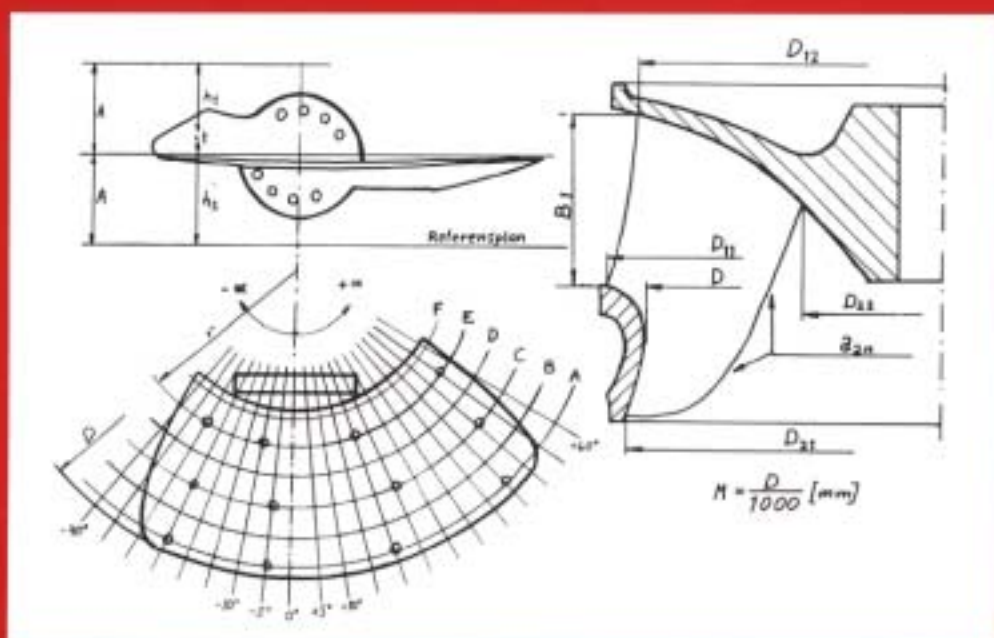


Kavitationsskador i vattenturbiner

Bedömningar och åtgärder

Elforsk Rapport 96:23



KAVITATIONSSKADOR I VATTENTURBINER

Bedömningar och åtgärder

Elforsk rapport 96:

Arbetsgrupp

Jan Deborg
Per-Gunnar Fällström
Åke Grahn
Evald Holmén
Alf Jonsson
JanErik Lindberg, projektledare
Hans Lindström
Jan Månsson

Vattenfall Hydropower AB
Konsult
Sydkraft Konsult AB
Evald Holmén Consulting
Vattenfall Utveckling AB
Vattenfall Energisystem AB
Vattenfall Utveckling AB
Graningeverken AB, Kraft

Arbetsgruppen tackar speciellt

Rune Sjöberg
Herman Lindqvist
Klas Wiberg

Kvaerner Turbin AB
Konsult
Vattenfall AB

INNEHÅLLSFÖRTECKNING

SAMMANFATTNING	1
SUMMARY	2
1. INLEDNING	3
1.1 Kavitationsfenomenet	3
1.2 Kavitationsskador	4
1.3 Ekonomi	7
2. BEDÖMNINGAR	9
2.1 Normer för garantitid	9
2.2 Bedömning under drifttiden	9
2.3 Besiktning och dokumentation	10
3. ÅTGÄRDER MOT KAVITATIONSSKADOR	13
3.1 Materialprovning i laboratorium	13
3.2 Metod- och svetsbarhetsprovning	18
3.3 Formförbättring	21
3.3.1 Kavitationsskador	21
3.3.2 Utloppskavitation	21
3.3.3 Inloppskavitation	23
3.4 Åtgärder i fält	24
3.4.1 Gejmåns kraftstation	24
3.4.2 Edensforsens kraftstation, G2	26
3.4.3 Forsmo kraftstation, G4	27
3.4.4 Andra kraftstationer	28
4. DETEKTERING AV KAVITATIONSEROSION	31
4.1 Litteraturstudie	31
4.1.1 Kavitationsegenskaperna, baserade på modellstudier	31
4.1.2 Kavitationsbuller	32
4.1.3 Vibrationsmätningar för detektering	32
4.1.4 Kavitationsskadeklocka för bättre driftstrategi	33
4.1.5 Författarnas slutsatser och rekommendationer	34
4.1.6 Projektgruppens kommentarer	34
4.2 Fältförsök	35
4.2.1 Utrustning från Accusonic	35
4.2.2 Utrustning från Vattenfall Utveckling AB	35
4.2.3 Slutsatser	37
5. SLUTSATSER OCH REKOMMENDATIONER	39
6. REFERENSER	41

APPENDIX 1: Mallar för skadeskisser

APPENDIX 2: Materialprovning i laboratorium

APPENDIX 3: Fältprov i Gejmån

APPENDIX 4: Fältprov i Edensforsen

APPENDIX 5: Fältprov i Forsmo

SAMMANFATTNING

Kavitation i turbiner orsakar underhåll och minskar vattenkraftens tillgänglighet och energiproduktion.

Genom prov i en utrustning som med hjälp av vibrator skapar kontrollerbar kavitation har olika material kunnat rangordnas ifråga om motståndskraft mot erosion. Polymera och keramiska material visade helt otillfredsställande förmåga att motstå kavitation. Bästa resultat bland de metalliska materialen för reparation erhöles med elektroderna Stellite 21, Hydroloy HQ 913 och Castolin 9080. De visade i denna laboratoriemiljö 20-50 gånger lägre skadehastighet än referenselektroden OK 63.30.

Fältprov av några elektroder har utförts i tre anläggningar, Gejmnå med Francisturbin, Edensforsen G2 och Forsmo G4 med Kaplan turbiner. Resultaten från dessa prov bekräftar att intervallet mellan reparationer av de skador som kavitation orsakat kan ökas. Med hjälp av de bästa elektroderna kan intervallen väntas bli minst 5 gånger dem som gällt med referenselektroden OK 63.30. Denna har ofta använts vid tillverkning av löphjul och vid reparation av skador.

Det har konstaterats att skovelformen har avgörande betydelse för kavitationserosionen hos vattenturbiner. Resultat motsvarande dem för de bästa elektroderna har kunnat nås i Gejmnå även med OK 63.30, enbart genom förbättring av löphjulets ytor och form.

Svetsmetoder för elektroderna har undersökts, visande att Stellite 21 har de bästa egenskaperna vid handhavandet, såväl enligt fältproven som enligt av KTH utförda prov. Av de senare framgår även att manuell svetsning med belagda elektroder (MMA = Manual Metal Arc) ger det bästa resultatet, och att MIG/MAG inte lämpar sig för de svåra svetslägen som är ofrånkomliga vid reparation i ett kraftverk.

En litteraturstudie har gjorts om möjligheterna att bestämma skaderisken innan erosion inträffat. Detta skulle ske t.ex. med hjälp av ljud- eller vibrationsmätning och lämplig filtrering av signalerna. Vissa auktoriteter anser att man redan nu kan avgöra skaderiskerna. Gruppen anser att avsevärd ytterligare forskning under väl kontrollerade förhållanden fordras för att verifiera detta. Sådant arbete pågår i viss utsträckning utomlands. Genom en kalibrering av kavitationssignalen och erosionen på ett individuellt löphjul bör det på sikt vara möjligt att skapa ett samband som medger en större medvetenhet om kavitationsskadornas omfattning vid aktuell last. Detta ökar möjligheterna till optimering av produktionen.

I studien gjorda erfarenheter kan direkt tillämpas vid svetslagning av kavitationsskador på vattenturbiners löphjul. För att tillämpningen skall ge bästa möjliga effekt fordras viss utbildning.

SUMMARY

Damage by cavitation in turbines causes maintenance and loss of availability and energy for water power production.

Tests in equipment that causes controllable cavitation by means of a vibrator have made it possible to rank various materials in order of resistance to cavitation erosion. Polymeric/ceramic materials were totally unsatisfactory in resisting cavitation. The best results among metallic repair materials were those from Stellite 21, Hydroloy HQ913 and Castolin 9080 electrodes. In this laboratory environment they have 20 to 50 times lower erosion rates than the reference electrode OK 63.30.

Site tests of some electrodes have been made at three plants, Gejmån (with a Francis turbine), Edensforsen G2 and Forsmo G4 (with Kaplan turbines). The results from these tests confirm that the intervals between repairs of erosion caused by cavitation can be increased. With the best electrodes the intervals can be at least 5 times longer than those that were used with the reference electrode OK 63.30. This electrode has been commonly used for manufacture of welded turbine runners, and for repair of cavitation pitting.

It has been shown that the blade shape has a decisive importance on the cavitation erosion rate in water turbines. Results matching those from the best electrodes have been reached in Gejmån even with OK 63.30, simply by improvement of the shape and surface of the runner.

Research on welding and grinding show that Stellite21 is the most suitable electrode in regard to its application, both according to site tests and according to tests at the Royal Institute of Technology. The latter tests also demonstrate that manual welding with coated electrodes (MMA) gives the best results, and that MIG/MAG is unsuitable for the severe welding positions that are unavoidable during repair work in a power plant.

A study has been made of literature on detection of the risk for erosion before erosion has actually occurred. This might be made e.g. by measurements of noise or vibrations, followed by a suitable filtering of signals. Some authors mean that the risks can already be ascertained. The Group means that considerable further research under well controlled conditions will be required to verify this. Some efforts in this direction has been started abroad. By calibration of cavitation signal and erosion on a specific runner it should be possible, in the future, to create a relation that offers a greater understanding of the occurrence of cavitation damage at a specific load. This will increase the possibilities to optimize the production.

Experience collected in this study can be directly applied at the repair of cavitation pitting on water turbine runners. To ascertain that the best possible results are achieved, some education will be necessary.

1. INLEDNING

Forskning om kavitation har i Sverige bedrivits ungefär sedan tiden för första världskriget. God respekt för forskningsresultaten har sedan lett till att de flesta svenska vattenkraftstationerna har relativt små erosionsskador av kavitation. Krav på drift med hög effekt under kort tid har emellertid bidragit till intresset att reducera skadorna.

Forskning skedde i flera organisationer, bl.a. i Kraftverksföreningens Stiftelse för Tekniskt Utvecklingsarbete (VAST). Dess Turbinkommitté startade 1962 ett projekt för bedömning av kavitationsbeständighet hos olika material som användes i vattenturbiner. Studien resulterade 1970 i publikationen "Steel for Water Turbines", utgiven 1970 vid IAHR.Symposiet i Stockholm.

Den gruppen, utvidgad med intressenter utanför VAST, övergick sedan till att ta fram en norm för bedömning av kavitationsskador. Arbetet resulterade i ett underlag som 1972 utgavs som svensk norm av Svenska Elektrotekniska Kommissionen, SEK.

I vetskap om att utveckling pågick på många håll genomfördes sedan en litteraturstudie om kavitation. Den beställdes av VAST hos Institutet för Metallforskning, som 1989 lämnade rapporten "Kavitation hos material för vattenturbintillämpningar".

Den rapporten och andra informationskällor visade att mer motståndskraftiga material kunde utnyttjas vid reparation av uppkomna skador. Utländska studier gav också uppslag till hur dessa material skulle kunna provas så att resultaten blev objektivt mätbara.

Det kunde också finnas vissa möjligheter att under drift detektera driftområden där riskerna för skador skulle kunna vara stora, och möjligen skulle dessa områden någon gång kunna undvikas till lägre kostnad än reparationskostnaderna.

Ett projekt som startats 1988 med ett löphjul i Vattenfalls anläggning Gejnmån kom att ingå i ett projekt som 1991 samordnades av Vattenfall och VAST, och som nu redovisas i detta ELFORSK-projekt. I detta inkluderades försök att finna hållbara argument för eller mot material som skulle kunna appliceras med enklare metoder än svetsning.

Följande delar av huvudrapporten är starkt förkortade beskrivningar av komplicerade förlopp. Fullständigare text finns i rikhaltig facklitteratur, av vilken en liten del förtecknats i kapitel "6. Referenser".

1.1 Kavitationsfenomenet

När trycket i en vätska sjunker till en viss nivå bildas ångfyllda blåsor i den. Detta inträffar när trycket når s.k. "ångbildningstryck". Blåsorna utgör hålrum, "kaviteter". Processen med dessa blåsors bildande, liv och kollaps kallas "kavitation". För kollapsen användes dessutom ordet "implosion".

I detta sammanhang behandlas bara vätskan vatten, men andra vätskor beter sig likartat. Kavitation i lagerolja är ett inte ovanligt problem.

Ångbildningstrycket beror på vattnets temperatur men tendensen till ångbildning även på

dess renhet. Föroreningar som fin sand, damm etc höjer ångbildningstrycket. Man brukar beteckna dem som kärnor, nuclei, vid vilka ångblåsorna först börjar bildas. För rent vatten av ca +20°C temperatur är det verkliga ångbildningstrycket ca 2,5 kPa (0,025 bar).

Trycket i en vätska beror på nivåskillnaden till en fri vattenyta, lufttrycket på denna vattenyta, och på vattnets hastighet och därav orsakade förluster. När det gäller vattenturbiner bestämmer nivåskillnaden till övre vattenytan i huvudsak turbintypen och därmed vattenhastigheten i kavitationszonen. Turbintyperna har olika benägenhet för kavitation och nivåskillnaden till övre vattenytan har därigenom en sekundär betydelse för kavitationen. Nivåskillnaden till nedre vattenytan och förlusterna i sugröret har däremot ett primärt inflytande, eftersom de bestämmer det statiska medeltrycket vid utloppet från löphjulet.

Ångbildningstrycket nås först i mindre områden med väsentligt lägre tryck än medeltrycket. I krökta kanaler gäller t ex att vattnets hastighet är större där krökningsradien är mindre. Eftersom trycket påverkas av hastighetens kvadrat, kommer en liten radie och därav orsakad hög hastighet i innerkurvan att få stor inverkan på marginalen mot ångbildningstrycket.

När ångbubblorna (radier av storleksordningen 0,01 - 1 mm) följer vattnet till ett område där det statiska trycket är högre än ångbildningstrycket kan de inte längre existera utan faller samman och försvinner. Detta sker med så stor hastighet (mikrosekunder) att det betecknas som "implosion", varvid höga, kortvariga och lokala tryck uppstår (storleksordning GPa eller 10000 bar!). Närliggande material utsätts för en stor mängd tryckpulser varvid det kan utmattas och spricka sönder, erodera.

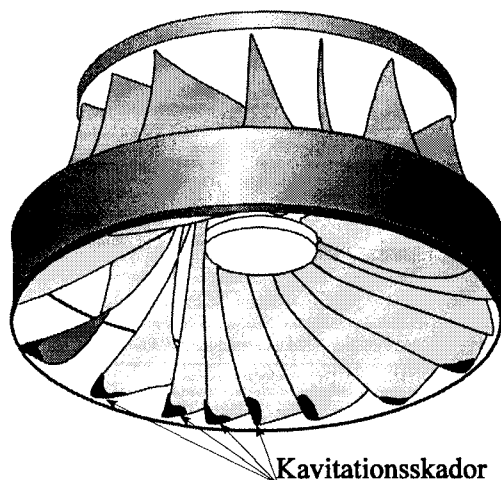
1.2 Kavitationsskador

Kavitation leder till skador av skilda slag. Vanligen avses bara den ovan nämnda erosionen. Den kan fortgå till dess ett löphjul helt förstörts, men långt tidigare har skovelytor skadats så att friktionsförlusterna ökar kraftigt och/eller så att vattnet inte omböjs på avsett sätt. De synliga molnen av ångblåsor har inte nödvändigtvis dessa erosionseffekter. Antingen kan "implosionerna" uppträda på så stort avstånd från turbinens ytor att dessa inte skadas, eller kan materialet vara så motståndskraftigt att skadorna uteblir. Däremot leder ångmolnen till att vattnet inte följer löphjulets skovlar på avsett sätt, vilket ger förlust av verkningsgrad. Molnen kan också bli så voluminösa att de inkräktar på vattnets strömrums och minskar den uttagbara effekten. Andra olyckliga följder är att kavitationen påverkar både löphjulets nivå i förhållande till nedre vattenytan ("sättning") och deras material i kostnadsfördyrande riktning.

Genom att variera statiska trycket i ett provaggregat kan man i stroboskopiskt ljus lätt se hur moln av ångblåsor bildas. Samtidigt studeras kavitationens inflytande på verkningsgraden. Med ledning av sådana observationer kan det statiska tryck som fordras för att undvika förlust av verkningsgrad (eller förlust över en viss gräns) fastställas. Därmed fastställs vid vilken nivå turbinens löphjul bör placeras i förhållande till nedre vattenytan. Nivån kan bli så låg att anläggningskostnaden blir "alltför" hög. Här måste man ta erfarenheter från andra anläggningar till hjälp. Detta är möjligt för nya anläggningar, men man har små möjligheter att ändra höjdplacering i befintliga kraftstationer.

Modellprov i provaggregat har också begränsningen att skillnader i nivå mellan zonerna för ångbildning och implosioner inte avbildas i samma skala som skillnaderna i tryck. Med i anläggningsturbiner använda material skulle erosionsprov i modell för varje enskild turbin kräva orimligt lång provtid.

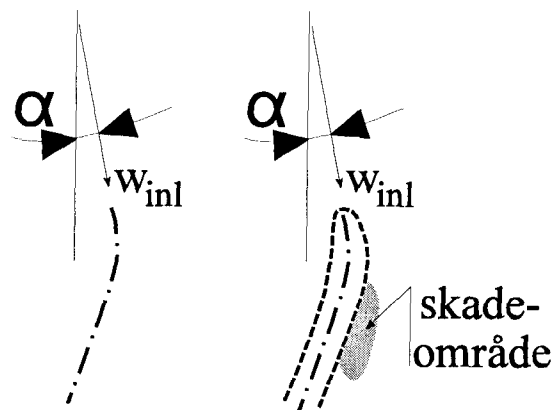
I Francisturbiner uppträder de svåraste skadorna vanligen vid utloppet ur löphjulet, på skovlarnas sug sida och vid bandet. Se figur 1.1. Skadorna kan variera mycket mellan individuella skovlar.



Figur 1.1: Löphjul för Francisturbin med kavitationsskador vid utloppen

Figure 1.1: Francis turbine runner with cavitation erosion at the outlets

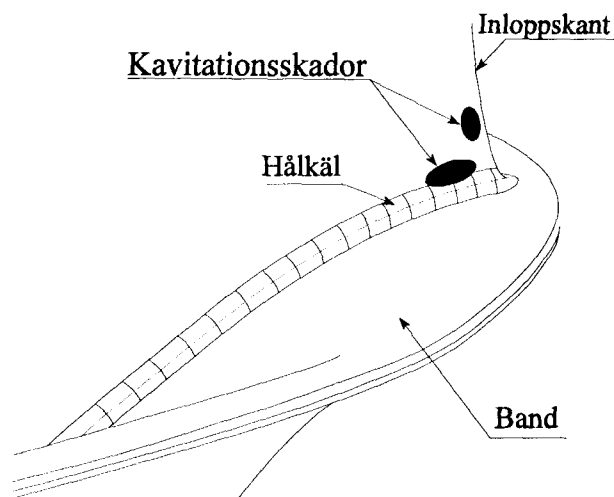
I löphjulets inlopp uppstår skador av annat slag, beroende på att löpskovlarnas riktning är fast och oberoende av vattnets riktning när det lämnar ledkransen. De två riktningarna kan bara stämma överens vid ett bestämt pådrag. När de inte stämmer överens, på grund av tillverkningsfel, på grund av att fallhöjden avviker från det optimala, eller enbart på grund av att löpskovels tjocklek framtvingar en riktningsändring, kommer en lågtryckszon med ångblåsor att uppstå bakom varje löpskovels inlopp, se figur 1.2.



Figur 1.2: Avlösning bakom löpskovels inlopp

Figure 1.2: Flow separation behind the runner blade inlet

Den följs av en eller två zoner med imploderande ångblåsor och där kan mycket lokala men djupa erosioner uppkomma, se figur 1.3.



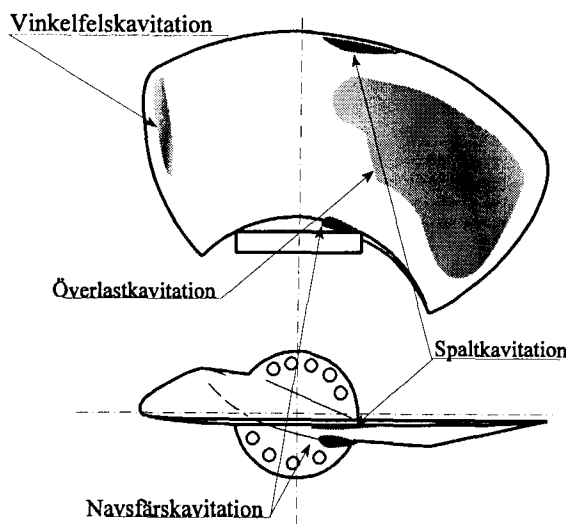
Figur 1.3: Inloppskavitation i Francisturbin

Figure 1.3: Inlet cavitation erosion in a Francis turbine

Skador i detta område kan repareras utan demontage av löphjulet bara i de allra största Francisturbinerna. Skadorna motverkas genom drift enbart vid bästa pådrag och genom val av motståndskraftigt material, men kan sällan påverkas av djupare sättning. Riskerna för sådana skador kan också minskas genom val av riklig diameter för ledkransen.

I Kaplanturbiner är spaltkavitation den mest vanliga typen av erosion. Den uppträder nära periferin på skovelns sug sida, se figur 1.4. Mindre vanlig är "överlast-kavitation" med erosion över större delen av sugsidan, eller lokal kavitation orsakad av formfel. Även

navsfärs-kavitation förekommer, men den har sällan någon materialskadande verkan av betydelse. De två senare typerna påverkas klart av turbinens sättning. Det gäller i mindre grad för spalt- och formfelskavitation.



Figur 1.4: Vanliga områden för kavitationsangrepp på Kaplanturbinskovlar

Figure 1.4: Common areas for cavitation erosion on Kaplan runner blades

Bristfällig överensstämmelse mellan vattnets riktning vid inloppet till löpskovlarna och skovelvinkeln kan ge samma typer av angrepp som hos Francisturbiner. Hos Kaplanturbinerna finns emellertid väsentligt större möjligheter att anpassa skovelvinkeln till strömriktningen.

1.3 Ekonomi

En invändningsfri beräkning av kavitationens ekonomiska konsekvenser är inte möjlig. Försök har gjorts att bedöma totala, både direkta och indirekta, kostnader för alla **svenska producenter** av vattenkraft.

Energiförlusterna under stopp har bedömts kosta ca 0,5 Mkr/år, energiförlusterna under drift ca 2,7 Mkr/år. Värdet av förlorad beredskap under stopp för inspektion och reparation av kavitation har uppskattats till ca 0,9 Mkr/år, och direkta reparationskostnader till ca 2,0 Mkr/år. Totalvärdet skulle då bli ca 6 Mkr/år.

Även om dessa uppskattningar har gjorts efter bästa förmåga har de fordrat en serie antaganden. Dessa har generellt valts så att ovannämnda värden sannolikt är för låga. Den verkliga summan bör därför inte anges vara noggrannare bestämd än till mellan 5 och 15 Mkr/år. Därtill kommer icke kvantifierbara verkningar av vibrationer och buller. Kostnader för insatser för att vid nybyggnader hindra kavitation har inte diskuterats, eftersom nybyggnad av vattenkraft i stort sett har upphört.

Cirka två tredjedelar av dessa kostnader bedömdes vid projektets start kunna påverkas genom ändrad frekvens hos reparationerna. Det föreföll sannolikt att material och metoder skulle kunna identifieras som gjorde det möjligt att dubbla eller tredubbla intervallen mellan reparationerna. Vinsten av detta skulle uppgå till mellan 2 och 5 Mkr per år. Det målet anses ha nåtts, och till en total projektkostnad av mindre än 1,5 Mkr. Vinsten förutsätter emellertid att de under projektet vunna erfarenheterna tillämpas.

Under senare år har möjligheter diskuterats att utveckla metoder att detektera och reducera kavitation innan den ger upphov till materialskador. Därmed skulle även energiförluster genom av kavitation sänkt verkningsgrad o d kunna elimineras. Detta har lett till att prov har gjorts inom projektets ram. Det anses sannolikt att ytterligare utveckling fordras inom detta område innan metoderna ger fullgott beslutsunderlag.

2. BEDÖMNINGAR

Man måste skilja på bedömning av kavitation under garantitid och kavitation under senare drifttid.

2.1 Normer för garantitid

I Sverige saknades länge grunder för bedömning av kavitationserosion i vattenturbiner. Sådana formulerades däremot i andra länder, och mest kända blev de i USA av National Electrical Manufacturers' Association (NEMA) utfärdade reglerna. Enligt dessa kunde det eroderade materialet få uppgå till flera hundra kilo per år och turbin. Anledningarna till att så stora skador accepterades var dels att de bedömda turbinerna var mycket klumpiga (turbiner med stor massa värderades högt), de utfördes ofta med löpskovlar av kolstål och de sattes in i stationer med så många aggregat att en eller flera turbiner kunde få stå för reparation. Dessutom utgavs reglerna av representanter för tillverkarna.

Dessa vida toleranser kom att tillämpas i stora delar av världen. I de länder som inte godtog dem skapades inga konkreta alternativ. Man nöjde sig med termer som "icke skadlig kavitation" utan definition av vad som skulle anses skadligt. Detta blev slutligen så otillfredsställande att en arbetsgrupp tillsattes med deltagare från Vattenfall, VAST, KTH och tillverkarna, med uppgift att skapa regler. Det resulterade i den av Svenska Elektriska Kommissionen (SEK) utgivna svenska normen SEN 26 80 10 som publicerades 1972.

Normen definierade hur stora skador som skulle kunna accepteras under garantitiden i turbiner i svenska vattenkraftverk, under förutsättning att de drevs på föreskrivet sätt. Den definierade också mätmetoderna.

De "tillåtna" skademängderna var väsentligt mindre än dem som t ex NEMA rekommenderat. Det medförde att de svenska normerna inte omedelbart accepterades internationellt och att flera stora tillverkare aktivt motarbetade dem. Inom Sverige fyllde de emellertid det avsedda behovet och de accepterades snart av de andra nordiska länderna.

SEKs internationella motsvarighet International Electrotechnical Commission (IEC) tvingades ta upp arbete med en internationell norm. En sådan etablerades också 1978 som IEC-609. Den svenska normen har en stor del av sin styrka i att den etablerar normvärden även där avtalsparterna inte gör det. Den internationella normen rekommenderar inga sådana värden. Om parterna underlåter att fastställa toleransområden o.d., hjälper det inte att ha åberopat den normens existens.

2.2 Bedömning under drifttiden

Oberoende av hur kavitationsskador påverkar relationen mellan leverantören av en vattenturbin och hans kund, kommer kunden att under turbinens livstid själv behöva ta ställning till hur ofta, när och hur han skall reparera uppkommande skador. Detta regleras inte av normer.

För turbiner som levererats för att uppfylla reglerna i SEN 26 80 10 kan hävdas att reparation med tätare intervall än ca 5 år knappast **behöver** göras. Om driftstopp skulle påkallas av annat än kavitationsskadan, kan tillfället till reparation ändå tas tillvara. Varje reparation av löpskovlarna medför emellertid risk för deformation, och antalet bör därför

hållas lågt. Tåta reparationer kan också behöva tillgripas för Kaplanturbiner som drivits fel-kombinerade, och för turbiner som drivits länge utanför avtalat område, t ex vid överlast eller för låg nedre vattenyta.

För äldre turbiner som projekterats före tillkomsten av SEN 26 80 10 kan tätare reparation erfordras. Kostnader för flera stopp måste vägas emot ökade driftkostnader på grund av de skador som kan förvärras. Kavitationsskador utvecklas vanligen såpass långsamt att de inte innebär oförutsebara haveririsker.

2.3 Besiktning och dokumentation

Besiktning av löphjul där kavitationen är okänd bör göras med intervall på ett - två år. Allt eftersom skadeutvecklingen blir känd kan intervallen eventuellt ökas till tre - fyra år. Skadorna skall, oberoende av sin storlek, dokumenteras vid besiktningstillfället. Under tiden för kavitationsgarantin gäller de regler för hur skadorna ska mätas som anges i respektive norm. Dokumentationen är en grund för jämförelse med kommande besiktningar och för planering av eventuella senare lagningar.

Följande bör finnas med i besiktningsdokumentationen:

Drifttid: Tidpunkt för besiktningen och drifttimmar sedan föregående besiktning.

Driftområde: Produktion och huvudsakligen använda effektområden sedan föregående besiktning, lämpligen som varaktighetsdiagram.

Skadeskisser: Samtliga skador ritas in på mallar för dokumentation enligt appendix 1. Skadans läge, yta och maxdjup skall framgå. Maximala skadedjupet kan mätas med spetsslipat djupmått på skjutmått som hålles mot en böjbar ställinjal som följer skovelformen. Begränsningslinjer med mått kan ritas för vad som är:

1. Matt yta
2. Eroderad yta med djup mindre än 0,5 mm
3. Skadad yta med djup större än 0,5 mm

Det rekommenderas att mallar för skovelformen används för löpskovlar som är känsliga för ändring vid svetsning. Härigenom kan formändringar dokumenteras och kontrolleras vid svetsreparation.

Foto: Skadeytan torkas torr och begränsningsytan för t ex matt och eroderad yta samt skovelnummer ritas ut med vattenfast tuschpenna. Området fotograferas, varvid det är viktigt att hålla god skärpa och att inte blixten slår rakt mot blanka ytor. För fotografering av skymda ytor som vid inloppskant på Francisturbiner användes spegel. Fotografier fogas till dokumentationen.

Övriga metoder: (Komplement till skadeskisser)

Avgjutning:

Skadan kan kopieras/avgjutas med hjälp av modellera, silikon m.m. Arbetsgruppen har gjort försök med vanlig modellera från en leksaksaffär, och den fungerade bra. Detta kan

vara ett bra sätt att mäta eroderad volym och/eller dokumentera skador på skymda ytor, som kan nås med handen.

Fiberoptik:

Fiberoptik kombinerad med videokamera har gett utmärkt resultat vid prov i Gejmån. De skymda ytorna vid inloppskanten avbildades mycket bra. Fiberoptik med erforderlig kvalitet och mättekniker finns hos kontrollföretag. Metoden är dock relativt dyr.

Fotogrammetri:

Fotogrammetri eller 3-D foto har ännu inte provats för kavitationsskador. Metoden ger koordinater för fotograferad yta. Denna bör efter viss databehandling kunna ritas upp och eroderad volym anges. Detta kan bli en mycket bra metod men frågetecken finns för upplösning, mätnoggrannhet och kostnad. Utrustning och mättekniker finns hos olika företag.

Digital teknik:

Digitala stillbilds- och videokameror kan snart väntas att ge god upplösning/kvalitet på bilderna. Via fotodiskett och programvara kan dessa bilder föras direkt in i rapporten. Foton kan också föras över till datorn med scanner, men upplösningen än så länge för dålig.

Exempel på dokumentation av skador visas i appendix 4 - 6. Det är bra om skadorna på ett aggregat dokumenteras av samma person så att bedömningen blir lika.

Vid varje besiktning av löphjul kontrolleras det även för sprickor, oljeläckage etc. och brister dokumenteras.

3. ÅTGÄRDER MOT KAVITATIONSSKADOR

3.1 Materialprovning i laboratorium

Detta är ett koncentrat av den rapport som utgör APPENDIX 2.

Prov i laboratoriemiljö har genomförts för att identifiera material med gott kavitationsmotstånd. Den använda utrustningen och provtekniken ansluter nära till den amerikanska standarden ASTM G32-85. Denna innebär att provet utförs med en fast monterad provkuts ovanför vilken ett "horn" vibrerar med konstant frekvens och amplitud. Metoden har visat sig ge samma relativa ordning mellan olika material som flera andra metoder för beständighetsklassning. Erosionshastigheten värderas via förlusten av massa per tidsenhet.

3.1.1 Provmaterial

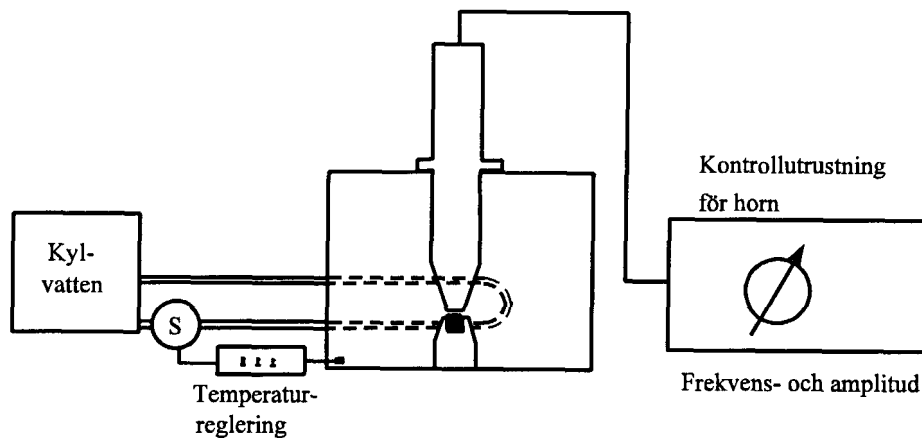
Proven har omfattat sju skovelmateriel, nio svetselektroder samt nio varianter av polymera ytbeläggningar. Av grundmaterialen är sex stål med krom och nickel som viktigaste legeringselement, och det sjunde en aluminiumbrons. Av svetsmaterialen är tre legeringar med kobolt som bas och resterande sex är stål med krom, nickel och molybden som viktigaste legeringselement. Svetsmaterialen har använts nationellt och internationellt vid reparation av kavitationsskador. Ett par elektrodyper har använts även vid tillverkning av svetsade löphjul.

Skovelmaterialet härrör från skovlar som bytts ut vid renoveringar samt från vid- och separatgjutna provstavsämnen från tillverkning. För elektrodgodis framställdes provet genom svetsning på änden av en $\phi 25$ mm stålstav, ur vilken kutsen svarvades. De polymera beläggningarna applicerades enligt tillverkarens instruktion på prefabricerade stålputsar. Provbereidningen utfördes i verkstads- eller laboratoriemiljö.

3.1.2 Utrustning

Utrustningen består av en provningskammare, en vibrationsenhet samt en enhet för kylning. Till detta kommer utrustning för styrning och övervakning. Arrangemanget framgår av figur 3.1.

Vibrationsenheten arbetar med konstant frekvens av 20 kHz och topp-till-topp amplituden kan varieras i intervallet 20 - 50 μm . Provningskammaren har en diameter av 240 mm och är invändigt isolerad med vibrationsdämpande plastmaterial. Nära kammarens yttervägg finns en sluten kylslinga med vilken temperaturen på vattnets temperatur regleras inom intervallet $20 \pm 1^\circ\text{C}$. I kammarens botten monteras en hållare med vilken provet kan positioneras på ett avstånd av 0 - 25 mm från det vibrerande hornet.



Figur 3.1: Provutrustning

Figure 3.1: Testing equipment

3.1.3 Provning

Proven utfördes i destillerat vatten. För att kunna bestämma erosionshastigheten avbröts proven, provkutsarna togs ut, vägdes och sattes tillbaka, varefter provet fortsatte.

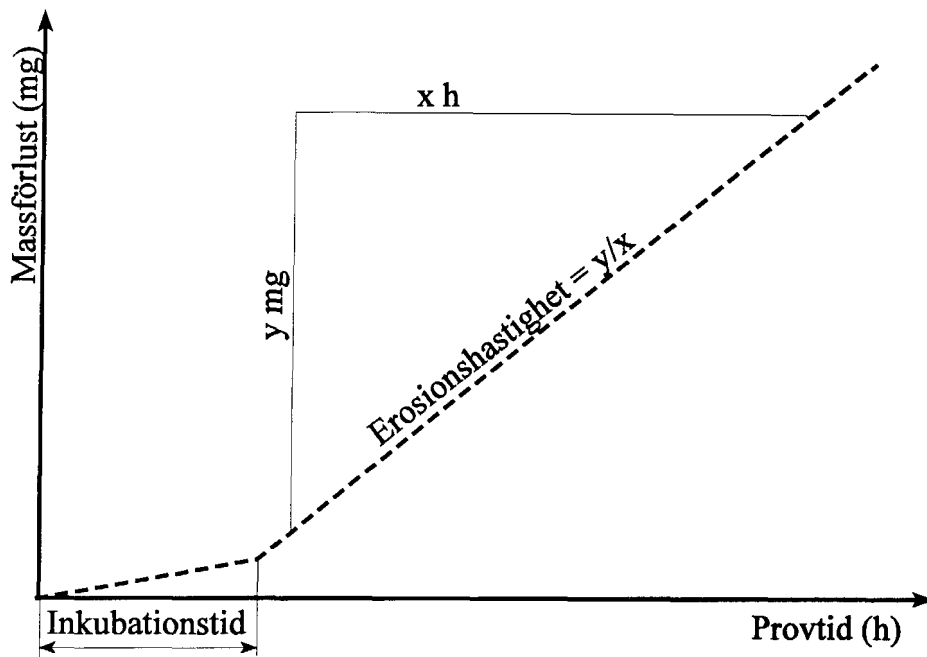
Under proven var avståndet mellan vibrationshornet och provets yta 0,5 mm och hornet vibrerade med en topp-till-topp amplitud av 25 μm . Polymera kompositmaterial för beläggning provades även med 1,0 mm mellan provyta och vibrationshorn.

För de metalliska materialen provades tre kutsar av vardera materialet till dess konstant erosionshastighet erhållits. För de polymera materialen avbröts provningen då beläggningarna lossnat, alternativt då 50% av materialet inom provytan kaviterat bort. För dessa material provades en eller två kutsar.

3.1.4 Resultat

Metalliska material

De metalliska materialen uppvisar en inledande fas (ca två timmar för grundmaterialen, upp till ca fyra timmar för vissa elektoder, vanligen betecknad. "inkubationstid") där erosionshastigheten är noll eller mycket låg. Efter denna inledning följer en ökning till med provtiden nära linjärt ökande massförlust. Vid en stor materialförlust övergår denna fas till en med provtiden minskande erosionshastighet. Detta beror på att medelavståndet mellan provytan och vibrationshornet ökar och den överförda energin därmed minskar. Som mått på materialets erosionsbenägenhet har den linjära massförlusten som funktion av



Figur 3.2: Typkurva för erosionshastighet i metalliska material

Figure 3.2: Typical curve for erosion rate in metals

provningstiden bestämts, se figur 3.2 och tabell.

För skovelmaterial sjunker erosionshastigheten med ökande halt legeringsämnen. Det äldsta materialet, gjutstål 13/0 med 13% krom som dominerande tillsats, har vid detta förfarande en erosionshastighet som är ca 40 % högre än det högst legerade materialet, gjutstål 16/5, med legeringselementen 16% krom och 5% nickel. Två svetsmaterial (OK 6330 och OK 6335) har likartad erosionshastighet som grundmaterialen. De andra har avsevärt lägre erosionshastighet. Elektrodmaterialen Hydroloy HQ 913 och Stellite 21 har mycket låg erosionshastighet, endast ca 1/50 av de bästa gjutstålens.

Resultaten ger inte stöd för att det skulle finnas något enkelt samband mellan erosionens hastighet och materialets hårdhet. Enligt tidigare hypoteser skulle detta kunna bero på att materialens hårdhet och flera därav beroende egenskaper mäts under nära statiska förhållanden. Kavitation belastar däremot materialen med mycket höga hastigheter.

Inget olegerat stål har ingått i provserien. Enligt uppgifter skulle erosionshastigheten vara tre till sex gånger högre än i gjutstål 13/0. Det har uppgivits¹ att erosionen i ett vanligt kolstål (0,22 % C, 0,8 % Mn) påverkas starkt av koncentrationen av Cl-joner. Redan en

¹"Prevention of Cavitation Erosion in Hydraulic Machinery", Rapport för B C Hydro av A. Akhtar

salthalt av 0,03% skulle ge nästan lika stor ökning av erosionen som de ca 3% som motsvarar full samverkan av korrosion och kavitation, medan de rostfria stålen inte påverkas nämnvärt av 0,03% salthalt. Så låg salthalt kan mycket väl överskridas i vanligt älvvatten. Tillgänglig information är dock inte helt tillämplig på de materialkvaliteter som ingått i detta projekts undersökningar.

Skovelmaterial	Mass för- lust mg/h	Hårdhet HV 100 (medel)	Tillsatsmaterial	Mass för- lust mg/h	Hårdhet HV 100 (medel)
Gjutstål 13/0	7,8	190	Castolin HD 6868	4,2	250
Gjutstål 13/1	7,4	190	Castolin 9080	0,3	400
Gjutstål 13/4	5,9	230	ESAB OK 63.30	5,7	220
Gjutstål 13/6	5,8	240	ESAB OK 63.35	8,8	200
Gjutstål 16/5	5,6	270	ESAB OK 84.42	3,1	360
Aluminiumbrons	8,2		Hydroloy HQ 913	0,1	350
Valsat material			Tribaloy T800	0,9	420
SS-stål 23 33	2,6	200	Stellite 21	0,1	400
kallbearb.					
SS-stål 23 33 glödgat	4,3	160	Sandvik 25.10.4.LR	4,1	260

Polymera och keramiska material

De provade icke metalliska materialen är Belzona Super Metal Glide, Belzona Ceramic-R+Ceramic-S + Super Metal Glide, Belzona Ceramic-R+Ceramic-S, Mega Metal MEGA TECH, Chesterton 890, Chesterton 855, Lithgow Saekaphen LTD FR 122, Devcon WR och Castolin Eutectic MeCaTeC 10. De är alla av tvåkomponenttyp, och alla utom det förstnämnda är keramikkompositer.

Kavitationsprov utfördes även för beläggningsmaterialen med 0,5 mm till vibrationshornet. Efter 2 timmars provtid var beläggningsarna kraftigt skadade och begynnande kavitation kunde iakttas på det underliggande godset. För flertalet av de polymera och keramiska materialen fanns inga rester av beläggningen kvar på provkutsen efter 2 timmars provning.

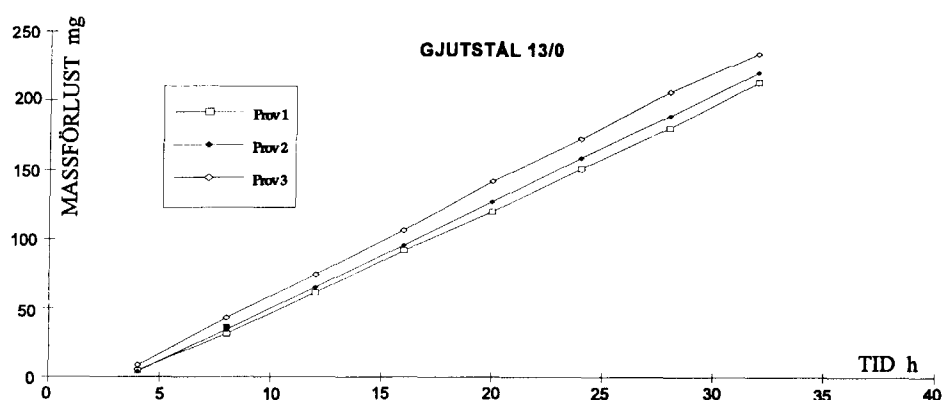
För att identifiera skillnader i de olika materialens skadehastighet utfördes kavitationsprov vid lägre kavitationsintensitet. Denna lägre intensitet erhöles genom att avståndet till vibrations-hornet ökades till 1,0 mm. Det blev då möjligt att vid provtider upp till 2 timmar registrera kavitationsskadornas tillväxt i ytbeläggningsarna. Efter dessa två timmar ökade skadornas omfattning hastigt och efter 4 timmar hade samtliga material så omfattande skador att underliggande material var frilagt inom minst 50 % av provytan.

Man kunde iakttä två skilda skadeförlopp, beroende av beläggningsarnas vidhäftning mot underliggande material. Vid låg vidhäftning lossnade beläggningen efter knappt märkbara kavitationsskador. Med ökande vidhäftning erhöles skador på beläggningen. När genombrott erhöles lossnade resterande beläggning från den belagda ytan. Eventuella skillnader i erosionshastighet har ej kunnat identifieras under dessa förutsättningar.

3.1.5 Kommentarer

Använda data med en topp-till-topp amplitud av 25 μm klassificeras i litteraturen som "low intensity cavitation" medan "high intensity" förutsätter en topp-till-topp amplitud av 50 μm .

De tre kutsarna av varje provat material visade sig ge nära identiska resultat, vilket ger ett gott intryck av provteknikens repeterbarhet, se figur 3.3 som visar utfallet för en kvalitet som givit relativt stor spridning.



Figur 3.3: Spridning mellan resultat från erosionsmätning på tre kutsar

Figure 3.3: Difference between results of erosion measurements from three samples of the same steel quality

De provade svetsmaterialen har lägre erosionshastighet än grundmaterialens och använda referensmaterial OK 6330 och OK 6335. Samtliga svetsmaterial kan bli aktuella som reparationsmaterial. Valet av tillsatsmaterial för en viss applikation blir beroende av svetsningsbetingelser, svetsbarhet och krav på efterbearbetning.

Inget av de provade polymera beläggningssmaterialen kan motstå kavitation av så hög intensitet som den som skadar vanliga grundmaterial.

3.2 Metod- och svetsbarhetsprovning

Provade elektroder har olika svets- och slipbarhet. Dessa egenskaper har studerats dels i samband med de prov som gjorts på anläggningsturbiner, dels vid beredning av kutsar för laboratorieprov, dels i ett särskilt uppdrag hos Svetstekniska Institutionen vid KTH. De förstnämnda proven utgör subjektiva bedömningar av de svetsare som utfört arbetet.

Arbetet för Gejmån utfördes i verkstad, varvid svetsläge kunde väljas. Motsvarande insatser för Forsmo och Edensforsen skedde i respektive turbin, vilket innebar svetsning under-upp. Den utfördes av ordinarie underhållspersonal. Resultaten redovisas i nedanstående tabeller.

GEJMÅN

Elektrod	Diam. mm	Svetsbarhet	Slipbarhet	Cirkapris 1990, kr/kg
Castolin HD6868	3,2	Lättsvetsad i alla lägen		352
Hydroloy HQ913	3,2	Svår att svetsa under-upp med gott resultat		400
Ferralium 255	3,2	Svår att svetsa under-upp. Mycket fuktkänslig!		355
Stellite 21 (blank tråd)	3,2	TIG-svets! Bör utföras i horisontalläge		670
ESAB OK63.35		God		230

FORSMO

Elektrod	Diam. mm	Svetsbarhet	Slipbarhet	Cirkapris 1993, kr/kg
Stellite 21	3,2	God i förekommande lägen	Ngt svårare än P11	500
Castolin 9080	3,2	Någorlunda god i förekommande lägen	Ngt svårare än P11	2200
Castolin HD6868	2,5	God	Lika lätt som P11	600
Hydroloy HQ913	4	Dålig i alla lägen. Svårt att tända och hålla riktningen på smältan. Man fick svetsa och slipa i flera omgångar. Påtaglig tendens till porbildning	Ngt svårare än P11	580
ESAB OK 84.42	4	God i förekommande lägen. Sprutar.	Hårdare att slipa än övriga	300
ESAB OK 63.35	2,5	God	Lätt	230
Avesta P11	2,5	Mest lättsvetsad	Lätt	

EDENSFORSEN

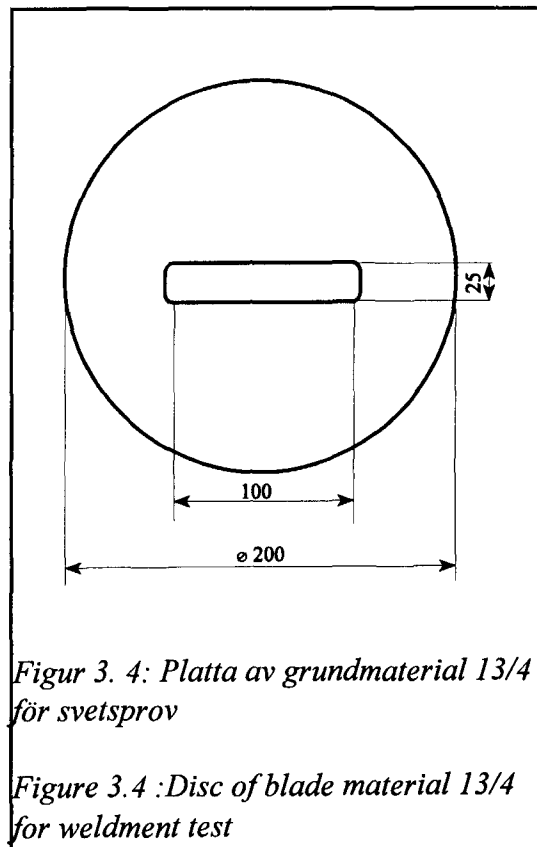
Elektrod	Diam. mm	Svetsbarhet	Slipbarhet	Cirka pris 1992, kr/kg
Casttolin HD6868	2,5	Lättsvetsad i alla lägen	Lätt	600
Stellite 21	3,2	Lättsvetsad i alla lägen	Lätt	560
Hydroloy HQ913	3,2	Ej möjlig att svetsa under-upp		590
Castolin 9080	3,2	Svårsvetsad men flyter ut bra. Kan inte böjas	Lätt	2300
Sandvik SAF2507	2,5	Lättsvetsad, flyter ut bra	Svår	450
ESAB OK 63.35		God	Lätt	230

I laboratoriet utfördes påsvetsprov i den omfattning och med de resultat som beskrivs i appendix 2. Utfallet sammanfattas med att laboratoriesvetsprovningen gav "--god likvärdighet mellan de olika tillsatsmaterialen med undantag för Triballoy T800. För detta material erhöles kraftig sprickbildning i samband med svetsningen. Materialet kräver normalt förvärmning och kan endast utnyttjas om tillfredsställande förvärmning kan erhållas på grundmaterialet." Eftersom sådan förvärmning knappast kan göras vid reparation i fält utslöts denna elektrod i följande prov.

För den slutliga bedömningen på KTH utvaldes fem tillsatsmaterial, Hydroloy HQ 913, Stellite 21, Castolin HD6868, Castolin 9080 samt som referensmaterial ESAB OK 63.30. Hydroloy HQ 913 fick dock utgå på grund av leverensproblem. Denna svetsning utfördes på provplattor enligt figur 3.4, i detta fall tillverkade ur material av typ 13/4.

Uppdraget omfattande studier av tre svetsmetoder, nämligen MMA (= Manual Metal Arc) med vanliga belagda elektroder, MIG/MAG (=Metal Inert/Active Gas) och TIG (=Tungsten Inert Gas). Undersökningen syftade till att klarlägga om de svetslägen som kunde påräknas vid reparation på plats i en turbin skulle kunna ge tekniskt godtagbara svetsar för respektive metod, samt fastställa lämpliga svetsparametrar för erhållande av sådana godtagbara resultat. Bedömningen av svetsarna baserades på visuell kontroll under och efter svetsning, granskning av längs- och tvärsnitt genom den färdiga svetsen samt hårdhetsprovningar i dessa snitt. I samband med provpreparering bedömdes även slipbarheten hos den färdiga svetsen.

Endast metoden MMA bedöms kunna ge tillfredsställande resultat i den aktuella miljön och med där möjligt svetsläge. Liksom vid de andra undersökningarna konstaterades att slipning av ESAB OK63.30 är lättare än slipning av de andra materialen, men att den inte försvårades väsentligt annat än för Castolin 9080. Vid MMA-svetsningen bör tunna elektroder användas, och rotsträngarna svetsas med låg energi. Fyllningen kan sedan göras med grövre elektrod och högre energinivå. De hårdaste materialen tenderar att spricka i rågens topp, men denna risk kan elimineras genom att rågen byggs så hög att ytan slipas ned ca 0,3 mm, eventuellt genom TIG-behandling.

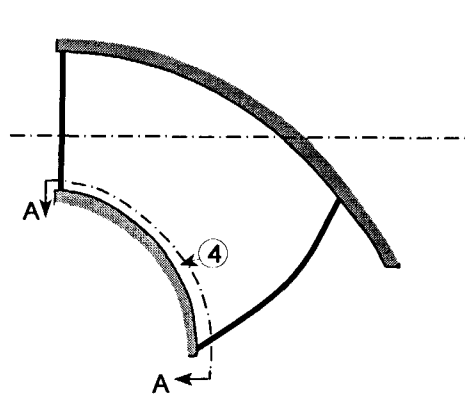


3.3 Formförbättring

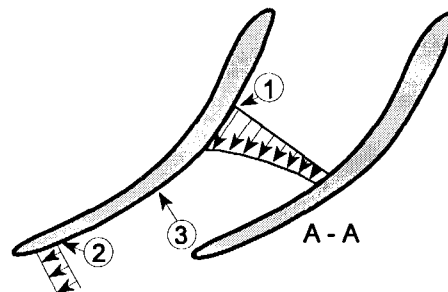
Kavitationens grunder har beskrivits i kapitel 1 ovan. Fenomenet upptäcktes i mitten på 1800-talet men det dröjde till en bit in på 1900-talet innan man upptäckte att kavitation kunde ge upphov till erosion av utsatt material - även om det var så starkt och hårt som stål.

3.3.1 Kavitationsskador

Figur 3.5 visar ett snitt genom två löpskovlar till en Francisturbin. Skovlarna skall länka om vattnet till en annan riktning. För strömning i krökar gäller att hastigheten blir högre i innerkurvan enligt ett givet samband, se senare beräkningsexempel. För skovelkanalen är alltså hastigheten större vid bandet, vid 4 på figuren, än vid navet. Strömningshastigheten blir också högre på skovlarnas sugsida, dvs vid 1 i figuren.



I ett område längre nedströms, vid 2 nära skovelutloppet, slutar kanalkrökningen och hastigheten blir lägre.



Hur hög hastigheten vid 1 blir är en funktion av skovelytans och kanalens krökning. Vattentryckets totalnivå bestäms av mottrycket efter turbinen - dvs läget av NVY i förhållande till löphjulet (sughöjden H_s), barometertrycket och hastighetshöjden. Då hastigheten är hög blir statiska trycket lokalt lågt. Om sughöjden är tillräckligt stor och därmed totaltrycket lågt kan statiska trycket sjunka ända ned till ångbildnings-trycket. Då bildas ångbubblor vid det mest utsatta området, 1. Bubblorna färdas med vattnet tills de kommer till ett område 2 med lägre hastighet och därmed högre statiskt tryck, där de kollapsar. Om en stor mängd blåsor kollapsar nära skovelytan och om skovelmaterialet inte är fullt beständigt, kommer erosion att uppstå förr eller senare.

Figur 3.5: Strömning i Francisturbin

Figure 3.5: Flow in Francis runner

3.3.2 Utloppskavitation

Utloppskavitation är det klassiska exemplet på kavitationsskador i ett löphjul. Den uppträder på skovlarnas sugsida i närheten av utloppet. Den kan ha flera olika orsaker. Om skovelytorna är perfekt formade beror felet antingen på för stor sughöjd H_s eller på för stor volymström som ger höga hastigheter och därmed lågt statiskt tryck.

Om sughöjden och volymströmmen är riktigt valda kan oväntade skador bero på fel i löpskovelformen. Detta formfel behöver inte vara stort, vilket följande exempel från Mtera, Tanzania, visar. Där upptäcktes efter en kort tids drift oväntade kavitationsskador av klassisk typ på sugsidan av skovlarna i hörnet vid skovlarnas anslutning till löphjulsbandet. På skovelytan ungefärligen vid 3 i figur 3.5, upptäcktes vid kontroll av skovelformen en bula med en höjd av ≈ 1 mm i förhållande till ritningsunderlaget. Detta kunde konstateras medföra en ändring av den lokala krökningsradien R från 0,89 till 0,85 m.

Med användande av potentialvirvelteorin

$$vR = \text{konstant}$$

där v = den lokala vattenhastigheten

R = den lokala strömningens krökningsradie

kan följande mycket approximativa beräkning göras av hur stort inflytande detta formfel har. I den arbetspunkt för löphjulet där kavitationsbubblor just börjar uppenbara sig är hastighetshöjden plus ångbildningstrycket = totaltrycket

$$\frac{v^2}{2g} + H_w = B - H_s$$

där H_w = ångbildningstrycket m

B = barometerståndet m

H_s = sughöjden m

Med insättning av sughöjden $H_s = -4$ m, ångbildningstrycket $H_w \approx 0,4$ m och barometertrycket $B = 9,9$ m kan den teoretiska hastighetshöjden h vid ångblåsbildning beräknas enligt

$$h = \frac{v^2}{2g} = B - H_w - H_s = 13,5 \text{ m}$$

vilket motsvarar en hastighet på 16,27 m/s. Om denna hastighet anses korrespondera mot det projekterade ritningsunderlaget med krökningsradien 0,89 m gäller för formfelet med krökningsradien 0,85 m

$$v = 16,27 \cdot \frac{0,89}{0,85} = 17,04$$

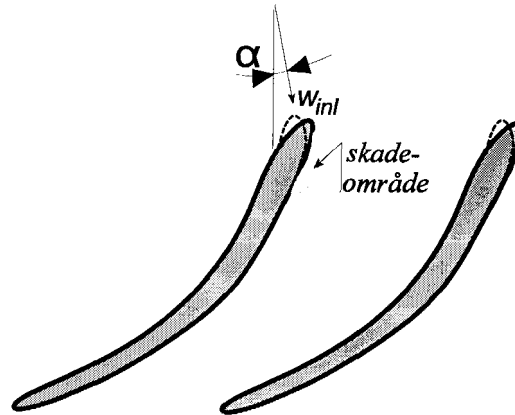
och hastighetshöjden

$$h = \frac{v^2}{2g} = B - H_w - H_{s'} = 14,8 \text{ m}$$

Det 1 mm stora formfelet motsvarar under denna modells förutsättningar en sughöjdsskillnad på

$$H_s - H_{sl} = 13,5 - 14,8 = -1,3 \text{ m}$$

Att en stor del sanning ligger i den teoretiska modellens beräkning visas av att sedan formfelet rättats till i Mtera sjönk den eroderade massan från $\approx 5 \text{ kg}$ till $\approx 0,5 \text{ kg}$ per 8000 drifttimmar.



Figur 3.6: Felaktig inströmningsvinkel ger lätt kavitation nära inloppet.

Figure 3.6: Unsuitable inlet angle easily results in erosion near the inlet

3.3.3 Inloppskavitation

En annan karakteristisk skada som kan uppkomma lika väl vid låglast som vid fullast, är inloppskavitation. Se figur 3.6, som visar liknande Francisskovlar som figur 3.5. Om inloppskanten anströmmas med relativhastigheten w_{inl} i en av konstruktören inte förutsedd vinkel kommer ett höghastighetsområde att bildas vid kantrundningens sida enligt figuren. Är vinkeln α alltför stor uppstår här ångbildning. Ångblåsorna kollapsar inne i skovelkanalen antingen i hålkälen mellan skoveln och bandet eller på skovelns yta nära inloppskanten. Båda platserna är mycket svåråtkomliga för lagning.

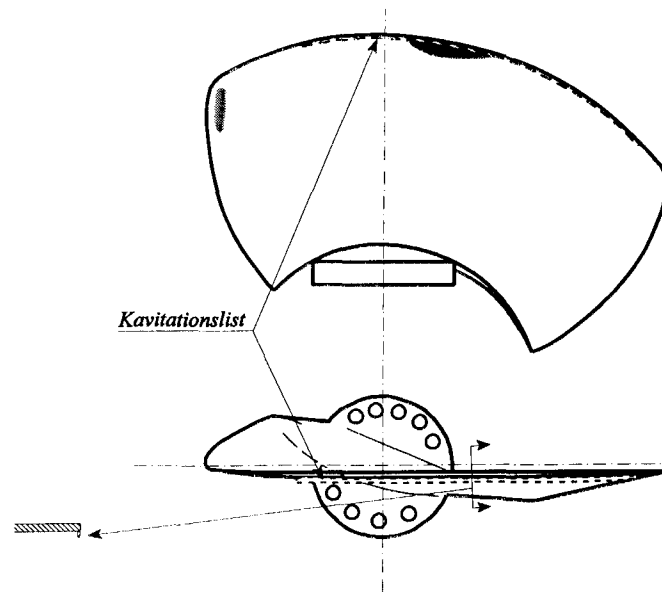
Skadorna kan elimineras genom omformning av skovelinloppet enligt streckad linje. Detta har i enstaka fall skett genom att en bit av skoveln skurits ut och en bättre formad del svetsats in.

Samma fenomen med bristande anpassning hos inloppskanten inträffar stundtals även på Kaplanturbiner och då för hörnet mellan inlopp och periferi. Figur 3.7 visar ett cylindersnitt genom en Kaplanskovel nära periferin.

Blåsor som bildas vid inloppskanten kan kollapsa antingen nära inloppet eller förena sig med spaltläckaget på något hittills inte fullt klarlagt sätt och då ge mycket lokala och djupa skador vid vridningsaxeln nära periferin.

Två åtgärder har visat sig ge bot för detta fenomen. Dels kan skovelformen modifieras i hörnet vid inloppet och periferin. Denna åtgärd har med gott resultat gjorts på modellöphjul sedan det visat sig att en första sats anläggningskovlar fått kavitationsskador. Det har då bekräftats att en sådan modifiering inte behöver påverka verkningsgraden, och nästa sats skovlar har blivit fri från skador.

Ett annat botemedel är att införa en kavitationslist längs periferin - se figuren. Detta har gjorts i efterhand på flera anläggningar. Prov har indikerat att en sådan list sänker verkningsgraden något. De mellaneuropeiska turbintillverkarna Voith och Sulzer-Escher Wyss tillverkar numera sina skovlar rutinmässigt med kavitationslister.



Figur 3.7: Löpskovel för Kaplanturbin. Vanliga angreppspunkter för skador, samt kavitationslist.

Figure 3.7: Runner blade for Kaplan turbine. Common areas for cavitation pitting, and cavitation list.

3.4 Åtgärder i fält

3.4.1 Gejmåns kraftstation

Detta är ett koncentrat av APPENDIX 3.

3.4.1.1 Bakgrund, data

Gejmåns kraftstation togs i drift 1970. Den har en Francisturbin med 1650 mm banddiameter. Fallhöjden är 245 m, varvtalet 500 rpm, effekten 65 MW, utbyggnadsvattenföringen 28 m³/s, medelvattenföringen ca 15 m³/s och medelårsproduktionen 280 GWh.

Kavitationsskador med djup som motsvarade halva skoveltjockleken eller mer per år ledde till reparation två gånger per år. År 1979 köptes ett andra löphjul men detta visade sig inte

få mindre skador än det första.

Resultat från ett kanadensiskt projekt visade att betydande ökning av kavitationsmotståndet kunde nås genom användning av i Sverige oprövade reparationsmaterial. Provet startades 1988 av Vattenfall enligt dessa idéer med ett av löphjulen för Gejmvån. De kom att ingå i det projekt som 1991 samordnades av Vattenfall och VAST och nu avslutas och redovisas i detta ELFORSK-projekt.

Med stort tålamod och avsevärda kostnader (från såväl Vattenfall som Kvaerner) minskades först skillnaderna mellan skovlarna.

De gamla skadorna användes för bedömning av storleken på den "medelyta" som sannolikt skulle komma att skadas efter ett löphjulsbyte. På en del av den ytan på varje skovel svetsades med elektroder av olika kvalitet. Varje provyta omges av referensmaterial av OK 63.30. Löphjulen är utförda i gjutstål 13/6 (Bofors 2RM2).

På fyra skovlar användes OK 63.30 inte bara som referensmaterial utan som enda provmaterial. På dessa skovlar gjordes en mindre ändring av inloppets sugsida. På några andra skovlar ändrades inloppsvinkeln.

Påläggen gjordes ca 3 mm djupa. Hårdheten mitt på påsvetsningarna var mellan HB 259 och HB 211 för de olika elektroderna.

3.4.1.2 Inspektioner

Aggregatet inspekterades tre gånger redan under första driftåret. De skador som kunde observeras vid skovelutloppen inskränkte sig emellertid till intryck av "matta" eller mycket lätt angripna ytor på referensmaterial, särskilt i den smala kanten mellan skovelutlopp och påläggssvets. Inga reparationer gjordes. En svag mattering uppträdde på bandet bakom varje skovels utloppskant.

Sedan ökades intervallen mellan inspektionerna. Efter 15700 drifttimmar under två och ett halvt års drift hade ingen kavitationssvetsning gjorts. En sjätte inspektion visade då fortfarande bara matta eller mycket lätt påverkade ytor på de "ädlare" materialen. Skador med djup fanns bara i referensmaterial, men inte ens där översteg djupen 3 mm.

Under augusti 1993, dvs mellan den sjätte och den sjunde inspektionen, utfördes svets- och sliparbeten på samtliga skovlars avloppspartier. Det är därför inte möjligt att jämföra tillståndet vid inspektioner efter den sjätte med dem vid de föregående.

Även om det statistiska underlaget kan tyckas vara otillräckligt, kan man ana att ökningen av bandets krökningsradie haft en liten men positiv effekt.

Man kan inte se området för eventuell inloppskavitation utan demontage av löphjulet. De indirekta bedömningar som gjordes vid tidiga inspektioner är därför osäkra. Vid en sista inspektionen i februari 1995 kontrollerades emellertid även dessa områden med bättre tekniska hjälpmedel.

Denna åttonde inspektionen gjordes alltså drygt fyra år och ca 23800 drifttimmar efter starten med detta löphjul. Den visade i de flesta kanalerna enbart mattering på små ytor,

i några kanaler svagt begynnande erosion, men ingenstans med större djup än ca 2 mm.

3.4.1.3 Slutsatser

Under en period av två och ett halvt år växte skador i grundmaterial och/eller referensmaterial i ett par skovlars utloppsparti till ca 3 mm maximaldjup. Under drygt fyra år växte inte skadorna i inloppspartiet till större djup än ca 2 mm, trots provokativ driftinstruktion under projektets sista år. Med den tillväxten skulle inte reparation ens med den vanligare elektroden OK 63.30 behöva göras oftare än ett par gånger per decennium.

Att den frekvensen varit så hög som två gånger per år anses ha berott på brister i skovelform. Den formen har från början motsvarat kraven i IEC:s modellkod. Kodens krav på homologitet bedöms vara otillräckliga för kavitationssäkerhet. Formen har dessutom sannolikt försämrats genom reparationer under för stark tidspress, och med ofullständig instruktion.

Under tidigare normaltillstånd skulle under så lång drifttid ha utförts 4 - 5 kavitationslagningar med reparationssvetsning på löphjulets alla skovlar. Nu har under samma period inga kavitationsskador som överstiger ca 0,2 mm djup förekommit i något av de mer kavitationståliga påsvetsade materialen Stellite 21, Hydroloy HQ913, Ferralium 255 eller Castolin 6868. Om dessa påsvetsningar täckt hela de utsatta ytorna skulle de sannolikt kunnat motstå kavitation i ett eller flera decennier innan skadorna nått så djupt att svetsreparation erfordrats.

Av de fyra mer motståndskraftiga materialen är Stellite 21 bäst. Skillnaderna mellan de andra är liten, men Ferralium 255 mattas något snabbare än de andra.

Det finns inget i genomförda besiktningar som antyder att den förändring i driftsättet som rekommenderats efter mätning av akustisk emission skulle väsentligt påverka kavitationsskadorna.

3.4.2 Edensforsens kraftstation, G2

Detta är ett koncentrat av APPENDIX 4.

3.4.2.1 Bakgrund, data

Edensforsens kraftstation i Ångermanälven är belägen ca 10 km uppströms Junsele samhälle i Sollefteå kommun. Stationen togs i drift 1956 med två aggregat. Fallhöjden är 28 m.

Aggregaten har Kaplanturbiner från Finshyttans Bruk. Turbineffekten är 35 MW per aggregat efter en ombyggnad 1977. Löphjulsdiametern är 4,53 m, antalet löpskovlar är 5, skovelmaterialet Avesta 739 (13/0),

3.4.2.2 Inspektioner

Skadorna har i stort sett varit lika varje år såväl i omfattning som i läge, och löpskovlarna har svetslagats årligen. Turbin 2 valdes som ett av aggregaten för prov av tillsatsmaterial

vid svetslagning av kavitationsskador. En inledande besiktning genomfördes 92-04-07 och följdes av reparationssvetsning. Följande fyra material kom till användning:

Skovel nr	Elektrod	Diameter, mm
1	Stellite 21	3,2
2	Castolin HD 6868	2,5
3	Castolin HD 6868	2,5
4	Castolin 9080	3,2
5	Sandvik SAF 2507	2,5

Vid nästa inspektion 93-04-06 hade turbinen varit i drift ett år och stationen hade körts under normala förhållanden under hela tiden.

3.4.2.3 Slutsatser

Resultatet bedömdes genom att bilda kvoten mellan erosionsdjupet i provmaterialet och djupet i referensmaterialet, dp/dr , varvid noterades:

Ordning	Elektrod	dp/dr
1	Castolin 9080	0,3
2	Sandvik SAF 2507	0,3
3	Stellite 21	0,3
4	Castolin HD 6868	0,4 resp 0,5

Skadorna kan alltså minskas till 30 - 40 % av den som uppträtt i referensmaterialet.

Edensforsen G2 utnyttjades även som provaggregat vad gäller detektering av kavitationsintensitet vid olika effekter. Se kapitel 4.2.

3.4.3 Forsmo kraftstation, G4

Detta är ett koncentrat av APPENDIX 5.

3.4.3.1 Bakgrund, data

Forsmo kraftstation i Ångermanälven nyttjar 34 m fallhöjd mellan Moforsens och Sollefteå kraftstationer. Stationen har fyra aggregat, varav det aktuella G4 togs i drift 1957.

Aggregatet har en Kaplanturbin från KMW. Turbineffekten är 45 MW. Löphjulsdiametern är 4,4 m, antalet löpskovlar är 5, skovelmaterialet Avesta 739G (13/1),

En inledande besiktning 1992 följdes av reparationssvetsning. Som referensmaterial valdes ESAB OK 63.35. Följande fyra provmaterial användes, med den fördelning som framgår under punkt 3.6.4: Stellite 21, Castolin 9080, Castolin HD6868, Hydroloy HQ 913 och ESAB OK 84.42.

3.4.3.2 Inspektioner

De skador som uppstått i referensmaterialen är jämförbara med dem som reparerades vid

provets början 1992.02.05. Visserligen kunde vid det tillfället bara de urslipade skadorna undersökas men djup och utbredning är av samma storleksordning på respektive skovel.

Vid nästa inspektion 1994.04.14 hade turbinen varit i drift i drygt 2 år och stationen hade körts under normala förhållanden. Man ser en tydlig gräns där referensmaterial och provmaterial möts på skovel 1, 2 och 5.

3.4.3.3 Slutsatser

Resultatet bedömdes genom att bilda kvoten mellan erosionsdjupet i provmaterialet och djupet i referensmaterialet, dp/dr , varvid noterades:

Skovel nr	Elektrod	dp/dr	dr
1	Stellite 21	0,2	5
2	Castolin 9080	0,3	9
3	Castolin HD 6868	0,4	7
4	Hydroloy HQ 913	0,3	4
5	ESAB OK 84.42	0,2	19

Skadorna kan alltså minskas till 20 - 40 % av dem som uppträtt i referensmaterialet. De material som innehåller kobolt klarar sig bäst.

En svårighet har varit att dra gränslinjen mellan materialen. Skovlarna 3 och 4 har en mer gradvis övergång mellan referens- och provmaterial än de övriga skovlarna. Erosionen i skovel 4 förefaller vara i ett tidigare stadium än på de andra skovlarna, möjligen beroende på att intensiteten varit lägre. Skovel 5 har å andra sidan utsatts för mycket kraftigare erosion än grannskoveln 4. Värdering enbart med relationsvärdet är därför osäker.

3.4.4 Andra kraftstationer

Metoder, intervall och material som använts vid lagning av kavitationsskador i följande kraftstationer har följts upp. Stationerna tillhör BÅKAB.

Trångfors kraftstation

Aggregatet har en vertikal Francisturbin med $P=75$ MW, $H=79$ m och löphjulsdiametern 3,2 m. Stationen togs i drift 1972. Skovelmaterialet är 13/6 (Bofors 2RM2), nav i kolstål SS 1306-02 och band i 13/4 (CNMo 130.4).

Prov har gjorts med formändringar, svetselektroder och polymera/keramiska material. Med hjälp av formändringar och byte till elektroder med bättre beständighet mot kavitation har intervallen mellan lagningarna förlängts från cirka ett till mer än fem år.

Formändring av fyra skovlars inloppskant nära bandet utfördes 1988 av leverantören. Det medförde tyvärr inte någon reducering av inloppskavitationen. Inga andra formändringar har gjorts av löphjulets inlopp.

En löpskovel har betydligt mindre kavitationsskador än de övriga och har inte behövt lagas någon gång. Samtliga övriga skovlar har successivt formändrats genom svetsning och

slipning så att de överensstämmer med mallar som togs fram från den skadefria skoveln.

Svetslagningen har ursprungligen gjorts med Avesta P5. Från och med 1992 har Castolin HD 6868 använts och från 1994 Stellite 21.

De polymera/keramiska materialen Chesterton 858+855, Devcon WR2 och Castolin MeCaTeC 10 har provats på löpskovlar och ledskovlar. På löphjulet försvann materialet inom någon månad. På ledskovlarna fanns cirka hälften kvar efter några år. Ledskovlarna har, efter kontroll av deras hållfasthet, 1993 slipats om så att kavitationen eliminerats.

Oldens kraftstation, Oldåturbinen

Vertikal Francisturbin med $P = 69$ MW, $H = 257$ m och $D = 1,65$ m. Aggregatet togs i drift 1974. Kavitationsgarantin överskreds och första svetsreparationen gjordes 1977.

Därefter gjordes reparationer 1980, 1982, 1984, 1985, 1986, 1987, 1988, 1989, 1990 och 1991. Efter iakttagelsen att intervallen mellan reparationerna blivit allt mindre gjordes 1987 och 1989 reparationerna på verkstad tillsammans med försök att återställa den ursprungliga formen på skovlarna. Vissa skador lagades 1990 med Castolin HD 6868. Dessa åtgärder visade sig dock vid inspektionen 1992 inte ha gett förväntat resultat, vilket delvis kunde skyllas på den alltför kort tilltagna verkstadstiden.

En ny reparation på verkstad gjordes 1992. Mycket stor omsorg ägnades nu åt att ge skovlarna ursprunglig form genom påläggning av svetsmaterial även på icke kavitationsskadade ytor - sådana som formändrats genom spänningar från de upprepade svetslagningarna. Omsorg ägnades också åt jämnheten hos skovelformen uppströms skadorna. De egentliga skadeområdena lagades med Stellite 21.

Vid inspektionen 1994 var kavitationsskadorna så obetydliga att intervall på 4 - 5 år mellan lagningarna kan förväntas i framtiden.

Korsselbränna kraftstation

Stationen har två vertikala Francisturbiner med vardera $P = 62$ MW vid $H = 108$ m och $D = 2,75$ m. De togs i drift 1961 - 62. Löphjulen byttes 1983 mot nya med något större effekt.

Före löphjulsbytet hade kavitationsskadorna varit obetydliga. Efter bytet överskreds kavitationsgarantin (SEN 26 80 10) och successiva lagningar och formkorrektioner gjordes vartannat år fram till 1992 då garantin innehölls. Reparationerna har gjorts med normala rostfria elektroder. Man planerar att vid nästa reparation använda Stellite 21 och förväntar sig därefter att få intervall på mer än 5 år mellan reparationerna.

Bergvattnets kraftstation

Stationen har en vertikal Francisturbin med $P = 21$ MW, $H = 70$ m och $D = 1,95$ m. Aggregatet togs i drift 1968. Svetsreparation av kavitationsskador har därefter gjorts cirka vartannat år. Försök till förbättring av skovelform har också gjorts.

Skovlarna lagades med Stellite 21 och HQ 913 första gången 1989. Senare inspektioner och efterlagningar har visat formändringar runt de lagade områdena på grund av att det

pålagda hårda materialet är mera svårslipat än grundmaterialet. Man förväntar sig dock att intervallen mellan reparationerna i framtiden skall vara mer än fördubblat.

4. DETEKTERING AV KAVITATIONSEROSION

Under ideala förhållanden skulle en vattenturbin kunna drivas från tomgång till maximal öppning utan några inskränkningar. En exakt överensstämmelse mellan maximalt pådrag och garanterad effekt uppnås emellertid sällan. De flesta turbiner har därför en marginal, som om den utnyttjas innebär ett närmande till eller passage över en kavitationsgräns. Denna gräns bestäms ofta genom att några personer lyssnar efter kavitationsbuller, och subjektivt bedömer när bullret blir för starkt. Särskilt för Francisturbiner har dessutom bestämts ett dellastområde där aggregatet ansetts gå "oroligt".

Sedan mättekniken utvecklats har mätDon av olika slag ersatt subjektiva bedömningar. Det har emellertid inte funnits kunskaper eller instrument för att under drift mäta kavitation eller dess skadeverkningar. Forskning på området har pågått och pågår.

Denna studie har syftat till att söka finna möjligheter att under drift detektera utvecklingen av kavitationsskador i vattenturbiner. Vilka metoder erbjuds? Har dessa metoder kunnat verifieras vid modellprov och i anläggningar? Vilka fördelar och nackdelar har de?

4.1 Litteraturstudie

Nedan angivna numrering hänför sig till källor i kapitel "6. REFERENSER", delrubrik "Detektering".

Respektive författare framför naturligtvis egna åsikter. Dessa delas inte alltid helt av projektgruppen och en del avvikande åsikter återfinns i punkten 4.1.6.

4.1.1 Kavitationsegenskaperna, baserade på modellstudier

Arndt m. fl. [1] hävdar att kavitationserosionens sannolikt viktigaste skada är den mindre livslängd och försämrade verkningsgrad som upprepade svetslagningar leder till. Tekniska krav och kvalitetskontroll vid leverans av nya aggregat kan inte nog betonas för att få en anläggning utan kavitationsskador. Marginalerna är små.

Studier av möjligheterna att bestämma kavitationserosion för prototypurbiner från teoretiska analyser och modellförsök har utförts i Kanada under 1980-talet av Institut de Recherche d'Hydro-Quebec (IREQ), **Simoneau m. fl. [2]**. Författarna anser sig ha visat att skadorna blir väsentligt mindre vid modellprov än vid anläggningar. Som huvudskäl anges att avverkningen var knappt mätbar på modellerna, att modeller och anläggningar arbetade vid olika Reynolds tal, och att anläggningsturbinerna hade vissa tillverkningstoleranser.

I studien [2] har IREQ använt två mätsystem. Det ena är i Kanada och Frankrike utvecklade elektrokemiska givare, (i Kanada kallade DECER av **D**etection **E**lements for **C**avitation **E**rosion **R**ate), monterade på den yta där erosionen ska mätas, det andra givare för vibrationssignaler placerade på sugrörskona, ledskoveltapp och lager. DECER-tekniken utnyttjar små titanelement, vars passiverande oxidskikt angrips av kavitation. Därvid uppstår en elektrisk ström, vars styrka mäts med en galvanometrar. Strömstyrkan visar sig ha likartat tidsförlopp som materialförlusterna på grund av kavitation, och tas som

ett mått på dessa.

Jämförelser av resultat från de två mätsystemen visade att vibrationssignalerna vid frekvenser över 10 kHz kunde ge likartade relativa mätvärden som dem från DECER. De senare visade sig emellertid inte vara tidsstabila.

Kalibrering till absolut skada var betydligt svårare. Resultaten bedömdes vid rapporttillfället 1988 vara otillräckliga. Fortsatta långtidsförsök behövdes för att få säkra underlag.

Fortsatt utveckling i Frankrike (där givarna kallas DECAVER av **DE**tecton of **CA**Vitation and **ER**osion) har rapporterats av **Chincholle [3]**. Denne hävdar bl a att dessa givare bör placeras på stationära komponenter, och har försökt knyta förlusten i titanoxid till liknande förluster i rostfritt stål. Arbetet fortsätter även i Kanada med stöd av Canadian Electrical Association (CEA) och resulterat i bl a en sammanfattning av **Bourdon m. fl. [4]** vid ett ASME möte 1993. Försök med en vingprofil i kavitationstunnel och därpå med modellturbin och slutligen prototypaggregat redovisas. Samma mekanismer för kavitationserosion återfinns i alla tre försöken men vibrationssignaturen modifieras av de specifika flödesförhållandena.

4.1.2 Kavitationsbuller

Farhat m. fl. [5] har jämfört bl a tryckvariationer och av kavitation orsakade vibrationer på en skovelpprofil. Man har kunnat bekräfta att kavitation ger upphov till vibrationer och att vibrationernas RMS-nivå varierar linjärt med "kavitationsintensiteten".

De kavitationsorsakade högfrekventa vibrationerna moduleras av t ex virvlar framkallade vid aggregatets rotation. Kavitationsorsakande tryckpulsationer och vibrationer i en vattenturbin moduleras av frekvensen i de tryckändringar som uppstår i turbinen när en löpskovelpasserar en bestämd punkt i turbinen (löpskovelpassagefrekvensen = Blade Passage Frequency = BPF) och av frekvensen i de tryckändringar som påverkar en enskild löpskovelpasserar en ledskovelpasserar (ledskovelpassagefrekvensen = Guide Vane Passage Frequency = GVPF). Även Bourdon m fl redovisade sådana resultat [4]. Vid mätning i modell dominerar modulering med löpskovlarnas passagefrekvens och i prototyp med ledskovelpassagefrekvensen.

4.1.3 Vibrationsmätningar för detektering

Strong m. fl. [6] har försökt korrelera faktisk kavitationsskada mot vibrationssignalens toppvärde i frekvensområdet 1 - 10 kHz, från givare på sugrör, löphjulskammarring, ledkrans etc. Deras övertygelse är att kavitationserosionen vid olika pådrag kan mätas med hjälp av accelerometer.

Detektering av kavitation genom mätning av högfrekvensstötter i området 100 kHz - 1 MHz har studerats av Sulzer-Escher Wyss genom **Nerz [7,8]**. I modellförsök jämfördes högfrekvensstöterna vid kavitation i kanalerna mellan löpskovlarna och mot löphjulets ytor.

Vid studier av kavitationsblåsors tillväxt och implosion har **Avellan m.fl. [9]** registrerat tryckpulser och vibrationssignaler. Studierna visar att implosionerna detekteras av tryck- och vibrationssignalgivare.

Omfattande studier av kavitation i pumpar av **Gulich [25]** visar ett samband mellan kavitationsljud och kavitationserosion. Gulich menar att mätning av intensiteten hos kavitationsljud direkt i vattnet är säkrare än mätning av tryck/vibrationsnivån i t ex pumphuset. De senare är beroende av material och vägg tjocklek, och dessutom påverkas de yttre mätpunkterna sannolikt mer av främmande störningar. Han utesluter dock inte mätning med utanpåliggande accelerometer.

Tennessee Valley Authority (TVA) [12] har utvecklat sensorer för akustisk emission, AE-sensorer, som med ett chip för signalbehandling förstärker, filtrerar och beräknar RMS värdet. Givarna är accelerometer för frekvenser upp till 20 MHz. Mätssystemet anses vara billigt, flexibelt och tillförlitligt under lång tid.

TVA [10, 11] har rapporterat om lyckade försök att detektera kavitationserosion med sådana AE-sensorer. Deras signaler är representativa för kavitationsintensiteten när det finns en direkt akustisk väg mellan platsen där materialavverkningen sker och givaren.

I en **EPRI rapport 1987 [13]** har **Abbot m.fl.** redovisat utvecklingen av ett kommersiellt mätsystem. Metoden som marknadsförs av Accusonic bygger på att de högfrekventa kavitationssignalerna som ger tryckvågor/vibrationer i materialet moduleras med BPF (se 4.1.2).

Accusonics mätsystem har beskrivits av **Abbot och Shanahan i [14]** där också resultat från olika mätningar redovisas. Mätningar med Accusonics system har gjorts på en rad anläggningar och har tillämpats både på modellturbiner och prototypaggregat [**15, 16, 17, 18, 19, 20, 21**].

Inom ramen för Elforsks projekt "Kavitation i vattenturbiner" har mätningar utförts med Accusonics system i Gejmnäs och Edensforsen av **Shanahan [22, 23]**.

I Edensforsen gjorde Vattenfall Utveckling genom **Lindström [24]** även jämförelser med en liknande metod. Den visade på en tydlig modulering med GVPF (se 4.1.2) i driftområden där kavitationserosion bedöms ske.

4.1.4 Kavitationsskadeklocka för bättre driftstrategi

Förhållandet mellan kavitationsintensitet och materialets resistens bestämmer om kavitationserosion inträffar och med vilken hastighet avverkningen sker. Ljudtrycket från kavitationsimplosionerna skulle enligt **Gulich [25]** sammanfatta alla parametrar som påverkar kavitationsintensiteten. Det finns normalt ett tröskelvärde för ljudtrycket under vilket ingen erosion uppstår. Gulich har vid kavitationsstudier på **pumpar** använt följande modell:

$$E \propto p_c^2 / R^2$$

där E = erosionshastigheten
 p_c = ljudtrycket från kavitationsimplosionerna
 R = draghållfastheten för skovelmaterialet

Ett samband enligt ovan kan användas för att bedöma om det är lönsamt att utsätta en pump för kavitation. Eventuellt skulle ett liknande samband kunna tillämpas på turbiner för att bedöma om driftbegränsningar är motiverade.

Accusonic menar att den modulerade amplituden vid BPML (se 4.2.1) är ett mått på den pulserande delen av kavitationsintensiteten och ett mått på den skadliga kavitationsintensiteten. BPML används för att fastställa kavitationserosionens relativa fördelningen på olika driftlägen. Genom att mäta under en längre period och jämföra med faktisk materialavverkning kan en korrelation erhållas mellan BPML och materialavverkningstakt.

Erfarenheten har visat att en stor del av erosionen i vissa aggregat kan uppstå under korta drifttider med mycket högre kavitationsintensitet än i övriga driftlägen. Kunskaper om dessa driftlägen kan vara underlag för att ändra driftstrategin i vissa anläggningar [14, 15].

Knapp, Schneider och Schilling [26] och [27] betonar att kavitationsintensitet lätt kan detekteras, och att detektering av erosionshastighet kanske kan komma att kunna detekteras i framtiden. För det senare förutsätts att mättekniken kan kalibreras i anläggningen, och att ytterligare grundläggande forskning genomförs om sambandet mellan kavitationsbuller och erosion. Tekniken kan troligen förenkla värderingen av modellprov, genom att sambandet mellan σ_1 och kavitationsbuller kan kalibreras i likartat byggda modeller.

4.1.5 Författarnas slutsatser och rekommendationer

För kvalitetskontroll och vid optimering av initialkostnad och kostnad för kavitation kan detektering av erosionstakten både vid modellprov och idrifttagning vara värdefull.

Kavitationsorsakade vibrationer moduleras/fångas upp av karakteristiska frekvenser för den aktuella konstruktionen. De kan vara resonanser från stående tryckvågor eller pulsationer från t. ex. varje passerande löpskovel.

4.1.6 Projektgruppens kommentarer

Det är möjligt att med signalgivare för vibrationer detektera kavitationsintensitet. Redan skillnader i avstånd och i vattnets kvalitet (luftinnehåll, mängd av kavitationsblåsor) mellan implosioner och mätställe i t ex modell och anläggning gör det osannolikt att ett enkelt universellt mått på intensitet skulle motsvara en viss erosionshastighet. Till dessa svårigheter kommer skillnader i konstruktion och material. Erhållna relativvärden kan efter tidskrävande individuell kalibrering ge vissa resultat.

Det kommer att vara mycket svårt att finna ett samband mellan "kavitationsintensiteten", mätt som ljudtryck på ett definierat sätt, och skadetillväxten. Det av Gülich [25] givna

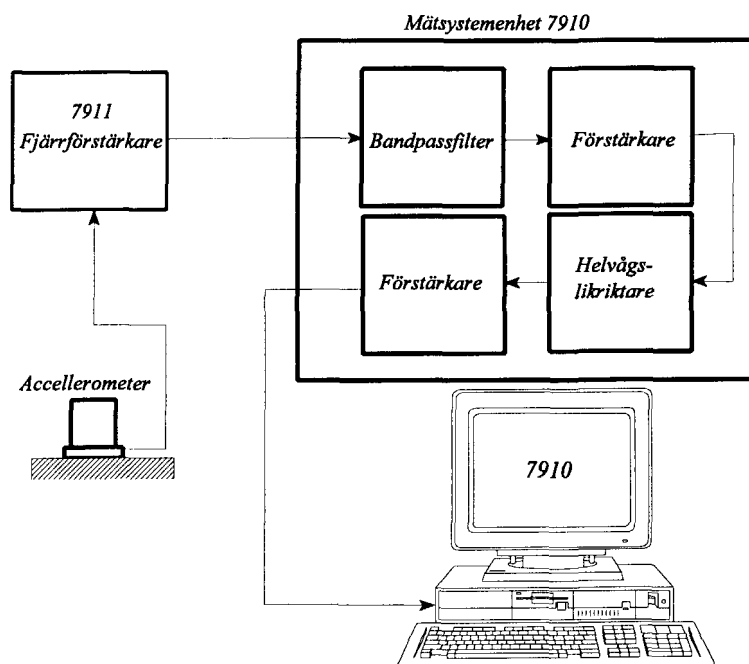
sambandet är en för vattenturbiner oacceptabel förenkling, och sannolikt kan detsamma sägas om de samband som Simoneau [4] använt för slutsatsen att prototyperna skadas mer än modellerna. Till den senare slutsatsen hör gruppens åsikt att stora skador på prototyper ofta beror på alltför rikliga tillverknings toleranser. Sådana toleranser har utformats för verkningsgradsgarantier och kan vara otillräckliga för att garantera låg kavitationserosion.

Ett antal mätningar refereras i [15 - 24]. De har inte alla givit övertygande positiva resultat.

Genom att med enkla medel skaffa information om ljudtryck och kavitationsskador skulle ett samband kunna konstrueras och användas för kalibrering av ett varningssystem. Detta bör kunna bli ett stöd i arbetet med att minska skador. Accusonic's mätsystem kostar över 100 kkr. Det bör därför knappast installeras allmänt för svenska aggregat. TVA's (se sid 33) mätsystem anses kosta ca 2.000 kr plus ca 20 h arbetstid för placering och intrimning.

4.2 Fältförsök

Inom ramen för Elforsk-projektet "Kavitationsskador i vattenturbiner" har två olika utrustningar för detektering av kavitationserosion provats. Den ena utrustningen var



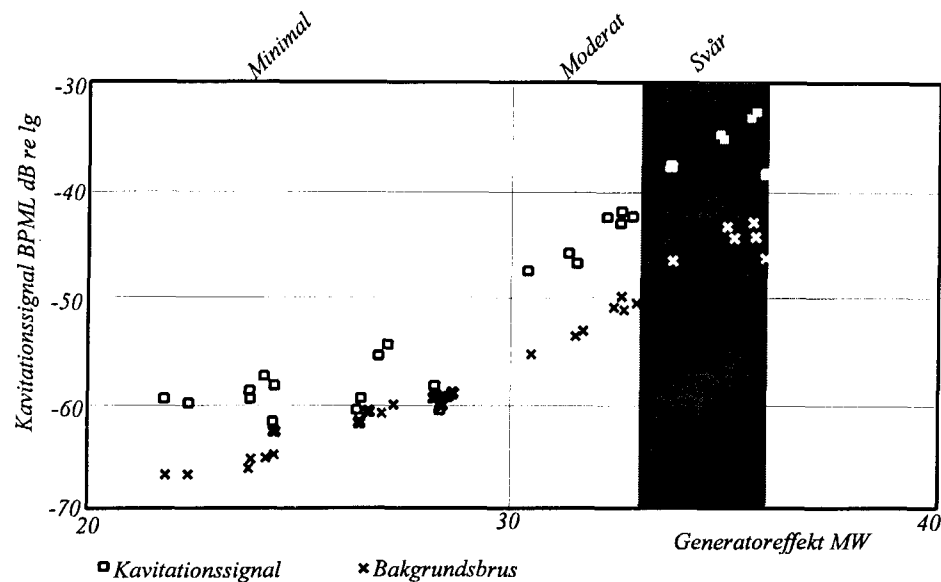
Figur 4.1: Accusonic mätsystem 7910, principschema

Figure 4.1: Principle scheme of the Accusonic measuring system 7910

Accusonic's utrustning för kavitationsmätning modell 7910. Denna har provats både på en Kaplanturbin i Edensforsen och på Francisturbinen i Gejmnå. Båda anläggningarna har haft stora problem med kavitationsskador. Den andra utrustningen har tagits fram av Vattenfall Utveckling, och är grundad på en resonansaccelerometer. Denna utrustning har bara provats på aggregat 2 i Edensforsen.

4.2.1 Utrustning från Accusonic

Accusonics mätsystem har beskrivits av Abbot och Shanahan i bl a [13] (se kapitel 6) där även resultat från olika mätningar redovisas.



Figur 4.2: Resultat av Accusonics mätning i Edensforsen

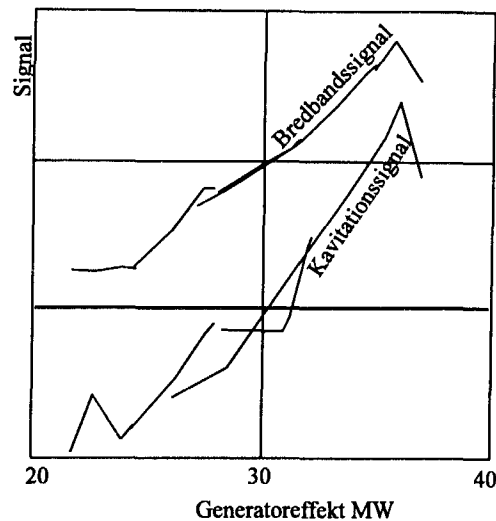
Figure 4.2: Results from the Accusonic measuring at Edensforsen

Givarna är små accelerometrar med konstant känslighet upp till 20 kHz. Dessa monteras vanligen med epoxylim på en ledskoveltapp. Accusonic studerar speciellt amplituden vid löpskovelpassagefrekvenser, vilket de menar är ett mått på kavitationspulsationernas intensitet. De anser att kavitatten börjar när amplituden är 3 dB över bredbandsignalen och normalt detekteras detta långt innan någon påverkan av verkningsgraden kan påvisas.

4.2.2 Utrustning från Vattenfall Utveckling AB

Vattenfalls utrustning bygger på en resonansaccelerometer, vanligen placerad på ledskoveltappen. Accelerometern fångar upp höga frekvenser, över 10 000 Hz. Före förstärkaren passerar signalen ett högpasfilter på 3 000 Hz. Samplingen sker med låg frekvens 1 250 Hz, med ett lågpasfilter på 312 Hz. Därefter sker frekvensanalyser. Tanken med metoden är att erhålla en signal som är representativ för kavitationserosionen i turbinen.

Vid användande av denna teknik kan en sidotopp till GVPF (se 4.1.2) komma att framträda karakteristiskt i de områden där kavitatten förekommer.



Figur 4.3: Resultat av Vattenfalls mätningar vid varierande kombinerings i Edensforsen G2

Figure 4.3: Results of Vattenfall's measurements at various cam relations for turbine 2 at Edensforsen

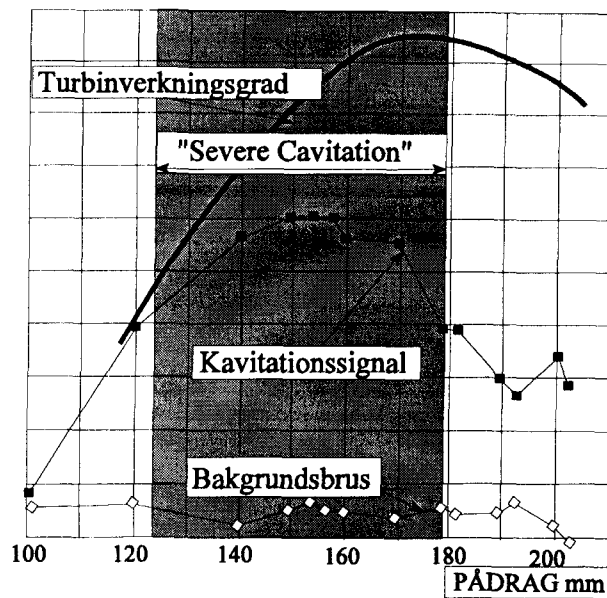
4.2.3 Slutsatser

Vid proven i Edensforsen visade både Accusonics och Vattenfalls utrustning att vid effektuttag över 32 MW ökar kavitationssignalen påtagligt.

Av Accusonics resultatredovisning framgår att BPML-signalen ökar mer än bakgrundsbruset över 30 MW, vilket enligt Accusonic är ett tecken på att kavitationserosionen tilltagit.

Enligt Vattenfalls redovisning tilltar mätsignalen i förhållande till bruset ungefär vidsamma driftpunkt. Vid proven i Gejmnå är resultatet något annorlunda. Enligt Accusonics uppfattning förekommer svår kavitation (severe cavitation) under och vid bästa verkningsgrad, se figur 4.4. Detta gäller enligt Accusonic såväl buller som erosion. Principiellt är det i detta område inloppskavitation uppträder. Från den last där kavitation över huvudtaget börjar förekomma till last vid bästa verkningsgrad då inloppskavitationen vanligen försvinner. Vid högre last finns normalt endast utloppskavitation som kan börja uppträda när lasten närmar sig bästa verkningsgrad för att sedan växa till och nå maximal intensitet vid full last. Ovanstående avser kavitation som implosionsförlopp vilket inte nödvändigtvis medför erosion.

Vid Accusonics mätningar avtar kavitationsbullret (enligt Accusonic också erosionen) i området över bästa verkningsgrad och upp till maxlast. För att bedöma om mätningen verkligen påvisar erosion och inte enbart buller har aggregatet under ca två år körts i området nära maxlast, där Accusonic visat låg kavitationssignal. Under påföljande halvår, ca 3500 drifttimmar i området nära bästa verkningsgrad, där Accusonic uppmätt "severe cavitation". Inspektionerna mellan och efter körningarna har inte visat någon ökad erosion genom kavitation. Det är alltså oklart om det finns något enkelt samband mellan på detta sätt registrerad kavitationssignal och kavitationserosion.



Figur 4.4: Resultat av Accusonics prov på akustisk emission i Gejmvån.

Figure 4.4: Results of the Accusonic measurements of acoustic emission at Gejmvån

Accusonics utrustning har kunnat användas i Francisturbinen i Gejmvån och en Kaplanturbin Edensforsen. I dessa anläggningar har utrustningen visat driftområden med olika signalnivå för kavitationsbuller. På grund av de korta provtiderna kan det inte avgöras om eller hur mycket skaderisken skulle öka vid lång tids drift i något av de olika områdena.

Vattenfalls utrustningar har i Edensforsen registrerat driftområden med olika signalnivå för kavitationsbuller. För att analysera signaler från Vattenfalls utrustning krävs mer arbete och kunskaper då utrustningen ej är speciellt avsedd för denna typ av mätningar.

Med båda utrustningarna kan driftområden med olika signalnivåer påvisas. Resultaten kan på sikt ge möjlighet att utifrån signalnivån välja bättre driftområde eller en för en Kaplanturbin bättre kombinerings. Därmed kan skador genom kavitation eventuellt minskas. Ytterligare insatser bör inriktas på att fastställa om ovan diskuterade samband mellan mätning av kavitationssignal och erhållen kavitationserosion är möjliga att bestämma generellt eller för individuella turbiner.

5. SLUTSATSER OCH REKOMMENDATIONER

De i denna studie gjorda erfarenheterna kan direkt tillämpas vid svetslagning av kavitationsskador på vattenturbiners löphjul. Man kan därefter vänta sig en förlängning av intervallet mellan reparationssvetsning med ca 5 gånger.

Tre av de laboratorieprovade svetsmaterialen har visat sig kunna motstå kavitation avsevärt bättre än de övriga - Stellite 21, Hydroloy HQ913 och Castolin 9080. I jämförelse med den vid både tillverkning och reparation av löphjul mycket allmänt använda elektroden OK 63.30 är dessa material ca 40 gånger bättre vid laboratorieprov, mätt som mg/h förlorat material. Fältproven bekräftar den vid laboratorieproven gjorda rangordningen av svetselektroder, så långt det varit möjligt att vid besiktningar tyda skadetillväxten.

Erfarenheter från svetsning och slipning av svetsmaterialen indikerar att Stellite 21 har de bästa egenskaperna vid handhavandet, såväl enligt fältproven som enligt av KTH utförda prov. Av de senare framgår även att manuell svetsning med belagda elektroder (MMA= Manual Metal Arc) ger det bästa resultatet, och att MIG/MAG inte lämpar sig för de svåra svetslägen som är ofrånkomliga vid reparation i ett kraftverk.

Vissa nya material kan förefalla mer svårsvetsade än de tidigare använda. Detta bör kunna avhjälpas genom utbildning av dem som skall utföra dessa reparationer. Därvid bör också nya kunskaper spridas om hur deformation av skovlar på grund av svetsning skall undvikas. Ändringar av skovelform och åtgärder för att återställa ursprunglig form på löphjul som reparerats många gånger och därvid deformerats har nämligen givit mycket goda resultat.

Från tid till annan förändras de förutsättningar som legat till grund för en anläggnings ursprungliga optimering. Sådana förändringar kan ställa helt nya krav på turbinens form för att skador från t. ex. kavitation skall kunna undvikas.

Elektroden Hydroloy HQ913, som är en kanadensisk produkt, har visat sig vara mycket svår att få tag i på europeiska marknaden. Den har därför inte kunnat ingå i KTHs undersökning. Castolin 9080 var enligt KTHs studie svårare att svetsa och slipa, och detta har också nämnts av dem som gjort arbetet vid fältproven.

Nya material för skovlar och svetsning med lovande egenskaper har kommit fram på senare tid, men de har inte kunnat tas med i studien. Ytterligare material kommer säkert att utvecklas.

Studier av polymera/keramiska beläggingsmaterial har visat att de inte kan bidra till att lösa problem med kavitation som åstadkommer skador på normalt använda skovelmateriel.

Teknik för detektering av kavitation är under utveckling. Den förmår för närvarande identifiera kavitation som fenomen, men ytterligare forskningsinsatser fordras innan sambandet mellan signalnivå och erosion kan fastställas.

6. REFERENSER

Översikter - allmänt

Eisenberg, P.; Preiser, H.S.; Thirvengadam A.T. : "On the mechanism of cavitation damage and methods of protection" - Trans. Soc. Nav. Arch. 1966

Knapp R.T.; Daily J.W.; Hammitt F.G.: "Cavitation" - McGraw-Hill 1970

Pawlikewich W.; Sinclair J.P.: "The trend to zero cavitation in hydraulic turbine operation" - Transactions of Canadian Electrical Association, Volume 15 Part 2, 1976

Hammitt F.G.: "Cavitation and multiphase phenomena" - McGraw-Hill 1980

Arndt R.E.A.: "Recent advances in cavitation research" - Academic Press 1981

Simoneau R.; Fihey J-L.;Roberge R.: "The effect of corrosion in low-intensity cavitation erosion" - ASME Symposium Boulder 1981

Simoneau R.; Fihey J-L.; Chincholle L.: "L'effet d'activation anodique de la cavitation érosive" - IAHR Symposium Amsterdam 1982

Chahine G.L.: "Pressure field generated by the collective collapse of cavitation bubbles" - IAHR Symposium Amsterdam 1982

Durrer H.: "Kavitationserosion und Strömungsmechanik" - Technische Rundschau Sulzer 1986

Arndt R.E.A.; Ferreira A.; Rodrigue P.R.;Sinclair J.P.; Voigt R.L.: "Assessment and mitigation of cavitation pitting in hydraulic turbines" - IAHR Symposium Montreal 1986

Avellan F.; Dupont P.: "Cavitation erosion of the hydraulic machines: generation and dynamics of erosive cavities" - IAHR Symposium Trondheim 1988

Bourdon P.; Simoneau R.; Avellan F.; Farhat M.: "Vibratory characteristics of erosive cavitation vortices downstream of a fixed leading edge cavity" - IAHR Symposium Belgrad 1990

Modellprov - skaleffekter

Causon G.J.: "Sonic cavitation studies on model and prototype water turbines" - Engg. Trans. I.E. Australia 1972

Hammit F.G.: "Cavitation erosion. The state of the art of predicting capability" - Applied Mechanics 1979

Sotnikov A.A.; Pylayev N.I.: "Comparison of cavitation erosion in model and full scale hydraulic turbines" - IAHR Symposium Tokyo 1980

Hutton S.P.; Selim S.M.A.; Lush P.A.: "Surface roughment measurements for assessing cavitation erosion" - IAHR Symposium Amsterdam 1982

Rao P.; Buckley D.: "Cavitation erosion size scale effects" - Wear 1984

Sotnikov A.A.; Harriman F.B.: "An investigation of cavitation phenomena on model and prototype Kaplan turbines" - IAHR Symposium Montreal 1986

Gindroz B.; Avellan F.; Henry P.: "Similarity rules of cavitation tests: The case of the Francis turbine" - IAHR Symposium Trondheim 1988

Gindroz B.; Henry P.; Avellan F.: "Francis cavitation tests with nuclei injection: A new test procedure" - IAHR Symposium Sao Paolo 1992

Laperrousaz E.; Dorey J.M.; Rigg J.P.; Simoneau R.; Avellan F.; Henry P.: "Predicting Cavitation in Francis Turbines on the Basis of Scale Model Testing", - IAHR Symposium Beijing 1994

Detektering (Numreringen hänför sig till litterarturstudien i kapitel 4)

[1] Arndt R.E.A; Voight Jr, R.L; Sinclair J.P; Rodrique P; Ferreira A: "Cavitation erosion in hydroturbines", Journal of Hydraulic Engineering, 1989, Vol.115, nr 10.

[2] Simoneau R; Bourdon P; Désy N; Grenier R.: "Cavitation detection in model tests of hydraulic turbines", Report for the Canadian Electrical Association, Maj 1988, CEA No. 230 G 439

[3] Chincholle L.: "Measurement Generalization of any Erosion in Hydraulic Systems - Flow Erosive Intensity Sediment Concentration Measuring", IAHR Symposium Beijing 1994

[4] Bourdon P.; Simoneau R.; Avellan F.: "Erosion Vibratory Fingerprint of Leading Edge Cavitation of a Naca Profile and of a Francis Model and Prototype Hydroturbine", Bubble Noise and Cavitation Erosion in Fluid Systems ASME 1993, 1993, Vol.ASME 1993.

[5] Farhat M.; Pereira F.; Avellan F.: "Cavitation Erosion Power as a Scaling Factor for Cavitation Erosion of Hydraulic Machines", 1993 ASME Winter Annual Meeting, New Orleans, Louisiana, US, Nov 28 - Dec 3, 1993, 1993, Vol.Fed-Vol. 176.

[6] Strong W.F; Mussalli Y.G: "Inservice diagnostic monitoring of turbine vibrations and cavitation", Waterpower 1985, Turbine vibrations and cavitation, 1985

[7] Nerz K.P: "Früherkennung und Überwachung materialschädigender Vorgänge durch digitale Schallemissionsanalyse", Technische Rundschau Sulzer, 1986, Vol.3

[8] Nerz K.P: "Investigation on flow cavitation in a Francis turbine by digital acoustic emission analysis", The 15th meeting of European working group on acoustic emission

[9] Avellan F; Farhat M: "Dynamique des cavités érosives: étude du collapse des

vortex cavitants", La Houille Blanche, 1988, Vol.7/8

[10] March P.M; Jones R.K: "Improving efficiency, saving money by monitoring turbine cavitation", Hydro review, 1993, Vol. Oct

[11] March P; Jones K: "Laboratory and field experience with cavitation monitoring of hydroturbines", Cavitation Monitoring, Waterpower 1991, 1991

[12] Derakhshan O; Houghton J.R; Jones R.K; March P.A: "Cavitation monitoring of hydroturbines with RMS acoustic emission measurement", Acoustic emission, 1991

[13] "Acoustic and Vibration Techniques for Cavitation Monitoring", EPRI AP-5385 Project 2602-3, Final Report, September 1987.

[14] Abbot P.A; Morton D; Shanahan T: "Hydroturbine cavitation detection using advanced acoustic emissions techniques", Symposium on Hydroacoustic Facilities, Instrumentation, and Experimental Techniques, ASME Winter Annual Meeting, Atlanta, Ga, 1991, Vol.appendix A

[15] Abbot P.A: "Cavitation detection measurements on Francis and Kaplan hydroturbines", 3rd International Symposium on Cavitation Noise and Erosion in Fluid Systems, ASME Winter Annual Meeting, San Fransisco, CA, USA, December, 1989

[16] Abbot P.A; Gedney C.J; Brown N.A: "Cavitation monitoring of two axial-flow hydroturbines using novel acoustic and vibration methods", IAHR Symposium Montreal 1986

[17] Abbot P.A; Greeley D.S: "Cavitation noise investigations", ASME New Orleans 1984

[18] Abbot P.A; Lowell F.C: "Listening to your turbines", Hydro Review, 1991, Vol.10, Oktober

[19] Abbot P.A; Walsh J; Halas R: "Cavitation noise investigaton of a pump-turbine", Waterpower '91, ASCE New York, 1991

[20] Abbot A; Shanahan T; Lowell Jr, F.C: "Acoustic cavitation tests and analyses of pump-turbine units 3 and 4 at the Northfield mountain plant", 1990 January

[21] Accusonic Division, O.R.E. International, Inc., Falmouth, Massachusetts, "Performance tests on pump turbine units at Salina pump storage plant", 1991

[22] Shanahan T. B: "Cavitation Acoustic Emission Test at Gejmån", Accusonic Report No. EX23405A, 1993.

[23] Shanahan T. B: "Acoustic Emission Cavitation Test at Edensforsen Unit 2", Accusonic Report No. FP23884, 1994

[24] Lindström H.; Aurosell U.: "Detektering av kavitationserosion med vibrationsgivare i Edensforsen G2 1994", Vattenfall Utveckling AB, VU - H 94:F3, 1994

[25] Gülich J.F; Rösch A, Sulzer Brothers Ltd., CH-8401 Winterthur, Switzerland: "Cavitation erosion in centrifugal pumps", Chemical Engineering Progress, 1989, Vol. November

[26] Knapp W; Schneider C; Schilling R: "Experience with an accoustic cavitation monitor för water turbines", IMechE Cambridge, Dec 1992

[27] Knapp W; Schneider C; Schilling R: "Ein Monitor-System zur akustischen Kavitationsüberwachung von Wasserturbinen", TU Wien Nov 1994

Material, lagning

Martin W.A.: "Metallurgical development of weld overlays for cavitation resistance" - Ontario Hydro Research 1963

"Steel for Water Turbines" - Swedish Power Association VAST, 1970

Hobbs J.M.; Brunton W.C.: "Comparative erosion tests on non-ferrous materials" - NEL 1971

Woodford P.A.: "Cavitation - erosion - induced phase transformations in alloys" - Met. Trans. 1972

Rao B.C; Rao P.V.; Rao N.S.L.: "Evaluation of erosion resistance of metallic materials and the role of materials properties in correlations" - J. of Testing and Evaluation 1979

Simoneau R.; Roberge R.: "Cavitation-corrosion damage mechanism in hydraulic turbine materials" - ASM Conference Harrison 1980

Heathcock C.B.; Protheroe B.E.; Ball A.: "Cavitation erosion of stainless steels" - Wear 1982

Anthony K.C.: "Wear-resistant cobalt-base alloys" - J. of Metals 1983

Hansen I.; Mørch K.A.: "Guide vanes in vibratory cavitation systems to improve cavitation erosion testing" - Technical University of Denmark, 1983

Simoneau R.: "The optimum protection of hydraulic turbines against cavitation erosion" - IAHR Symposium Stirling 1984

Akhtar A.; Rao A.S.; Kung D.: "Cavitation erosion of stainless steel, nickel and cobalt alloy weld overlay materials" - ASM 1984

Milne A.J.: "Cavitation erosion on a number of ceramic monolithic materials' coatings and metal platings" - IAHR Symposium Montreal 1986

Simoneau R.: "A new class of high strain-hardening austenitic stainless steels to fight cavitation erosion" - IAHR Symposium Montreal 1986

Rao A.S.; Kung D.; Akhtar A.: "Effects of stress on cavitation-erosion" - IAHR Symposium Montreal 1986

Rao A.S.; Kung D.: "Metallic overlay materials for the optimum cavitation performance of hydraulic turbines" - Canadian Electrical Association No 135 G 273 - 1987

Simoneau R.; Mossoba Y.: "Field experience with ultra-high cavitation resistance alloys in Francis turbines" - IAHR Symposium Trondheim 1988

Rao A.S.; Akhtar A.; Kung D.: "Interface cavitation erosion in carbon steel/stainless steel weldments" - IAHR Symposium Trondheim 1988

March P.A.; Karr O.F.; Curvin L.L.: "Laboratory and field comparisons of cavitation erosion resistance for base materials, weld overlays and coatings" - IAHR Symposium Trondheim 1988

Linder, J.: "Kavitation hos material för vattenturbintillämpningar" - Kraftverksföreningen VAST, 1989

Borg S.; Zhiliang Z.; Klein J.: "Undersökning av lämpliga svetslägen och parametrar vid kavitationslagning av vattenturbiner" - KTH/IMP/Svetsteknologi, Stockholm maj 1995

Normer, etc

SEN 2680 10 - Svensk standard "Vattenturbiner - Bedömning av kavitationsskador" - SEK 1972

IEC Publication 609 - "Cavitation Pitting Evaluation in Hydraulic Turbines, Storage Pumps and Pump-Turbines" - IEC 1978

IEC Publication 193 - "Model Acceptance Tests of Hydraulic Turbines" - IEC 1965 (Under omarbetning. Beräknas 1995 ersättas med nuvarande koncept IEC 4/111/CDV "Model Acceptance Tests to Determine the Hydraulic Performance of Hydraulic Turbines, Storage Pumps and Pump-Turbines")

ASTM G-32-85 - "Standard Method of Vibratory Cavitation Erosion Test" - Annual Book of ASTM Standards

APPENDIX 1

MALLAR FÖR SKADESKISSER

Detta appendix innehåller fyra mallar för dokumentation av kavitationsskador. Två mallar lämpar sig för Francisturbiner, de två övriga för Kaplanturbiner.

Följande bör finnas med i besiktningsdokumentationen:

Drifttid: Tidpunkt för besiktningen och drifttimmar sedan föregående besiktning.

Driftområde: Produktion och huvudsakligen använda effektområden sedan föregående besiktning, lämpligen som varaktighetsdiagram.

Skadeskisser: Samtliga skador ritas in på mallar för dokumentation enligt appendix 1. Skadans läge, yta och maxdjup skall framgå. Maximala skadedjupet kan mätas med spetslipat djupmätt på skjutmätt som hålles mot en böjbar ställinjal som följer skovelformen. Begränsningslinjer med mått kan ritas för vad som är:

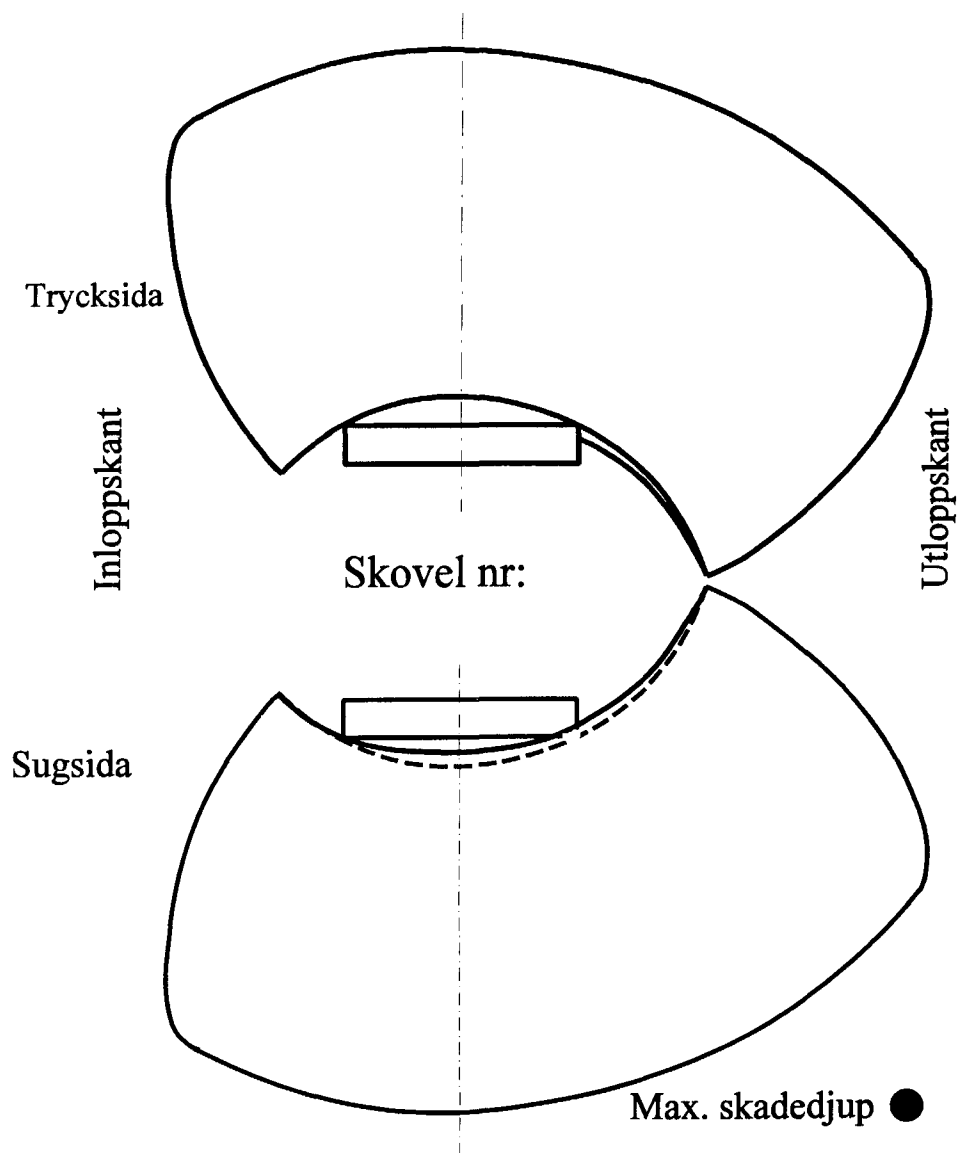
1. Matt yta
2. Eroderad yta med djup mindre än 0,5 mm
3. Skadad yta med djup större än 0,5 mm

DOKUMENTATION AV KAVITATIONSSKADA

ANLÄGGNING: _____ TURBIN NR: _____

AVSYNAT AV: _____ DEN: _____

KAPLAN



Skadekaraktär: 1: Matt yta

2: Eroderad < 0,5 mm

3: Skadad > 0,5 mm

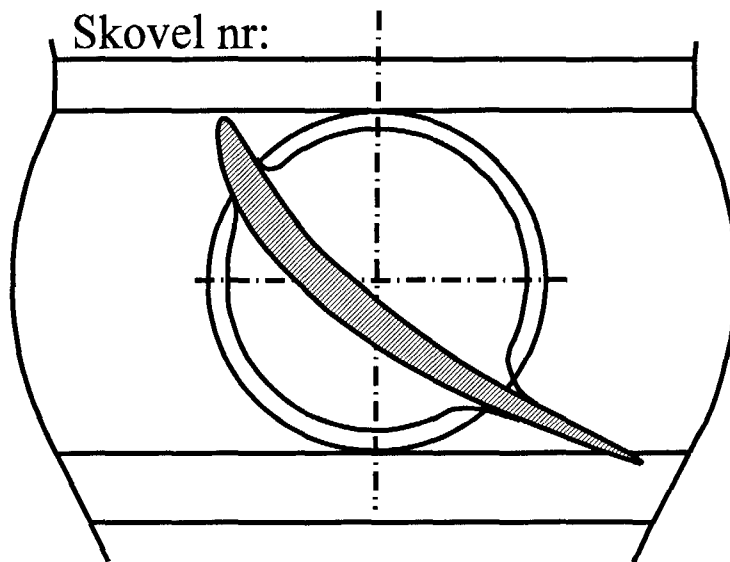
DOKUMENTATION AV KAVITATIONSSKADA

ANLÄGGNING: _____ TURBIN NR: _____

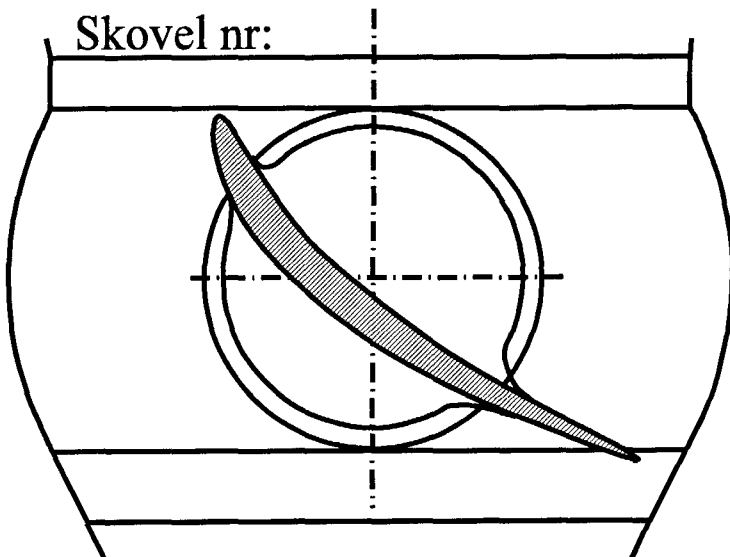
AVSYNAT AV: _____ DEN: _____

KAPLAN

Skovel nr: _____



Skovel nr: _____



● Max. skadedjup

Skadekaraktär: 1: Matt yta

2: Eroderad < 0,5 mm

3: Skadad > 0,5 mm

DOKUMENTATION AV KAVITATIONSSKADA

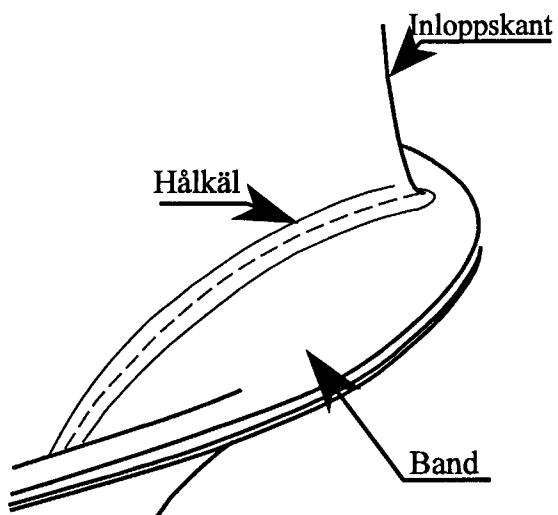
ANLÄGGNING: _____

TURBIN NR: _____

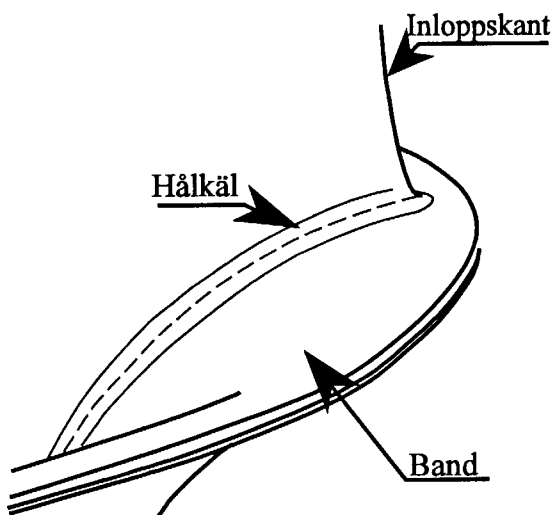
AVSYNAT AV: _____

DEN: _____

FRANCIS



Max skadedjup ●



Skadekaraktärer: 1: Matt yta

2: Eroderad < 0,5 mm

3: Skadad > 0,5 mm

DOKUMENTATION AV KAVITATIONSSKADA

ANLÄGGNING: _____

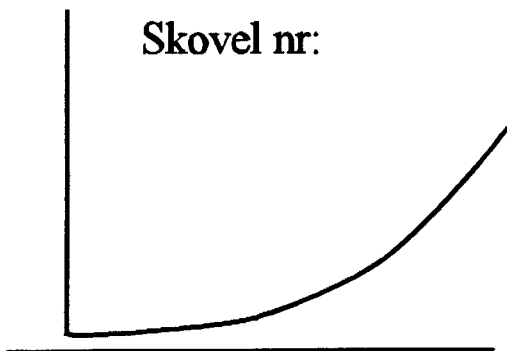
TURBIN NR: _____

AVSYNAT AV: _____

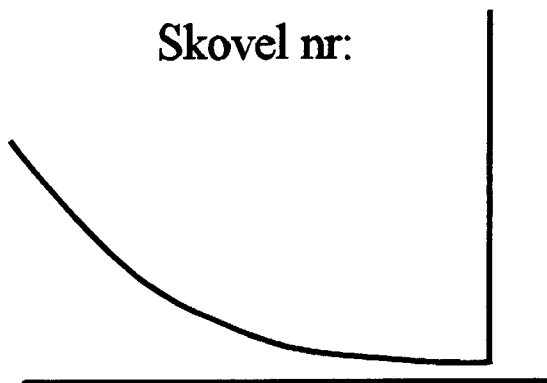
DEN: _____

FRANCIS

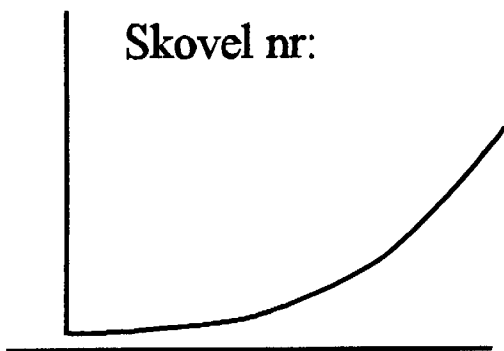
Skovel nr:



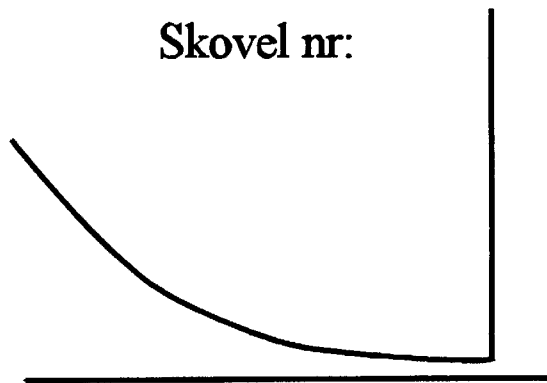
Skovel nr:



Skovel nr:



Skovel nr:



● Max. skadedjup

Skadekaraktärer: 1: Matt yta

2: Eroderad < 0,5 mm

3: Skadad > 0,5 mm

APPENDIX 2

MATERIALPROV I LABORATORIUM

MATERIALPROVNING I LABORATORIUM

1. Bakgrund

Kavitation i vattenturbiner samt reparation av dessa förorsakar årligen betydande kostnader inom vattenkraftindustrin. Inom uppdraget har skovelmaterial och material avsedda för reparation av kavitationsskador värderats i laboratorieprov.

Laboratorieprovningen har omfattat kavitationsprovning av skovel- och reparationsmaterial samt svetsbarhetsprovning. Kavitationsprovningen utfördes på fast monterade kutsar ovanför vilka ett vibrationshorn vibrerade med konstant frekvens och amplitud. Skadorna värderades som massförlust per tidsenhet.

Svetsbarheten provades genom påsvetsning och värderades genom metallografisk undersökning av bindzonen, bockningsprov samt hårdhetsmätning.

2. Provmaterial

Proven har utförts på sju skovelmaterial, nio svetsreparationsmaterial samt nio polymera ytbeläggningar. Av sju skovelmaterial är sex stål, med krom och nickel som viktigaste legeringselement, och ett en aluminiumbronslegering. Av svetsmaterialen är tre legeringar med kobolt som bas och resterande sex är stål med krom, nickel och molybden som viktigaste legeringselement. De har utnyttjats nationellt och internationellt vid reparation av erosions- och kavitationsskador, några av dem också vid tillverkning av löphjul.

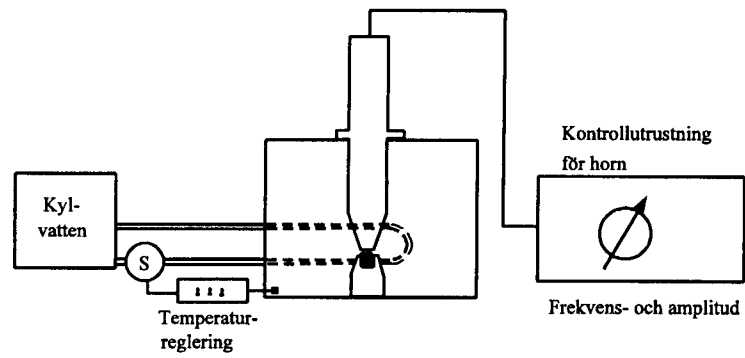
De provade icke metalliska materialen är Belzona Super Metal Glide, Belzona Ceramic-R+Ceramic-S + Super Metal Glide, Belzona Ceramic-R+Ceramic-S, Mega Metal MEGA TECH, Chesterton 890, Chesterton 855, Lithgow Saekaphen LTD FR 122, Devcon WR och Castolin Eutectic MeCaTeC 10. De är alla av tvåkomponenttyp, och alla utom det förstnämnda är keramikkompositer.

Skovelmaterialen härrör från skovlar vilka bytts ut i samband med renoveringar samt från vid- eller separatgjutna provstavsämnen från tillverkning. Provkutsar för elektrodgods framställdes genom svetsning på änden av en stålstav, ϕ 25 mm, varur kutsarna svarvades. För de polymera materialen applicerades beläggningarna på prefabricerade stålkutsar enligt tillverkarens arbetsinstruktioner. Provberedningen utfördes i verkstads- eller laboratiemiljö.

3. Kavitationsprovning

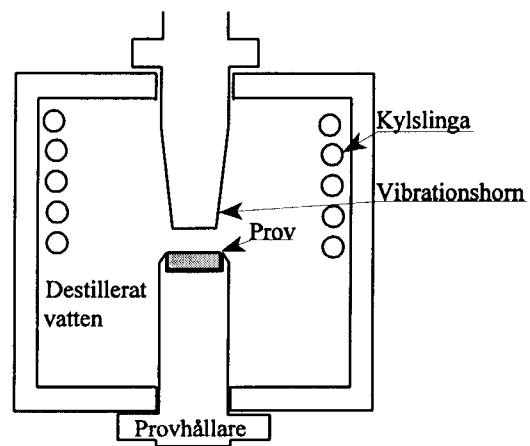
Kavitationsprovningen utfördes med utrustning med den amerikanska standarden ASTM G32-85 som utgångspunkt, enligt beskrivning av Hansson och Mørch vid Danmarks tekniska högskola. Utnyttjade uppställningar och parametrar redovisas nedan.

Arrangemanget framgår ur figur 1 och 2.



Figur 1: Provutrustning

Figure 1: Testing equipment



Figur 2: Detalj över provinfästning

Figure 2: Detail of test piece fixture

Tabell 1: Skovelmateriel

Material	Innehåll viktsprocent														
	C	Si	Mn	P	S	Cu	Cr	Ni	Al	N	Mo	Co	Fe	Cr _{Eq}	Ni _{Eq}
Gjutstål 13/0	0,32	0,41	0,72	0,036	0,018	0,09	12,8	0,38	-	0,09	0,10	-	bal.	13,5	13,0
Gjutstål 13/1	0,18	0,51	0,61	0,034	0,021	0,12	136	0,65	0,02	0,095	0,23	-	bal.	14,6	9,2
Gjutstål 13/4	0,042	0,55	0,64	0,026	0,011	-	12,7	4,1	-	0,08	0,43	-	bal.	14	3,1
Gjutstål 13/6	0,04	0,38	0,65	0,030	0,013	-	13,4	5,8	-	0,06	-	-	bal.	13,5	9,1
Gjutstål 16/5	0,039	0,43	0,80	0,014	0,010	0,02	15,5	4,66	0,14	0,35	1,08	-	bal.	17,2	7,3
Aluminiumbrons	-	0,08	0,98	-	-	bal.	-	4,9	10,2	-	-	-	4,2	-	-
SS-stål 2333	0,038	0,47	1,48	0,034	0,009	0,23	17,9	8,5	0,02	0,09	0,10	-	bal.	18,7	13,1

Tabell 2: Svetsreparationsmaterial

	Innehåll viktsprocent														
	C	Si	Mn	P	S	Cu	Cr	Ni	Al	N	Mo	Co	Fe	Cr _{Eq}	Ni _{Eq}
Castolin HD 6868	0,03	0,74	0,29	0,020	0,010	0,16	27,4	10,5	0,03	0,14	0,94	0,41	bal.	29,4	15,8
Castolin 9080	0,18	0,43	1,76	0,018	0,004	-	22,4	3,37	-	0,044	4,09	bal.	25,2	-	-
ESAB OK 63.30	0,29	0,87	0,68	0,020	0,015	0,07	18,4	12,3	<0,01	0,069	2,86	0,02	bal.	22,6	15,6
ESAB OK 63.53	0,38	0,39	0,69	0,019	0,007	0,02	18,2	11,9	<0,01	0,069	2,74	0,02	bal.	21,5	15,5
ESAB OK 84.42	0,13	0,52	0,39	0,013	0,004	0,03	13,3	0,08	0,01	0,024	0,01	0,02	bal.	14,1	4,9
Hydroloy HQ 913	0,17	0,61	0,70	0,016	0,008	-	24,3	3,62	-	0,036	3,85	bal.	29,1	-	-
Tribaloy T 800	0,06	3,4	0,61	-	-	-	17,8	-	-	-	26,9	bal.	-	-	-
Stellite 21	0,25	0,2	0,78	0,013	0,006	-	28,2	2,42	-	-	5,7	bal.	-	-	-
Sandvik 25.10.4.LR	0,02	0,43	0,65	0,015	0,008	-	24,2	9,6	-	0,09	4,1	-	bal.	28,9	13,2

- = ej analyserat $Cr_{Eq} = \%Cr + 1,5 * \%Si + \%Mo$ $Ni_{Eq} = \%Ni + 30 * (\%C + \%N) + 0,5 * (\%Mn + \%Cu + \%Co)$

Vibrationsenheten arbetar med en konstant frekvens av 20 kHz och amplituden topp-till-topp kan varieras i intervallet 20-50 µm. Provningskammaren har en diameter av 240 mm och är invändigt isolerad med vibrationsdämpande plastmaterial. Invändigt vid kammarens yttre vägg finns en sluten kylslinga som medger att temperaturen på det vatten provet utförs i hålls inom det i normen föreskrivna intervallet 20±1°C. I botten av kammaren monteras provhållaren vilken tillåter att provet kan positioneras på ett avstånd av 0-25 mm från det vibrerande hornet.

För mätning av massförlusterna hos provkutsarna utnyttjades en laboratorievåg med en noggrannhet av ±5 µg.

3.2. Provning

Provningen utfördes vid en temperatur av 20±1°C i destillerat vatten. Under proven var avståndet mellan vibrationshornet och provkutsen 0,5 mm och hornet vibrerade med en amplitud topp-till-topp av 25 µm. För polymera kompositmaterial för beläggning utfördes prov även med avståndet 1,0 mm mellan prov och vibrationshorn.

För att bestämma erosionen uttryckt som massförlust per tidsenhet avbröts varje prov och kutsen togs ut och vägdes varefter provet fortsattes. Under avbrotten tvättades de metalliska provkutsarna i finsprit, sköljdes i aceton, torkades och vägdes. Plastmaterialen behandlades lika men utan sköljning i aceton.

För svetsmaterial provades tre kutsar av vardera materialet tills dess konstant hastighet erhöles. För övriga material avbröts provet då beläggningarna lossnat, alternativt då 50% av materialet inom provytan kaviterat bort. För dessa material provades 1-2 kutsar.

3.3.Resultat

3.3.1. Skovelmateriel

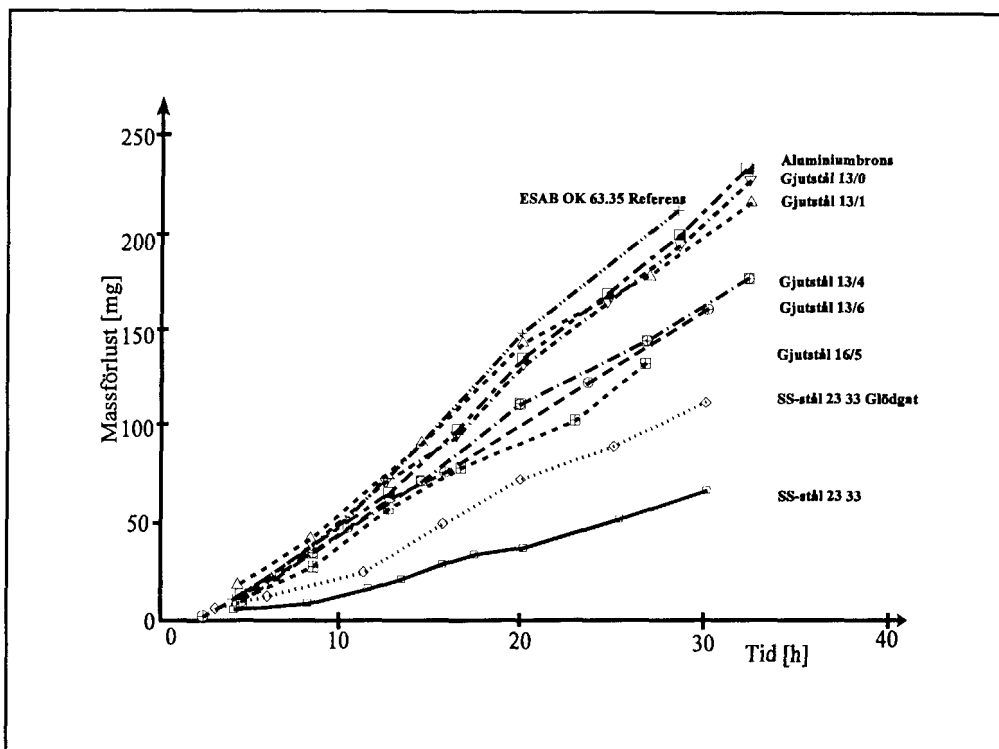
Resultat från kavitationsprovning av skovelmateriel redovisas i figurer på de avslutande sidorna. Resultaten är även sammanställda i tabell 3 och figur 3.

Tabell 3: Massförlust i skovelmateriel

Skovelmateriel	Massförlust mg/h
Gjutstål 13/0	7,8
Gjutstål 13/1	7,4
Gjutstål 13/4	5,9
Gjutstål 13/6	5,8
Gjutstål 16/5	5,6
Aluminiumbrons	8,2
Valsat materiel	
SS-stål 2333 kallb.	2,6
SS-stål 23 33 glödgat	4,3

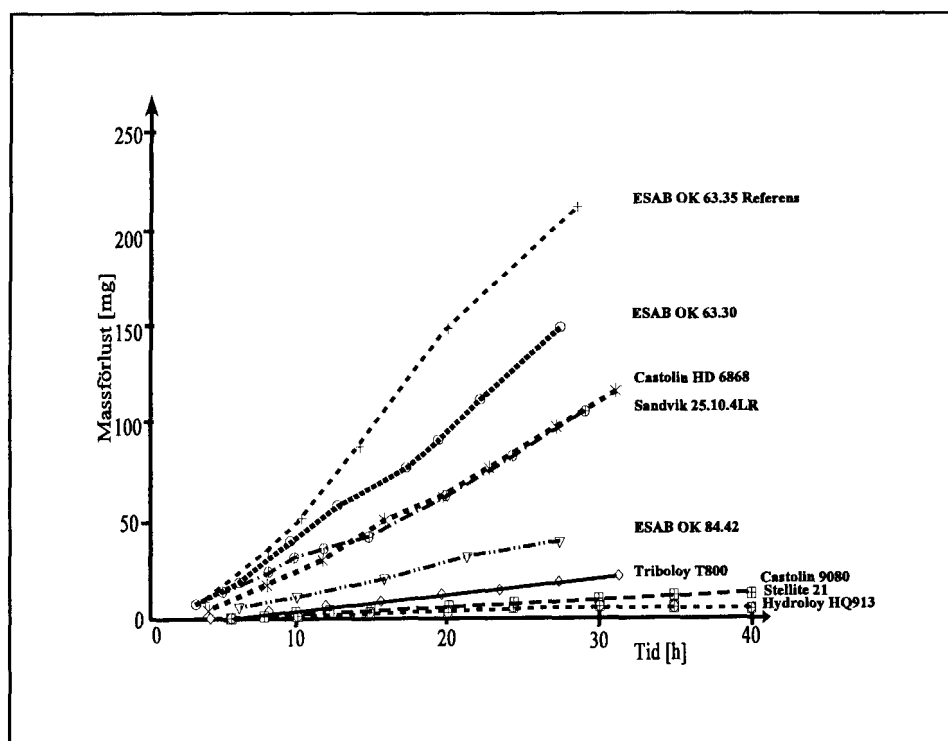
Tabell 4: Massförlust i svetsmateriel

Tillsatsmateriel	Massförlust mg/h
Castolin HD 6868	4,2
Castolin 9080	0,3
ESAB OK 63.30	5,7
ESAB OK 63.35	8,8
ESAB OK 84.42	3,1
Hydroloy HQ 913	0,1
Tribaloy T800	0,9
Stellite 21	0,1
Sandvik 25.10.4.LR	4,1



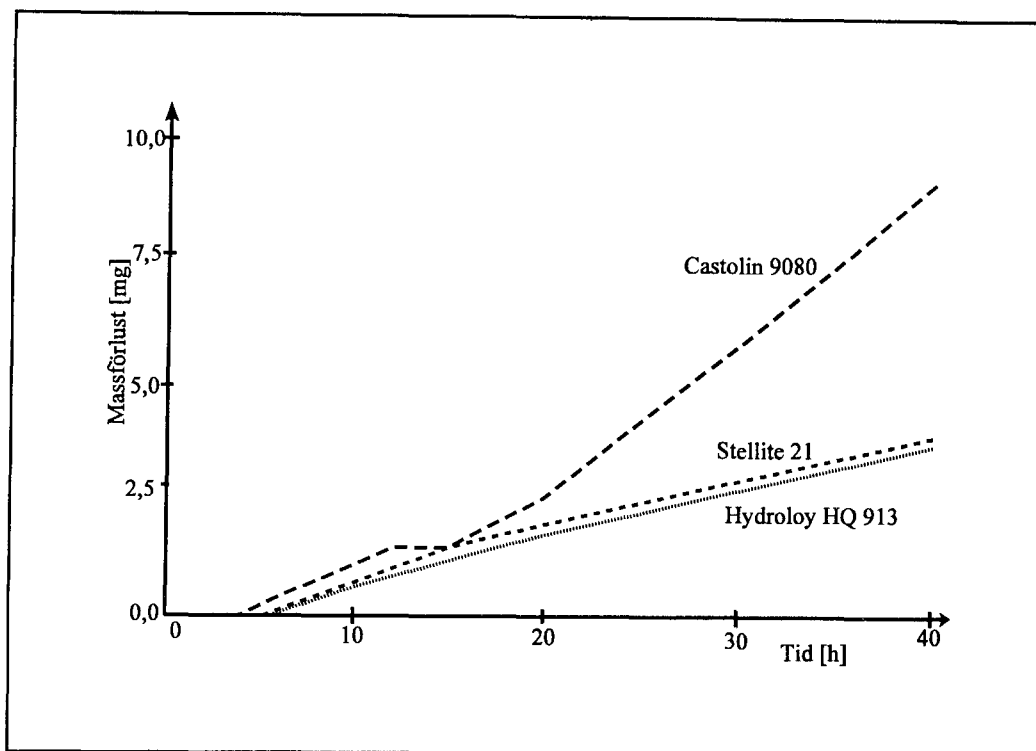
Figur 3: Massförlust som funktion av provtid för löpskovelmaterial

Figure 3: Eroded mass in function of testing time for runner blade materials



Figur 4: Massförlust som funktion av provtid för svetsmaterial

Figure 4: Mass erosion in function of testing time for weld materials



Figur 5: Delförstoring av figur 4

Figure 5: Magnified part of figure 4

3.3.2. Svetsreparationsmaterial

Resultat från kavitationsprovning av svetsreparationsmaterialen redovisas i figurer på de avslutande sidorna och är sammanställda i tabell 4 och figur 4.

3.3.3. Polymera och keramiska material

Kavitationsprovningen utfördes för de utvalda materialen med ett avstånd till vibrationshornet om 0,5 mm. Inom 2 timmars provtid var ytbeläggningarna kraftigt skadade och begynnande kavitationsskador kunde iakttas på det underliggande stålgodset. För flertalet av de polymera och keramiska materialen fanns inga rester av ytbeläggningen kvar på provkutsen efter 2 timmars provning.

För att identifiera skillnader i de olika materialens kavitationsskadehastighet utfördes prov vid lägre kavitationsintensitet. Denna erhöles genom att avståndet till vibrationshornet ökades till 1,0 mm. Under dessa förutsättningar var det möjligt att vid provtider upp till 2 timmar registrera skadornas tillväxt i ytbeläggningarna. Härefter ökade skadornas omfattning hastigt och efter 4 timmars provning hade alla material så omfattande skador att underliggande grundmaterial var frilagt inom minst 50% av provytan.

För de provade materialen erhöles två skilda kavitationsförlopp, beroende av ytbeläggningarnas vidhäftning mot underliggande grundmaterial. Vid låg vidhäftning lossnar ytbeläggningen efter minimala eller inga märkbara kavitationsskador. Med ökande vidhäftning mot grundmaterialet erhöles kavitationsskador på ytbeläggningen, som efter genombrottet får resterande beläggning att lossna från den belagda ytan.

Eventuella skillnader i skadehastighet har ej kunnat identifieras vid dessa förutsättningar.

4. Svetsbarhetsprovning

Svetsbarhetsprovningen utfördes i form av påsvetsprov på och med material enligt tabell 5. Svetsningen utfördes med undantag för T800 med belagda elektroder, Ø2,4-4,0, och med 80-150 A. Svetsmaterialet T800 TIG-svetsades. I de fall elektrod tillverkaren rekommenderade förhöjd arbetstemperatur begränsades denna till 50°C.

Tabell 5

Tillsatsmaterial	Grundmaterial			
	13/0	13/1	13/4	16/5
Castolin HD 6868	X	X	X	X
Castolin 9080	X	X	X	X
ESAB OK 63.30	X	X	X	X
ESAB OK 63.35	X	X	X	X
ESAB OK 84.42	X	X	X	X
Hydroloy HQ 913	X	X	X	X
Triballoy T800	X			
Stellite 21	X	X		X
Sandvik 25.10.4.LR	X			X

4.1. Visuell inspektion och metallografisk undersökning

Svetsprovet med Triballoy T800 uppvisade omfattande sprickbildning i svetsgodset och provades ej ytterligare. Ur resterande svetsprov preparerades snittytor tvärs och parallellt med svetsens längdriktning för visuell inspektion och metallografisk undersökning.

Inga bindfel eller porer kunde konstateras i de undersökta snittyterna.

4.2. Hårdhetsprovning, Hm

Från svetsproverna preparerades snittytor tvärs svetsens längdriktning för hårdhetsmätning. Hårdhetsprovningarna utfördes med Vickersdiamant och provlasten 100 g. Resultaten från hårdhetsprovningen redovisas i tabellerna 6, 7, 8 och 9.

Tabell 6: Hårdhet i 13/0 material

Svetsgods	Hårdhet HV 100			Hårdhet HV 100		
	Grundmaterial	HAZ	Svetsgods	Grundmaterial	HAZ	Svetsgods
Castolin HD 6868	180-200	350-500	230-260	185-195	350-590	230-250
Castolin 9080	180-200	350-570	300-350	187-197	350-570	300-370
ESAB OK 63.30	180-200	350-570	200-220	190-200	350-570	190-220
ESAB OK 63.35	180-200	350-530	200-220	185-195	350-520	190-210
ESAB 84.42	180-200	400-500	450-470	190-200	400-450	420-470
Hydroloy HQ 913	180-200	300-400	280-300	185-195	300-400	280-300
Stellite 21	180-200	350-590	320-350	190-200	350-590	320-350
Sandvik 25.10.4.LR	180-200	350-500	260-280	190-200	350-530	250-280

Tabell 7: Hårdhet i 13/1 material

Tabell 8: Hårdhet i 13/4 material

Svetsgods	Hårdhet HV 100			Hårdhet HV 100		
	Grundmaterial	HAZ	Svetsgods	Grundmaterial	HAZ	Svetsgods
Castolin HD 6868	190-210	350-500	230-250	260-270	300-370	280-300
Castolin 9080	190-210	350-550	340-370	270-280	300-360	340-370
ESAB OK 63.30	190-210	350-450	190-210	260-270	300-350	190-210
ESAB OK 63.35	190-210	350-450	190-210	260-270	300-350	190-210
ESAB 84.42	190-210	350-550	420-450	260-270	300-370	420-450
Hydroloy HQ 913	190-210	320-420	280-300	260-270	300-370	280-300
Stellite 21	190-210	350-550	320-350	260-270	320-370	320-350

Tabell 9: Hårdhet i 16/5 material

För skovelmateriel legerade med 13 % krom erhöles för samtliga elektroder mycket hög hårdhet, >400 Hm100, i den värmepåverkade zonen, HAZ. Med ökande hårdhet ökar risken för sprickbildning både under avsvälning efter svetsning och under yttre belastning. Svetsproven på skovelmateriel med 16 % krom uppvisar genomgående lägre hårdheter i den värmepåverkade zonen. Mikrohårdheten uppgår till maximalt 370 Hm100. För samtliga materialtyper är hårdheten så hög att avspänningsglödning eller anlöpning rekommenderas för lastupptagande svetsar.

4.3. Bockprov

Bockproven utfördes enligt SS 11 26 26. Från samtliga svetsprov, utom T800, togs 20 mm breda provstavar ut tvärs svetsens längdriktning. Proven bockades 120° över ett dorn med radien lika med provstavstjockleken.

Inga ytbristningar eller bindfel med en längd överstigande 2 mm konstaterades.

5. Kommentarer

5.1. Skovelmateriel

De konventionella skovelmaterialetn uppvisar ett med ökande legeringsinnehåll och hårdhet ökande motstånd mot kavitationsskador. För dessa har den slutliga värmebehandlingen givit hårdheter av 170 -270 Hm100.

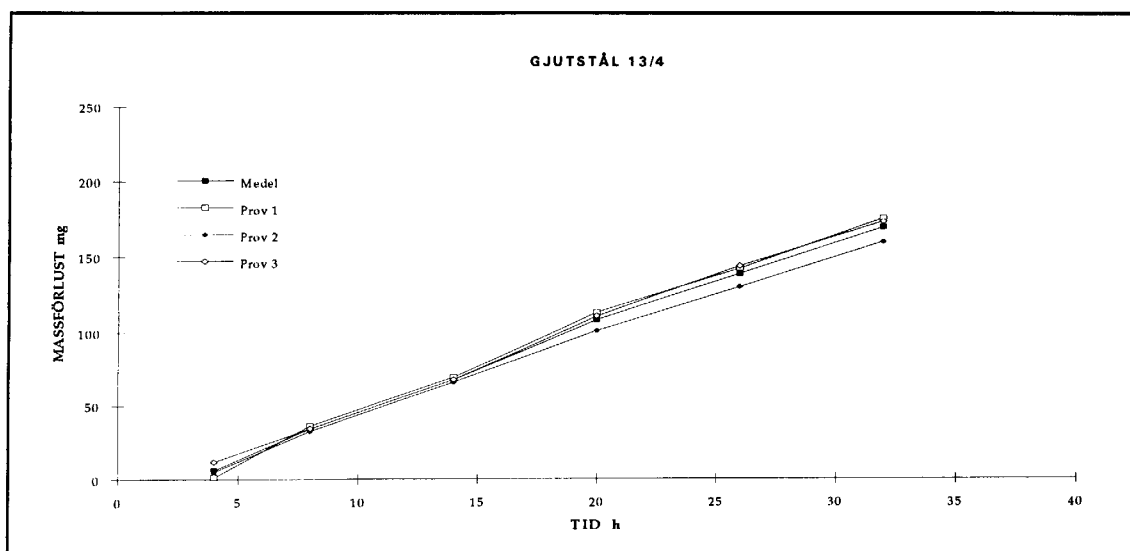
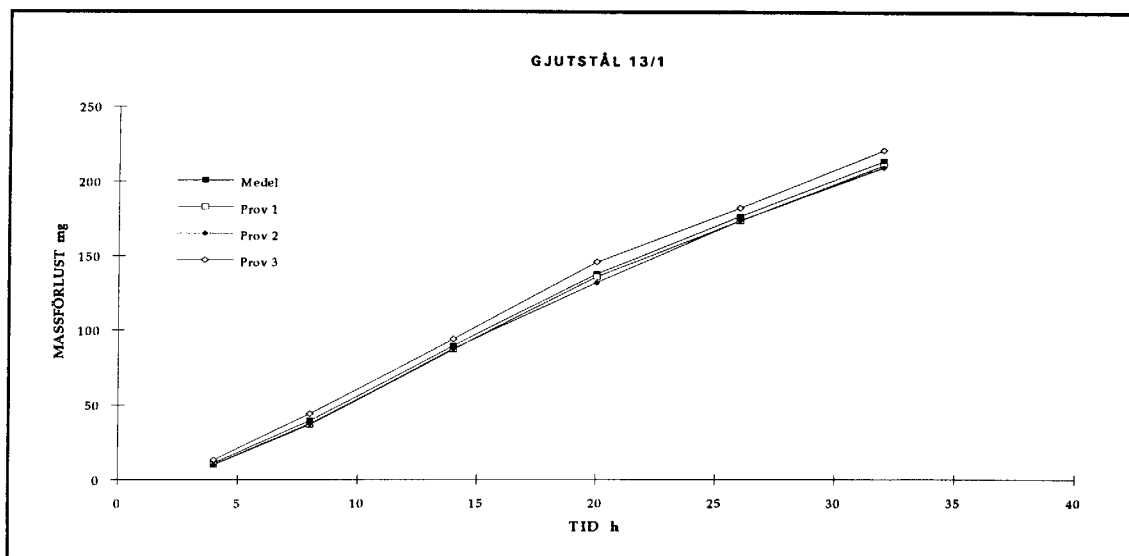
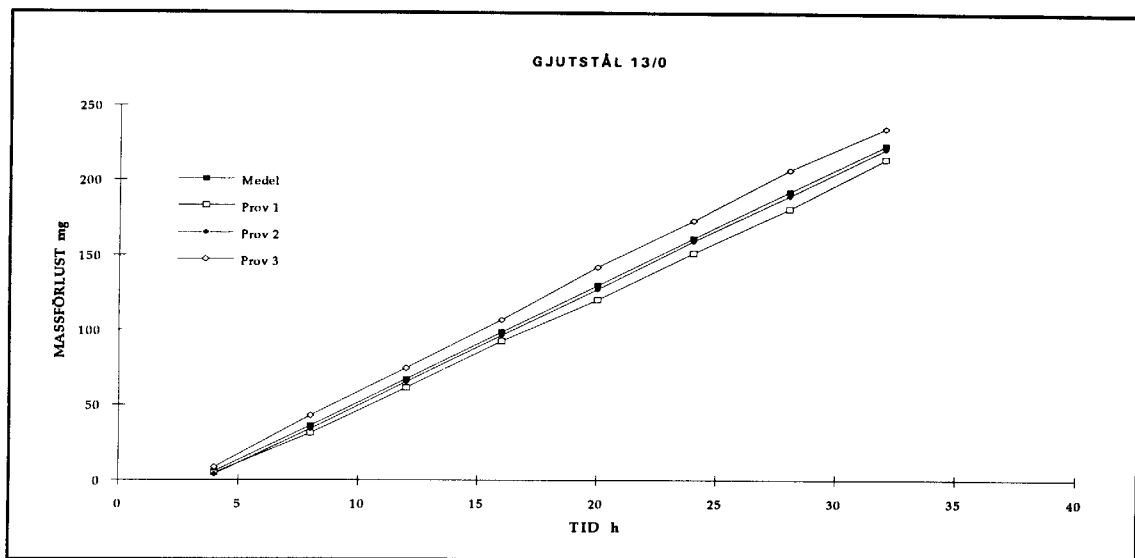
5.2. Svetsreparationsmaterial

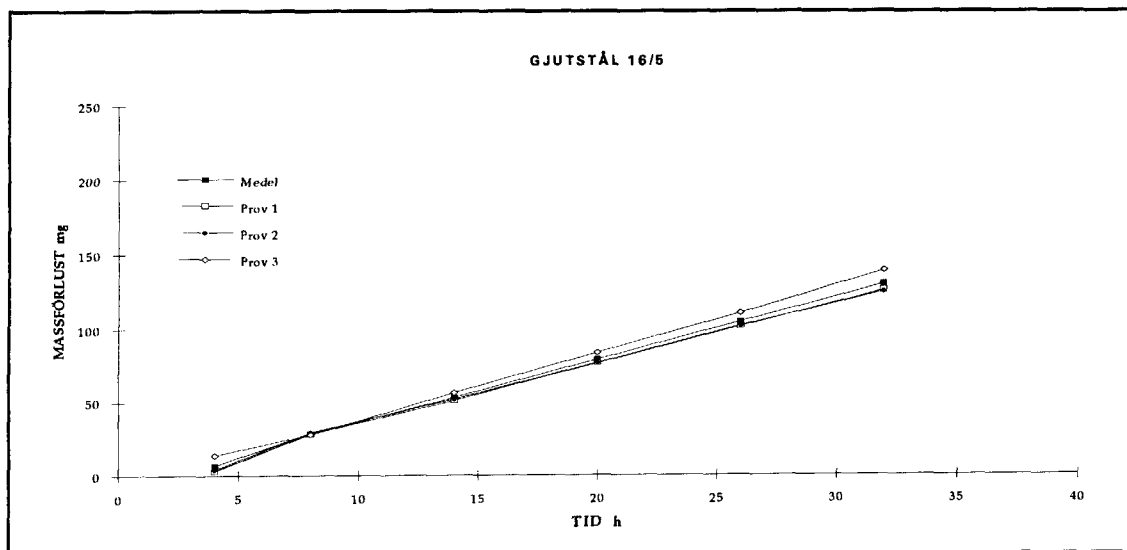
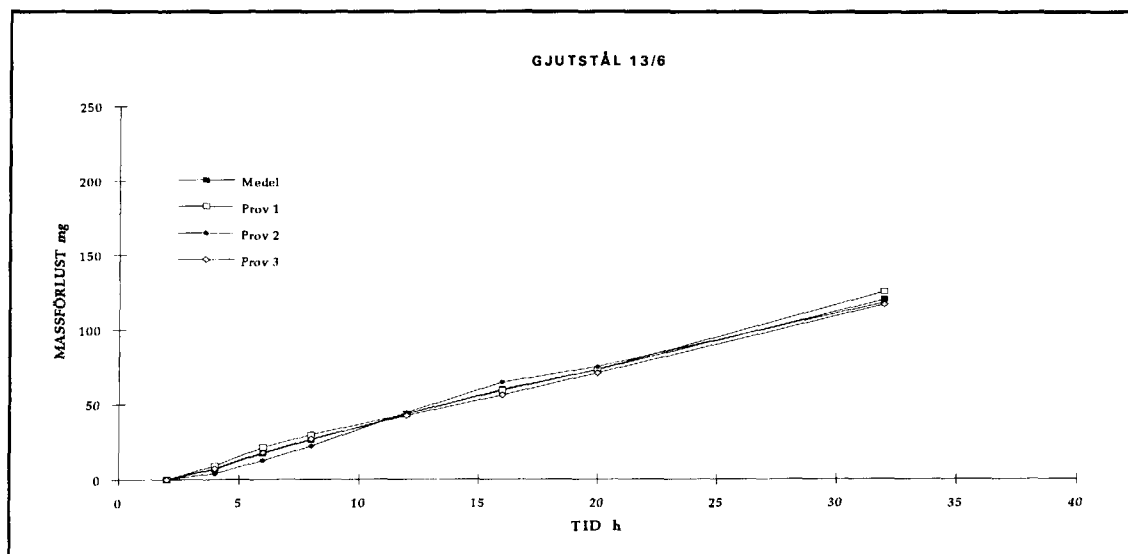
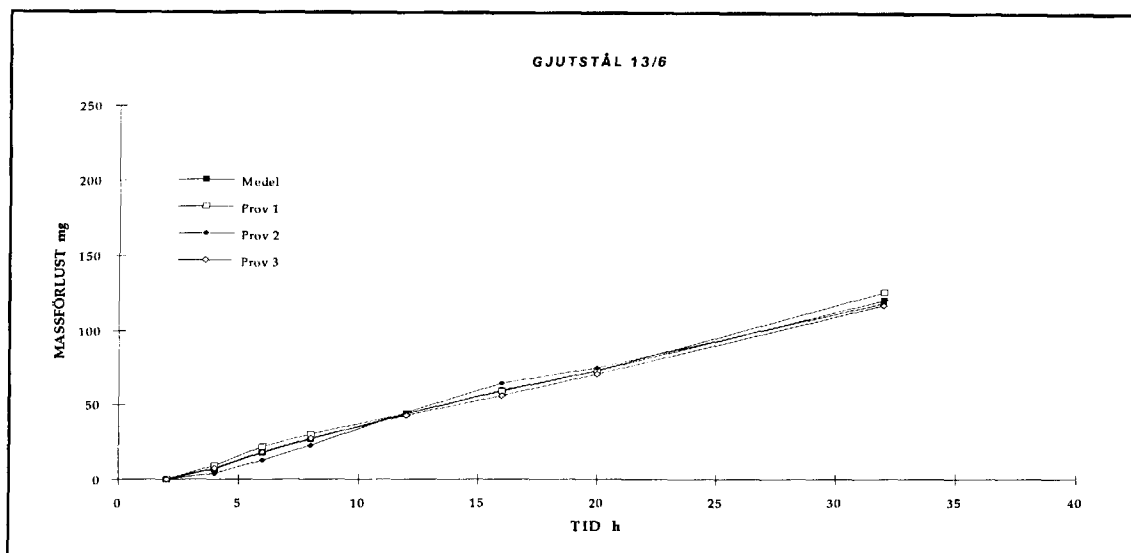
Svetstekniskt gav laboratoriesvetsprovningen god likvärdighet mellan de olika tillsatsmaterialen med undantag för Triballoy T800. För detta material erhöles kraftig sprickbildning i samband med svetsningen. Materialet kräver normalt förvärmning och kan endast utnyttjas om tillfredställande förvärmning kan erhållas på grundmaterialet. Övriga materialkombinationer uppvisade inga sprickbildningar eller bindfel. Materialen gav för samtliga appliceringsprov höga hårdheter i den värmepåverkade zonen. De högsta hårdheterna erhöles för de 13%-iga Cr-stålen. För sammanfogande svetsning skall avspänningsglödning eller anlöpning utföras.

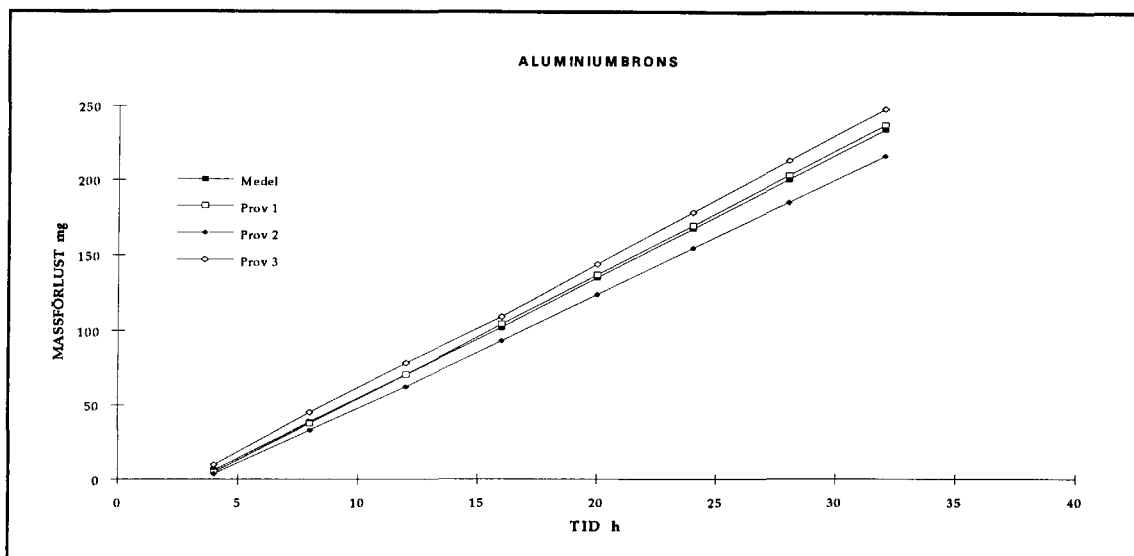
Kavitationsprovningen visar att Hydroloy HQ 913 och Stellite 21 tillsammans med Castolin 9080 har det lägsta kavitationsskadehastighetet med en massförlust av 0,09, 0,10 resp 0,32 mg/h. Av övriga material har ESAB OK 84 42, Castolin HD 6868 och Sandvik 25.10.4.LR lägre kavitationsskadehastighet än grundmaterialen.

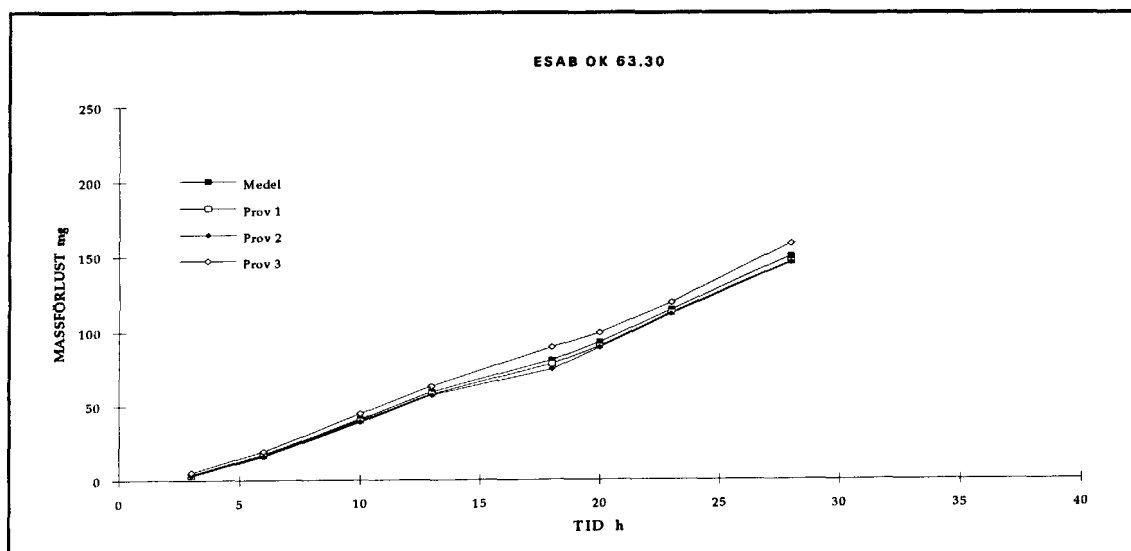
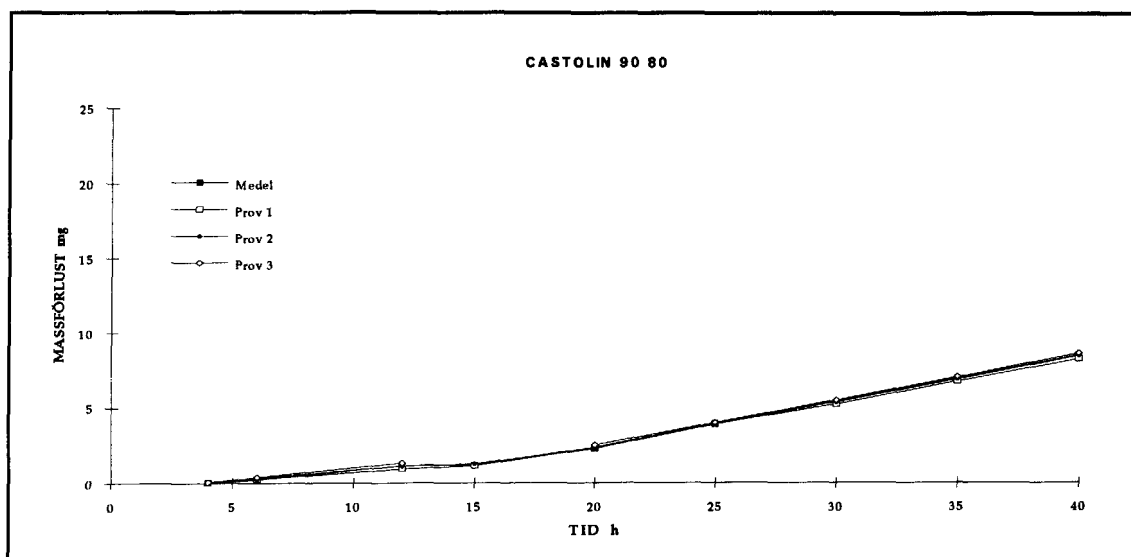
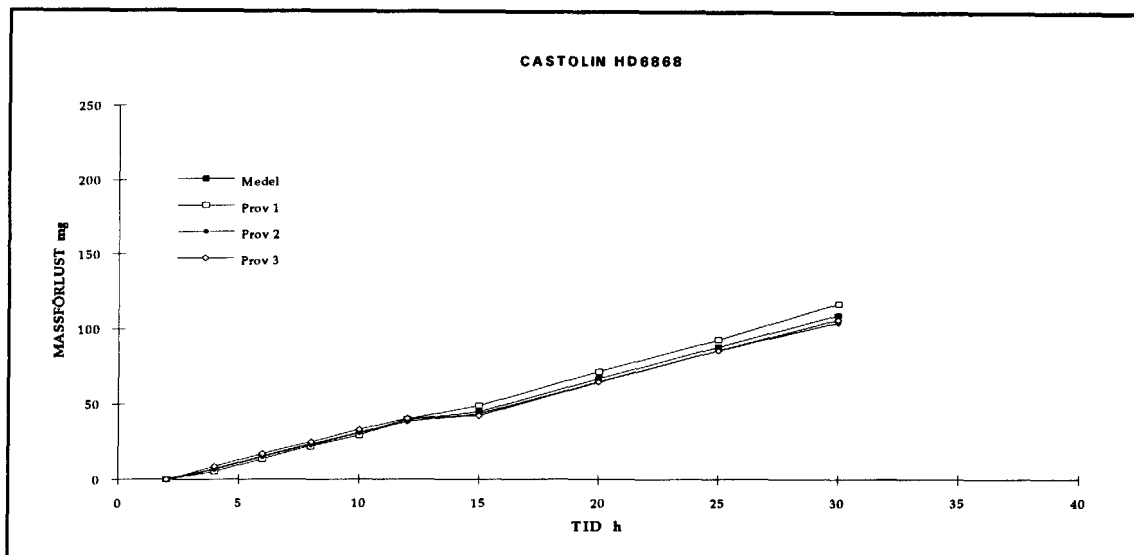
5.2. Polymera och keramiska material

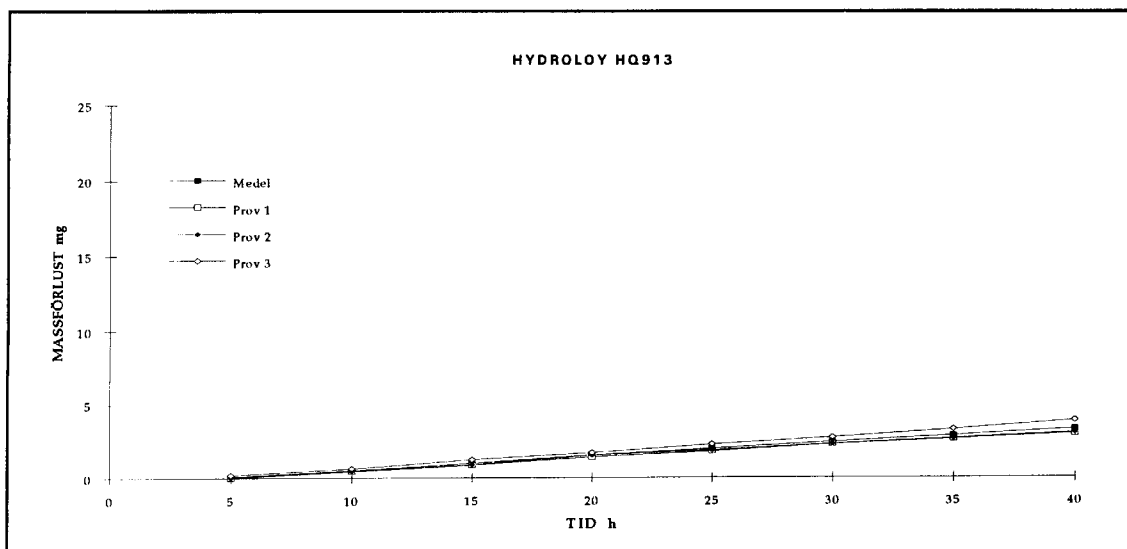
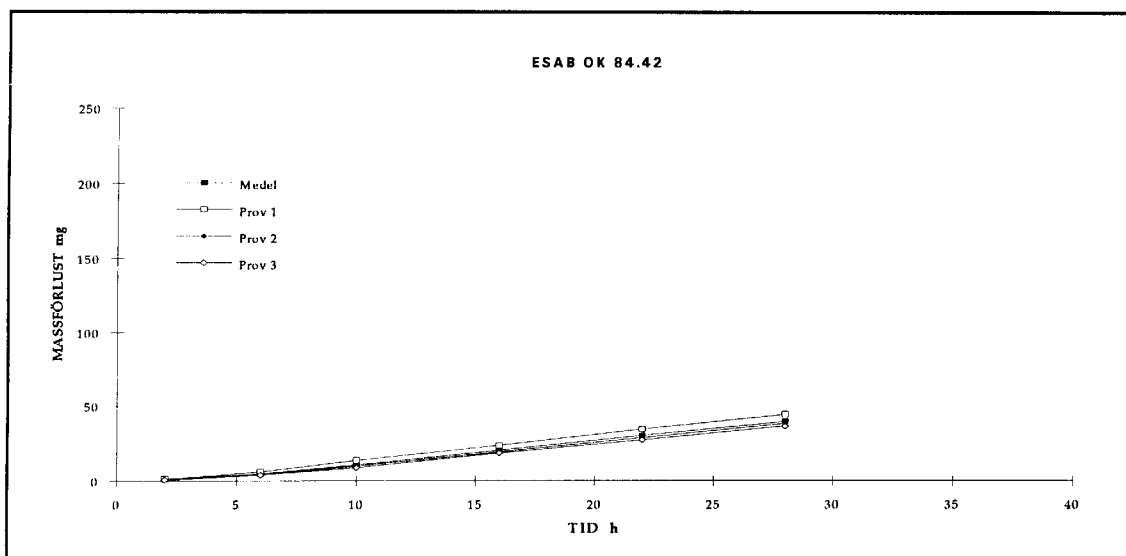
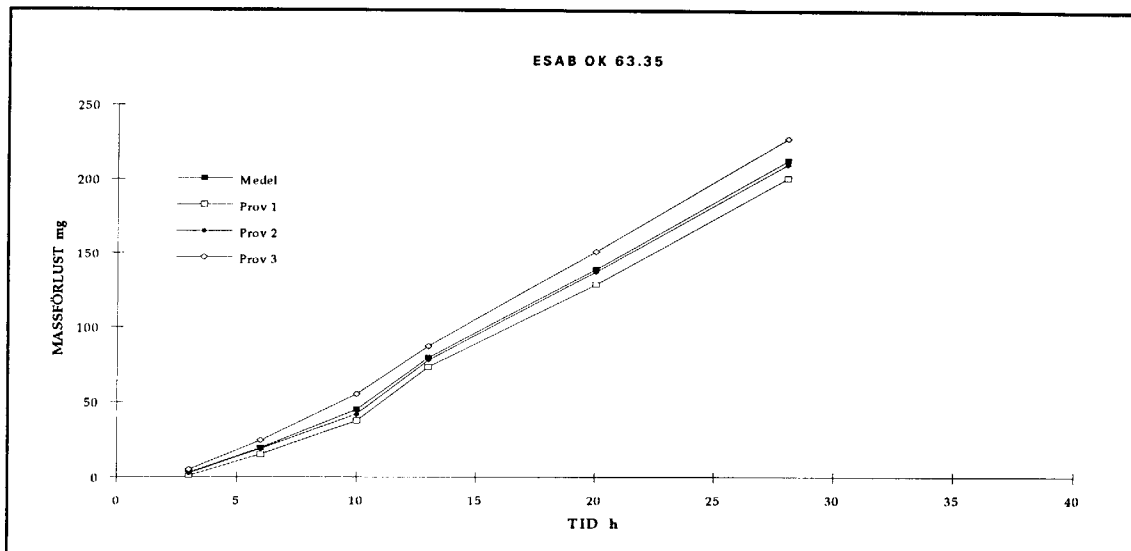
För de provade ytbeläggningarna är vidhäftningen mot grundmaterialet den faktor som styr materialens användbarhet som skydd mot kavitationsskador. Under utnyttjande av samma provningsparametrar som vid provning av metalliska material återstår endast fragment av ytbeläggningarna efter en provtid av 2 timmar. För de metalliska materialen motsvarar denna provtid närmast inkubationsfasen för kavitationsskador varunder endast mindre ytskador erhålles. Provning med reducerad intensitet visar att kavitationskrafterna efter det att ytbeläggningarna genombrutits angriper i bindningszonen och ytbeläggningen slits bort från underlaget. Materialtypens kavitationsskadehastighet är väsentligt högre än turbinmaterialens varför den ej kan utnyttjas som ytskydd i anläggningar med i huvudsak kavitationsskador.

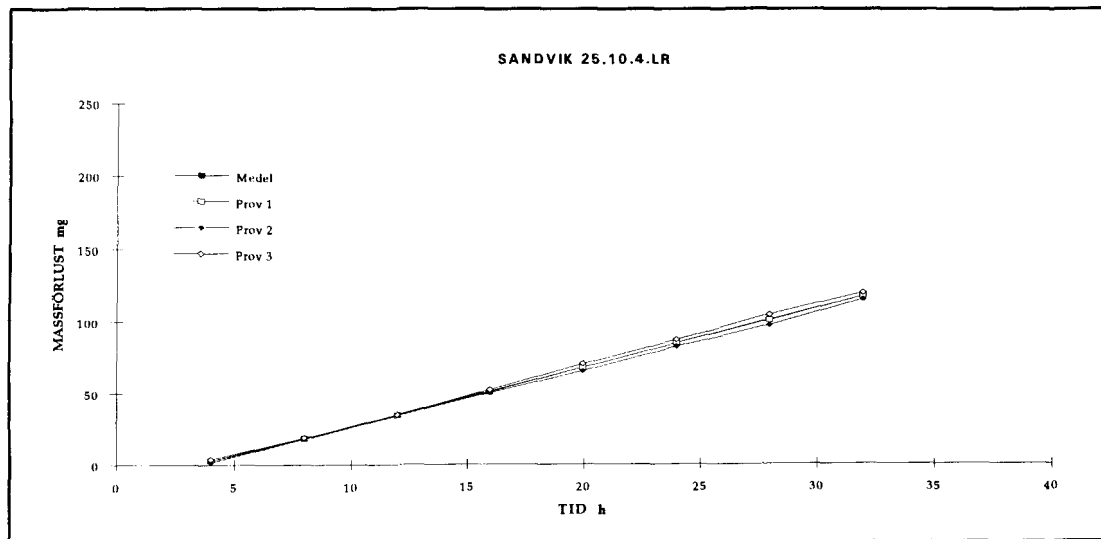
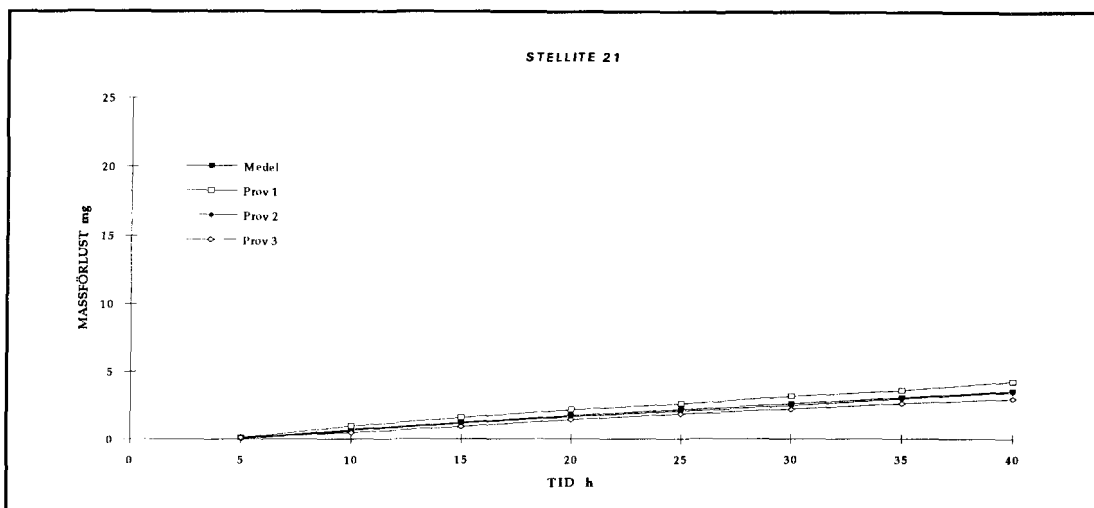
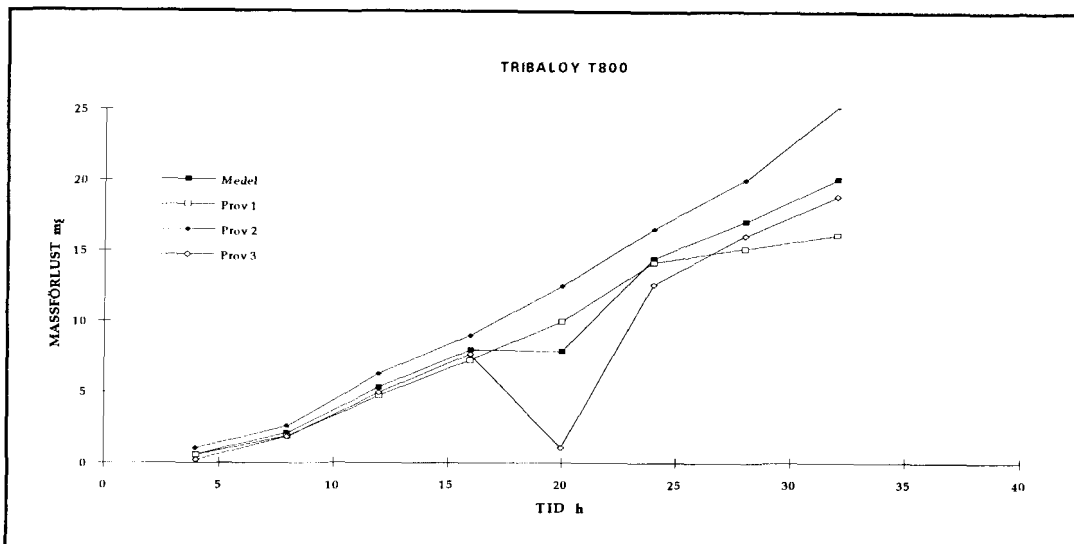












APPENDIX 3

FÄLTPROV I GEJMÅN

FÄLTPROV I GEJMÅN

1. Bakgrund, data

Gejmåns kraftstation togs i drift 1970 för att utnyttja fallhöjden mellan Bleriken och Övre Björkvattnet. Den har ett aggregat med en effekt av 65 MW, utbyggnadsvattenföringen 28 m³/s och medelårsproduktionen 280 GWh. Medelvattenföringen är ca 15 m³/s

Övre vattenyta	DG	+645,6 m	SG	+641,0 m
Nedre magasin	DG	+395,0 m	SG	+389,1 m

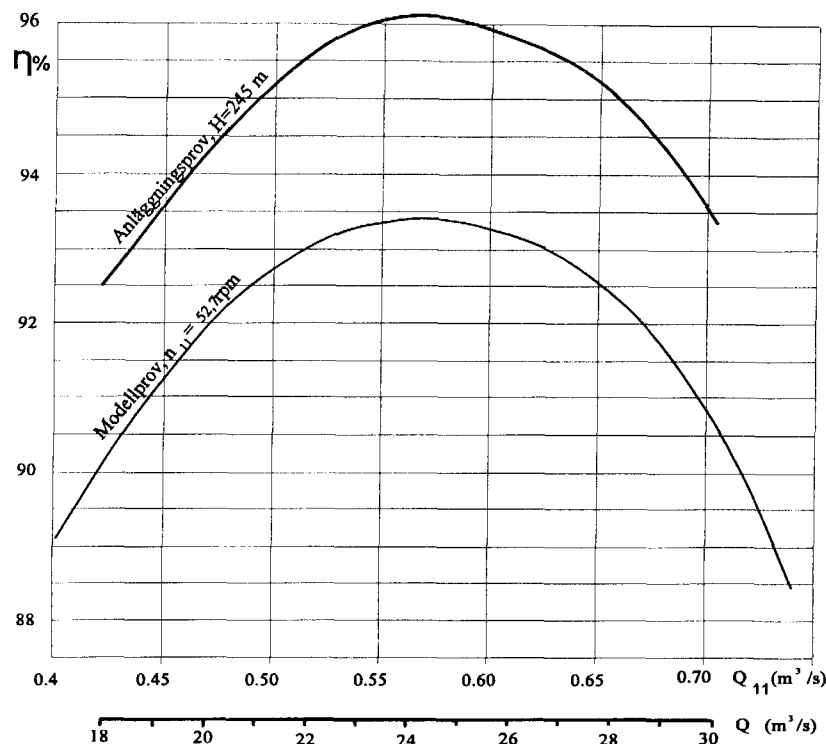
Aggregatet består av en Francisturbin och en synkrogenerator. Turbinen är utförd så att löphjulet tas ut nedåt, liggande på sugrörskonan.

Vid projekteringen valdes först varvtalet 375 rpm. Detta ökades till 428 och sedan till 500 rpm för att generatoren skulle bli billigare och mindre utrymmeskrävande. Samtidigt ökade turbinverkningsgraden.

För turbinen gäller följande data:

Leverantör	NOHAB
Turbintyp	Francis
Löphjulstyp	F 210-16-20
Nominell fallhöjd	245 m
Effekt kontinuerlig vid $H_n = 245$ m	65,0 MW
Effekt kortvarig vid $H_n = 245$ m	66,8 MW
Driftvarvtal	500 r/m
Tilloopstub, diameter	2250 mm
Klotventil, diameter	1800 mm
Spiralplan (stagkrans mittplan)	+386,00 m
Löphjul, banddiameter	1650 mm
" max diameter	2034 mm
" antal löpskovlar	16 st
" vikt	3,5 ton
Ledkrans, diameter	2300 mm
" höjd	330 mm
" antal ledskovlar	20 st
" max öppningsvinkel α	25°
Antal stagpelare inkl spets	
20 st	

Efter en tid observerades kavitationsskador vid skovlarnas utlopp. Skadorna bedömdes vara djupa i förhållande till de tunna skovlarna. Stationens drivs med konstant och hög belastning under en stor del av året, följd av stillestånd under tiden för fyllningen av magasinet, ett par månader. Skadorna borde elimineras under stilleståndsperioden för att inte tvinga till stopp under högbelastningstiden. Detta ledde till rutinmässig svetsning på hjulet, och sådan kom att göras två gånger per år.



Figur 1: Verkningsgrad för turbinen i Gejmån

Figure 1: Efficiency for the Gejmån turbine

Skadorna förutsattes bero på att turbinen placerats för att drivas vid full last vid den nvy som svarar mot +390,9 i Övre Björkvattnet, som uppgivits bli normal lägsta nedre vattenyta. I verkligheten kom magasinet att sänkas ända mot +389,1 varje år. En andra orsak kunde vara skillnader i skovlarnas form, men det var inte möjligt att avgöra om dessa funnits vid leverans eller vuxit fram vid reparationerna.

Eftersom löphjulet uppenbarligen försämrades från år till år och en ordentlig reparation inte bedömdes böra ske på plats, köptes 1979 ett andra löphjul. Detta förväntades inte få så stora avvikelser mellan skovlarna. Tyvärr visade detta löphjul emellertid behov av reparation med samma frekvens som det första.

Med hänsyn till stationens stora magasin och höga utbyggnadsgrad kunde man stanna för reparation utan att förlora vatten. Tillgången på klotventil och sugrörslucka skapade också förutsättningar för billiga avställningar. Stopp fordrades dessutom både på grund av stort kolslitage och för att lagren var extremt känsliga för oljenivåer, på grund av det höga driftvarvtalet. Oljedimma och koldamm fordrade frekvent rengöring av generatorn.

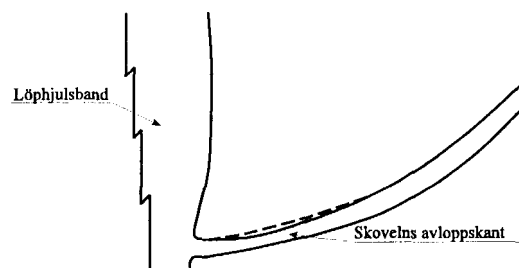
2. Projektuppläggning

Ett av Canadian Electrical Association (CEA) drivet projekt "Metallic Overlay Materials for the Optimum Cavitation Performance of Hydraulic Turbines" visade att betydande ökning av kavitationsmotståndet kunde nås genom användning av i Sverige oprövade reparationsmaterial. CEA's studie gav också uppslag till hur fältprov skulle kunna genomföras så att resultaten blev objektivt mätbara.

Ett projekt startades 1988 av Vattenfall enligt dessa idéer med ett av löphjulen för Gejnmån, och kom att ingå i det projekt som 1991 samordnades av Vattenfall och VAST, och som nu redovisas i detta ELFORSK-projekt. Värdefulla insatser i projektet har gjorts av Rune Sjöberg, Herman Lindqvist och Klas Wiberg.

Den första åtgärden var att se till att de skilda skovlarna fick samma form, inom ramen för rimliga toleranser. Med stort tålamod och avsevärda resurser (från såväl Vattenfall som Kvaerner), minskades ändå avvikelserna från mallarna. Detta var svårt eftersom skovlarna "levde ett eget liv" efter det en förmändring genomförts. På grund av spänningar i materialet ändrade sig formen på oförutsägbart sätt. Efter serier av misslyckanden nåddes slutsatser som sammanfattades i följande rekommendation:

I området nedströms kavitationsskadorna var avloppskanten på flera skovlar



Figur 2: Kavitationsskadat löphjul

Figure 2: Damage caused by cavitation erosion repair

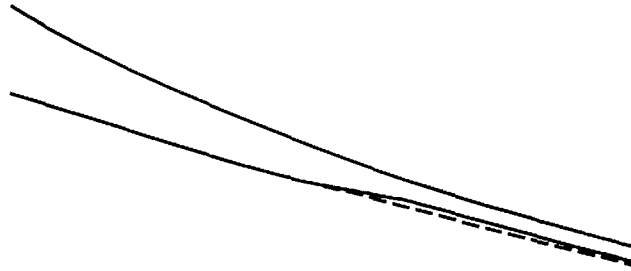
uttunnad. Kantens form tvärs strömriktningen föreföll normal på sugsidan. På trycksidan tycktes däremot material saknas. Se figur 2.

Den streckade konturen anger avloppskantens ursprungliga form på trycksidan.

Samma fel har tidigare konstaterats på andra löphjul av samma typ och storlek som löphjulen för Gejnmån.

Formfelet har att göra med tidigare svetsreparationer och förklaras med figurerna 3-5. Dessa visar snitt i strömriktningen genom skovelns utloppskant. Skovelns sug sida är vänd nedåt.

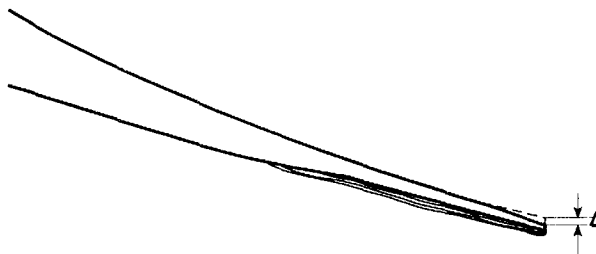
Figur 3 visar den skadade skoveln före reparation. Området mellan den streckade



Figur 3: Snitt genom löpskovelns utloppsdel

Figure 3: Section through the runner blade outlet

linjen och skovelytan motsvarar material som eroderats bort av kavitation.



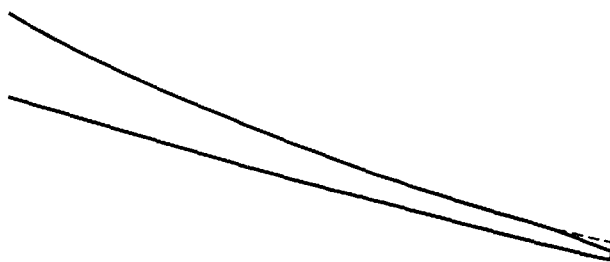
Figur 4: Skoveln under reparation

Figure 4: Runner blade during repair

Figur 4 visar skoveln efter urslipning av skadan och påläggning med svets. Svetssträngarna har lagts i **strömriktningen**. Eftersom de krympspänningar som uppkommer vid svetsningen verkar i svetsens längdriktning, viks skovelkanten ned i sin nedre ände. Skovelkanten flyttar sig på trycksidan måttet Δ i riktning från sugsidan på intill liggande skovel.

Efter slipning av sugsidan blir resultatet i enlighet med figur 5. Den streckade konturen anger ursprunglig form på trycksidan.

För att undvika deformationer av detta slag vid reparation av löphjul med relativt tunna skovlar, måste stor varsamhet iakttas vid svetsningen.



Figur 5: Skoveln ovan efter slipning

Figure 5: The blade after being ground

Om man lägger svetssträngarna **tvärs strömriktningen** kommer skovelkanten att vikas åt andra hållet. Skoveln kan då lätt justeras till rätt form genom slipning.

Som indikation på de skillnader som ändå kvarstod efter den exceptionellt noggranna upprustningen redovisas följande uppmätningar för utloppsöppningarna.

Bågmått från band	Ritn.-mått	Max före rep	Min före rep	Medel före rep	Max efter rep	Min efter rep	Medel efter rep
66,0	102,6	103,0	100,0	101,1	103,7	99,5	101,4
132,0	97,7	97,0	94,0	95,1	99,0	95,7	97,9
198,0	88,1	88,0	86,0	87,2	91,2	88,0	89,0
330,0	83,2	85,0	83,0	83,9	85,0	83,2	84,1
462,0	84,1	85,0	82,5	83,8	85,0	82,6	84,0

För avvikelserna från en mall mot skovelns sugside gäller

Bågmått från avloppskant sugside	Sko-vel 1	Sko-vel 2	Sko-vel 3	Sko-vel 4	Sko-vel 5	Sko-vel 6	Sko-vel 7	Sko-vel 8
10,0	14,0	17,0	13,5	15,5	14,5	13,5	16,5	16,8
100,0	13,5	15,0	13,5	16,0	14,5	13,5	15,0	15,5
200,0	11,0	12,0	13,0	13,5	13,0	11,5	13,0	12,0
300,0	9,0	9,5	12,0	11,5	14,5	11,5	14,0	10,0
400,0	6,5	7,5	8,0	8,0	10,0	5,5	8,5	7,5
520,0	4,0	6,0	6,0	6,0	7,5	1,5	5,5	5,0

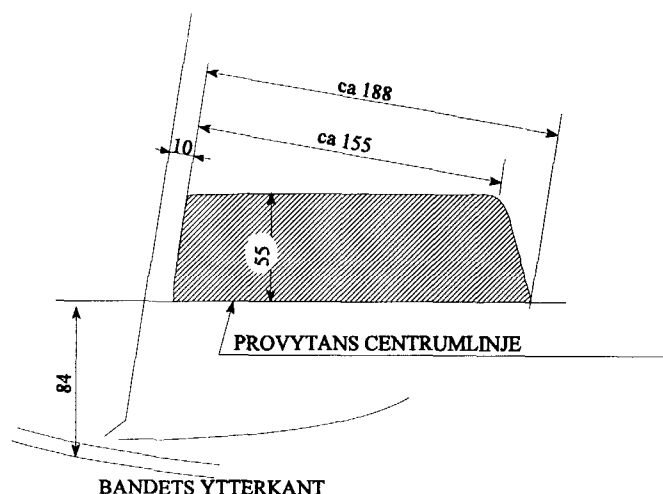
Bågmått från avloppskant sugside	Sko-vel 9	Sko-vel 10	Sko-vel 11	Sko-vel 12	Sko-vel 13	Sko-vel 14	Sko-vel 15	Sko-vel 16
10,0	16,8	13,0	13,5	12,5	12,2	14,0	11,5	12,0
100,0	15,5	13,8	12,5	12,5	11,2	12,0	11,0	11,0
200,0	13,5	13,5	10,0	11,5	10,8	9,5	9,0	9,0
300,0	11,5	12,5	8,5	9,2	9,8	8,2	8,0	7,3
400,0	8,5	8,5	6,3	6,0	7,0	6,5	6,5	6,0
520,0	5,0	5,0	4,0	3,0	4,0	5,0	5,5	5,5

Analys av de flesta fältprov som gjorts av kavitationsskador har misslyckats på grund av att skadornas storlek kunnat påverkas av en stor mängd parametrar. Det har sällan varit möjligt att avgöra vilken enskild parameter som varit viktig för en skadas uppkomst och storlek. Resultaten har därför varit förenade med stor osäkerhet. CEA-proven eliminerade en stor del av denna osäkerhet genom att betrakta varje enskild skovels skada för sig. Varje skadeområde delas i två genom en mittlinje och varje del behandlas med ett "eget" material. De två delarna kommer sedan att under fältprovets gång att utsättas för "exakt" samma kavitation av samma intensitet och varaktighet. Eventuell skillnad i skada nära gränslinjen mellan de två områdena efter en tids drift måste bero enbart på skillnader i de olika materialen.

Metoden kan bara användas på skadeställen som hade rimligt stor utbredning. För de flesta Francisturbiner har skador nära inloppet i regel alltför liten utbredning för att kunna delas.

De skador som uppträtt i utloppen på Gejrmåns löphjul användes för bedömning av storlek och omfattning av en "medelyta" som sannolikt skulle komma att skadas efter ett löphjulsbyte. Den ytan halverades och den ena halvan påläggssvetsades med elektroder av olika kvalitet. Området form och läge dokumenterades i en mall.

Samma mall, ombyggd för att kunna användas vid fältprov utan tillgång till bandets ytterkant, har sedan nyttjats vid kontroll av skadorna. Utseendet framgår av figur 6.



Figur 6: Försöksområde för fältprov med nya elektroder

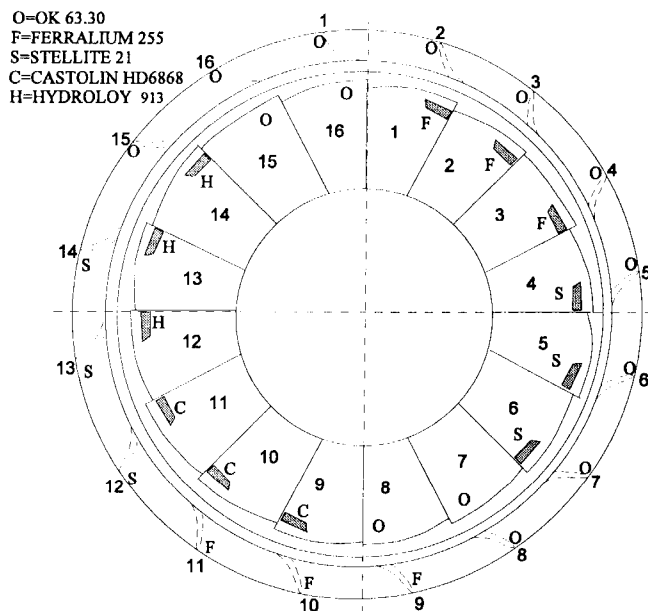
Figure 6: Test area for prototype tests with new electrodes

3. Material

Elektroder för påsvetsningen valdes med ledning av bl. a. information i den förut nämnda rapporten från CEA och efter kontakt med rapportens författare. Därmed var Stellite 21, Hydroloy 913 och Ferralium givna. Positiva uppgifter gavs även om Tribaloy T-800 men de svenska försöken visade att elektroden inte var svetsbar. (De kanadensiska proven utfördes på helt andra grundmaterial än de som är vanliga i Sverige.)

Till de "främmande" materialen lades två svenska elektroder. OK 63.30 var sedan länge en etablerad elektrod för både tillverkning och reparation på svenska löphjul, medan Castolin HD6868 var en relativt ny svensk elektrod för dessa ändamål.

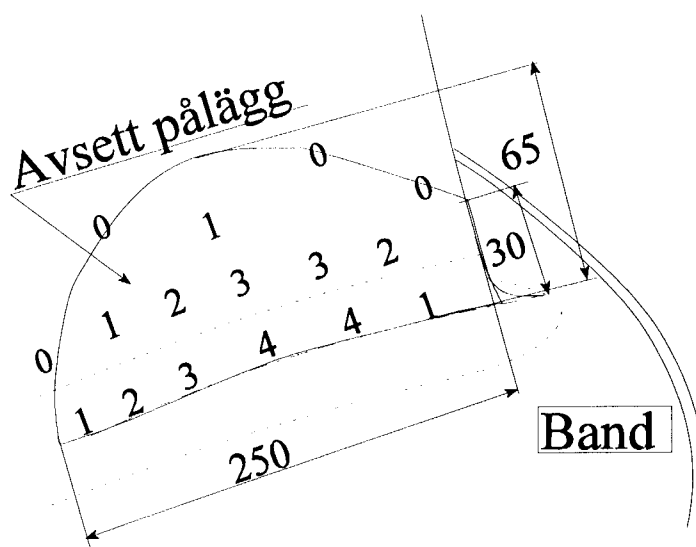
Fördelningen av de olika materialen på olika skovlar redovisas i figur 7.



Figur 7: Placering av provmaterial

Figure 7: Distribution of test material

Löphjulet är utfört i Bofors kvalitet 2RM2. Varje provyta omges av påsvetsat referensmaterial av OK 63.30, väl etablerat från tillverkning av hjul i denna kvalitet.



Figur 8: Avsett pålägg på sugsidan av skovlarna 7, 8, 15 och 16.

Figure 8: Recommended additional welding on the suction side of blades 7, 8, 15 and 16

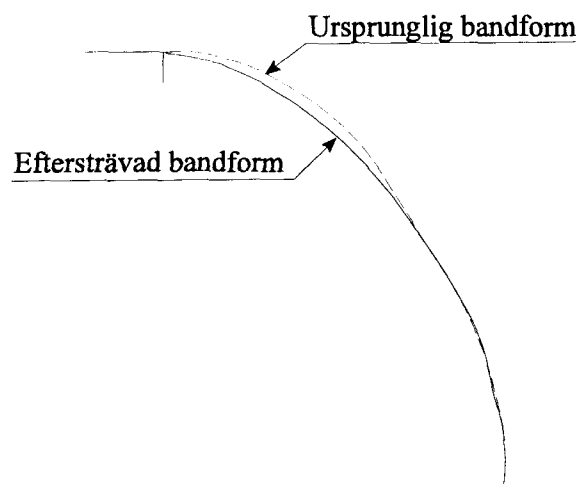
På fyra skovlar användes OK 63.30 inte bara som referensmaterial utan som enda provmaterial. På dessa skovlar gjordes å andra sidan en annan ändring. På skovlarna 7, 8, 15 och 16 gjordes ett svetspålägg på inloppssidans sugside, se figur 8. Av en på sidan 12 visad tabell framgår att utförandet inte helt motsvarar konsultens H. Lindqvists önskemål. Redan vid mallens avstånd från bandet, 35,5 mm, hade pålägget en icke mätbar tjocklek. Vissa ändringar vid inloppen gjordes även på skovlarna 1 - 6.

Bandets form ändrades vid två skovelkanaler på vardera löphjulshalvan, se figur 9. Inte heller här nådde utförandet ända fram till önskemålet. Den verkliga bandformen i dessa kanaler ligger mellan den ursprungliga och den eftersträvade.

Svetsningen gjordes så att påläggets djup efter bearbetning skulle bli ca 3 mm. Smärre avvikelser kunde inte undvikas, bl a eftersom efterföljande slipning till formriktighet måste göras. Efter svetsningen gjordes dels en hårdhetsmätning dels kontroll av löphjulets form.

Hårdheten mitt på påsvetsningarna var i medeltal HB 259 på Stellite 21, HB 251 på Ferralium F-255, HB 240 på Hydroloy 913, HB 231 på Castolin HD 6868 HB 211 på referenselektroden OK 63.30.

Löphjulsbytet visade sig kräva större arbetsinsats än väntat, beroende på att förbandet mellan löphjul och axel inte kunde lossas eller spännas utan att box och styrlager demonterades. En ändring till friktionsförband har diskuterats men inte beslutats.



Figur 9: Förslag till ändring av bandets form för fyra kanaler.

Figure 9: Suggested change of the band shape for four channels

4 Drift, inspektioner

Turbinen togs i drift med det upprustade hjulet 1990.11.09. Verkningsgradsprov genomfördes några dagar senare. Det nya hjulets verkningsgrad var något högre än det gamla, men störningarna vid hög last bedömdes subjektivt vara större. Aggregatet kördes för att ge optimalt utbyte, utan några inskränkningar.

En studie för att avgöra om den vanligen utnyttjade driftpunkten kunde vara olämplig gjordes tidigt med hjälp av SPM-utrustning. Den pekade på att de svåraste störningarna uppträdde nära den driftpunkt som gav högsta verkningsgrad. Detta bedömdes så motsägelsefullt att resultaten inte togs på fullt allvar.

Mätningar med samma syfte genomfördes i maj 1993 på det här aktuella löphjulet med den modernare Accusonic-utrustningen. Den gav likartade resultat, dvs att den högsta turbinverkningsgraden skulle vara förknippad med så svår kavitation att den borde undvikas. Jämför figur 10.

För att kunna värdera resultatet innan körning vid bästa verkningsgrad skulle förbjudas, kördes aggregatet under perioden april 1994 - februari 1995 enbart inom det område som indikerats ha svår kavitation.

I avsikt att få ut all möjlig information om hur de väntade angreppen skulle utveckla sig hade ett ambitiöst inspektionsprogram lagts upp. Löphjulet inspekterades därför första gången redan 1991.01.11 efter ca 1500 timmars drift, andra gången 1991.03.21 efter ca 3100 timmar, tredje gången 1991.06.04 efter ca 3900 timmar.

Avsikten var att skadorna skulle klassificeras i en fyrgradig skala, med 1 = matt yta, 2 = frostad yta, 3 = svag pitting och 4 = pitting. Visserligen saknas formell definition på gränserna mellan dessa, men en matt yta skulle reflektera ljus på annat sätt än en polerad, medan en frostad yta skulle ge ett känselintryck av råhet. Det visade sig inte möjligt att leva upp till målet, utan i verkligheten sammanfördes 1 och 2 till kavitationpåverkan som vid en eventuell reparation inte skulle motivera annat än lätt slipning, medan 3 och 4 möjligen skulle kunna motivera svetsning. Det överensstämmer också med den svenska normen SEN 26 80 10, som endast beaktar skador med djup över 0,5 mm. Gränsen vid bedömningarna i Gejmnå torde ha legat vid ca 0,2 - 0,3 mm.

Det var inte möjligt att göra korrekta studier av eventuella kavitationsskador i inloppen. Intryck via känsel och granskning med speglar tydde inte på några snabba förändringar. Inte förrän vid den sista inspektionen i februari 1995 kunde dessa inlopp studeras närmare.

De tecken till kavitationsskador som kunde observeras vid de första tre inspektionerna inskränkte sig till intryck av "matta" eller "frostiga" ytor på referensmaterial, särskilt i den smala kanten mellan skovelutlopp och påläggssvets. Inga reparationer gjordes. En svag mattering uppträdde dessutom på bandet bakom varje skovels utloppskant.

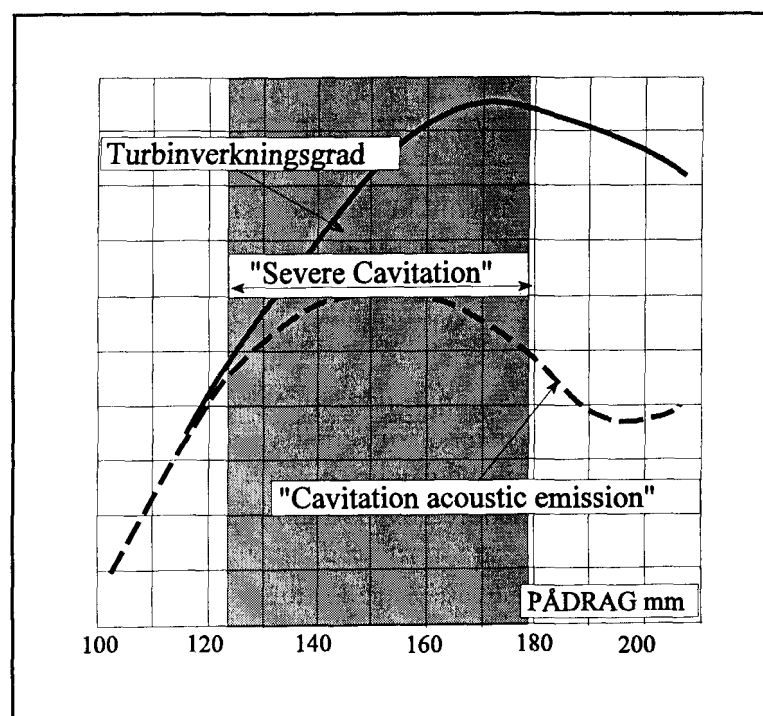
Därför ökades intervallen mellan inspektionerna. Den fjärde inspektionen ägde rum 1992.03.19 efter ca 7700 drifttimmar, den femte 1992.06.21 efter ca 9700 drifttimmar, den sjätte 1993.04.19 efter ca 15700 drifttimmar, den sjunde 1994.03.23 efter ca 20300 drifttimmar. Den åttonde och senaste inspektionen gjordes 1995.02.07 efter ca 23800 drifttimmar.

Vid den fjärde inspektionen kunde skador med ett djup av 1 à 2 mm noteras i referensmaterial på flera skovlar. Angreppens avgränsning mot provmaterialen visade klart att provmaterialen hade större beständighet än referensmaterialet. Mattering kunde observeras på flera provmaterial.

Den femte inspektionen visade ingen ökning av skadorna i förhållande till den föregående. För att undvika att angrepp i referensmaterial skulle komma att underminera ett provmaterial (Stellite 21) gjordes en smal tilläggssvets med Stellite 21 på referensytan på skovel 4.

Den sjätte inspektionen visade en liten ökning av skadornas area och djup, men också att skadorna på de "ädlare" materialen fortfarande inskränkte sig till "mattering" eller "frostiga" ytor. Skador med djup över "frostning" fanns bara i referensmaterial, och inte ens där översteg djupen 3 mm (skovel 14). Djupet nära provpålägget kunde ha motiverat en svetsning på skovel 5, 13 och 14 liknande den som gjordes på skovel 4 efter förra inspektionen. Inget beslut togs om detta.

Under augusti 1993, dvs mellan den sjätte och den sjunde inspektionen, utfördes



Figur 10: Resultat av prov på akustisk emission i Gejmån.

Figure 10: Results of measurements of acoustic emission from the Gejmån turbine

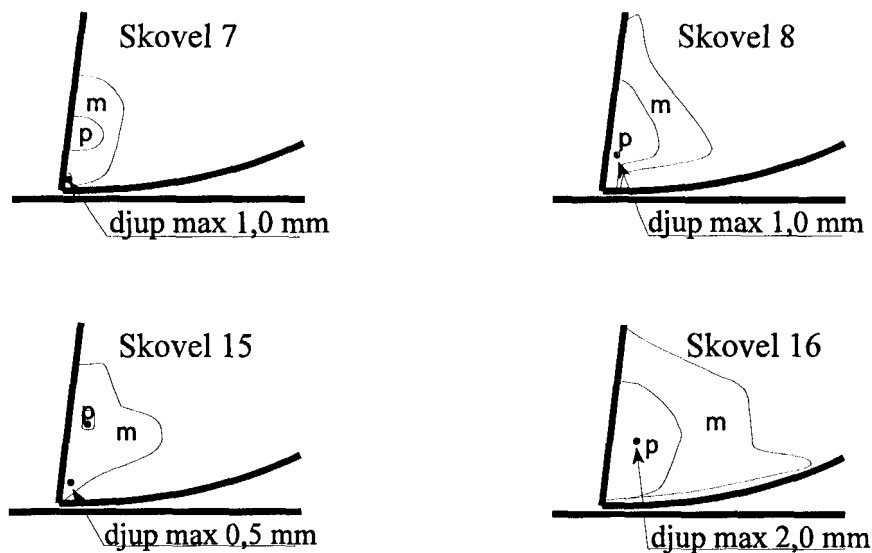
emellertid på lokalt initiativ svets- och sliparbeten på samtliga skovlars avloppspartier. Enligt uppgift utfördes svetsarbetet enbart med Stellite 21 och enbart i områden med referensmaterial, medan lätt slipning kan ha utförts även på ytor med provmaterial. Påsvetsningarna visade sig bli poriga, men en del sådana porer hade funnits från början i provytorna med Hydroloy 913 utan att förstöras. Det förefaller sannolikt att en hel del porer kan tolereras i dessa material.

Det är emellertid inte möjligt att jämföra utloppens skador vid den sjunde och åttonde inspektionen med de föregående. Sådana jämförelser skulle också ha försvårats av en vid sjunde inspektionen genomförd ändring av driftförutsättningarna. Nu infördes en regel om ständig körning vid högsta turbinverkningsgrad, motiverad av den av den mätta akustiska emissionen väckta misstanken att detta driftsätt skulle ge högre kavitationsintensitet, se figur 10.

Som förut nämnts hade bandet vid några skovelkanaler ändrats så att dess krökningsradie ökats, se figur 9. Det är tyvärr svårt att se dessa skillnader i en enskild skovelkanal. I figur 11 visas emellertid utfallet i samtliga av bandändringen påverkade kanaler. Det mest påfallande är att skadorna generellt inskränker sig till matteringar, och att endast en kanal visar pitting av mätbart djup (2 mm) efter 15700 timmars drift. Men är skadorna mindre än i andra kanaler?

Det finns två skovlar som inte påverkats av ändringen av bandet men har mycket små skador, skovlarna 3 och 9. De visas som jämförelse i figur 12. Läget av djuppunkten på skovel 9 gör att det inte kan uteslutas att skadorna skulle ha kunnat vara avsevärt större om inte den påsvetsade provytan hindrat skadeutvecklingen. På skovel 3 bör den möjligheten kunna uteslutas.

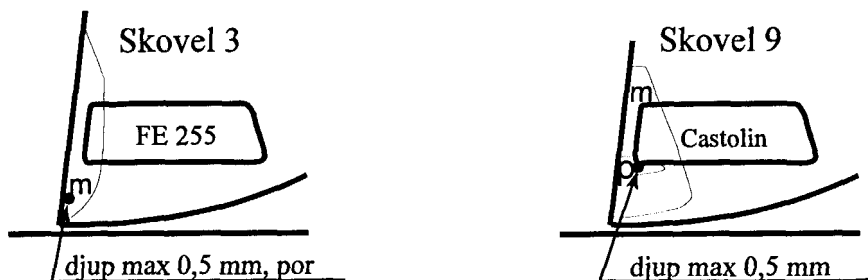
Även om det statistiska underlaget är litet, torde man kunna dra slutsatsen att ändringen av bandformen haft en positiv effekt. Kanske inte någon stor effekt, men ett bidrag åt rätt håll.



Figur 11: Skador på de löpskovlar som påverkats av den ändrade bandformen

Figure 11: Cavitation attack on runner blades that have been influenced by the changed band shape

Försök att jämföra de olika materialens beständighet har försvårats av att skadorna utvecklats så långsamt. Det har ändå framstått som uppenbart att lagningarna med Stellite 21 visat sig bäst. I figur 12 kan man inte undgå att notera att gränsen för det



Figur 12: Skador på de två löpskovlar som har de minsta skadorna utan att ha påverkats av den ändrade bandformen

Figure 12: Attack on the two runner blades that have the smallest damage without being affected by the chaged band shape

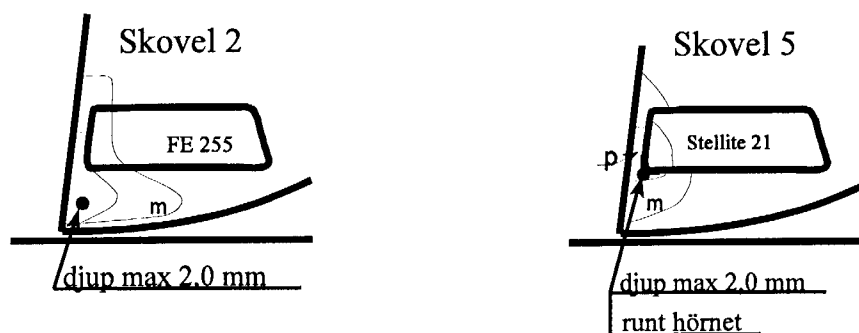
svagt påverkade området på skovel 3 inte påverkas av övergången mellan referensmaterialet och Ferralium. Samma iakttagelse kan på skovel 9 göras för

matteringen genom Castolinbeläggningen. Som jämförelse visas i figur 13 skovel 2, där området med pitting tydligt undvikit Ferraliumsvetsen, och skovel 5 där även matteringen undvikit beläggningen med Stellite 21.

En svårighet vid bedömningen av dessa försök är att skovelformen är litet olika på samtliga skovlar. Det är därför osäkert om en korrektion som förefaller gynnsam på en skovel också skulle vara gynnsam om den applicerades på andra skovlar. Visserligen har man försökt korrigera flera skovlar till samma formvariant, men resultaten är inte tillfredsställande. En följd därav är att det statistiska underlaget inte räcker för att ge säkra slutsatser.

Följande tabell visar skillnaderna i skovlarnas form vid inloppet. Tabellen bör läsas med figur 8 i minnet. Utöver dessa måste man räkna med skillnader i nosradier och hålkälar.

Vid den avslutande inspektionen i februari 1995, fyra och ett halvt år efter starten med detta löphjul, provades tekniska hjälpmedel för att dokumentera inloppskavitationens skadeverkan. Två av dessa var mycket enkla, nämligen avbildning med lera resp med silikongummi, den tredje var direkt inspektion med hjälp av en mycket liten videokamera. Kopieringen med lera var enklast men det är oklart om leran verkligen trängde ända in i de djupaste "hålén". För såväl lera som silikongummi gäller att det bör finnas kvaliteter med särskilt lämpad viskositet och en till miljön anpassad härdningstid. Videokameran gav en mycket god bild, men det var svårt att bedöma skadornas djup.



Figur 13: Skador nära det påsvetsade partiet på två löpskovlar

Figure 13: Cavitation attacks to the welded area on two runner blades

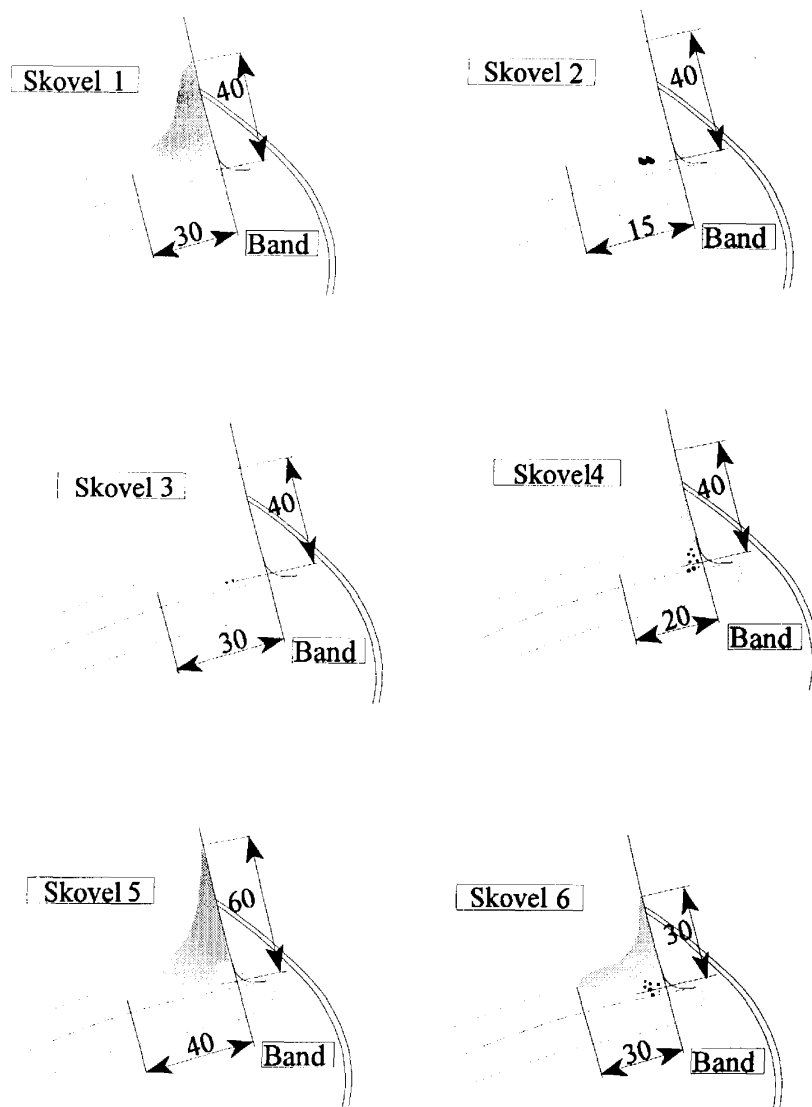
INLOPP, SUGSIDA: Avvikelse från en mall, belägen 35,5 mm från bandet och formad efter skovel 11.

Bågmått s	10	30	55	80	105	130	155	180	205
Δ skovel 1	0,5	0,5	0	0	0	0	0	0	0
Δ skovel 2	2,5	2	1,5	1	0	0	0	0,5	0,5
Δ skovel 3	1,5	1,5	1,5	1	0	0	1,5	2	2,5
Δ skovel 4	12	6,5	4,5	2,5	1	0	0	0	0
Δ skovel 5	4	2,5	0,5	1	0,5	0	0	0,5	0,5
Δ skovel 6	4,5	2,5	2	1,5	1,5	0	0	0	0
Δ skovel 7	2,5	2,5	2	1,5	0,5	0	0	0	0
Δ skovel 8	3,5	3,5	3	2	0,5	0	0	0,5	1
Δ skovel 9	1	1	1	1,5	0	0	0	0	0
Δ skovel 10	0	0	0,5	2	2	1,5	1,5	1,5	1,5
Δ skovel 11	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Δ skovel 12	0	0,5	0,5	1,5	1	0,5	0,5	1,5	1,5
Δ skovel 13	0	0,5	0,5	0,5	0,5	0	0	0,5	0,5
Δ skovel 14	1	1,5	1,5	1,5	1	0	0	0	0
Δ skovel 15	1,5	1,5	1,5	1	0	0	0	0,5	0,5
Δ skovel 16	2,5	3	2,5	2	1,5	0	0	0	0

Den åttonde inspektionens resultat framgår i sina huvuddrag av figurerna 14 - 16.

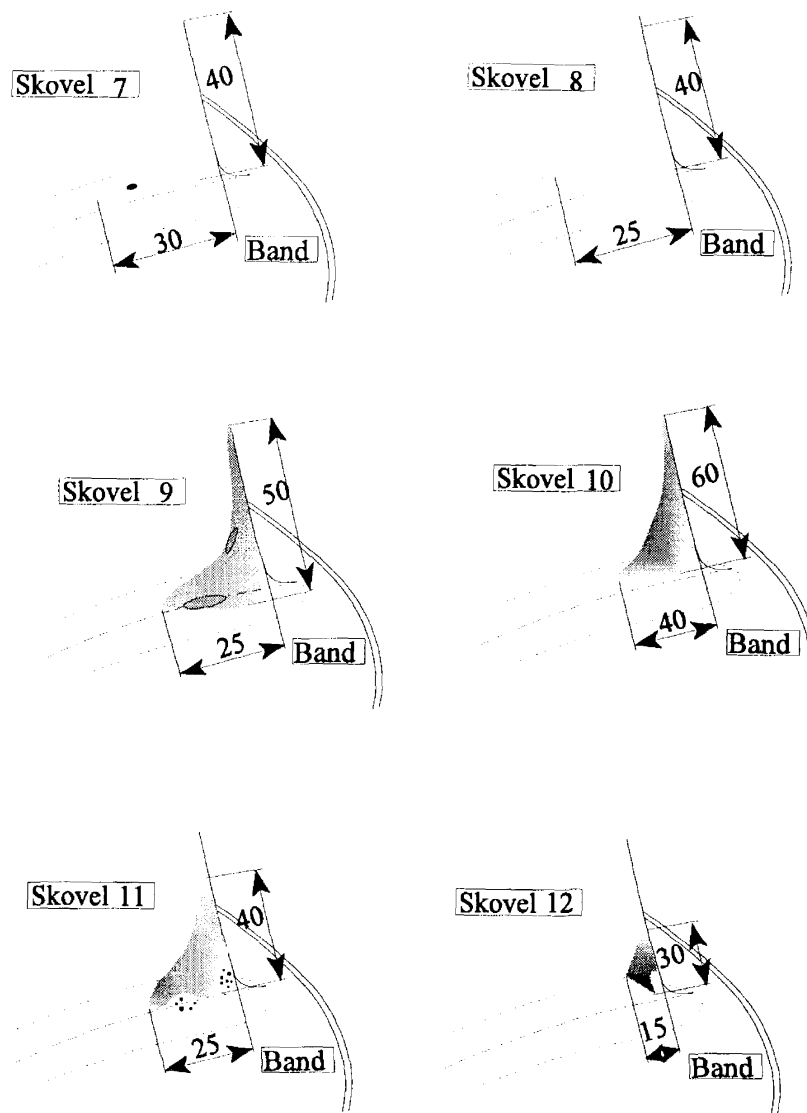
Skadorna är grunda och mindre än väntat. Största djup är ca 2 mm. Skadorna är minst på skovlarna 15 och 16, som svetsats med OK 63.30. Samma teknik har använts för skovlarna 7 och 8, som också har grunda skador. Det skulle varit intressant att veta hur dessa skador skulle sett ut om konsultens avsikter förverkligats.

Stellite 21 har använts på skovlarna 12 - 14 och syns ha skyddat dessa skovlars hålkälar mycket väl. Detsamma kan inte sägas om Ferralium som användes på skovlarna 9 - 11.



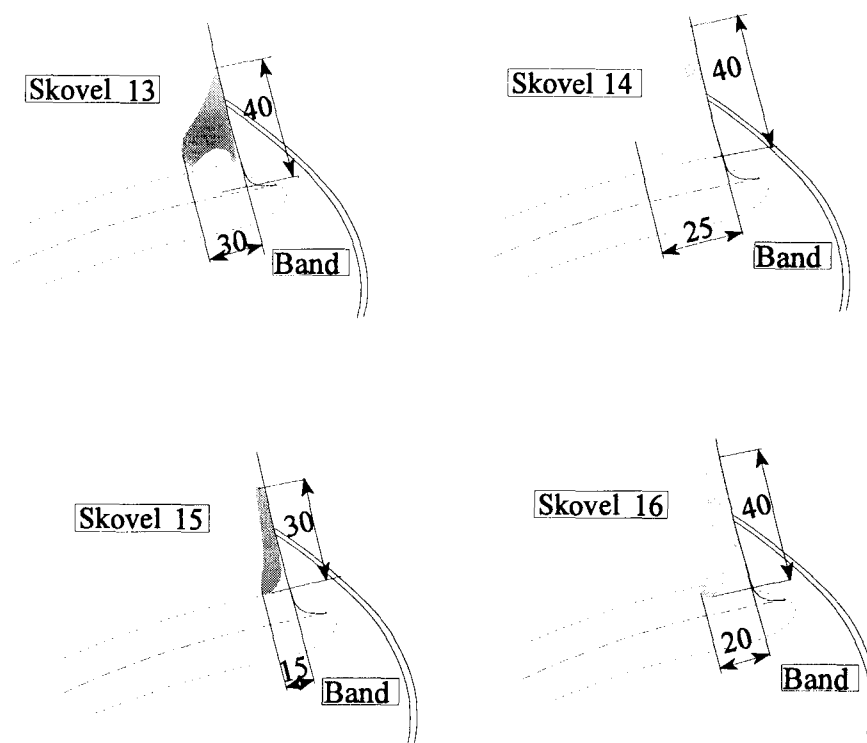
Figur 14: Inloppskavitation efter 23800 drifttimmar. Max djup 2 mm.

Figure 14: Inlet erosion after 23800 hours of operation. Maximum depth 2 mm.



Figur 15: Inloppskavitation efter 23800 drifttimmar. Max djup 2 mm. Skovlarna 9 - 11 har Ferralium 255 i hålkälen, skovel 12 har Stellite 21.

Figure 15: Inlet cavitation after 23800 hours of operation. Maximum depth 2 mm. Blades 9 - 11 have Ferralium 255 in the moulding, blade 12 has Stellite 21



Figur 16: Inloppskavitation efter 23800 drifttimmar. Max djup 0,5 mm.
 Skovlarna 13 och 14 har Stellite 21 i hålkälen, skovlarna 15 och 16 OK 63.30.

Figure 16: Inlet cavitation after 23800 hours of operation. Maximum depth 0,5 mm. Blades 13 and 14 have Stellite 21 in the moulding, blades 15 and 16 have OK 63.30

5. Slutsatser

Under en period av två och ett halvt år växte skador i grundmaterial och/eller referensmaterial i ett par skovlars utloppsparti till ca 3 mm maximaldjup. Under drygt fyra år växte inte skadorna i inloppspartiet till större djup än ca 2 mm, trots provokativ driftinstruktion under det sista driftåret. Med den tillväxten bedöms reparation även med den "enklare" elektroden OK 63.30 inte behöva göras oftare än ett par gånger per decennium.

Att den frekvensen periodvis varit så hög som två gånger per år anses ha berott på brister i skovelform. Den formen har från början motsvarat kraven i IEC:s modellkod. Den kodens krav på homologitet bedöms vara otillräckliga för kavitationssäkerhet. Formen har dessutom sannolikt försämrats genom reparationer under för stark tidspress, och med ofullständig instruktion.

Under tidigare normaltillstånd skulle under så lång drifttid ha utförts 4 - 5 kavitationslagningar med reparationssvetsning på löphjulets alla skovlar. Nu har under samma period inga kavitationsskador som överstiger ca 0,2 mm djup förekommit i något av de mer kavitationståliga påsvetsade materialen Stellite 21, Hydroloy HQ913, Ferralium 255 eller Castolin 6868. Om dessa påsvetsningar täckt hela de utsatta ytorna skulle de sannolikt kunnat motstå kavitation i ett eller flera decennier innan skadorna nått så djupt att svetsreparation erfordrats.

Av de fyra mer motståndskraftiga materialen är Stellite 21 bäst. Skillnaderna mellan de andra är liten, men Ferralium 255 matteras något snabbare än de andra.

Det finns inget i genomförda besiktningar som antyder att den förändring i driftsättet som rekommenderats efter mätning av akustisk emission skulle väsentligt påverka kavitationsskadorna.

APPENDIX 4

FÄLTPROV I EDENSFORSEN

Kvaerner Turbin AB

Dokumentnamn R-1301-TH			Sida nr 1 (4)
Ort Kristinehamn	Datum 1993-05-05	År THU	Arkivbeteckning 2642
Utfärdare Rune Sjöberg/Agg	För 4811	Sign	Ordernr Beteckn 3302
Ärendenr		Distribution	

P G Fällström	Vattenfall, Stockholm
J-E Lindberg	Vattenfall, Stockholm
J Deborg	Vattenfall, Älvkarleby
A Jonsson	Vattenfall, Västerås
A Johansson	Vattenfall, Näsåker
E Holmén	VBB-VIAK, Stockholm
J Månsson	GVAB
Å Grahn	Sydskraft
S Leonsson	KTAB
K Eriksson	"
K-E Värilind	"
L Hyllén	"
M Sjönnaby	"
R Sjöberg	"

EDENSFORSENS KRAFTVERK. Aggr 2

LÖPHJULSINSPEKTION 1993-04-06

Deltagare: Jan Månsson, Graningeverkens AB
Jan-Erik Lindberg, Vattenfall, Stockholm
Rune Sjöberg, Kvaerner Turbin

Bakgrund

Vid inspektionen hade turbinen varit i drift ett år sedan föregående inspektionstillfälle (1992-04-07). Se tidigare rapport R-1256-TH daterad 1992-05-08.

Turbinen är utvald för ett fältförsök med ett antal olika svetsmaterial för att undersöka dessas motståndskraft mot kavitationserosion. I samband med inspektionen för ett år sedan svetsades en provyta av de aktuella materialen på var och en av de fem skovlarna.

På skovelns undersida nära periferin och i anslutning till skovelns vridningsaxel uppkommer på relativt kort tid en lokal men kraftig kavitationsskada. Eftersom denna skada tillväxer tämligen snabbt och till sin karaktär och storlek är mycket lika på de olika skovlarna valdes den som plats för provytorna.

Beträffande provytornas storlek och placering hänvisas till den föregående rapporten R-1256-TH. Se även dokumentationsbladen 1/5 - 5/5 i denna rapport.

Avsikten med den nu utförda besiktningen var att se och dokumentera de under det gångna året uppkomna skadorna på provytorna och på det angränsande referensmaterialet.

Ort Kristinehamn	Datum 1993-05-05	Avd THU	Arkivbeteckning 2642
Utfärdare Rune Sjöberg/Age	Tel 4811	Sign	Ordernr Beteckn 3302
Ärende		Distribution	

Driftförhållanden

Driftförhållandena för vart och ett av kraftverkets två aggregat är inte tillgängliga eftersom endast kraftverkets totala produktion registreras. Stationseffekten (maximalt 66 MW) bedöms i medeltal ha varit ca. 2 MW lägre under det gångna året än under det föregående. Kraftverket är principiellt i drift hela året. Uppgifter om körfördelningen mellan aggregaten är ej tillgängliga. Variationen i nedervattenytans nivå uppges vara liten.

Skador

Enligt överenskommelse berörde besiktningen enbart den skada vid skovelns periferi som har använts för det utförda materialprovet. Övriga skador vid skovlarnas in- och avloppskanter samt på navkalotterna dokumenterades vid den föregående besiktningen, varefter de reparerades. Jämfört med den nu besiktigade skadan tillväxer de övriga betydligt långsammare.

Skadorna markerades med tuschlinjer på skovelytan, varefter de uppmättes och avritades på dokumentationsbladen 1/5 - 5/5. Skadans yttre begränsning är angiven med en heldragen linje. Innanför denna finns ytterligare en heldragen linje som anger gränsen för skadans pitting-område. Mellan de två gränslinjerna har skadan karaktären skuggad, matt till frostad yta.

Gränslinjen mellan provytan och referensmaterialet ligger 45 mm från skovelns periferi och är markerad med en streckad linje på dokumentationsbladen. Den är placerad så att den delar skadeområdet i två lika delar. Jfr. den föregående rapporten R-1256-TH sid. 3. Referensmaterialet (OK 63.35) ligger utanför gränslinjen (mot skovelns periferi) och testmaterialet innanför linjen.

Det uppmätta maximala skadedjupet samt det ungefärliga läget för detta är angivet på dokumentationsbladen. Ofylld cirkel gäller för provmaterialet och fylld cirkel för referensmaterialet.

Skadorna fotograferades. Se bildblad 1 - 2. På bilderna av skadorna på skovlarna 1 och 2 syns en blå streckad linje. Denna anger provytans begränsning mot det orörda skovelmaterialet. Linjerna kunde dras eftersom materialgränsen var synlig om skadan belystes från en lämplig riktning. På skovel 4 syns materialgränsen tydligt. Ingen motsvarande linjemarkering gjordes på denna skovel.

Det maximala skadedjupet i referensmaterialet var i genomsnitt ca. 1 mm större än vid den föregående besiktningen. Skadorna karakteriserades av ett mindre erosionsdjup i provytan (d_p) och ett större djup i referensmaterialet (d_r). På fyra av de fem skovlarna fanns däremellan en markerad sluttande övergångszon. Se figuren på följande sida, som visar ett radiellt snitt genom skovelkanten.

Ort
Kristinehamn

Datum
1993-05-05

Avd
THU

Arkivbeteckning
2642

Utfardare
Rune Sjöberg/Age

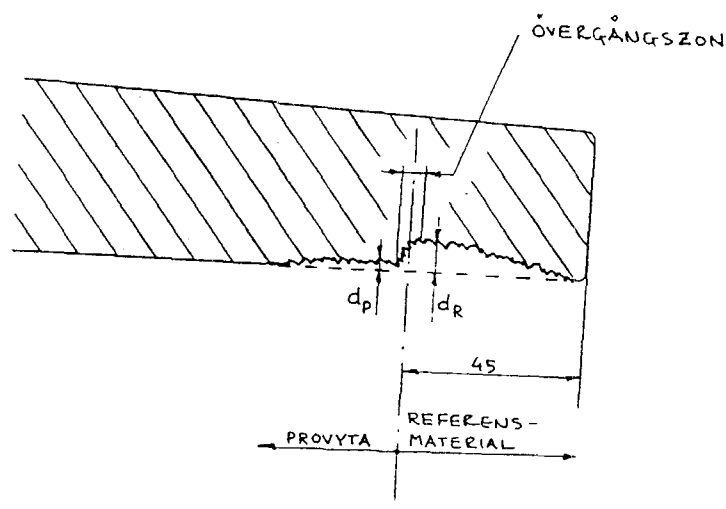
Tel
4811

Sign

Ordernr - Beteckn
3302

Ärende

Distribution



Det är inte helt självklart på vilket sätt man skall värdera de provade materialens motståndskraft mot erosion med utgångspunkt från de observerade skadorna. En möjlig metod är att bilda kvoten mellan de maximala skadedjupen i provytan och i referensmaterialet och låta denna kvot rangordna materialen. En stor motståndskraft mot erosion motsvarar ett lågt värde på den beräknade kvoten.

Tabellen nedan sammanfattar de uppmätta erosionsdjupen (d_p och d_R) och storleken av den beräknade kvoten för de provade materialen. Dessa är rangordnade med det bästa materialet överst i tabellen.

Skovel nr.	Provmaterial	d_p mm	d_R mm	d_p/d_R
4	Castolin 9080	1	4	0.25
5	Sandvik SAF 2507	3	10	0.30
1	Stellite 21	2	6	0.33
3	Castolin HD 6868	2	5	0.40
2	Castolin HD 6868	4	8	0.50

Enligt den ursprungliga planeringen skulle provmaterialet Hydroloy HQ 913 användas på skovel 3. Detta material måste dock uteslutas på grund av svårigheter med svetsning i underupplägg. Hydroloy-materialet ersattes med Castolin HD 6868 som därför har använts på två skovlar.

Dokumentnamn R-1301-TH			Sida nr 4
Ort Kristinehamn	Datum 1993-05-05	Årt THU	Arkivbeteckning 2642
Utfärdare Rune Sjöberg/Age	Tv 4811	Sign 	Ordernr Beteckn 3302

Som framgår av tabellen är Castolin 9080 det bästa materialet enligt detta prov och med denna utvärderingsmetod. Därefter följer Sandvik SAF 2507, Stellite 21 och Castolin HD 6868. När man värderar resultatet måste man betänka att osäkerheter finns i flera avseenden. Exempel på sådana är:

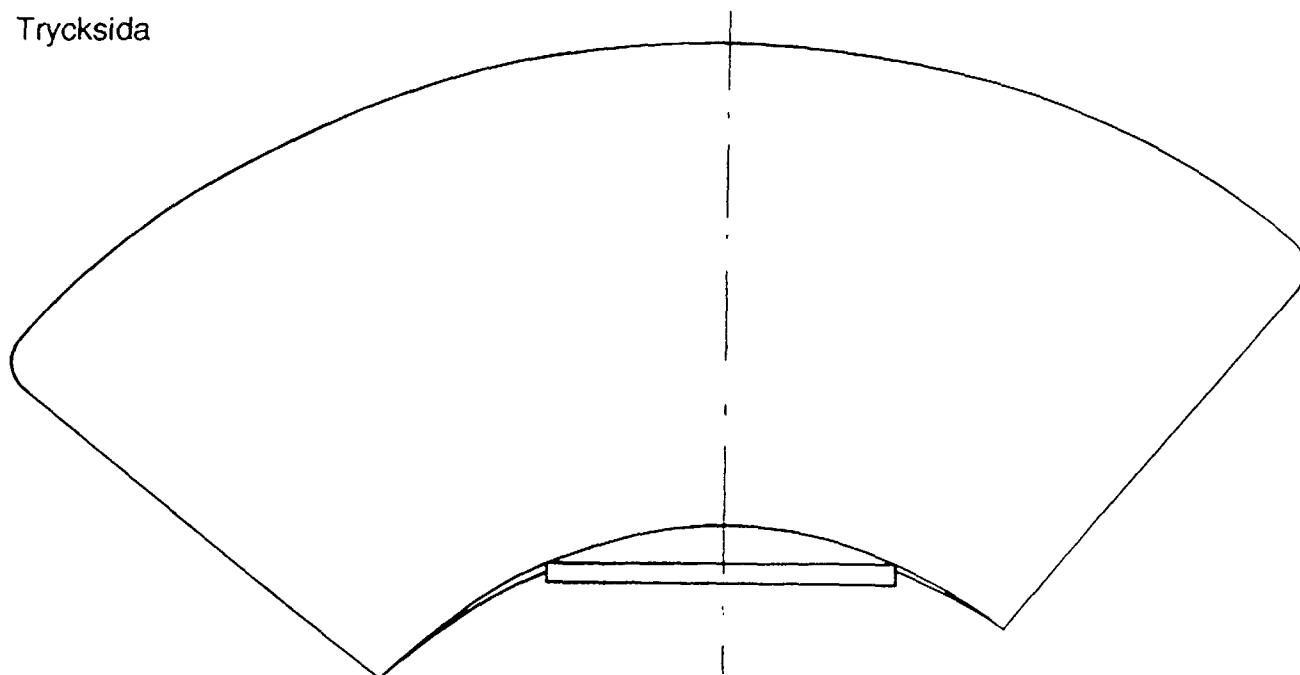
- Varierande skiktjocklek för de olika provmaterialen.
- Varierande längd-bredd- djupförhållanden för de olika skadorna.
- Varierande intensitet och karaktär hos kavitationen vid de olika skadorna.
- Varierande uppblandning med underliggande material i samband med svetsningen.
- Svårigheten att noggrannt och på ett konsekvent sätt mäta skadedjupet.

Löphjul: 50 KLV 117. D=4530. FINSHYTAN

Skovel nr.: 1

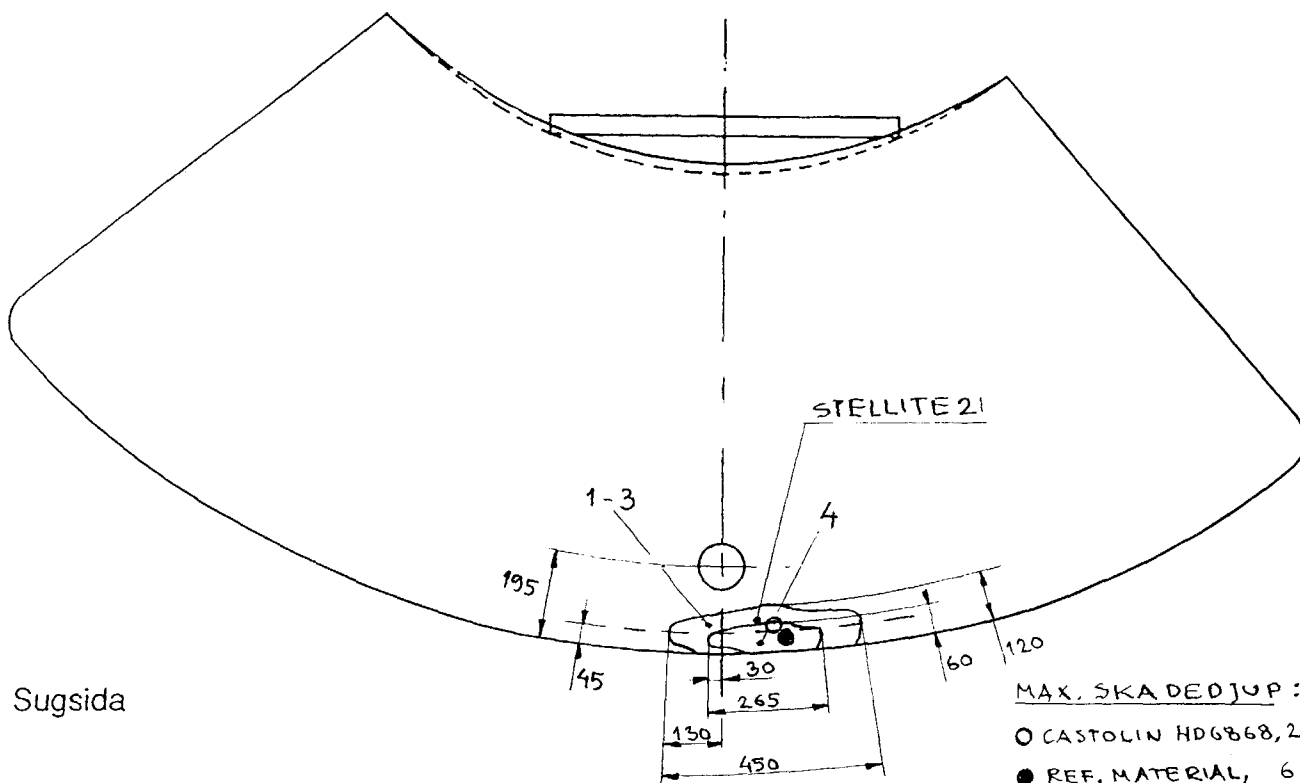
Inspektionsdatum: 1993-04-06

Trycksida



Avloppskant

Inloppskant



Sugsida

SKADEKARAKTÄRER:

1. Skuggad yta

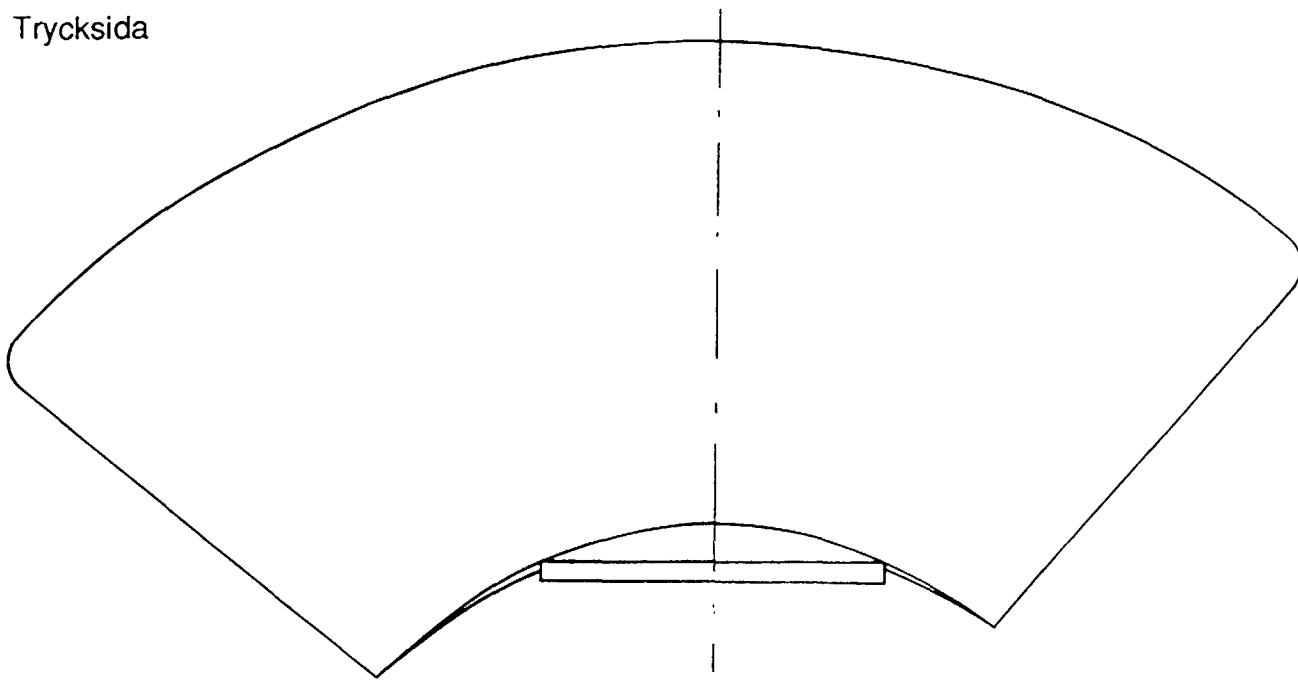
2. Matt yta

3. Frostad yta

4. Pitting

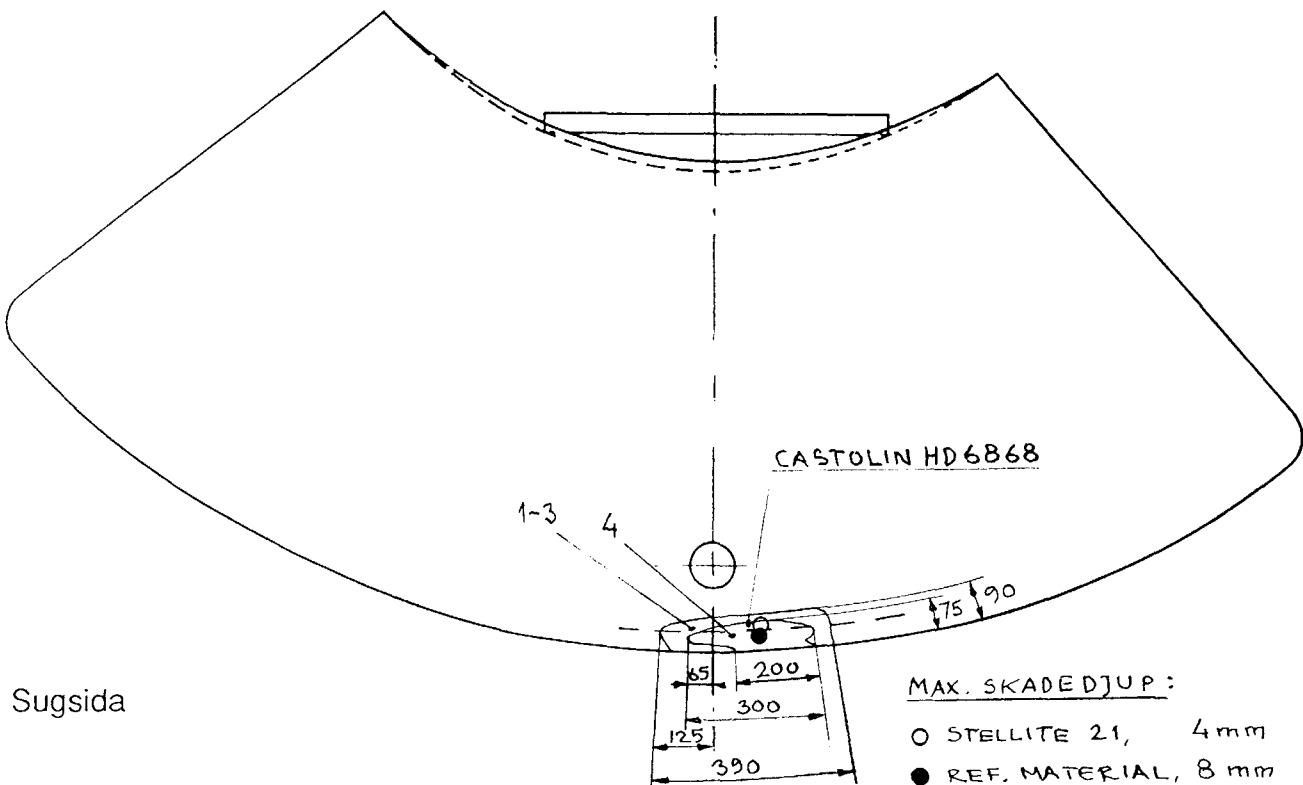
Löphjul: 50 KLV 117. D = 4530. FINSHYTAN
Skovel nr.: 2
Inspektionsdatum: 1993-04-06

Trycksida



Avloppskant

Inloppskant



Sugsida

CASTOLIN HD6868

MAX. SKADEDJUP:

- STELLITE 21, 4 mm
- REF. MATERIAL, 8 mm

SKADEKARAKTÄRER:

1. Skuggad yta

2. Matt yta

3. Frostad yta

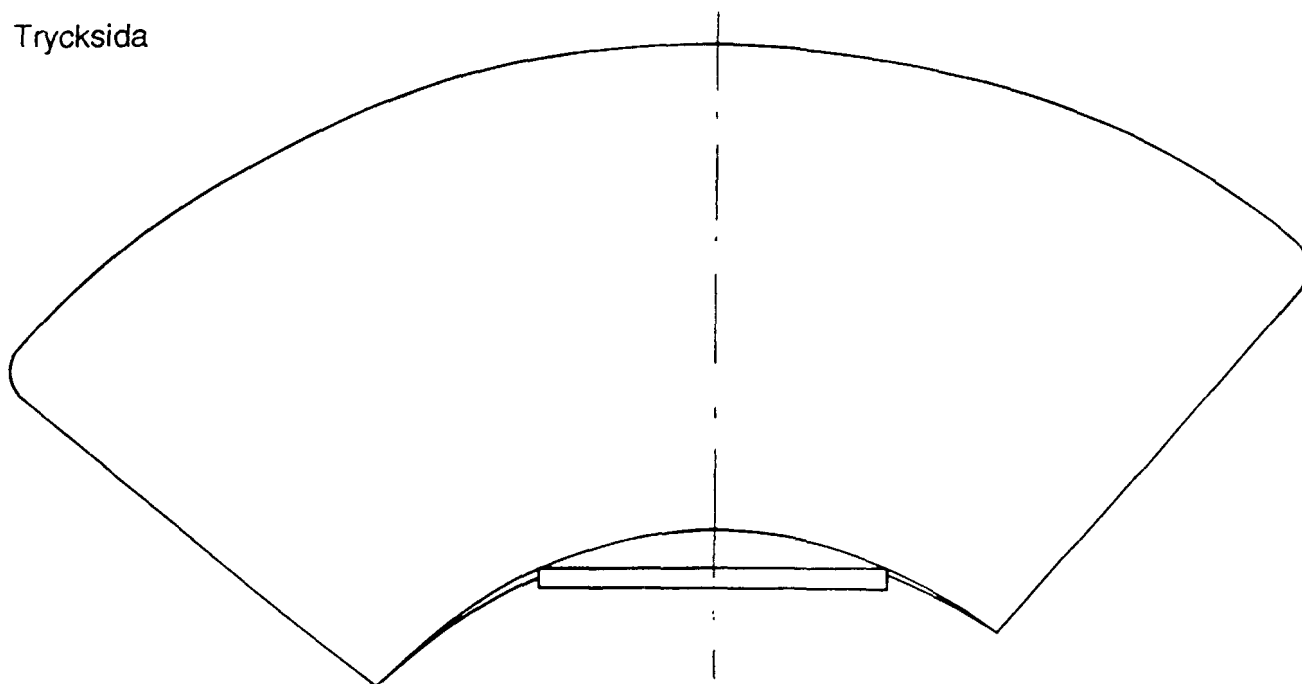
4. Pitting

Löphjul: 50 KLV 117. D=4530. FINSHYTTAN

Skovel nr.: 3

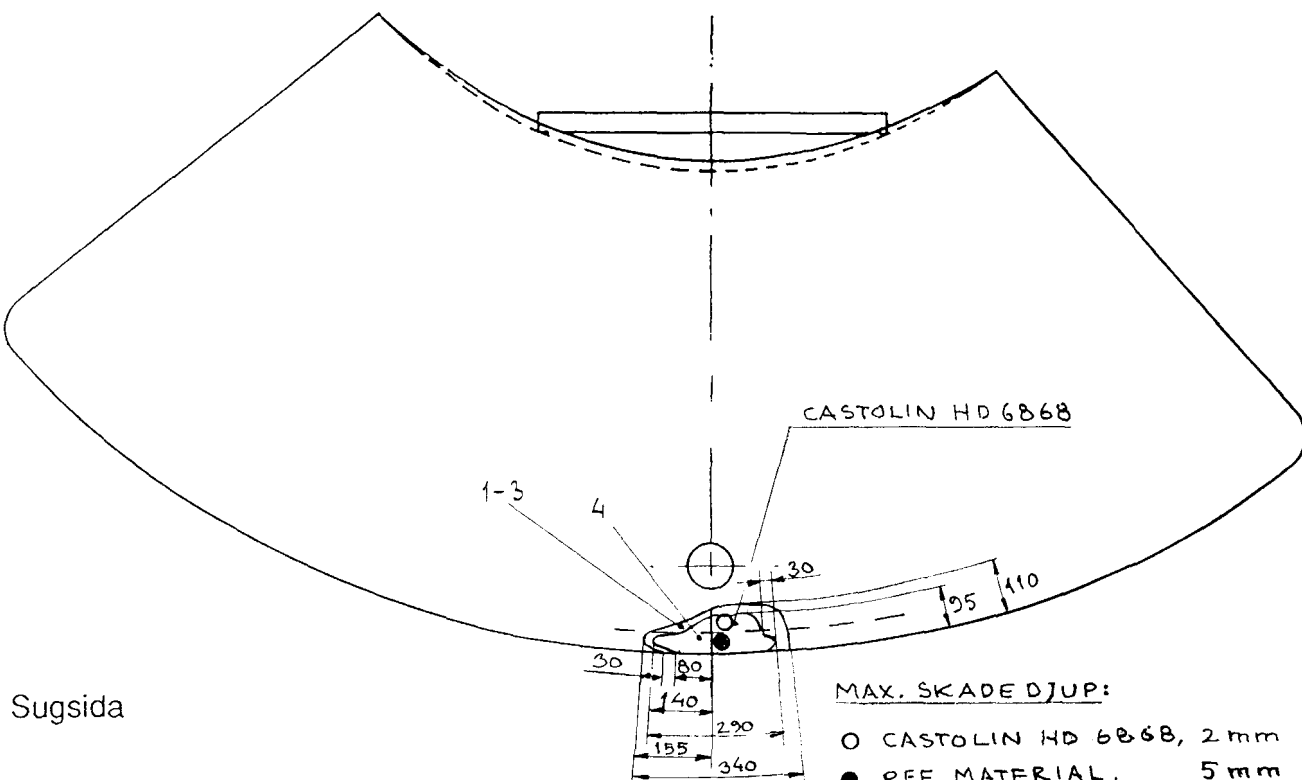
Inspektionsdatum: 1993-04-06

Trycksida



Avloppskant

Inloppskant



Sugsida

SKADEKARAKTÄRER:

1. Skuggad yta

2. Matt yta

3. Frostad yta

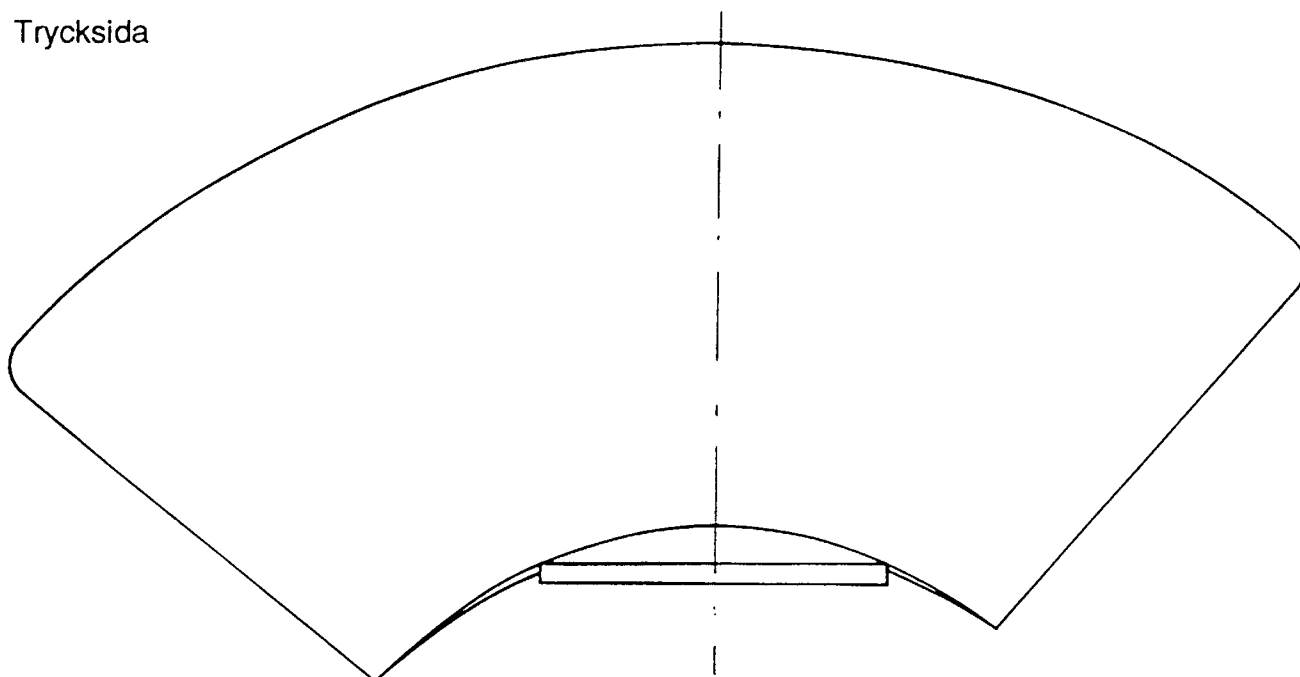
4. Pitting

Löphjul: 50 KLV 117. D=4530. FINSHYTAN

Skovel nr.: 4

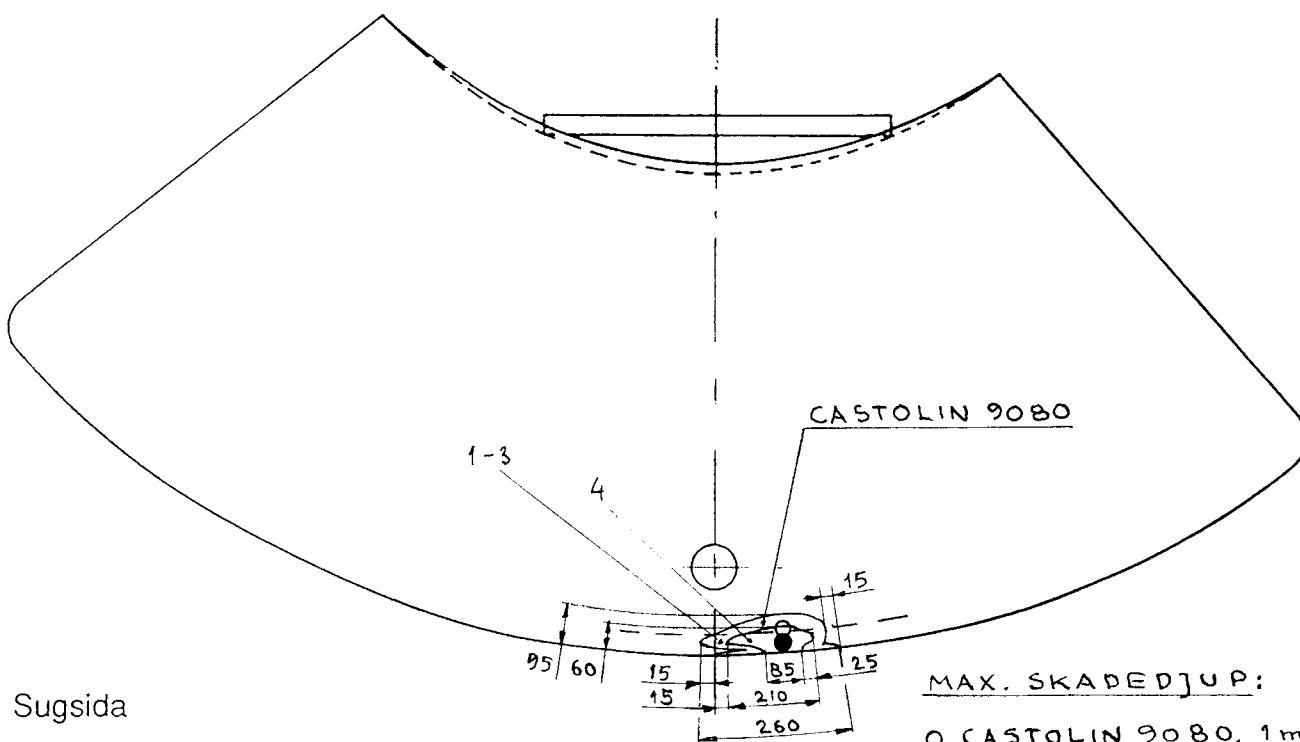
Inspektionsdatum: 1993-04-06

Trycksida



Avloppskant

Inloppskant



Sugsida

SKADEKARAKTÄRER:

1. Skuggad yta

2. Matt yta

3. Frostad yta

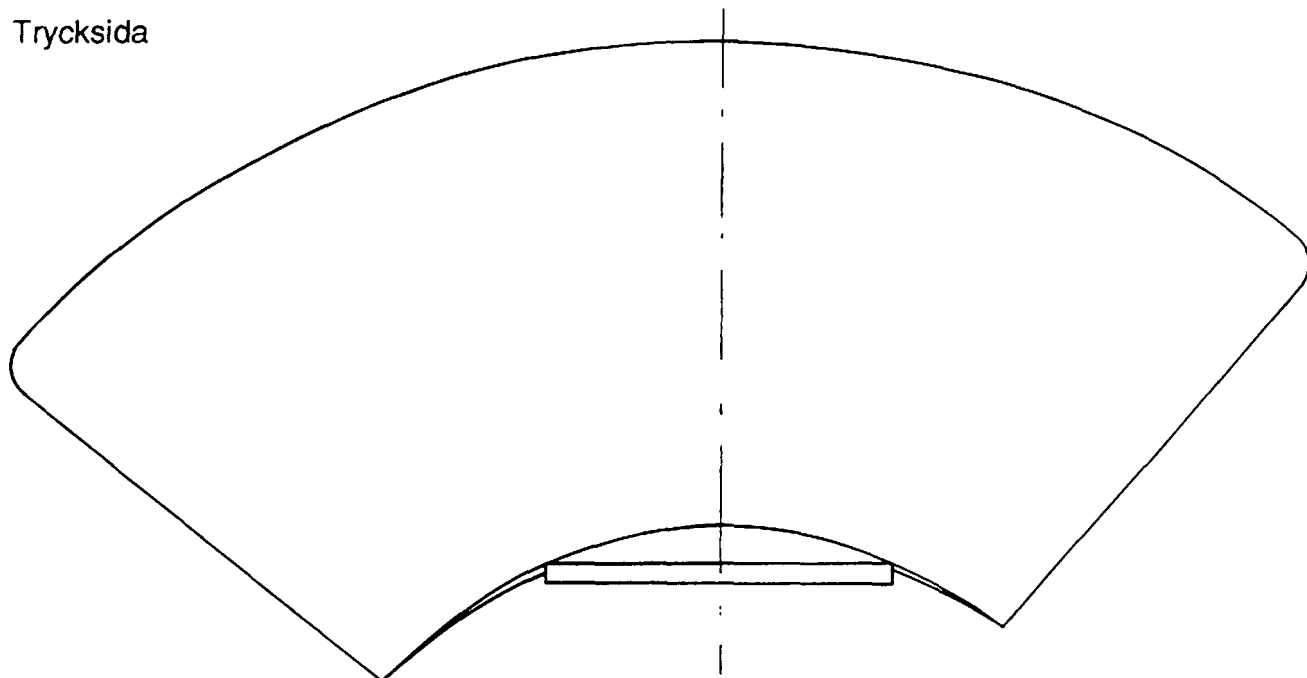
4. Pitting

Löphjul: 50 KLV 117, D = 4530. FINSHYTAN

Skovel nr.: 5

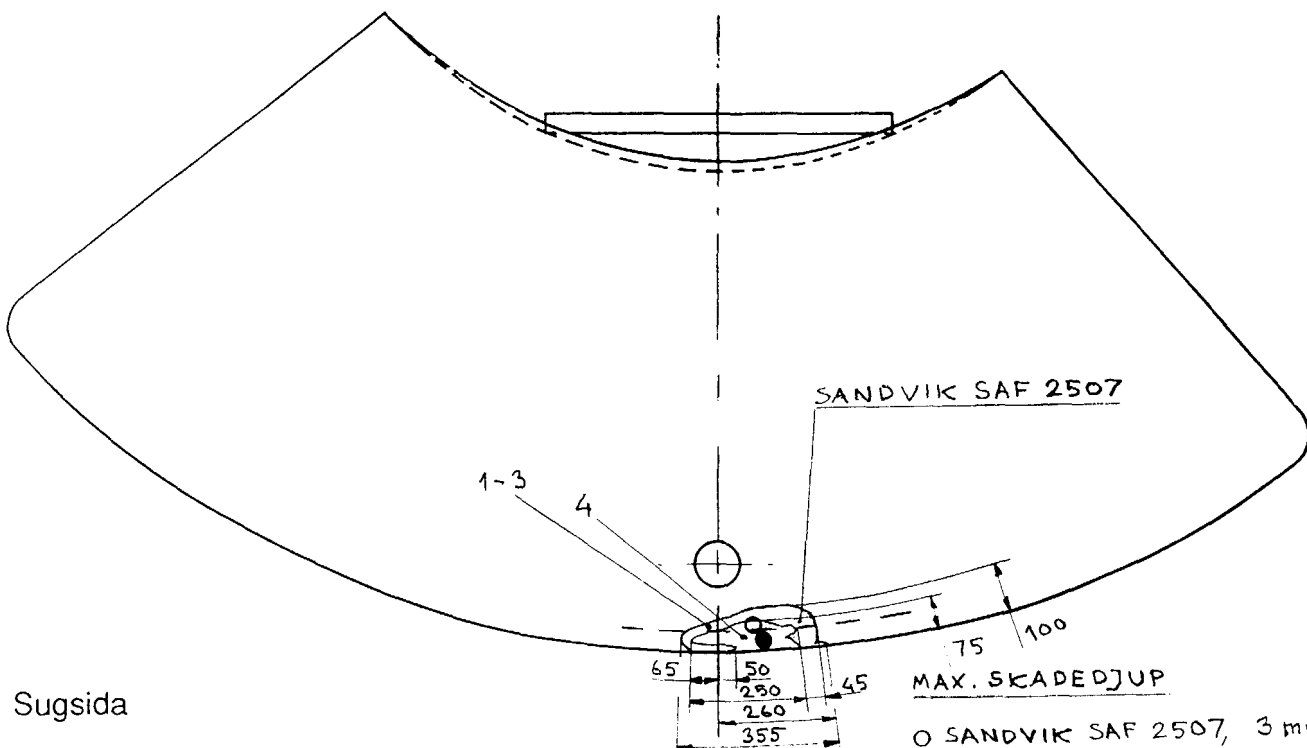
Inspektionsdatum: 1993-04-06

Trycksida



Avloppskant

Inloppskant



Sugsida

SKADEKARAKTÄRER:

1. Skuggad yta

2. Matt yta

3. Frostad yta

4. Pitting

APPENDIX 5

FÄLTPROV I FORSMO

Dokumenttyp RAPPORT		Dokumentnumrering GED-504	
		Filnamn	
Utskriftsdatum 1995-06-07		Uppdragsnummer ELFORSK 1052	
Författare JanErik Lindberg		Utskrivet av	
Granskad			
Godkänd		Datum	
Hänvisning till underlag / Ersätter			
Sökord	Antal textsidor 2	Antal bilagor 1	Antal bil. sidor 5

Ärende

FORSMO KRAFTSTATION AGGREGAT 4 LÖPHJULSBESIKTNING 1994-04-14

Deltagare: Jan Månsson, Graningeverkens AB, JanErik Lindberg Vattenfall
Energisystem AB

Bakgrund

Löphjulet till aggregat 4 i Forsmo kraftstation svetslagades avseende kavitation 1992-03-20 för att genomföra fältprov med olika material. Dessa valdes ut med hjälp av de genomförda laboratorieproven och var:

Skovel	Material
1.	Stellite 21
2.	Castolin 9080
3.	Castolin HD 6868
4.	Hydroloy HQ 913
5.	ESAB OK 84.42

Den nu genomförda besiktningen, efter ca. två år, är den första efter att fältprovet startades därför att aggregatet varit i produktion eller beredskap och därmed otillgängligt för inspektion.

Delgivning

Evald Holmén VBB-VIAK, Jan Månsson Graningeverkens AB, Åke Grahn Sydkraft konsult AB, Alf Jonsson och Hans Lindström Vattenfall, Utveckling AB, Jan Deborg Vattenfall Hydropower AB, PG Fällström.

Driftförhållanden

Aggregat 4 har under den gångna tvåårsperioden haft 14 664 drifttimmar.

Skador

Skadornas omfattning på provytorna finns dokumenterade på skadeskisserna i bilaga 1. Fotografier av skovlarnas skador återfinns i bildblad 1 och 2.

De skador som uppstått är väl jämförbara med de som reparerades vid provets början. Visserligen kunde vi vid det tillfället bara undersöka de urslipade skadorna men djup och utbredning är av samma storleksordning på respektive skovel.

Man ser en tydlig gräns där referensmaterial och provmaterial möts på skovel 1, 2 och 5 vilket också avspeglas i relationen maximalt uppmätt djup nedan.

Ett försök att särskilja materialen görs här genom att bilda kvoten mellan maximalt uppmätt skadedjup i provmaterialet och referensmaterialet (dp/dr).

Skovel nr.	Provmaterial	Relation dp/dr	Skadedjup	
			provmtrl. (dp)	referensmtrl. (dr)
1	Stellite 21	0,2	ca. 1	5
2	Castolin 9080	0,3	3	9
3	Castolin HD 6868	0,4	3	7
4	Hydroloy HQ 913	0,3	ca. 1	4
5	ESAB OK 84.42	0,2	ca. 3	19

En svårighet har varit att veta var gränslinjen mellan materialen faktiskt ska dras och att skovel 3 och 4 har en mer kontinuerlig övergång mellan referens- och provmaterial. Skovel 4 som är lagad med Hydroloy HQ 913 har ett mer svårtolkat utseende också genom att erosionen förefaller vara i ett tidigare stadium än på övriga skovlar. Det kan bero på att intensiteten är lägre eller att provmaterialet har fått en större utbredning än avsett.

KAPLANSKOVEL

DOKUMENTATION AV KAVITA-
TIONSSKADOR

Anläggning

Blad nr.: 1

FORSMO G4

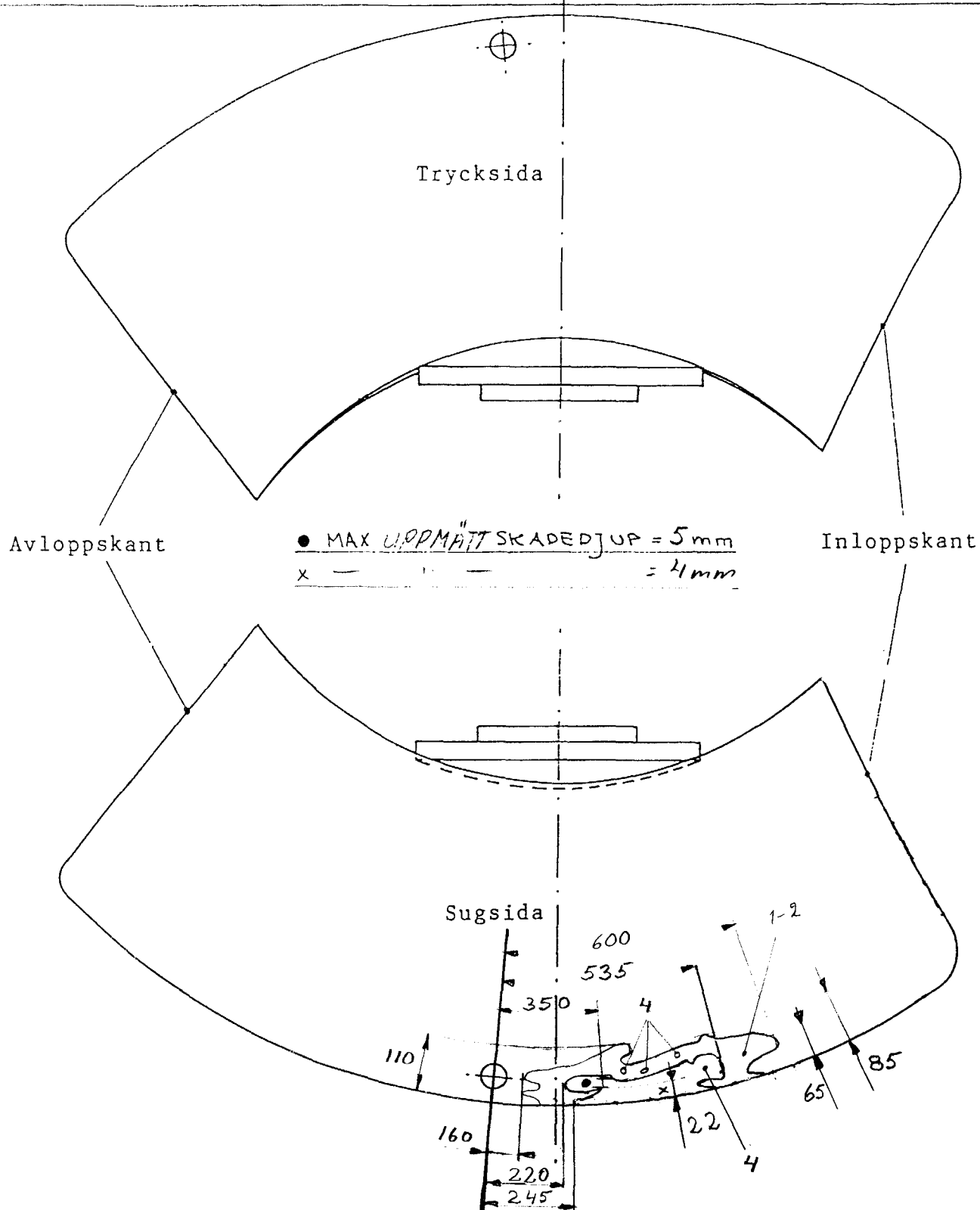
Ref.nr.

Stellite 21

Löphjul: K185/5-5347 D=4400 mm

Skovel nr.: 1

Inspektionsdatum: 1994-04-14



SKADEKARAKTÄRER:

1. Skuggad yta
2. Matt yta
3. Frostad yta
4. Pitting
5. Urslipad skada

KAPLANSKOVEL

DOKUMENTATION AV KAVITA-
TIONSSKADOR

Anläggning

Blad nr.: 2

FORSMD G4

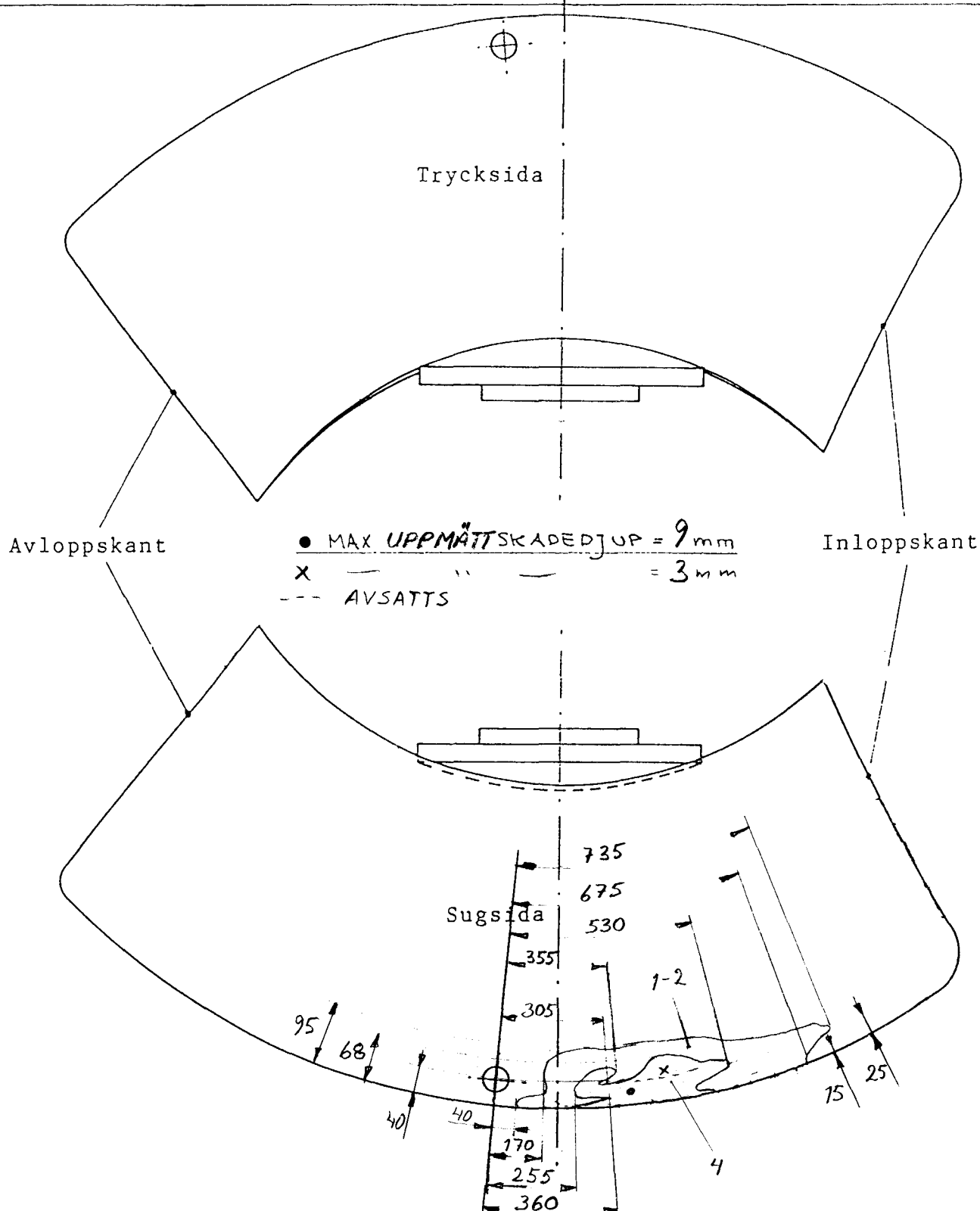
Ref.nr.

Castolin 9080

Löphjul: K125/5-53.4% D=1400 mm

Skovel nr.: 2

Inspektionsdatum: 1994-04-14



SKADEKARAKTÄRER:

1. Skuggad yta
2. Matt yta
3. Frostad yta
4. Pitting
5. Urslipad skada

KAPLANSKOVEL

DOKUMENTATION AV KAVITA-
TIONSSKADOR

FORSMD G4

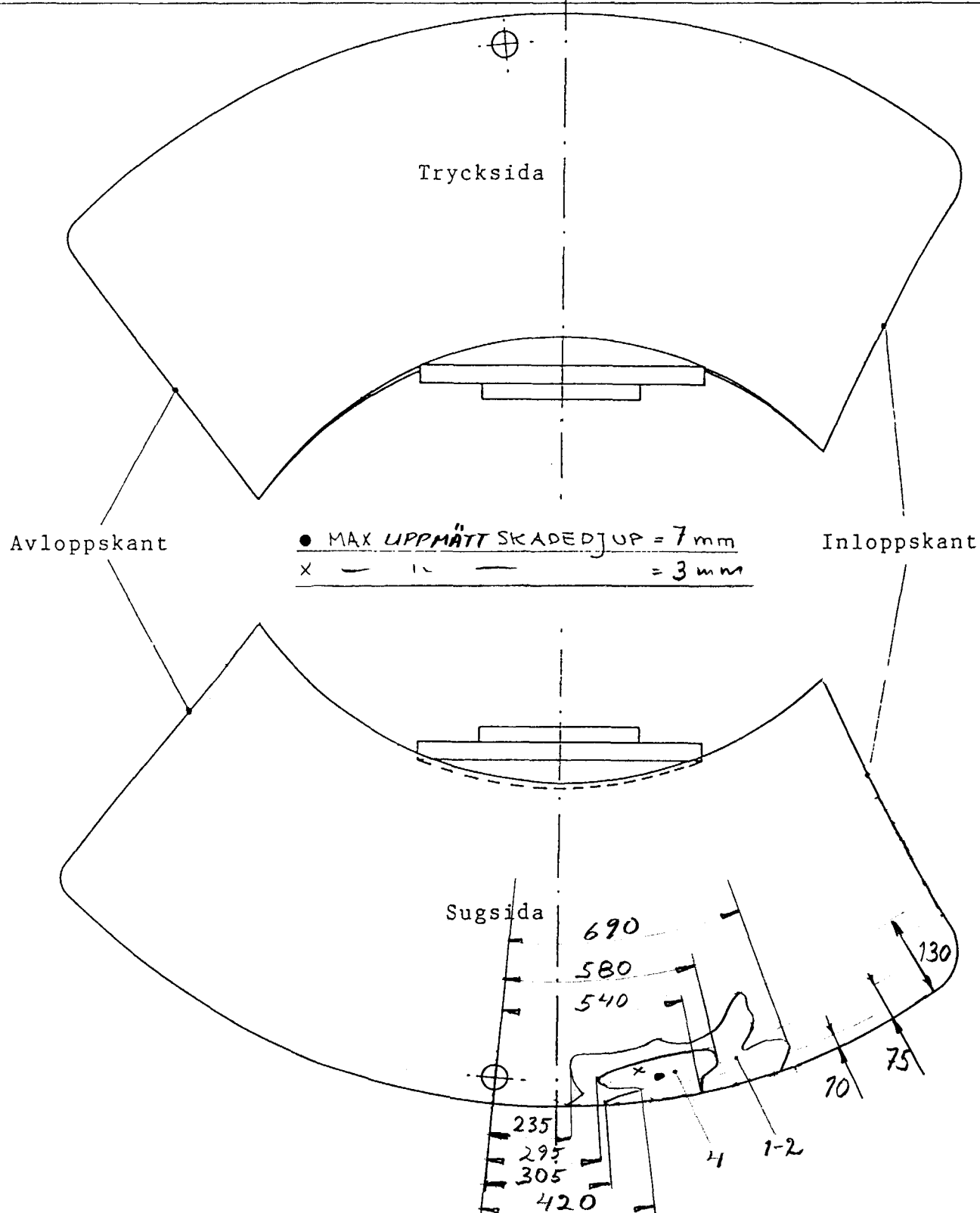
Ref.nr.

Castolin HD 6868

Löphjul: K185/5-53.4° D=4400 mm

Skovel nr.: 3

Inspektionsdatum: 1994-04-14



SKADEKARAKTÄRER:

1. Skuggad yta
2. Matt yta
3. Frostad yta
4. Pitting
5. Urslipad skada

KAPLANSKOVEL

DOKUMENTATION AV KAVITA-
TIONSSKADOR

Anläggning

Blad nr.: 4

FORSMO G4

Ref.nr.

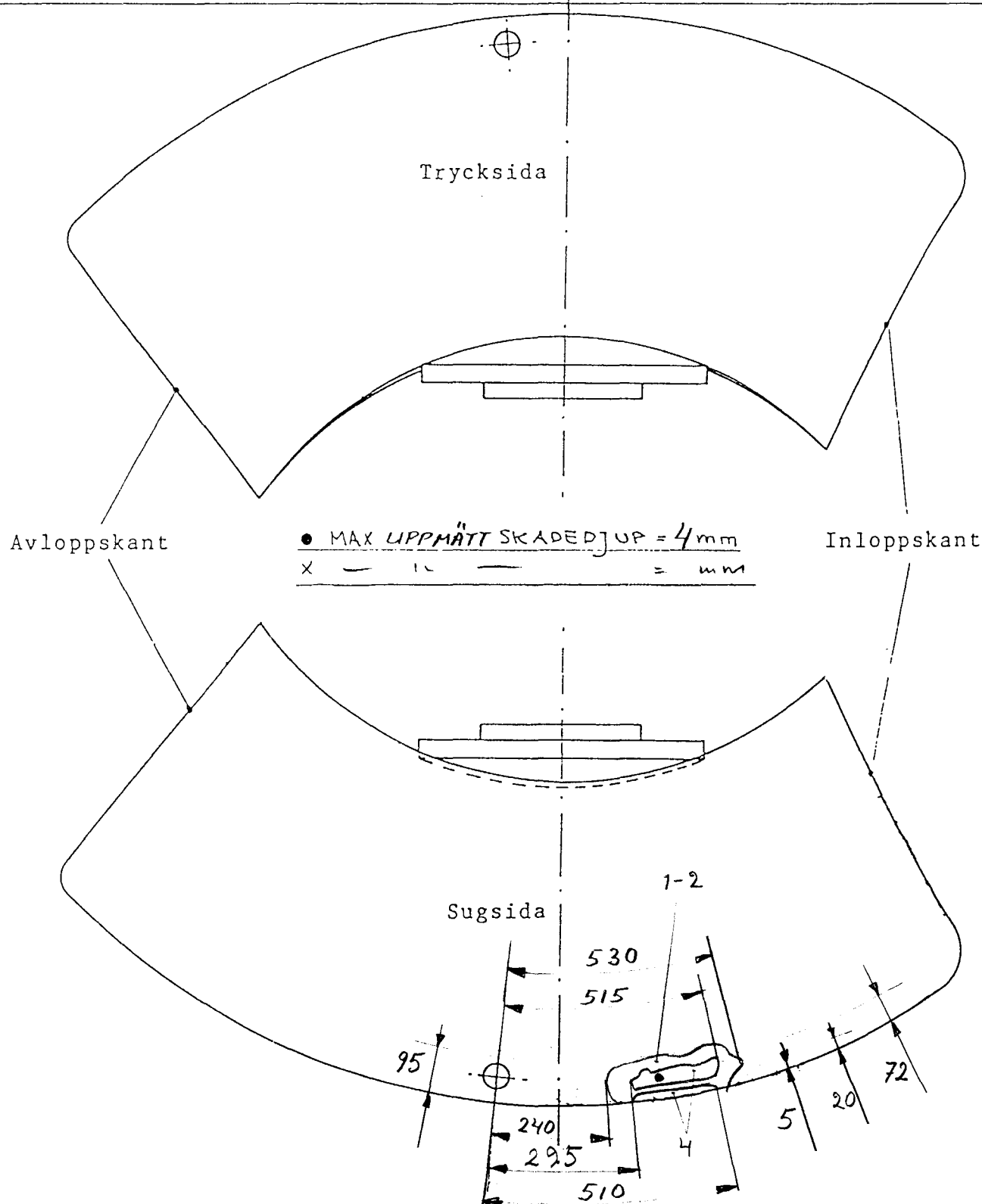
Hydrology HQ 113

Löphjul: K185/5-53.4°

D=4400 mm

Skovel nr.: 4

Inspektionsdatum: 1994-04-14



SKADEKARAKTÄRER:

1. Skuggad yta

2. Matt yta

3. Frostad yta

4. Pitting

5. Urslipad skada

KAPLANSKOVEL

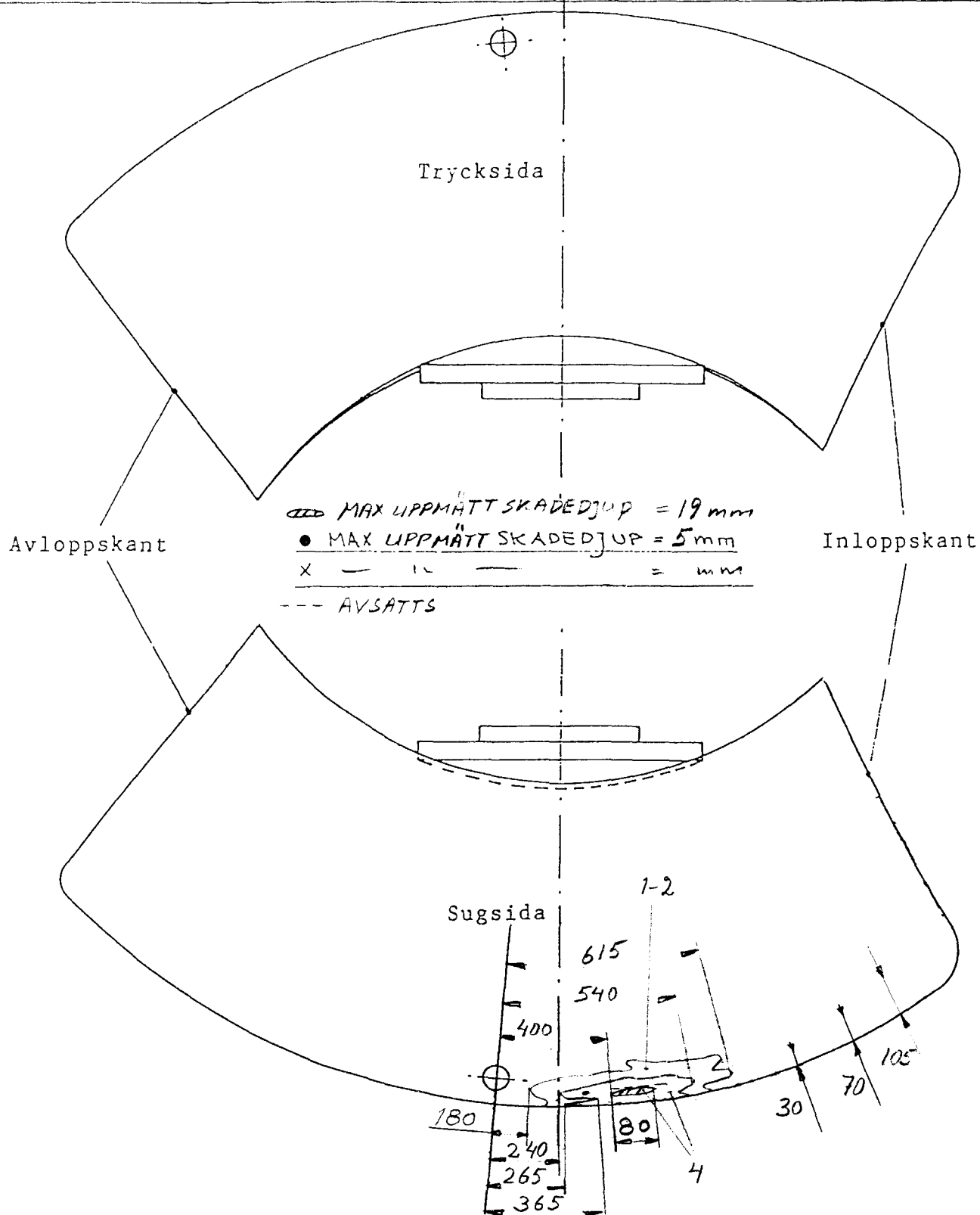
DOKUMENTATION AV KAVITA-
TIONSSKADOR

FÖRSMO G4

Ref.nr.

ESAB OK 84.42

Löphjul: K185/5-53.470 D=4400 mm
 Skovel nr.: 5
 Inspektionsdatum: 1994-04-14



SKADEKARAKTÄRER:

1. Skuggad yta 2. Matt yta 3. Frostad yta 4. Pitting 5. Urslipad skada

ELFORSK

SVENSKA ELFÖRETAGENS FÖRENING OCH UTVECKLING - ELFORSK - AB

Elforsk AB, Box 1704, 111 87 Stockholm. Besöksadress: Birger Jarlsgatan 41 A

Telefon: 08-790 04 50. Telefax: 08-723 06 65