas och måste ställas av för reparation. Om detta sker i ett skarpt läge med höga flöden kan det ge allvarliga konsekvenser för dammsäkerheten.

Rapporten har tagits fram av Peter Bergkvist på Norconsult på uppdrag av styrgruppen för Energiforsks program Tillämpad vattenkraftteknik. Projektet har haft en referensgrupp kopplat till sig bestående av Peder Eklund, Fortum och Anders Marklund, Vattenfall.

Sammanfattning

Metoder för kontroll och övervakning av lagerinbyggnader till segmentluckor.

Segmentluckor är vanligt förekommande på dammar och vattenkraftsanläggningar i yt- och bottenutskov samt vid intag till kraftverk.

Lagerinbyggnadens utformning skiljer sig åt beroende på om luckan har raka eller snedställda luckben vilket medför olika belastningsfall på lagret.

Äldre installationer har lager som kräver tillsatssmörjning emedan nyare luckor ofta är utrustade med självmörjande lager. Lucklager är vanskliga att eftersmörja då smörjmedlet inte tränger in i det belastade området. Vanligast förekommande som självmörjande lager är metallager i brons med grafitfyllda fickor emedan man i Norge har goda erfarenheter av smörjningsfria lager i kompositmaterial, dessa får dock inte vara vattenupptagande.

Ett lucklager i dålig kondition medför höga belastningar på luckbenet vilket man inte kan förutsätta att de är dimensionerade för. De säkerhetssystem som förekommer mot att vid manövrering överbelasta spelmaskineriet skyddar inte mot risken att överbelasta ett luckben.

I rapporten belyses några exempel på förändringar vilka kan medför ökade risker för lagerhaveri så som, byte av smörjmedel, minskat underhåll, ombyggnad av lyftspel och tröskelhöjningar på befintliga luckor.

Inom industrin finns det övervakningssystem av lagerinbyggnader men dessa är avsedda för roterande axlar där man mäter temperaturer och vibration. Lagerinbyggnader för segmentluckor är inte lämpade för dessa mätsystem.

Övervakning av lyftkraften vid öppning förekommer både för hydrauliska och mekaniska kugg- eller linspel. Lyftkraften beror av en mängd samverkande parametrar och det är svårt att övervaka lagerfriktionerna på detta sätt.

I rapporten redovisas tre olika exempel där man monterat töjningsgivare på luckbenen och vid manövreringen avläst vilka spänningar som uppstår. Metoderna skiljer sig något i det praktiska genomförandet men bygger på samma princip. Vilken av metoderna som är bäst lämpad kan bero av hur luckbenet är utformat. Generellt torde man kunna säga att slanka luckben ger ett tillförlitligare resultat, men dessa är mer känsliga för ökande lagerfriktioner.

Summary

Methods to control and monitor bearing installations at radial gates.

Radial gates are common on dams and hydropower plants both as surface and bottom outlets and at intakes. The design of the bearing installation differs depending on whether the gate has straight or angel legs, which leads to different load cases on the bearing.

Older installations have bearings that require additional lubrication, modern gates are often equipped with self-lubricating bearings. Gate bearings are difficult to re-lubricate as the lubricant tends not penetrate to the loaded area. The most common as self-lubricating bearings are metal bearings in bronze with graphite filled pockets. In Norway they have positive experiences of self-lubricating bearings in composite materials, but these must not be water-absorbing.

A bearing in poor condition causes high loads on the gate-arms, which cannot be assumed that they are dimensioned for. The safety systems that exist against overloading the lifting-machinery during operation do not protect against the risk of overloading the gate-arms.

The report highlights some examples of changes that may increase the risks of bearing failure, such as replacement of lubricants, reduced maintenance, altering of lifting-machinery and increased retention level and sill-height.

Monitoring systems for bearing housings in industrial application are intended for rotating shafts where temperatures and vibration are measured. These measuring systems are not suitable for bearings in radial gates.

Monitoring of the lifting force when opening is used for both hydraulic and mechanical lifting-machineries. The lifting force depends on several interacting parameters and it is difficult to monitor the bearing frictions in this way.

The report presents three different examples where strain-gauges were mounted on the gate-arms measuring the stresses that arise during maneuvering. The methods differ somewhat in the practical implementation but are based on the same principle. Which of the methods is best suited may depend on the design of the gate-arms. In general, slender gate-arms give a more reliable result, but these are more sensitive to increasing bearing frictions.

Innehåll

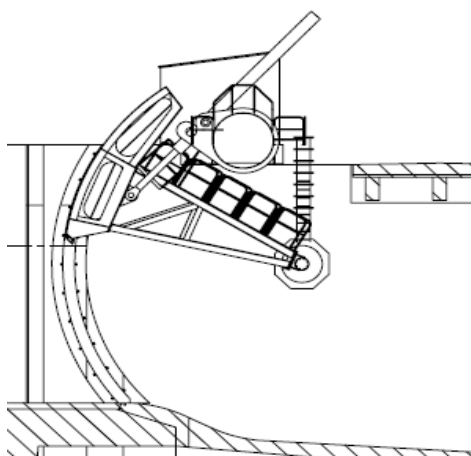
1	Segmentluckor	7
1.1	Segmentluckor	7
1.2	Lagerkonstruktioner	7
1.3	Lagertyper och material	9
2	Lagerhaveri	11
2.1	Följder av ett lagerhaveri	11
2.2	Orsaker	11
2.3	Folsom dam haveriet	12
2.4	Byte av luckspel	12
2.5	Höjning av dämningen	13
3	Säkerhetsfunktioner mot lagerhaveri på segmentluckor	15
3.1	Periodisk tillsyn	15
3.2	Manöverkrafter	15
3.2.1	Hydrauliska lyftspel	15
3.2.2	Vajer och kuggstångspel	17
3.3	Begränsning av manöverkrafter	18
3.3.1	Kuggstångsspel	18
3.3.2	Lyftcylindrar	18
3.3.3	Linspel	18
4	Metoder för lagerövervakning inom industrin	19
5	Metoder för lagerövervakning inom vattenkraft	20
5.1	Töjningsgivare på luckben	20
5.1.1	FEM-Analys	20
6	Exempel på lagerövervakning för segmentluckor	25
6.1	Exempel 1	25
6.2	Exempel 2	27
6.3	Exempel 3	28
7	Tillämpning av lagerfriktionsmätning	30
7.1	När kan det vara lämpligt att genomföra en mätning?	30
7.2	Hur kan genomförda mätningar användas/tolkas?	30
7.3	Vad kostar det att göra en mätning?	30

1 Segmentluckor

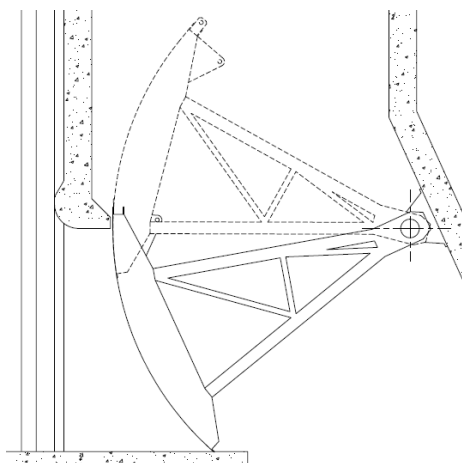
1.1 SEGMENTLUCKOR

För en segmentlucka är bordläggningen ett cirkelsegment som är cylindrisk tvärs strömriktningen. Vattenlasten tas upp av luckkroppen som i sin tur bärs av två luckben som är lagrade i bordläggningens krökningscentrum. Avbördningen sker genom att luckan vrids uppåt runt lagercentrum.

Segmentluckor förekommer både vid intag till kraftverk samt i utskov på dammar. Det kan vara som ytutskov där överkanten av luckan är ovanför vattenytan eller som bottenutskov med en tätning i överkant på bordläggningen.



Figur 1.1 Sektion ytutskov



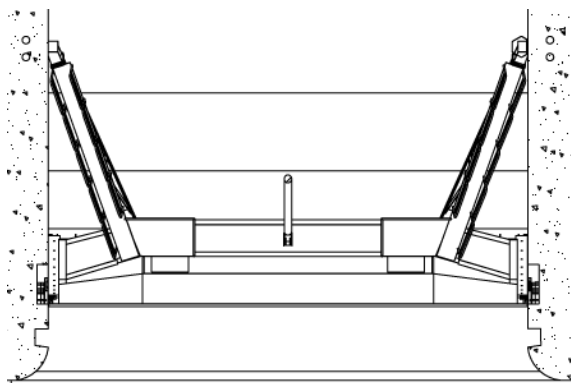
Figur 1.2 Sektion bottenutskov

De vanligaste systemen för manövrering av segmentluckor är linspel, kuggstängspel eller hydrauliska dragande cylindrar.

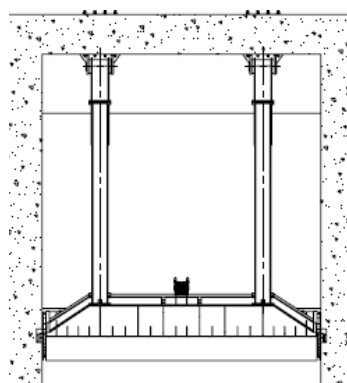
1.2 LAGERKONSTRUKTIONER

Luckbenen på segmentluckor kan vara raka med lagringarna infästa i en vägg nedströms luckkroppen, detta är vanligt förekommande för intagsluckor samt för bottenutskovsluckor.

I ytutskov är luckbenen vanligtvis snedställda med lagringarna infästa i sidoväggarna. Snedställningen medför en viss lastförskjutning på lagren med axiell last och kantryck.

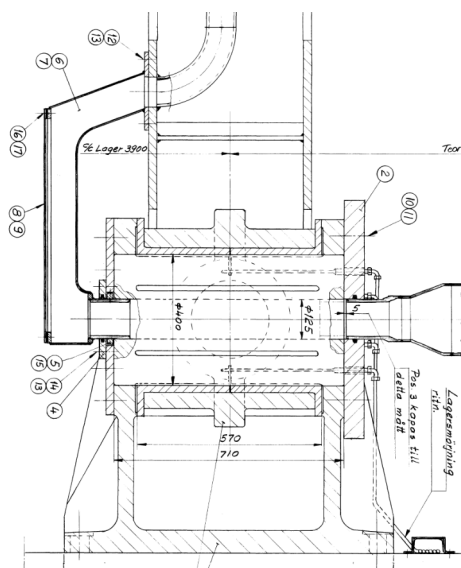


Figur 1.3 Toppvy snedställda luckben



Figur 1.4 Toppvy raka luckben

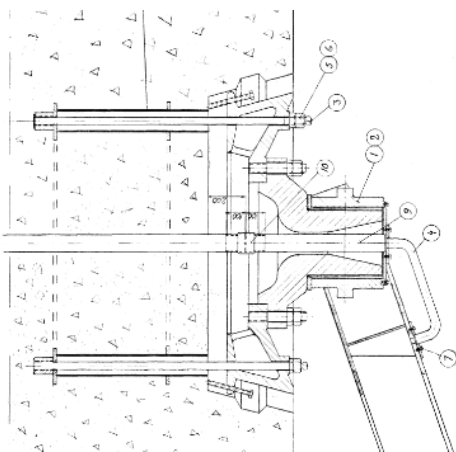
Luckor med raka luckben är normalt försedda med lagringar där tappen har stöd i bägge ändar, även kallade 2-skurna. Infästningen är fördelaktig då den ger en jämn belastning på lager och tapp.



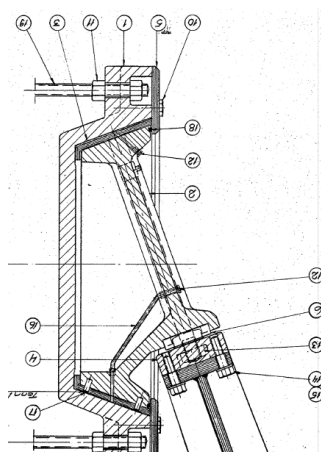
Figur 1.5 2-skuret lager.

Det förekommer även att luckor med snedställda luckben har 2-skurna lager, dessa är då infällda i en nisch i pelarsidan.

För luckor med snedställda luckben är den vanligaste konstruktion ett lager på fri tapp, även kallad 1-skurna. Tappen är då ofta placerad i en murkona som är ingjuten pelarsidan. En cylindrisk lagertapp utsätts där för ett böjmoment som medverkar till en förskjutning av yttrycket i lagret. Det cylindriska lagret är därför då även kompletterat med en fläns eller en axiell lagringsbricka. Alternativt att man istället har ett koniskt glidlager som får en bättre lastfördelning och kan ta upp de axiella krafter som uppstår med snedställda luckben.



Figur 1.6 Cylindriskt lager på fri tapp



Figur 1.7 Koniskt lager

1.3 LAGERTYPER OCH MATERIAL

Glidlager är den överlägset mest använda lagertypen för utskovsluckor, friktionsmotståndet är något högre än för rullningslager men glidlager är mer robusta, mindre känsliga för korrosion och kan bära en högre last. Totalt är därför glidlager den bäst lämpade lagertypen för segmentluckor.

Vanligaste materialet i glidlager är olika bronslegeringar, för att lagret skall fungera krävs det smörjning som reducerar friktionen. Smörjmedlet kan endera tillföras externt som fett via nippel och smörjkanaler eller finnas inbyggt i lagret, då vanligtvis som grafitkutsar i lagermaterialet. Den senare typen av självsmörjande lager kallas ofta för "Oiles lager".



Figur 1.8 Glidlager i bronsmetall för extern tillsatssmörjning.



Figur 1.9 Glidlager i bronsmetall med grafitinlägg.

Smörjmedlet i lager förbrukas egentligen inte men trots detta så krävs det påfyllning i lager för tillsatssmörjning. Vilket beror av att fett trycks ut och den film som skall bära mellan glidytor försvinnas. Smörjfettet har även en tätande funktion då det motverkar att partiklar eller vatten tränger in mellan glidytor.

I självsmörjande lager så är principen att grafiten trycks ut vid belastning och sedan fördelas i lagret vid rotationsrörelsen. Grafiten har inte samma tätande förmåga vilket delvis kan kompenseras genom att lagringen förses med radiallytätningar, exempelvis V-ringar, samt att tappen är i rostfritt stål.

Det finns även självsmörjande lager i plast eller kompositmaterial som fiberförstärkta plastmaterial. Lager med plast är i Sverige ovanliga för dammluckor, vilket kan bero av tradition och att det saknas långvarigt beprövade installationer. Vissa typer av plastlager sväller i vatten och är därmed olämpliga som lager för segmentluckor.



Figur 1.10 Glidlager i kompositmaterial

Erfarenhetsutbyte med expertis i Norge har visat att man där sedan ca 20 år tillbaka förordar lucklager i kompositmaterial typ "Orkot" på en axel av rostfritt stål. Vid genomförda mätningar har man funnit att de självsmörjande lagren i brons med grafitinlägg ofta har hög friktion, vilket antas bero av att rotationen i ett lucklager är för liten för att på ett fullgott sätt fördela ut grafiten mellan kontaktytor.

2 Lagerhaveri

2.1 FÖLJDER AV ETT LAGERHAVERI

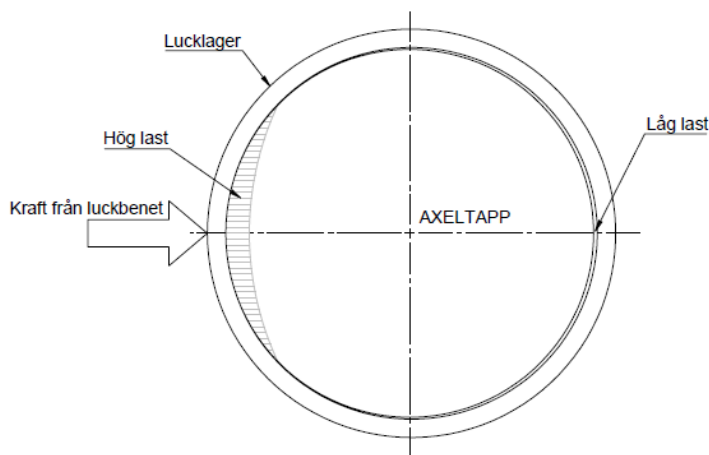
Ett haveri i glidlager betyder att friktionsmotståndet ökar vilket medför att den kraft som behövs för att manövrera luckan ökar. Beroende på hur lucka och lyftutrustning är dimensionerat kan det i sin tur innebära olika scenarier. Från att lyftutrustningen inte kan manövrera luckan till att luckbenen deformeras, luckan kilar fast i utskovet eller ett haveri på någon komponent i lyftutrustningen.

2.2 ORSAKER

Friktionsmotståndet mellan två ytor är egentligen två olika värden. Dels det högre värdet som man kallar för startfriktion, vilket är den friktion som finns mellan två ytor när de står stilla. I samma ögonblick som rörelsen initieras så sjunker friktionen till det man kallar rörelsefriktion. För segmentluckor så är det störst last på lagret när luckan är stängd mot tröskeln och bär full vattenlast, en start av lyftmanöver från stängd lucka blir alltså det dimensionerande lastfallet.

Friktionsmotståndet beror av ytfinhet på glidytorerna samt smörjfilmens bärighet. Avsaknad av en smörjande film, skador i glidytan eller främmande partiklar i smörjmedlet ökar friktionen. De mest sannolika orsakerna till ett lagerhaveri är därmed kontaminering av smörjmedlet, avsaknad av smörjmedel, inträngande smuts/vatten och korrosion på lagertappen.

Utskovsluckor manövreras generellt väldigt sällan och står därmed under långa perioder i stängt läge med full vattenlast på lagringarna. Den smörjfilm som skall finnas mellan glidytorerna riskeras därför att tryckas från det högst belastade området till de ytor som har ett lägre yttryck. När nytt smörjmedel tillförs tenderar det att välja lättaste vägen i lagret och hamnar då i den lägst belastade delen av lagringen. Hur smörjspåren är placerade i lagret är därför viktigt för att säkerställa en god funktion. Det är brukligt att man om möjligt smörjer lagren samtidigt som man manövrerar utskovsluckan för att ökar möjligheten för smörjmedlet att tränga in mellan de belastade glidytorerna i lagringen.



Figur 2.1 Belastningen (yttrycket) i ett lager

För segmentluckor i intag så är förutsättningarna annorlunda. Då luckan normalt står i ett öppet och lågt belastat läge kan smörjmedlet enklare tränga in mellan de glidytor som sedan belastas när luckan har fällts. I gengäld så är det vanligt att lagringen till dessa luckor är placerad under vatten i flödet till aggregatet. Lagringen är därmed utsatt för vatten och inträngande partiklar. Lagringar till intagsluckor smörjs med fördel innan fällning.

2.3 FOLSOM DAM HAVERIET

Den 17 juli år 1995 havererade en segmentlucka vid Folsom dam i Kalifornien, till följd av ökad friktion i ett lager så blev påfrestningen i luckbenet för hög och det vek sig. Efterföljande utredningar visade att det hade uppstått korrosion på lagertappens yta vilket ökade friktionsmotståndet. En trolig orsak till detta var att man av kostnadsskäl hade minskat underhåll och smörjning samt att man av miljöskäl bytt till ett miljövänligare fett som inte var vattenbeständigt. Man fann även att luckbenen var något försvagade av korrosion framförallt i fack där fukt och skräp hade ansamlats. Denna försvagning bedömdes dock endast ha en mindre påverkan för haveriet.

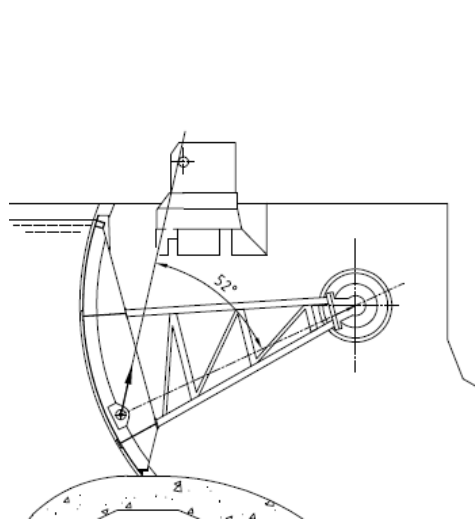


Figur 2.2 Haveri av segmentlucka vid Folsom dam Kalifornien 1995.

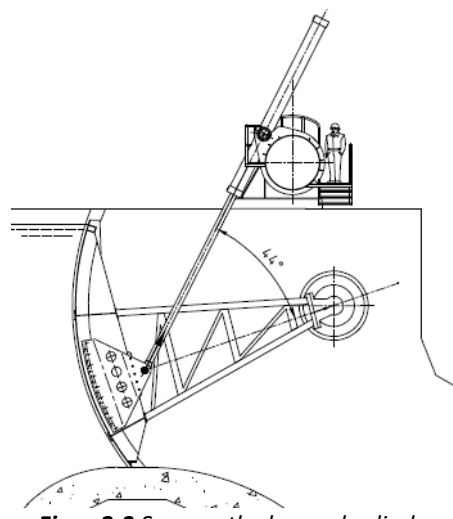
2.4 BYTE AV LUCKSPEL

Riktlinjerna i RIDAS föreskriver att lyfttrustningen för utskovsluckor skall dimensioneras med en säkerhetsfaktor 1,25 gånger den dimensionerande lyftkraften. När detta tillämpas för segmentluckor så bör man även beakta luckans hållfasthet. Det är vanligt förekommande att man inom dammsäkerhetshöjande-projekt byter från kuggstångspel till hydraulisk lyftcylinder, ombyggnaden kan medföra att påkänningarna vid manövrering av luckan förändras. Dels genom att lyftkapaciteten ökar och att infästningspunkt och lyftkraftens riktning förändras.

Om man installerar en centralt placerad hydraulcylinder fäst på en rörbalk nedströms luckan bör man beakta att om lyftkraftens vinkel mot luckbenet minskar medför det att lagerbelastningen vid öppningsögonblicket ökar.



Figur 2.2 Segmentlucka med kuggstångslyft.

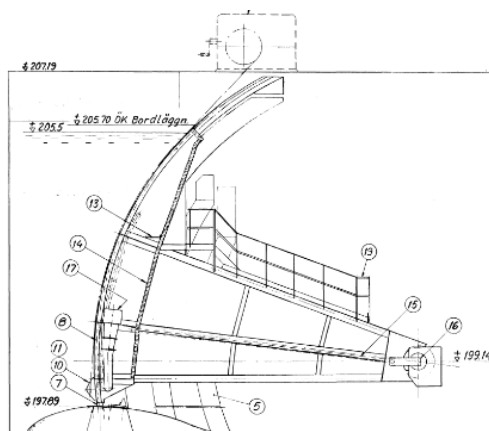


Figur 2.3 Segmentlucka med cylinder efter ombyggnad.

Förutom förändringarna i belastning av lagren så innebär en sådan ombyggnad även en förändring i laster på övriga delar av luckan vilket bör kontrolleras med nya beräkningar.

2.5 HÖJNING AV DÄMNINGEN

Det finns dammanläggningar där man i efterhand har höjt dämningen jämfört med den ursprungliga nivån, detta i syfte att öka produktionen. Om utskovskapaciteten redan har varit tillräckligt så har man behållit luckorna och gjutit på tröskeln motsvarande höjd. För segmentluckor så innebär detta att lagercentrum hamnar på en lägre nivå under magasinsytan och därmed riskerar att överspolas vid större tappningar, se bilder nedan.



Figur 2.4 Lucklagrets position efter tröskelhöjning



Figur 2.5 Överspolning av lucklager

Ombyggnationen medför ett antal risker för lagringens funktion som bör beaktas.

- Ökad risk för inträngande vatten och smuts i lagerytan, speciellt om den ursprungliga lagringen inte var konstruerad med tätningar för att stå under vatten.
- Smörjmedlet kan spolats bort.
- Det kan uppstå vibrationer som vid långvarig tappning kan skada lagerytorna.
- Det är svårt att smörja lagren under drift och att uppfatta eventuella missljud vid manövrering.

3 Säkerhetsfunktioner mot lagerhaveri på segmentluckor

3.1 PERIODISK TILLSYN

RIDAS föreskriver att anläggningsägaren skall tillämpa ett tillsynsprogram på dammanläggningen med periodiska rondningar, inspektioner och funktionsprov för avbördningsanordningar. Funktionsprov rekommenderas att genomföras minst årligen. Vid manövreringen finns det möjlighet att kontrollera för tecken på lagerproblem, dessa tecken kan då vara:

- Stumt motstånd i smörjsprutan när nytt fett skall tillföras kan innebära att fettet i ledningar eller nippel har bekat ihop. Inget nytt smörjmedel når då fram till glidytor.
- Lagerknarr eller missljud när luckan öppnar, det krävs då att en person står vid lagret när rörelsen startar.

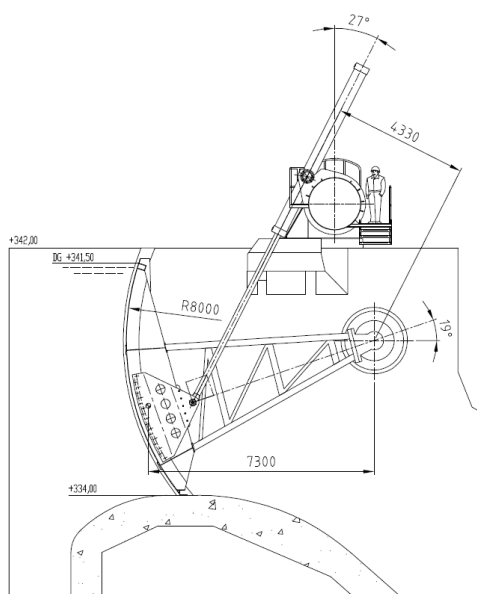
3.2 MANÖVERKRAFTER

3.2.1 Hydrauliska lyftspel

Om luckan är försedd med ett hydrauliskt lyftspel så kan manöverkraften avläsas i hydraultrycket, ett förhöjt öppningstryck kan då vara en indikation om ökande friktionsmotstånd i lagringen.

För att undersöka detta så genomfördes beräkningar av den teoretiska manöverkraften för två olika segmentluckor.

Exempel 1: Ytutskovslucka 14 x 7,5 m (B x H) med hydraulisk manövrering.

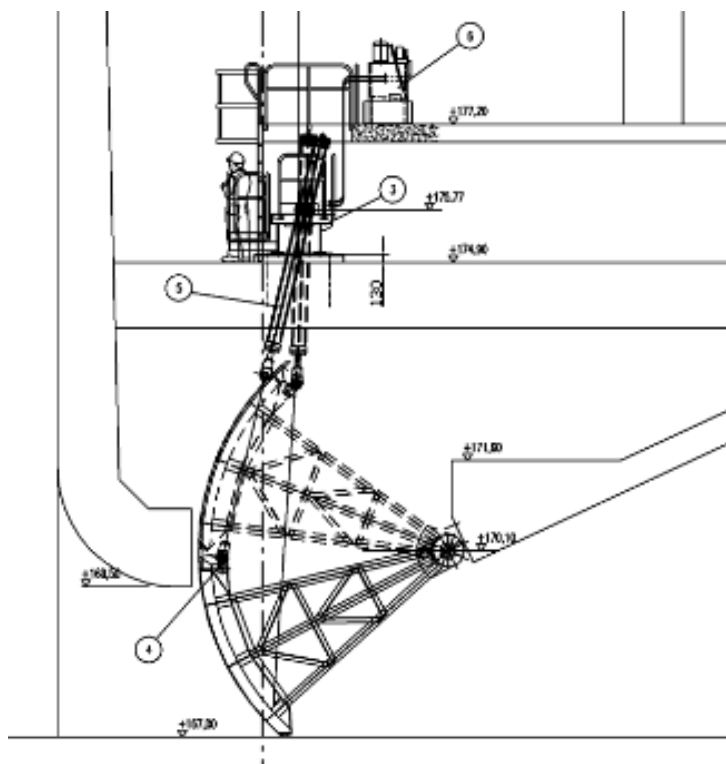


Figur 3.1 Segmentlucka i ett ytutskov.

Luckans bredd =	14 m	Luckans bredd =	14 m
Tröskeldjup =	7,5 m	Tröskeldjup =	7,5 m
Vattenlasten =	3938 kN	Vattenlasten =	3938 kN
Tätningfriktion:			
Tätningstans bredd =	0,06 m	Tätningstans bredd =	0,06 m
Friktionskoefficient =	0,9	Friktionskoefficient =	0,9
Tätningkraften =	2,25 kN/m	Tätningkraften =	2,25 kN/m
Momentarm för tätning =	8 m	Momentarm för tätning =	8 m
Tätningens längd =	16,4 m	Tätningens längd =	16,4 m
Tätningfriktionsmoment =	266 kNm	Tätningfriktionsmoment =	266 kNm
Lagerfriktion:			
Friktionskoefficient =	0,15	Friktionskoefficient =	0,6
Lucklagrets radie =	0,35 m	Lucklagrets radie =	0,35 m
Lagerfriktionsmoment =	207 kNm	Lagerfriktionsmoment =	827 kNm
Egenvikt:			
Luckans vikt =	33 000 kg	Luckans vikt =	33 000 kg
Momentarm för egenvikt =	7,3 m	Momentarm för egenvikt =	7,3 m
Moment av egenvikt =	2 409 kNm	Moment av egenvikt =	2 409 kNm
Erfodrade manöverkrafter			
Momentarm för lyft =	4,33 m	Momentarm för lyft =	4,33 m
Teoretisk lyftkraft =	665 kN	Teoretisk lyftkraft =	809 kN
Cylinder diameter =	360 mm	Cylinder diameter =	360 mm
Kolv diameter =	180 mm	Kolv diameter =	180 mm
Hydraultryck lyft =	87 Bar	Hydraultryck lyft =	106 Bar

I detta fall så medförde en fyrfaldig ökning av lagerfriktionen, från 0,15 till 0,6 en ökning av lyftkraft och hydraultryck med faktorn 1,2.

Exempel 2: Bottenutskovslucka 6 x 2,75 m (B x H) barlastad med betong. Luckan manövreras med hydraulcylinder.



Figur 3.2 Segmentlucka i ett bottenutskov.

Luckans bredd =	6 m	Luckans bredd =	6 m
Luckans höjd =	2,75 m	Luckans höjd =	2,75 m
Tröskeldjup =	18,6 m	Tröskeldjup =	18,6 m
Vattenlasten =	2842 kN	Vattenlasten =	2842 kN
Tättningsfriktion:		Tättningsfriktion:	
Tättningsytans bredd =	0,06 m	Tättningsytans bredd =	0,06 m
Friktionskoefficient =	0,9	Friktionskoefficient =	0,9
Tättningskraften =	5,58 kN/m	Tättningskraften =	5,58 kN/m
Momentarm för tätning =	4,1 m	Momentarm för tätning =	4,1 m
Tätningens längd =	6,4 m	Tätningens längd =	6,4 m
Tättningsfriktionsmoment =	132 kNm	Tättningsfriktionsmoment =	132 kNm
Lagerfriktion:		Lagerfriktion:	
Friktionskoefficient =	0,15	Friktionskoefficient =	0,6
Lucklagrets radie =	0,1 m	Lucklagrets radie =	0,1 m
Lagerfriktionsmoment =	156 kNm	Lagerfriktionsmoment =	623 kNm
Egenvikt:		Egenvikt:	
Luckans vikt =	20 800 kg	Luckans vikt =	20 800 kg
Momentarm för egenvikt =	3,1 m	Momentarm för egenvikt =	3,1 m
Moment av egenvikt =	645 kNm	Moment av egenvikt =	645 kNm
Erfodrade manöverkrafter		Erfodrade manöverkrafter	
Momentarm för lyft =	3,5 m	Momentarm för lyft =	3,5 m
Teoretisk lyftkraft =	266 kN	Teoretisk lyftkraft =	400 kN
Cylinder diameter =	180 mm	Cylinder diameter =	180 mm
Kolv diameter =	80 mm	Kolv diameter =	80 mm
Hydraultryck lyft =	131 Bar	Hydraultryck lyft =	196 Bar

I detta fall så medförde en fyrfaldig ökning av lagerfriktionen, från 0,15 till 0,6 en ökning av lyftkraft och hydraultryck med faktorn 1,5.

Beräkningarna indikerar att en ökad friktion i lucklager teoretiskt kan avläsas i en förhöjd lyftkraft, vilket dock även kan bero av andra faktorer som varierande magasinsnivå, ökad friktion i tätningar eller intern friktion i hydraulsystemet som uppstår vid låg temperatur på hydraulmediet. Dessutom är det två lager som bär luckan och statusen för dessa kan inte förutsättas vara lika.

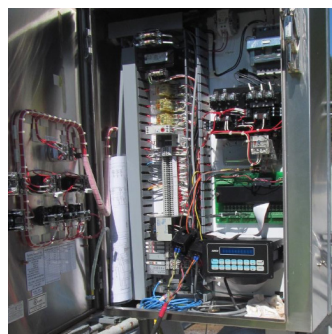
Sammanlagt är metoden inte tillräckligt tillförlitlig för att säkerställa status för ett lucklager.

3.2.2 Vajer och kuggstängspel

För att mäta lyftkraften i dessa spel så kan man mäta motorströmmen eller vridningen i drivaxeln vid manövrering.



Figur 3.3 Mätning av vridning i spelaxel.



Figur 3.4 Mätning av motorström.

För bägge dessa metoder är svagheten lika som för att mäta hydraultrycket. Ett ökat friktionsmotstånd i lagret bör ge en indikation på ökade mätvärden men det finns ett flertal andra faktorer som även dessa kan medföra förändringar av mätvärden. Exempelvis temperatur i växellåda, startströmmar och friktioner i elmotorn, tättningsfriktioner m.m.

3.3 BEGRÄNSNING AV MANÖVERKRAFTER

Segmentluckor är ofta utrustade med skydd mot överbelastning av spelutrustningen. Man kan dock inte förutsätta att luckbenen är dimensionerade för den belastning de utsätts för vid ett lagerhaveri. För en segmentlucka som inte öppnar bör man vara försiktig med att höja hydraultrycket eller momentvakter eftersom en förhöjd lagerfriktion medför ökad belastning av luckbenen.

3.3.1 Kuggstångsspel

Luckor som manövreras med ett kuggstångsspel är vanligtvis försedda med fundamentbrytare. Brytaren är oftast placerad vid maskineriets infästning i betongen och bryter rörelsen om spelet lyfter från underlaget. Detta är endast ett skydd mot att böja kuggstången vid en stängning och har ingen funktion vid öppning av luckan.

Det förekommer att drivmaskineriet är utrustat med en momentbegränsning för att skydda spelet mot överbelastning vid öppning men dessa har inte tillräcklig noggrannhet för att säkerställa att de bryter innan luckbenen har skadats.

3.3.2 Lyftcylindrar

Oftast manövreras segmentluckor med en enkelverkande hydraulcylinder och luckan stänger då av egenvikten. Om luckan manövreras med en dubbelverkande cylinder skall aggregatet vara försett med en tryckbegränsare för motsvarande funktion som en fundamentbrytare. Den skyddar kolvstången mot att böjas vid stängning av luckan. Vid öppning av luckan så är hela det inställda aggregatstrycket tillgängligt.

3.3.3 Linspel

Det förekommer att drivmaskineriet för linspel är utrustat med momentbegränsning för att skydda spelet mot överbelastning vid öppning motsvarande som på kuggstångsspel. Vid stängning finns det ingen risk att överbelasta spelet eftersom ingen tryckkraft kan överföras via linan.

4 Metoder för lagerövervakning inom industrin

Friktionen i ett lager medför att rörelseenergi omvandlas till värme samt vibrationer och ljud. Inom industrin finns både handhållna instrument för periodisk övervakning vid rondning och system för permanent installation med kontinuerlig övervakning



Figur 4.1 Handhållen vibration och temperaturmätare



Figur 4.2 Sensor för kontinuerlig övervakning med trådlös överföring

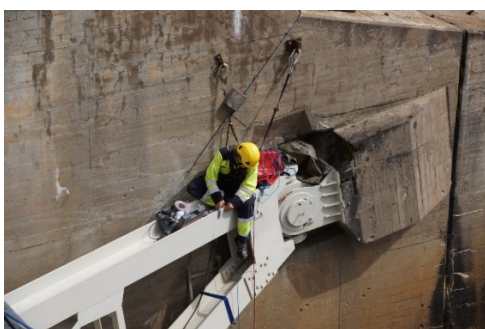
Systemen för övervakning av lager bygger på att man mäter temperaturer och vibrationer. Dessa system är anpassade för att fungera när man exempelvis har lagrat en maskinaxel eller liknande komponent som roterar kontinuerligt med ett högt varvtal. Ett lucklager för en segmentlucka har en så långsam rotationshastighet att värmeutvecklingen blir omätbar i förhållande till omgivningens påverkan av exempelvis solljus. Vattnet som strömmar under luckan skapar vibrationer som fortplantas i luckan och därmed försvårar att mäta de vibrationer som kan härledas till friktion i lucklagret.

Dessa system för övervakning är därför ej lämpliga för dammluckor.

5 Metoder för lagerövervakning inom vattenkraft

5.1 Töjningsgivare på luckben

I Norge har man sedan 1998 utarbetat en metod att mäta utböjningen i luckbenet vid öppningsmanöver av segmentluckor. Metoden bygger på att man installerar två töjningsgivare på respektive luckben nära lagret. En givare på ovansida av luckbenet som mäter tryckspänningarna i huvudriktningen och en givare på undersidan som mäter dragspänningarna i samma riktning.



Figur 5.1 Montering av töjningsgivare.



Figur 5.2 Töjningsgivare på luckben.

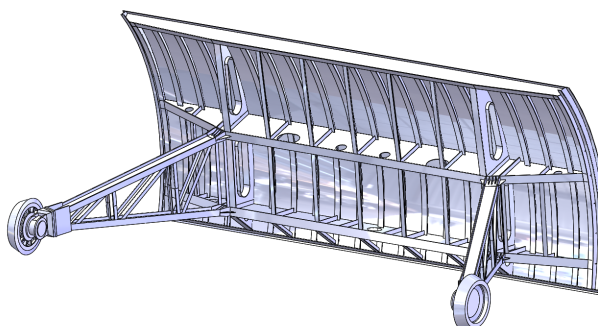
Genom att man mäter både tryck och dragspänningen så kan man beräkna den tvärkraft som vid manövrering uppstår i luckbenet till följd av friktionen i lagret.

5.1.1 FEM-Analys

För att undersöka den teoretiska skillnaden på spänningarna i luckbenet genomfördes FEM-analyser för två olika segmentluckor.

Exempel 1:

Utskovsbredd: 14,4 m
Vattendjup: 6,25 m
Radie: 7,0 m
Luckvikt: 30 ton
Lucklager: Ø300 mm



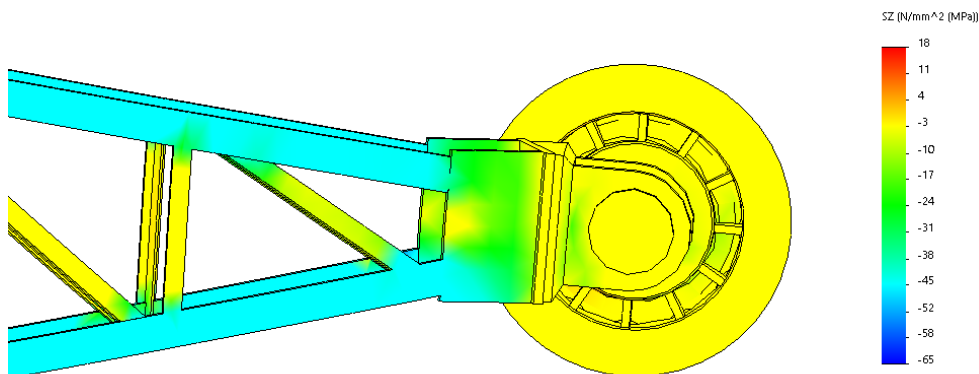
Figur 5.3 Segmentlucka för FEM-analys

Vid beräkning av manöverkrafter för denna lucka så visade det sig att inverkan från lagerfriktionen är mindre än för den luckan som beräknades i kapitel 3.2

Analysen genomfördes för fyra olika lastfall:

Lastfall 1

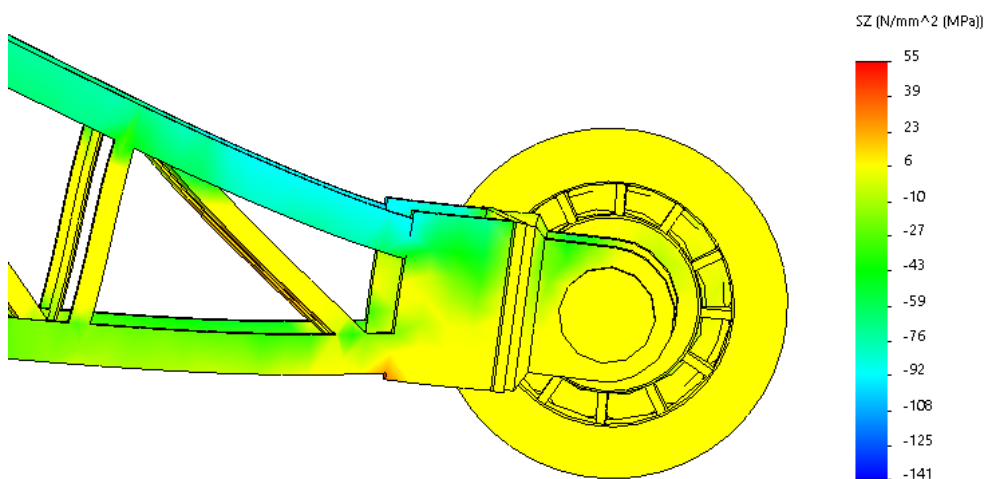
Vattenlast 6,25 mvp mot bordläggningen samt egenvikt när luckan står på tröskeln.



Figur 5.4 Vid enbart vattenlast är spänningarna i Z-riktning (vattenriktningen) ca -45 MPa d.v.s. tryckspänningar både i över och underkant på luckbenet.

Lastfall 2

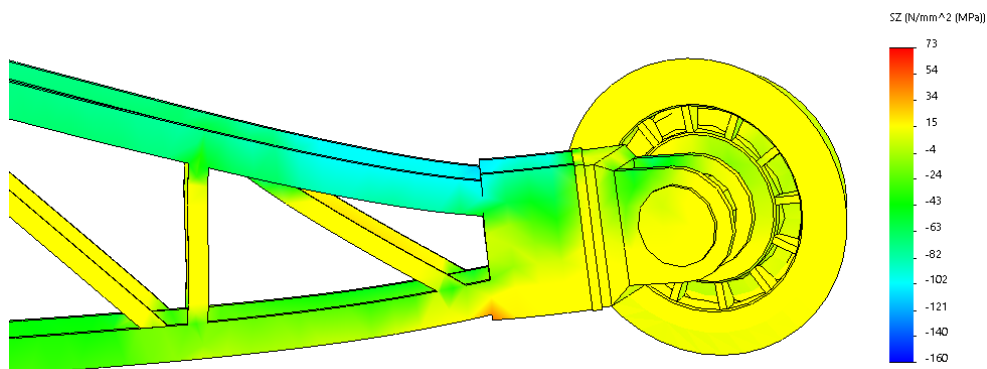
Vattenlast 6,25 mvp mot bordläggningen samt egenvikt när luckan lyfts med kraften 310 kN (lagerfriktion 0,15) med lyftvagnar infästa i nedre hörnen på bordläggningens uppströmssida.



Figur 5.5 Spänningarna i Z-riktning är ca -90 MPa (tryckspänning) i överkant på luckbenet och ca 10 MPa (dragspänning) i underkant.

Lastfall 3

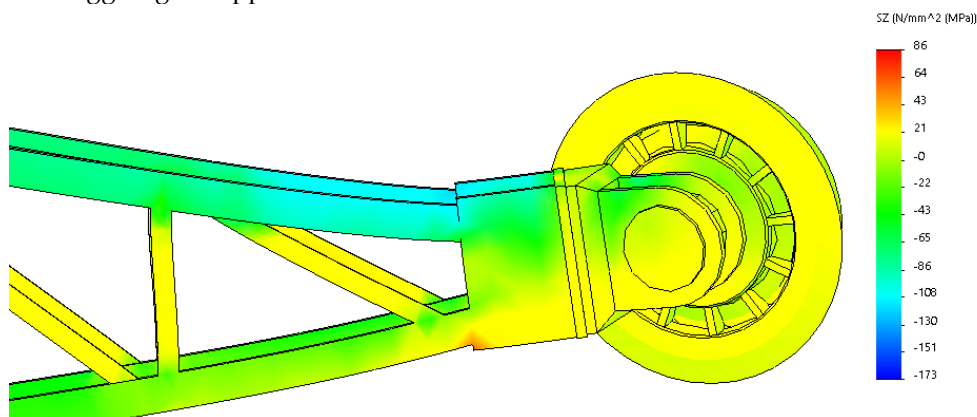
Vattenlast 6,25 mvp mot bordläggningen samt egenvikt när luckan lyfts med kraften 335 kN (lagerfriktion 0,6) med lyftvagnar infästa i nedre hörnen på bordläggningens uppströmssida.



Figur 5.6 Spänningarna i Z-riktning är ca - 100 MPa (tryckspänning) i överkant på luckbenet och ca 15 MPa (dragspänning) i underkant.

Lastfall 4

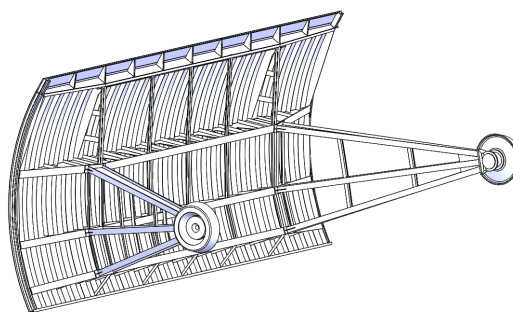
Vattenlast 6,25 mvp mot bordläggningen samt egenvikt när luckan lyfts med kraften 352kN (lagerfriktion 0,9) med lyftvagnar infästa i nedre hörnen på bordläggningens uppströmssida.



Figur 5.7 Spänningarna i Z-riktning är ca - 110 MPa (tryckspänning) i överkant på luckbenet och ca 20 MPa (dragspänning) i underkant.

Exempel 2:

Utskovsbredd: 20,42 m
 Vattendjup: 8,78 m
 Radie: 9,0 m
 Luckvikt: 64 ton
 Lucklager: Ø450 mm

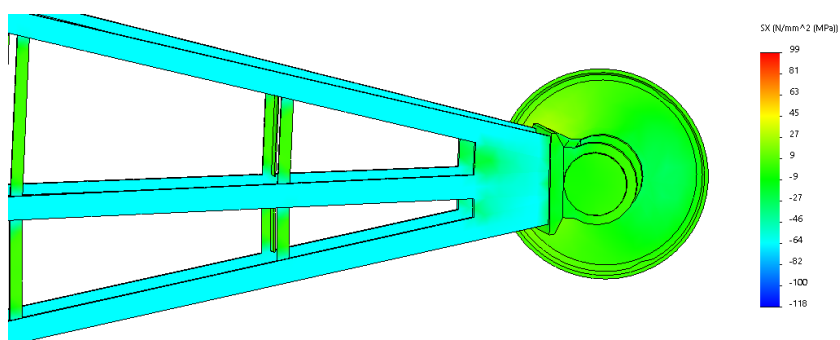


Figur 5.8 Segmentlucka för FEM-analys

Analysen genomfördes även här för fyra olika lastfall:

Lastfall 1

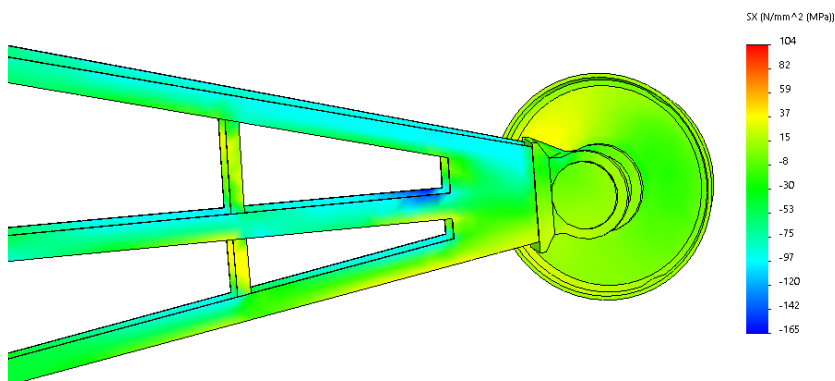
Vattenlast 8,78 mvp mot bordläggningen samt egenvikt när luckan står på tröskeln.



Figur 5.9 Vid enbart vattenlast är spänningarna i X-riktning (vattenriktningen) ca - 65 MPa d.v.s. tryckspänningar både i över och underkant på luckbenet.

Lastfall 2

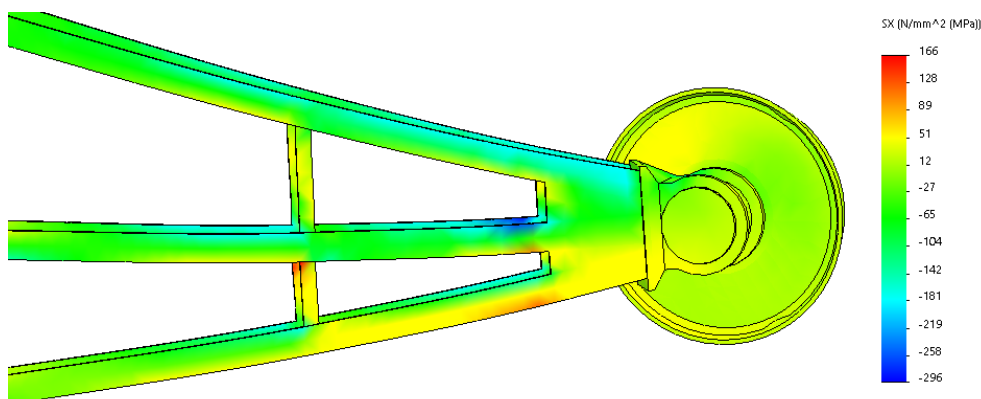
Vattenlast 8,78 mvp mot bordläggningen samt egenvikt när luckan lyfts med kraften 474 kN (lagerfriktion 0,15) med lyftvagnar infästa i nedre hörnen på bordläggningens uppströmssida.



Figur 5.10 Spänningarna i X-riktning är ca - 100 MPa (tryckspänning) i överkant på luckbenet och ca 40 MPa (dragspänning) i underkant.

Lastfall 3

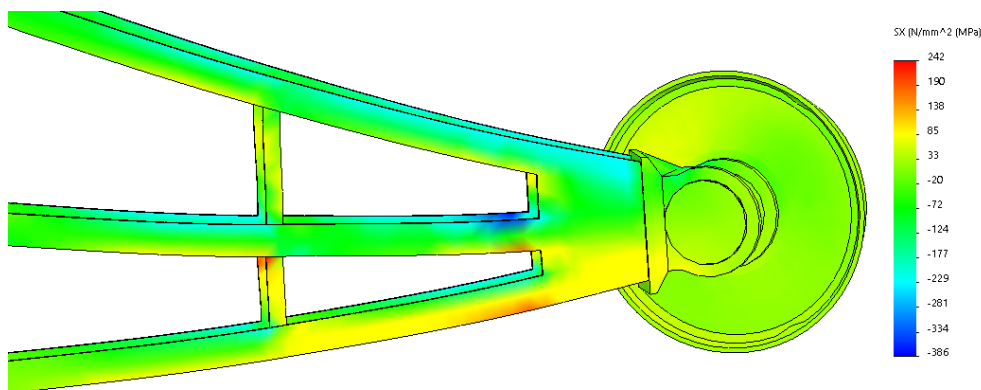
Vattenlast 8,78 mvp mot bordläggningen samt egenvikt när luckan lyfts med kraften 553 kN (lagerfriktion 0,6) med lyftvagnar infästa i nedre hörnen på bordläggningens uppströmssida.



Figur 5.11 Spänningarna i X-riktning är ca - 180 MPa (tryckspänning) i överkant på luckbenet och ca 120 MPa (dragspänning) i underkant.

Lastfall 4

Vattenlast 8,78 mvp mot bordläggningen samt egenvikt när luckan lyfts med kraften 605kN (lagerfriktion 0,9) med lyftvagnar infästa i nedre hörnen på bordläggningens uppströmssida.



Figur 5.12 Spänningarna i X-riktning är ca - 230 MPa (tryckspänning) i överkant på luckbenet och ca 150 MPa (dragspänning) i underkant.

Sammanfattning av FEM-Analyser

Analyserna indikerar att de tryck och dragspänningar som vid manöver uppstår vid luckbenets infästning mot lagret kan användas för att övervaka den friktion som finns i lagret. Stora luckor med slanka luckben bör ge en tydligare indikation eftersom spelets lyftkraft där ger större utböjning.

6 Exempel på lagerövervakning för segmentluckor

Inom denna studie har tre olika metoder hittats vilka samtliga använder en metod att med töjningsgivare på luckbenen mäta deformationen vid manövrering. Med hjälp av en 3D-modell kan man sedan med FEM-analys räkna fram en friktionskoefficient för respektive lager.

6.1 EXEMPEL 1

Norconsult AS i Norge har genomfört mätningar på 50 olika segmentluckor. Resultatet några av dessa mätningar redovisas i tabellen nedan.

Presentation of results

Table 1. Key data of gates measured and results

W x H		Bearing Shaft	Lubr. system	Friction coefficient		Condition class	Prior lubrication
m	(ft)			Nominal	Measured Left / Right		
16 x 4,75	(52.5 x 15.5)	B*/S	Selflub.	0,1	0,22 / 0,29	2 / 2	N/A
16 x 4,75	(52.5 x 15.5)	B*/S	Selflub.	0,1	0,28 / 0,28	2 / 2	N/A
16 x 4,75	(52.5 x 15.5)	B*/S	Selflub.	0,1	0,22 / 0,22	2 / 2	N/A
15 x 5,45	(49.2 x 17.9)	B/S	Grease	0,2	0,10 / 0,11	1 / 1	Yes
15 x 5,45	(49.2 x 17.9)	B/S	Grease	0,2	0,08 / 0,10	1 / 1	Yes
15 x 9,25	(49.2 x 30.3)	B/S	Grease	0,15	0,16 / 0,16	1 / 1	Yes
20 x 6,3	(65.6 x 20.7)	B/S	Grease	0,15	0,40 / 0,16	3 / 1	Yes
20 x 4,5	(65.6 x 14.8)	B*/PS	Selflub.	0,1	0,11 / 0,12	1 / 1	N/A
20 x 4,5	(65.6 x 14.8)	B*/PS	Selflub.	0,1	0,25 / 0,15	2 / 1	N/A
17 x 5	(55.8 x 16.4)	B*/PS	Selflub.	0,1	0,71 / 0,58	3 / 3	N/A
17 x 5	(55.8 x 16.4)	B*/PS	Selflub.	0,1	0,43 / 0,42	3 / 3	N/A
15 x 5,2	(49.2 x 17.1)	B/S	Grease	0,2	0,08 / 0,09	1 / 1	Yes
8 x 2,8	(24.2 x 9.2)	B/SS	Selflub.	0,1	0,35 / 0,25	2 / 2	N/A
20 x 8	(65.6 x 24.2)	B/PS	Selflub.	0,1	0,15 / 0,10	1 / 1	N/A
13 x 4	(42.7 x 13.1)	B/S	Grease	0,2	0,75 / 0,50	3 / 3	No
13 x 4	(42.7 x 13.1)	B/S	Grease	0,2	0,45 / 0,45	3 / 3	No
11,5 x 5	(37.7 x 16.4)	B/S	Grease	0,2	0,15 / 0,14	1 / 1	Yes
11,5 x 5	(37.7 x 16.4)	B/S	Grease	0,2	0,14 / 0,13	1 / 1	Yes
11,5 x 5	(37.7 x 16.4)	B/S	Grease	0,2	0,12 / 0,09	1 / 1	Yes
13 x 4	(42.7 x 13.1)	B/S	Grease	0,2	0,55 / 0,40	3 / 3	Yes
13 x 4	(42.7 x 13.1)	B/S	Grease	0,2	0,22 / 0,35	2 / 2	Yes
12 x 6,3	(39.4 x 20.7)	DU/PS	Selflub.	0,15	0,18 / 0,20	1 / 1	N/A
12 x 6,3	(39.4 x 20.7)	DU/PS	Selflub.	0,15	0,17 / 0,19	1 / 1	N/A
17 x 5	(55.6 x 16.4)	B*/PS	Selflub.	0,1	0,71 / 0,58	3 / 3	N/A
17 x 5	(55.6 x 16.4)	B*/PS	Selflub.	0,1	0,43 / 0,42	3 / 3	N/A
13 x 4	(42.7 x 13.1)	C/SS	Selflub.	0,15	0,09 / 0,13	1 / 1	N/A

B = Bronze, S = Carbon steel, PS = Chrome plated carbon steel, SS = Stainless steel, DU = Glacier DU bushing, C = composite. * Oiles 500 w/SL4 lubricant plugs.

Figur 6.1 Tabell beräknade friktionskoefficienter i lucklager

I ett av fallen som är markerat genomförde man en ombyggnad av lagret.

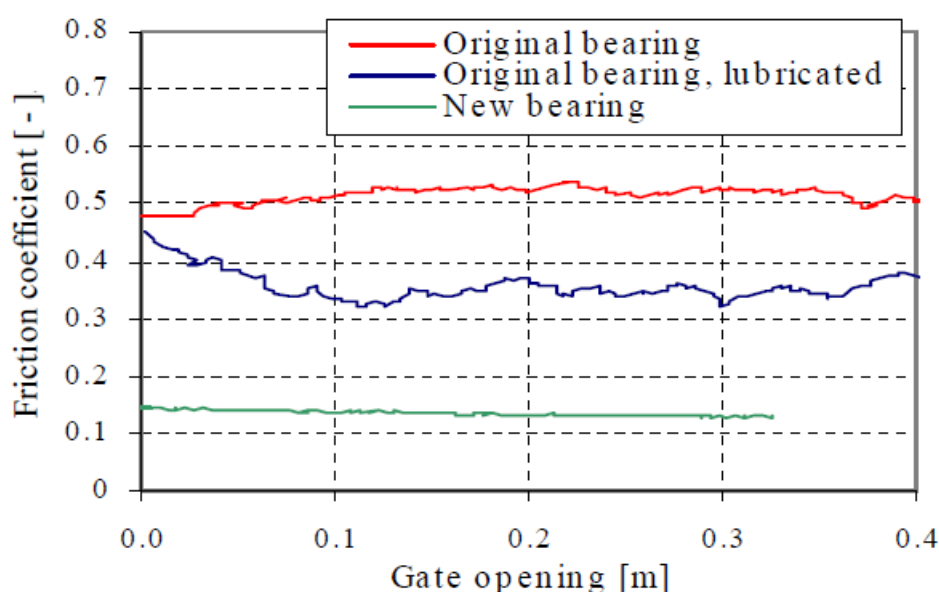
Segmentluckan hade vid första mättillfället inte manövrerast på ett år och friktionskoefficienterna var då 0,75 vid den första öppningen. Vid andra öppningen så sjönk de till 0,6 och 0,5 för vänster respektive höger lager och vid därpå följande öppningar så var koefficienterna i samma nivå.

Man genomförde därefter flera mätningar under ett års tid med intensifierad lagersmörjning och manövrering av luckan. Friktionskoefficienterna sjönk då till

0,4 respektive 0,35 under rörelse men startfriktionen låg kvar på ungefär samma nivå som för den osmorda lagringen.

Till följd av mätningarna beslutade man att torrlägga utskovet för att demontera och inspektera lagringarna. Det visade sig då att ytan på bronslagret var skadad med repor och att axeltappen hade korrosionsskador. Man byggde om lagringen och installerade en axeltapp i rostfritt stål samt ett orkot-glidlager i kompositmaterial.

Efterföljande mätningar visade så låga friktionskoefficienter som 0,09 respektive 0,13. Se diagram nedan för jämförelse mellan de olika mättillfällena.



Figur 6.2 Lagerfriktion före och efter ombyggnad

Förutom att kurvorna för den ursprungliga lagringen visar en högre friktion så kan man även se att de är taggiga vilket antas bero av skadorna i glidytorna som skapar en ojämn friktion.

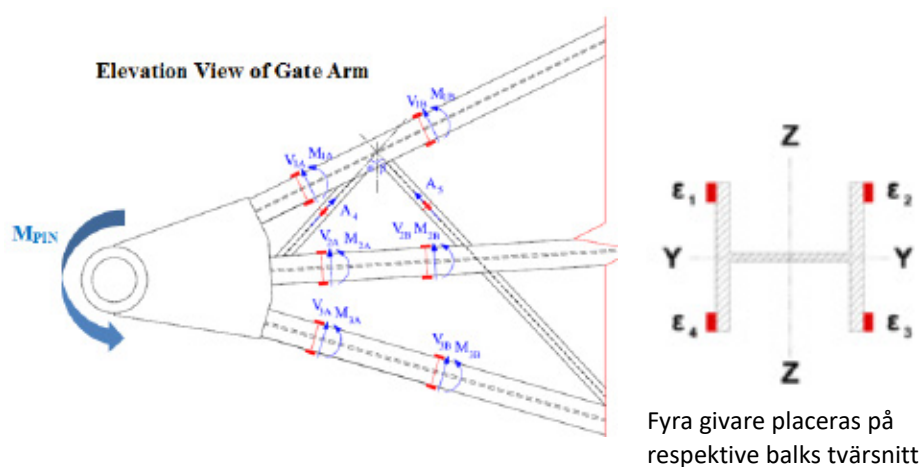
Anmärkningsvärt är även den låga friktion som uppmättes för kompositlagren. Då detta är en lagertyp som det finns liten erfarenhet från som lucklager i Sverige, men som ofta används i Norge.

Man har genomfört nya mätningar under 2020 vilka ännu inte har utvärderats. Resultatet därifrån torde ge en bra referens för kompositlagrens beständighet som lucklager, då dessa nu har varit i drift i ca 20 år.

6.2 EXEMPEL 2

I Colorado finns företaget Bridge Diagnostics Inc. (BDI) som arbetar med deformationsmätning inom flera olika områden som broar, byggnader, berg och järnväg. BDI har tagit fram ett likartat mätsystem med töjningsgivare som installeras på luckbenen, man uppger att man har genomfört mätningar på mer än etthundra olika segmentluckor i Nordamerika.

Systemet bygger på att man installerar mellan 24 och 36 stycken töjningsgivare per luckben vilket förefaller vara fler än i föregående exempel. Detta torde göra att noggrannheten i mätningarna blir bättre men montage och utvärdering mer komplicerat.

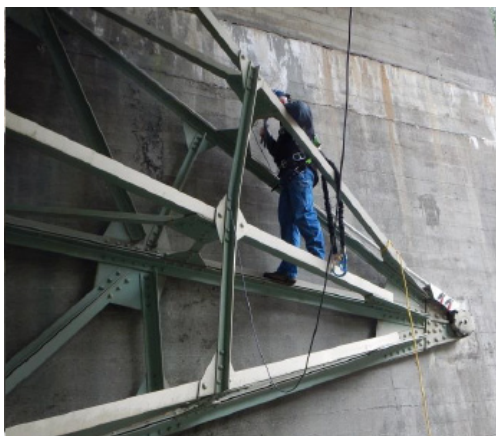


Fyra givare placeras på respektive barks tvärsnitt

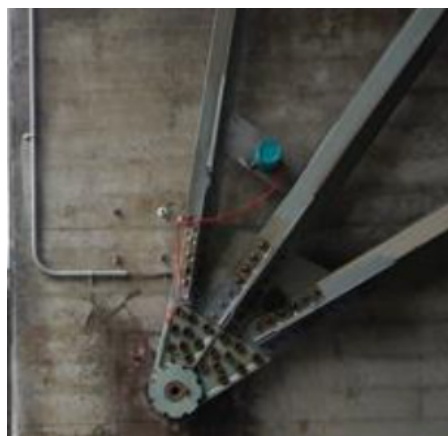
Figur 6.2 Placering av givare på luckben

6.3 EXEMPEL 3

Vid Diablo dam i Washington state genomfördes mätningar av friktionen i lucklagren på en segmentlucka med anledning att man misstänkte risk för ett lagerhaveri. Luckbenen är på denna lucka en nitad fackverkskonstruktion och saknar därmed de bärande huvudbalkarna som tidigare beskrivna metoder nyttjar för att mäta töjningen. Man monterade därför en ca 1,8 m lång stålstav utefter luckbenet i vilken man mätte töjningen.



Figur 6.3 Luckbenets konstruktion



Figur 6.4 Mätutrustningen monterad

Analysen av mätningarna styrkte misstankarna, friktionskoefficienterna uppmättes då till 0,9 på vänster lager och 0,6 på höger. Man gick därmed vidare med att demontera lagringarna. Lagertappen visade sig i detta fall vara korroderad med upp till ca 0,6 mm djupa gropar och repor i glidytan på bronslagret.



Figur 6.5 Den skadade lagertappen



Figur 6.6 Lucklagret

Lagertapparna bearbetades ner och nya lager tillverkades med flera smörjpunkter och förbättrad placering av smörjspåren.

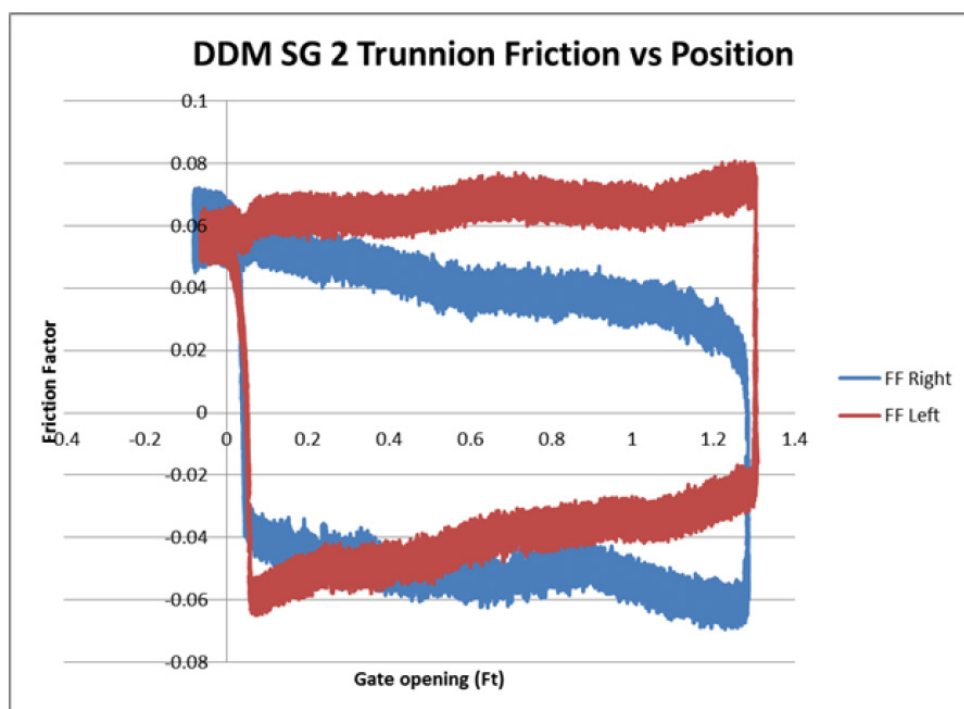


Figur 6.7 Renoverad lagertapp



Figur 6.8 Nyttillverkade lucklager

Efter renoveringen genomfördes motsvarande mätningar varpå friktionskoefficienterna var under 0,1 för bägge lagren.



Figur 6.9 Uppmätta friktioner efter renovering av lucklager.

7 Tillämpning av lagerfriktionsmätning

I föregående kapitel redovisades tre metoder för att kontrollera friktionen i glidlager på segmentluckor. Metoderna är snarlika och bygger på att mäta töjningar i luckbenet vid manövrering av luckan. Nedan belyses några frågeställningar med betydelse för en eventuell fortsättning av studien med praktiska försök.

7.1 NÄR KAN DET VARA LÄMPLIGT ATT GENOMFÖRA EN MÄTNING?

Man kan tänka sig några olika fall där det kan vara lämpligt att genomföra praktiska försök med mätningar.

1. Vid en större luckrenovering där man har planerat att inspektera och rengöra eller renovera lucklagren. Fördelaktigast skulle då vara om man kan genomföra mätningar före och efter renoveringen.
2. Man kan även tänka sig att man vid nykonstruktion eller en större ombyggnad förbereder luckbenen med infästningspunkter för trådtöjningsgivare. Man skulle då kunna genomföra mätningar när den har tagits i drift och sedan återkomma för uppföljande mätningar några år senare.
3. Om det för en lucka finns indikationer på höga lagerfriktioner på en lucka, som ökad lyftkraft eller missljud. Det är tämligen vanligt att dammar är bestyckade med två eller flera identiska utskovsluckor. Det kan då vara värdefullt att genomföra mätningar på flera luckor om det finns misstanke om lagerproblem på en av luckorna.

7.2 HUR KAN GENOMFÖRDA MÄTNINGAR ANVÄNDAS/TOLKAS?

Metoderna bygger på att man mäter töjningen i luckbenet och sedan med en FEM analys i en 3D-modell räknar fram vilken lagerfriktion som krävs för att den uppmätta töjningen skall uppstå. Det är vanskligt att säga en generell kritisk nivå för lagerfriktionskoefficienten eftersom spelmaskineriet lyftkapacitet och luckbenens bärighet varierar på olika luckor. Med den 3D-modell som används för beräkning av lagerfriktionen kan man räkna fram en kritisk nivå när luckbenet blir för högt belastat.

Som visades med figur 6.2 i föregående kapitel med den ”taggiga” kurvan så kan en stor variation i friktionen vid manövreringen tyda på skador i lagerytan. Likaså kan en allt för stor skillnad mellan startfriktionen och rörelsefriktionen vara en indikation på lagerproblem.

7.3 VAD KOSTAR DET ATT GÖRA EN MÄTNING?

Kostnaden varierar utifrån luckan komplexitet, geografiskt läge och vald metod. Norconsult AS i Norge uppger att den totala kostnaden för en lucka ligger på ca 100 000 – 200 000 kr. Kostnaden innefattar både de praktiska mätningarna på plats samt efterföljande beräkningar och analys. Genomför man mätningar på flera identiska luckor så blir kostnaden för beräkningar och analys billigare för

efterföljande luckor. Likaså om man genomför en efterföljande mätning på en lucka som redan tidigare har beräknats och analyserats.

De övriga två av de redovisade metoderna kommer från företag i Nordamerika och kan nog därför antas vara kostsammare med beaktande av resor med mera. Någon prisuppskattning har inte begärts från dessa.

Sökord

Folsom dam

Glidlager

Hydraulisk

Lagerfriktion

Lagerhaveri

Lagerövervakning

Luckben

Lucklager

Lyftspel

Manöverkraft

Segmentlucka

Vajerspel

LAGERINBYGGNAD FÖR SEGMENTLUCKOR

En ökad reglering av vattenkraften och ett förändrat flöde genom klimatförändringar, gör att det är viktigt att bibehålla säkerheten kring avbördning i våra vattenkraftanläggningar.

Luckbenen är en svag del av konstruktionen i en segmentlucka. Med ett förhöjt friktionsvärde i ett lucklager blir benet utsatt för stora påkänningar. Förhöjd friktion i ett glidlager kan uppstå av skador i glidyterna, genom kontaminering av vatten och partiklar eller på grund av bristfällig smörjning. De inbyggda skyddssystem som vanligtvis förekommer på segmentluckor är dimensionerade för att skydda luckspelet mot överbelastning. Man kan inte förutsätta att luckbenen är dimensionerade för klara lyftspelets maxkapacitet om ett lager kärvar.

Ökande lagerfriktion medför en höjning av lyftkraften. Även parametrar som tätningsfriktion, vattennivå och mediatemperatur vid hydraulik påverkar lyftkraften. Dessutom är det två lagringar för en segmentlucka. Att övervaka lyftkraften räcker därför inte för att säkerställa konditionen på ett lager.

Här redovisas tre snarlika metoder där man monterat töjningsgivare på luckbenen och genom analys beräknat lagerfriktionskoefficienten. Metoden har bland annat tillämpats där det funnits indikationer på bristande funktion i lagringen. Mätningarna har genomförts både före och efter renovering av lagerinbyggnader och verifierat lägre friktioner efter renovering.

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