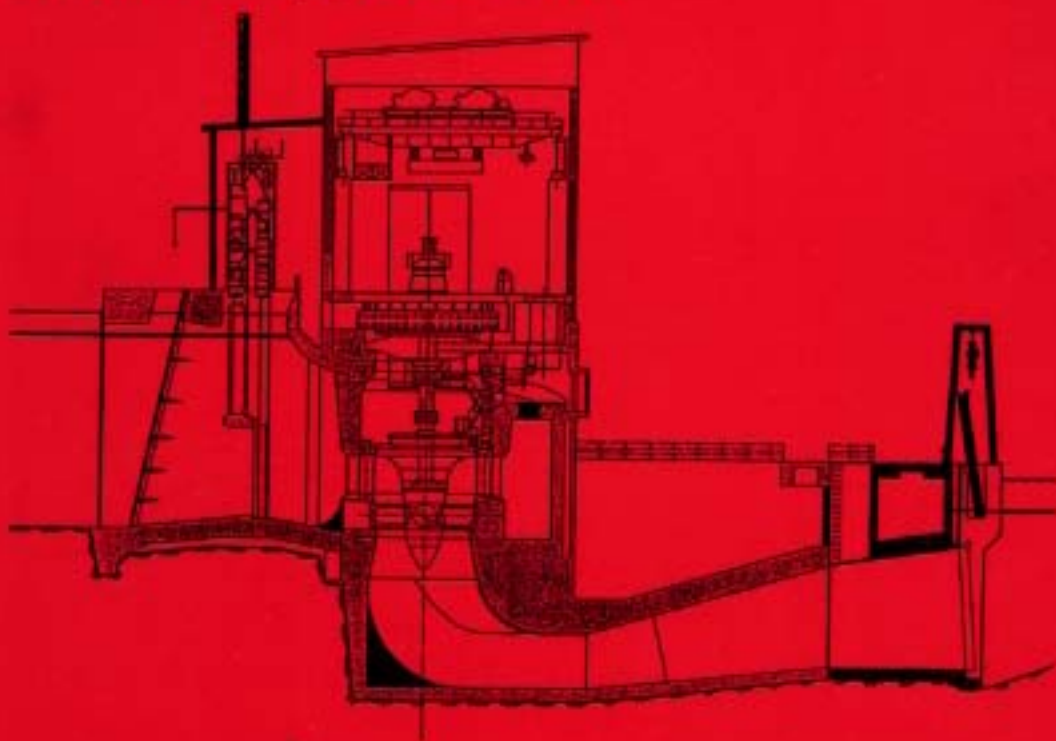


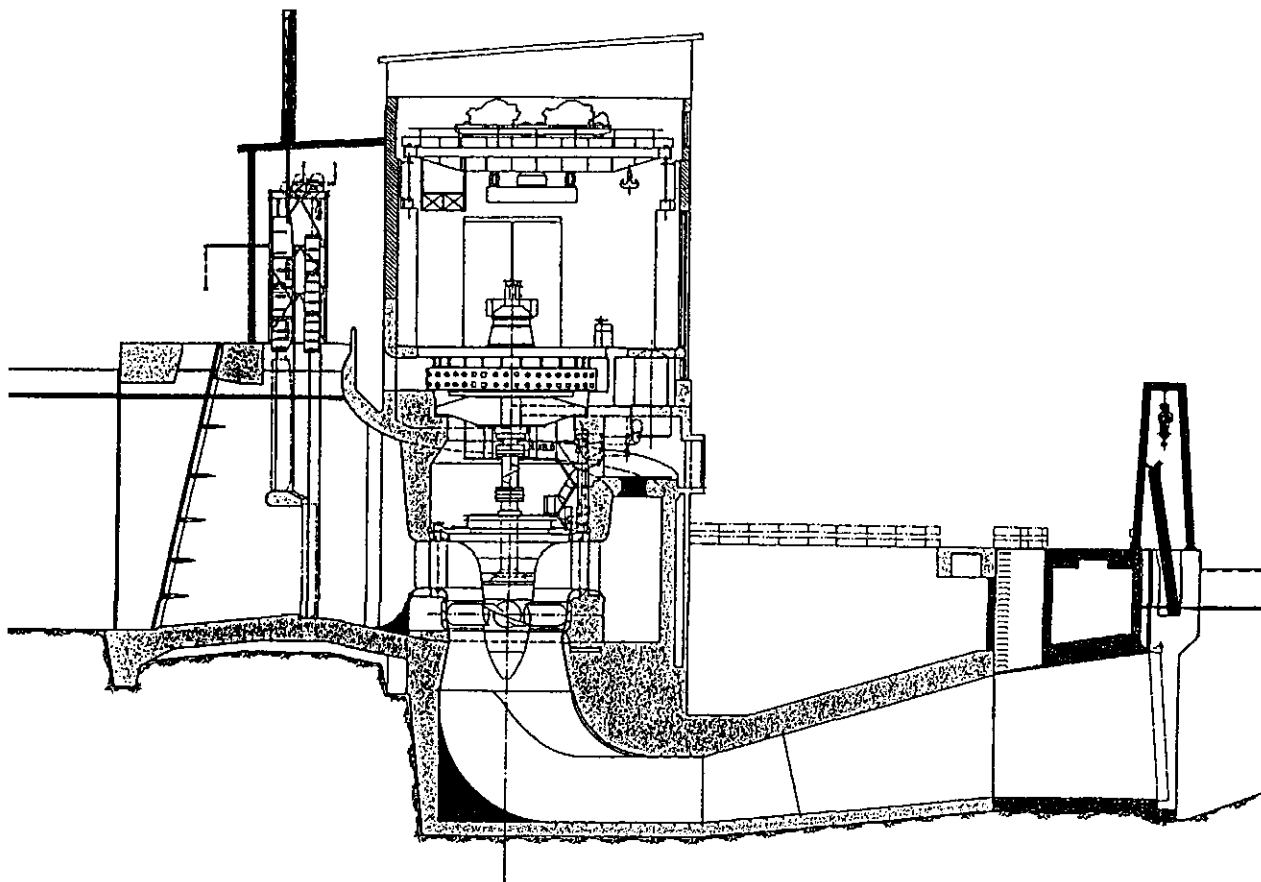
Verkningsgrads- förbättringar i vattenkraftstationer

Elforsk Rapport 93:2



VERKNINGSGRADS- FÖRBÄTTRINGAR

I VATTENKRAFTSTATIONER



VERKNINGSGRADSFÖRBÄTTRINGAR

I VATTENKRAFTSTATIONER

Innehållsförteckning

Sammanfattning	1	5. Driftoptimering	22
Summary	2	5.1 Allmänt	22
1. Inledning	3	5.2 Adaptiv reglering	22
1.1 Bakgrund	3	5.3 Stationsfunktioner	24
1.2 Projekt	3	5.3.1 Vattennivåövervakningsautomatik	25
1.3 Ekonomiska aspekter	4	5.3.2 Vattennivåreglering	26
1.4 Verkningsgradsförbättringar	5	5.3.3 Stationsflödesfördelning	27
1.5 Energiförluster	6	5.3.4 Lastfördelning aktiv effekt	28
		5.3.5 Lastfördelning reaktiv effekt	28
2. Turbiner och vattenvägar	7	5.4 Aggregatfunktioner	29
2.1 Allmänt	7	5.4.1 Fallförlustövervakning	29
2.2 Magasin	8	5.4.2 Fallhöjdsberoende kombinerings	29
2.3 Till- och utloppskanaler	8	5.4.3 Verkningsgradsövervakning	29
2.4 Till- och utloppstunnlar	8	6. Utvärderingsmetoder	30
2.5 Kraftverksintag	9	6.1 Allmänt	30
2.6 Spiraler och tuber	10	6.2 Modellteknik	30
2.7 Stagingar	10	6.3 Beräkningsteknik	31
2.8 Ledskovlar	10	6.3.1 Beräkningsformler	31
2.9 Löphjul	11	6.4 Fältprov	33
2.10 Sugrör	14	7. Utveckling	35
2.11 Kombinerings	15	7.1 Allmänt	35
2.12 Kavitation	16	7.2 Driftoptimering	35
2.13 Normer	16	7.3 Förlustreducering	35
3. Generatorer och transformatorer	17	7.4 Reglersystem	35
3.1 Allmänt	17	7.5 Kontroll och noggrannhet	35
3.2 Generator	17	7.6 Datateknik	35
3.2.1 Ventilation	17	7.7 Material	35
3.2.2 Magnetisering	17	8. Referenser	36
3.2.3 Lindning	17	Appendix	
3.2.4 Plåt	18	Tillämpningsexempel:	
3.3 Transformatorer	18	A: Långhags kraftstation	37
3.4 Förlustvärdering	19	B: Olidan kraftstation	40
3.5 Normer	19	C: Gammelånga kraftstation	42
4. Hjälpårustning	20	Rapportförteckning	44
4.1 Allmänt	20		
4.2 Styrning och dimensionering	20		
4.3 Kylsystem och ventilation	20		
4.4 Oljor	21		

Sammanfattning

Utvecklingen inom kraftindustrin går från en stadig uppbyggnad av samhälliga resurser med infrastrukturerella nybyggnationer till en mer förvaltande tillvaro med underhåll, ombyggnationer och moderniseringar.

Det blir alltmer intressant att optimera driften, förbättra verkningsgraden och höja effekten i befintliga anläggningar. Många anläggningar faller successivt för åldersstreck och verkningsgradshöjande åtgärder kommer in som ett naturligt inslag i reinvesteringsprojekten.

Vattenkraften i Sverige är till största delen utbyggd och svarar idag för nära hälften av den genererade elen, den andra hälften kommer från kärnkraft.

Ett stort upprustnings- och moderniseringsskede har inletts för de befintliga anläggningarna. Som ett led i att effektivisera vattenkraften för att fylla ekonomiska, säkerhets och tekniska krav vidtas olika åtgärder. Det kan vara omorganiseringar och rationaliseringar av verksamheten och tekniska förbättringar.

Mindre åtgärder t ex förbättringar av ytjämnhet och minskning av läckage ger förbättringar av verkningsgraden i storleksordningen 0,1-0,2 %. Byte av löphjul och löphjuls-kammare kan ge förbättringar på någon procent. I vissa fall kan en förändring av sugröret öka energiuttaget. En bra kombinerad mellan löphjul och ledskovlar ger mindre förluster och det kan finnas upp till en procent att tjäna, speciellt om fallhöjden varierar.

Det är naturligtvis stor skillnad på kostnader att förlänga ett sugrör mot att jämna till några ytor. Huruvida resultatet motsvarar kostnaderna för insatsen beror på förutsättningarna i det enskilda fallet. Ju sämre anläggning ju bättre förutsättningar att tjäna på att göra effekt- och verkningsgradshöjande åtgärder.

En målsättning med denna rapport är att kartlägga vad som kan vara aktuella områden för verkningsgradshöjande åtgärder. Genom att försöka kvantifiera dessa vaskades relevanta åtgärder fram. Dessa har sedan bearbetats och redovisas i rapporten.

Verkningsgradshöjande åtgärder som har bedömts

som relevanta redovisas i rapporten under följande rubriker:

- Turbiner och vattenvägar
- Generator och transformator
- Hjulputrustning
- Driftoptimering
- Utvärderingsmetoder

Tillståndskontroll behandlas inte i denna rapport. Parallellt med detta projekt pågår dock ett annat projekt "Metoder för tillståndskontroll av vattenkraftsregat" i VASTs regi, tillsammans med Vattenfall.

Adaptiv reglering är ett område som undersökts av arbetsgruppen. Dessa regulatorer har ännu inte fått något genomslag inom vattenkraften.

Vart tar egentligen den energi vägen som produceras i en kraftstation? Kraftverken genererar och avger energi i olika former. Den nyttiga avgivna energin är den som matas ut på nätet. Förhållandet mellan tillförd och nyttig energi ger således kraftverkets totala verkningsgrad.

För att lösa strömningstekniska problem har modellteknik använts under lång tid bl a för att åskådliggöra ett komplext fenomen, men också i brist på andra tillförlitliga utvärderingsmetoder. Det är mycket billigare att korrigera en felaktighet i modell än att göra prov på en färdig anläggning.

Det här projektet har begränsats till vad som inom en station kan förbättras avseende åtgärder och optimering. Det finns även andra områden som också borde undersökas ur optimering och effektivitetssynpunkt.

Det går att optimera vattenplaneringen av en älv eller en älvsträcka så att bästa utnyttjande av den kan göras genom samkörning mellan stationer. Det går även att beräkna t ex när olika underhållsåtgärder kan göras vid det mest ekonomiska tillfället.

Rapporten ger förhoppningsvis läsaren en del tips om verkningsgradshöjande åtgärder i vattenkraftstationer. Huruvida dessa är tillämpbara i det enskilda fallet får var och en själv fundera över. Det går inte att ge generella "direktiv" om vad som är tillämpligt, men det har gått att ge kvantifierade förslag till åtgärder.

Summary

The power industry in Sweden is facing a period of administration of existing hydroelectric power plants. Very few new plants will be constructed the next coming decades. It has thus become ever more interesting to optimize the operation, raise the efficiency and the electric output in existing plants.

The economic and environmental potential for hydro power in Sweden is almost completely utilized. Hydroelectric production contributes with roughly 50 % of the total production. The other half has its origin in nuclear power plants.

The present era is characterized by renewal and refurbishment of, ageing, existing plants. With this as a background the Swedish foundation for research in hydroelectric power production, VAST, formed a working group "Efficiency Improvements in Hydroelectric

Power Plants". The working groups main task was to summarize and evaluate relevant areas for efficiency improvements. This report is the direct result from the joint work of the group.

The following headlines are covered in the report:

- Turbines and Waterways
- Generators and Transformers
- Auxiliary Equipment
- Production Optimization
- Evaluation Methods

This report is restricted to a single hydro power station and is in no way ment to be preemitive. There are of course other areas, not covered, such as water planning etc. where large benefits could be gained.

1.3 Ekonomiska aspekter

De ekonomiska aspekterna finns i den text som beskriver t ex en åtgärd i form av en kvantifiering. Det beror mycket på olika omständigheter från fall till fall. Därför har arbetsgruppen även inkluderat några fårska exempel i appendix sist i rapporten. Dessa går att jämföra med för den som har en aktuell anläggning.

Många åtgärder ger var för sig en ökning av verkningsgraden på mellan 0.1-0.3%. Det är åtgärder typ förbättringar av olika ytors jämnhet och tätningar t ex byte av spaltringar. De stora och reella tillskotten på någon eller några procent ger åtgärder som byte av löphjul eller förlängning av sugrör. En bra kombinerad mellan löphjul och ledskovlar ger mindre förluster och det kan finnas upp till en procent att tjäna, speciellt om fallhöjden har ändrats eller varierar.

Det är naturligtvis stor skillnad på kostnader att förlänga ett sugrör mot att jämna till några ytor. Huruvida resultatet motsvarar kostnaderna för insatsen beror på förutsättningarna i det enskilda fallet. Ju sämre anläggning ju bättre förutsättningar att tjäna på att göra effekt- och verkningsgradshöjande åtgärder.

Ombyggnaden i Stora Krafts station Långhag är ett exempel på vad olika åtgärder kan ge, se appendix A och nedanstående sammanställning.

Sammanställning, Långhag:

Förbättringarna i Långhag gav 9 GWh per aggregat. Dessa fördelade sig enligt följande:

Turbin	5,5 GWh
Generator	2,0
Transformator (mindre)	1,0
Kontrollutrustning	0,5
Korttidsreglering	0,5

Åtgärder i turbin och vattenvägar ger en förbättring med 2% och fördelar sig enligt följande:

Nytt större och nedsänkt löphjul	2,4 GWh
Ny turbinkammare	1,7
Förlängning av sugrör	1,4
Summa:	5,5

Med hjälp av datorberäkningar kan strömbilder och förluster efterliknas i en simulering. Detta öppnar möjligheten att studera resultat av och utvärdera olika åtgärder.

Lämpliga områden för studier är t ex:

- Risgrindar
- "Inlägg" (t ex att jämna ut tvära hörn i vattenvägar-na)
- Sugrörsform
- Löphjulsspalt
- Sugrörsförlängning

Simuleringar leder fram till ekonomiska kalkyler som kan ligga till grund för eventuella åtgärder.

Nedan visas ett förslag till kalkyl för bedömning av lönsamheten i ett renoveringsprojekt.

Exempel, lönsamhetskalkyl:

En ombyggnad av en kraftstation ger ett produktionstillskott på 10 GWh samt en höjning av maxeffekten med 3 MW.

Investeringsbudgeten ca 50 MSEK, dvs 5 kronor per årskilowattimme.

Investeringen jämförs mot en intäktstariff, t ex:

november – mars	32 öre / kWh
april – oktober	22 öre / kWh
effektavgift 300 kr / kW (effektbehov vid höglåstid)	

Den nya energin är fördelad:

30 %	november – mars
70 %	april – oktober

Intäkt per år:

$$I = 3 \cdot 10^6 \cdot 0,32 + 7 \cdot 10^6 \cdot 0,22 + 300 \cdot 3 \cdot 10^3 = \underline{3.400.000 \text{ kr / år}}$$

Med 30 års avskrivning och ett förräntningskrav på 7% blir den totala intäkten:

$$I \sum_{n=0}^{30} \frac{1}{1,07^n} = I \cdot \frac{1 - (1+0,07)^{-30}}{0,07} = I \cdot 12,41 = \underline{42.191 \text{ kkr}}$$

Denna investering är tveksam. Vid mera ingående analys bör eventuella variationer i tariffens realprisutveckling beaktas.

1. Inledning

1.1 Bakgrund

Vattenkraften i Sverige är till största delen utbyggd och svarar idag för nära hälften av den genererade elenergin, den andra hälften kommer från kärnkraft.

Ett stort upprustnings- och moderniseringsskede har inletts för de befintliga anläggningarna. Som ett led i att effektivisera vattenkraften och göra den tillgänglig för framtida ekonomiska och tekniska krav vidtas åtgärder på olika plan. Dessa kan vara omorganisering och rationalisering av verksamheten likaväl som tekniska förbättringar i alla led.

I vattenkraftstationerna finns en potential i form av effektivisering av komponenter i anläggningen. Det är främst effekthöjande och verkningsgradsförbättrande åtgärder som kan vidtas, men också optimering i stationer och älvräckor.

En förutsättning för effektivisering är att mäta upp resultat och på så sätt kunna kontrollera processen. En ökad effektivisering tillsammans med en förbättrad tillståndskontroll av anläggningen skapar möjligheter att förlänga ett utnyttjande av en befintlig anläggning såväl ekonomiskt som tekniskt.

Mycket intressant ur effektiviseringssynpunkt är även driftoptimering i fleraggregatsstationer. Det är ej ovanligt att man enbart med en förändrad startordning av aggregaten kan öka intäkterna med 0,5-1%.

Även driftstrategin för en älvräcka med flera kraftstationer kan optimeras och ge påtagliga produktionsvinster.

Enskilda verkningsgradshöjande åtgärder i en station behöver kvantifieras avseende det totala resultatet för att kunna bli aktuella. Det finns även element och fenomen som "minskar" verkningsgraden. Sådant behöver också ses över, t ex värmeförluster och kavitation.

VAST, Forskningsråd I, har gett en arbetsgrupp uppdraget att se över verkningsgradshöjande åtgärder för vattenkraftstationer.

1.2 Projekt

Projektet är avgränsat till enskild station, med väl kvantifierade verkningsgradshöjande åtgärder. Förutom direkta åtgärder för olika komponenter skall även kombinerad, adaptiv reglering, samt mätning av vattenflöde och verkningsgrad behandlas.

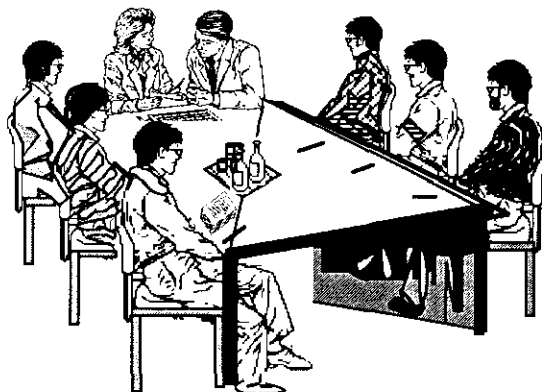
En arbetsgrupp tillsatt av VAST Forskningsråd I förstärktes med en person från Vattenfall Utveckling AB, Niklas Dahlbäck, som senare ersattes av Jan Deborg Vattenfall Hydropower.

Arbetsgruppen kom att bestå av följande personer:

Teuvo Piirainen	Sydkraft Konsult (ordf.)
Hans Birger	Gullspångs Kraft (Örebro)
Lennart Henriksson	Stora Kraft
Bo Andersson	Gullspångs Kraft (Karlstad)
Roger Nöjd	Krångede
Niklas Dahlbäck	Vattenfall Utveckling
Jan Deborg	Vattenfall Hydropower
Börje Jonasson, adj.	Gullspångs Kraft (Sveg)
Kent Lundin, (sekr.)	VAST / Cap Programator

Under projektet har besök gjorts hos Kvaerner i Kristinehamn och ABB Generation i Västerås. Arbetsgruppen ber att få tacka Kvaerner och ABB för mycket fruktbara diskussioner. Arbetsgruppen har också fått lov att använda en del av deras material i rapporten vilket underlättat arbetet med den.

Tack!



1.4 Verkningsgradsförbättringar

Verkningsgradsförbättrande åtgärder som har bedömts som speciellt intressanta redovisas i rapporten under följande rubriker:

- Turbiner och vattenvägar
- Generatorer och transformatorer
- Hjälpustning
- Driftoptimering
- Utvärderingsmetoder

Tillståndskontroll behandlas inte i denna rapport. Parallellt med detta projekt pågår dock ett annat projekt "Metoder för tillståndskontroll av vattenkraftaggregat" i VAST – Vattenfall regi.

Bägge projekten bedöms ungefär lika väsentliga för utvecklingen inom vattenkraften. Arbetsgruppen vill rekommendera "Tillståndskontrollrapporten" som ett komplement till denna rapport då det finns starka beröringspunkter mellan rapporterna inom flera områden.

Hur energi och förluster fördelar sig i en station framgår av avsnitt, 1.5.

Det finns även andra områden som är viktiga att kommentera generellt, exempelvis problemen med flödesmätning. Det är bara att konstatera att vi fortfarande väntar på bättre metoder att mäta flöden.

Adaptiv reglering är ett område som undersökts av arbetsgruppen. Dessa regulatorer har inte fått något genomslag inom vattenkrafttillämpningar. Man kan undra varför och hur framtiden för den teknologin ser ut inom vattenkraftområdet.

I appendix A och B redovisas exempel på stationer där verkningsgradshöjande åtgärder omsatts i praktiken.

1.5 Energiförluster

Vart tar egentligen energin vägen i en kraftstation? Frågeställningen är onekligen intressant. Kan man godta en något enklare utredning i ärendet, är kanske nedanstående avsnitt till gagn. Den anläggning som här skall tjäna som modell är Gammelänge kraftverk under året 1991. Stationen är helt ordinär med tre kaplanturbiner, vilka tagits i drift mellan åren 1944 och 1947. Maximal effekt på varje aggregat är 27 MW.

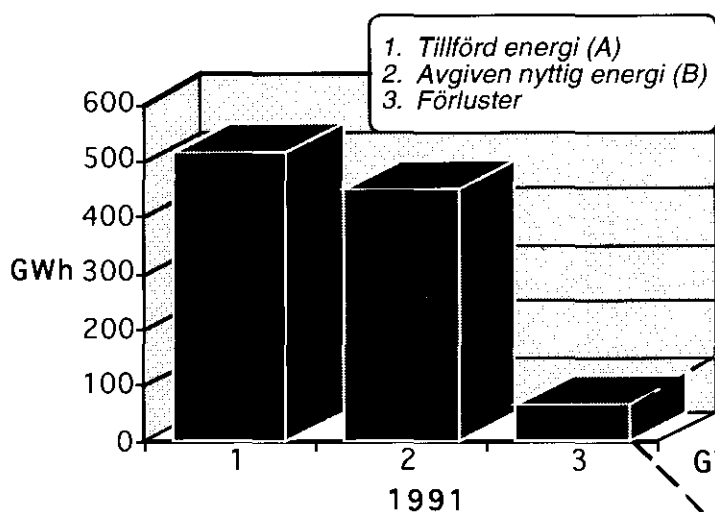
I denna framställning har ingen hänsyn kunnat tas till vattenvägar upp- och nedströms själva kraftverket, inte heller till in- och utströmningsförluster. Den teoretiskt maximalt utvinningsbara energin är den energi som vattnet i älven uppströms kraftverket innehåller. Vid vissa kraftverk har man även andra tillförda energier, exempelvis diesel. Sådana yttre energikällor finns inte i vårt exempel.

Kraftverket genererar och avger energi i olika former. Den avgivna nyttiga energin är den som matas ut på nätet. Förhållandet mellan tillförd och avgiven nyttig energi ger således kraftverkets totala verkningsgrad.

I detta exempel, figur 1, är kraftverkets totala verkningsgrad cirka 87 %. 67 GWh är den energi som kraftverket själv förbrukar eller inte kan tillgodogöra sig. Vi kallar det förluster. Förlusterna kan delas upp i turbin- generator- och transformatorförluster, lokalförbrukning samt vattenspill. Nedan presenteras uppmätta och till viss del uppskattade värden.

Den avgjort största förlustsiffran uppvisar onekligen turbinen med sina 47,5 GWh, på god andra plats kommer generatoren tätt följd av vattenspill. De minsta förlusterna uppvisar transformatorn och lokalförbrukningen på 1,5 respektive 1 GWh. I appendix C redovisas hur lokalförbrukningen i Gammelänge kraftverk fördelar sig på olika anläggningsdelar.

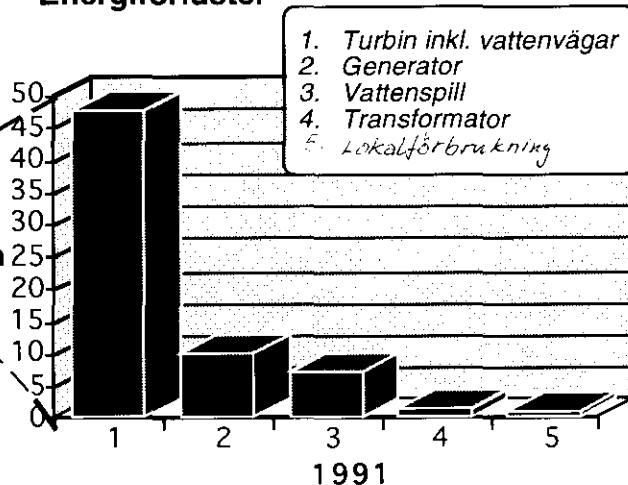
Verkningsgrad 87%



Figur 1.

- (A) Total vattenmängd i älven multiplicerad med fallhöjden. Ingen annan energi är tillförd (i form av diesel eller liknande).
(B) Avgiven nyttig energi är den energi som är utmatad på nätet.

Energiförluster



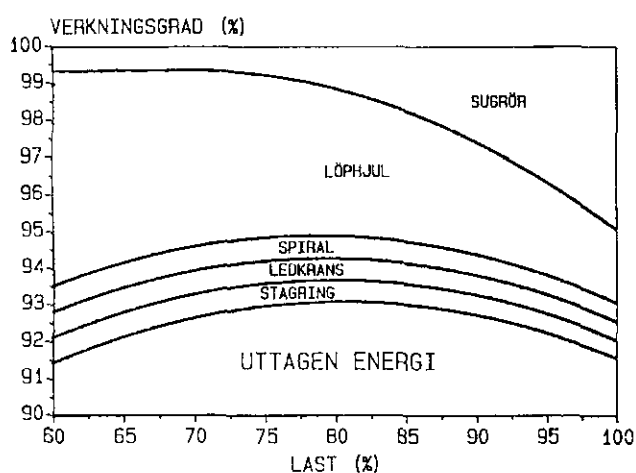
2. Turbiner och vattenvägar

2.1 Allmänt

I detta avsnitt behandlas alla delar av en vattenkraftstation som har kontakt med det strömmande vattnet. Eftersom kraftverket påverkas av förhållanden även långt uppströms respektive nedströms kommenteras även andra anläggningsdelar såsom kanaler och tunnlar.

För ett kraftföretag är det en produktionsanläggnings totala verkningsgrad som är relevant. Förbättringar i enskilda komponenter som sker på bekostnad av prestanda i andra delar av systemet är inte intressanta.

I ett vattenkraftverk är vattenvägarna från intag till utlopp och det roterande systemet så intimt sammankopplade att åtgärder på ett ställe oftast påverkar andra delar i systemet, därför behöver man alltid ha helhetssyn på verkningsgradsförbättrande åtgärder inom detta område. Vidare sker den största delen av de totala energiförlusterna i vattenvägarna och turbinen. Uppspaltningen av fallförluster komponent-vis, enligt nedan, får därför ses som en anvisning av vilka åtgärder som kan bidra med ett nettotillskott, men för varje station bör alltid en total utvärdering göras innan arbeten utförs. Observera att alla vattenkraftverk är individuellt designade varför lämplig åtgärd kan variera från fall till fall beroende på utgångsläge.



Figur 2

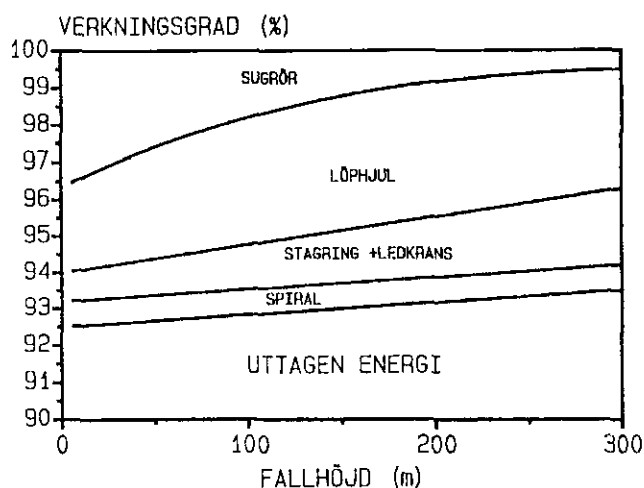
Förlustfördelning turbindelar
och dess lastberoende

De flesta typer av förluster ökar vid ökande belastning. Strömningsförluster beror dessutom på kvadraten av flödet och ökar därför med en accelererande takt och blir speciellt märkbara vid höga flöden. I figur 2 och 3 visas schematiskt var förlusterna i huvudsak sker och hur de beror på last respektive fallhöjd. Från dessa figurer dras slutsatsen att det också är viktigt att inväga hur en kraftstation används (t ex om mycket maxlast förekommer) när effekten av verkningsgradsförbättrande åtgärder ska utvärderas.

Utvärdering av åtgärder i kanaler, tunnlar och intag kan göras via fallförlustmätningar. Genom att mäta fallförlusten över fallsträckan, före och efter åtgärder vid ett specifikt flöde, kan nyttan av en rensningsåtgärd värderas.

Andra åtgärder på turbiner och vattenvägar är svåra att utvärdera annat än genom en mätning av totala verkningsgraden eftersom systemet är så sammankopplat. Det är även i dessa fall flödesmätningen som har svårast att uppfylla noggrannhet och lång tids repeterbarhet. Flera metoder finns (se kap 6).

I slutet av kapitel 6 finns ett avsnitt med en sammanställning av formler för erhållande av karakteristiska storlekar på olika förluster.



Figur 3

Förlustfördelning turbindelar
och dess fallhöjdsberoende

2.2 Magasin

Genom att hålla så hög vattennivå som möjligt i kraftverksdammar kan verkningsgraden på tilloppssidan förbättras genom att fallförlusterna blir lägre.

Modern automatik för nivåövervakning av turbiner och luckor gör det lättare att hålla vattennivån närmare dämningssgränsen.

Till verkningsgradsförbättrande åtgärder hör givetvis även att ha så täta utskovsluckor som möjligt.

2.3 Till- och utloppskanaler

Förlusterna i tilloppskanaler består av utbredda eller koncentrerade förluster. Sambandet mellan fallförlust och förlorad effekt framgår av samma formel som för dammar, se 6.3.1.

En grävd kanal bör ha förluster på högst 8-10 cm/km. Vid högre förlusttal finns i allmänhet ekonomiskt utrymme för muddringar.

En bergkanal har i allmänhet större förluster på höga kostnader för sprängningsarbeten. Ekonomin i att utvidga kanaler behöver avgöras från fall till fall.

I kanaler finns också koncentrerade förluster vid in- och utlopp samt vid eventuella förträngningar (t.ex. bergklack i botten). Eftersom förlusterna är koncentrerade kan en mindre insats ge stor lönsamhet även när det gäller eventuellt sprängningsarbete. En hydraulisk utredning med modellförsök (eller i vissa fall numeriska beräkningar) bör ingå i projekteringen.

2.4 Till- och utloppstunnlar

Samma kriterier gäller för både tilllops- och utloppstunnlar. Det bör observeras att förändringar i utloppstunneln kan orsaka förändrade svallingsförlopp.

Förlusterna i en tilllops- och/eller utloppstunnel kan uppdelas i utbredda och/eller koncentrerade. De utbredda förlusterna förekommer utmed hela tunnel längden. Koncentrerade förluster förekommer vid tunnelförstärkningar, förträngningar, lucklägen och sandfickor.

Typiska fallförluster i svenska bergtunnlar ligger runt 0,5 m per km. Variationen kan dock vara stor beroende på dimensionerande hastighet, tunnelarea och råhet då tunneln byggdes. En TBM-borrade tunnel kan göras cirka 40% mindre i tvärsnittarea med motsvarande hydrauliska kapacitet.

Vid en uppgradering där flödet ökas kan det vara lönsamt med tunnelåtgärder.

Generellt gäller att åtgärder är lättare att utföra i tillloppstunnlar eftersom de kan tömmas lättare.

Förluster i tunnlar kan minskas genom utslätning av tunnelytor och/eller bottensula samt ökning av tunnelarea eller rensning av rasmassor.

Sprutbetong kan användas både för friktionsminskande och tunnelförstärkande åtgärder. Ett storskaligt försök av Vattenfall i Sillre visar att förlusterna kan reduceras med cirka 30-35%. Kostnaden är ungefär dubbelt så hög som intäkten.

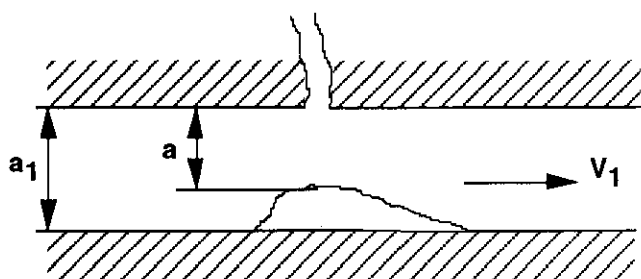
Förlusterna kan också minskas genom asfaltering eller gjutning av betongplattor på botten. Utvärderingar som gjorts i Norge tyder på att förlusterna kan reduceras med 15-20%. Kostnaderna ligger nära lönsamhetsgränsen. Som bonus vid en sådan åtgärd erhålles en transportväg som kan utnyttjas vid inspektioner eller eventuella förstärkningsarbeten.

Ett alternativ för att reducera fallförlusterna är att bygga en parallelltunnel.

Kostnaderna tenderar att bli mer än dubbelt så höga som intäktsökningen. Ett viktigt argument för en parallell tunnel kan dock vara den minskade risken för driftbortfall vid exempelvis ett tunnelras. Dessutom minimeras produktionsbortfallet under parallelltunnels byggnation.

Vilken metod som är bäst för den aktuella anläggningen måste avgöras från fall till fall.

Förlusterna, p g a förträngning i vattenvägarna, figur 4, kan ge upphov till fallförluster som är svåra att identifiera utan noggrann mätutrustning.



Figur 4

Lokal förträngning
i vattenväg

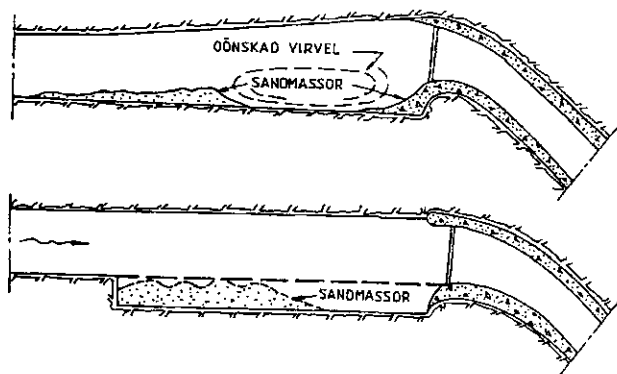
Olämpliga konstruktioner, t ex för brant diffusorvinkel, kan ge upphov till fallförluster.

Förlusterna i s k sandfickor kan uppkomma p g a upplagrade massor som ger areaminskning och oönskade virvelbildningar (figur 5). Normalt fungerande ficka ger mycket små förluster (figur 6).

För beräkning av förluster i tunnlar, se 6.3.1.

Figur 5.

Olämplig utformning
av stenficka



Figur 6

Lämplig utformning
av stenficka

2.5 Kraftverksintag

Vid kraftverksintag förekommer inströmningsförluster och fallförluster över isgrindar och dess bärande balksystem.

Inströmningsförluster kan vara svåra att bedöma utan modellprov eller 3-dimensionella beräkningar.

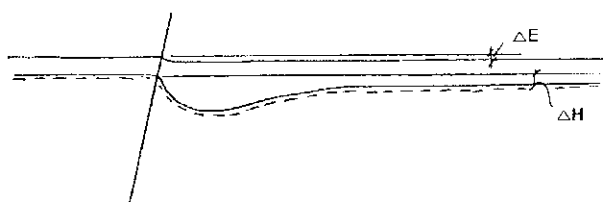
Ibland kan ledmurar som styr vattenriktningen ge avsevärda förbättringar. I svårare fall där luft sugas in i turbinen kan problemet temporärt lösas med exempelvis en flotte som placeras över virvelområdet. Detta bör dock betraktas som tillfällig lösning.

Fallförlusterna över isgrindar kan minskas om strömningsriktningen ändras i linje med intagsgrindar och genom bättre hydrauliskt utformade bärande balkkonstruktioner.

Förluster över isgrindar minimeras genom att hålla så stort grindstålsavstånd som vattendomen eller turbinen tillåter. Om elektrisk uppvärmning av grindar ej är nödvändig kan grindar av rostfritt stål eller aluminium användas vilket ger glattare metallytor och därmed blir grindarna mindre benägna att sättas igen. Ökning av fria öppningar i intaget ger lägre fallförluster.

Automatisk rensutrustning eller övervakningsutrustning är i de flesta fall lönsamt och bör övervägas från fall till fall.

Observera att vattenytan innanför grindar normalt är ytterligare avsänkt, någon eller några cm, på grund av att en del av fallhöjden har blivit omsatt i ökad hastighet (figur 7).

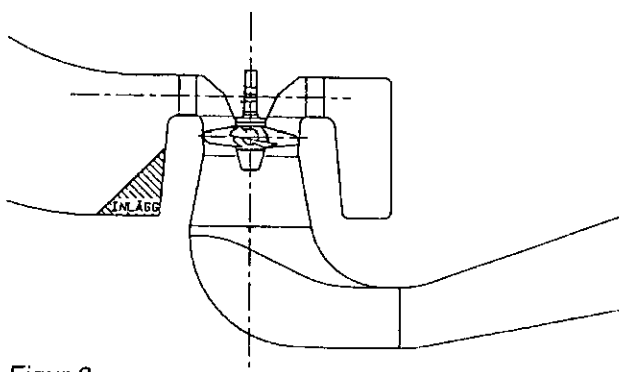


Figur 7

Vattenprofil genom
intagsgrind

2.6 Spiral och tuber.

Förluster i dessa delar består främst av friktions-förluster. Eftersom hastigheterna vanligen är låga, är andelen av de totala förlusterna små, utom vid långa tuber eller tunnlar. Speciellt vid höga fallhöjder bör god yttjämnhet eftersträvas vilket åstadkomms genom målning av plåtspiraler. En rostig yta kan ge verknings-gradssänkning av cirka 0,3%. En betongspiral har oftast så låga hastigheter att förlustandelen är mycket liten. Skadade ytpartier bör dock lagas. Botteninlägg i inloppet till semispiraler kan enligt modellprov öka verkningsgraden cirka 0,2 %, figur 8.



Figur 8

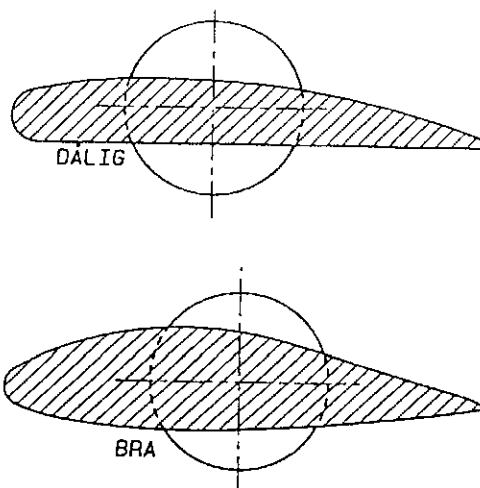
Botteninlägg i semispiral

2.7 Stagring

Stag med felaktig placering i vattnets strömningsriktning kan orsaka verkningsgradsförluster. Detsamma gäller grova stag med mindre bra profil. Slipning av avloppskanten kan ge förbättringar på cirka 0,2 % vid Francismaskiner. Vid höga fallhöjder krävs god ytfinhet.

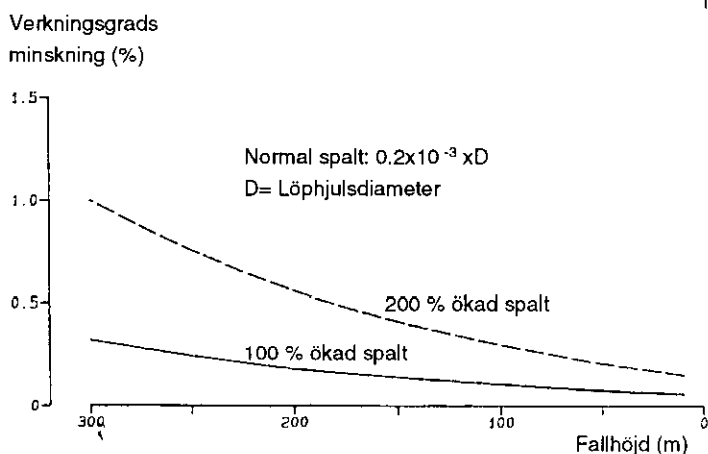
2.8 Ledskovlar

Profilen är mycket betydelsefull för att minska risken för avlösning vid dellast och överlast. Anledning kan ibland finnas att ändra skovelprofil. Exempel på skovelprofiler framgår av figur 9. Vid höga fallhöjder är ytfinhet och små ändplansspalter av betydelse. Skovlar med exakt lika höjd möjliggör små ändplansspalter mellan skovel, lock och fot. Små spalter betyder också minskat läckage, figur 10. Detta kan också åstadkommas genom uppblåsbara gummitätningar.



Figur 9

Gammal och ny ledskeneprofil



Figur 10

Åndplansspalternas inverkan av verkningsgraden som funktion av fallhöjd

2.9 Löphjul

Den dominerande delen, cirka 30-50 %, av förlusterna i ett vattenkraftaggregat finns i löphjulet. Dess funktion är i hög grad beroende av utformningen av spiral, stagring, ledskovlar och sugrör. Ett kaplanlöphjul består av löpskovlar, nav och löphjulsammare som måste fungera bra tillsammans. Om man byter en eller flera av dessa delar är det svårt att förutsäga resultatet utan att modellprov görs. Ofta är det nödvändigt att, om man byter skovlar, även byta nav och löphjulsammare. Nya skovlar har mindre area och därmed lägre friktionsförluster. Äldre nav utförs ofta cylindriska och med större diameter än de moderna. Den cy-

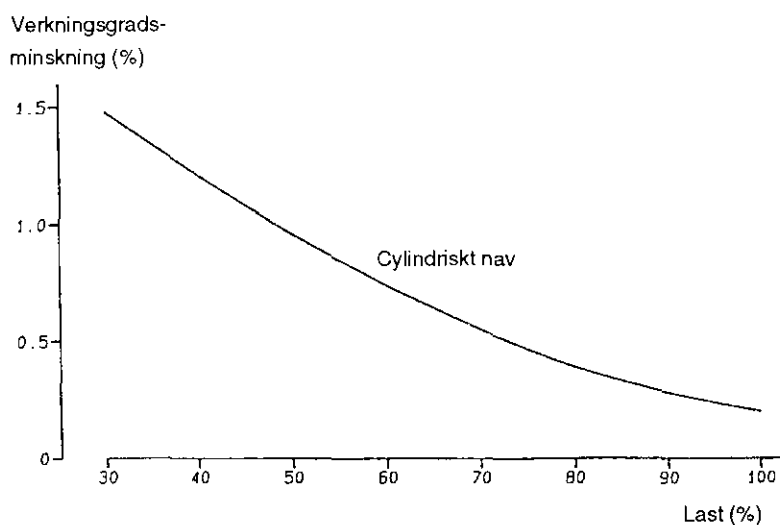
lindriska formen medför att vid dellast uppstår en spalt mellan löpskovel och nav som medför att läckaget ökar och därmed försämras verkningsgraden (figur 11).

Ett sfäriskt nav med mindre diameter minskar dessa förluster och ger också lägre friktionsförluster p g a lägre vattenhastighet.

Löphjulsammaren i äldre turbiner har ofta en strypning av 6 % medan moderna turbiner har ammare med max 4 % strypningsgrad. Den hårdare strypningsgraden anses medföra att turbinen förlorar verkningsgrad inom ett visst lastområde (figur 12). Vid byte av skovlar, nav och ammare kan verkningsgradssökningar uppemot cirka 4 % erhållas.

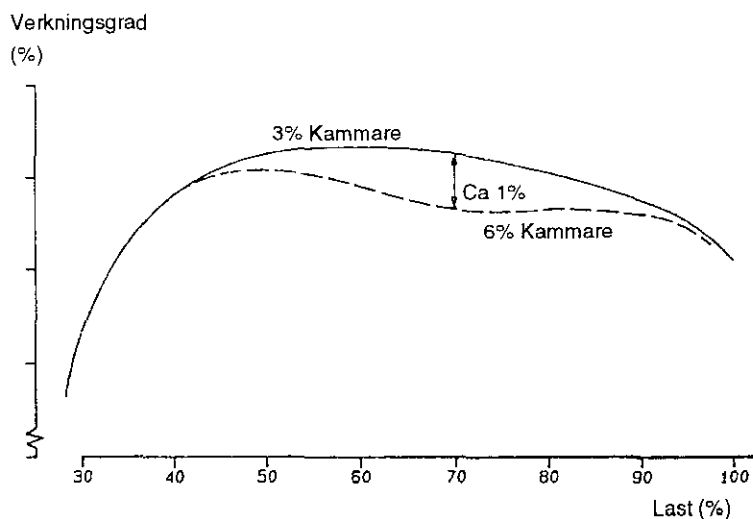
Figur 11

Navspaltens inverkan på verkningsgraden som funktion av last



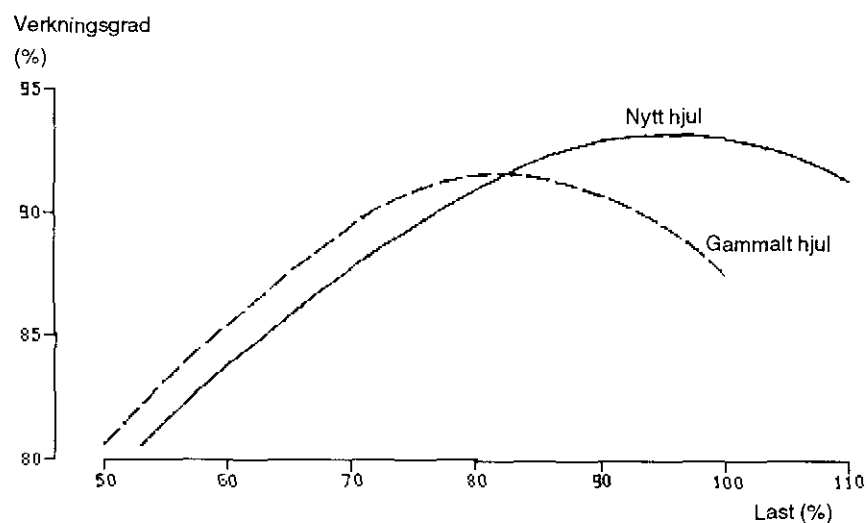
Figur 12

Löphjulsammarens inverkan på verkningsgraden som funktion av last



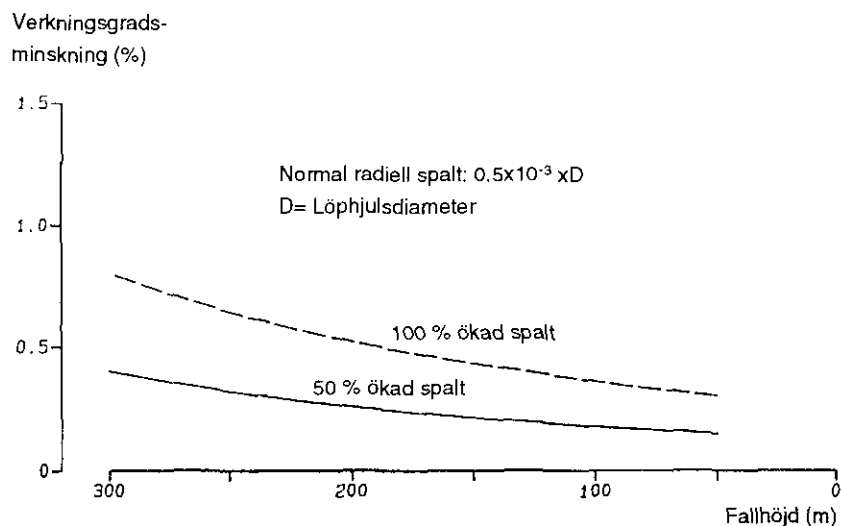
Vid byte av francishjul kan en ökning av verkningsgraden erhållas genom moderna konstruktioner och slankare skovelprofiler. Verkningsgradsökningar på 0,5-2% kan uppnås. I vissa kortids-reglerade stationer kan vinster nås genom att välja hjul där bästa verkningsgrad förskjuts mot större volymströmmar (figur 13).

Andra orsaker till förluster kan vara stora löphjulspalter för francisturbiner. Det ger stort läckage och stora axiallaster (figur 14).



Figur 13

Förskjutet verkningsgradsmaximum



Figur 14

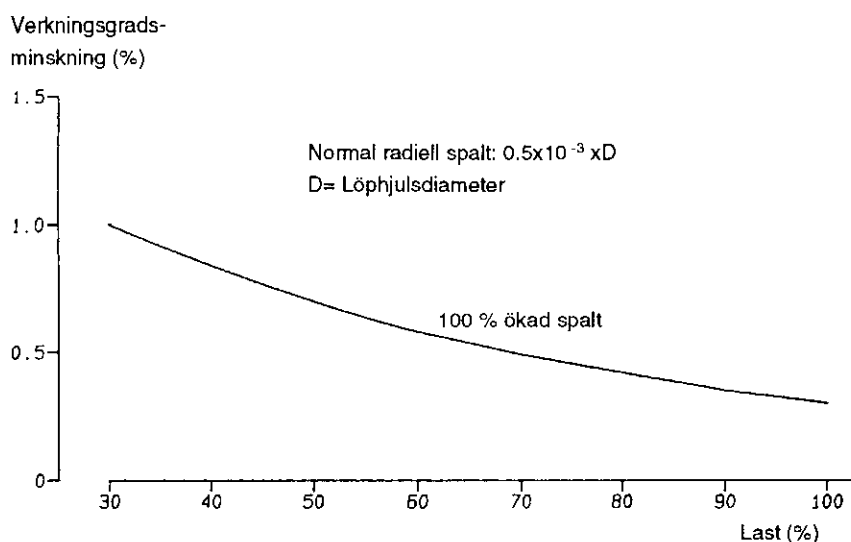
Löphjulsspaltens inverkan på verkningsgraden som funktion av fallhöjd

För kaplanturbiner har spalten mellan löphjul och kammaren betydelse för verkningsgraden (figur 15). Vid för liten spalt finns risken att skovlarna slår i kammarväggen vid pulsationer och lastfrånslag.

För båda turbintyperna finns det krav på stor yttfinhet då friktion påverkar verkningsgraden (figur 16). Friktionen är beroende av vattenhastigheten.

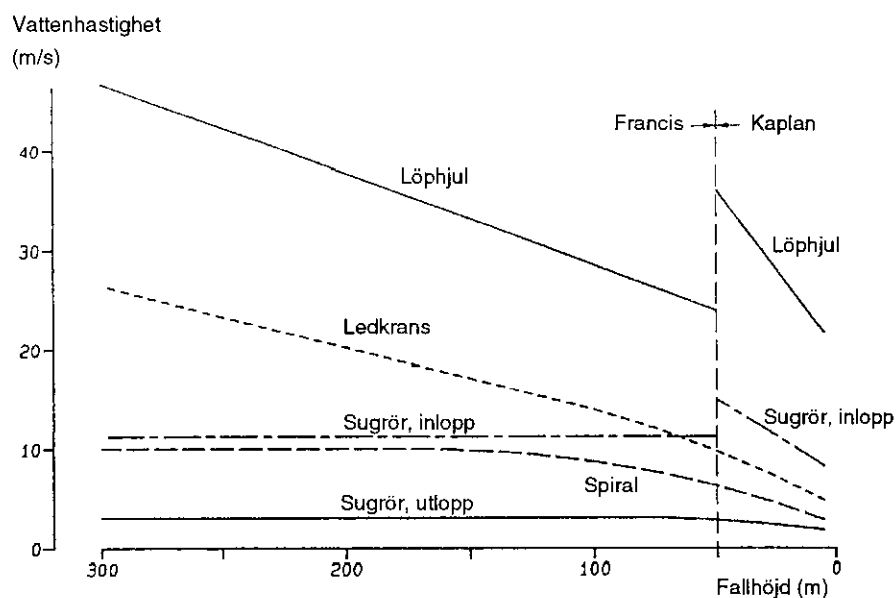
Figur 15

Löpskovelspaltens inverkan på verkningsgraden som funktion av last



Figur 16

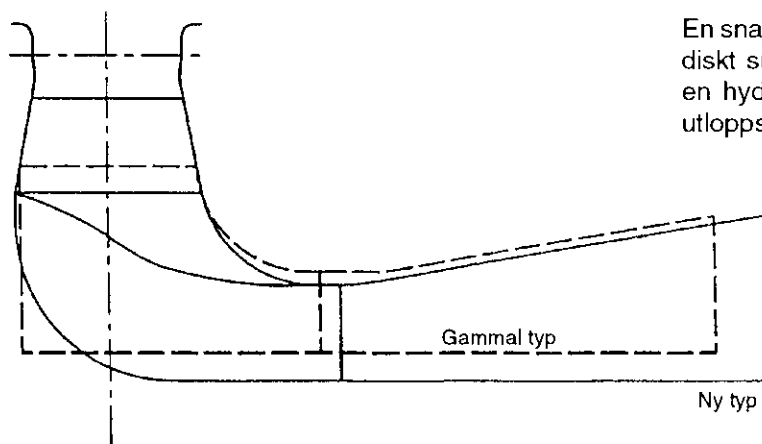
Vattenhastigheter på olika turbin-delar som funktion av fallhöjd



2.10 Sugrör

Sugrörets uppgift är att sänka vattenhastigheten så att rörelseenergin kan tas till vara och på så sätt öka den effektiva fallhöjden över turbinen. Förlusterna består av friktions- och avlösningsförluster. Många äldre turbiner har trånga, grunda och därmed dåliga sugrör. Speciellt för maskiner med låg fallhöjd och stor volymström har dåliga sugrör stor negativ inverkan på verkningsgraden.

Sugröret utgör en sk diffusor och ska dels reducera hastigheten, dels länka om vattnet 90° eller mer. Detta ställer stora krav på sugrörsformen. Figur 17 visar ett modernt sugrör jämfört med ett äldre. Efter areaökningen i sugrörskonan kommer en del med minskad area. Detta ger en hastighetsökning genom kröken så att omlänkningen av flödet kan ske utan avlösningsförlust. Det är väsentligt att arean i kröken inte är för liten.



Figur 17

Jämförelse av ny och gammal sugrörsform

Justeringar av kröken i sugröret kan beräknas ge verkningsgradsförbättringar på cirka 0,3 % enligt modellprov. Vattenfall har dock utfört mätningar i Leringens Kraftstation som indikerar förbättringar på cirka 1,5 %.

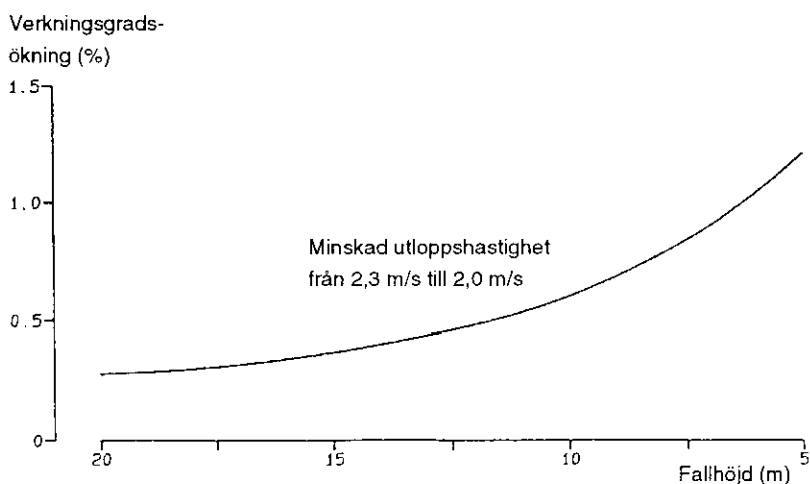
Då rörelseenergin i sugrörsutloppet vanligen helt går förlorad kan verkningsgraden i befintliga anläggningar ökas genom en förlängning av sugröret.

Eftersom alla sugrör inte är lämpliga att förlänga bör modellprov göras för att kontrollera lämpligheten. Om avloppsarean blir för stor i förhållande till sugrörlängden kan tryckpulsationer och effektpendlingar uppstå. Åtgärderna brukar begränsas till att reducera hastigheten till 2 m/s vid utloppet, vilket motsvarar en förlust av cirka 0,2 m v p. Eftersom friktionsförlusterna ökar vid en sugrörsförlängning kan man räkna med att få ut max 70-80 % av den beräknade förbättringen, figur 18.

En snabb tvärsnittsökning vid luckläget i ett underjordiskt sugrör kan orsaka ökade fallförluster. Genom en hydrauliskt riktig utformning vid övergången till utloppstunnel reduceras förlusterna.

Figur 18

Utloppshastighetens inverkan på verkningsgraden som funktion av fallhöjd



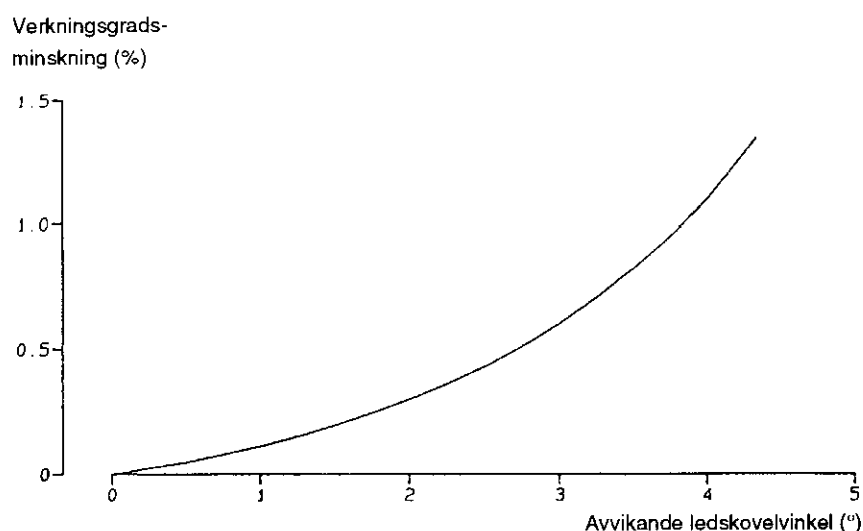
2.11 Kombinerings

Ledskovlarnas öppningsvinkel och aktuell fallhöjd bestämmer löphjulsskovlarnas optimala öppningsvinkel. Felaktig kombinerings mellan löphjulsskovlar och ledskovlar kan lätt ge upphov till verkningsgradsförluster på uppemot några procent, figur 19. När en

anläggning tas i drift bör kombineringsprov utföras för att fastställa rätt kombinerings. Dessa prov bör kontrolleras med intervall som bestäms av anläggningens vikt och hur spetsiga propellerkurvor som mätts upp. Fallhöjdsvariationer påverkar kombinerings, figur 20. Kombinerings påverkar även driftförhållandet, bl a kavitation.

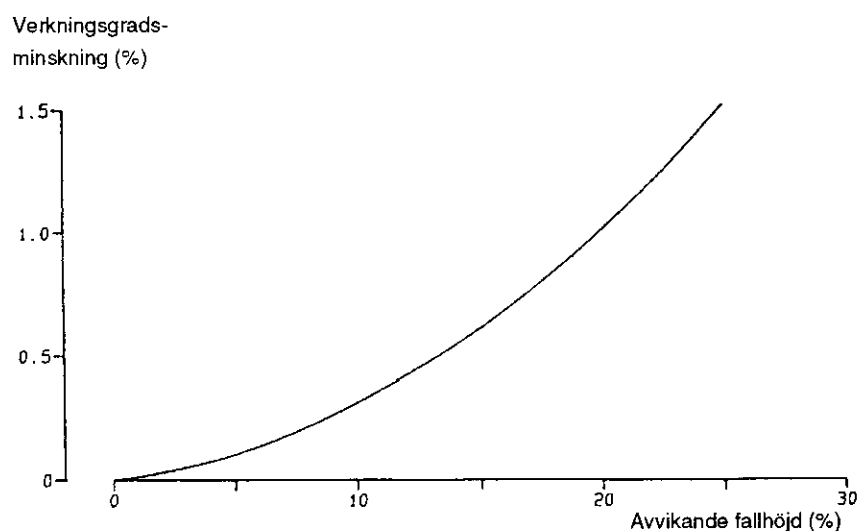
Figur 19

Verkningsgradsminskning vid felkombinerings som funktion av vinkelavvikelse



Figur 20

Verkningsgradsminskning vid felkombinerings som funktion av fallhöjd



2.12 Kavitation

Kavitation förekommer på turbiner om vattnets statiska tryck lokalt sjunker till ångbildningstrycket.

Hos vattenturbiner yttrar sig uppträdandet av kavitation i prestandahänseende främst i en sänkning av verkningsgraden. Om man vid ett modellturbinprov ökar sughöjden vid konstant fallhöjd och ledskenöppning erhålls förloppet enligt figur 21. I samband med att kavitation inträder sker även en viss minskning av volymströmmen genom den förträngningsverkan som de bildade ångblåsorna har.

Vid förnyelse av turbiner konstrueras löphjulen ofta för så hög toppverkningsgrad som möjligt. Man bör dock se upp med att kavitationsegenskaperna inte blir sämre.

Vid lagning av kavitationsskador är det viktigt att skovelformen inte förändras eftersom detta också kan leda till försämring av verkningsgraden.

Någon generell medelvärds-siffra för verkningsgradsförsämring på grund av kavitationen går inte att fastställa eftersom den är beroende av bland annat skovelform, löphjulsöppning, volymström och sughöjd.

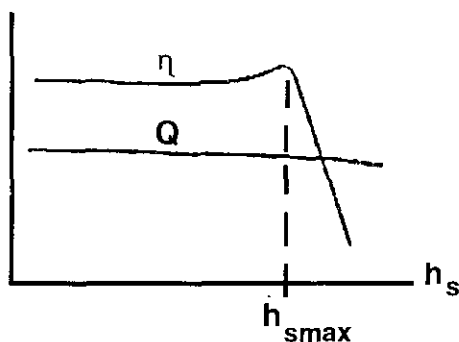
Vid anläggningar där sughöjden ligger på en kritisk nivå bör modellprov utföras inför skovel- eller löphjulsbyte för val av lämpligt löphjul med tanke på flöde, verkningsgrad och kavitation.

Det är viktigt att komma ihåg att normen för vilken grad av kavitation som tillåts är mycket generös.

2.13 Normer

Normer som används vid turbintillverkning:

IEC 41	Testmetoder vattenturbiner
IEC 193	Provnorm vattenturbiner
IEC 545	Anvisningar för drift och underhåll
IEC 609	Kavitationsnorm
SEN 268010	Kavitationsnorm
IEC 198	Testmetoder, pumpkraftverk
IEC 308	Testmetoder för styrverk
IEC 497	Testmetoder för modellprov ang. pumpkraftverk



Figur 21

Prestandaförsämring
vid kavitation

3. Generator och transformator

3.1 Allmänt

Vid såväl ombyggnad som nyinvestering ägnas idag stort intresse åt möjligheterna att optimera förlusterna hos generatorer, transformatorer och dess respektive hjälputrustningar. Genom att utnyttja "teknikens landvinningar" kan man på olika sätt förbättra verkningsgraden. Med hjälp av datorer är möjligheten att utföra teoretiska beräkningar till rimlig kostnad långt bättre än tidigare. Utrustning för mätning och reglering har också utvecklats snabbt på senare år. Nedan behandlas några åtgärder som kan medföra verkningsgradsförbättring av väsentlig storlek.



Omlindning av stator

3.2 Generator

3.2.1 VENTILATION

Vid ombyggnad och nyinvesteringar försöker man alltid att optimera ventilationsluften. Mindre kylkanaler ger lägre luftmängdsbehov, vilket medger reducering av friktionsförlusterna hos fläkten. Till åtgärderna hör normalt ombyggda kåpor och nya eller färre fläktvingar. Effektiviteten är i storleksordningen 10-20 % av friktionsförlusterna, vilket innebär 10-20 kW för en 25 MVA maskin av 50-talskonstruktion.

Generatorernas kylvatten kan via värmeväxlare användas till uppvärmning av luckfalsar, personalutrymmen eller andra närliggande lokaler. Även luftkylda generatorers förluster kan nyttjas på motsvarande sätt.

3.2.2 MAGNETISERING

En roterande matare innebär alltid extra förluster. Hur mycket är svårt att säga och varierar från fall till fall men ett riktmärke kan vara 5-10 % av magnetiseringseffekten. Vid en ombyggnad till statisk matning överförs förluster från likströmsgeneratoren till främst transformator och likriktare. En nettovinst i storleksordningen 2 % är rimlig. Ett montage av borstlöst system ger endast marginell förlustreducering i förhållande till roterande matare.

I vissa fall kan det vara idé att se över luftgapet. Ett minskat luftgap innebär lägre magnetiseringseffekt men också högre tillsatsförluster hos polerna. Dock bör man tänka på att en minskning av luftgapet innebär en höjning av maskinens synkrona reaktans. Av mekaniska skäl vill man inte ha små luftgap eftersom luftgapskrafterna ökar vid störningar och skulle i extrema fall kunna förorsaka att rotern slår i statorn. En minskning av luftgapet är intressant framför allt då man vid en ombyggnad vill öka effektuttaget med befintlig magnetiseringsutrustning. Förlustminskningen blir i gynnsamma fall i storleksordningen 10-15 % av magnetiseringseffekten.

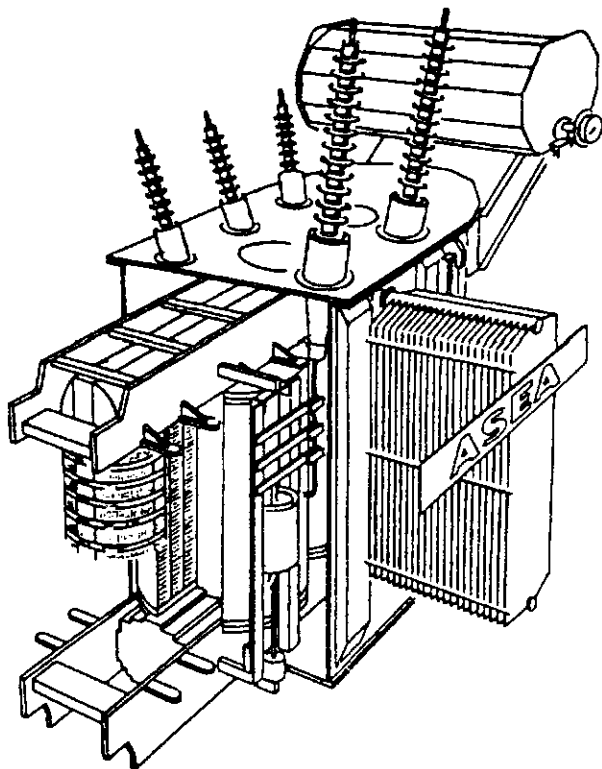
3.2.3 LINDNING

Ett lindningsbyte ger generellt minskade förluster. Hur mycket beror av koppararea och hur den nya och gamla lindningen är transponerad.

3.2.4 PLÅT

Statorplåt är inte orienterad på samma sätt som transformatorplåt. Flödet är här lika fördelat i plåtens alla riktningar. Det största flödet erhålles vid "tänderna" och det lägsta vid "ryggen". Flödets storlek beror av den aktuella konstruktionen men ett riktvärde kan vara 1 Tesla vid ryggen och 2 längst ut i tanden. Ny plåt i förhållande till gammal är främst en fråga om hur väl bibehållen plåten är. Kommer plåten att hålla för ytterligare en lindnings livslängd? En förlustminskning erhålls framför allt vid byte till tunnare plåt. En modern statorplåt har ett specifikt förlustvärde på ca 1 W/kg vid 1 Tesla. Motsvarande för en 50-talsmaskin är 1,5-2W/kg vilket innebär 20 – 40 kW extra förluster för en 25 MVA generator.

Byte av både plåt och lindning ger dock fritt spelrum för nya konstruktionslösningar med t ex annat spåralt och annan utformning av kylkanaler. Det gäller alltså att se till helheten och några år in i framtiden vid reinvesteringsbeslut.

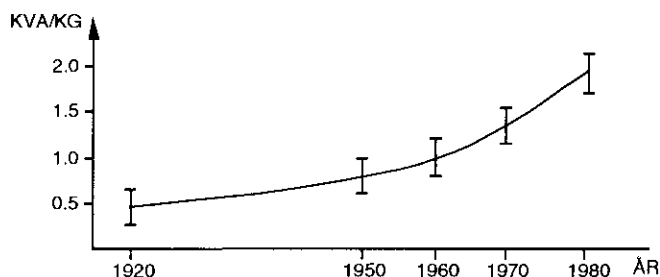


Transformator i
genomskärning

3.3 Transformator

Den främsta orsaken till minskade dimensioner och förluster hos en modern transformator är att hänföra till plåtutvecklingen. Hur effektuttaget per kg plåt ökat sedan 1920 framgår av figur 22a. De markerade intervallen beror på aktuell storlek och förlustvärdering. Orienterad kärnplåt har olika förluster beroende på flödets vinkel i förhållande till plåtens valsriktning. En modern kärnplåt har i dag ett specifikt förlustvärde på 0,25 W/kg i valsriktningen vid 1 Tesla, se figur 22b. Förlusterna ökar ungefär kvadratisk med flödet. Induktionens storlek beror av aktuell förlustvärdering men är normalt 1,6 – 1,8 Tesla. Pga att flödet vid hörnen går tvärs valsriktningen blir kärnförlusterna i verkligheten ca 25 % större per kg jämfört med figur 22b.

På en äldre transformator är det framför allt förluster i kylutrustningen man kan påverka, t ex bättre styrning av fläktar och pumpar. Att optimera vattenflödet vid vattenkylning kan ge betydande vinster med hänsyn till att vattnet istället passerar turbinen. Det finns även tekniska orsaker till att styra kylvattenflödet. Lindningarnas förspänning kan minska vid alltför stora temperaturvariationer. Detta innebär i sin tur risk för haveri vid kortslutning. Att placera nya lindningar på en gammal kärna synes knappast realistiskt.

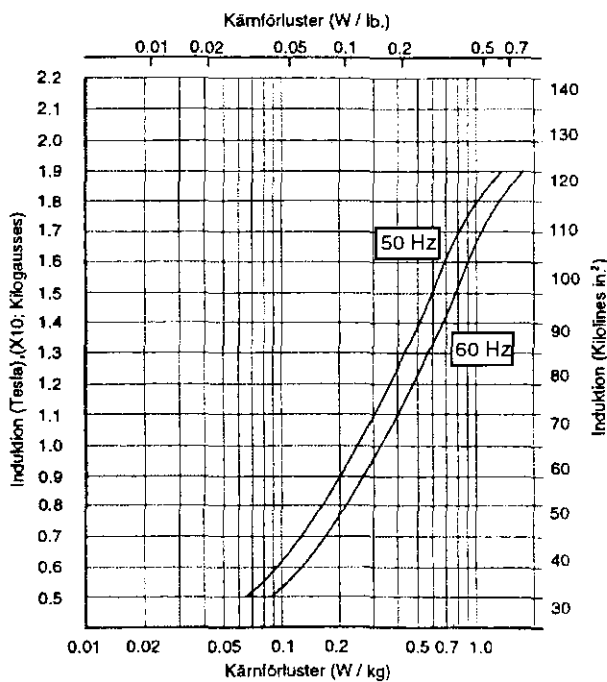


Figur 22 a

Ökning av effektuttaget
per kg plåt sedan 1920

3.4 Förlustvärdering

I enlighet med exemplet i avsnitt 1.3 beräknas först eget förlustvärde. Härvid måste hänsyn tas till utnyttjningstid och belastningsfördelning.



Figur 22b

Kärnförluster som funktion av flödet vid 50 respektive 60 Hz

Antag att en transformator skall installeras till en vattenkraftstation. Stationen dygnsregleras hårt under 10 timmar perioden september – mars, går fullt april – maj och står juni – augusti.

Tomgångsförlusternas värde:

$$9/12 \times 8760 \times 0,32 = 2102,4 \text{ kr/år och kW}$$

$$\text{Kapitaliserat } 2102,4 \times 12,41 = 26.091 \text{ kr/kW}$$

Belastningsförlusternas värde:

$$2/12 \times 8760 \times 10/24 \times 0,22 + 5/12 \times 8760 \times 10/24 \times 0,32 = 620,5 \text{ kr/år och kW}$$

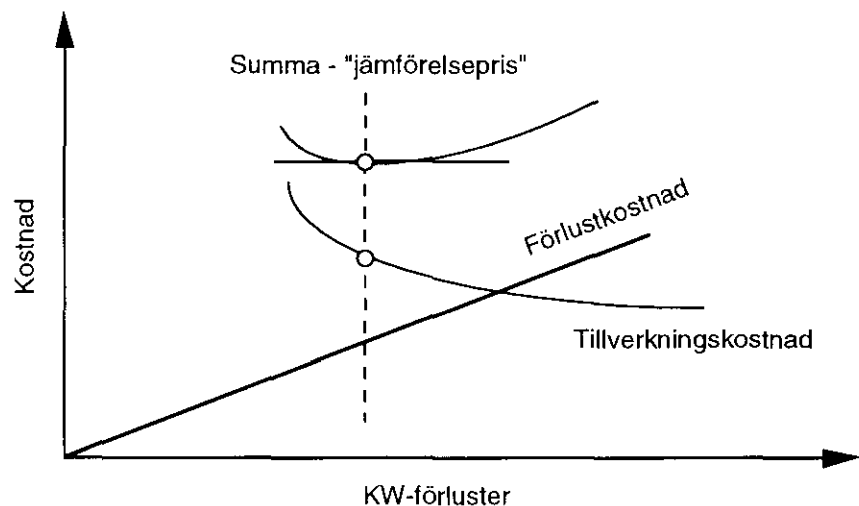
$$\text{Kapitaliserat } 7.700 \text{ kr/kW}$$

Denna förlustvärdering multipliceras med aktuella förluster och adderas sedan till inköpspriset varvid den aktuella jämförelsekostnaden erhålls, figur 23. Motsvarande resonemang kan appliceras för övrig utrustning.

3.5 Normer

Normer som används vid tillverkning och kontroll av generator- och transformatorlindningar.

IEC 34	Rotating electrical machines
SEN 426 01 01	Märkdata och driftdata
SEN 426 01 05	Elmaskiner
SEN 26 01 21	Förlustmätning på synkrongeneratorer



Figur 23

Jämförelsekostnad

4. Hjälpustrustning

4.1 Allmänt

Hjälpustrustningen är ofta ett bortglömt kapitel i resonemanget om verkningsgradsförbättringar. Den upplevs många gånger som något nödvändigt ont men som måste fungera klanderfritt. Det finns dock möjligheter att minska förlusterna i hjälpustrustningen. Ökningen av anläggningens verkningsgrad blir visserligen inte så stor i procent räknat, men i gengäld brukar investeringarna vara små. Det kan vara en god affär att se över hjälpustrustningen.

Relativt stora energimängder åtgår för vakhållning och uppvärmning av täckta utskovsluckor. Lägre energiåtgång kan erhållas genom installation av luftavfuktare, varvid temperaturen i luckan kan sänkas.

4.2 Styrning och dimensionering

Gemensamt för all hjälpustrustning är att den ger stöd åt den primära utrustningen, turbiner, generatorer etc. Det finns dock inget intresse i att den arbetar mer än nödvändigt. Därför är det viktigt att det finns en väl fungerande styrning av hjälpustrustningen.

Styrningen kan vara så enkel som att motorer stoppas och ventiler stängs då aggregatet stoppas. Det kan även vara mer eller mindre avancerade regleringar. Idag finns många möjligheter till energisparande regleringar via motorventiler eller varvtalsreglerade motorer.

Även dimensionering av hjälpustrustning påverkar förlusterna. Onödigt stora motorer, pumpar etc ger onödigt stora förluster. Man skall inte transportera mer luft, vatten och olja än vad som behövs.

4.3 Kylsystem och ventilation

Kylsystemen i vattenkraftstationer används i första hand till att föra bort förlustenergi från generatorer och transformatorer. Hos generatorer finns de största förlusterna i plåt och lindning. På medelstora generatorer kyla vanligtvis dessa delar av cirkulerande luft, som i sin tur kyla med vatten. Även lager är ofta vattenkylda.

Det enklaste sättet att få kylvatten är att ta vatten från uppströmsytan och låta en del av vattnet passera kylarna. Vid låga fallhöjder är detta ofta den bästa lösningen. Man bör dock räkna på om det är lönsamt att i stället låta allt vatten passera genom turbinen och pumpa upp det vatten som behövs för kylning från nedströmssidan. Ju högre fallhöjd desto lönsammare blir detta.

Kylsystemet behöver dimensioneras efter sämsta tänkbara driftfall. Ur kylsynpunkt inträffar detta då vattentemperaturen är som högst och maskinen går för fullt. I många anläggningar är kylsystemet injusterat för just detta fall och den injusteringen behålls året runt. Genom att temperaturreglerna kylutrustningen anpassas kyleffekten till aktuellt kylbehov.

Rätt ventilation i ett kraftverk kan påverka anläggningens verkningsgrad. Avloppsvärmen från kylarna kan utnyttjas till att värma lokaler m m.

Kyl-/ventilationsluft ska vara filtrerad och tryckas in i stationsbyggnaden. Detta ger en renare miljö i lokaler och utrustning eftersom ofiltrerad luft inte kan komma in.

Att ha övertryck i stationsbyggnaden är extra viktigt i anläggningar där generatorer tar sin kylsluft från maskinsalen, vilket innebär renare generatorlindningar.

Ventilationsluften kan också användas till att skapa bättre klimat i andra utrymmen i anläggningen innan den släpps ut ur byggnaden.

I utrymmen med svåra kondensbesvär är det mer ekonomiskt att använda lufttorkningsutrustning i stället för uppvärmning och ventilation.

4.4 Oljor

Valet av smörjoljetyper för bär- och styrlager påverkar i hög grad friktionsförlusterna i dessa maskindelar. Friktionsförlusterna utgörs huvudsakligen av lagerförluster och strömningsförluster. Oljans viskositet är den faktor som kan manipuleras för att minska friktionsförlusterna. Poly Alfa Olefin olja (PAO) tillåter även att oljefilmens tjocklek minskas med bibehållen säkerhet mot smetning.

Genom att välja en syntetisk olja av PAO-typ med en viskositetsklass lägre än motsvarande tidigare använd mineralolja, kan friktionsförlusterna minskas med upp till 40%.

Minskningen av friktionsförlusterna visar sig genom en sänkning av oljetemperaturen och skall för att uppnå maximal besparing motverkas med en avstängning av tillämpligt antal oljekylare så att rätt lagertemperatur och oljefilmtjocklek erhålles.

PAO-oljor är ca 5-7 gånger dyrare än mineraloljor men är aromatfria och därför fördelaktiga ur arbetsmiljösynpunkt. De har också låg giftighet, vilket leder till att de är nedbrytbara i naturen om ovarsam hantering skulle leda till spill. Vidare har de en livslängd som är ca 5 gånger längre än mineraloljan.

Se vidare VAST/Vattenfall:s rapport om miljövänliga oljor.

5. Driftoptimering

5.1 Allmänt

Ett sätt att höja den totala verkningsgraden för en vattenkraftstation är att införa styr- och övervakningsfunktioner som optimerar driften av stationen. I detta kapitel beskrivs ett antal funktioner som idag tillämpas i många stationer. Samtliga funktioner som nämns finns beskrivna i VAST:s rapport "Programmerbara styr- och övervakningssystem (PLC)". Flera av funktionerna utförs idag manuellt av t ex personalen i driftcentralen. En fördel med att automatisera funktionerna är att automatiken blir repeterbar.

För att funktionerna skall fungera på avsett sätt, krävs att all mätning sker på ett tillförlitligt sätt. Detta ställer krav på att hela kedjan fungerar, från process till kontrollsystem och tillbaka ut till processen. I kedjan ingår givare, givarplacering, signalöverföring, in- och utgångsenheter i kontrollsystemet, ställdon m m. Allt detta behöver ses över avseende noggrannhet och tillförlitlighet för att optimeringsfunktionerna skall få önskad effekt. Ingen kedja är starkare än sin svagaste länk som bekant.

Kalibrering och kontroll av givare bör ske med jämna intervaller för att optimeringsfunktionerna skall fungera på avsett vis.

5.2 Adaptiva regulatorer

Ett kontroversiellt område inom vattenkraften har varit adaptiva regulatorer. Att optimera reglerfunktioner vore önskvärt. Därför har arbetsgruppen undersökt huruvida adaptiva regulatorer skulle kunna användas. Utan att gå för djupt i den problematiken har följande konstaterats:

En adaptiv reglering innebär, exempelvis vid kombinerad, att om regulatören avser att ligga på toppen av en verkningsgradskurva så behöver den "kliva" ned från toppen med jämna mellanrum för att finna referenserna, kanske halva tiden "of top". Om verkningsgradskurvan har en störning på toppen som gör att det i princip finns två toppar, hur hindras då regulatören att välja fel topp?

Hur motiveras en adaptiv regulator? Ett sätt att motivera den är att, om man inte vet så mycket om sin reglering kan man hoppas på att regulatören kan "lära sig" det man inte själv kunde.

För vattenkraften gäller snarare att man kan väldigt mycket om sin reglering varför det blir mer intressant att istället få med så många parametrar som möjligt i regleringen. Om man har många komplicerade parametrar finns risken för ett kapacitetsproblem, dvs tidsproblem. I en reglering är det väsentligt att inställningar inte tar för lång tid.

Frågeställningarna om adaptiva regulatorer är många. Det finns dock applikationer där adaptiva regulatorer fungerar alldeles utmärkt.

Det finns exempel i Sverige på applikation av adaptiva regulatorer inom vattenkraften. I Leringsforsen, som är en kraftstation med Kaplanturbin och stor fallhöjdsvariation, har Vattenfall inom ett FoU-program installerat en ny typ av adaptiv löphjulsregulator.

Stationen har utrustats med akustisk flödesmätning för noggrann verkningsgradsbestämning. I en PC registreras flödet tillsammans med effekt och fallhöjd. PC:n utför fortlöpande verkningsgradsbestämningar samt sökandet av maximal verkningsgrad vid rådande flöde och fallhöjd. Erhållna maxvärden lagras i en databas tillsammans med den exakta löphjuls-vinkeln (mätning med ny teknik).

Databasen ersätter nuvarande "kombineringsadel" vilket ger en ökad noggrannhet vid kombinerings- och därmed ökad verkningsgrad.

Systemet skall löpande kontrollera att verkningsgraden vid jämförbara driftfall bibehålls.

Trots ovannämnda exempel, på applikation av adaptiva regulator inom vattenkraften, har följande slutsats dragits av projektgruppen:

För vattenkraften är parameterstyrda regulatorer det mest relevanta jämfört med adaptiva sådana. Användandet av många parametrar kan ställa till kapacitetsproblem. På sikt brukar tekniken lösa just den typen av problem, vilket får ses som en fördel inför framtiden.

Det uppstår en relevant frågeställning när det påstås att man kan så mycket om sin reglering att det inte

går att motivera adaptiva regulatorer. Frågan blir då: Hur tar man tillvara den kunskapen? Lösningen är den teknik som just bygger på att bygga upp kunskapsbaser från system och person dvs "Expertsystemteknik". Inom kunskapsbaserade system, som de också kallas, finns teknik som "Fuzzy logic" och "Neurala Net" (NN).

Fuzzy logic, är en teknik som används allt mer inom reglering för att ta tillvara kunskaper från exempelvis experter på processen. Detta när det är svårt att modellera och när olika typer av in- och utsignaler förekommer samt vid icke linjär karakteristik.

Fuzzy betyder oskarp. Genom att vikta information, typ litet värde/ganska litet värde/stort värde/ganska stort värde osv, kan ett "resonemang" om parametrar föras i regulatorn, ungefär som en driftexpert skulle göra innan en åtgärd. Detta betyder att regulatorn kan göra grova justeringar i likhet med driftexperten, kontrollera resultatet mot den beräkning som ändå pågår och lära sig av jämförelsen.

Bergeforsens station har den typen av teknik för VNR i drift sedan 1992, ABB är leverantör.

NN är den nyaste tekniken inom expertsystem. Den bygger på att ett system, genom upprepning av sekvenser, kan "lära sig" t ex en funktion eller ett komplext sammanhang och på ett smart sätt lagra informationen och göra den tillgänglig för en applikation.

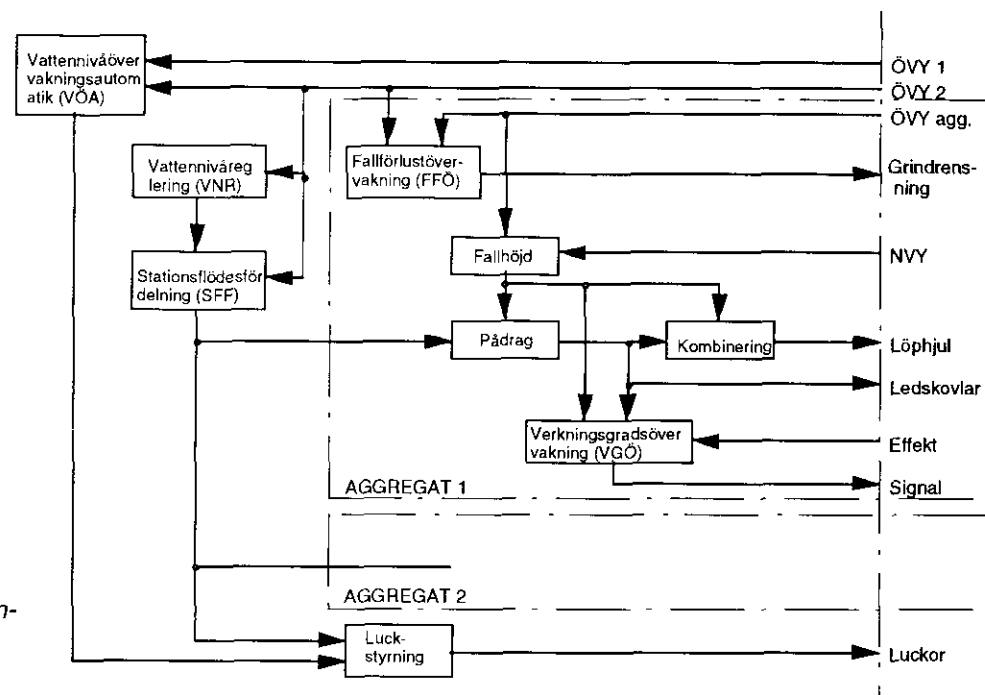
Inom vissa områden är expertsystem en etablerad teknik och behovet av att kunna lagra kunskaper i olika former får anses som växande.

5.3 Stationsfunktioner

Stationsfunktioner benämns de funktioner som ej kan hänföras till ett enskilt aggregat i en station. De funktioner som är aktuella i detta sammanhang finns inom vattenhantering och lastfördelning. Vattennivåöver-

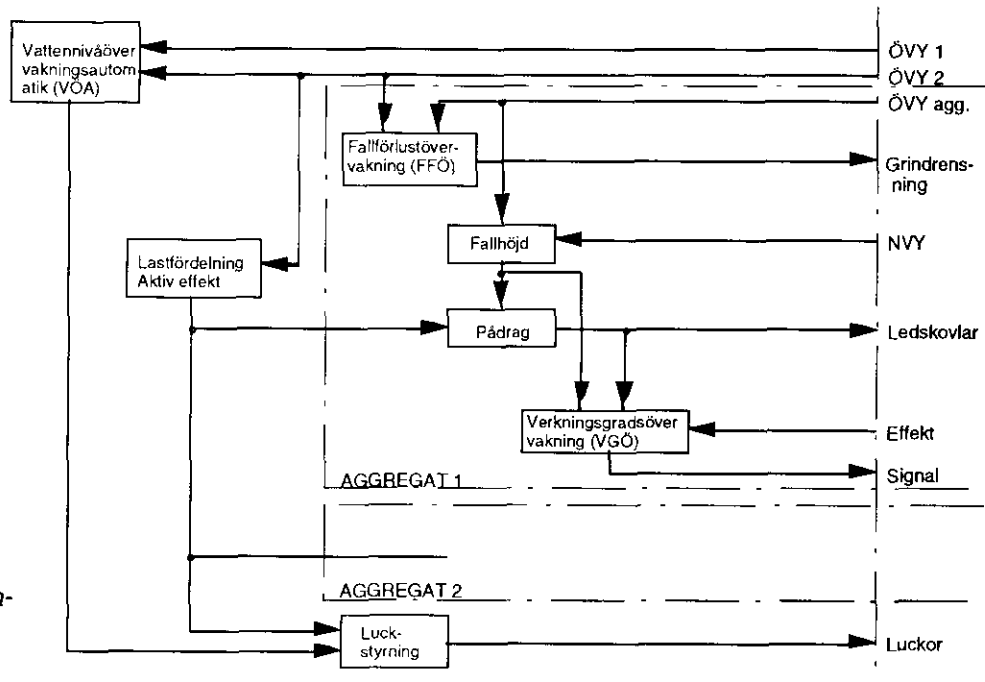
vakningsautomatik och vattennivåreglering är aktuella för såväl en- som fleraggregatsstationer, medan de övriga enbart är aktuella i fleraggregatsstationer.

Nedan ges två exempel på funktionssamband.



Figur 24

Exempel på funktionssamband i station med två kaplanaggregat.



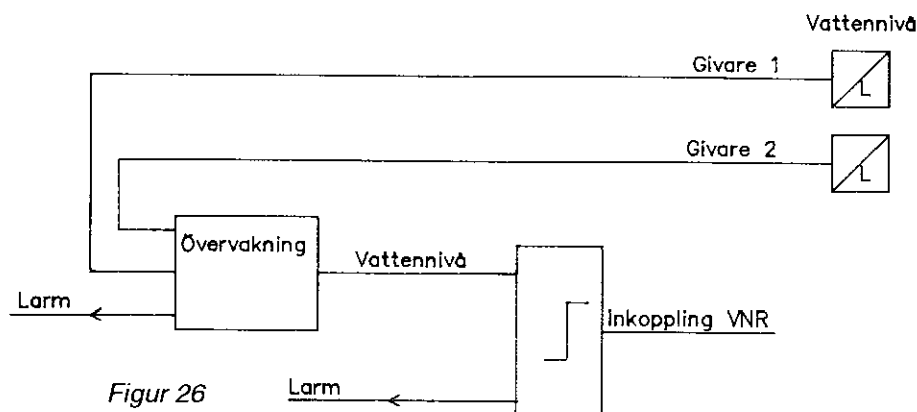
Figur 25

Exempel på funktionssamband i station med två Francisaggregat

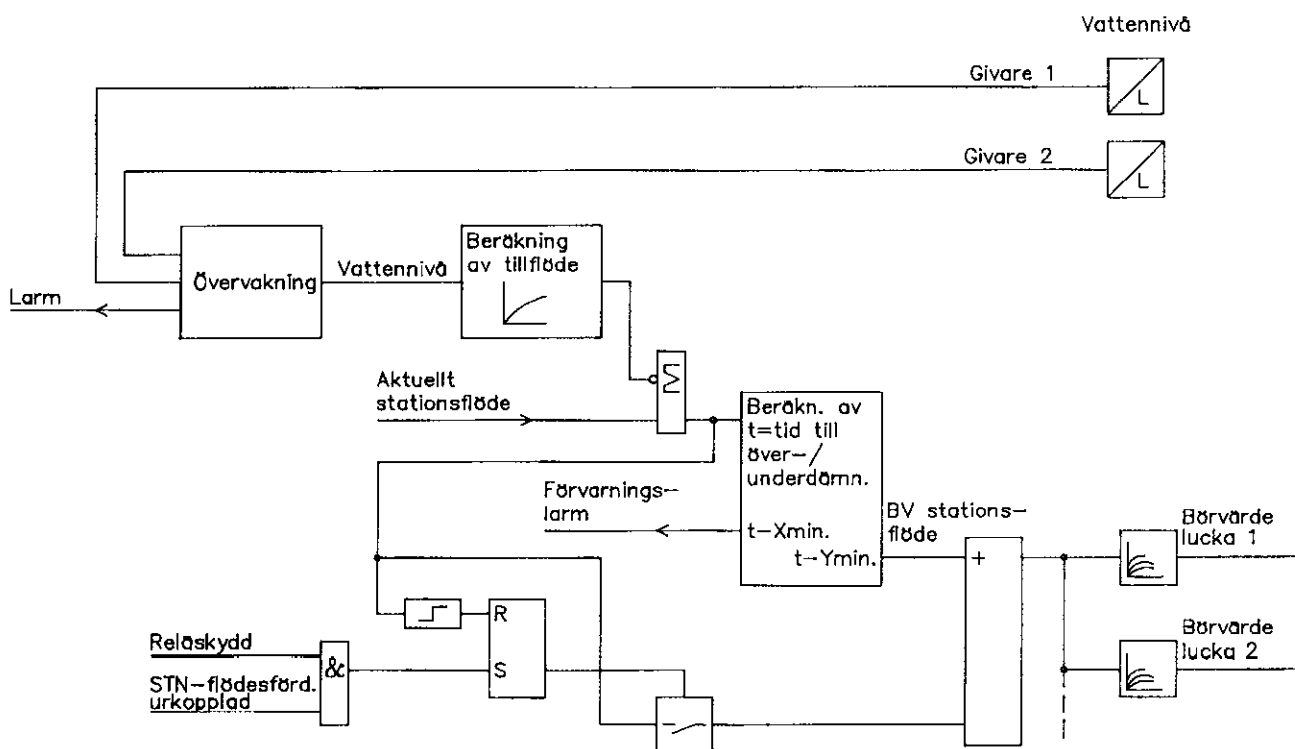
5.3.1 VATTENNIVÅÖVERVAKNINGS-AUTOMATIK (VÖA)

VÖA används för att kontinuerligt övervaka nivån i ett vattenmagasin samt tillse att över- respektive underdämning undviks. Det innebär för känsliga magasin en möjlighet att ligga närmare dämningssgränsen och på så vis utnyttja fallhöjden bättre.

Det finns två former av VÖA. Dels en form som arbetar som fristående funktion. Den beräknar det stationsflöde som krävs för att hålla nivån inom dämningss- respektive sänkningsgränsen och kan även styra utskovs-luckorna direkt. Dels en andra form som endast kopplar in befintlig vattennivåreglering.



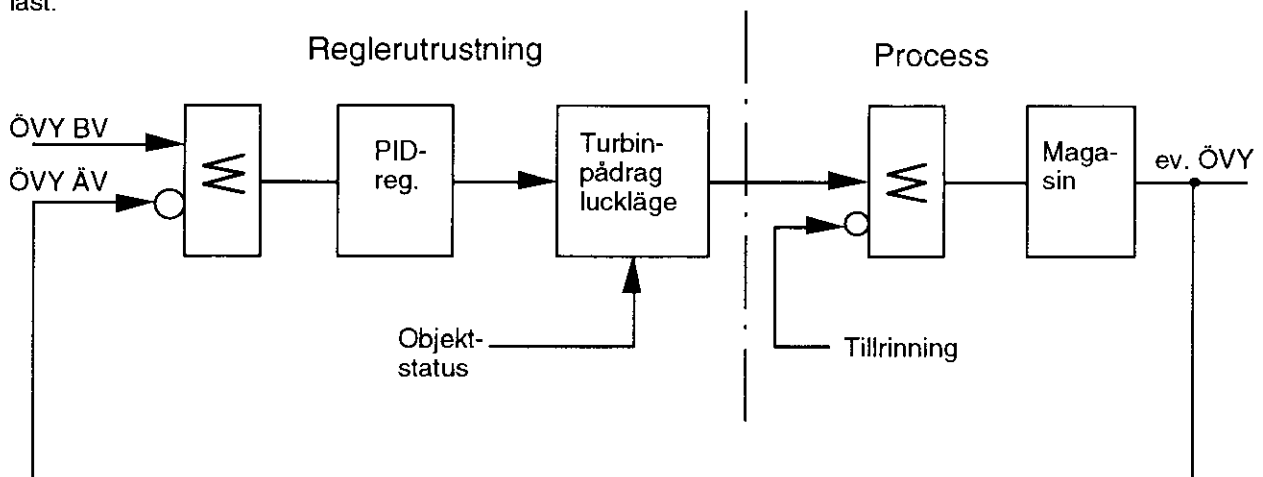
I figur 26 finns en bild på en förenklad vattennivåövervakningsautomatik (VÖA) och i figur 27 en bild på en komplett vattennivåövervakningsautomatik.



Figur 27

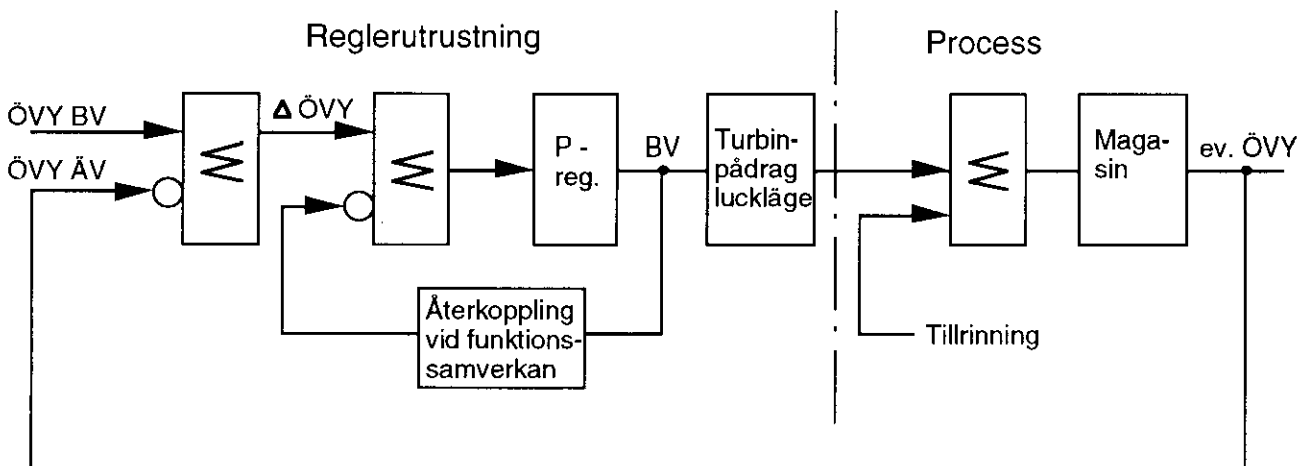
5.3.2 VATTENNIVÅREGLERING (VNR)

VNR används för att under lugna driftförhållanden reglera turbinpådrag och lucköppningar, så att övre vattenytan hålls vid en önskad nivå. Med vattennivåreglering utan statik kan ÖVY, oavsett vattenföring, hållas på en konstant nivå nära (i vissa fall på) dämningssgränsen. Vid byte från en vattennivåreglering med ett statikområde på 1 % av fallhöjden till en vattennivåreglering utan statik får man en energiökning på ca 0,4 %. Detta under förutsättning att varaktighetskurvan för flödet är linjär mellan min- och maxlast.



Figur 28

VNR, vattennivåreglering utan statik

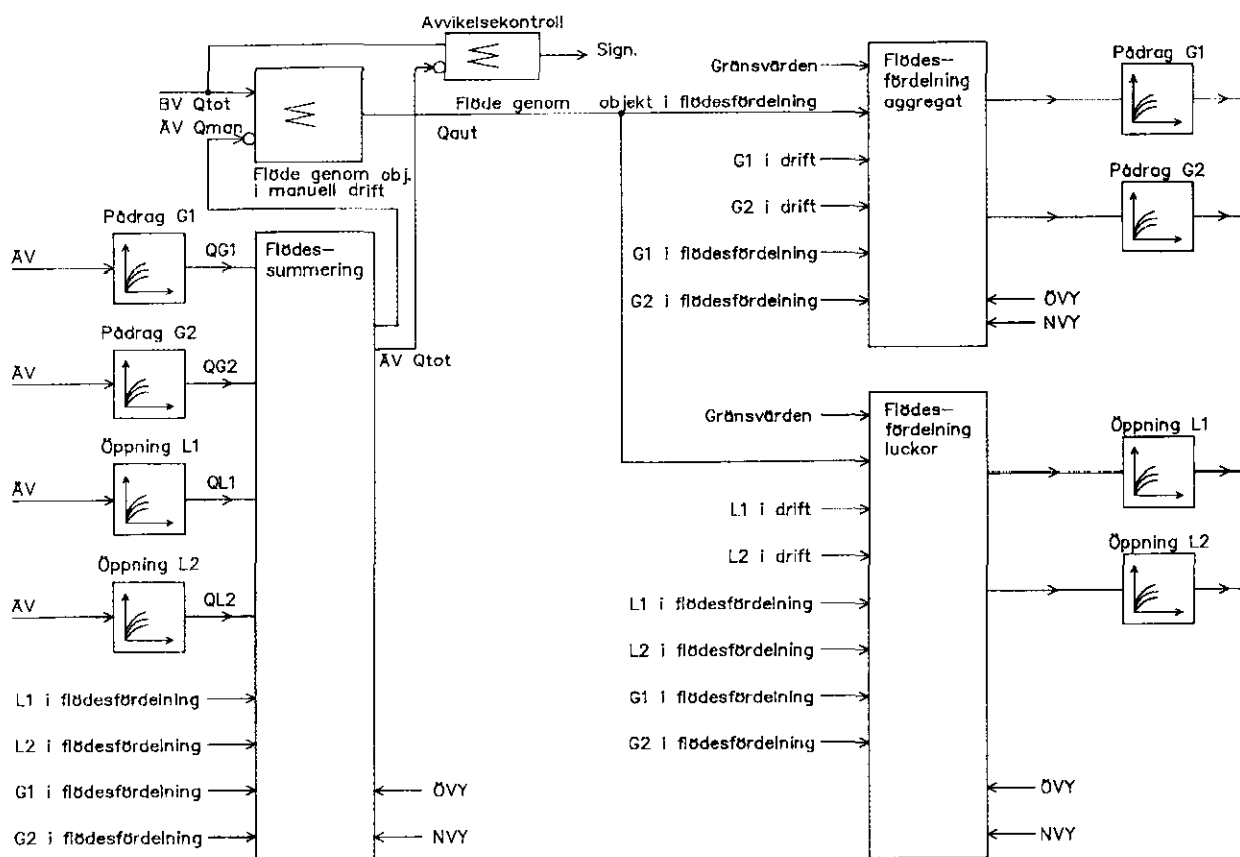


Figur 29

Vattennivåreglering med statik

5.3.3 STATIONSFLÖDESFÖRDELNING

Stationsflödesfördelning är en funktion som används i stationer med flera aggregat och där stationen styrs av ett flödesbörvärde. Börvärdet kan antingen vara inmatat eller beräknat av en vattennivåregleringsfunktion. Funktionen har till uppgift att på ett optimalt sätt fördela flödet mellan aggregat och utskovsluckor. Det är viktigt att mäta upp de relativa verkningsgradskurvorna för samtliga aggregat i en station och göra fördelningen utifrån dessa.



Figur 30

Stationsflödesfördelningen på bilden omfattar två aggregat och två luckor. Funktionen kopplas till speciella funktioner för luckstyrning respektive aggregatstyrning.

Förbättringen av verkningsgraden i stationen är beroende av hur stort fel som funnits tidigare. Det finns exempel där verkningsgraden har kunnat förbättras med flera procentenheter. Ju spetsigare verkningsgradskurvorna är desto viktigare blir det att man fördelar flödet på optimalt sätt. Detta gäller även då aggregaten har olika toppverkningsgrader.

I Trollhättans kraftstationer, Hojum och Olidan har Vattenfall genomfört ett omfattande driftoptimeringsprogram, se appendix B.

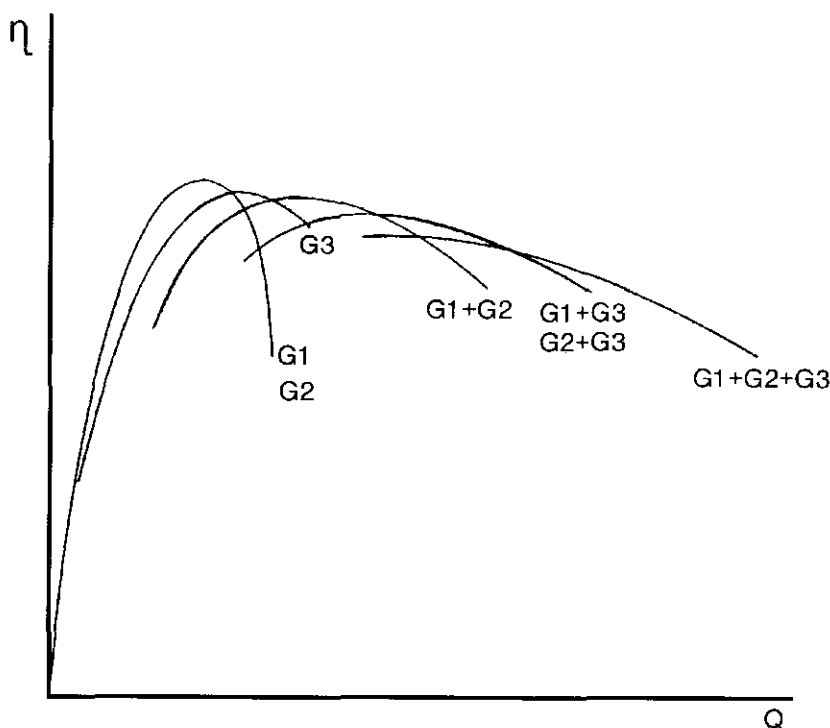
Resultatet av dessa åtgärder blev ett årligt energitillskott på 15 GWh.

5.3.4 LASTFÖRDELNING AV AKTIV EFFEKT

Funktionen lastfördelning av aktiv effekt används i stationer med flera aggregat och där stationen styrs av ett effektbörvärde. Funktionen används normalt i magasinstationer och har till uppgift att fördela stationens aktiva effekt mellan aggregaten på ett optimalt sätt. Förutsättningarna för funktionen är samma som för stationsflödesfördelning.

5.3.5 LASTFÖRDELNING AV REAKTIV EFFEKT

Lastfördelning av reaktiv effekt är en funktion som används i stationer med flera aggregat och där reaktiv reglering tillämpas. Funktionens uppgift är att fördela den önskade reaktiva effekten mellan aggregaten på ett optimalt sätt. Verkningsgradsvinsterna är här relativt små, i storleksordningen någon tiondels procent.



Figur 31

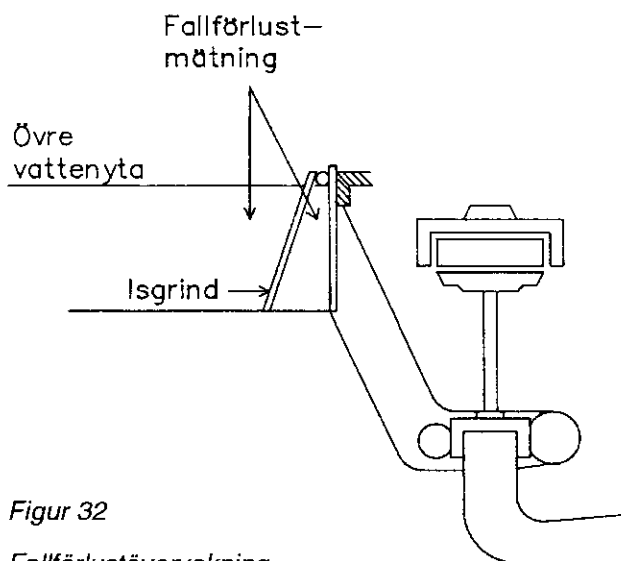
Exempel på verkningsgradskurvor i en 3-aggregatsstation (Kaplanturbiner) vid stationsflödesfördelning.

5.4 Aggregatfunktioner

Som aggregatfunktioner räknas de funktioner som är knutna till ett aggregat. Dessa arbetar enbart med data från det egna aggregatet och påverkas inte av förhållandena för övriga aggregat.

5.4.1 FALLFÖRLUSTÖVERVAKNING

Fallförlustövervakning är en funktion där fallförlusten över intagsgrindar övervakas. Risk kan t ex föreligga för igensättning p g a krävning (isbildning) eller att mycket bråte finns i vattendraget. Vid hög fallförlust ger funktionen i första hand signal om automatisk grindrensning och i andra hand larm. Rätt använd kan funktionen i regel ge en verkningsgradsförbättring. Fel använd blir den t ex om vattennivåregleringen ställs in på millimetern när och larmgränsen för fallförlustövervakning ställs på 20 cm för att undvika för många larm. Funktion är enkel och kan betala sig snabbt. Den kan också användas för att övervaka t ex tunnlar. Vid noggranna mätningar är det viktigt att ha kontroll på hastighetshöjden.



Figur 32

Fallförlustövervakning

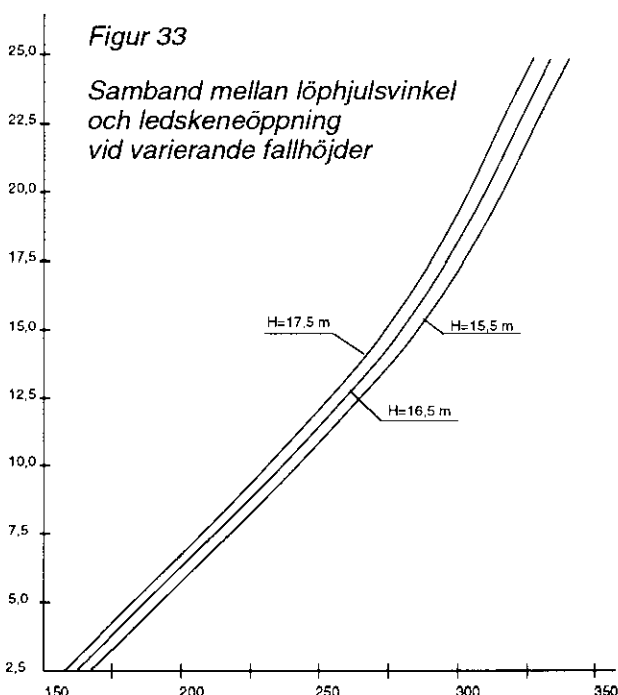
5.4.2 VERKNINGSGRADSÖVERVAKNING

Funktionen verkningsgradsövervakning har till uppgift att övervaka att ett aggregat fungerar på avsett vis och behåller den verkningsgrad som mätts upp vid indexprovet.

Det är viktigt att all mätning sker på ett tillförlitligt sätt. Kontinuerlig övervakning av fallhöjd, pådrag och effekt är ett minimum för funktionen. Dessa parametrar jämförs i tabeller, som är framtagna vid verkningsgradsprov för turbinen. För att snabbt kunna upptäcka förändringar som medför förluster bör även flöden och temperaturdifferenser i kylare för lager, transformator och generator mätas. Kraven på noggrannhet och placering av givare är höga.

5.4.3 FALLHÖJDSBEROENDE KOMBINERING

Fallhöjdsberoende kombineringsfunktion är en funktion som används för kaplanturbiner med varierande fallhöjd. Uppgiften är att alltid ställa in den optimala vinkeln på löphjulet enligt en programmerad tabell. Som tidigare nämnts har försök gjorts med att använda adaptiva regulatorer för kombineringsfunktion, se vidare 2.11 och 5.2.



6. Utvärderingsmetoder

6.1 Allmänt

Tidigare i rapporten finns ett antal riktvärden på vilka förbättrade prestanda som kan erhållas vid effektiviseringsåtgärder. Vi måste dock komma ihåg att varje kraftstation skall bedömas individuellt.

För att få bättre möjlighet att bedöma nyttan av olika typer av åtgärder finns följande möjligheter:

a) Lita på erfarenhet

Detta kräver i sin tur att ett antal tidigare projekt har följts upp med anläggningsprov, så att normvärden för kanal-, intags- och tunnelförluster har kunnat fastställas. Erfarenheter vad gäller olika turbintypers verkningsgrad är även viktigt.

b) Användning av modellteknik

Detta är närmast ett måste när det gäller turbinnära frågor. Modellteknik är även användbart vid andra strömningstekniska problemställningar (intag, rensningar, komplexa svallningsförlopp m m).

c) Användning av beräkningsprogram

Vid strömningstekniska problem duger detta som ersättning för modellteknik om kunskapen är gedigen och beräkningarna kan ses som en interpolation mellan kända situationer. I bland önskas dock endast grova uppskattningar och då kan beräkningstekniken ge ett snabbt och tillräckligt gott resultat.

d) Provning av enskilda komponenter hos leverantör (garantivillkor)

Detta gäller främst apparater som inte är så platsberoende (t ex transformator, delar av hjälpsystem m m).

e) Provning i anläggning

Direkt nytta kan fås vid planerade upprepade åtgärder i fleraggregatstationer. Annars genomförs prov för att skapa erfarenhet av verkligt utfall av insatser och därmed ge en vägledning inför kommande projekt.

Ytterligare kommentarer om punkterna b-c och e ges i 6.2, 6.3 respektive 6.4.

6.2 Modellteknik

För att lösa strömningstekniska problem har modellteknik använts under lång tid bl a för att åskådliggöra ett komplext fenomen, men också i brist på andra tillförlitliga utvärderingsmetoder. Det är mycket billigare att korrigera en felaktighet i modell än att ändra i en färdig anläggning

När det gäller turbinmodeller finns en bred erfarenhet hos många tillverkare. Hur resultat överförs till verklig anläggning finns beskrivet i normer, som är baserad på samlade erfarenheter. Alla experter är dock inte ense om hur och när omräkningsformlerna ska användas. Resultaten avviker också ibland från leverantörens garantivärden. Det har visat sig vid fullskaleprov att resultaten avviker ibland också från leverantörens garantivärden baserade på modellprov. Ur beställarens synvinkel skadar det inte att sätta press på leverantören genom att göra de anläggningsprov som nu är möjliga att genomföra med god noggrannhet.

Även om slutliga prestanda är svåra att fastställa bättre än $\pm 0,5\%$ med hjälp av modellprov, så kan effekter av små modifieringar alltid testas med relativprovning. Vid relativprov når man noggrannhet ned mot 0,1%.

Förändringar av turbinen eller vattenvägar rekommenderas inte utan att modellprov först genomförts.

För att studera åtgärder i de öppna vattenvägarna samt i intag och utlopp används en annan typ av modeller, s k planmodeller. I dessa studeras förluster, hastigheter, tryck m m i en given geometri. Detta är i flera fall det enda tillförlitliga verktyget t ex för fastställande av utskovskapacitet.

Lokala förluster i krökar, kanalinlopp, intag m m studeras med fördel i en planmodell där även åtgärder lätt kan föreslås och testas. Vid studier av fallförluster i planmodeller blir vanligen noggrannheten 1-2 cm omräknat till en verklig anläggning.

6.3 Beräkningsteknik

Möjligheterna att studera och lösa avancerade strömningstekniska problem med hjälp av beräkningar är på stark frammarsch. Allt fler problem där modellteknik tidigare använts löses nu med beräkningsprogram. Speciellt gäller detta vid väl kontrollerade geometrier och då det finns flera liknande referensfall. Exempelvis så är idag problem med stark 1- eller 2-dimensionell prägelse ofta möjliga att lösa genom beräkningar. Eftersom förlusterna ofta är beroende av beskrivningen av turbulens kommer osäkerheten alltid att vara större än för en planmodell.

6.3.1 BERÄKNINGSFORMLER

Magasin

Energiförlusten E vid nedsänkt magasin kan beräknas enligt:

$$E = \eta \cdot g \cdot Q \cdot \Delta h \cdot T_d$$

där

Δh = höjdskillnad mellan tillåten och verklig vattennivå

η = verkningsgrad

g = $9,81 \text{ m/s}^2$

Q = volymström m^3/s

T_d = drifttid

Tunnlar

Fallförlustberäkning kan utföras med Mannings formel:

$$h_f = \frac{V^2 L}{M^2 R^{4/3}}$$

där

h_f = fallförlust

V = vattenhastighet

L = tunnellängd

M = råhetskoefficient:

borrad tunnel $58 < M < 65$

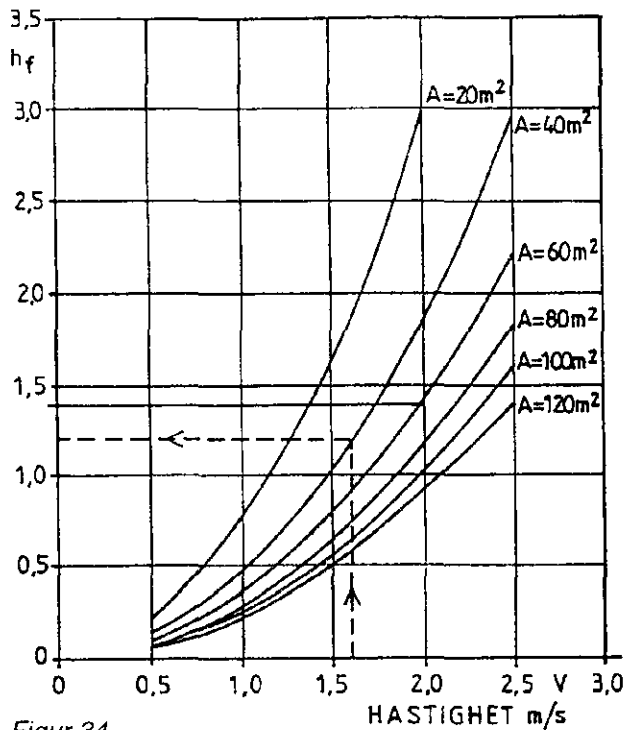
finskuren tunnel $32 < M < 37$

grovskuren tunnel $30 < M < 35$

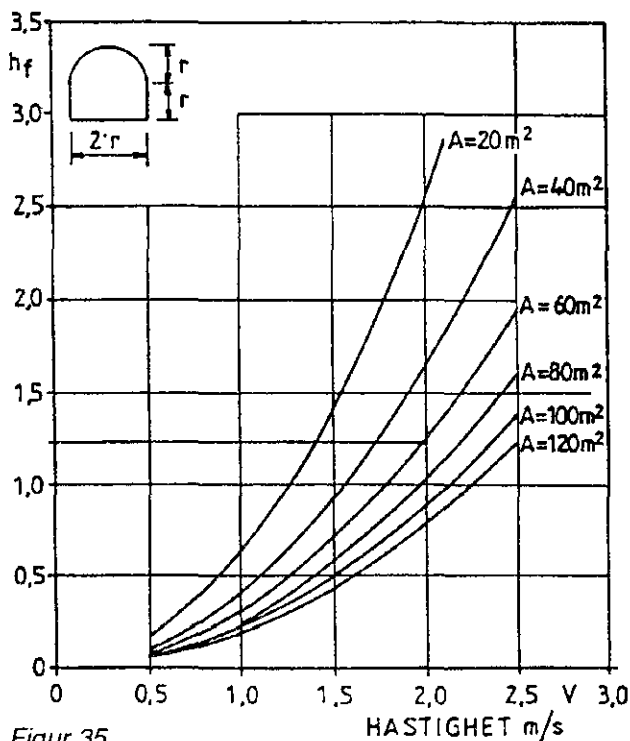
R = hydraulisk radie (area/våt omkrets)
se diagram figur 34 och 35.

Diagrammen visar normal fallförlust i grov- och finskuren tunnel.

A = verklig area.



Figur 34
Grovskuren tunnel



Figur 35
Finskuren tunnel

Koncentrerade förluster bl a i lucklägen framgår av nedanstående formel:

$$h_l = k_a \cdot k_s \frac{V^2}{2g}$$

där

h_l = fallförlust

k_s = öppningsförhållandet, diagram figur 36

V^2 = vattenhastighet m/s

k_a = konstant

Konstanten k_a kan variera mellan 1,0-0,2. Där skarpkantad förstärkningsbåge ger konstanten k_a 1,0 och rätt utformad diffusor med vinkel 7-8° ger k_a = 0,2.

Sambandet mellan fallförlust och förlorad energi framgår av nedanstående formel:

$$E = \eta \cdot g \cdot Q \cdot h_{lm} \cdot T_d$$

där

η = verkningsgrad

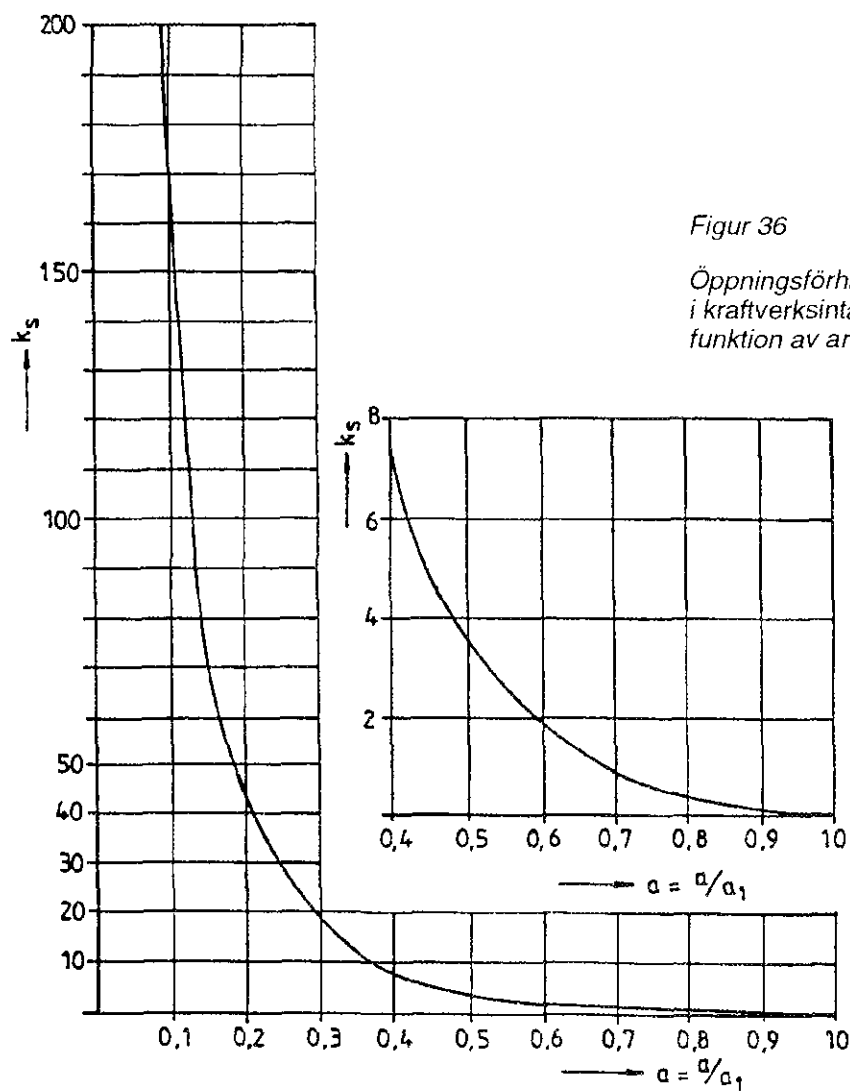
g = 9,81 m/s²

Q = volymström m³/s

h_{lm} = medelvärde av fallförlusten under aktuell drifttid

T_d = drifttid i timmar

Kraftverksintag; kanaler m m.



Figur 36

Öppningsförhållande i kraftverksintag som funktion av arean

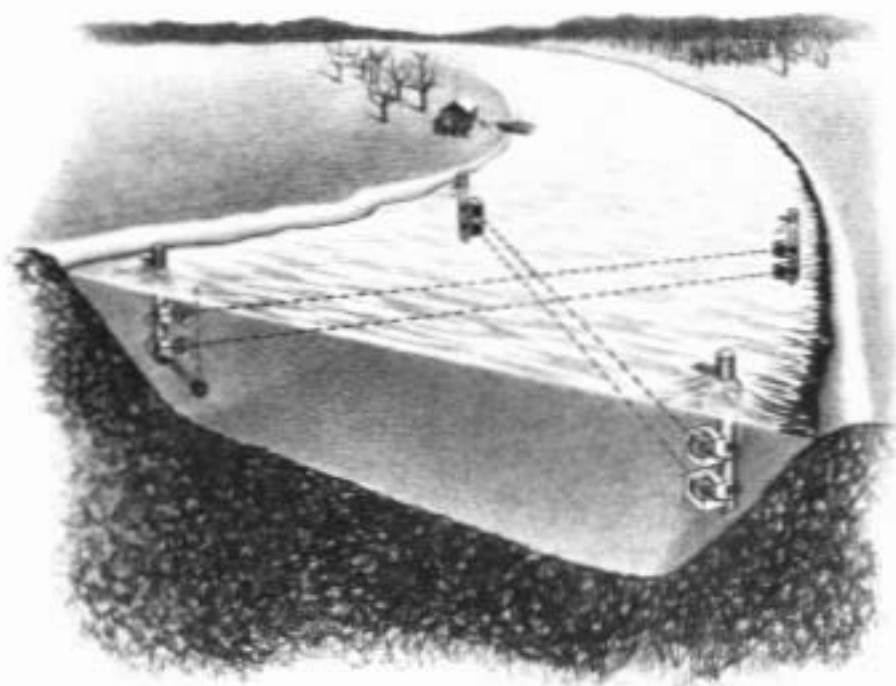
6.4 Fältprov

Tyvärr är det ej så vanligt med provning för att fastställa det verkliga utfallet av en effektiviseringsåtgärd. Det beror antagligen på att nyttan normalt inte står i relation till kostnaden. Men resultatet är viktigt för att ge rätta bedömningar för framtida handlande.

Vid fältprov, där nyttan av effektiviseringsinsatser skall bedömmas, är det viktigt att behandla alla delar av en vattenkraftstation som har kontakt med det strömmande vattnet. Eftersom kraftverket påverkas av förhållande även långt uppströms respektive nedströms inkluderas även andra anläggningsdelar såsom kanaler och tunnlar.

Utvärdering av åtgärder i kanaler, tunnlar och intag kan göras via fallförlustmätningar. Det är då viktigt att på något sätt kunna relatera till flödet vid tidigare mätningar. Om inte fallhöjden påverkats nämnvärt kan detta göras genom att turbinen körs vid samma effekt. En annan möjlighet är att jämföra med fallförluster i ej åtgärdade delar av systemet.

Åtgärder i övriga delar av vattenvägen är svåra att utvärdera annat än genom en mätning av totala verkningsgraden före och efter åtgärd. Anledningen till detta problem är de olika delarnas påverkan på varandra i det sammankopplade systemet.



Figur 37

Givarplacering vid flödesmätning med akustisk mätteknik i öppna kanaler.

Vid verkningsgradsprov finner man oftast att det är flödesmätningen som har svårt att uppfylla krav på noggrannhet och lång tids repeterbarhet. För flödesmätning finns flera metoder angivna. Av de praktiskt användbara är det endast den akustiska metoden som ger god lång tids repeterbarhet så att osäkerheten reduceras avsevärt vid jämförande prov.

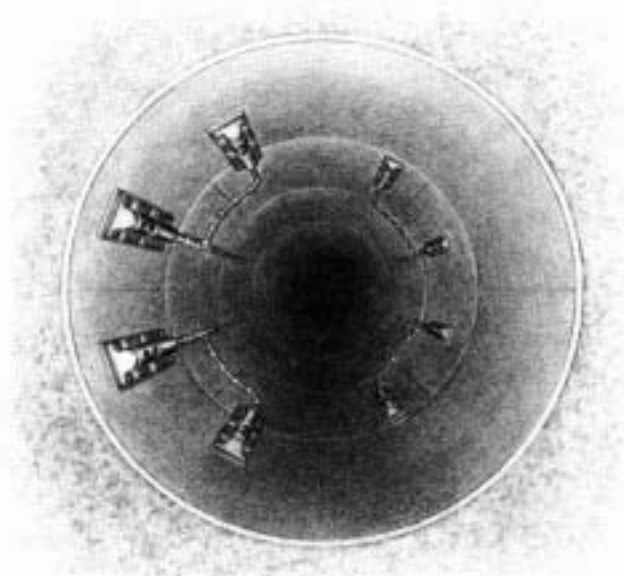
Den svåraste delen vid verkningsgradsbestämning för en kraftstation är att bestämma flödet. Det finns ett flertal metoder att välja mellan. Vissa av dem är absoluta andra är relativa. De senare används därför endast för att bestämma ett vattenkraftsaggregats bästa arbetspunkt. Hur dessa metoder skall användas och vilka krav man skall ställa på mätutrustning och utförande regleras i IEC-kod 41 "Field acceptance tests to determine the hydraulic performance of hydraulic turbines, storage pumps and pump turbines". I denna kod regleras även de olika metodernas noggrannhet.

Bland de absoluta metoderna kan nämnas:

- Flygelmätning
- Tryck-Tid-metoden (Gibson)
- Termodynamiska metoder (fallhöjder över 100 m)
- Spårämnesmetoden
- Akustiska metoder

Bland de relativa:

- Differenstryck (Winter-Kennedy)
- Strömningsförlustmätning



Figur 38

Givarplacering vid flödesmätning med akustisk mätteknik i slutna vattenvägar, t ex tillloppstuber

7. Utveckling

7.1 Allmänt

Utvecklingen för kraftindustrin går från en stadig uppbyggnad av samhälliga resurser med infrastrukturella nybyggnationer till en mer förvaltande tillvaro med underhåll, ombyggnationer och moderniseringar.

Det blir alltmer intressant att optimera driften, förbättra verkningsgraden och höja effekten i befintliga anläggningar. Många anläggningar faller succesivt för åldersstrecket och verkningsgradshöjande åtgärder kommer in som ett naturligt inslag i reinvesteringsprojekten.

Det finns också möjligheter att göra rena verkningsgradsförbättrande och kanske också effekthöjande åtgärder i anläggningar som ännu inte fallit för åldersstrecket.

7.2 Driftoptimering

Det här projektet har begränsats till vad som inom en station kan förbättras avseende åtgärder och optimering. Det finns även andra områden som också borde undersökas ur optimering och effektivitetssynpunkt.

Det går att optimera vattenplaneringen av en älv eller en älvsträcka så att bästa utnyttjande av den kan göras genom samkörning mellan stationer. Det går även att beräkna t ex när olika underhållsåtgärder kan göras vid det mest ekonomiska tillfället.

7.3 Förlustreducering

Förluster går att minimera. Generellt ger en dålig verkningsgrad värmeförluster och därmed en förkortad livslängd. Dessa energiförluster är naturligtvis relativt små, men tillsammans kan de vara intressanta att beakta för framtiden (många bäckar små...).

7.4 Reglersystem

Reglersystemen är idag elektrohydrauliska. De elektriska funktionerna blir snabbare och mer integrerade med övriga aggregatfunktioner. Utvecklingen på hydraulsidan går mot högre tryck och därmed mindre dimensioner och oljevolymmer.

7.5 Kontroll och noggrannhet

Om verkningsgradshöjande åtgärder skall ge optimala lösningar behövs en bra tillståndskontroll. Det är väsentligt med återkoppling på körningen så att regleringen verkligen hamnar rätt på verkningsgradskurvan för aggregaten och totalt sett för stationen.

Verkningsgradshöjande åtgärder kan leda till verkningsgradssänkande resultat om inte hela stationen tas med i projekteringen. Detta även när enskilda och till synes smärre åtgärder planeras av olika skäl. Det är en fördel om man är noggrann och omsorgsfull.

Att vara noggrann och dokumentera anläggningar, erfarenheter från olika mätningar och kunskaper om detta är viktigt för utvecklingen av området. Eftersom flödesmätningen ligger till grund för verkningsgradsbestämmande åtgärder och kontroller behövs forskning inom området. Det ligger i kraftföretagens och leverantörernas intresse att utveckla detta.

7.6 Datateknik

Utvecklingen av olika delar och enheter i anläggningarna samt kunskaper om dessa har stadigt gått framåt. Med ökade möjligheter att mäta, övervaka och styra i anläggningarna kan optimeringar göras. Modern datateknik i kombination med olika åtgärder i anläggningen är ett bra instrument för att åstadkomma bra resultat.

Modern datateknik är ett bra instrument som möjliggör exempelvis simulering och verifiering av åtgärder, så att de rätta insatserna utförs.

7.7 Material

Generellt pågår hos tillverkarna en materialutveckling som medger bättre utnyttjning av produktionsapparaten. Nya material, främst olika plastprodukter, kommer troligen att ersätta maskindelar i metall medförande både minskat underhåll och ökad effektivitet. Ett par exempel kan vara olika lager- och turbindelar.

8. Referenser

Rapporter:

Upprustning och modernisering av vattenkraftstationer
VAST-rapport

Programmerbara styr- och övervakningssystem (PLC),
transformator- och vattenkraftstationer
VAST-rapport

Metoder för tillståndskontroll av vattenkraftaggregat
Elforsk AB

Svetslagning av vattenturbiner
VAST-rapport

Miljövänliga oljor
Vattenfall och VAST

Avbördningssäkerhet vid vattenkraftstationer
VAST / Vattenfall-rapport

Grindrapport
Vattenfall

Sillre sprutbetong
Vattenfall Utveckling AB

Bladvinkelmätning på kaplanturbiner
Vattenfall

Kombinering
Vattenfall

Prov med adaptiv reglering – Svegs vattenkraftstation
ABB-Generation AB

Ultraljudsmätning
VASO

Teststandard modellprov
Kvaerner AB

Effektivare vattenkraft
Kvaerner AB

Falltap i vattenvejer
Vassdragsregulanternes forening, VF, i Norge

Appendix A

LÅNGHAGS KRAFTVERK.

UPPRUSTNING OCH MODERNISERING.

Långhags Kraftverk byggdes 1936-1938 och utrustades med två aggregat med Kaplan-turbiner. Löphjuls-skovlarna tillverkades i rostfritt stål, medan löphjuls-kamrarna utfördes i vanligt gråjärn. Med anledning av uppkomna kavitationsskador försågs kammaren senare med infällda, fastskruvade, rostfria plåtar. Plåtarna har under årens lopp lossnat och bytts ut i omgångar. Vid det senaste tillfället sprutades plåtarna med Metaloc 2, som dock lossnade efter något års drift.

Problemen med löphjuls-kamrarna samt långt framskriden termisk åldring av statorlindningarna ledde till att beslut togs att rusta upp och modernisera stationen under 1991-1993.

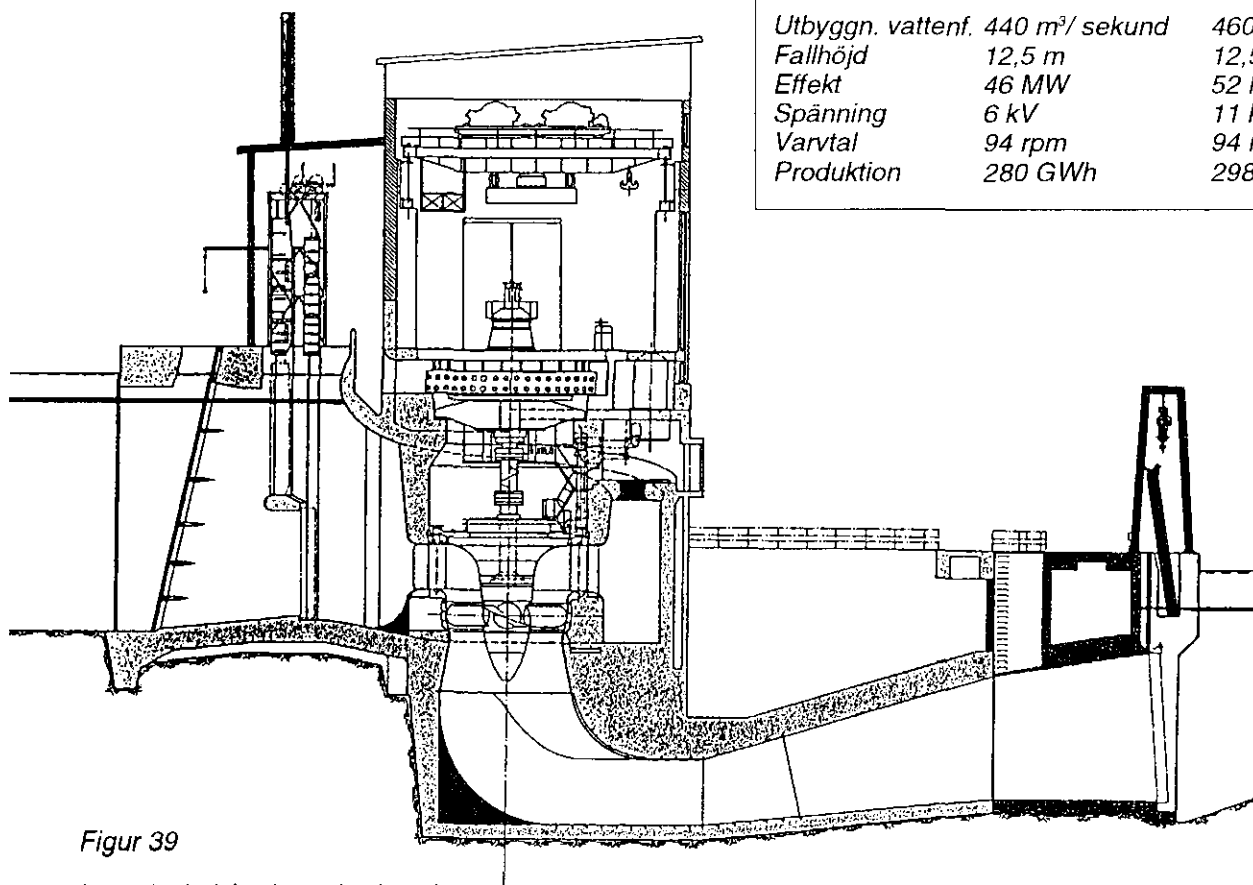
Avställningstiden för att åtgärda turbiner och generatorer bedömdes till tjugo veckor per aggregat. För att uppnå samordningsfördelar och utnyttja avställningstiden beslöts att även rusta upp vattenvägarna och modernisera el- och kontrollutrustningarna.

Eftersom stationen var väl utbyggd och måttligt spill kunde förväntas under respektive aggregats avställning förlades avställningsperioderna till 1 november 1991 till 1 april 1992 för aggregat 2 och 1 november 1992 till 1 april 1993 för aggregat 1. Den låga beläggningen i leverantörernas verkstäder under denna period medförde lägre priser och bidrog till att fastställa tidpunkterna.

STATIONS DATA

Före ombyggnad och förväntat efter ombyggnad:

Utbyggn. vattenf.	440 m ³ /sekund	460 m ³ /sek
Fallhöjd	12,5 m	12,5 m
Effekt	46 MW	52 MW
Spänning	6 kV	11 kV
Varvtal	94 rpm	94 rpm
Produktion	280 GWh	298 GWh



Figur 39

Längdsnitt Långhags kraftstation

MODELLPROV

Modellprov utfördes i sju olika varianter.

Provserien inleddes med prov av befintlig anläggning där turbinkammarestryppningen var 6%.

Därefter upprepades provet med 4%:ig turbinkammarestryppning.

I prov 3 behölls den 4%:iga strypningen men sugröret modifierades med en inläggning i bakkanten samt en förlängning.

I prov 4 upprepades prov 3 men med ett nytt löphjul.

I prov 5 upprepades prov 4 med ändrad sugrörsarea i utloppet.

I prov 6 upprepades prov 5 men med nyutvecklade löphjulsskovlar.

I prov 7 bibehölls de tidigare utförda yttre förändringarna men originallöphjulet användes.

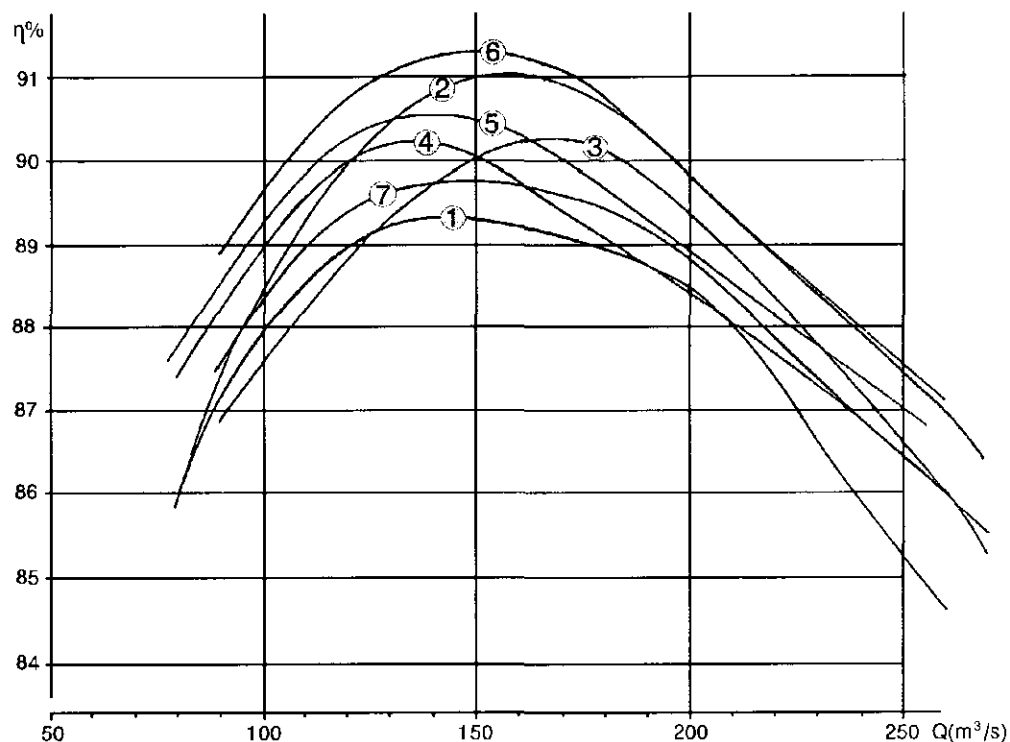
Den största verkningsgradsökningen erhöles vid prov 6, då turbinverkningsgraden ökade med 4%-enheter, se diagram (figur 40). Av dessa 4% hänförs 0,5% till det förlängda sugröret.

Vid proven undersöktes också nyttan av att modifiera sugrörskröken samt vattenvägen vid ledkransbotten. Det konstaterades att dessa åtgärder hade endast marginell betydelse för verkningsgraden (0,1-0,2%).

Maximalt uttagbar effekt ökade med 3 MW per aggregat till totalt 52 MW vid 460 m³/sek.

	Prov	Hjul	Bladbredd	A2 m ²
Original	1	200	310	84
Ny kammare 4%	2	200	310	84
Ny kammare 4%, långt sugrör	3	200	310	111
	4	210	310	111
	5	210	310	102
	6	6122	310	102
	7	K200	310	102

Modellverkningsgrad originalkammare har 6% strypning, andra har %



Figur 40

Uppmätta verkningsgradskurvor vid modellprov 1-7 för Långhags kraftstation

ÅTGÄRDER

Byggnader och vattenvägar

- Ny kombinerad personal- och kontrollrumsbyggnad
- Förlängning av sugrör
- Nya nedstigningsschakt till spiraler
- Modifiering av sugrörskrök
- Modifiering av vattenvägen vid ledkransbotten
- Reparation av betongskador
- Renovering av grindar och stödkonstruktioner
- Översyn av intagsluckor
- Insättande av sugrörslucka

Turbiner

- Byte av löphjuls-kammare
- Byte av löphjul
- Modifiering av tryckoljesystem. Ökning till 40 bar.
- Byte av reglersystem
- Renovering av ledkrans
- Byte av styrlager och tätningsboxar
- Nya turbinaxlar
- Nya inre lock

Generatorer

- Byte av statorer
- Omsolering av rotorpoler
- Ombyggnad av styr- och bärlager
- Nya luftbaserade bromssystem
- Nya statiska matare
- Modifiering av kylsystem

Elutrustning

- Nya aggregattransformatorer 30 MVA, 11/145 kV
- Installation av generatorställverk
- Nytt lokalkraftsystem
- Nytt säkerhetssystem
- Ny kontrollutrustning
- Nya kablar

RESULTAT AV ÅTGÄRDER FÖR ÖKAD PRODUKTION

Vattenvägar och turbiner

I avsikt att kunna verifiera detta med hjälp av modellprov antagna resultat av åtgärderna i turbiner och vattenvägar, har noggranna mätningar gjorts på varje aggregat vid tre tillfällen.

Mätningarna som utförts genom indexprov enligt Winter-Kennedymetoden, genomfördes dels före arbetenas början, dels efter sugrörsförlängningen och dels efter avslutade arbeten. Den relativa förbättringen kan uppmätas med god noggrannhet (ca 0,5%) medan den absoluta verkningsgraden är svårare att fastställa genom anläggningsprov. Här får man lita till de modellprov som genomförts och som sedan räknats upp med skalfaktor till anläggningsdimensioner. Vi har genom de relativa mätningarna kunnat fastställa att turbinverkningsgraden ökat med 4% i det mest utnyttjade driftområdet. Verkningsgradsökningen samt den ökade slukförmågan hos turbinerna ger en produktionsökning av 11 GWh.

Generatorer

Byte av statorer och magnetiseringsutrustning är främsta anledningen till att energitillskottet från generatorupprustningen beräknas till 4 GWh per år.

Transformatorer

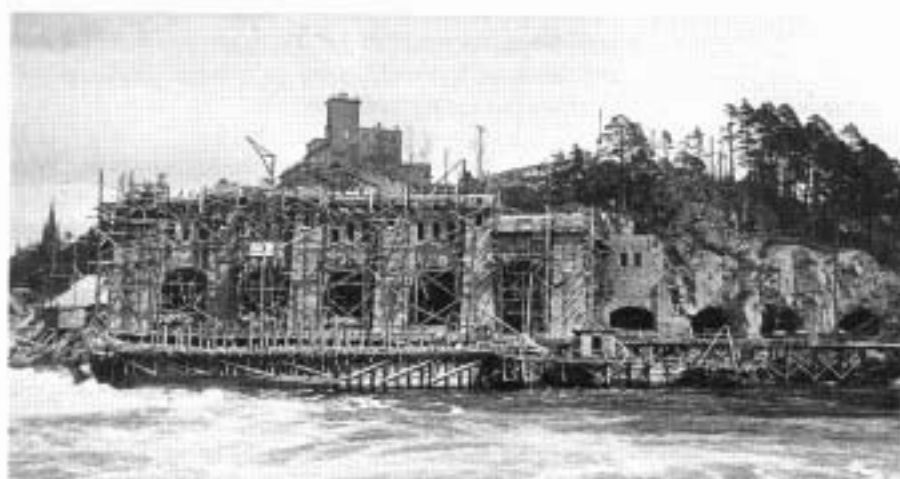
Bytet av transformatorer med minskade förluster i plåt och lindning ger ett energitillskott på 2 GWh per år.

Kontrollutrustning

Modern datorbaserad styrutrustning med möjlighet till förbättrad produktionsoptimering beräknas ge en energiökning av 1 GWh per år.

Appendix B

OLIDANS KRAFTSTATION



Olidans kraftstation i Trollhättan under byggnad. Bilden är tagen den 23 april 1909. På höjden i bakgrunden Hotell Utsikten.

*Källa: Vattenfall VÄSTINFO nr. 5 okt. 1990.
Artikelförfattare: Hans Elmvik*

UPPRUSTNING OCH MODERNISERING.

Det första aggregatet i Olidans kraftstation i Trollhättan togs i drift våren 1910. Tillsammans med de efterföljande 12 aggregaten och de två i Hojums kraftstation produceras cirka 1200 GWh under ett normalår.

Nyligen genomförda verkningsgradsmätningar och optimeringsberäkningar medför effektivare utnyttjning av vattenflödet. Produktionen kan därmed ökas med cirka 15 GWh/år.

Tappningen i Göta älv varierar normalt mellan 170 och 900 kubikmeter per sekund. Order om gällande tappning ges av Kraftkontroll i Räcksta till Regioncentralen i Trollhättan (RCT0), som på bästa sätt fördelar flödet mellan aggregaten i respektive station.

Avgörande för totaltappningen i älven är det aktuella produktionsläget i landet samt tillgången på vatten i

Vänernmagasinet. Tappningen kan exempelvis vara konstant här under ett vinterhalvår eller varieras mellan max och min flera gånger dagligen.

Fördelningen av flödet mellan aggregaten i stationerna är komplicerat. Hänsyn ska tas till de femton aggregatens olika verkningsgradskurvor och läckvattenflöden. Fördelningen mellan Hojum och Olidan påverkas dessutom av de stora fallförlusterna i kraftkanalerna till Olidan. Tidigare tillämpad flödesfördelning har med åren förändrats på grund av bl a förslitning av aggregaten. Mätmetoderna för att ge rätt indata om flöden, verkningsgrader och fallförluster har samtidigt förbättrats. Det var därför dags att modernisera flödesfördelningen.

Inför beslutet om utbyggnaden av G16 i Hojum utfördes under 1988 verkningsgradsmätningar på Olide-aggregaten. Det svåra med att bestämma absolutverkningsgraden för en turbin är att mäta vattenflödet

genom turbinen. Mätningen utfördes med en för Vattenfall ny akustisk mätmetod.

Via mätning av gångtidsskillnaden mellan ljudpulser sända med- respektive motströms kan vattenhastigheten bestämmas. Tillsammans med tubens tvärsnittsarea beräknas därefter flödet.

De nya verkningsgradskurvorna för Olideaggregaten medförde att startordningen för aggregaten ändrades. Aggregaten har med sina francisturbiner relativt "spetsiga" verkningsgradskurvor. De normala körningsalternativen blir därför inställning på bästa verkningsgrad eller nollproduktion (synkronkörning).

Nästa steg var att uppdatera verkningsgradskurvorna för Hojumstationen. Aggregatens korta tuber omöjliggör noggrann flödesmätning. I stället utnyttjades resultaten från Olidan. Ett känt flöde uppmätt i Olidan omfördelades till ett aggregat i taget i Hojum. Därmed kunde en punkt på verkningsgradskurvan fixeras för fortsatt relativ mätning. Hojumaggregatens kaplanturbiner har flackare kurvor, varför bra verkningsgrader fås inom ett brett flödesområde.

Det tredje steget bestod i att via dator för alla förekommande tappningar beräkna bästa fördelning av flödet dels mellan Hojum och Olidan totalt, dels inbördes mellan aggregaten i respektive station.

Det sista steget innebar analys och vidarebearbetning av resultatet inom TDD0 samt att TDDR ompro-

grammerade RCT0-datorer så att optimalt körningsförslag erhålles automatiskt för varje given tappning. Instruktion för att kunna göra fördelningen manuellt har också framtagits.

Mätningarna utförda av Älvkarlebylaboratoriet samt datorberäkningarna utförda av NPD i Sundsvall har tillsammans kostat 1.95 Mkr.

Optimeringen av flödesfördelningen ger jämfört med tidigare körning ett effekttillskott på mellan 1 och 4 MW beroende på tappningen. Under ett medelår ökas energiproduktionen därmed med cirka 15 GWh, vilket kan värderas till drygt 2.2 Mkr per år. Åtgärderna är därmed återbetalda på mindre än ett år.

Ett stort energitillskott har på detta sätt fåtts via relativt enkla medel. 15 GWh motsvarar ungefär årsförbrukningen hos 750 elvärmda villor. Jämförelse kan också göras med den i Västinfo tidigare beskrivna totalombyggnaden i Krokfors (cirka 3 GWh per år) eller med utbyggnaden av G3 i Vargön inklusive rensningar i vattenvägarna vilka gav cirka 39 GWh per år.

Här beskrivna förbättringar i Trollhättestationerna är också ett bra exempel på ett av Vattenfallskoncernens effektivitetsområden: "Bättre utnyttjning av befintliga elanläggningar". Operativ Drift, TDD, tillsammans med övriga enheter på driftavdelningen arbetar vidare inom detta område.

Appendix C

GAMMELÄNGE KRAFTVERK

ENERGIFÖRBRUKNING

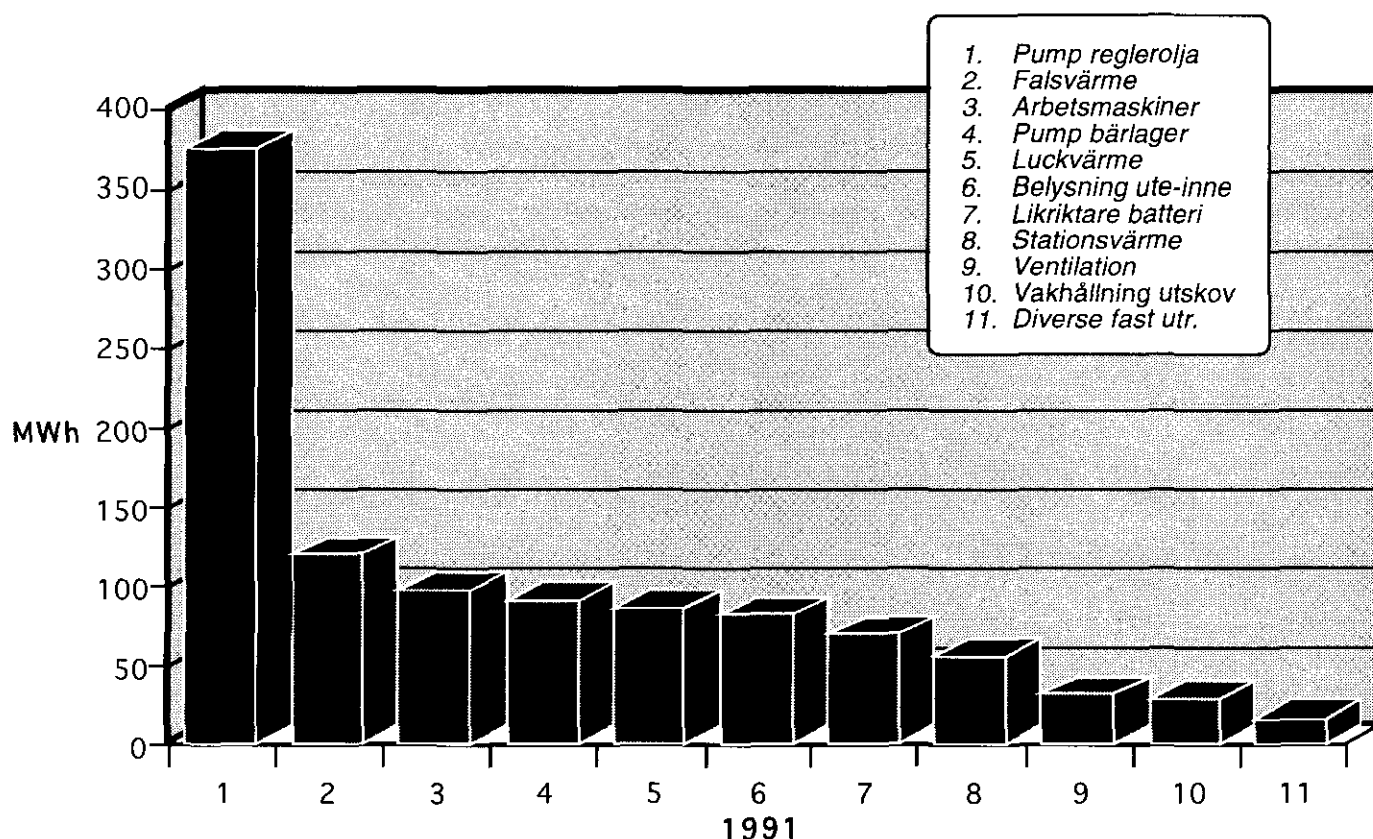
Nedan följer en redovisning av hur lokalförbrukningen fördelar sig på olika anläggningsdelar för Gammelänge kraftverk (se också under avsnitt 1.5 energiförluster) under år 1991. I stapeldiagram (fig 41) framgår fördelning av olika anläggningsdelars energiförbrukning.

Stationen har tre kaplanturbiner om vardera 27 MW, idrifttagna mellan åren 1944 och 1947. Utbyggnadsgraden är väldigt låg vilket medför att utnyttjande tiden, per aggregat, är mycket hög närmare 8 500 timmar. Antalet stopp, per år och aggregat, inskränker sig till 10-15 stycken. Dygnsregleringen sker med en ändring av pådraget i intervallet 70-100%.

Lokal energiförbrukning

Under åren 1989-1991 har en allomfattande renovering skett av hela kraftverket. Turbin, generator, kontrollutrustning och lokalkraft har renoverats eller byggts om. Allt detta ihoptaget har gjort att lokalkraftuttaget har minskat från 1,3 MWh till 1 MWh, säkert har även de senaste årens milda vintrar bidragit till minskningen.

Det är svårt att exakt peka ut var minskningen i lokalkraft har gjorts, dock kan det konstateras att utrustning av modernt snitt sänker förbrukningen radikalt jämfört med 45 år gammal dito.



Figur 41

Lokalkraftförbrukning i Gammelänge kraftverk.

REGLEROLJEPUMPAR, BÄRLAGER

Största energiförbrukarna är regleroljepumparna (pos 1 i fig 41), varje aggregat är utrustat med två tryckstyrda regleroljepumpar. Pumparna är nya, de installerades under åren 1989-91.

Bärlagret är inte självcirkulerande vilket gör att en eller båda bärlagerpumparna (pos 4 i fig 41) behöver vara i drift för cirkulation av olja, då aggregatet är i drift.

UTSKOVSLUCKOR

Anläggningen har två luckor, vardera 14 m breda och 7 m höga. Luckorna är utrustade med falsvärme (pos 2 i fig 41). Transformatoroljan används som värmebärare. De är också utrustade med luckvärme (pos 5 i fig 41) vilken består av termostatstyrda aerotemperar.

Vakhållningen (pos 10 i fig 41) ordnas med luftbubbling. I nedre delen av luckan blåses luft ut vilket ger en tillräcklig "omrörning" av vattnet så att isbildning därmed förhindras.

Sammantaget är alltså utskovet den näst största energiförbrukaren, märk väl att denna förbrukning är starkt beroende av vädret.

STATIONSMILJÖ-VÄRME, VENTILATION OCH BELYSNING

Belysningen har normal omfattning både inomhus och utomhus (pos 6 i fig 41). Ställverk och stationsområde inklusive damm är upplyst.

Uppvärmningsbehovet (pos 8 i fig 41) har ökat beroende på en reduktion av generatorförlusterna efter generatorrevisionerna. Hur stort det ökade värmebehovet kommer att bli är inte färdigutrett i skrivande stund.

Ventilationen (pos 9 i fig 41) av stationen sker i normal omfattning.

LIKRIKTARE

Det finns förhållandevis många batterier i stationen. Både kraft-, manöver- och databatterier är dubblade (pos 7 i fig 41). Detta gör att likströmsförbrukningen blir relativt hög.

ARBETSMASKINER

Under år 1991 skedde en totalrenovering av ett aggregat vilket torde vara förklaringen till att energiförbrukningen för arbetsmaskiner (pos 3 i fig 41) har blivit så pass hög.

ÖVRIGT

Övrig fast monterad utrustning (pos 11 i fig 41), såsom länsmpumpar o dyl, är samlade under denna rubrik.

Rapportförteckning

- 93:1 Metoder för tillståndskontroll
av vattenkraftaggregat
K Lundin m.fl
Sept 1993
- 93:2 Verkningsgradsförbättringar
i vattenkraftstationer
K Lundin m.fl
Sept 1993

ELFORSK

ELFORSK - SWEDISH ELECTRICAL UTILITIES R & D COMPANY

Elforsk AB, S-101 53 Stockholm. Visiting address: Olaf Palmes Gata 31
Tel: +46 8 677 25 30, Fax: +46 8 677 25 35, e-mail: info@elforsk.se