SVENSKA
VATTENKRAFTFÖRENINGENS
PUBLIKATIONER

Ansvarig utgivare: Olle Gimstedt

UTNYTTJNINGEN AV VATTENKRAFTVERKENS LÅNGTIDSMAGASIN

Av

Sven Stage

1957:9 PUBL. 464

Svenska Vattenkraftföreningens Publikationer

År 1910—1954:

Förteckning över samtliga publikationer t. o. m. år 1949 återfinnes i SVKF:s publ. 414 (1950:4). Förteckningar över 1950—54 års publikationer tillhandahållas å föreningens expedition.

I nedanstående förteckning betecknar P publikation, M meddelande. Streck i priskolumnen anger att publikationen är utgången.

År 1955:

				Pris
1		—	Ledamotsförteckning	0: 50
2	M	132	Elstatistik och elekonomi i Schweiz, av Sven Lalander. Elskatt för överskottskraft. Litteratur. Årsmötet	1: —
3	M	133	Styrelse- och revisionsberättelser för år 1954	0: 50
4	P	447	*Vattenkraften och virkesutdrivningen* av Nils Viklund och Bengt G Sterne	2: 50
5	P	448	*Till vem skall ersättning utgivas för försvårad virkesutdrivning?* av Anders Karlén	—
6	P	449	*Atomkraften — vår viktigaste energireserv* av The Svedberg	2: —
7	P	450	*Vandringsfiskutredningens verksamhet, särskilt under 3-års-perioden 1952—54* av Gunnar Alm	2: —
8	P	451	*Försök med märkning av odlade laxungar* av Börje Carlin	2: —
9	P	452	*Skadereglering vid Tennessee River-företaget* av Lars Delin	2: —
10	P	453	*Yttrande över Elkraftutredningens huvudbetänkande*	3: —
11	P	454	*Control of the Economic Loading of a Large Hydro and Thermal Power System* by Sven Stage	4: —
12	M	134	Vattenregleringsavgifterna. Svagströmskungörelsen och elektricitetsstadgan. Vattenfallsstyrelsens utbyggnads- och undersökningsprogram. Vattenkraften och atomkraften, av Lennart Berg. AB Atomenergis anslagsäskanden. Om byggande i vatten enligt 2, 3 och 5 kap. vattenlagen. Litteratur. Kongresser	2: —
13	M	135	Vattenfallsstyrelsens anslagsäskanden. Litteratur	2: 50
14	P	455	*Svenska Vattenkraftföreningens fyrtiosjätte ordinarie årsmöte den 20 april 1955*	5: —
			Dagens kraftfrågor. Föredrag av Erik Blomqvist.	
			Zwischenstaatliche Wasserkraft- und Elektrizitätswirtschaft und die Rolle Österreichs. Föredrag av Oskar Vas, Wien. (Särtryck 2: 50)	
			Aktuell vattenkraftutbyggnad i Finland. Föredrag av Gunnar E Lax, Helsingfors. (Särtryck 1: 50)	
			En kraftverksfilm från Österrike, med kommentarer av Rudolf Partl, Wien.	
15	M	136	Flygfotogrammetrisk verksamhet. Rätt till vattenkraft. Ändringar i vattenlagen, föreslagna av Svenska Naturskyddsföreningen. PM angående Vattenkraft—Värmekraft—Atomkraft för tillgodoseendet av elkraftbehovet under perioden 1956—65. Årsmötet	1: 50
16	P	456	*Vattenkraftutbyggnaderna i Sverige under år 1954, preliminära uppgifter.* Svenska Vattenkraftföreningens årsstatistik utarbetad av Sigvard Lennefors *Alstringen och förbrukningen av elektrisk energi i Sverige år 1954* av Fritz Paszkowski	1: 50

UTNYTTJNINGEN AV VATTENKRAFTVERKENS LÅNGTIDSMAGASIN

AV

SVEN STAGE

OSKAR EKLUNDS BOKTRYCKERI
STOCKHOLM
1958

INNEHÅLL

UTNYTTJNINGEN AV VATTENKRAFTVERKENS LÅNGTIDSMAGASIN

Av överingenjör *Sven Stage*[1]

Problemet att bestämma tappningarna från vattenkraftverkens långtidsmagasin är omfattande och komplicerat, och det är här icke fråga om någon fullständigare behandling av problemet. Det anges endast de stora dragen i en metod att anpassa tappningarna efter krafttillgångar och kraftbehov. Det är huvudsakligen den kraftteckniska sidan av saken som behandlas, medan de sannolikhetsberäkningar som erfordras och den statistiska sidan av problemet äro mycket summariskt behandlade. Behandlingen leder i flera fall fram till frågeställningar, som det inte gjorts något försök att besvara, och det finnes även många frågor, som icke tagits upp till behandling. Även om de nedan angivna beräkningssätten äro användbara, fordras det därför ett flertal kompletterande utredningar och undersökningar, innan man fått fram en komplett metod.

Det räknas närmast med att man har de tillrinningsförhållanden som finnas i Norrland. Behandlingen av problemet är nedan uppdelad i två delar, A och B. Under A behandlas en approximativ eller preliminär tappningsplan, och under B behandlas vissa korrektioner i och kompletteringar av den preliminära tappningsplanen. Framställningen sker delvis i anslutning till SVKF publ. nr 400, "Kontroll av körningen av ett större kraftsystem", och hela framställningen bygger på en värdering av kraften på en bestämning av "priset på sista kWh".

[1] Bil. 1 och 2 författade av civilingenjör Yngve Larsson.

A. PRELIMINÄR TAPPNINGSPLAN

I. Allmänt

Som nyss nämnts behandlas under hela avsnitt A en preliminär tappningsplan. Vid uppgörandet av denna göras de förenklade förutsättningar, som angivas under 1 till 5 nedan.

1. Belastningen under veckan förutsättes vara konstant. Inverkan av korttidsregleringen försummas sålunda.

2. Vattenkraftverkens verkningsgrad förutsättes vara konstant ända upp till maximala belastningen. Det förutsättes således, att den avgivna effekten från ett vattenkraftverk är proportionell mot vattenframsläppningen genom verket.

3. En viss maximal ångeffekt förutsättes vara tillgänglig. Det förutsättes, att man alltid har samma rörliga kostnad per kWh för ångkraften. Denna kostnad är således oberoende av den ångeffekt som produceras.

4. I den mån sekunda leveranser förekomma förutsättes det, att man upp till ett bestämt begränsat maximivärde kan lägga på en effekt, som man har full frihet att välja. Det förutsättes, att det för all sekundakraft betalas ett och samma pris per kWh.

5. Överföringsförlusterna mellan kraftverken kunna försummas.

Det finnes ofta ett antal begränsningar i rätten och möjligheterna att använda ett långtidsmagasin. Nedan göras följande förutsättningar angående långtidsmagasinen. Varje magasin förutsättes ha en bestämd övre och nedre magasinsgräns. Gränsens läge kan variera med tidpunkten på året. Så länge vattenståndet i magasinet ligger mellan övre och nedre magasinsgränsen, får tappningen från magasinet fritt varieras mellan en viss maximi- och en viss minimitappning. Det förutsättes, att övre magasinsgränsen icke får överskridas och den undre icke underskridas. När övre magasinsgränsen uppnås, måste man därför, om gränsens läge icke ändrar sig med tiden, tappa tillrinningen eller mera.

II. Ett vattenkraftverk, ett långtidsmagasin

a. Endast prima belastning. Stor ångeffekt

Vi förutsätta, att vi ha ett kraftsystem med ett vattenkraftverk med ett långtidsmagasin samt ett ångkraftverk. Systemet förutsättes endast ha prima belastning.

Det förutsättes, att ångkraftverket är så stort, att det jämte vattenkraftverket kan tillgodose hela den prima belastningen, även om långtidsmagasinet går tomt. Ångkraftverket är med andra ord så stort, att långtidsmagasinet icke behöver användas för att hålla upp minimivattenföringen vid vattenkraftverket. Vattenkraftverkets effekt förutsättes vara större än primabelastningen.

Det är i detta fall mycket enkelt att ange, huru långtidsmagasinet skall utnyttjas. Så länge vattenståndet i magasinet ligger mellan övre och nedre magasinsgränsen, skall man helt enkelt tappa så mycket som behövs för att vattenkraftverket nätt och jämnt skall kunna tillgodose hela primabelastningen. När vattenståndet ligger vid övre magasinsgränsen, får tappningen ökas så mycket utöver nyssnämnda värde, att magasinsgränsen icke överskrides, och när vattenståndet ligger vid nedre magasinsgränsen, skall det hållas kvar vid denna gräns, så länge vattenkraftverket icke tar hela primabelastningen. Först när vattenkraftverket tar hela primabelastningen, tillåtes vattenståndet stiga över nedre magasinsgränsen. När vattenståndet ligger vid nedre magasinsgränsen, får ångkraftverket ta den del av primabelastningen, som icke tillgodoses av vattenkraftverket.

Körningen bör tydligen helt enkelt gå ut på att erhålla minsta möjliga ångkraftproduktion. Med under I angivna förutsättningar torde det utan vidare vara klart, att detta uppnås med nyssnämnda körsätt. Samtidigt som man får minsta möjliga ångkraftproduktion, får man tydligen största möjliga energiproduktion i vattenkraftverket. Detta sätt att utnyttja magasinet kan därför lämpligen kallas ren *energireglering*. Behovet av ångeffekt blir i detta fall stort.

b. Endast prima belastning. Begränsad ångeffekt

Om man har en begränsad ångeffekt, kan man, om denna ej är alltför liten, alltid tillgodose primabelastningen genom att ta långtidsmagasinet till hjälp. Men vet icke huru intensiv och långvarig en vattenbristperiod blir. Man måste därför genom att köra ångkraft hålla upp magasinsfyllnaderna så mycket, att magasinet icke blir tomt förrän vattenbristen är slut, även om de svåraste vattenförhållanden som man har kännedom om skulle upprepas. Detta resulterar i att man måste bestämma vissa magasinsfyllnader, vid vilka man skall börja ångkraftproduktionen.

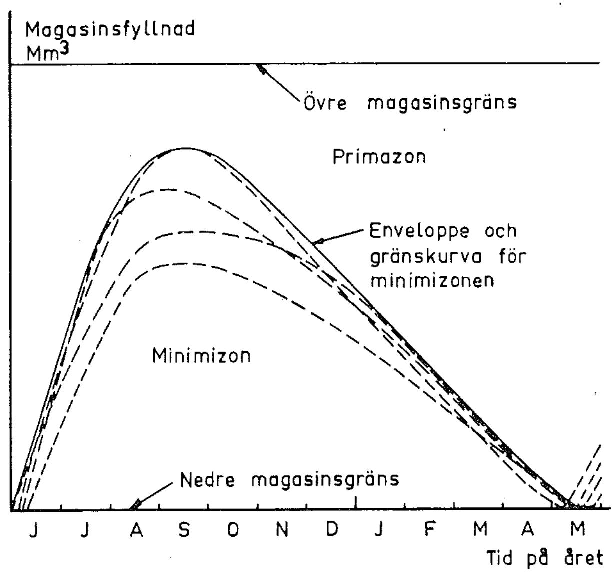

Fig. 1.

Huru man bestämmer dessa magasinsfyllnader framgår av *fig. 1.* Denna visar ett magasinsfyllnadsdiagram. Diagrammet är ett årsdiagram med årets månader och dagar avsatta efter x-axeln. Efter y-axeln är magasinsfyllnaden avsatt. I figuren finnas ett antal prickade kurvor. För varje känt gånget vattenbristår får man en dylik kurva. Kurvan för ett år visar de magasinsfyllnader, vid vilka man med det årets vattenförhållanden måste börja ångkraftkörningen. I figuren finnes vidare en heldragen kurva. Denna kurva är en enveloppe till de prickade kurvorna, lagd på översidan av dem. Den visar de magasinsfyllnader, vid vilka ångkraftkörningen skall börja.

Bestämningen av den prickade kurvan för ett vattenbristår tillgår på följande sätt. Från primabelastningen dras maximala ångeffekten. Det som återstår måste tillgodoses med vattenkraft och är således den minsta belastning, man kan hålla på vattenkraftverket. Härur fås *minimivattenföringen* vid vattenkraftverket. Genom att från minimivattenföringen dra den nyttiga tillrinningen vid vattenkraftverket under vattenbriståret i fråga får man den vattenföring, som måste tas ur magasinet. Man får göra upp en summationskurva

för denna vattenföring på så sätt, att man börjar med tomt magasin vid vattenbristperiodens slut och går baklänges mot dess början. Denna summationskurva visar tydligen, vad man under det ifrågavarande vattenbriståret (med full ångkörning) måste ha i magasinet för att kunna tillgodose primabelastningen. Kurvan visar då också de magasinsfyllnader, vid vilka man måste börja ångkraftkörningen, och den är således den sökta prickade kurvan för vattenbriståret i fråga.

Vattenbristen slutar, när summationskurvan vänder och åt båda hållen avlägsnar sig från nedre magasinsgränsen. Summationskurvan skall stå på (tangera) nedre magasinsgränsen.

Då man fått upp de prickade kurvorna, lägger man på översidan av dem ovannämnda enveloppe. Denna avgränsar en *minimizon* i nedre delen av magasinet.

En utförligare beskrivning av tillvägagångssättet finnes i bil. 1.

Om man, när man bestämmer tappningen, förfar så, att man går upp till full ångkraftkörning och därmed ned till minimivattenföring så snart som magasinsfyllnaden kommer ned i minimizonen, kan man hålla primabelastningen fram till vattenbristens slut, såvida man icke får en vattenbristperiod, som är svårare än alla de vattenbristperioder, som man haft med vid bestämningen av enveloppen, nedan kallad *gränskurvan för minimizonen.*

Den del av magasinet, som ligger inom minimizonen, användes således för att hålla en viss minimivattenföring för att säkerställa primabelastningen. Ju mindre ångeffekt man har, dess större blir minimivattenföringen, och dess högre blir minimizonen. Om ångeffekten är så liten, att gränskurvan för minimizonen når upp till övre magasinsgränsen, har man den minsta ångeffekt, med vilken det är möjligt att genomföra körningen vid en exceptionell vattenbrist.

Den del av magasinet, som ligger inom minimizonen, användes tydligen för att minska ångeffekten. Man kan då säga, att den användes för *effektreglering.*

Den del av magasinet, som ligger ovanför gränskurvan, bör man fortfarande använda för att öka energiproduktionen. Den största energiproduktionen erhålles fortfarande genom att, så länge magasinsfyllnaden ligger i området ovanför gränskurvan, hålla *primavattenföringen* vid kraftverket, dvs. den vattenföring, som behövs för att vattenkraftverket nätt och jämnt skall kunna tillgodose primabelastningen. Området ovanför gränskurvan kan därför lämpligen kallas för *primazonen*. Primazonen användes fortfarande för energireglering.

Man har nu fått en tappningsplan. När magasinsfyllnaden ligger inom primazonen, skall man hålla primavattenföringen vid kraftverket, och när magasinsfyllnaden ligger inom minimizonen, skall man hålla minimivattenföringen. Om magasinsfyllnaden ligger på gränskurvan och går upp i primazonen för minimivattenföringen och ned i minimizonen för primavattenföringen, skall man tappa så mycket, att magasinsfyllnaden ligger kvar på gränskurvan.

Om ett magasin användes för effektreglering, medför detta en minskning i energiproduktionen i vattenkraftverket. Det medför en energiförlust. *Fig. 2* ger en uppfattning om hur denna förlust uppstår. Vi förutsätta två fall. I ena fallet ha vi effektreglering, och i det andra ha vi ren energireglering. Vi förutsätta, att ett år fyllnadskurvan till en början är densamma i båda fallen, och att den ligger i primazonen. För fallet med effektreglering fortsätter fyllnadskurvan enligt den heldragna kurvan i fig. 2 och för fallet utan effektreglering enligt den prickade kurvan. I fallet med effekt-

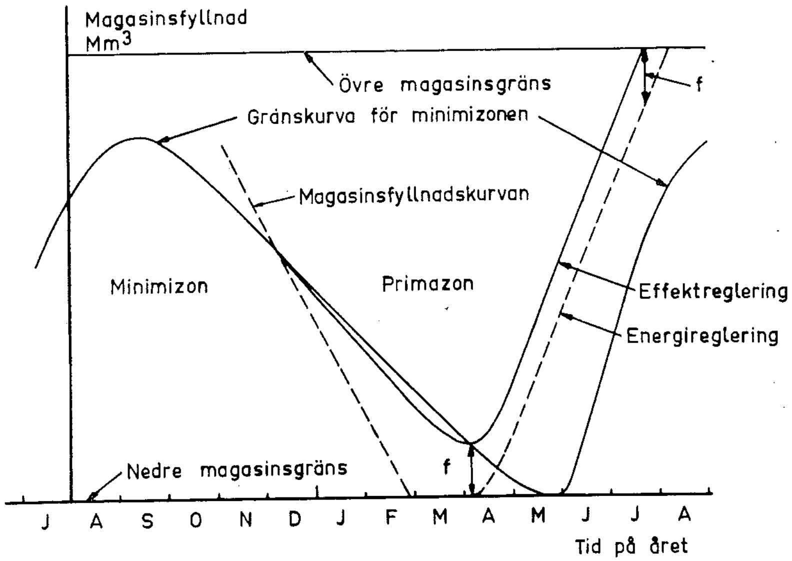

Fig. 2.

reglering börjar ångkraftkörningen så snart fyllnadskurvan kommer ned i minimizonen, medan den i fallet med ren energireglering icke börjar förrän man kommit ned till nedre magasinsgränsen. Detta medför som regel, att den heldragna kurvan ligger högre än den prickade, då den heldragna kurvan åter lämnar minimizonen. Är avståndet mellan dem då lika med f, och gå kurvorna därefter direkt till överrinning, så är det tydligt, att man har en vattenkvantitet motsvarande f, som går förlorad i alternativet med effektreglering men icke i alternativet med ren energireglering. Man kan räkna igenom en följd av vattenår och bestämma hur stor den genomsnittliga förlusten per år genom effektregleringen är.

Ju större ångeffekt man har, dess lägre ligger gränskurvan för minimizonen, och dess mindre blir förlusten genom effektregleringen eller med andra ord ju större ångeffekt, ju mindre ångenergiproduktion.

Ovanstående avser närmast en *årseffektreglering*, dvs. en reglering, som icke sträcker sig längre än över ett år. Med ovan angivna förfaringssätt synes man också kunna lägga upp en *flerårs effektreglering*. För att man skall få en årseffektreglering skola de prickade kurvorna inom ett år åter gå ned till nedre magasinsgränsen. Tar det mer än ett år, innan någon av kurvorna åter går ned till nedre magasinsgränsen, får man en flerårs effektreglering. En flerårs effektreglering synes med den begränsade kännedom man har om vattenföringarna införa betydande riskmoment.

I bil. 1 ha förhållandena genomräknats för ett norrlandskraftverk med relativt hög regleringsgrad. Trots att regleringsgraden är rätt hög, lönar det sig icke att utnyttja magasinet för en flerårs effektreglering för att få ned ångeffekten. Den mest ekonomiska ångeffekten får man vid övergången mellan års- och flerårsreglering.

Ovan angivna sätt att bestämma minimizonen syftar närmast till att helt säkerställa primabelastningen. Resultatet blir emellertid i hög grad beroende av huru extrema de vattenbristår äro, som man fått med vid bestämningen. I bil. 2 är angivet en metod att basera minimikurvan på en viss risk för ransonering, dvs. på en viss risk för att det ej går att helt tillgodose primabelastningen.

c. Prima och sekunda belastning

Innan vi gå vidare, torde det vara lämpligt att något beröra själva utgångspunkterna för bestämningen av tappningen.

Man kan tydligen icke få fram prognoser för nederbörd och tillrinning, som äro av något som helst värde för bestämningen av tappningen av långtidsmagasinen. Tappningen måste därför bestämmas med *tidpunkten på året och den förhandenvarande vattensituationen* som utgångspunkter. Vattensituationen bestämmes i sin tur i första hand av magasinsfyllnaderna i långtidsmagasinen.

(En viss inverkan på vattensituationen har även snömagasinet och den nyttiga tillrinningen.

Snömagasinet är den vattenkvantitet, som är magasinerad i form av snö. Dess storlek torde kunna bestämmas med tillfredsställande noggrannhet. En avsevärd del av snömagasinet kan emellertid dunsta bort under snösmältningen. Detta gör att det samband, som finnes mellan snömagasinets storlek och vårflodens storlek, är ganska löst.

Den nyttiga tillrinningen beror dels på vattenstånden i oreglerade sjöar, i mossar o. d., dels på den vattenkvantitet, som så att säga är på väg efter den sista nederbörden. Det vatten, som är på väg, kan vintertid "frysa bort".

Man kan ta hänsyn till både snömagasinet och den nyttiga tillrinningen genom att göra vissa korrektioner i magasinsfyllnaden i långtidsmagasinen. Den förbättring, man härigenom kan uppnå i tappningarna, torde vara rätt måttlig. För att icke komplicera framställningen tages nedan ingen hänsyn till varken snömagasinet eller den nyttiga tillrinningen.)

I följande framställning gå vi ut ifrån att *vattensituationen* entydigt *bestämmes av magasinsfyllnaden i långtidsmagasinen.* Ingen hänsyn tages till snömagasin eller nyttig tillrinning.

Övergången till minimitappning under b ovan är ett exempel på bestämning av tappningen ur magasinsfyllnaden i ett långtidsmagasin. Det kan med under b angivna förutsättningar direkt beräknas, när övergången bör ske.

Om man har sekunda belastning, synes det icke vara möjligt att direkt beräkna, när man skall använda den ena eller andra tappningen. Man får sätta sig in i vatten- och belastningsförhållanden och på basis av den erfarenhet man får och allmänna resonemang och överslagsberäkningar lägga upp en tappningsplan, med hjälp

av vilken man kan bestämma tappningarna ur tidpunkten på året och magasinsfyllnaden i långtidsmagasinet. Man får sedan kontrollera, om tappningsplanen är riktig, och om så icke är fallet korrigera den i den riktning, som kontrollen anvisar. Den justerade tappningsplanen får man sedan åter kontrollera osv., tills man kommit fram till en tillfredsställande tappningsplan.

Kontrollen av tappningsplanen tillgår så, att man tillämpar tappningsplanen på en lång följd av gångna kända vattenår. *Tappningsplanen får anses vara riktig, om den för hela denna följd av gångna vattenår tagna som en enhet ger bästa möjliga ekonomiska resultat.* Den rörliga kostnaden för ångkraften minskad med inkomsten av sekundakraftleveranserna skall vara så liten som möjligt. Kontrollen av tappningsplanen hänger intimt samman med värderingen av kraften, och vi skola börja med ett exempel på värdering av kraften.

Vi gå till en början tillbaka till ett system med ett vattenkraftverk, ett långtidsmagasin och ett ångkraftverk, som är så stort, att det icke behövs någon effektreglering. Det förutsättes, att det finnes en liten sekunda belastning, som betalar ett visst pris per kWh, som är lägre än den rörliga kostnaden för ångkraften. Vattenkraftverkets effekt förutsättes vara större än primabelastningen. Vi skola bestämma, när den sekunda belastningen skall läggas på och kopplas ifrån.

Då magasinet rinner över, bör givetvis den sekunda belastningen vara tillkopplad. Då magasinet ligger vid nedre magasinsgränsen, har kraften ångkraftvärde, och den sekunda belastningen bör då vara bortkopplad.

Om man vid en viss tidpunkt på året har en magasinsfyllnad, som ligger mellan övre och nedre magasinsgränsen, kan man på följande sätt bestämma, om den sekunda belastningen skall läggas på eller ej.

Man går igenom en känd följd av gångna vattenår och ritar upp magasinsfyllnadskurvorna. Den sekunda belastningen förutsättes enligt ovanstående vara liten. Detta medför, att fyllnadskurvorna icke ändras nämnvärt genom att man lägger på den sekunda belastningen. De kunna således anses oförändrade. Den förhandenvarande tidpunkten på året och den förhandenvarande magasinsfyllnaden motsvarar en punkt i magasinsfyllnadsdiagrammet. Se *fig. 3.* Av de uppritade magasinsfyllnadskurvorna gå *m* st. genom (eller i närheten av) denna punkt. Vi följa dessa kurvor framåt i tiden (mot senare tidpunkter), tills de första gången träffa övre eller

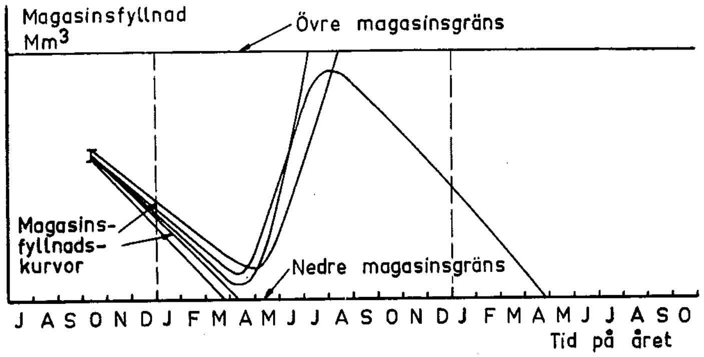

Fig. 3. De magasinsfyllnadskurvor som gå inom ett visst avstånd från den punkt som skall undersökas äro utplockade och i fig. inritade på ett gemensamt diagram.

nedre magasinsgränsen. Vi få som resultat, att p kurvor först träffa nedre magasinsgränsen, och att detta medför ångkörning, och att $(m—p)$ kurvor gå till övre magasinsgränsen, och att det där uppstår överrinning. Om man lägger på en sekundabelastning av S kWh, får man en motsvarande minskning i magasinsfyllnaden, och denna resulterar under p år av m i en ökning av ångkörningen av S kWh och under $(m—p)$ år av m i en minskad överrinning. Den sannolika ökningen av ångkörningen blir således lika med $\frac{p}{m} S$.

Om rörliga kostnaden för ångkraften är $k_å$ öre/kWh, blir således den sannolika kostnaden k_o i öre/kWh för sekundabelastningen:

$$k_o = \frac{p}{m} k_å \quad \dots\dots\dots\dots\dots\dots \quad (1)$$

Om den sekunda belastningen betalar mer per kWh, bör den läggas på, i annat fall bör den kopplas bort.

Man kan på detta sätt för varje punkt i magasinsfyllnadsdiagrammet bestämma ett pris k_o på kraften. Då detta pris är kostnaden för en liten ökning av kraftproduktionen, är priset ett pris på sista kWh.

Priset k_o är konstant under veckan, beroende på att belastningen under veckan förutsatts vara konstant.

(I publ. 400 räknas med variabel belastning, och man får därför där fram ett pris på sista kWh k, som är olika vid olika tidpunkter under dygnet och veckan.)

Enligt publ. 400, i vilken det icke tas hänsyn till långtidsmagasinen, kan ett direkt numeriskt värde på priset på sista kWh endast erhållas, då man har ångkraftkörning eller då man har en icke fullt utnyttjad sekundaleverans. Man kan då bestämma priset på sista kWh ur kostnaden för ångkraften resp. priset på sekundakraften. Då man endast har primabelastning och tillgodoser den helt med vattenkraft, kan man icke få fram några absoluta värden på priset på sista kWh. I ovanstående fall, där det tas hänsyn till ett långtidsmagasin, har man tydligen möjlighet att få fram ett pris på sista kWh, även då man varken har ångkraftkörning eller sekundabelastning. Det är vidare vattensituationen som i sista hand bestämmer, om man har ångkraftkörning eller ej och ångkraftkörningens storlek eller om man har sekundaleverans eller ej. *Det är således generellt i sista hand tidpunkten på året och vattensituationen, som bestämmer priset på sista kWh.*

Det torde framgå av följande, att detta gäller allmänt och ej blott för ovanstående fall.

Vi gå så över till det fallet, att vi ha ett system med ett vattenkraftverk med ett långtidsmagasin, ett ångkraftverk med begränsad effekt samt en bestämd, begränsad sekundabelastning, som betalar ett bestämt pris per kWh. Vattenkraftverkets effekt förutsättes tillräcklig för både primabelastningen och hela sekundabelastningen.

Man kommer i detta fall fram till en tappningsplan med det allmänna utseende som framgår av *fig. 4.* Man får på samma sätt som under b ovan nederst en minimizon och ovanför denna en primazon. Man får emellertid nu ovanför primazonen en *sekundazon* och en *gränskurva för sekundazonen,* som avgränsar denna mot primazonen.

Om magasinsfyllnaden ligger i minimi- eller primazonen, skall man tappa som angivits under b, och om den ligger i sekundazonen, skall man hålla *sekundavattenföring* vid vattenkraftverket, dvs. den vattenföring som behövs för att tillgodose hela prima- och sekundabelastningen. Man kan nu få det fallet, att magasinsfyllnadskurvan följer gränskurvan för sekundazonen för en begränsad sekundakraftproduktion.

Enligt ovanstående kan man icke beräkna gränskurvan för sekundazonen. Man får lägga upp kurvan med hjälp av allmänna

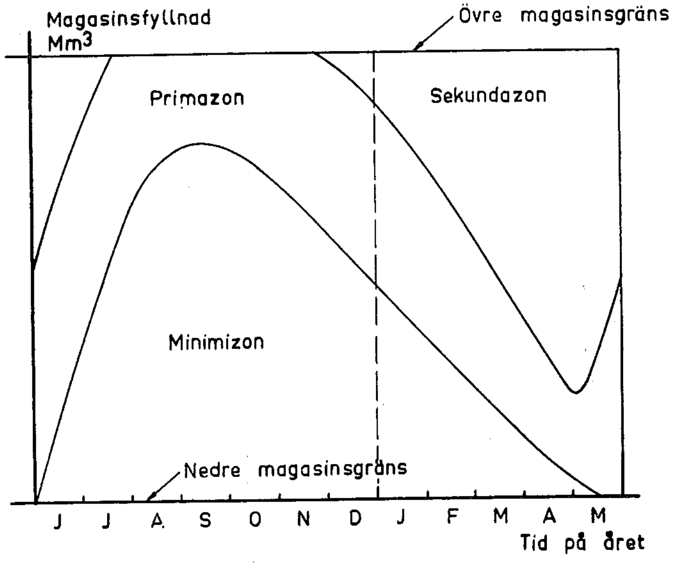

Fig. 4. Tappningsplan.

resonemang och överslagsberäkningar och sedan kontrollera, att den är riktig.

För ett bestämt kraftsystem torde det vara möjligt att med en större räknemaskin för en följd av gångna kända vattenår räkna fram totala rörliga kostnaden för olika form och lägen av gränskurvan för sekundazonen och på så sätt passa sig fram till en riktig gränskurva. Totala rörliga kostnaden bestämmes som redan nämnts som rörliga kostnaden för ångkraften minus inkomsten av sekundakraften.

Det torde vara lämpligare att se saken så, att man gör små ändringar i gränskurvan för sekundazonen och bestämmer motsvarande ändringar i totala rörliga kostnaden. Gränskurvan är riktig, om en liten ändring var som helst på kurvan icke ger någon ändring i totala rörliga kostnaden.

En liten flyttning av en kort sträcka $\Delta\, b$ av gränskurvan påverkar endast de magasinsfyllnadskurvor, som passera den korta sträckan $\Delta\, b$. För en sådan fyllnadskurva må den av flyttningen av sträckan $\Delta\, b$ förorsakade ökningen i tappningen, då fyllnadskurvan passerar

gränskurvan, mätt i naturenergi vara ΔW_b. Totalt för alla fyllnadskurvor, som passera $\Delta\, b$, är ökningen $\Sigma \triangle W_b$. För dessa fyllnadskurvor minskas i fortsättningen tappningen för ångkraftproduktion med totalt $\Sigma \triangle W_å$ och för sekundakraftproduktion med totalt $\Sigma \triangle W_s$.

Är

$k_å$ = rörliga kostnaden för ångkraften i öre/kWh

k_s = sekundakraftpriset i öre/kWh

η_o = vattenkraftverkets konstanta totalverkningsgrad

blir

vinsten genom tappningsökningen vid $\Delta\, b$ lika med $\eta_o\ k_s\ \Sigma \triangle W_b$

förlusten genom den ökade ångkraftproduktionen i fortsättningen lika med $\eta_o\ k_å\ \Sigma \triangle W_å$

förlusten genom den minskade sekundakraftproduktionen i fortsättningen lika med $\eta_o\ k_s\ \Sigma \triangle W_s$.

Då vinsten genom flyttningen av $\Delta\, b$ skall vara noll fås:

$$k_s\ \Sigma \triangle W_b - k_å\ \Sigma \triangle W_å - k_s\ \Sigma \triangle W_s = 0 \ldots\ldots \quad (2)$$

En närmare redogörelse för hur en ändring av gränskurvan påverkar tappningarna och en närmare motivering för formel (2) finnes i bil. 3.

Priset på sista kWh i en punkt i tappningsplanen kan bestämmas så, att man tar ut de m st. fyllnadskurvor, som passera en kort vertikal sträcka $\Delta\, a$, vars mittpunkt ligger i punkten i fråga och ökar tappningen för dessa kurvor med ΔW_a eller totalt med $m\, \Delta\, W_a$. På samma sätt som i förra fallet får man för de m fyllnadskurvorna bestämma minskningen i tappningarna för ångkraftproduktion $\Sigma \triangle W_å$ och för sekundakraftproduktion $\Sigma \triangle W_s$ genom ökningen $m \triangle W_a$. Då värdet av tappningsökningarna i punkten a skall vara lika med kostnaden för den ökning i ångkraftproduktion och den minskning i sekundakraftproduktion, som de medföra, får man:

$$m \cdot k_{oa} \triangle W_a = k_å\ \Sigma \triangle W_å + k_s\ \Sigma \triangle W_s \ \ldots\ldots \quad (3)$$

där k_{oa} är priset på sista kWh i punkten i fråga.

Även denna formel är närmare motiverad i bil. 3.

Beräkningarna enligt formel (2) och (3) torde kunna genomföras med en större räknemaskin. En brist, som i synnerhet kommer fram vid bestämningen av priset på sista kWh enligt formel (3), är att det statistiska materialet är för litet.

I bil. 3 visas, att man även kan räkna så, att man följer fyllnadskurvorna fram till överrinning eller ångkörning och bestämmer priset på sista kWh enligt formel (1) ovan.

I bil. 3 finnas även vissa synpunkter på under vilka förhållanden formlerna gälla och på riktigheten av hela beräkningssättet.

Bestämmande för en tappningsplan bli i stora drag följande storheter.

1. Kurvorna för nyttiga tillrinningen, speciellt tillrinningens fördelning under året.

2. Regleringsgraden.

3. Förhållandet mellan primabelastningens medelvärde och den mot medelvattenföringen svarande effekten i vattenkraftverket.

4. Förhållandet mellan medelvärdet av minimivattenföringen och medelvattenföringen vid kraftverket.

5. Förhållandet mellan medelvärdet av sekundabelastningen och medelvärdet av primabelastningen.

6. Förhållandet mellan sekundakraftpriset och rörliga kostnaden för ångkraften.

Om regleringsgraden är hög, är det ekonomiskt att till en viss gräns spara vattnet till nästa regleringsår i stället för att tappa ur det före vårfloden för att producera sekunda kraft. Det sparade vattnet rinner visserligen några år bort under vårflödet, men det kommer andra år att minska produktionen av ångkraft. Man får på så sätt en *flerårsenergireglering.*

Om regleringsgraden är låg, är det ekonomiskt att tömma magasinet varje år även om det medför produktion av sekundakraft. Man kommer då till en ren *årsenergireglering.*

Hela sekundakraftproduktionen spelar vid svenska förhållanden en rätt underordnad roll. Ett måttligare fel i utformning av gränskurvan för sekundazonen är procentuellt sett icke av någon nämnvärd betydelse. Utslagsgivande för hela tappningsplanen är däremot gränskurvan för minimizonen.

III. Kraftverk och magasin i flera vattendrag

a. Fördelningen av magasinsfyllnaden

Det förutsättes, att vattenkraftverken i ett vattendrag ha samma utbyggnadsvattenföring, och att det inte finnes någon nämnvärd tillrinning mellan dem.

Magasinen parallellkopplade

Magasinen i en älv äro parallellkopplade, om de ligga i skilda tillflöden. Dessa skola rinna ihop nedanför magasinen, så att man icke kan få över vatten från det ena magasinet till det andra. Magasin, som ligga i skilda vattendrag, skola även betraktas som parallellkopplade.

Magasinsfyllnaden bör fördelas på de olika magasinen, så att man så långt som möjligt undviker att ett magasin rinner över, medan ett annat icke blir fullt. Detta torde man vid parallellkopplade magasin i ett vattendrag i allt väsentligt uppnå genom att så långt som möjligt fördela magasinsfyllnaden på de olika magasinen, så att risken för överrinning är lika stor i alla magasinen.

En sådan fördelning av magasinsfyllnaden får man fram på det sätt, som visas av *fig. 5.* Figuren avser närmast vårflödet och avser tre parallellkopplade magasin A, B och C.

I den övre delen av fig. 5 är för vart och ett av magasinen uppritad en fördelningskurva för storleken av vårflödena, som rinna ned i magasinet. Vårflödena under en följd av år äro ordnade i storleksordning. Efter x-axeln är sedan avsatt antalet vårflöden och efter y-axeln vårflödenas storlek exempelvis mätta i Mm^3. Då även magasinsfyllnaden kan mätas i Mm^3, kan man avsätta totala magasinsvolymen A från origo upp efter y-axeln och gradera in magasinsfyllnaden å sträckan A. Detta göres så, att origo motsvarar fullt magasin och övre änden av sträckan A tomt magasin. Man har då fått ett diagram, i vilket man vid den tidpunkt, då vårflödet börjar för olika magasinsfyllnader, kan avläsa risken för överrinning under förutsättning, att ingenting tappas ur magasinet under vårfloden. För magasin A är exempelvis vid 44 Mm^3 magasinsfyllnad överrinningsrisken 25 %.

Om man tar ut en punkt med samma varaktighet (samma x-värde) i de tre fördelningskurvorna för A, B och C och avläser motsvarande magasinsfyllnader, så har man fått fram tre magasins-

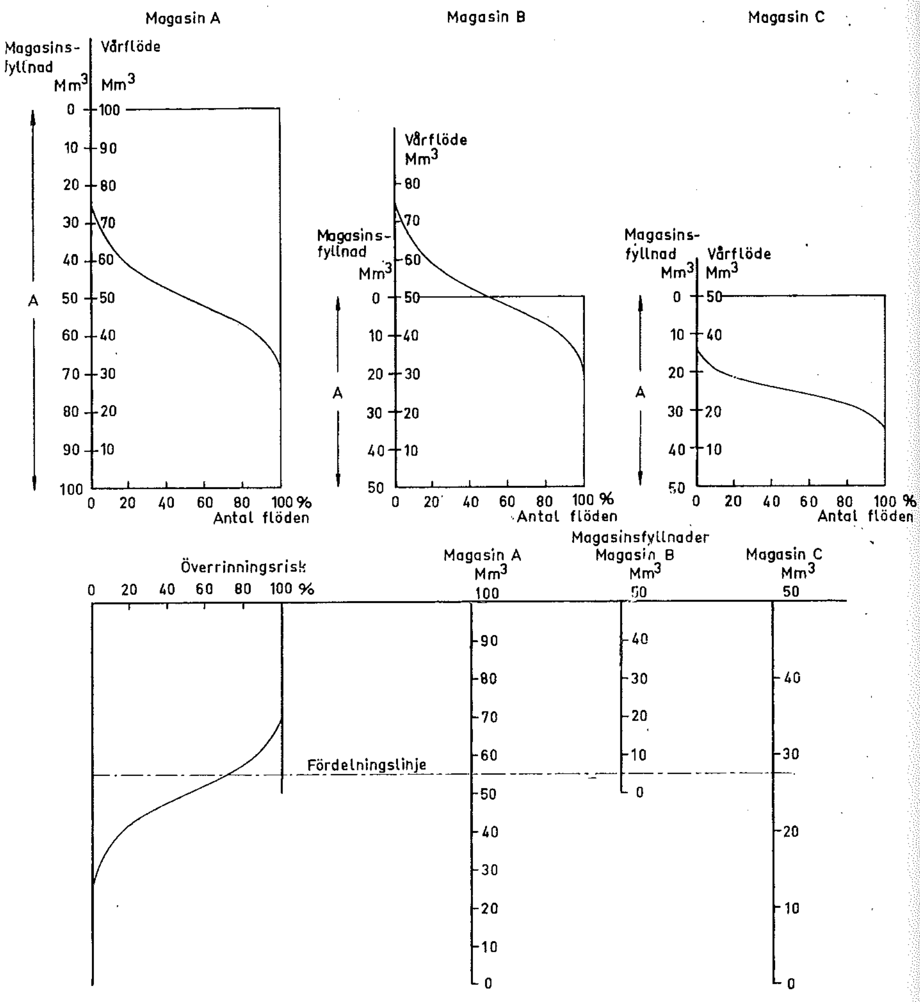

Fig. 5.

fyllnader, en för varje magasin, som ha samma överrinningsrisk. Nedre delen av fig. 5 avser att förenkla bestämningen av magasinsfyllnader med samma överrinningsrisk. Skalorna efter y-axeln i den övre delen av fig. 5 ha ändrats så, att man för alla tre magasinen får en och samma fördelningskurva. Denna för alla tre magasinen

gemensamma fördelningskurva finnes till vänster i figuren och de tre magasinsfyllnadsskalorna till höger. Fördelningskurvan och skalorna ha vänts upp och ned, och fullt magasin ligger för alla tre magasinen på x-axeln. Man har nu fått den förenklingen, att man endast behöver lägga en horisontell linje över de tre skalorna för att få fram tre magasinsfyllnader med samma överrinningsrisk och därmed en riktig fyllnadsfördelning. En dylik horisontell linje kallas nedan för en *fördelningslinje* och ett diagram sådant som nedre delen av fig. 5 för ett *fördelningsdiagram*.

Vid bestämningen av fördelningskurvan för storleken av vårflödena bör man från nyttiga tillrinningen till magasinet under vårfloden dra minimitappningen från magasinet, om denna icke är lika med noll. Man måste vidare bestämma en tidpunkt, då vårflödet börjar och slutar. Man torde kunna räkna med att det börjar och slutar, då nyttiga tillrinningarna vid kraftverken ge en totalproduktion, som är lika med den belastning, som man har vid vårflödets början och slut. I inget vattendrag får dock vårflödet anses börja senare än då nyttiga tillrinningen vid kraftverken kommit upp till, och sluta, förrän den gått ned till utbyggnadsvattenföringen.

Om man på ovan angivet sätt räknar fram ett fördelningsdiagram för det fallet, att magasinen ligga i olika flodsystem, kan man få in vissa mindre fel, som man ej har, om diagrammet endast omfattar magasin inom ett flodsystem.

Man bör kunna få fram riktigare och noggrannare metoder än den ovan angivna för att bestämma magasinsfyllnadsfördelningen, och man bör kunna korrigera den exempelvis för att vårfloden inträder vid något olika tidpunkter i olika områden, för olika stora snömagasin och för olika långt framskriden snösmältning inom olika områden. För att i möjligaste mån förenkla framställningen nedan räkna vid med att vi för alla parallellkopplade magasin, även de som ligga i olika vattendrag, ha ett fördelningsdiagram uppbyggt på samma sätt som diagrammet i nedre delen av fig. 5 med en skala för varje magasin, och att vi under hela flödet ur detta diagram med en för alla skalorna gemensam fördelningslinje kunna bestämma den med hänsyn till överrinningsrisken riktiga fyllnadsfördelningen.

Magasinen seriekopplade

Magasinen äro seriekopplade, om de ligga efter varandra, så att man kan tappa vattnet från det ena magasinet till det andra. Av två seriekopplade magasin får det ovanför liggande icke tappas ned så långt, att det finnes någon risk för att det nedanför liggande magasinet blir fullt utan att det ovanför liggande blir fullt.

Följer man denna regel behärskar man tappningen från det nedersta magasinet, ända tills alla magasinen äro fulla. Seriekopplade magasin betraktas därför nedan som ett enda magasin.

Har man två seriekopplade magasin, och har det nedanför liggande magasinet en proportionsvis stor separat tillrinning, kan man komma i det läget, att det nedre magasinet blir tomt, och att man sedan måste tappa ned det övre magasinet mer än som är riktigt enligt nyssnämnda regel. Man kommer då tillbaka till förhållandet vid parallellkopplade magasin. Man får blott det speciella förhållandet, att tappningen från det övre magasinet går genom det nedre.

b. Fördelningen av tappningen på de olika magasinen

Tappningen bör fördelas på de olika magasinen så, att man så långt det är möjligt går mot den riktiga fördelningen av magasinsfyllnaden och så, att man om möjligt behåller denna, om den uppnåtts.

Om alla magasinen ligga i ett vattendrag, bestämmes tappningsfördelningen på följande sätt. I fördelningsdiagrammet inlägges på lämplig höjd en fördelningslinje. Från magasin, som ligga ovanför fördelningslinjen, skall största tillåtna vattenföring tappas, och från magasin, som ligga under linjen, skall minsta tillåtna vattenföring tappas. Man får minst ett magasin, som ligger på linjen. Från det eller de magasin, som ligga på fördelningslinjen, tappas så mycket, att man får den önskade tillrinningen vid kraftverken. Har man flera magasin, som ligga på fördelningslinjen, skall tappningen om möjligt fördelas mellan dem så, att de ligga kvar på en gemensam fördelningslinje. Kan man med det valda läget för fördelningslinjen icke komma ned till den önskade tillrinningen vid kraftverken, får man flytta fördelningslinjen uppåt och tvärtom.

Har man kraftverk i flera vattendrag, måste tappningen i den mån det är möjligt läggas så, att

1. tillrinningen vid kraftverken icke överstiger utbyggnadsvattenföringen och

2. tillrinningen vid kraftverken icke underskrider den minsta tillåtna vattenföringen. (Det kan eventuellt finnas ett annat ställe i huvudfåran, där viss minimivattenföring skall hållas.)

Dessa båda punkter medföra, att man icke kan använda en gemensam fördelningslinje för alla vattendragen. En gemensam fördelningslinje kan endast användas för en del av dem. Man får vattendragen uppdelade i följande fyra grupper, inom vilka tappningen bestämmes på nedan angivet sätt.

1. Vattendrag för vilka den gemensamma fördelningslinjen kan användas. Tappningen från magasinen inom gruppen bestämmes av den gemensamma fördelningslinjen på ovan angivet sätt. Detta ger en vattenföring vid kraftverken, som icke överskrider utbyggnadsvattenföringen och icke underskrider minsta tillåtna vattenföringen.

2. Vattendrag där överrinning erhålles vid kraftverken, om tappningen bestämmes av den gemensamma fördelningslinjen. I dessa vattendrag tappas totalt så mycket, att man får fullt vatten vid kraftverken. Tappningen fördelas mellan de olika magasinen i vattendragen på ovan angivet sätt med en för varje vattendrag speciell fördelningslinje.

3. Vattendrag där minimivattenföringen vid kraftverken underskrides, om tappningen bestämmes av den gemensamma fördelningslinjen. I dessa vattendrag tappas totalt så mycket, att man får minimivattenföringen vid kraftverken. Tappningen fördelas mellan de olika magasinen i vattendragen med en för varje vattendrag speciell fördelningslinje.

4. Vattendrag där tillrinningen nedanför magasinen är så stor, att man får överrinning vid kraftverken, även om man har minimitappning från alla magasinen. I dessa vattendrag tappas minimitappning från alla magasinen.

Ovanstående tappningsfördelning bör användas under flödestid, då det är fråga om att få möjligast riktig fyllnadsfördelning för att i den mån det låter sig göra undvika överrinning eller hålla ned omfattingen av överrinningen, om den ej kan undvikas. Under hela tömningsperioden finnes ingen nämnvärd risk för överrinning. Under hela tömningsperioden behöver man därför endast inrikta sig på att få en riktig fyllnadsfördelning vid den tidpunkt, då vårflödet inträder.

Vårflödet börjar emellertid olika år vid något olika tidpunkter. Man måste därför alltid fördela magasinsfyllnaden mellan de olika magasinen så, att man kan få planenlig totalproduktion från vattenkraftverken, även om vårflödet skulle börja vid en mycket sen tidpunkt. (Man kan vid en fördelning enligt a ovan få hela magasinsfyllnaden koncentrerad till ett fåtal magasin med hög regleringsgrad. Det är från kraftverken nedanför dessa magasin, som man skall ha ut så gott som hela vattenkraftproduktionen, och deras effekt kan vara otillräcklig härför.) Om vårfloden kommer tidigt, måste man därför oftast ha en fyllnadsfördelning, som avviker något från den under a angivna. Vi skola icke närmare ingå härpå. Det bör emellertid vara möjligt att för hela den senare delen av tömningsperioden bestämma magasinsfyllnads- och tappningsfördelningar, som utan att medföra onödiga förluster medge planenlig vattenkraftproduktion fram till vårflodens början, även om denna inträffar sent.

Då vårfloden inträder, bör man som regel ha kommit fram till rätt magasinsfyllnadsfördelning. Denna består, om vårfloden börjar sent, i att alla magasinen, oberoende av i vilket vattendrag de ligga, samlats på en enda fördelningslinje. Ett undantag utgöra de magasin, vilkas nedre magasinsgräns ligger ovanför fördelningslinjen. För att fyllnadsfördelningen skall vara riktig, skola dessa magasin vara tomma. (Det är dessa magasin, som i första hand rinna över under vårflödet. Under vårflödet komma de eller åtminstone vissa av dem att ligga över fördelningslinjen och att maximitappas för att undvika eller hålla ned överrinningen.)

Det kan tänkas, att ett magasin med mycket hög regleringsgrad tappas ned så långt under ett vattenbristår, att man icke får upp det till fördelningslinjen under hela nästföljande år. Det har då fel magasinsfyllnad, då vårfloden inträder. Det kan även tänkas, att ett magasin är så stort, att det icke är magasinsfyllnaden, som bestämmer huru mycket man kan ta ut ur magasinet, utan i stället utbyggnadsvattenföringen hos de nedanför liggande vattenkraftverken. Man kan även i detta fall komma till fel fyllnad i magasinet, då vårfloden inträder. Fallen torde vara så pass sällsynta, att de här kunna lämnas ur räkningen.

Vi förutsätta således, att vi för varje total magasinsfyllnad ha en bestämd magasinsfyllnadsfördelning, då vårfloden börjar. Börjar den sent, bestämmes fördelningen av fördelningslinjen i fördelningsdiagrammet. Börjar den tidigare, är denna fördelning något modifierad på grund av hänsyn till produktionen fram till en sen vårflod.

Det bör kanske framhållas, att ovanstående närmast är ett sätt att räkna för att bestämma överrinningarnas storlek. Om man direkt skulle tappa enligt beräkningarna, skulle man få mycket snabba och stora ändringar i tappningarna, då ett magasin blir fullt. I verkligheten torde det vara möjligt att en tid i förväg bedöma, om ett magasin rinner över eller ej, och jämna till tappningen så, att man icke får alltför höga och kortvariga toppar i vattenföringarna.

c. Totala vattenkraftproduktionens storlek

Vattenkraftverkens totalverkningsgrad har förutsatts vara konstant. Man kan då tillmäta vattenkraftverken så stora bruttofallhöjder, att verkningsgraden blir densamma för alla vattenkraftverken. Denna för alla vattenkraftverken gemensamma totalverkningsgrad kalla vi η_0. Naturenergien W kan då användas som en gemensam måttenhet för magasinsfyllnaden i alla magasinen.

Totala vattenkraftproduktionen bestämmes av tidpunkten på året och vattensituationen. Med de förutsättningar, som ovan gjorts, bestämmes vattensituationen av magasinsfyllnaderna i de olika magasinen eller med andra ord av totala magasinsfyllnaden och magasinsfyllnadsfördelningen.

Då vårfloden börjar, är enligt vad som sagts under b ovan magasinsfyllnadsfördelningen bestämd, så snart man känner totala magasinsfyllnaden. *Då vårfloden börjar, bestämmes således vattensituationen entydigt av totala magasinsinnehållet.*

Man kan utan överrinning under tömningsperioden komma fram till riktig magasinsfyllnadsfördelning vid dess slut. Under tömningsperioden är därför resultatet av körningen oberoende av magasinsfyllnadsfördelningen och *vattensituationen bestämmes därför även under hela tömningsperioden entydigt av totala magasinsinnehållet.*

Under fyllnadsperioden är magasinssituationen mera oklar. Exempelvis är magasinsfyllnaden i sådana magasin, som bli fulla varje år, utan betydelse för vattensituationen. Magasinen följas emellertid i stort sett åt, och man torde därför utan alltför stora fel även under fyllnadsperioden kunna bestämma vattensituationen ur totala magasinsfyllnaden.

Man kommer således till att vattensituationen entydigt bestämmes av totala magasinsfyllnaden i kWh naturenergi. *Man kan således göra upp en tappningsplan, med vilken man ur tidpunkten på året och totala magasinsfyllnaden kan bestämma totala vattenkraftproduktionen.* Då totala produktionen är bestämd och dessutom fördelningen av tappningen på olika flodsystem och olika magasin är bestämd enligt b, är därmed hela körningen bestämd.

Problemet är därmed i stort sett återfört till problemet under II c, och tappningsplanen får samma uppbyggnad som den där angivna planen. Magasinsfyllnaden och vattenföringen vid kraftverket under II c ersättes av totala magasinsfyllnaden i kWh naturenergi resp. summan av vattenföringarna vid kraftverken omräknade i kW natureffekt. Under II c måste man räkna fram magasinsfyllnaden i och tappningen ur magasinet. Här får man steg för steg räkna fram magasinsfyllnaden i och tappningen ur alla magasinen. Detta måste man i första hand göra för att för magasin efter magasin kunna bestämma överrinningen. Hela detta räknearbete bör det vara möjligt att genomföra med en stor räknemaskin. Denna måste emellertid kunna ta emot ett mycket omfattande statistiskt material.

Med en dylik räknemaskin kan man dels kontrollera en tappningsplan och passa sig fram till en riktig plan, dels sedan denna är uppgjord beräkna priset på sista kWh k_o.

Ovan har förutsatts, att vattenkraftverken i ett vattendrag ha samma utbyggnadsvattenföring och att det icke finnes någon mellantillrinning mellan dem. Då kraftverken ligga spridda ut över flodsystemen, kan man med hjälp av nedanstående formler få en viss uppfattning om huru detta påverkar tappningarna.

Vi införa begreppet *vattenvärde* och förstå därmed *värdet i öre/kWh naturenergi av en liten ökning av tappningen.*

För ett vattenkraftverk få vi då från priset på sista kWh k_o och ovannämnda för alla vattenkraftverken gemensamma totalverkningsgrad η_o fram ett vattenvärde $\varkappa_o$ ur ekvationen:

$$\varkappa_o = \eta_o \cdot k_o \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad (4)$$

Denna ekvation gäller tydligen endast så länge vattenkraftverket icke har överrinning och icke går med full effekt. Har kraftverket överrinning blir:

$$\varkappa_o = 0$$

(eller noga räknat något negativt på grund av ökat bakvatten). Har kraftverket full effekt utan överrinning blir:

$$0 \leqq \varkappa_o \leqq \eta_o \cdot k_o$$

Man kan även få fram vattenvärdet för ett magasin. Under tömningsperioden, då man kan förutsätta, att inget kraftverk nedanför magasinet har fullt vatten, och då man väl icke heller behöver förutsätta några maximi- eller minimitappningar, fås vattenvärdet i magasinet ur nyss angivna ekvation (4):

$$\varkappa_o = \eta_o \cdot k_o$$

Mera komplicerat är det att bestämma vattenvärdet under ett flöde. Det förutsättes, att magasinet i fråga med förhandenvarande magasinsfyllnader av totalt m år före flödets slut icke rinner över p år och rinner över $(m-p)$ år. För det n:te av de p år, som magasinet icke rinner över, är kraftvärdet under den följande tömningsperioden k_{on}. Man får då vattenvärdet vid den ifrågavarande tidpunkten under flödet $\varkappa_o$ ur formeln:

$$\varkappa_o = \eta_o \frac{\sum\limits_{1-p} k_{on}}{m} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad (5)$$

(Jämför B V b och bil. 4.)

Ligga vattenkraftverken utströdda över flodområdet, så kommer man ofta därhän, att vissa kraftverk ha överrinning, medan andra icke ha fullt vatten. Har man nedanför det ifrågavarande magasinet överrinning på fallhöjden h_1 av totala fallhöjden h, blir tydligen vattenvärdet i magasinet framräknat ur det förhandenvarande priset på sista kWh k_o och kraftverkens körning:

$$\varkappa_o = \eta_o \frac{h - h_1}{h} k_o \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad (6)$$

Om $h_1 = 0$, övergår tydligen formeln i formel (4).

Man bör tydligen tappa så, att formlerna (5) och (6) ge samma värde å $\varkappa_o$. Nu kan emellertid värdet ur formel (5) bli högre än värdet ur formel (6), även om man går ned till minimitappning. Man skall då hålla minimitappning. Skulle värdet ur formel (5) bli lägre än värdet ur formel (6), även om man går upp till maximitappning, skall man hålla maximitappning. I båda fallen är det formel (5), som bestämmer vattenvärdet i magasinet.

Om man har kraftverken utspridda över flodsystemen, bör tappningsfördelningen enligt b ovan göras med hänsyn till kraftverken i vattendragets huvudfåra. Göres den så, torde justeringarna enligt formlerna (5) och (6) icke märkbart påverka tappningsplanen och prisbildningen.

B. KORREKTIONER FÖR APPROXIMATIONERNA I DEN PRELIMINÄRA TAPPNINGSPLANEN

I. Allmänt

För att få fram den preliminära tappningsplanen och priset k_o på sista kWh ha de under A I angivna approximationerna gjorts. Den preliminära tappningsplanen och priset k_o bestämmas utom av de hydrologiska förhållandena av prima-, minimi- och sekundavattenföringarna samt ångkraft- och sekundakraftpriserna. Nedanstående går ut på att i den mån det är möjligt eliminera inverkan av approximationerna genom att räkna fram riktigare värden å nyssnämnda tre vattenföringar och två kraftpriser överförda till naturenergipriser. Från dessa riktigare utgångsvärden beräknas en definitiv tappningsplan med de under A angivna metoderna oförändrade.

Den preliminära planen leder fram till ett pris på sista kWh k_o, som är konstant under veckan. Då man har variabel belastning, får man ett pris på sista kWh k, som varierar under veckan. Nedan anges även huru detta variabla pris k kan räknas fram. Vidare lämnas vissa synpunkter på tappningsfördelning.

II. Korrektioner i utgångsvärdena för den preliminära tappningsplanen

a. Korrektioner i primabelastning, ångkraftproduktion och sekundabelastning

Vid uppgörandet av den preliminära tappningsplanen har förutsatts, att vattenkraftverkens effekt är större än den sammanlagda prima- och sekundabelastningen. Om man tar hänsyn till dygnsvariationerna i belastningen, finner man oftast att redan de högsta primabelastningarna överskrida vattenkraftverkens effekt. Möjligheterna att leverera sekundakraft inskränkas i regel avsevärt av vattenkraftverkens begränsade effekt.

Man måste därför vidtaga följande åtgärder:

1. Vid bestämning av den primabelastning, som man skall räkna med vid uppgörandet av den definitiva tappningsplanen, bör man endast ta med den del av den verkliga primabelastningen, som ligger inom vattenkraftverkens effekt.

2. Vid bestämningen av den största ångenergikvantiteten per vecka för den definitiva planen bör man från den verkliga ångproduktionen dra den del av primabelastningen, som enligt 1 icke kan täckas med vattenkraft utan alltid måste täckas med ångkraft.

3. Vid bestämning av sekundabelastningen skall man endast ta med den sekundabelastning, som med primabelastningen i botten ligger inom vattenkraftverkens effekt.

Det kan vidare förekomma, att ångkraftverkens effekt är så stor, att man icke kan fullbelasta dem nattetid därför att ångeffekten är större än nattbelastningen minskad med den minsta produktion, som man kan komma ned till i vattenkraftverken. Man får då göra en motsvarande reduktion, då man bestämmer den största ångenergiproduktionen per vecka. Ångkraftproduktionen bör även reduceras med hänsyn till nödvändiga avställningar för tillsyn och mindre revideringar. Detta motsvarar ungefär stopp under var eller varannan söndag.

b. Bestämning av prima-, minimi- och sekundavattenföringarna

Vid uppgörandet av den preliminära tappningsplanen räknar man om belastningarna i vattenföringar under antagande av att vattenkraftverkens totalverkningsgrad är konstant. I verkligheten är verkningsgraden lägre ju större den avgivna effekten är och ju större korttidsreglering man gör. Felen som uppstå härigenom torde man kunna minska avsevärt på följande sätt.

För alla vattenkraftverken sammantagna uppritas en kurva över avgiven effekt som funktion av tillförd effekt vid en ungefärlig fördelning av belastningen mellan verken och en genomsnittlig avsänkning av korttidsmagasinen. Se *fig. 6 a.* På samma x-axel som nyssnämnda kurva uppritas primabelastningskurvan modifierad en-

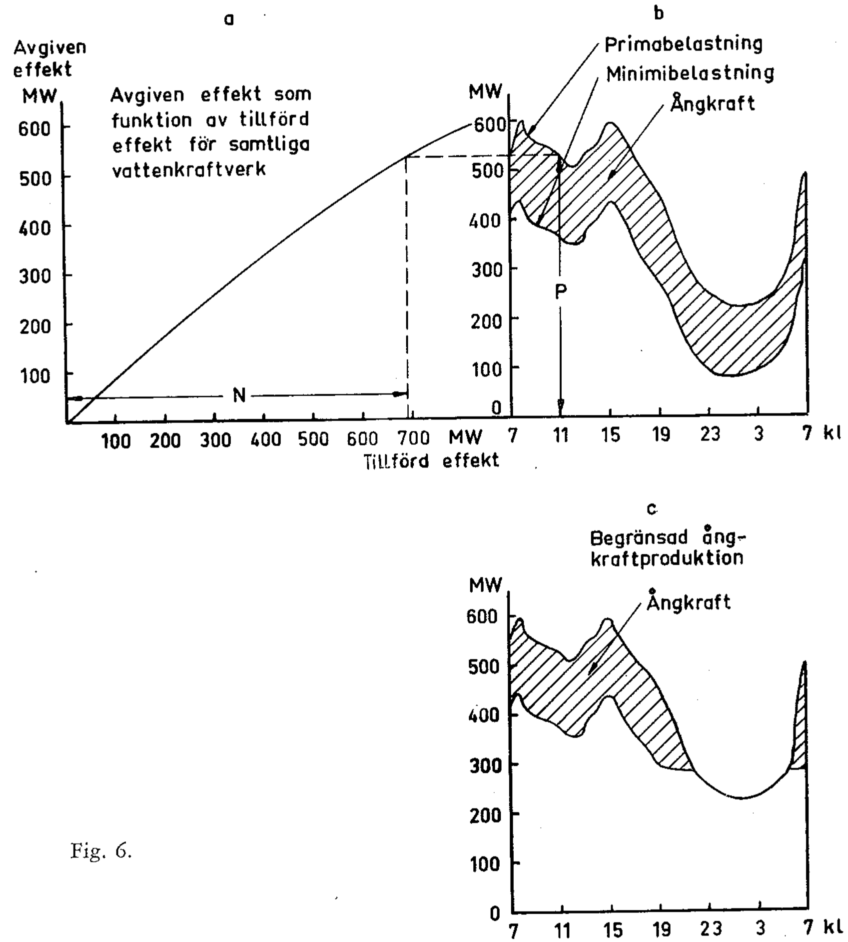

Fig. 6.

ligt a ovan. Se *fig. 6 b.* Man kan då, på det sätt som fig. 6 a och b antyder, för tidpunkt efter tidpunkt bestämma den mot primabelastningen *P* svarande natureffekten *N*. Härur får man fram ett medelvärde för natureffekten under veckan. Man är därmed framme vid primavattenföringen mätt i natureffekt, och det är denna primavattenföring, som skall användas vid uppgörandet av den definitiva tappningsplanen.

Vid full ångkörning gå ångkraftverken fullbelastade veckan runt med de under a ovan angivna undantagen. Ångkraftverkens belastningskurva är sålunda känd och genom att dra denna kurva från primabelastningskurvan får man minimibelastningskurvan för vattenkraftverken. Se fig. 6 b, där den streckade ytan motsvarar ångkraften. Ur denna kurva får man med hjälp av kurvan i fig. 6 a fram minimivattenföringen.

Om magasinsfyllnadskurvan följer gränskurvan för minimizonen, får man en begränsad ångkörning, och man måste således även bestämma de ångenergikvantiteter, som motsvara olika vattenföringar. Vid begränsad ångkörning måste belastningsvariationerna delas upp mellan vatten- och ångkraftverken enligt publ. 400. *Fig. 6 c* visar en uppdelning, som förutsätter enbart dagdrift av ångkraftverken. Man får utgå från en viss ångenergiproduktion per vecka, dela upp belastningen mellan ång- och vattenkraftverken samt bestämma vattenföringen ur belastningskurvan för vattenkraftverken. Man får på så sätt fram en vattenföring och motsvarande ångkraftproduktion per vecka.

Primabelastningen innefattar förlusterna i överföringssystemet. Då ångkraftverken i allmänhet äro gynnsamt placerade ur förlustsynpunkt, blir minskningen i primabelastningen större än ångeffekten. Man bör ta hänsyn härtill vid bestämning av de ångkraftproduktioner, som motsvara olika vattenföringar.

På motsvarande sätt kan man bestämma sekundavattenföringen och de begränsade sekundabelastningar, som motsvara olika vattenföringar. Härvid bör beaktas, att belastningsökningen i vattenkraftverken är större än sekundabelastningen.

c. Övergången till och från ångkraftproduktion

Värderingen av kraften i en viss punkt i tappningsplanen baseras på verkan av en liten belastningsökning i punkten i fråga. En liten ökning av belastningen tas upp av vattenkraftverken och resulterar i en liten minskning i totala magasinsfyllnaden och därmed i en liten sänkning av magasinsfyllnadskurvorna genom den ifrågavarande punkten i tappningsplanen. För en magasinsfyllnadskurva, som sedan från primazonen går ned till gränskurvan för minimizonen, medför den lilla sänkningen av fyllnadskurvan, att denna kommer ned till gränskurvan en liten tid Δt tidigare. Man får då en förlängning Δt av körningstiden för ångkraftverken men däremot ingen ökning av belastningen på dem. Skär fyllnadskurvan gränskurvan, får man full ångkörning under tiden Δt. Går däremot fyllnadskurvan ned till gränskurvan för att sedan följa den, får man en begränsad ångkraftproduktion under tiden Δt. Går fyllnadskurvan från minimizonen upp till gränskurvan, når den denna tiden Δt senare. Skära kurvorna varandra, förlänges ångkörningen med tiden Δt, och man får även nu full ångkörning under tiden Δt. Går fyllnadskurvan upp till gränskurvan för att sedan följa den, får man en ökning av ångkraftkörningen under tiden Δt.

Då en fyllnadskurva, som sänkts ned ett litet stycke, passerar gränskurvan för minimizonen, får man en minskning $\Delta W_å$ av den naturenergi, som tillföres vattenkraftverken och en motsvarande ökning $\Delta Å$ av ångkraftverkens produktion av elektrisk energi. Det är här fråga om att bestämma kostnaden för $\Delta W_å$ ur kostnaden för $\Delta Å$.

På grund av de stora avstånden mellan långtidsmagasinen och huvudparten av vattenkraftverken kommer en tappningsändring att jämnas ut över veckan, innan den kommer ned till vattenkraftverken, och övergången får därför räknas för hela veckan.

Storleken av $\Delta Å$ för ett visst värde å $\Delta W_å$ erhålles direkt ur det enligt b ovan bestämda sambandet mellan vattenföring och ångenergi per vecka.

Ångeffekten är oftast sammansatt av kraften från ett flertal verk vart och ett oftast med flera aggregat. De olika verken och många gånger även de olika aggregaten ha olika ekonomi. Om man ordnar aggregaten efter ekonomi, får man en kurva för rörliga kostnaden för ångkraften i öre/kWh för tillkommande effekt som funktion av totala utnyttjade ångeffekten sådan som *fig.* 7 visar. Man torde böra ställa in sig på att normalt icke utnyttja aggregaten med den sämsta ekonomien utan betrakta dem som en reserv, som endast kommer till användning vid fel å något av de bättre aggregaten. Man kan då som fig. 7 visar skära bort översta delen av kurvan med en vertikal linje.

Ur de belastningsdiagram, som man måste göra upp enligt b ovan, får man fram var på kurvan i fig. 7 de ångeffekter ligga, som tas i anspråk under tiden Δt. Man kan då få fram ett medelvärde i öre/kWh för kostnaden $k_å$ för ångkraften $\Delta Å$. Vid bestämningen av $k_å$ bör man även ta hänsyn till avställningskostnaderna, om ångkraftverken icke gå med full effekt hela veckan.

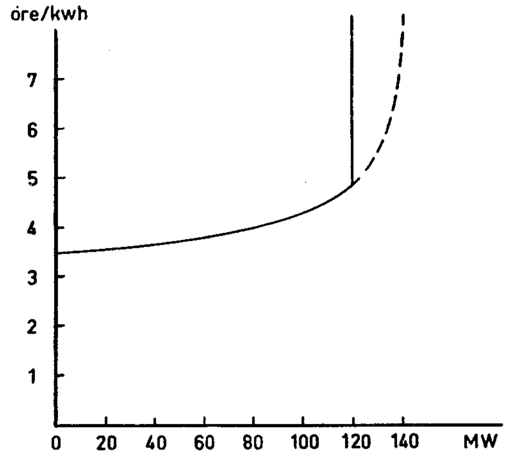

Fig. 7. Rörlig kostnad för ångkraft.

Vi införa beteckningen $\eta_{vå}$ bestämd av att:

$$\eta_{vå} = \frac{\Delta Å}{\Delta W_å}$$

Vi förutsätta först, att vi endast ha ett vattenkraftverk. Vattenvärdet å den där inbesparade naturenergien genom ökningen i ångkraftproduktionen betecknas med $\varkappa_å$, och man får då:

$$\Delta W_å \cdot \varkappa_å = \Delta Å \cdot k_å$$

$$\varkappa_å = \eta_{vå} \cdot k_å \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad (7)$$

Om man har flera vattenkraftverk, så får man som framgår av B III olika vattenvärden för de olika verken. Om man med $\varkappa_{åM}$ betecknar ett genomsnittligt vattenvärde för den i samtliga vattenkraftverk inbesparade naturenergikvantiteten $\Delta W_å$, får man:

$$\Delta W_å \cdot \varkappa_{åM} = \Delta Å \cdot k_å$$

$$\varkappa_{åM} = \eta_{vå} \cdot k_å \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad (8)$$

Man kan knappast bestämma värdena å $\eta_{vå}$, $k_å$, $\varkappa_å$ resp. $\varkappa_{åM}$ för övergång efter övergång, utan det torde vara nödvändigt att mera bedömningsvis direkt få fram medelvärden å de nämnda storheterna. Nedan förstås med $\eta_{vå}$, $k_å$, $\varkappa_å$ resp. $\varkappa_{åM}$ medelvärden för de olika övergångarna, och det förutsättes, att man kan räkna med medelvärden.

Den omständigheten, att man enligt kurvan i fig. 7 har olika värden å den rörliga kostnaden för ångkraften för olika verk och aggregat, medför strängt taget att gränskurvan för minimizonen borde delas upp i en kurvskara. Här finnes således en approximation i den preliminära planen, som det icke finnes någon möjlighet att rätta till.

Om man har stora prisskillnader mellan olika delar av ångkraften, borde det vara genomförbart att räkna med två gränskurvor mellan prima- och minimizonen med var sitt värde å $\eta_{vå}$, $k_å$ och $\varkappa_å$ resp. $\varkappa_{åM}$. Uppdelningen medför att bestämningen av dessa medelvärden underlättas och blir säkrare.

d. Övergången till och från sekundakraftproduktion

På samma sätt som en liten sänkning av en magasinsfyllnadskurva resulterar i en ökning i ångkraftproduktionen, om kurvan går till gränskurvan för minimizonen, resulterar den i en minskning ΔS av sekundakraftproduktionen, om fyllnadskurvan går till gränskurvan för sekundazonen.

Även då det är fråga om sekundakraften, torde man icke ha ett utan flera olika priser. Det är ångpannebelastningen, som är den dominerande sekundabelastningen, och det pris den betalar är relativt enhetligt. Man får en kurva för priset i öre/kWh för tillkommande sekunda belastning som funktion av totala sekunda belastningen sådan som *fig. 8* visar. Kurvan bör med hänsyn till vad som nyss sagts till större delen vara ganska flack.

På samma sätt som vid övergången till och från ångkraftproduktion kan man bestämma minskningen ΔW_s i naturenergi, som tillföres vattenkraftverken och den däremot svarande minskningen ΔS i sekundakraftproduktion samt kostnaden k_s i öre/kWh för minskningen.

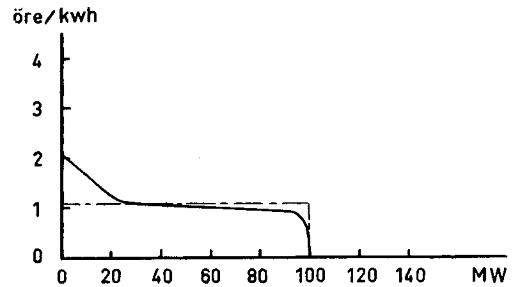

Fig. 8. Pris på sekundakraft.

Sätt

$$\eta_{vs} = \frac{\Delta S}{\Delta W_s}$$

Sättes vattenvärdet å ΔW_s, då man har ett vattenkraftverk, lika med $\varkappa_s$ fås:

$$\varkappa_s = \eta_{vs} \cdot k_s \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad (9)$$

Har man flera vattenkraftverk, kan man sätta:

$$\varkappa_{sM} = \eta_{vs} \cdot k_s \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad (10)$$

III. Sambandet mellan nätets pris på sista kWh och vattenvärdet för ett vattenkraftverk vid variabel belastning

Belastningen å vattenkraftverket förutsättes vara variabel, och hänsyn tages till variationen i vattenkraftverkets verkningsgrad.

I kraftverket i fråga göra vi en liten belastningsökning. För att få en motsvarande ökning i vattenkraftverkets produktion ökas med hjälp av långtidsmagasinen tillrinningen till kraftverkets korttidsmagasin med Δq. Då långtidsmagasinen förutsättas ligga så långt ovanför kraftverket, att de icke kunna användas för någon som helst korttidsreglering, får Δq förutsättas vara jämnt fördelad över korttidsregleringsperioden, veckan.

(Beträffande nedanstående beräkningar se även publ. 400 sid. 11—14.)

Om kraftverkets körning är fri, kan då samtidigt vattenframsläppningen Q genom kraftverket ökas med $\Delta Q = \Delta q$. Mot Q svarar i kraftverket natureffekten N, och mot ΔQ svarar ΔN.

Är kraftverkets avgivna effekt P och totala förluster F, och medför ökningen ΔN en ökning av den avgivna effekten med ΔP och av de totala förlusterna med ΔF, får man:

$$\Delta N = \Delta P + \Delta F$$

$$\Delta N = \left(1 + \frac{\delta F}{\delta P}\right) \Delta P$$

Sätter man:
$$\alpha = 1 + \frac{\delta F}{\delta P}$$
får man:
$$\triangle P = \frac{1}{\alpha} \triangle N$$

Sträcker sig korttidsregleringsperioden, veckan, från t_a till t_b, och är dess längd T samt nätets pris på sista kWh k, så får man för hela veckan
värdet av ökningen i tillrinningen lika med:
$$\int_{t_a}^{t_b} k \cdot \triangle P \, dt = \int_{t_a}^{t_b} k \frac{1}{\alpha} \triangle N \, dt = \triangle N \int_{t_a}^{t_b} \frac{k}{\alpha} dt$$
och naturenergien genom ökningen i tillrinningen lika med $T \Delta N$.

Vattenvärdet $\varkappa$ blir då:
$$\varkappa = \frac{\triangle N \int_{t_a}^{t_b} \frac{k}{\alpha} dt}{T \cdot \triangle N}$$
$$\varkappa = \frac{1}{T} \int_{t_a}^{t_b} \frac{k}{\alpha} dt \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad (11)$$

Denna formel säger tydligen, att *kraftverkets vattenvärde är lika med medelvärdet av* $\frac{k}{\alpha}$ *under veckan.*

För kraftverkets pris på sista kWh K i tidpunkten t gäller (se publ. 400, sid. 14):
$$K = K_2 \frac{\alpha}{\alpha_2} e^{\int_t^{t_2} \beta dt}$$
där K_2 och α_2 är värdet av K resp. α i tidpunkten t_2.

Om kraftverkets körning är riktig, vilket nedan förutsättes vara fallet, är:
$$k = K \text{ och } k_2 = K_2$$
och man får:
$$\frac{k}{\alpha} = \frac{k_2}{\alpha_2} e^{\int_t^{t_2} \beta dt}$$

Väljes tidpunkten t_2 lika med den tidpunkt t_b då korttidsregleringsperioden, veckan, slutar får man:
$$\frac{k}{\alpha} = \frac{k_b}{\alpha_b} e^{\int_t^{t_b} \beta dt}$$

$\frac{k_b}{\alpha_b}$ är konstant och uttrycket $e^{\int_t^{t_b} \beta dt}$ är tydligen $= 1$ vid korttidsregleringsperiodens slut och växer till ett värde något större än 1 vid regleringsperiodens början. Tillväxten är i regel rätt regelbunden och rätt måttlig. Detsamma gäller då den tillväxt, som $\frac{k}{\alpha}$ undergår under veckan, och detta gör, att man som regel kan beräkna $\varkappa$ som medelvärdet av $\frac{k}{\alpha}$ för några få tidpunkter jämnt fördelade över veckan.

Kan man försumma avsänkningen av korttidsmagasinet blir $\beta = 0$, och man får:
$$\frac{k}{\alpha} = \frac{k_b}{\alpha_b}$$

Ovanstående gäller för ett kraftverk, som kör veckoreglering och alltid har fri körning.

För ett kraftverk med fri körning, som kör dygnsreglering, kan man också beräkna $\varkappa$ som ett medelvärde för $\frac{k}{\alpha}$ för några tidpunkter jämnt fördelade över de olika regleringsperioderna och över veckan.

Vid kraftverk, som längre tider köra vid gränsvärden, får man strängt taget komplicerade formler för vattenvärdet. Om kraftverket har någotsånär stort magasin eller genomgående korttidsreglering, kan man räkna med medelvärdet av $\frac{k}{\alpha}$ för de tider, då kraftverkets körning är fri.

Har man ett kraftverk med goda korttidsregleringsmöjligheter, och ändrar sig priset på sista kWh avsevärt från dag till natt, från vardag till söndag, så kommer kraftverkets vattenvärde att ändra sig avsevärt med tillrinningen q till kraftverksmagasinet. Man får en kurva för sambandet mellan q och $\varkappa$ av det utseende som visas i *fig. 9*. Så länge tillrinningen är låg, kan kraften köras ut som vardagsdagkraft och vattenvärdet blir då högt, emedan kraftverket, då det har goda regleringsmöjligheter, icke gör några större förluster genom korttidsregleringen. Vattenvärdet sjunker sedan, då tillrinningen blir så stor, att billigare natt- och söndagskraft måste produceras. Då tillrinningen överstiger kraftverkets utbyggnadsvattenmängd, blir vattenvärdet tydligen noll eller noga räknat något negativt på grund av bakvatten.

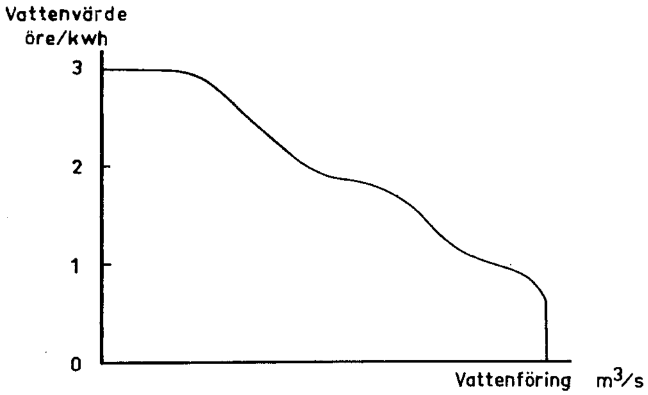

Fig. 9.

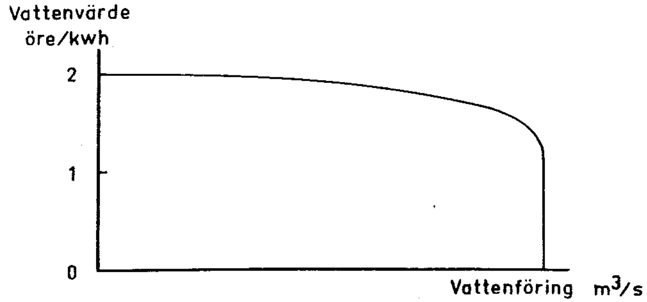

Fig. 10.

För ett strömkraftverk med jämn tillrinning blir tydligen

$$\varkappa = \frac{1}{\alpha} \cdot \text{medelvärdet av } k \text{ under veckan.}$$

Kurvan för $\varkappa$ som funktion av q får det utseende som *fig. 10* visar.

Om man känner belastningskurvan för ett vattenkraftverk med veckoreglering och fri körning under hela veckan, så kan man räkna fram ett relativvärde, som anger huru priset på sista kWh för kraftverket varierar under veckan. Man kan emellertid icke räkna fram något absolutvärde å priset på sista kWh. Relativvärdet beteckna vi med g, och vi bestämma detta värde så, att medelvärdet för g under veckan är lika med 1. Vi få då fram numeriska värden å g för varje tidpunkt under veckan.

Priset på sista kWh kan man sätta:

$$k = C \cdot g \quad \dots\dots\dots\dots\dots \quad (12)$$

där C är en konstant.

För vattenvärdet enligt formel (11) får man:

$$\varkappa = \frac{1}{T}\int_{t_a}^{t_b} \frac{C \cdot g}{\alpha}\, dt = C\frac{1}{T}\int_{t_a}^{t_b} \frac{g}{\alpha}\, dt$$

$$\varkappa = C \cdot G \quad \dots\dots\dots\dots\dots \quad (13)$$

där

$$G = \frac{1}{T}\int_{t_a}^{t_b} \frac{g}{\alpha}\, dt \quad \dots\dots\dots\dots\dots \quad (14)$$

Om man som ovan förutsatts känner kraftverkets belastning, kan man räkna fram ett numeriskt värde å G.

g är närmast ett värde för nätet, medan man tydligen har olika värden å G för olika kraftverk.

Om man känner g, kan man även räkna fram G för kraftverk, som icke köra veckoreglering, och som tidvis icke ha fri körning.

I förlusterna F äro medtagna förlusterna fram till en viss punkt vid kraftverket. Ovanstående gäller under förutsättning att nätets pris på sista kWh k hänför sig till denna punkt. Har man nätets pris på sista kWh exempelvis i en för hela nätet gemensam referenspunkt, måste priset först räknas om till ovannämnda punkt invid kraftverket. Omräkningen sker enligt sid. 31 i publ. 400.

IV. Ett vattenkraftverk. Priset på sista kWh vid variabel belastning

Vi gå tillbaka till det fallet, att vi ha ett system med ett vattenkraftverk och ett långtidsmagasin. Vi skola bestämma priset på sista kWh k vid variabel belastning i kombination med variabel verkningsgrad hos vattenkraftverket.

Beräkningarna enligt B II genomföras. Man får därigenom fram prima-, minimi- och sekundavattenföringarna samt värden å $k_å$, k_s, $\eta_{vå}$ och η_{vs}.

På nedan närmare angivet sätt uppgöres en definitiv tappningsplan för systemet.

Vattenvärdet $\varkappa$, konstanten C och integralen G i en punkt a i denna tappningsplan betecknas med resp. $\varkappa_a$, C_a och G_a.

Punkten a i tappningsplanen kan anses representera en vecka. Tappningsplanen bestämmer tappningen under veckan, och då denna är känd erhålles enligt B II belastningskurvan för vattenkraftverket under veckan. Då denna är känd kan man bestämma g för olika tidpunkter under veckan och därur värdet å G_a för hela veckan. Nedanstående beräkningar gå ut på att bestämma C_a för veckan.

Man kan enligt ekvation (7) i tillägget till bil. 3 få en modifierad form å ekvation (3) under A II c. Om man beaktar att:

$\triangle W_a$ har värdet $\varkappa_a \triangle W_a$
$\triangle W_å$ " " $\varkappa_å \triangle W_å$
$\triangle W_s$ " " $\varkappa_s \triangle W_s$

får man tydligen:

$$m \cdot \varkappa_a \cdot \triangle W_a = \Sigma\varkappa_å \cdot \triangle W_å + \Sigma\varkappa_s \cdot \triangle W_s \quad \ldots \quad (15)$$

Enligt ekvation (13) under B III och ekvationerna (7) och (9) under B II är:

$$\varkappa_a = C_a \cdot G_a$$
$$\varkappa_å = \eta_{vå} \cdot k_å$$
$$\varkappa_s = \eta_{vs} \cdot k_s$$

Insättes dessa värden i ekvation (15) fås:

$$m \cdot C_a \cdot G_a \cdot \triangle W_a = \eta_{vå} \cdot k_å\, \Sigma\triangle W_å + \eta_{vs} \cdot k_s\, \Sigma\triangle W_s \quad \ldots \quad (16)$$

Ovannämnda definitiva tappningsplan uppgöres så, att man ur ekvation (3) under A II c får fram en ekvation med samma högra sida som ekvation (16). Den definitiva tappningsplanen uppgöres enligt A II c och baseras på

1. ovannämnda enligt B II beräknade värden å prima-, minimi- och sekundavattenföringarna
2. det enligt B II beräknade värdet å $k_å$
3. ett sekundakraftpris k'_s bestämt så att

$$k'_s = \frac{\eta_{vs}}{\eta_{vå}} k_s \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad (17)$$

där k_s samt $\eta_{vå}$ och η_{vs} bestämmas enligt B II.

Ekvation (3) får då följande form:

$$m \cdot k'_{oa} \triangle W_a = k_å\, \Sigma\triangle W_å + k'_s\, \Sigma\triangle W_s \quad \ldots\ldots \quad (18)$$

där k'_{oa} är priset på sista kWh med hänsyn tagen till det modifierade sekundakraftpriset k'_s. Med hjälp av ekvation (18) kan man bestämma värdet å k'_{oa}.

Insättes värdet å k'_s fås:

$$\eta_{vå} \cdot m \cdot k'_{oa} \triangle W_a = \eta_{vå} \cdot k_å\, \Sigma\triangle W_å + \eta_{vs} \cdot k_s\, \Sigma\triangle W_s$$

Denna ekvation och ekvation (16) ger:

$$m \cdot C_a \cdot G_a \cdot \triangle W_a = \eta_{vå} \cdot m \cdot k'_{oa} \cdot \triangle W_a$$

$$C_a = \frac{\eta_{vå} \cdot k'_{oa}}{G_a} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad (19)$$

Då man enligt ovanstående fått fram värden å $\eta_{vå}$, G_a och k'_{oa} är C_a bestämd.

Enligt ovanstående är även g bestämd. Enligt ekvation (12) får man då det variabla priset på sista kWh

$$k = C_a \cdot g = \frac{\eta_{vå} \cdot k'_{oa}}{G_a} g \ldots\ldots\ldots\ldots \quad (20)$$

V. Kraftverk och magasin i flera vattendrag. Priset på sista kWh och tappningsfördelningen vid variabel belastning

a. Priset på sista kWh

Vi gå ut från, att vi ha ett system med flera vattenkraftverk och långtidsmagasin fördelade på ett antal vattendrag och att systemet har varierande belastning och att kraftverkens verkningsgrader äro variabla.

Tappningsfördelningen under flödet bestämmes av A III b ovan. Då man tar hänsyn till vattenkraftverkens variabla verkningsgrader, är det inte längre likgiltigt, huru man fördelar vattenföringen mellan de olika verken under tömningsperioden. Under tömningsperioden kan man som en första approximation räkna med, att man skall hålla så jämna vattenföringar som möjligt vid de olika vattenkraftverken, emedan variationer i vattenföringarna i stort sett medföra en försämring av genomsnittsverkningsgraden. För att få jämna vattenföringar kan man förfara på följande sätt. Man går ut från normala tillrinningar under återstoden av tömningsperioden. Man bestämmer den totala magasinsfyllnaden vid tömningsperiodens slut. Då magasinsfyllnadsfördelningen vid tömningsperiodens slut är känd, kan man räkna ut den totala vattenkvantitet, som skall gå genom varje kraftverk fram till tömningsperiodens slut. Vattenföringarna vid de olika verken hållas proportionella mot dessa totala vattenkvantiteter.

Det förutsättes, att beräkningarna enligt B II genomförts och att på basis av de erhållna värdena å prima-, minimi- och sekundavattenföringarna och $k_å$, k_s, $\eta_{vå}$ och η_{vs} samt ett korrigerat sekundakraftpris $k'_s = \frac{\eta_{vs}}{\eta_{vå}} k_s$ en definitiv tappningsplan uppgjorts. Den förutsättes uppgjord på samma sätt som den definitiva planen under B IV, dock med de modifikationer, som enligt A III c äro betingade av att man nu har flera vattenkraftverk och magasin.

Genom tappningsplanen och beräkningarna under B II bestämmas totalbelastning och ångkraftproduktion. Tappningsfördelningen göres på det sätt, som nyss angivits. Vi ha då de uppgifter, som enligt publ. 400 erfordras för att få fram belastningsfördelningen och speciellt fördelningen av belastningsvariationerna mellan de olika kraftverken. I och med att man får fram belastningsfördelningen, får man även fram variationen i nätets pris på sista kWh och kan bestämma värdet å g vid olika tidpunkter under dygnet och veckan. Då man känner g, kan man räkna fram värdet å G för ett vattenkraftverk vilket som helst.

För här ifrågavarande beräkning är det lämpligt att sammanföra kraftverken i grupper på så sätt, att man till samma grupp för de kraftverk, som ligga efter varandra i samma vattendrag, utan att det finnes något långtidsmagasin eller tillflöde med långtidsmagasin mellan kraftverken.

Man får tydligen lika många möjligheter att variera tillrinningen till kraftverken, som man har kraftverksgrupper.

Om n:te kraftverket i en dylik grupp har vattenvärdet $\varkappa_n = C \cdot G_n$ och man har r kraftverk i gruppen, så är, om man kallar gruppens vattenvärde för $\varkappa_z$ och dess G-värde för G_z :

$$\varkappa_z = C \cdot G_z = \frac{\sum\limits_{1-r} h_n \cdot \varkappa_n}{\sum\limits_{1-} h_n} = C \frac{\sum\limits_{1-r} h_n \cdot G_n}{\sum\limits_{1-r} h_n} \ldots \quad (21)$$

där h_n är bruttofallhöjden hos n:te kraftverket.

$$G_z = \frac{\sum\limits_{1-r} h_n \cdot G_n}{\sum\limits_{1-r} h_n} \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad (22)$$

Beroende på de olika kraftverksgruppernas korttidsregleringsmöjligheter får man olika värden å G_z och därmed olika värden å $\varkappa_z$ för de olika grupperna. Vi uppgöra en fördelningskurva för värdena å G_z på så sätt, att vi ordna grupperna efter storleken å G_z och längs x-axeln efter varandra avsätta gruppernas medeleffekter och efter y-axeln värdena å G_z. Se *fig. 11.* Mellan kraftverksgrupperna böra korttidsregleringsmöjligheterna bli betydligt

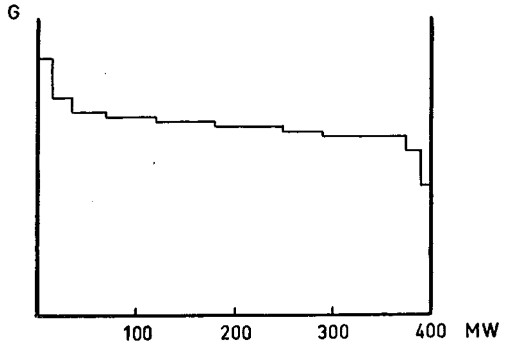

Fig. 11.

jämnare fördelade än mellan de olika kraftverken. Detta gäller framför allt de stora kraftverksgrupperna i vattendragens huvudfåror. Man har därför anledning att vänta att fördelningskurvan för G_z är flack möjligen bortsett från en kort del i början och slutet av kurvan.

En liten belastningsökning, som tas upp av vattenkraftverken, medför totalt för alla verken en ökning ΔW av den tillförda naturenergien. Vi bestämma ett medelvattenvärde $\varkappa_M$ för ΔW på så sätt, att vi ta ut medelhöjden G_M ur fördelningskurvan för G_z och sätta:

$$\varkappa_M = C \cdot G_M \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad (23)$$

Då ökningen ΔW i stort sett delar upp sig på de olika kraftverksgrupperna i proportion till deras medeleffekt (i fördelningskurvan ha de olika grupperna getts olika vikt allt efter medeleffekten), och dessutom fördelningskurvan för G_z är flack, bör man få ett värde å $\varkappa_M$, som har tillfredsställande noggrannhet.

Enligt B II är:

$$\varkappa_{\mathring{a}M} = \eta_{v\mathring{a}} \cdot k_{\mathring{a}} \qquad \varkappa_{sM} = \eta_{vs} \cdot k_s$$

Man bör då kunna använda formlerna (15) och (18) på totalvärdena ΔW, $\Delta W_{\mathring{a}}$ och ΔW_s för alla vattenkraftverken och genomföra beräkningarna av C i analogi med B IV ovan. För en punkt a i tappningsplanen med värden å $\varkappa_M$, C och G_M lika med resp. $\varkappa_{Ma}$, C_a och G_{Ma} får man då:

$$C_a = \frac{\eta_{v\mathring{a}} \cdot k'_{oa}}{G_{Ma}} \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad (24)$$

Det variabla priset k på sista kWh fås ur ekvationen:

$$k = C_a\, g = \frac{\eta_{v\mathring{a}} \cdot k'_{oa}}{G_{Ma}}\, g \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad (25)$$

Om man går upp mot full last på ett vattenkraftverk med Francisturbiner, t. ex. för att ta vissa belastningsspetsar, springer priset på sista kWh upp i höga värden beroende på den dåliga utnyttjningen av vattnet. Även vid relativt riklig vattentillgång kan priset på sista kWh gå upp över priset på ångkraften. Det är då riktigast att ta den översta delen av belastningen med ångkraft och ej med vattenkraft. Den maximala belastningen, som man bör ta ut från vattenkraftverken, är således ett ganska tänjbart värde.

b. Tappningsfördelningen

Tappningsfördelningen enligt a ovan är, som framgår av nedanstående, icke riktig. Det förutsättes här, att den förbättring som man får, om man rättar till felen i tappningsfördelningen, icke är så stor, att förbättringen nämnvärt påverkar prisbildningen på hela nätet.

Även om prisändringarna för hela nätet äro obetydliga, så hindrar icke detta, att man på grund av de stora värden det är fråga om absolut sett kan göra avsevärda besparingar genom att rätta till tappningsfördelningen, och att en justering bör ske.

Vi förutsätta således här, att det enligt a ovan bestämda priset på sista kWh är praktiskt taget riktigt. Vi ha då en teoretisk möjlighet att för magasin efter magasin kontrollera tappningen.

Redan då man gör upp den definitiva tappningsplanen, får man fram totala magasinsfyllnaden för en följd av gångna kända vattenår. För samma följd av år får man räkna fram magasinsfyllnaden för det magasin, vars tappning skall kontrolleras. Man får vidare räkna fram priset på sista kWh och vattenvärdet för alla kraftverken nedanför det ifrågavarande magasinet. För det n:te av de p kraftverken nedanför magasinet må vattenvärdet vara $\varkappa_n$ och fallhöjden h_n. Om man varken har maximi- eller minimitappning ur magasinet, bestämmes vattenvärdet $\varkappa$ i magasinet av formeln:

$$\varkappa = \frac{\sum\limits_{1-p} h_n \cdot \varkappa_n}{\sum\limits_{1-p} h_n} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad (26)$$

Har man maximitappning ur magasinet, är vattenvärdet i magasinet lägre, och om man har minimitappning är det högre än det värde man får med formeln. Om man har maximi- eller minimitappning, får man använda nedanstående kontrollräkning (formel 1 i bil. 4) för att bestämma vattenvärdet. Det är i första hand på vattenvärdet i magasinet, som kontrollen av tappningen baseras. (Jämför sista delen av A III c.)

En undersökning av tappningen från ett magasin får göras för utgångspunkt efter utgångspunkt.

En utgångspunkt bestämmes av tidpunkten på året och vattensituationen. Vattensituationen bestämmes enligt ovanstående av totala magasinsfyllnaden. I den mån man justerar tappningsförfarandet, så att man kommer fram till en riktig tappningsfördelning, komma fyllnaderna i de olika magasinen icke att följas åt på det sätt som angives under A III. Noga räknat skulle man således ta hänsyn till magasinsfyllnaden i varje enskilt magasin, då man bestämmer vattensituationen. Även vid en exakt riktig tappningsfördelning torde magasinsfyllnaderna följas åt så pass väl, att man kan låta vattensituationen bestämmas av dels magasinsfyllnaden i det ifrågavarande magasinet, dels av totala magasinsfyllnaden.

Kontrollen av en utgångspunkt bestämd av

1. tidpunkten på året t_1
2. magasinsfyllnaden i det ifrågavarande magasinet W_n
3. totala magasinsfyllnaden W

skall tillgå på följande sätt.

I serien av vattenår väljer man ut de m år, då man i tidpunkten t_1 har magasinsfyllnaderna W_n och W. För alla m åren är vattenvärdet i det ifrågavarande magasinet i tidpunkten t_1 detsamma, emedan vattensituationen är densamma. För en tidpunkt t_2 senare än t_1 bestämmes ett genomsnittligt vattenvärde för magasinet i fråga för de m åren. Vid denna bestämning skall man, om fyllnadskurvan för det ifrågavarande magasinet går till övre eller nedre magasinsgränsen innan den nått fram till t_2, räkna med vattenvärdet i den punkt, då fyllnadskurvan når eller första gången når en magasinsgräns. *Om tappningen är riktig, är nyssnämnda vattenvärde i tidpunkten t_1 lika med det på detta sätt bestämda genomsnittliga vattenvärdet i tidpunkten t_2.*

En närmare redogörelse för kontrollen finnes i bil. 4.

Det torde vara i det närmaste ogörligt att för ett större system för en följd av vattenår räkna fram vattenvärdena i de olika magasinen.

Genom att schematisera förhållandena, så att man endast räknar med ett par utvecklingslinjer för vattenförhållandena, torde man ofta kunna bilda sig en uppfattning om hur en tappningsfördelning verkar.

Som exempel kunna vi ta förhållandena under tömningsperioden och förutsätta att ingen sekundakraftleverans sker denna tid. Tidpunkten t_1 förutsättes ligga i början av tömningsperioden, och det förutsättes, att ingen ångkraft produceras i tidpunkten t_1. Vi välja ut ett magasin med högt vattenvärde i tidpunkten t_1. Tidpunkten t_2 förlägga vi i senare delen av tömningsperioden. Från t_1 till t_2 kan situationen utveckla sig i två riktningar. Man kan i tidpunkten t_2 få ångkraftkörning, eller man kan få hela primabelastningen täckt med vattenkraft. I förra fallet sker en radikal minskning i vattenkraftverkens belastning, och detta medför en utjämning av alla vattenvärden. Ökningen i vattenvärdet från t_1 till t_2 för det ifrågavarande magasinet blir därför mindre än den genomsnittliga ökningen i vattenvärdet. För det fall att man icke får ångkörning i t_2, blir belastningen på kraftverken i stort sett oförändrad. Ändringen i vattenvärdet från t_1 till t_2 för det ifrågavarande magasinet blir ungefär proportionell mot ändringen i det genomsnittliga vattenvärdet. Resultatet blir, att det genomsnittliga vattenvärdet för det ifrågavarande magasinet i t_2 blir lägre än vattenvärdet i t_1. Man kan få de båda vattenvärdena lika genom att öka tappningen ur det ifrågavarande magasinet i början av tömningsperioden och minska det i slutet av perioden. Enligt B III medför nämligen en tappningsökning en minskning av vattenvärdet och tvärt om.

VI. Genomförandet av körningen

Praktiskt sett torde man få bestämma tappningarna, genomföra körningen och räkna fram kraftpriserna på ungefär följande sätt.

Man får räkna fram den definitiva tappningsplanen för det förhandenvarande systemet och den prognosticerade belastningen.

(Man torde böra räkna fram tappningsplanen för ett par belastningar, en något under och en något över den prognosticerade, så att man har möjlighet att interpolera, om belastningen avviker från den prognosticerade.)

Tappningar och tappningsfördelning bestämmas i första hand ur den förhandenvarande vattensituationen med hjälp av tappningsplanen.

Körningen av kraftverken får man genomföra så, att man på känn lägger fast värden å priset på sista kWh för olika tider under dygnet och veckan. Man får välja ut ett antal stora vattenkraftverk med goda regleringsmöjligheter och dirigera deras körning centralt. Övriga vattenkraftverk få anpassa sin körning efter det fastlagda priset på sista kWh. De centralt dirigerade verken få ta återstående belastning.

Det på känn fastlagda priset på sista kWh består av värden å g för olika tider under dygnet och veckan och å ett värde å C för veckan. Enligt ekvation (12) är nämligen:

$$k = C \cdot g$$

Kontrollen av att man fått riktiga värden å g får göras så, att man ur de belastningar, som de centralt dirigerade verken få, räknar fram deras g-värden. Dessa skola stämma överens med de g-värden, som motsvara de på känn fastlagda värdena på k. Om så icke är fallet, få de på känn fastlagda värdena å k justeras, tills man får överensstämmelse.

Kontrollen av C-värdet får göras för en vecka i efterhand. Ur de verkliga körningarna får man räkna fram värdet å G_z för de olika kraftverksgrupperna och göra upp fördelningskurvan enligt fig. 11. Härur får man värdet å G_M. Då värdena å k'_o och $\eta_{vä}$ erhållits vid beräkningen av tappningsplanen, får man värdet å C ur formel (24):

$$C = \frac{\eta_{vä} \cdot k'_o}{G_M}$$

Då man räknat fram värdet å G för de olika kraftverken och känner C, kan man få ut vattenvärdet för de olika kraftverken och kraftverksgrupperna och för de olika magasinen. Det är säkert lämpligt att fortlöpande följa dessa värden.

Om man enligt de anvisningar, som finnas under B V b ovan och bil. 4, skaffar sig en uppfattning om hur tappningsfördelningen bör göras, och dessutom på nyss angivet sätt följer vattenvärdena för olika kraftverksgrupper och magasin, torde man ha förutsättningarna för att rätta till de större felen i tappningsfördelningen. Man torde även få möjligheter att få fram riktiga tappningar vid regleringsförbud och andra onormala förhållanden. Även det ovan i slutet av B V a nämnda problemet, hur långt man skall gå upp med belastningen på vattenturbinerna för att minska ångkraftproduktionen, får man möjligheter att reda ut. Man får även möjligheter till en noggrannare avvägning av tappningen vid stor överrinningsrisk. Jämför sista delen av A III c. Pris på sista kWh och vattenvärden för olika kraftverk, kraftverksgrupper och magasin ger ett fast grepp om och en god kontroll av tappningar och kraftverkskörningar.

Bilaga 1

Bestämning av minimizon för Faxälvens sjömagasin. Optimal ångkrafttillsats

Bestämning av minimizonen

Faxälvens sjömagasin består av ett flertal sjöar i huvudsak utefter varandra längs älven. För att göra detta exempel så enkelt som möjligt antages emellertid här, att det är en enda sjö med reglervolymen ca 25 000 dygnsenheter.

Beräkningarna avse förhållandena vid utloppet ur Ströms Vattudal. Medelvattenföringen är här ca 150 m^3/s, och det antages, att ett kraftverk på denna plats jämte ett ångkraftverk skall tillgodose en primabelastning svarande mot en årsmedelvattenföring av 150 m^3/s. Belastningens variation under året antages vara sådan att den tappning, som erfordras för att täcka hela belastningen, bör variera enligt följande:

Månad:	Jan.	Febr.	Mars	April	Maj	Juni
Tappning m^3/s:	167	165	156	145	136	127
Månad:	Juli	Aug.	Sept.	Okt.	Nov.	Dec.
Tappning m^3/s:	122	135	149	159	167	172

För utnyttjningen av långtidsmagasinet skall konstrueras en tappningsplan av det i kap. II b beskrivna slaget. Principen är i korthet följande. Magasinet indelas i två zoner, en primazon och en minimizon. Så länge magasinsinnehållet ligger inom primazonen tappas den i ovanstående tabell angivna tappningen, *primatappning*, Q_{prima}, dvs. all belastning tillgodoses med vattenkraft. Om magasinsinnehållet kommer ned i minimizonen, reduceras tappningen med ett bestämt, alltid lika stort belopp, svarande mot ångkraftverkets produktion vid körning dygnet om. Den tappning man då får benämnes *minimitappning*, Q_{min}. Gränsen mellan primazon och minimizon bestämmes så att om man, när denna uppnås, går ned till minimitappning undre magasinsgränsen ej kommer att underskridas ens vid mycket låg tillrinning eller ett mycket sent vårflöde.

Utgående från tillrinningen åren 1925—1956 ha sådana tappningsplaner bestämts för några olika värden på $Q_{prima} - Q_{min}$.

Beräkningarna ha utförts på följande sätt. För varje "reglerings-år" beräknas och uppritas med godtycklig nollpunkt en summationskurva för nyttig tillrinning minus minimitappning. *Fig. 12* visar ett

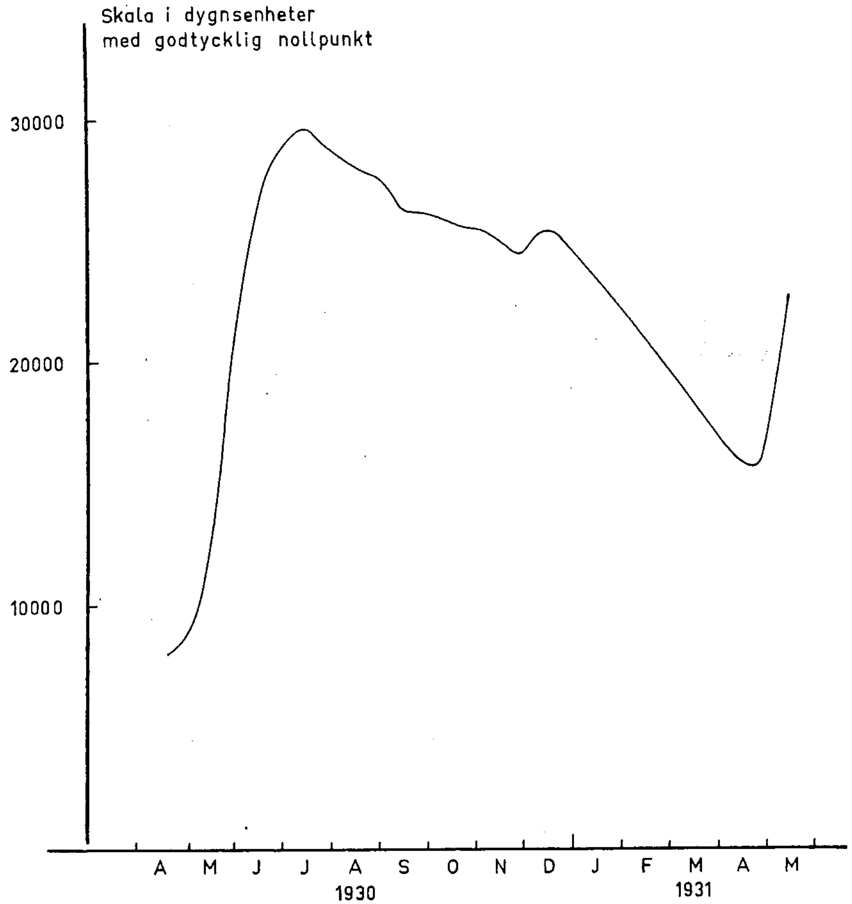

Fig. 12. Exempel på summationskurva för nyttig tillrinning minus minimitappning $Q_{prima} - Q_{min.} = 50$ m^3/s.

exempel. Denna kurva anger alltså magasinsinnehållets utveckling, om magasinet vore oändligt stort och man alltid tappade minimitappning. Kurvan får en minimipunkt vid det efterföljande vårflödets början någonstans under tiden mars—maj. De olika årens kurvor kalkeras sedan av på ett och samma papper förskjutna i vertikalled, så att minimipunkterna komma på samma horisontella linje, *fig. 13*. Enveloppen till denna kurvskara utgör den sökta begränsningskurvan för minimizonen.

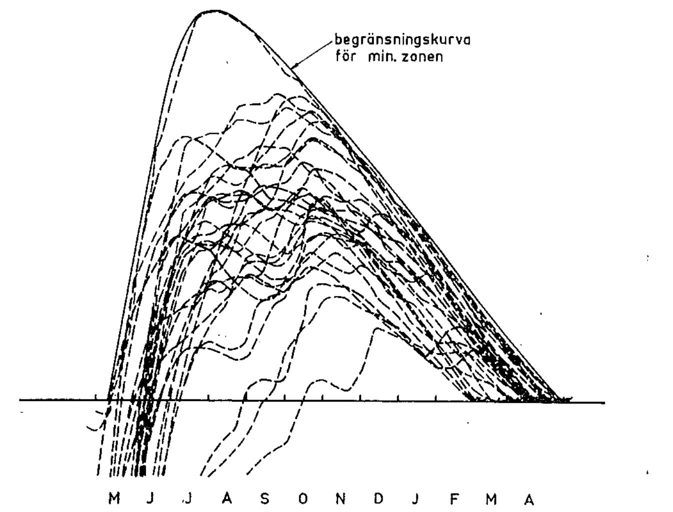

Fig. 13. Summationskurvorna för åren 1925—1955 placerade på gemensam horisontell tangent.

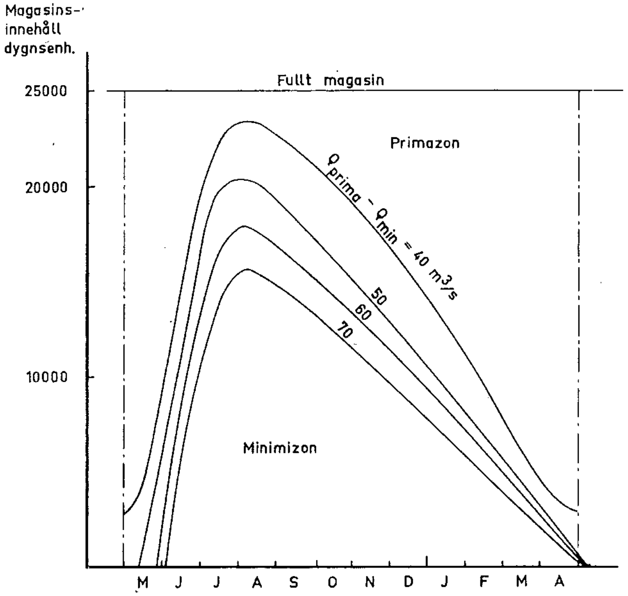

Fig. 14. Tappningsplaner för olika värden på $Q_{prima} - Q_{min}$.

Fig. 14 visar de sålunda bestämda minimizonerna för aktuella värden på $Q_{prima} - Q_{min}$. För det lägsta värdet når gränskurvan inte ned till noll, vilket innebär flerårsreglering.

Optimal ångkrafttillsats

För att få en uppfattning om hur regleringen fungerar, ha de beräknade tappningsplanerna tillämpats på vattenårsserien 1925—1956. *Fig. 15* visar några typiska år.

Den erforderliga ångenergiproduktionen är en funktion av $Q_{prima} - Q_{min.}$, dvs. ångeffekten, och blir för den genomräknade perioden:

$Q_{prima} - Q_{min.}$ m^3/s:	40	50	60	70
Ångenergiprod. % av belastn.:	8,42	7,08	6,67	6,39

För det teoretiska ytterlighetsfall att man hade en ångeffekt så stor, att den ensam kunde taga hand om all belastningen, skulle man köra vattenkraftverket ända tills magasinet blev alldeles tomt och därefter köra på tillrinning och producera resten i ångkraftverket. Detta ger minsta möjliga ångenergiproduktion, som i detta fall uppgår till 5,76 % av belastningen.

Fig. 16 visar det ovan beräknade ångenergibehovet som funktion av $Q_{prima} - Q_{min.}$ Sambandet mellan ångeffekten, räknad i % av medelbelastningen, och $Q_{prima} - Q_{min.}$ utgöres av en rät linje i samma figur. Man kan nu beräkna totalkostnaden för ångkrafttillsatsen som funktion av $Q_{prima} - Q_{min.}$, den övre kurvan i figuren. Det är räknat med energikostnaden 40 kr/MWh och effektkostnaden (gränskostnad) 50 kr/kW och år.

Lägsta totalkostnaden erhålles i det här exemplet för $Q_{prima} - Q_{min.} = 45$ m^3/s. Den kraftiga kostnadsstegringen när man går mot lägre värden beror, som tappningsplanerna visa, på att man måste inrikta sig på att varje vår ha kvar en del vatten i magasinet vid tömningsperiodens slut för att gardera sig mot ett litet vårflöde (flerårsreglering). Detta vatten rinner emellertid ofta bort och får ersättas med ångkraft.

Genom att göra motsvarande beräkningar med några olika förhållanden mellan belastning och medelvattenföring och olika storlek på regleringsmagasinet kan man komma fram till optimal utbyggnadsgrad för vattenkraft, regleringsgrad och ångkrafttillsats.

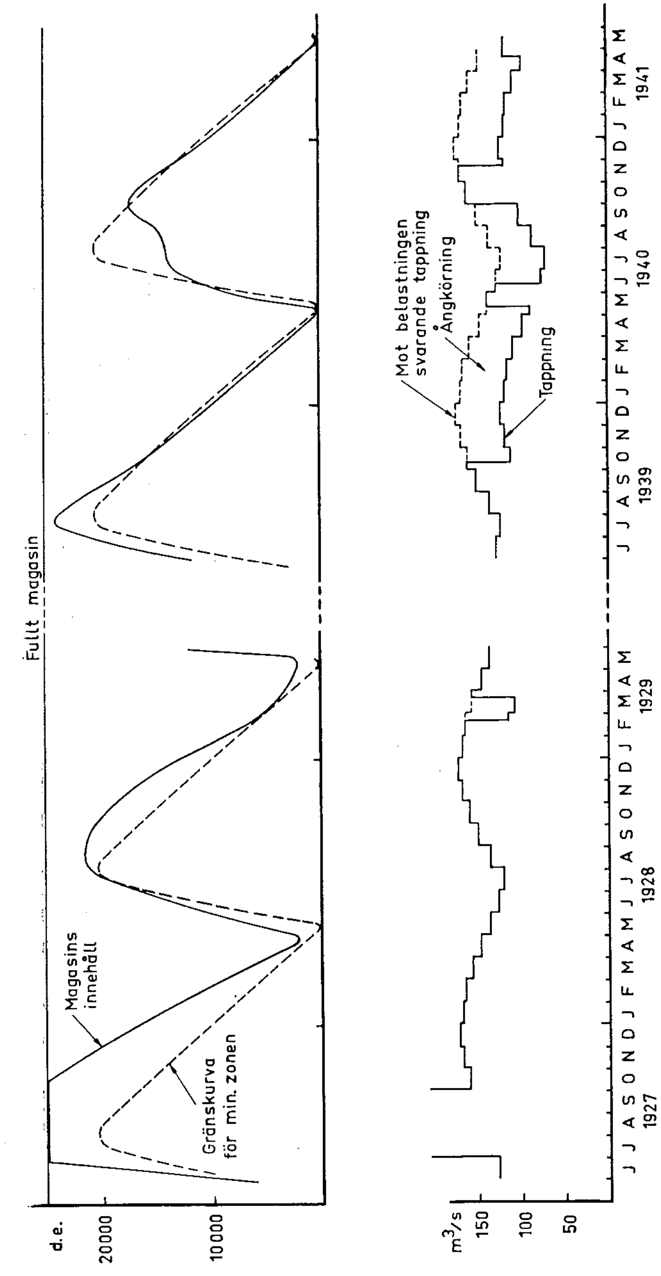
Fullt magasin
Magasins innehåll
Gränskurva för min. zonen
d.e.
20000
10000
m3/s
150
100
50
Mot belastningen svarande tappning
Ångkörning
Tappning
J J A S O N D J F M A M J J A S O N D J F M A M
1927
1928
1929
J J A S O N D J F M A M J J A S O N D J F M A M
1939
1940
1941

Fig. 15.

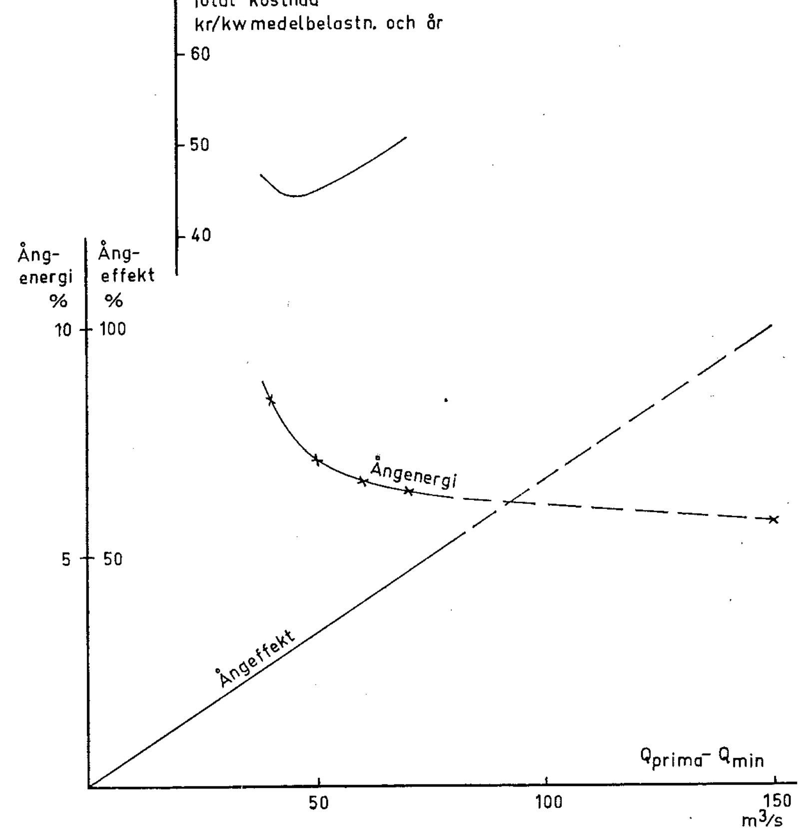
Total kostnad
kr/kw medelbelastn. och år
60
50
40
Ång- energi %
Ång- effekt %
10
100
5
50
Ångenergi
Ångeffekt
Qprima − Qmin
50
100
150
m3/s

Fig. 16.

Bilaga 2

Statistisk metod för bestämning av minimizonen

Om man bestämmer gränsen mellan prima- och minimizonerna så, att undre magasinsgränsen aldrig underskrides under den period man har vattenföringsuppgifter från, exempelvis en 30-årsperiod, så är det de allra ogynnsammaste vattensituationerna inom denna 30-årsperiod, som bli utslagsgivande. Nu kan det mycket väl hända, att någon av dessa ogynnsamma vattensituationer i verkligheten är mycket extrem, varför man hellre bort taga risken av en enstaka kraftransonering än gardera sig för denna sällsynta vattensituation med åtföljande stora spill under normala och våta år. Man kan även råka ut för motsatsen; att den valda 30-årsperioden inte innehåller något "tillräckligt" ogynnsamt år, utan att det kan förekomma ogynnsammare år relativt ofta trots att inget sådant råkat falla inom den aktuella 30-årsperioden.

För att få ett bättre resultat får man göra en statistisk analys utgående från det erforderliga magasinsinnehållet vid en viss tidpunk under *samtliga* år i den tillgängliga årsserien och räkna fram en gräns, sådan att när denna uppnås man löper en viss med hygglig noggrannhet bestämd risk att magasinet inte räcker till. Mot olika stora risker svara olika gränskurvor och ju mindre risker man tager, desto mera ångkraft måste man sätta till. Det finns därför en av bl. a. den nationalekonomiska förlusten p. g. a. kraftransonering bestämd optimal risk, som man bör inrikta sig på.

Bestämning av minimizon utan hänsyn till förhandenvarande tillrinningen

Det magasinsinnehåll, vid vilket man skall gå över från primatappning till minimitappning, skall bestämmas så, att man löper endast en viss liten risk för att magasinet skall bli tomt före vattenbristperiodens slut. Avgörande för magasinets avsänkning är sammanlagda tappningen (minimitappning) minus nyttiga tillrinningen under tiden fram till vattenbristperiodens slut. För norrlandsförhållanden är det alltid fråga om avsänkningen före vårflödet. Denna avsänkning bestämmes dels av tillrinningen under vintern, dels av tidpunkten för vårflödet och båda måste beaktas. Ett enkelt sätt att göra detta är att på summationskurvor över tillrinning minus

minimitappning år för år mäta upp avsänkningen efter den aktuella tidpunkten. Har man tillgång till en databehandlande maskin, kan man låta den leta upp minimipunkten och beräkna den sökta kvantiteten. Man får alltså för exempelvis en 30-årsperiod 30 st. sådana värden på den statistiska variabel man är intresserad av.

Denna statistiska variabel beror ytterst på nederbörd och temperatur under en rätt lång tid samt på den tidpunkt, då vårflödet slutligen lossnar. Den utgör alltså summan av ett stort antal andra statistiska variabler och bör därför enligt statistikens centrala gränsvärdessats vara normalt fördelad. Delvariablerna, väderleken under på varandra följande tidsintervaller, äro visserligen autokorrelerade, men denna korrelation torde inte sträcka sig längre än att villkoren för centrala gränsvärdessatsen kunna anses uppfyllda. *Fig. 17* visar en observerad fördelningskurva för en 30-årsserie uppritad på normalfördelningspapper och den m. fl. andra motsäger inte detta antagande. Tyvärr finns det i regel inte observationer för så många år, att man effektivt kan testa hypotesen om normalfördelningen och långt mindre nöjaktigt bestämma en transformation, som eventuellt ger bättre resultat.

När man kommer fram i mars och april har vårflödet i många fall redan börjat, och då får man utesluta dessa år och arbeta med en stympad fördelning, enär man eljest skulle få en "tvåpucklig" fördelning, varav den ena delen inte är av intresse i detta sammanhang.

Man har i Finland och inom Vattenfall gjort en del undersökningar beträffande vattenföringars statistiska fördelningar och funnit vissa avvikelser från normalfördelningen. Det är emellertid i båda fallen fråga om medelvattenföringen under en kalendermässigt angiven tidsperiod, vilket är en betydligt oenhetligare variabel än den avsänkning det här är fråga om.

När man kommer in på problemet att bestämma en minimizon gällande för ett helt system av vattenkrafttillgångar i kanske skilda delar av landet kommer man, om man betraktar den ovan definierade avsänkningen, så nära normalfördelningen man över huvud taget kan begära.

I det följande antages därför att de observerade värdena härröra från en normal fördelning.

Om de från en viss tidpunkt observerade avsänkningsvärdena betecknas $x_1\ x_2 \ldots x_n$, kan man bestämma uppskattningar för parametrarna i fördelningen enligt de kända formlerna:

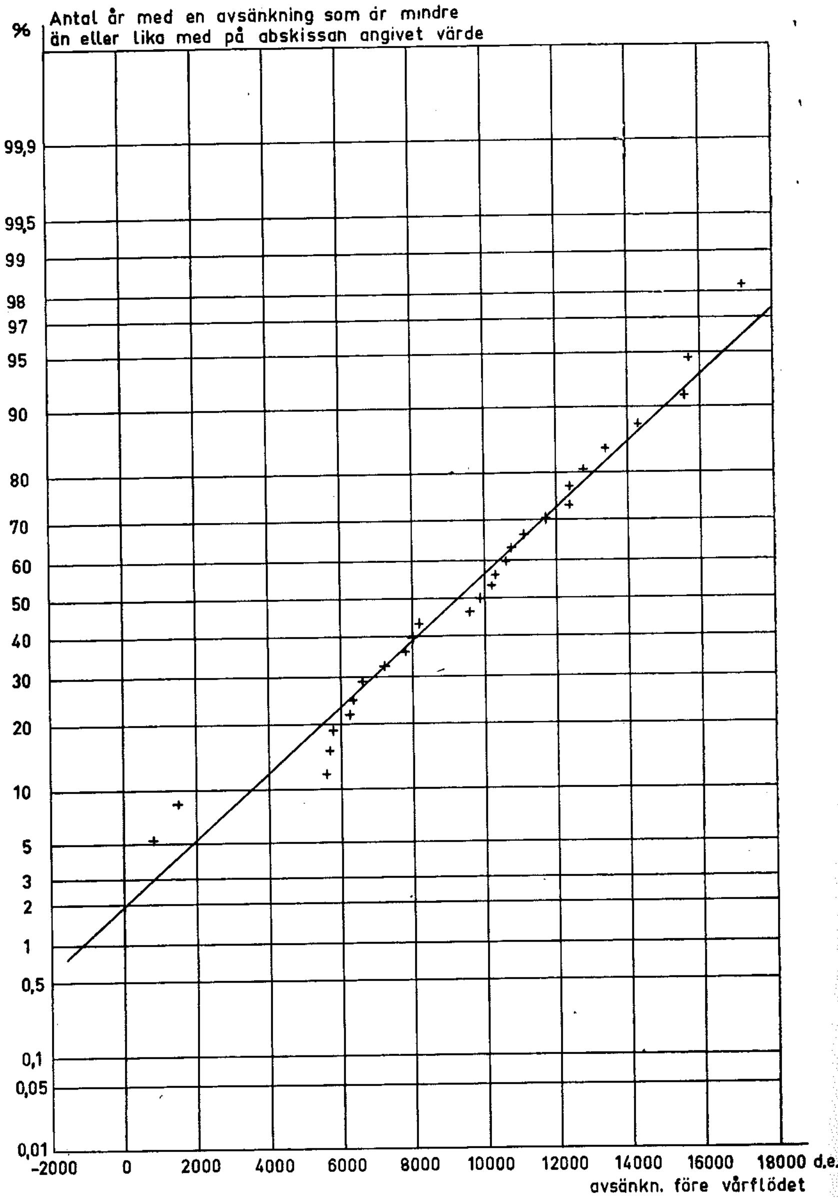

Fig. 17. Fördelningskurva för magasinsavsänkningen från 1 okt.—vårflödets början vid min.-tappning. $Q_{prima} - Q_{min.} = 50$ m³/s.

$$\text{medelvärdet } \xi \approx \bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} x_i$$

och

$$\text{spridningen } \sigma \approx s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^{n} (x_i - \bar{x})^2}$$

För den numeriska beräkningen utnyttjar man att:

$$\Sigma (x_i - \bar{x})^2 = \Sigma x_i^{\ 2} - \frac{(\Sigma x_i)^2}{n}$$

Vad man slutligen vill åt är ett värde x_p på avsänkningen sådant att:

$$P(x \leqq x_p) = P$$

där $1 - P$ är sannolikheten för att magasinet ej räcker till (*"ransoneringsrisk"*, av storleksordning några %).

Om man känner ξ och σ blir:

$$x_p = \xi + u_p \cdot \sigma$$

där u_p är P-fraktilen i den normerade normala fördelningen.

Om man som i det här fallet inte känner ξ och σ utan blott de ur n st. observerade värden på x beräknade uppskattningarna $\bar{x}$ och s kan man med tillhjälp av t-fördelningen bestämma ett värde:

$$\underline{x_p' = \bar{x} + s \sqrt{1 + \frac{1}{n}} \cdot t_p} \qquad (f = n - 1)$$

sådant att:

$$P(x \leqq x_p') = P$$

Det sista uttrycket betyder egentligen "sannolikheten för att olikheten är uppfylld vid återupprepning av hela proceduren", dvs. om man ett flertal gånger observerar en serie av n st. x-värden och därur beräknar x' och jämför det med ytterligare ett x-värde, så kan olikheten förväntas gälla med sannolikheten P. Man får alltså inte uppfatta x_p' som en fast gräns, under vilken framtida iakttagelser förväntas falla med sannolikheten P. Kvar står emellertid att x_p' är den bästa approximation man kan få på x_p ur det tillgängliga materialet.

Det kan vara skäl i att undersöka, inom vilka gränser x_p verkligen kan ligga. Detta kan man komma fram till genom att med hjälp av X^2-fördelningen bestämma säkerhetsgränser för σ. Man finner därav följande symmetriska säkerhetsgränser för x_p :

$$P\left(\bar{x} + \sqrt{\frac{f}{X^2_p}\left(1+\frac{1}{n}\right)} \cdot s \cdot u_p < x_p < \bar{x} + \right.$$
$$\left. + \sqrt{\frac{f}{X^2_{1-p}}\left(1+\frac{1}{n}\right)} \cdot s \cdot u_p \right) = 2P - 1$$

där X^2_p är P-fraktilen i X^2-fördelningen med $f = n - 1$ frihetsgrader. För $n = 30$ erhålles exempelvis:

$$P(\bar{x} + 0{,}810 \cdot s \cdot u_p < x_p < \bar{x} + 1{,}368 \cdot s \cdot u_p) = 95\ \%$$
$$P(\bar{x} + 0{,}875 \cdot s \cdot u_p < x_p < \bar{x} + 1{,}230 \cdot s \cdot u_p) = 80\ \%$$
$$P(\bar{x} + 0{,}924 \cdot s \cdot u_p < x_p < \bar{x} + 1{,}153 \cdot s \cdot u_p) = 60\ \%$$
$$P(\bar{x} + 0{,}960 \cdot s \cdot u_p < x_p < \bar{x} + 1{,}102 \cdot s \cdot u_p) = 40\ \%$$
$$P(\bar{x} + 0{,}993 \cdot s \cdot u_p < x_p < \bar{x} + 1{,}062 \cdot s \cdot u_p) = 20\ \%$$

x_p', som är något större än $\bar{x} + s \cdot u_p$, ligger ungefär i mitten av fördelningen.

Man kan få en uppfattning om hur lång årsserie man bör eftersträva att grunda analysen på genom att studera hur ovanstående sifferfaktorer för exempelvis 80 % gränserna variera med n.

n	Nedre gräns	Övre gräns
10	0,820	1,540
20	0,856	1,304
30	0,875	1,230
40	0,888	1,190
50	0,899	1,164
60	0,903	1,148
100	0,923	1,110

Som synes kommer man rätt långt med en 30-årsserie, det är förhållandevis litet att vinna på en förlängning av serien därutöver. *Man måste komma ihåg, att det inte är fråga om att bestämma sannolikheten på 100-dels % när, utan det räcker mer än väl om man vet den på hela % när.*

Fig. 18 visar som exempel några tappningsplaner gällande med viss angiven säkerhet.

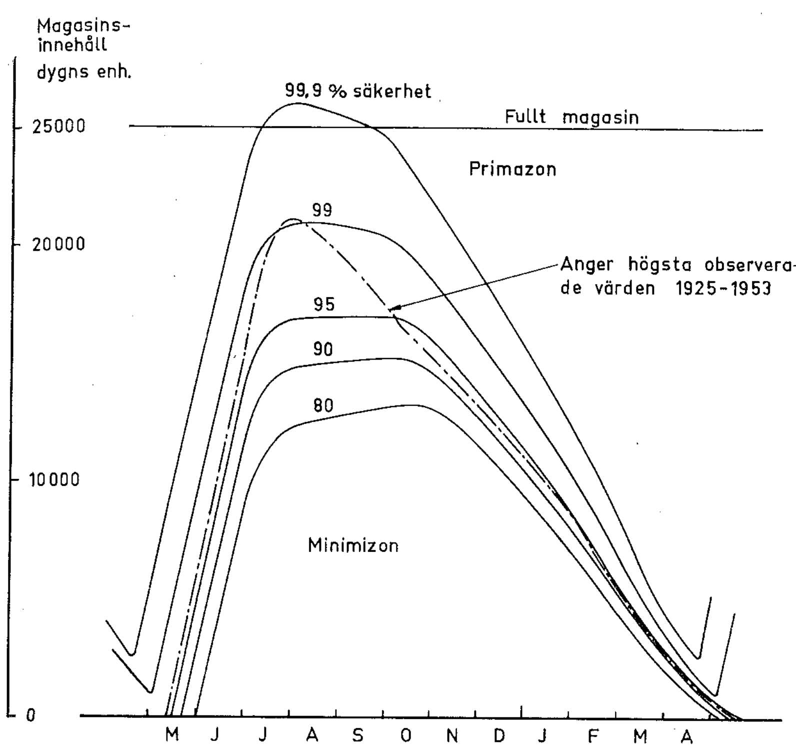

Fig. 18. Tappningsplaner med olika säkerhet.

Vad händer nu vid tillämpning av en tappningsplan med en minimizon gällande med viss risk. Ja, så snart man vid något tillfälle kommer ned till minimizonen och börjar köra ånga, så löper man den angivna risken för att magasinet inte skall räcka fram till vårflödet. I en del fall kommer det alltså definitivt inte att gå ihop; magasinsinnehållet sjunker trots ångkörningen allt djupare in i minimizonen för att slutligen hamna vid nedre magasinsgränsen. Detta svarar mot att risken, som från början var kanske 2,5 %, ökar alltmer för att till slut bli 100 %. Det är ganska klart att så får man inte låta det gå till, utan man får, när risken ökat till ett ganska högt värde, säg över 50 %, tillgripa kraftransonering för att slippa nå ända ned till nedre magasinsgränsen och behöva slå igen butiken helt.

En minimizon med 2,5 % risk ger inte som man skulle vänta kraftransonering i genomsnitt vart $\frac{100}{2,5} = 40$:e år men väl något ditåt beroende på två faktorer, som verka åt var sitt håll. Den ena är, att man enligt ovan tillgriper ransonering, innan magasinet är tomt, och den andra att man inte kommer ned till minimizonen varje år.

Den angivna metoden kan användas även för bestämning av tappningsförfarandet vid flerårsreglering. *Fig. 19* visar som exempel en på detta sätt beräknad minimizon med 2,5 % risk, som sträcker sig två år tillbaka från ett visst vårflöde. Beräkningsmetoden tager automatiskt hänsyn till ev. korrelation mellan två på varandra följande år. Nu kan man ju inte säga, att man ett visst år skall tillämpa den del, som svarar mot år 1 på denna fig., och nästa år den del, som svarar mot år 2, utan dessa delar måste läggas på varandra enligt *fig. 20.* Man finner då att under tiden fram till ca 15 okt. är det risken för stor avsänkning den närmaste vintern, som är avgörande, och under tiden därefter är det risken för låg tillrinning under hela nästa år, som är avgörande. Man bör vid beräk-

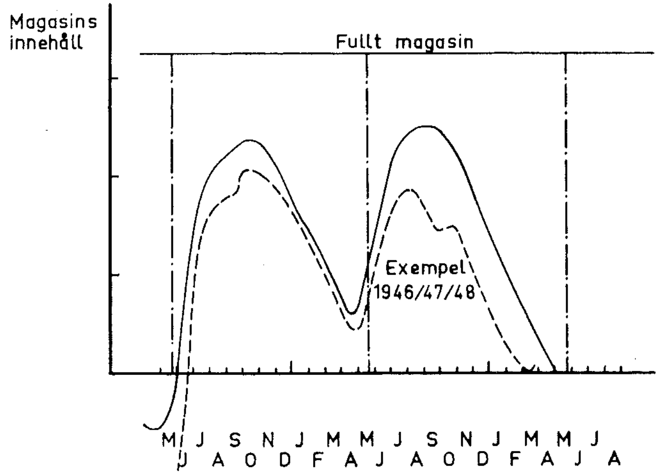

Fig. 19. Erforderligt magasinsinnehåll för att vid full ångkörning klara sig fram till ett visst vårflöde med 2,5 % risk.

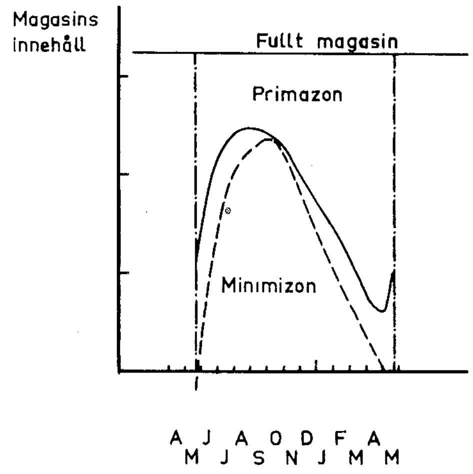

Fig. 20. Tappningsplan för flerårsreglering.

ningar av detta slag, som sträcka sig över vårflödet, räkna med en lägre ångeffekt under ett par månader p. g. a. revisioner och under själva flödet kontrollera att inte tillrinningar nedanför magasinen äro så stora, att hela ångeffekten ej kan utnyttjas.

Det har i det föregående framskymtat, att metoden kan användas även för bestämning av magasinsutnyttjningen i ett helt system. Det verkar vara alldeles hopplöst att statistiskt studera tillrinningen till varje magasin för sig och taga samman dem med hänsyn till korrelationen dem emellan. Enklast torde vara att omvandla alla tillrinningar till kraftproduktion och lägga ihop dem samt statistiskt behandla summan enligt ovan. Man får vid sådana beräkningar också taga hänsyn till oreglerade vattendrag och tillrinningar nedanför magasinen jämte tvångstappning i reglerade vattendrag och kontrollera att dylik ej magasinerbar produktion ej överskrider belastning minus max. ångenergiproduktion, i vilket fall ångenergiproduktionen måste reduceras. Detta är vid maskinell beräkning mycket lätt att göra.

Slutligen må det pekas på möjligheten att vid beräkning av avsänkningens statistiska fördelning taga hänsyn till osäkerheten i belastningsprognosen och risken för haverier i ångkraftverken.

Minimizon som funktion av förhandenvarande tillrinningen

Ovan behandlades avsänkningen efter en viss tidpunkt som om den vore fullständigt oberoende av tillrinningen före den aktuella tidpunkten. Det är emellertid ganska klart, att det i verkligheten finns ett visst samband mellan dessa faktorer beroende på att en del av nederbörden tidsfördröjes vid passage genom oreglerade sjöar, mossar, kärr etc. Man skulle m. a. o. räkna med den av förhandenvarande tillrinningen betingade statistiska fördelningen för avsänkningen efter en viss tidpunkt.

Om avsänkningen antages vara normalfördelad för alla tillrinningar, så komma parametrarna i fördelningsfunktionen att vara funktioner av tillrinningen. Med det knapphändiga statistiska material som finns är det inte möjligt att exakt bestämma dessa funktioner, men man kan komma ganska långt med antagandet att spridningen är oberoende av tillrinningen och medelvärdet en linjär funktion av tillrinningen (regressionslinje). Detta gäller oberoende av hur tillrinningen är fördelad.

Om tillrinningen betecknas x med medelvärdet $\bar{x}$ och avsänkningen betecknas y antages alltså:

betingade medelvärdet för y: $E\left[y \mid x\right] = \alpha + \beta(x - \bar{x})$

betingade variansen för y: $D^2\left[y \mid x\right] = \sigma^2$

Ur ett antal observerade samhöriga värden x_i, y_i, $i = 1, 2 \ldots n$, kan man bestämma en approximativ regressionslinje:

$$Y = a + b(x - \bar{x})$$

och ett approximativt värde på variansen:

$$\sigma^2 \approx s^2$$

a och b bestämmas enligt minsta kvadrat-metoden, dvs. så att summan av kvadraterna på avvikelserna från regressionslinjen:

$$\sum_{i=1}^{n} (y_i - Y)^2$$

blir minsta möjliga. Detta ger:

$$a = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} y_i = \bar{y}$$

$$b = \frac{\sum_{i=1}^{n} (x_i - \bar{x}) \cdot (y_i - \bar{y})}{\sum_{i=1}^{n} (x_i - \bar{x})^2}$$

Man kan visa[1] att Y därvid är normalt fördelat kring $E\left[y \mid x\right]$ med variansen:

$$D^2\left[Y\right] = \sigma^2 \left(\frac{1}{n} + \frac{(x - \bar{x})^2}{\sum_{i=1}^{n} (x_i - \bar{x})^2}\right)$$

σ^2 kan approximeras med:

$$s^2 = \frac{1}{n-2} \sum_{i=1}^{n} (y_i - Y_i)^2 =$$

$$= \frac{1}{n-2} \left[\Sigma (y_i - \bar{y})^2 - \frac{[\Sigma (y_i - \bar{y})\ (x_i - \bar{x})]^2}{\Sigma (x_i - \bar{x})^2}\right]$$

Sedan man på detta sätt bestämt Y och s^2 utgående från en serie av n st. vattenår kan man beräkna ett värde på avsänkningen y_p, sådant att det med sannolikheten p inte överskrides under ett år som inte ingår i den använda årsserien. Differensen mellan ett enskilt värde y och regressionslinjen Y är nämligen enligt ovan normalt fördelad med:

medelvärdet $E[y - Y] = 0$

och variansen $D^2\left[y - Y\right] = \sigma^2 \left(1 + \frac{1}{n} + \frac{(x - \bar{x})^2}{\Sigma (x_i - \bar{x})^2}\right)$

[1] Hald: Statistical Theory with Engineering Applications, New York och London 1952.

Då σ^2 ersättes med s^2 gäller t-fördelningen med $f = n - 2$ frihetsgrader och man får följande uttryck för gränsen mellan prima- och minimizonerna vid säkerheten p:

$$y_p = \bar{y} + b(x - \bar{x}) + s \sqrt{1 + \frac{1}{n} + \frac{(x - \bar{x})^2}{\Sigma (x_i - \bar{x})^2}} \cdot t_p \; (f = n - 2)$$

som alltså är en icke linjär funktion av förhandenvarande tillrinningens avvikelse från medelvärdet $(x - \bar{x})$. Beträffande tolkningen av denna gräns gäller vad som sagts om motsvarande uttryck i föregående avsnitt.

Fig. 21 visar som exempel en för ett visst magasin beräknad minimizon som funktion av den förhandenvarande tillrinningen den 1 dec. och *fig. 22* visar hur hela gränskurvan kan spaltas upp i flera kurvor. I verkligheten får emellertid detta samband rätt liten betydelse, eftersom tillrinningen i regel ligger i närheten av medelvärdet, när passage över gränskurvan är aktuell. När tillrinningen antager extremvärden, är man i regel långt på ena eller andra sidan av gränsen.

Det torde finnas möjligheter att nå ännu bättre resultat genom att betrakta avsänkningen som en av nederbörd och temperatur under lång tid tillbaka betingad fördelning:

$$E\left[y \,\middle|\, x_1 x_2 \ldots x_k \right] = \alpha + \beta_1 (x_1 - \bar{x}_1) + \beta_2 (x_2 - \bar{x}_2) + \ldots + \beta_k (x_k - \bar{x}_k)$$

Beräkningen av uppskattningar för koefficienterna är ganska enkel men numeriskt mycket omfattande.

Man kan komma ifrån alla dessa korrelationsberäkningar och förmodligen nå minst lika bra resultat genom att i magasinsinnehållet inräkna det vatten, som finns i oreglerade sjöar, mossar, kärr etc. Dessa vattenkvantiteter torde kunna bestämmas genom observationer i ett fåtal referenssjöar. Vid beräkningen av minimizonen får man taga hänsyn till det vid vårflödets början kvarvarande vattnet i dessa magasin, men det erbjuder ingen större svårighet. Med detta vinner man också att förutsättningarna för avsänkningens normalfördelning bli än bättre uppfyllda.

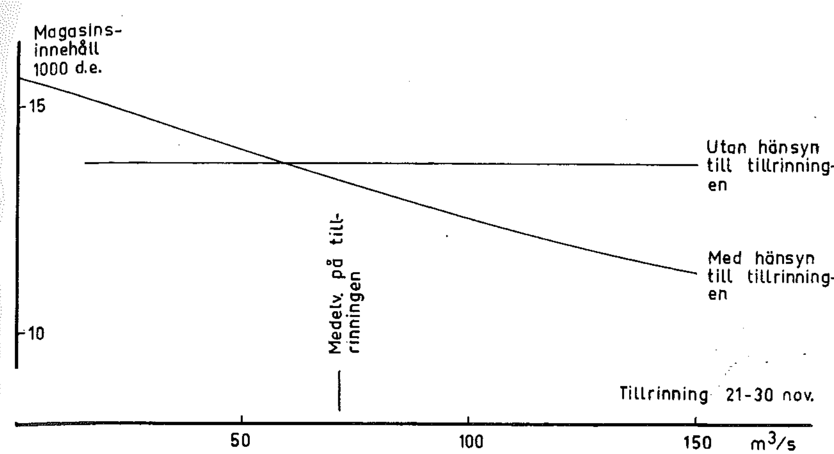

Fig. 21. Min.-zonens omfattning den 1 dec. som funktion av tillrinningen 21—30 nov.

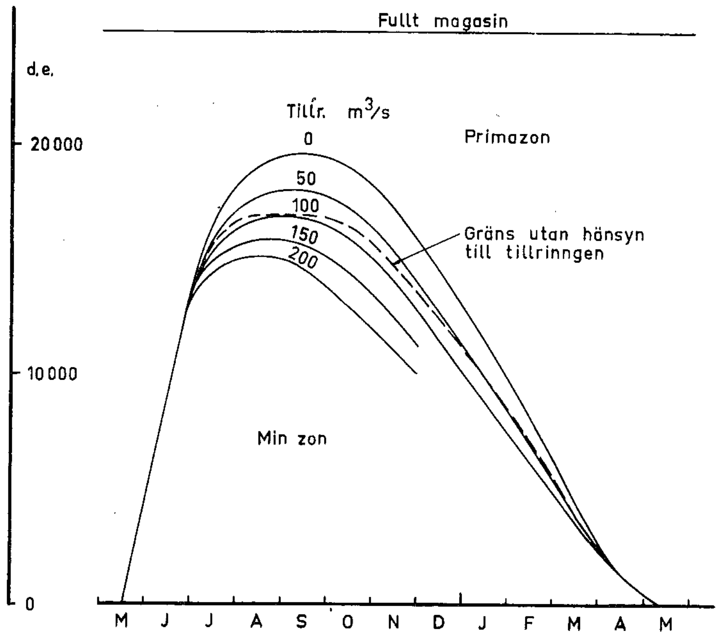

Fig. 22. Min.-zon som funktion av tillrinningen.

Bilaga 3

Bestämning av gränskurvan för sekundazonen och pris på sista kWh. Förutsättningar enligt A I. Ett vattenkraftverk och ett långtidsmagasin

Kraftverket tillmätes en viss bruttofallhöjd. Kraftverkets totalverkningsgrad är enligt A I konstant och betecknas med η_o. Magasinsfyllnaden mätes i naturenergi, som betecknas med W. Mot naturenergien W svarar då en av vattenkraftverket avgiven elektrisk energi av η_o W.

Om man för systemet har en tappningsplan sådan som fig. 4 visar och vill kontrollera, att gränskurvan för sekundazonen är riktig, kan till grund för kontrollen läggas följande resonemang.

Man tar en kort sträcka Δb av gränskurvan och flyttar den exempelvis nedåt stycket Δc. Se *fig. 23*. Om gränskurvan är riktig, bör tydligen vinsten genom ändringen vara noll. Hela gränskurvan är riktig, om vinsten är noll om man gör en dylik flyttning av en kort sträcka vilken som helst av gränskurvan.

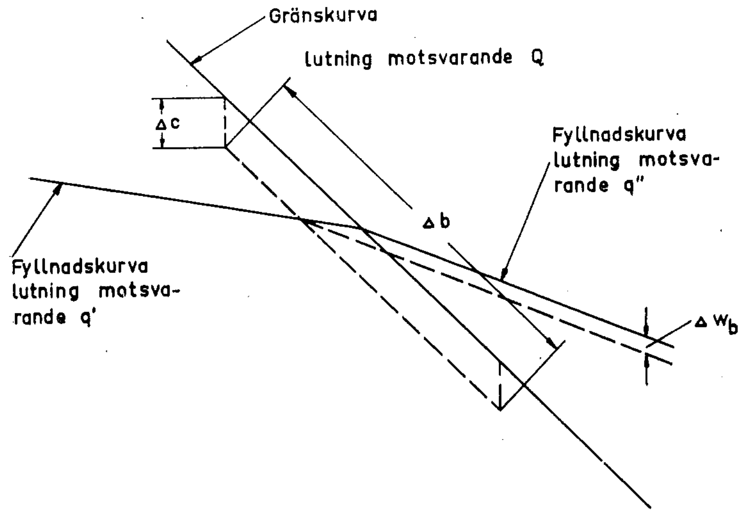

Fig. 23.

För att få fram vinsten måste man bestämma, huru flyttningen av sträckan Δb stycket Δc inverkar på magasinsfyllnadskurvorna.

Flyttningen av Δb påverkar endast de fyllnadskurvor, som komma i beröring med sträckan Δb. Dessa kunna uppdelas i tre olika slag.

1. Fyllnadskurvor som skära sträckan Δb. Se fig. 23.

Det är lätt att visa, att en sådan fyllnadskurva, sedan den skurit Δb, flyttas stycket ΔW_b nedåt genom att Δb flyttats stycket Δc nedåt, där ΔW_b bestämmes av ekvationen:

$$\Delta W_b = \frac{q'' - q'}{Q - q'} \Delta c \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad (1)$$

där

q' är den vattenföring, som tages ur magasinet (= tappningen ur magasinet — nyttiga tillrinningen till magasinet) innan fyllnadskurvan passerat Δb

q'' är samma vattenföring sedan fyllnadskurvan passerat Δb

Q är den vattenföring, som skulle tagas ur magasinet för att fyllnadskurvan skulle följa gränskurvan.

2. Fyllnadskurvor, som följa gränskurvan före sträckan Δb och lämna gränskurvan under sträckan Δb.

I detta fall flyttas tydligen fyllnadskurvan nedåt stycket:

$$\Delta W_b = \Delta c$$

3. Fyllnadskurvor, som följa gränskurvan eller gå in till denna under sträckan Δb för att sedan följa gränskurvan efter sträckan Δb.

Fyllnadskurvan kommer i detta fall tydligen icke att påverkas av att Δb flyttas. Man får:

$$\Delta W_b = 0$$

Om en magasinsfyllnadskurva erhållit en viss flyttning, i detta fall nedåt, så behåller fyllnadskurvan denna flyttning oförändrad, till dess den nästa gång passerar en gränskurva. Vid varje passage av en gränskurva reduceras storleken av flyttningen. Är flyttningen nedåt $\Delta W'$ innan fyllnadskurvan nått gränskurvan och $\Delta W''$ sedan den passerat gränskurvan, så får man: Se *fig. 24*.

1. Om fyllnadskurvan skär gränskurvan:

$$\Delta W'' = \frac{Q - q''}{Q - q'} \Delta W' \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad (2)$$

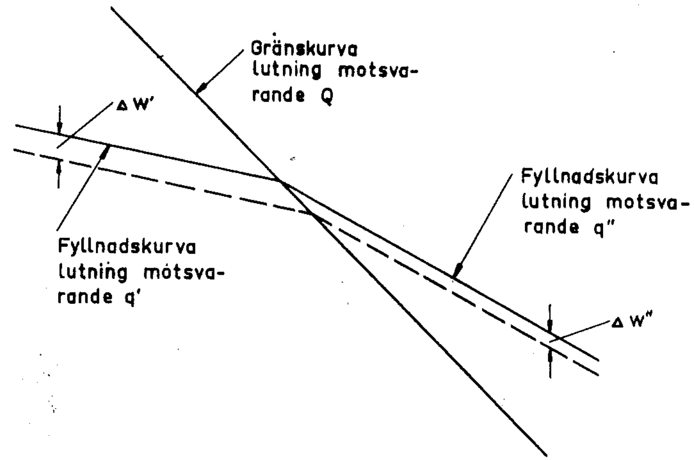

Fig. 24.

2. Om fyllnadskurvan någon sträcka följer gränskurvan:

$$\Delta W'' = 0$$

Reduktionen $\Delta W_å$ vid gränskurvan mot minimizonen resp. ΔW_s vid gränskurvan mot sekundazonen blir då

1. Om fyllnadskurvan skär gränskurvan:

$$\Delta W_å \text{ resp. } \Delta W_s = \frac{q'' - q'}{Q - q'} \Delta W' \ldots\ldots\ldots \quad (3)$$

2. Om fyllnadskurvan någon sträcka följer gränskurvan:

$$\Delta W_å \text{ resp. } \Delta W_s = \Delta W'$$

Om fyllnadskurvan går till övre magasinsgränsen blir:

$$\Delta W'' = 0$$

och överrinningen minskas med $\Delta W_ö$ där:

$$\Delta W_ö = \Delta W'$$

Vi införa beteckningarna:

$k_å$ rörliga kostnaden för ångkraften i öre/kWh

k_s priset på sekundakraften i öre/kWh

Man får ta ut de m st. magasinsfyllnadskurvor, som passera stycket Δb. För dessa m kurvor ökas vid Δb uttagningen av naturenergi totalt med $\Sigma \Delta W_b$ och produktionen av sekundakraft med totalt $\eta_o \, \Sigma \Delta W_b$ med ett värde av $\eta_o \, k_s \, \Sigma \Delta W_b$. Man får följa de m fyllnadskurvorna framåt till $\Delta W'' = 0$ och bestämma storleken av alla tappningsminskningarna $\Delta W_å$ och ΔW_s vid gränskurvan för minimi- resp. sekundazonen. För alla m fyllnadskurvorna får man vid gränskurvan för minimizonen en total ökning av ångkraftproduktionen av $\eta_o \, \Sigma \Delta W_å$ för en kostnad $\eta_o \, k_å \, \Sigma \Delta W_å$ och vid gränskurvan för sekundazonen en total minskning av produktionen av sekundakraft av $\eta_o \, \Sigma \Delta W_s$ motsvarande en förlust av $\eta_o \, k_s \, \Sigma \Delta W_s$.

Då vinsten av flyttningen av Δb skall vara noll blir:

$$\eta_o \cdot k_s \, \Sigma \Delta W_b - \eta_o \cdot k_å \, \Sigma \Delta W_å - \eta_o \cdot k_s \, \Sigma \Delta W_s = 0$$

$$k_s \, \Sigma \Delta W_b - k_å \, \Sigma \Delta W_å - k_s \, \Sigma \Delta W_s = 0 \ldots\ldots \quad (4)$$

Om man vill göra en bestämning av priset på sista kWh i olika punkter av tappningsplanen, bör man kunna dela upp hela planen med vertikala linjer på lika avstånd från varandra och sedan dela upp varje sådan linje i lika stora stycken. För ett sådant litet stycke Δa bestämmes priset på sista kWh genom att välja ut de m fyllnadskurvor, som passera stycket Δa, och förutsätta en för alla m kurvorna lika stor tappningsökning ΔW_a, då de passera Δa. Man får sedan följa de m kurvorna framåt och bestämma tappningsminskningarna $\Delta W_å$ och ΔW_s vid gränskurvan för minimi- resp. sekundazonen. På samma sätt som vid härledningen av formel (1) under A II c får man:

$$\eta_o \cdot k_{oa} \Sigma \Delta W_a = \eta_o \cdot k_å \, \Sigma \Delta W_å + \eta_o \cdot k_s \, \Sigma \Delta W_s$$

där k_{oa} är priset på sista kWh vid den korta sträckan Δa:

$$m \cdot k_{oa} \Delta W_a = k_å \, \Sigma \Delta W_å + k_s \, \Sigma \Delta W_s \ldots\ldots \quad (5)$$

På gränskurvan för sekundazonen bör priset på sista kWh vara k_s, ty om man börjar leveransen av sekundakraft, innan priset gått ned till k_s, gör man en förlust, och om man väntar med att leverera sekundakraft, tills priset gått ned under k_s, gör man också en förlust.

Under vissa förutsättningar, som beröras närmare nedan, kan man även förutsätta, att priset på sista kWh på gränskurvan för minimizonen är $k_å$.

I ovanstående härledningar av formlerna (4) och (5) gör man så att man, då en fyllnadskurva passerar gränskurvan för exempelvis sekundazonen, delar upp $\Delta W'$ i två delar ΔW_s och $\Delta W''$. Å ΔW_s sätter man direkt ett värde per kWh lika med $k_s\ \eta_o$. Värdet av kvantiteten $\Delta W''$ bestämmes av den vidare utvecklingen av fyllnadskurvan. Kvantiteterna ΔW_s och $\Delta W''$ äro, då uppdelningen göres, båda tillgängliga i en punkt på gränskurvan för sekundazonen, och där är kraftvärdet k_s. De båda kvantiteterna böra således ha samma värde per kWh. Den vidare utvecklingen av fyllnadskurvan borde då även kunna bestämma värdet av ΔW_s. Man borde således kunna låta fyllnadskurvan passera gränskurvan utan att göra någon reduktion i $\Delta W'$.

Då en fyllnadskurva passerar gränskurvan för minimizonen, borde man omvänt icke behöva bestämma värdet av $\Delta W''$ med hjälp av den vidare utvecklingen av fyllnadskurvan. Man borde även kunna sätta värdet per kWh av $\Delta W''$ lika med $\eta_o\ k_å$. Detta innebär, att man sätter värdet å hela $\Delta W'$ lika med $\eta_o\ k_å\ \Delta W'$ och att man icke behöver följa fyllnadskurvan längre än till gränskurvan för minimizonen.

Genomför man detta räknesätt vid bestämningen av priset på sista kWh blir i formel (5) $\Delta W_s = 0 \quad \Delta W_å = \Delta W_a$

$$m \cdot k_{oa} \Delta W_a = k_å \cdot p \Delta W_a + k_s \cdot 0$$

där p är antalet kurvor som först gå till gränskurvan för minimizonen (och ej till överrinning).

$$k_{oa} = \frac{p}{m} k_å \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad (6)$$

Man är tillbaka till formel (1) under A II c.

Värderingen av kraften är i själva verket mycket mera komplicerad än ovanstående enkla resonemang ge vid handen, och det är lätt att visa, att det finnes motsägelser och svårigheter i ovanstående beräkningssätt.

Om man räknar med formel (6), får man en diskontinuitet i priset på sista kWh vid gränskurvan för minimizonen. Om man tar en punkt omedelbart ovanför kurvan, så bestäms priset på sista kWh i denna punkt dels av ett flertal magasinsfyllnadskurvor, som gå till gränskurvan för minimizonen och där få ett värde å ΔW_a lika med $\eta_o \cdot k_å\ \Delta W_a$ dels av en del fyllnadskurvor, som gå till övre magasinsgränsen och där få ett värde å ΔW_a lika med 0. Då antalet fyllnadskurvor, som gå till övre magasinsgränsen, jämfört med antalet kurvor, som gå till gränskurvan för minimizonen, i regel icke är så litet, att det kan försummas, kan priset på sista kWh i punkten i fråga bli märkbart mindre än $k_å$ och man får således en diskontinuitet i priset.

På liknande sätt kan man visa, att formel (5) oftast ger en diskontinuitet i priset på sista kWh vid gränskurvan för sekundazonen. I regel är priset omedelbart ovanför gränskurvan märkbart lägre och priset omedelbart nedanför kurvan märkbart högre än k_s. Formel (6) kan tydligen icke ge någon diskontinuitet i priset på sista kWh vid gränskurvan för sekundazonen. Formlerna (5) och (6) ge således olika resultat.

Att så är fallet synes närmast bero på själva utgångspunkterna för tappningsbestämningen och i första hand på att ingen hänsyn tagits till den förhandenvarande tillrinningen. Tar man hänsyn till tillrinningen på så sätt, att man gör ett tillägg till magasinsfyllnaden, då tillrinningen är stor, och gör ett avdrag i magasinsfyllnaden, då tillrinningen är liten, och låter ändringen variera med tillrinningen, torde man kunna uppnå en förbättring i tappningen och en bättre överensstämmelse mellan formlerna (5) och (6).

Resonemanget under A II b går närmast ut på att gränskurvan för minimizonen är en kurva, som avser att säkerställa leveransen av primakraft i stort sett oavsett de ekonomiska konsekvenserna. Med denna utgångspunkt torde resultatet bli, att gränskurvans läge påverkas av en tappningsändring ovanför gränskurvan. Det kan därför ifrågasättas, om de på ovan angivna sätt beräknade värdena å $\Sigma \Delta W_å$ äro riktiga. Eventuella fel torde emellertid vara rätt måttliga.

Man kan emellertid lägga en ekonomisk avvägning till grund även för bestämningen av gränskurvan för minimizonen. Om man flyttar kurvan exempelvis nedåt ett litet stycke, så medför detta en minskad ångkraftproduktion men en ökad ransoneringsrisk. Om gränskurvan för minimizonen är baserad på en ekonomisk avvägning mellan kostnaden för ångkraftkörningen och kostnaden för en nedskärning av primabelastningen, så kan man göra en liten flyttning av gränskurvan utan att det ekonomiska resultatet ändras. Man kan då även göra en liten tappningsändring ovanför gränskurvan för minimizonen och beräkna den ekonomiska konsekvensen härav utan att göra någon ändring av gränskurvan.

Med gränskurvan för minimizonen baserad på en ekonomisk avvägning finnes det även förutsättningar för en beräkning av priset på sista kWh i minimizonen.

Med det begränsade statistiska material, som är tillgängligt, får man bara en eller annan fyllnadskurva, som går till ransonering. Man kan därför icke bestämma gränskurvan för minimizonen på samma sätt som man enligt ovanstående bestämmer gränskurvan för sekundazonen. Man får även svårigheter, om man skall bestämma priset på sista kWh i minimizonen.

Tillägg till bilaga 3

(Bör läsas i samband med B IV)

Bestämningen av vattenvärdet. Ett vattenkraftverk med variabel verkningsgrad. Variabel belastning

Vid uppställandet av ekvation (5) har förutsatts, att vattenkraftverket har konstant verkningsgrad. Om vattenkraftverkets verkningsgrad icke är konstant, kan man i stället för $\eta_o\, k_{oa}$ införa vattenvärdet $\varkappa_a$, i stället för $\eta_o\, k_å$ vattenvärdet $\varkappa_å$ och i stället för $\eta_o\, k_s$ vattenvärdet $\varkappa_s$. Vattenvärdet $\varkappa_a$ i utgångspunkten är detsamma för alla m magasinsfyllnadskurvorna.

Man får då i stället för ekvation (5) följande ekvation:

$$m \cdot \varkappa_a \cdot \triangle W_a = \Sigma \varkappa_å \cdot \triangle W_å + \Sigma \varkappa_s \cdot \triangle W_s \; \ldots\ldots \quad (7)$$

Kontroll av tappningen från ett magasin. Flera vattenkraftverk med variabel verkningsgrad och flera magasin. Variabel belastning

Tappningen av ett långtidsmagasin skall kontrolleras.

Vi förutsätta, att vi räknat igenom en följd av gångna vattenår och uppgjort kurvor för magasinsfyllnaden och vattenvärdet i det ifrågavarande magasinet samt för totala magasinsinnehållet.

Tappningen kontrolleras för utgångspunkt efter utgångspunkt. En utgångspunkt bestämmes av:

1. tidpunkten t_1 på året
2. magasinsfyllnaden i det ifrågavarande magasinet
3. totala magasinsfyllnaden

I följden av gångna vattenår välja vi ut de m år, då utgångspunktens värden äro uppfyllda.

Från utgångspunkten i tidpunkten t_1 följa vi magasinsfyllnadskurvorna för de m åren för det ifrågavarande magasinet fram till en senare tidpunkt t_2 och finna då att:

q fyllnadskurvor mellan t_1 och t_2 gå till överrinning,
r kurvor mellan t_1 och t_2 gå till nedre magasinsgränsen,
s kurvor mellan t_1 och t_2 varken gå till övre eller nedre magasinsgränsen.

Om en fyllnadskurva går till magasinsgräns mer än en gång mellan t_1 och t_2, skall endast första gången detta sker medräknas.

Tydligen är

$$m = q + r + s$$

Vattenvärdet i det ifrågavarande magasinet må vara:

$\varkappa_1$ för alla m åren i tidpunkten t_1. Vattenvärdet är detsamma alla m åren, emedan vattensituationen är densamma,

0 då de q fyllnadskurvorna för det ifrågavarande magasinet nå övre magasinsgränsen,

$\varkappa_{Nn}$ då den n:te av de r kurvorna når nedre magasinsgränsen,

$\varkappa_{2n}$ för den n:te av de s kurvorna i tidpunkten t_2.

För alla m åren ökas tappningen ur det ifrågavarande magasinét i tidpunkten t_1 med ΔW. Tappningen hålles sedan oförändrad tills magasinsfyllnadskurvorna nå övre eller nedre magasinsgränsen, eller om detta icke är fallet, till tidpunkten t_2, då tappningen minskas med ΔW.

Genom ökningen av tappningen med ΔW m gånger i tidpunkten t_1 uppstår vinsten

$$m \cdot \varkappa_1 \cdot \triangle W$$

Då de r fyllnadskurvorna för det ifrågavarande magasinet nå nedre magasinsgränsen, uppstår förlusten:

$$\sum_{1-r} \varkappa_{Nn} \cdot \triangle W$$

De s åren uppstår i tidpunkten t_2 förlusten:

$$\sum_{1-s} \varkappa_{2n} \cdot \triangle W$$

Om tappningen av magasinet är riktig, skall vinsten genom den lilla tappningsändringen vara noll, och man får:

$$m \cdot \varkappa_1 \cdot \triangle W = \sum_{1-r} \varkappa_{Nn} \cdot \triangle W + \sum_{1-s} \varkappa_{2n} \cdot \triangle W$$

$$m \cdot \varkappa_1 = \sum_{1-r} \varkappa_{Nn} + \sum_{1-s} \varkappa_{2n} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad (1)$$

Om alla m fyllnadskurvorna gått till övre eller nedre magasinsgränsen före tidpunkten t_2 får man:

$$m \cdot \varkappa_1 = \sum_{1-r} \varkappa_{Nn} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad (2)$$

Om ingen fyllnadskurva gått till övre eller nedre magasinsgränsen före tidpunkten t_2 får man:

$$m \cdot \varkappa_1 = \sum_{1-m} \varkappa_{2n} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad (3)$$

Om man avser att fullständigt tömma ett magasin i slutet av tömningsperioden, kan man få vissa oregelbundenheter i tappningen på grund av att man icke vet, när vårfloden kommer. Man bör bestämma $\varkappa_{Nn}$ så, att man tar vattenvärdet, innan dessa oregelbundenheter börja.

Ovanstående förutsätter, att man på det sätt som nämnts i bil. 3 baserat gränskurvan för minimizonen på en ekonomisk avvägning och att man har ett pris på sista kWh även i minimizonen. Man får då även med de i bil. 3 nämnda svårigheterna på grund av att endast en eller annan fyllnadskurva går till ransonering.

621.2.01
621.293

STAGE, SVEN: *Utnyttjningen av vattenkraftverkens långtidsmagasin.* Svenska Vattenkraftfören. publ. 464 (1957:9). Tappningen av långtidsmagasinen anpassas efter primabelastningens storlek och tillgången till ångeffekt och sekundabelastning samt rörliga kostnaden för ångkraften och priset på sekundakraften. Först göras vissa förenklande förutsättningar och uppgöres en preliminär tappningsplan. Det visas huru denna uppgöres för ett enkelt system med endast ett vattenkraftverk och ett långtidsmagasin. Det visas huru tappningen måste anpassas efter den tillgängliga ångeffekten. Vidare anges en metod att värdera kraften och att bestämma sekundabelastningens utnyttjning. Metoderna utvidgas sedan till att omfatta system med vattenkraftverk och magasin i flera vattendrag. Det anges vidare huru man kan minska inverkan av de approximationer som gjorts för att få fram den preliminära tappningsplanen och det anges huru man skall räkna fram det med belastningen varierande kraftvärdet under veckan. Vissa allmänna kriterier angående tappningsfördelningen anges och vissa synpunkter på det praktiska genomförandet av körningen lämnas.