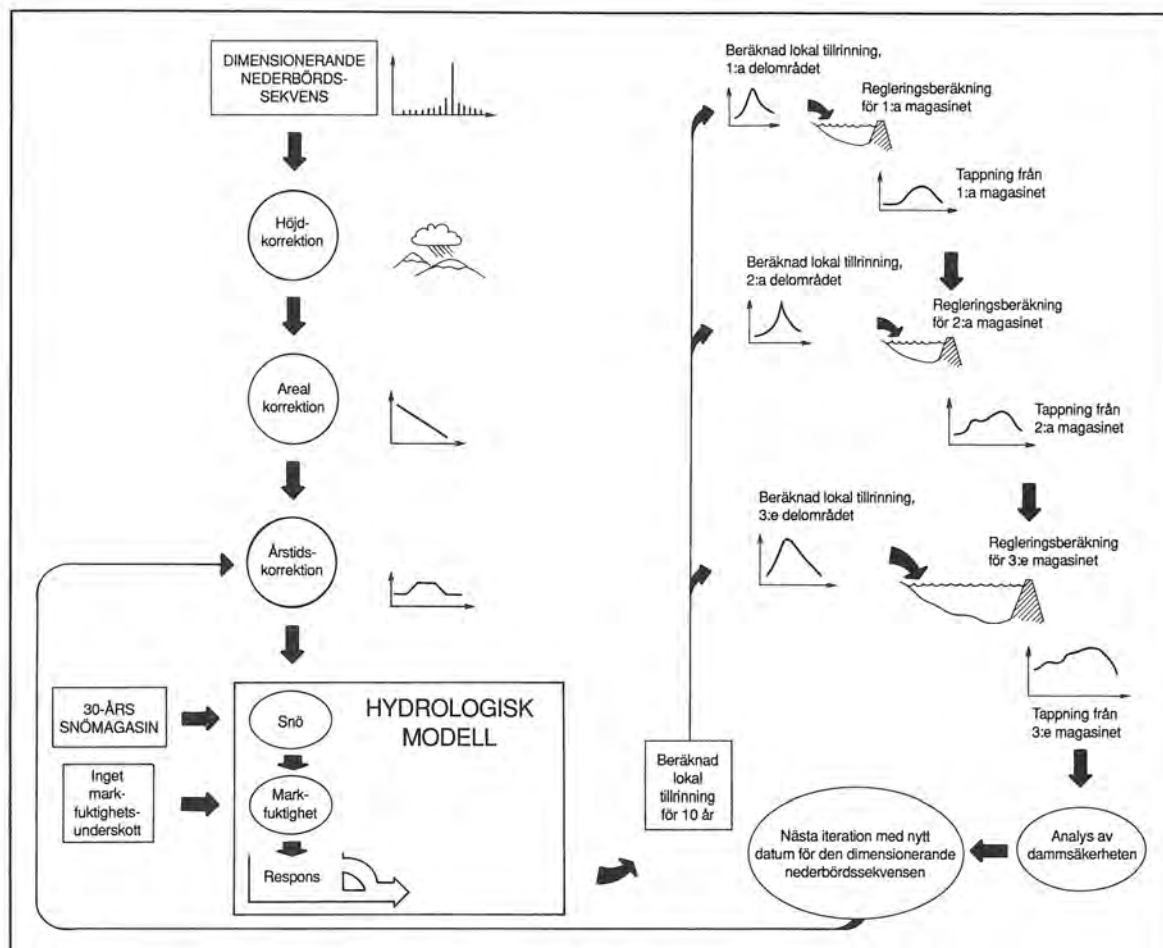




## KÄNSLIGHETSANALYS AV FLÖDESKOMMITTENS RIKTLINJER FÖR DIMENSIONERING AV HEL ÄLV

SMHI

Joakim Harlin  
Göran Lindström  
Mikael Sundby

Vattenfall Hydropower AB

Claes-Olof Brandesten

Projektet är finansierat av Vattenregleringsföretagens Samarbetsorgan,  
Hydrologiskt Utvecklingsarbete (VASO/HUVA)



## **KÄNSLIGHETSANALYS AV FLÖDESKOMMITTÉNS RIKTLINJER FÖR DIMENSIONERING AV HEL ÄLV**

**SMHI**

Joakim Harlin  
Göran Lindström  
Mikael Sundby

**Vattenfall Hydropower AB**

Claes-Olof Brandesten

## INNEHÅLLSFÖRTECKNING

|                          | <u>Sid.</u> |
|--------------------------|-------------|
| Förord .....             | 1           |
| Bakgrund .....           | 1           |
| Målsättning .....        | 1           |
| Studerade områden .....  | 1           |
| Studerade faktorer ..... | 2           |
| Slutsatser .....         | 2           |
| Slutord .....            | 3           |
| Referenser .....         | 4           |

Bilaga 1: Känslighetsanalys av dimensionerande flödesutveckling i Ljusnan-systemet.

Bilaga 2: Känslighetsanalys av dimensionerande flödesutveckling i Umeälven.

Bilaga 3: Flödesdimensionering i Luleälven - känslighetsanalys av de nya svenska riktlinjerna.

## FÖRORD

Denna rapport sammanfattar arbetet inom VASO/HUVA-projektet "Känslighetsanalys av Flödeskommitténs riktlinjer för dimensionering av hel älv". Projektet har varit uppdelat mellan SMHI och Vattenfall Hydropower AB. SMHI har genomfört studierna av Ljusnan och Umeälven, och Vattenfall Hydropower AB har ansvarat för beräkningarna i Luleälven.

Rapporten innehåller dels en gemensam sammanfattning av resultaten för alla tre studerade älvar, dels tre bilagor, där resultaten för var och en av älvarna redovisas i detalj. Bilaga 1, som redovisar arbetet i Ljusnan, har publicerats i den internationella tidskriften "Hydrological Sciences Journal". Detta arbete har även redovisats i form av en poster vid XX General Assembly IUGG-IAHS Symposia, Wien 1991. Bilaga 3 har presenterats och publicerats i samband med Nordisk Hydrologisk Konferens NHK-92 i Alta, Norge, 1992.

En hel del programmeringsarbete har krävts för att göra de mycket omfattande beräkningarna möjliga. För studierna av Ljusnan och Luleälven har systemet HBV DIM 1.6 använts medan för Umeälven har det nya IHMS systemet använts.

## BAKGRUND

Nya riktlinjer för dimensionering av dammar och utskov i Sverige presenterades av Flödeskommittén under 1990 (Flödeskommittén, 1990). Arbeta med att räkna igenom de svenska vattenkraftmagasinen enligt de nya riktlinjerna pågår. Detta arbete kommer att leda fram till olika dammsäkerhetshöjande åtgärdsförslag.

De av Flödeskommittén föreslagna riktlinjerna för flödesdimensionering är detaljerade både vad beträffar indata och simuleringsförfarande. Det finns dock vid tillämpningen av riktlinjerna moment, som påverkas av subjektivitet. En fråga av intresse är vilka moment, som är viktigast vid tillämpning av riktlinjerna och hur dessa förhåller sig till de av Flödeskommittén fastlagda faktorema.

## MÅLSÄTTNING

Avsikten är att identifiera och genom känslighetsanalys studera de viktigaste faktorema av Flödeskommitténs riktlinjer för vattenståndsutveckling i hel älv. Resultaten av analysen kan utnyttjas för att minska spridningen i resultaten vid tillämpning av riktlinjerna samt för att identifiera avgörande antaganden, vilka kan vara värda fortsatta studier.

## STUDERADE OMRÅDEN

Ljusnan, Umeälven och Luleälven har studerats.

Ljusnan simulerades med 16 delområden och HBV-modellen kalibrerades för 5 punkter. Magasinen Lossen, Svegssjön och Arbråsjöarna studerades i känslighetsanalysen.

Umeälvens avrinningsområde indelades i 15 delområden, och HBV-modellen kalibrerades i 6 punkter. Två av de totalt sju ingående dammarna studerades. Dessa var magasin-  
en vid Ajaure och Storuman.

Luleälven modellerades som 35 delområden och HBV-modellen kalibrerades i 16 punkter. För Luleälven gjordes känslighetsanalysen för 5 magasin. Dessa var Suorva, Tjaktjajaure, Messaure, Letsi samt Boden.

## STUDERADE FAKTORER

Tre huvudgrupper av faktorer har studerats. Dessa var:

1. Av Flödeskommittén fastlagda meteorologiska och hydrologiska faktorer.
2. Parametrar i den hydrologiska modellen.
3. Regleringsstrategier i älven och utskovskapacitet vid dammarna.

Inledningsvis gjordes en referenskörning, där Flödeskommitténs riktlinjer följdes i detalj. Sedan ändrades en faktor i taget, med de övriga faktorerna lika som vid referenskörningen. Relationen mellan de nya resultaten och referenskörningen anger sedan den relativa känsligheten av den studerade faktorn.

Vidare studerades skillnaderna mellan vår- och höstfallen samt lokal och total dimensionering till en damm inom ett system.

## SLUTSATSER

De utförda beräkningarna visar att det är svårt att i förväg bedöma de sammanlagda effekterna av extrem nederbörd, snösmältning och reglering i ett vattenkraftssystem. Av denna studie kan man exempelvis inte dra några generella slutsatser om vilken situation som i allmänhet är den mest kritiska: vår eller höst. I Luleälvens övre del var våren värst, medan hösten var mer kritisk längre nedströms. I nedre Ljusnan fanns däremot våren vara mycket mer kritisk än hösten. Genomgående blev dock den totala dimensioneringen värre än den lokala. Den lägre nederbördsintensiteten vid den totala beräkningen, p.g.a. arealreduktionsfaktorn, uppvägdes med andra ord mer än väl av den ökande arealen som träffas av extrem nederbörd. I både Ljusnan och Luleälven ökade problemen nedströms i älven, medan Storuman dämpade upp flodvågen uppströms ifrån i Umeälven.

I allmänhet rådde ett ganska tydligt samband mellan högsta tillrinning och högsta vattenstånd, åtminstone efter det att magasinet hade fyllts. Denna kunskap kan användas till att få en uppfattning om hur en förändring inverkar på högsta vattenståndet, om man

vet hur effekten blir på tillrinningsmax. Därigenom fås en koppling till den kompletterande känslighetsanalys av dimensionerande tillrinningar till Tjaktjajaure, Torrön, Trängslet och Blankaström som gjordes av Lindström och Harlin (1992).

De dimensionerande vattenstånden var känsliga för nederbördsmängd och snötäckets vatteninnehåll vid beräkningens start. Båda dessa faktorer har emellertid slagits fast av Flödeskommittén. Nederbördsmängden är exakt specificerad och påverkas ej av subjektivitet vid tillämpning av riktlinjerna. Däremot baseras snömängden på frekvensanalys av modellberäknat snötäcke. Därför finns ett visst utrymme för subjektivitet i denna beräkning, då olika modeller kan tillämpas och kvaliteten i kalibrering kan varieras.

Av de undersökta modellparametrarna hade  $K_0$ , som styr modellens uppförande vid höga flöden, störst betydelse. Betydelsen minskade dock i någon mån nedströms, och hade till exempel i Luleälvens nedre delar en ganska obetydlig inverkan på det slutliga vattenståndet. Beskrivningen av rinntid i älvsträckor hade tämligen liten inverkan på resultatet. Det visade sig till och med att ökad rinntid inom ett delområde, kunde öka vattenståndet nedströms, p g a superposition av lokal tillrinning och tappningen från uppströms liggande magasin.

Utskovskapaciteten är av avgörande betydelse för vattenståndsutvecklingen i ett magasin, och en liten ökning kan väsentligen förbättra situationen för den aktuella dammen, men kan å andra sidan förvärra situationen nedströms. Resultaten illustrerar också betydelsen av ett eventuellt bortfall i tappningsförmåga. Den exakta formuleringen av regleringsstrategin hade mindre betydelse än väntat. Detta gäller t.ex. startvattenstånd och förtappning, som bara hade betydelse i stora magasin.

Den av Flödeskommittén föreslagna metoden för beräkning av dimensionerande flöde har flera fördelar. Dels kan man skapa kritiska men tänkbara kombinationer av flödeskapande faktorer, och dels kan man koppla dessa till regleringsstrategier över året. Slutligen kan man pröva effekten av olika åtgärder, t.ex. en ökning av utskovskapaciteten eller en ändring av regleringen i uppströms liggande magasin. En känslighetsanalys av detta slag ger vägledning om vilka moment i en beräkning som är mest kritiska, och därför viktigt att göra noggrant. Analysen pekar även på vilka antaganden i riktlinjerna som är de viktigaste och därmed värda eventuellt fortsatta studier.

De dimensionerande vattenstånden beror av flera faktorer, både sådana som specificeras av Flödeskommitténs riktlinjer och subjektiva moment i det praktiska arbetet. De viktigaste faktorerna är dock fastslagna av riktlinjerna. Studien visar att riktlinjerna är robusta, i den meningen att i de flesta dammarna erhöles små skillnader i dimensionerande vattenstånd vid variationer i beräkningsfaktorerna.

## SLUTORD

Detta projekt har finansierats av Vattenregleringsföretagens Samarbetsorgan/Hydrologiskt Utvecklingsarbete, VASO/HUVA. Författarna tackar alla, som bidragit till denna rapport. Vera Kuylenstierna har ansvarat för ordbehandling och layout.

## REFERENSER

Flödeskommittén (1990). Riktlinjer för bestämning av dimensionerande flöden för dammanläggningar. Slutrapport. Vattenfall, Svenska Kraftverksföreningen, SMHI.

Lindström, G., and Harlin, J. (1992)

Spillway design floods in Sweden. II: Applications and sensitivity analysis. Hydrological Sciences Journal, Vol. 31, No. 5.

## KÄNSLIGHETSANALYS AV DIMENSIONERANDE FLÖDES- UTVECKLING I LJUSNAN-SYSTEMET

Göran Lindström, Joakim Harlin, SMHI

### SAMMANFATTNING

En känslighetsanalys av Flödeskommitténs riktlinjer för beräkning av dimensionerande flöden tillämpade på flermagasinssystemet i Ljusnan redovisas. Simuleringarna har gjorts med hjälp av ett modellsystem baserat på HBV-modellen, som kompletterats med regleringsstrategier. Det 14 560 km<sup>2</sup> stora avrinningsområdet delades in i 16 delområden. Vid tre kraftverksdammar studerades känsligheten hos de dimensionerande vattennivåerna med hänsyn tagen till ändringar i de föreskrivna riktlinjerna, regleringsstrategier och modellparametrar. Förändringar i den dimensionerande nederbörden, snömagasinet eller utskovskapaciteten hade betydande inverkan på högsta vattenståndet i alla tre magasinerna. Ändringar i regleringsstrategierna hade mindre effekt. Den högsta recessionsparametern i HBV-modellen,  $K_0$ , hade stor inverkan på de dimensionerande vattennivåerna. Efter det att magasinet fyllts, syntes ett klart samband mellan högsta tillrinning och maximal vattennivå. Studien visar, att det är svårt att förutbestämma den integrerade effekten av extrem nederbörd, snösmältning, markfuktighetstillstånd och reglering i ett system.

### INLEDNING

Nya riktlinjer för beräkning av dimensionerande flöden i Sverige har nyligen föreslagits av Flödeskommittén (1990). Dessa riktlinjer rekommenderar användningen av en hydrologisk modell för simulering av dimensionerande flöden. Riktlinjerna baseras på en uppsättning dimensionerande nederbördssekvenser och ett snömagasin med en återkomsttid på 30 år. Vid simulering av dimensionerande flöden införs nederbördssekvensen successivt på alla möjliga datum inom en period av minst 10 års klimatobservationer. En fördel med riktlinjerna är, att de kan tillämpas på ett magasinssystem genom att man utformar en regleringsstrategi för varje magasin i systemet. Alla dammar i ett system måste kunna stå emot de mest kritiska flödena, som simulerats med denna metod.

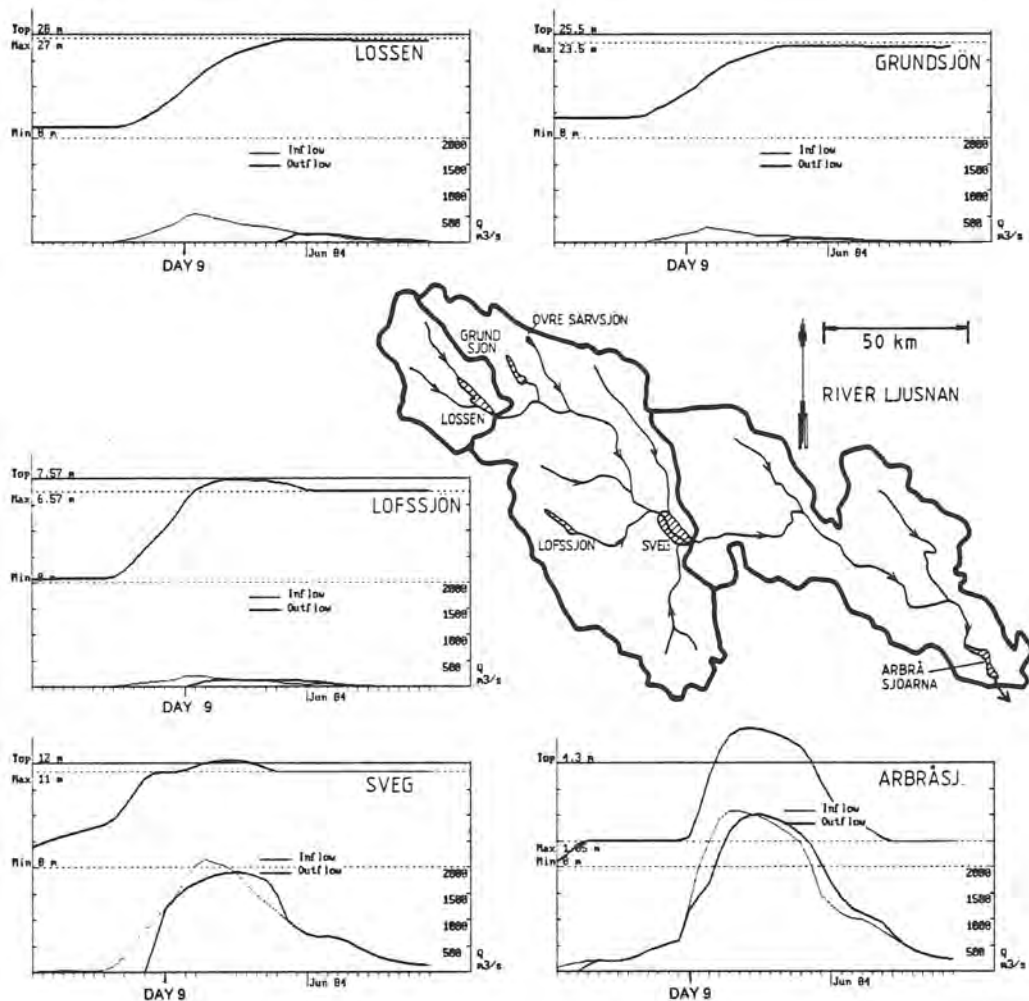
Metoderna för beräkning av dimensionerande flöden och operationell flödeskontroll skiljer sig från land till land och ibland även inom ett land (se t ex ICOLD, 1988 och 1992). Optimeringsmodeller för reglering av system med flera magasin har ofta analyserats och beskrivits i litteraturen (t ex Yeh, 1985, och Unver et al., 1987). Redogörelser för samtidiga simuleringar av dimensionerande flöden i system av reservoarer, såsom denna rapport, är det emellertid svårt att hitta.

Denna studie beskriver riktlinjernas tillämpning i Ljusnan. Känsligheten hos dimensioneringsberäkningarna har sedan studerats med hänsyn till ändringar i de fastställda riktlinjerna, den valda strategin och kalibreringen av den hydrologiska modellen. Målet är att identifiera de viktigaste antagandena och faktorena vid tillämpningen av de nya riktlinjerna för ett magasinssystem.

## METODIK

### Ljusnans avrinningsområde

Dimensioneringsberäkningar har gjorts för tre magasin i Ljusnan: Lossen, Sveg och Arbråsjöarna (figur 1).



**Figur 1.** Ljusnans avrinningsområde och de studerade magasinerna. Vattennivåerna samt tillrinnings- och avrinningskurvor avser det dimensionerande fallet för Arbråsjöarna. Detta fall var även det mest kritiska för Sveg-magasinet. Top = dammkrön, Max = dämningssgräns, Min = sänkningsgräns. DAY 9 avser kulmen i den dimensionerande nederbördssekvensen.

Den totala arean vid utloppet i Östersjön är 19 816 km<sup>2</sup>. Största delen av området är täckt med barrskog, och sjöandelen är 4 %. Avrinningsområdet mottar en årlig regnmängd av 900 mm i det västra fjällområdet och 650 mm i den östra delen av avrinningsområdet. Den årliga evapotranspirationen varierar i medeltal från 200 mm i västra delen till 400 mm i den östra. Det oreglerade flödet i älven har ett tydligt säsongsmönster med stora vårflöden på våren (april och maj), enstaka regnflöden på sommaren och hösten (juni till november) och basflöde under vintern (december till mars). Kraftproduktionen i Ljusnan uppgår till 3.9 TWh under ett normalår och den installerade effekten är ca 750 MW. Förklarande data för de tre avrinningsområdena och magasinerna i studien visas i tabell 1.

Tabell 1. Förklarande data för avrinningsområden och magasin.

| Magasin                                                 | Lossen | Sveg  | Arbrå-sjöarna |
|---------------------------------------------------------|--------|-------|---------------|
| Avrinningsområdets totala area (km <sup>2</sup> )       | 1 353  | 8 490 | 14 560        |
| Lokala avrinningsområdets area (km <sup>2</sup> )       | 1 353  | 5 860 | 6 070         |
| Aktiv magasinvolym (Mm <sup>3</sup> )                   | 500    | 237   | 40            |
| Min. föreskriven tappning (m <sup>3</sup> /s)           | 3      | 0     | 0             |
| Utbyggnadsvattenföring (m <sup>3</sup> /s)              | 60     | 200   | 300           |
| Utskovskapacitet vid dämningssgräns (m <sup>3</sup> /s) | 620    | 1 600 | 830           |

### Regleringsstrategier

Schablonmässiga regleringsstrategier utformades efter samråd med Ljusnans Vattenregleringsföretag. Regleringsstrategier formulerades för alla större magasin i systemet och inte enbart för de tre magasinerna i studien. I enlighet med riktlinjerna skall magasinerna regleras på det sätt som är normalt, då ett stort snömagasin föreligger. Förekomster av extrem regnnederbörd antas emellertid inte vara förutsägbara.

Vid dimensioneringsberäkningarnas början antogs alla magasin vara sänkta till lägsta medelnivå vid vårflodens början. Dessa nivåer var baserade på ca 10 till 20 års observationer. Min-tappning följdes tills vattennivån nådde en viss höjd, ovanför vilken kraftproduktionen startades och utskoven gradvis öppnades. Denna nivå sattes i de flesta magasinerna till en meter nedom dämningssgränsen. Utskoven antogs vara helt öppna vid dämningssgränsen. Om vattennivån fortfor att stiga till följd av extrem tillrinning, beräknades tappningen i enlighet med avbördningskurvan för helt öppna utskov.

I överensstämmelse med riktlinjerna förutsattes att kraftproduktionen från kraftverken upphörde på dagen för den intensivaste nederbörden, dag nio i dimensioneringssekvensen. Tappningen från turbinerna stoppades därför vid denna dags början. Kraftproduktion förutsattes under sommar och höst, men dammarna antogs vara fyllda till dämningss-

gränsen senast den 1 augusti. Sedan denna nivå uppnåts, sänktes vattnet inte nedanför den igen. I denna redogörelse hänförs allt, som inträffat före den 1 augusti, till våren och händelser efter detta datum till hösten.

Den i texten nämnda högsta dammnivån är det faktiska krönet på vissa dammar och tätjärnans krön i andra. Denna nivå är först och främst avsedd som referens och skall inte uppfattas som en nivå som förorsakar dammbrott. I några simuleringar nådde vattennivåerna ovanför dammens krön. Alla beräkningar gjordes därför under förutsättningen att dessa magasin hade höjts för att tåla dessa höga vattennivåer. Vidare togs ingen hänsyn till möjligheten av nödutskov ("fuse-plugs" m m) i denna studie. Resultaten bör alltså uppfattas kvalitativt snarare än kvantitativt.

### Den hydrologiska modellen

Alla dimensioneringsberäkningar gjordes med hjälp av ett modellsystem baserat på HBV-modellen (Bergström, 1976). För routing genom magasin, som i denna studie, har modellen kompletterats med volymsrouting av tillrinning genom magasin enligt givna regleringsstrategier.

HBV-modellen installerades och kalibrerades för fem punkter i Ljusnans avrinningsområde: tillrinningarna till Lossen, Grundsjön, Lofssjön, oreglerad lokal tillrinning till Sveg och oreglerad lokal tillrinning till Arbråsjöarna. Det totala avrinningsområdet delades in i 16 delområden. Modellen kalibrerades manuellt med betoning på de två flödesparametrarna  $K_0$  och MAXBAS.  $K_0$  bestämmer recessionen vid höga flöden. MAXBAS är en routing-parameter inom ett delområde. Vid sammanlänkning av delområdena tillämpades en tidsfördröjning (BLAG) motsvarande rinntiden mellan delområdena. Rinntiden från Lossen till Sveg-magasinet är t ex tre dagar. De valda parametervärdena ges i tabell 2.

Tabell 2. Analyserade parametrar i HBV-modellen.

| Parameter                                   | Lossen | Sveg | Arbråsjöarna |
|---------------------------------------------|--------|------|--------------|
| $K_0$ (dag <sup>-1</sup> )                  | 0.25   | 0.25 | 0.16         |
| MAXBAS (dagar)                              | 2      | 3    | 3            |
| Rinntid BLAG till magasin nedströms (dagar) | 3      | 1    | -            |

## Känslighetsanalysmetod

Dimensionerande tillrinning och vattennivåer beräknades först strikt i enlighet med riktlinjerna, vilket gav referensvärden. Nya dimensionerande tillrinningar och vattennivåer beräknades sedan med förändring av en faktor åt gången med behållande av alla de andra lika som i referenskörningen. Känsligheten i dimensionerande vattennivåer studerades med hänsyn tagen till ändringar i riktlinjernas föreskrifter, regleringsstrategierna och modellparametrarna.

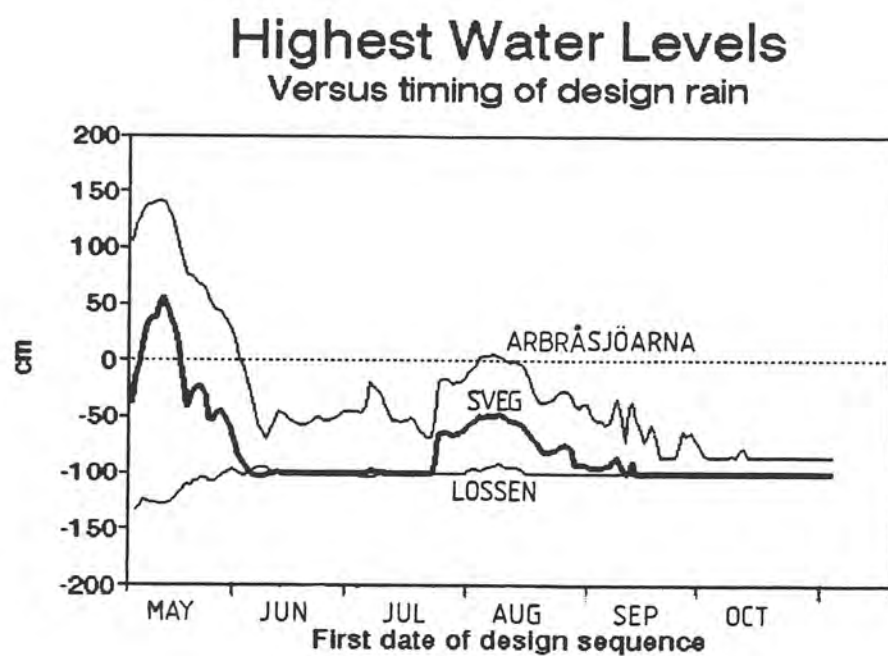
Dimensionerande vattenstånd beräknades med ändringar på  $\pm 10\%$  och  $\pm 20\%$  i den dimensionerande nederbörden, i det dimensionerande snömagasinet, i modellparametern  $K_0$  och i utskovskapaciteten. MAXBAS ändrades i steg om 1 dygn.  $K_0$  och MAXBAS ändrades i de lokala avrinningsområdena, som använts vid kalibreringen med behållande av de uppströms belägna avrinningsområdenas referensvärden. Utskovskapaciteten ändrades endast i ett magasin åt gången. Den dimensionerande nederbörden och snömagasinen ändrades å andra sidan för det totala avrinningsområdet. Betydelsen av regleringsstrategin undersöktes genom ändring av startvattennivåer, buffringsmagasinering och tappningsstrategier. De ursprungliga startvattenstånden varierades mellan de lägsta och högsta observerade nivåerna vid vårflodens början.

För studier av betydelsen av hydrauliken i avrinningsområdet sattes rinntiderna BLAG lika med noll. Slutligen simulerades fallet att den dimensionerande nederbörden förflyttades nedströms i överensstämmelse med vattenståndsutvecklingen i älven.

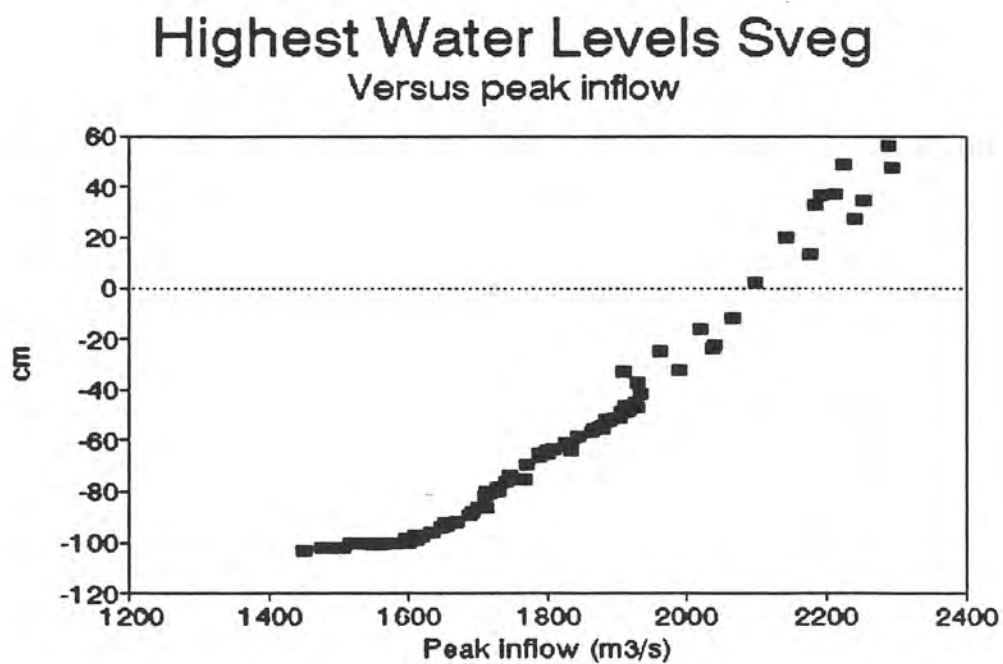
## RESULTAT OCH DISKUSSION

Figur 2 visar det dimensionerande vattenståndet för alternativa datum för den dimensionerande nederbördssekvensen. Endast en kort period resulterade i kritiska vattennivåer för Svegmagasinet, under det att nästan en månad var kritisk för Arbråsjöarna. Samma perioder var kritiska i Sveg och Arbråsjöarna, under det att de kritiska vårsituationerna inträffade senare på året i Lossen. Detta beror på den senare snösmältningen på högre höjder och en stor flödesdämpande magasinvolym. Högre vattennivåer förekom på hösten än på våren i Lossen, under det att våren var mycket mera kritisk för de andra två magasinerna. Figur 2 utvisar även att magasinens förmåga att ta hand om den dimensionerande tillrinningen i Ljusnan minskade nedströms, trots att den dimensionerande nederbördsintensiteten minskar med ökande area.

Tydliga samband konstaterades mellan de högsta flödestopparna och de högsta vattennivåerna i Sveg (figur 3) och Arbråsjöarna. I Lossen störde den stora magasinskapaciteten sambandet betydligt. De högsta flödestopparna förorsakades av snösmältning kombinerad med regn på våren, när magasinet ännu inte hade fyllts. Emellertid fanns det efter fyllningen av magasinet ett klart samband mellan största tillrinning och högsta vattenstånd även i Lossen.



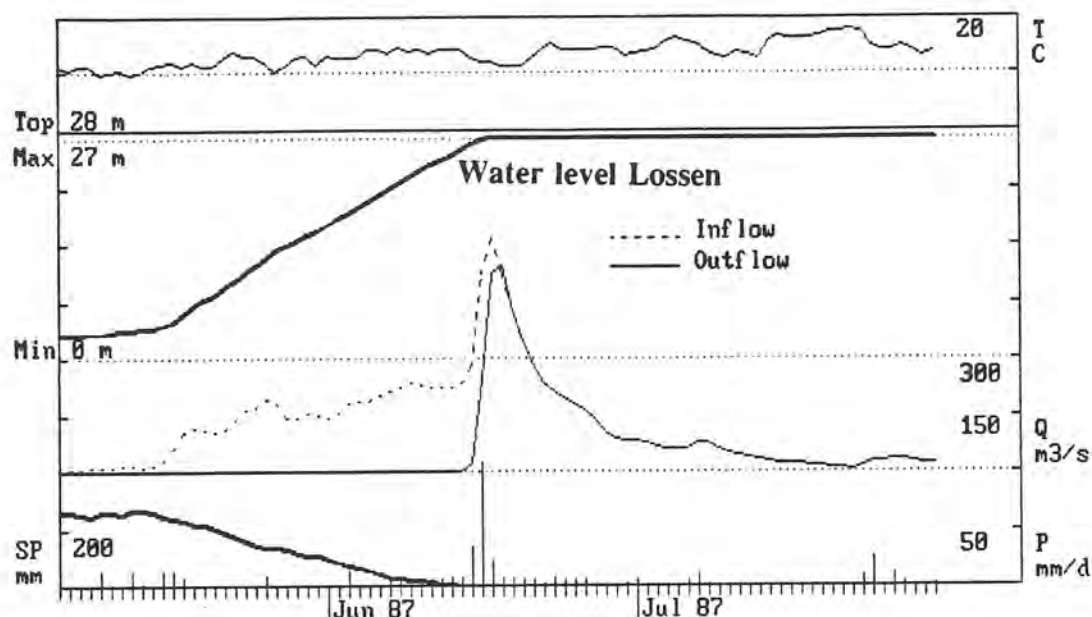
Figur 2. De högsta vattennivåerna vid olika placering av den dimensionerande nederbördssekvensen under en simulerad 10-årsperiod.



Figur 3. Sambandet mellan maximalt vattenstånd och maximal tillrinning för Svegsmagasinet.

## Referenssimuleringar

Det högsta vattenståndet i Lossen erhöjls när den dimensionerande nederbörden kombinerades med observerade data från augusti 1989, men nivån var endast några cm högre än den värsta vårsituationen (figur 4).



Figur 4. Den mest kritiska vårsituationen för Lossen. Top = dammkrön, Max = dämningssgräns, Min = sänkningsgräns, SP = snömagasin, T = temperatur och P = nederbörd.

I Sveg var den dimensionerande vårfloden mycket högre än höstfloden. Med den använda utskovskapaciteten kunde magasinet inte klara av vårsituationen (figur 1), medan det kunde tåla de mest kritiska höstflödena. Den mest kritiska situationen i Sveg inträffade så tidigt, att de stora magasinerna Lossen och Grundsjön ännu inte hade fyllts. Från de uppströms belägna magasinerna kom endast små tillskott från Lofssjön och Övre Särvsjön. Även utan någon tappning alls från dessa två uppströmsmagasin nådde vattennivåerna nästan lika högt som vid referenskörningen. Det är därför inte möjligt att avsevärt förbättra situationen vid Sveg genom aktiv flödesdämpning i magasinerna uppströms. Tillskottet från lokal snösmältning på våren dominerar sålunda över tillskottet från magasin uppströms på hösten, trots den större dimensionerande höstnederbörden. Det dimensionerande vattenståndet i Sveg blev endast 2 cm lägre vid den lokala beräkningen än vid den totala på grund av de mycket små tillskotten från magasinerna uppströms.

Liksom vid simuleringen för Sveg inträffade de mest kritiska situationerna i Arbråsjöarna på våren (figur 1). Magasinsutvecklingen i Arbråsjöarna var till stor del orsakade av tappning från Sveg, vilken bidrog till mer än hälften av den högsta tillrinningen till Arbråsjöarna. Utan tappningen från Sveg nådde inte vattennivån i Arbråsjöarna dammkrönet; detta gjorde inte heller det lokala dimensionerande flödet.

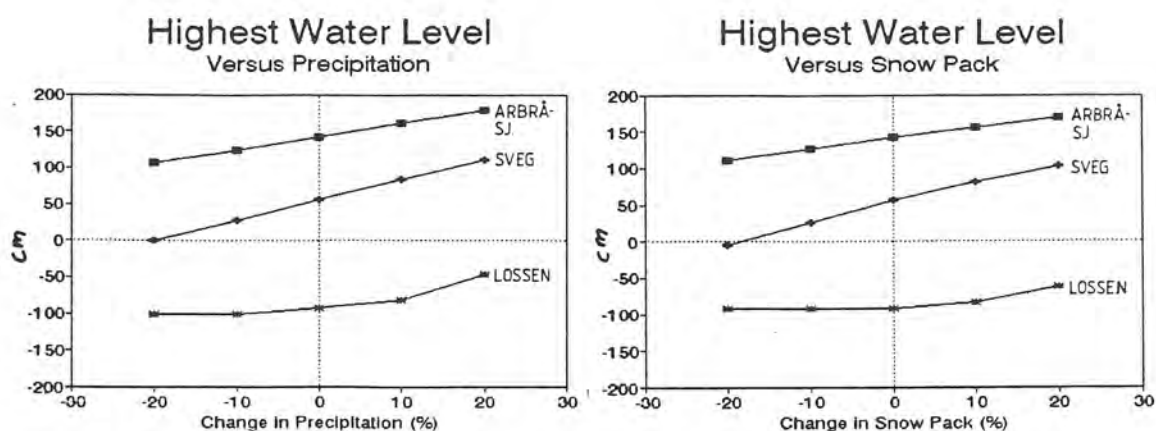
## Känslighetsanalys

Den sekvensplacering, som resulterade i de mest kritiska tillfällena i referenskörningen var vanligen den mest kritiska också efter ändringar i känslighetsanalysen. Emellertid var detta inte alltid fallet. I Lossen t ex resulterade ändringar i snömagasinet i en ny kritisk sekvensplacering, så att vårfloden blev mera kritisk än höstfloden.

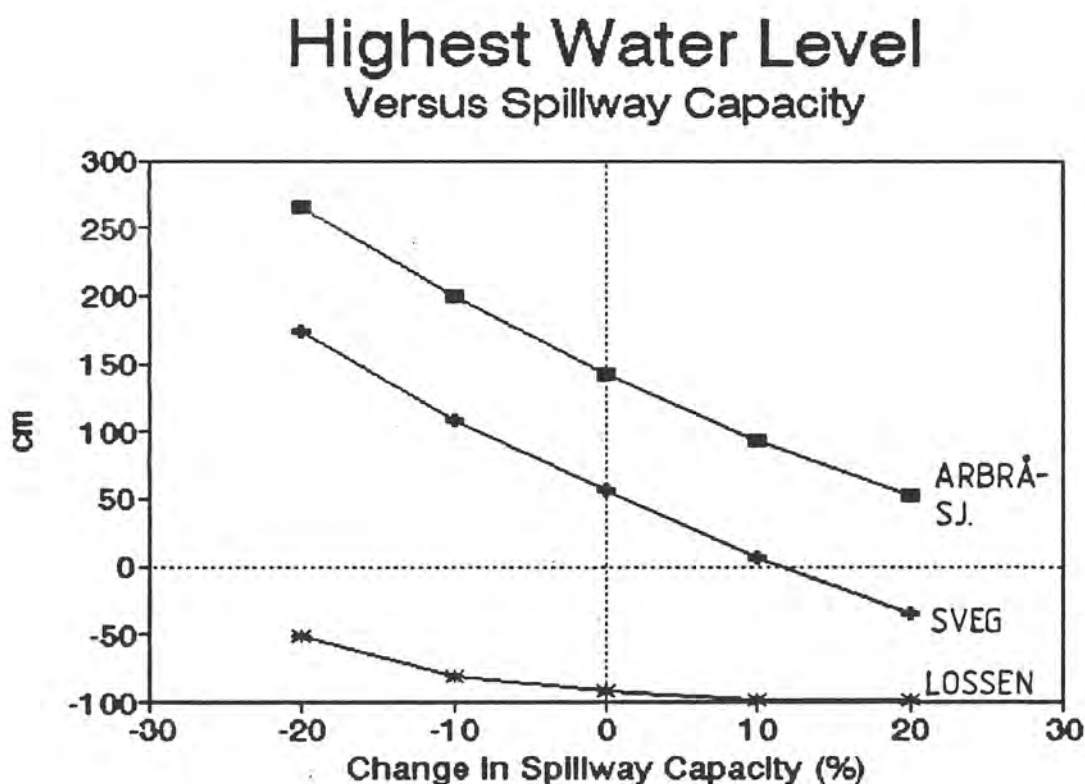
Förändringar av den dimensionerande nederbörden och det dimensionerande snömagasinet hade en betydande inverkan på det högsta vattenståndet i alla tre magasinerna (figur 5). Ändringarna i magasinens regleringsstrategier var av mindre betydelse (tabell 3). Startvattenståndet i Sveg och Arbråsjöarna hade ingen effekt alls på de dimensionerande vattenståndet. Likaså hade startnivåerna i magasinerna uppströms endast mycket litet inflytande på magasinerna nedströms, när startnivåerna varierades inom observerade gränser (tabell 3). Mycket mera avgörande för vattenståndets utveckling var tappningskapaciteten (figur 6). Detta belyses också av betydelsen av det föreskrivna bortfallet i tappningskapacitet genom turbinerna dag nio i den dimensionerande nederbördssekvensen (tabell 3). Ökad tappningskapacitet förvärrar å andra sidan situationen nedströms (tabell 3).

Tabell 3. Resultat från känslighetsanalysen avseende regleringsstrategier. <sup>1)</sup> Ingen tappning i referenskörningen. <sup>2)</sup> Inga magasin uppströms.

| Ändring jämfört med referens                                                                       | Dimensionerande vattenstånd (cm ovanför dammkrönet) |      |                    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|------|--------------------|
|                                                                                                    | Lossen                                              | Sveg | Arbråsjöarna       |
| Referens                                                                                           | -92                                                 | +56  | +142               |
| Nolltappning upp till dämningssgränsen i det studerade magasinet                                   | -84                                                 | +57  | +142 <sup>1)</sup> |
| Ökad tappningskapacitet för undvikande av överdämning i uppströms belägna magasin                  | <sup>2)</sup>                                       | +91  | +224               |
| Inget bortfall av kraftproduktionen i det studerade magasinet                                      | -99                                                 | ± 0  | + 90               |
| Startvattenstånd i alla uppströms belägna magasin vid lägsta uppmätta nivåer vid vårflodens början | <sup>2)</sup>                                       | +55  | +142               |
| Startvattenstånd i alla uppströms belägna magasin vid högsta uppmätta nivåer vid vårflodens början | <sup>2)</sup>                                       | +56  | +144               |
| Förtappning i det studerade magasinet börjar 1 m lägre än i referenskörningen                      | -95                                                 | +56  | +142               |
| Ingen rinntid mellan magasinerna                                                                   | <sup>2)</sup>                                       | +79  | +164               |

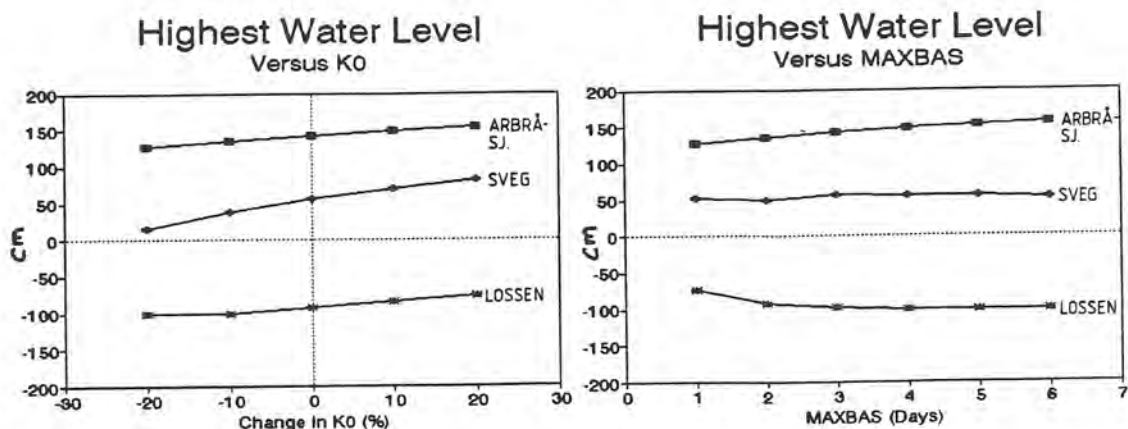


Figur 5. Effekten av förändringar i den dimensionerande nederbörden och det dimensionerande snömagasinet på högsta vattennivå.



Figur 6. Effekten av förändringar i utskovskapaciteten i det aktuella magasinet på högsta vattennivå.

Det dimensionerande vattenståndet var känsligt för HBV-modellens parameter  $K_0$  (figur 7). Modellstrukturen förutsätter en linjär extrapolering av recessionen vid extrema flöden enligt denna parameter. En ändring i  $K_0$  kan därför även illustrera effekterna av en möjlig icke-linjäritet, som modellstrukturen inte tagit hänsyn till.



Figur 7. Effekten av förändringar i  $K_0$  och MAXBAS på högsta vattennivå.

Routing i avrinningsområdet, representerad av modellparametern MAXBAS (figur 7) var mindre betydelsefull. En ökning i MAXBAS i ett delområde nedströms kunde till och med resultera i mer kritiska situationer på grund av överlagring med tappning från magasin uppströms. Parametern påverkade emellertid simuleringen för Lossen och har betydelse i randmagasin. Fördrojningen, representerad av modellparametern BLAG, befanns vara något känsligare. Effekten av att flytta den dimensionerande nederbörden nedströms i överensstämmelse med flödesutvecklingen var ungefär densamma som när rinntiden sattes till noll.

## SLUTSATSER

Dimensioneringsberäkningarna för Ljusnan visar, att det är svårt att i förväg uppskatta de integrerade effekterna av extrem nederbörd, snösmältning, markfuktighetsförhållanden och reglering i ett system. Med en hydrologisk modell kan man pröva sig fram för att hitta den kombination, som ger den mest kritiska vattenståndsutvecklingen. Denna kombination av händelser var vanligen den mest kritiska även efter måttligt förändrade förutsättningar för dimensioneringen. Detta förhållande kan utnyttjas för att spara tid vid praktiska dimensioneringsberäkningar. Efter det att ett magasin hade fyllts, märktes ett klart samband mellan högsta tillrinning och högsta vattenstånd. Detta betyder, att kännedom om hur olika faktorer påverkar tillrinningen också kan ge information om effekten på vattenståndets utveckling. Därmed kan mycket av resultaten från den känslighetsanalys av dimensionerande tillrinningar till randmagasin, som gjordes av Lindström och Harlin (1992), överföras till att gälla även för dimensionerande vattenstånd.

Det dimensionerande vattenståndet är beroende av ett flertal faktorer, av vilka de av Flödeskommittén föreskrivna nederbörds- och snövärdena är de viktigaste. Utskovskapaciteten är naturligtvis avgörande, och en liten ökning i utskovskapaciteten kan väsentligt förbättra situationen för en viss damm. Den valda regleringsstrategin och de ursprungliga vattennivåerna tycks vara något mindre viktiga i Ljusnan, om de varierar inom rimliga gränser.

I tillämpningen av riktlinjerna för dimensioneringsberäkningar för ett system av magasin är det viktigt med en noggrann modellkalibrering, med den högsta recessionskoefficienten  $K_0$  som den viktigaste parametern. Betydelsen av denna parameter är inte bara begränsad till de övre delarna av älven. Den befanns vara mycket viktigare än routingparametern MAXBAS. En ökning i MAXBAS kan till och med resultera i en mer kritisk situation på grund av överlagring med tappning från uppströms liggande magasin.

De dimensionerande vattenstånden var känsliga för förändringar i några av beräkningsfaktorena. Emellertid kan dessa faktorer varieras betydligt utan att man ändrar slutsatsen om huruvida en viss damm kan klara de nya riktlinjerna eller inte.

## SLUTORD

Detta projekt har finansierats av Vattenregleringsföretagens Samarbetsorgan (VASO). Författarna vill också tacka alla kolleger på SMHI, vilka bidragit till detta arbete. Särskilt tackar vi Judith Olofsson, som deltagit i modellarbetet och Sten Bergström, som har hjälpt oss med rapporteringen.

## REFERENSER

Bergström, S. (1976)

Development and application of a conceptual model for Scandinavian catchments. SMHI, RHO nr 7, Norrköping.

Bergström, S., Lindström, G., and Harlin, J. (1992)

Spillway design floods in Sweden. I: New guidelines. Hydr. Sci. J.

Flödeskommittén (1990)

Riktlinjer för bestämning av dimensionerande flöden för dammanläggningar. Slutrapport. Vattenfall, Svenska Kraftverksföreningen, SMHI.

Harlin, J., and Lindström, G. (1992)

Spillway design floods in Sweden. II: Applications and sensitivity analysis. Hydr. Sci. J., Vol. 31, No. 5.

ICOLD (1988)

Design flood and operational flood control. Proceedings: 16th International Congress on Large Dams, San Francisco, Question 63, Vol. IV.

Unver, O., Mays, L.W., and Lansey, K. (1987)

Real-time flood management model for Highland Lake system.

J. of Water Res. Planning and Management, ASCE, Vol. 113, No. 5, 620 - 638.

Yeh, W.W.-G. (1985)

Reservoir management and operation models: A state-of-the-art review.

Water Resources Research, Vol. 21, No. 12, 1797 - 1818.

## KÄNSLIGHETSANALYS AV DIMENSIONERANDE FLÖDESUTVECKLING I UMEÄLVEN

Mikael Sundby, SMHI

### SAMMANFATTNING

Känsligheten i det dimensionerande vattenståndet vid förändring av olika faktorer har studerats för ett flermagasinssystem i Umeälven. Analysen utgår från Flödeskommitténs riktlinjer och har gjorts med hjälp av HBV-modellen. Det totala avrinningsområdet på 6655 km<sup>2</sup> indelades i 15 delområden och 6 kalibreringspunkter. 7 dammar finns i området och av dessa gjordes känslighetsanalys för 2. Variationerna i vattenstånd studerades vid ändringar av dimensionerande snötäcke, dimensionerande nederbörd, startvattenstånd, regleringsstrategier, utskovskapacitet och modellparametrar. Snötäcke, nederbörd och utskovskapacitet visade sig ha stor betydelse medan startvattenstånd och regleringsstrategi hade mindre betydelse. Modellparametern K0 visade sig ha viss betydelse om än inte lika stor betydelse som tidigare studier visat.

### INLEDNING

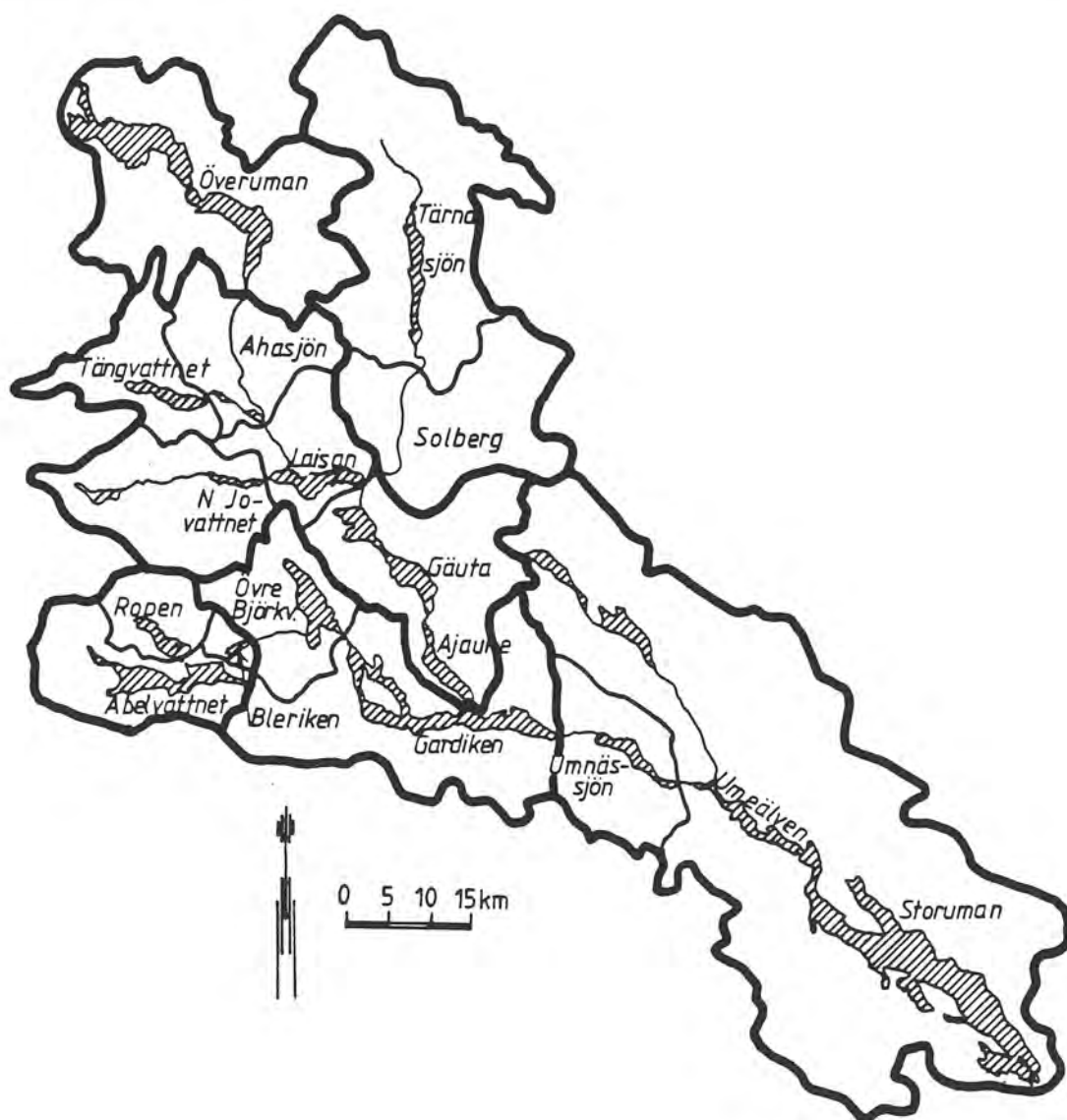
Nya riktlinjer för dimensionering av dammar i Sverige har nu tagits fram (Flödeskommittén, 1990). Enligt riktlinjernas rekommendationer skall en hydrologisk modell användas med en kombination av ogynnsamma hydrologiska och meteorologiska förhållanden för att bestämma det dimensionerande flödet. Den i riktlinjerna fastlagda nederbördssekvensen skall vid dimensionering av en damm successivt prövas på alla datum inom en period på minst 10 år

Hitintills har i Sverige HBV-modellen (Bergström, 1976) använts för dessa beräkningar. En variant av denna har tagits fram där regleringsstrategier kan formuleras för varje damm och hela magasinssystem simuleras.

Nedan studeras känsligheten i det dimensionerade vattenståndet vid dimensionering av ett system vid ändringar av snötäcket, nederbörd, regleringsstrategier, utskovskapaciteter och modellparametrar. Avsikten är att studera vilka faktorer som har störst betydelse vid dimensioneringsberäkningar. Här görs analys för två dammar i Umeälven. Liknande arbeten har gjorts för Ljusnan (bilaga 1) och för Luleälven (bilaga 3). Arbetet i Umeälven har gjorts i det nya IHMS-systemet som utvecklats på SMHI.

## UMEÄLVEN

Analysen gjordes för magasinerna Storuman och Ajaure i Umeälven (figur 1). Vid Storuman är det totala avrinningsområdet 6 655 km<sup>2</sup>. Området är indelat i 15 delområden och 7 dammar finns i området. För Ajaure är motsvarande siffror 3 138 km<sup>2</sup>, 8 delområden och 2 dammar. Vid indelning av områdena har uppdelning gjorts vid dammar, större sjöar samt större oreglerade områden med avbördningskurvor. I tabell 1 finns listat uppgifter om de studerade dammarna. Förutom de båda analyserade dammarna finns ytterligare fem dammar, Överuman, Abelvattnet, Bleriken, Övre Björkvattnet och Gardiken.



Figur 1. Umeälvens avrinningsområde vid Storuman.

Tabell 1. Data för de studerade dammarna.

| Magasin                                           | Ajaure | Storuman |
|---------------------------------------------------|--------|----------|
| Avrinningsområdets totala area (km <sup>2</sup> ) | 3138   | 6655     |
| Lokala avrinningsområdet (km <sup>2</sup> )       | 2509   | 2239     |
| Magasinsvolym (Mm <sup>3</sup> )                  | 209    | 1101     |
| Utbyggnadsvattenföring (m <sup>3</sup> /s)        | 170    | 340      |
| Utskovskapacitet vid DG (m <sup>3</sup> /s)       | 1025   | 1220     |
| Utskovstyp                                        | Botten | Yt       |

## REGLERINGSSTRATEGIER

Regleringsstrategierna har utformats i samarbete med Umeälvens vattenregleringsföretag för vart och ett av magasinerna som finns i området. Dessa har ett likartat utseende och kan principiellt beskrivas som följer:

Vid beräkningens början är magasinet sänkt till en medelnivå av alla års minimivärden. Under en viss nivå tappas nolltappning eller minimitappning. Från denna nivå och till nästa sker produktionstappning av varierande grad som ökar när magasinet närmar sig dämningssgränsen. På ett visst avstånd från DG (10 - 25 cm) startar utskovstappning. Vid dämningssgränsen tappas maximal utskovstappning. Om vattenståndet stiger ovanför DG tappas enligt avbördningskurvan för helt öppna utskov.

I enlighet med riktlinjerna faller produktionstappningen bort under den mest intensiva nederbördsdagen i sekvensen, dag 9, och tappning sker endast genom utskoven under resten av sekvensperioden.

## REFERENSKÖRNINGAR

### Kalibreringar

Områdena har kalibrerats med HBV-modellen. Såväl kalibrerings- som dimensioneringskörningar har tidigare gjorts med det gamla modellsystemet som är kompletterat med routingrutiner och regleringsstrategier. Alla filer och data har konverterats till det nya IHMS-systemet där känslighetsanalysen gjorts.

Området kalibrerades i 6 punkter med sammanlagt 15 delområden. Överuman, Ajaure, Abelvatten, Gardiken och Storuman kalibrerades mot lokal tillrinning och Solberg som är ett oreglerat område mot avrinning. Eftersom kalibreringarna gjordes för dammdimen-

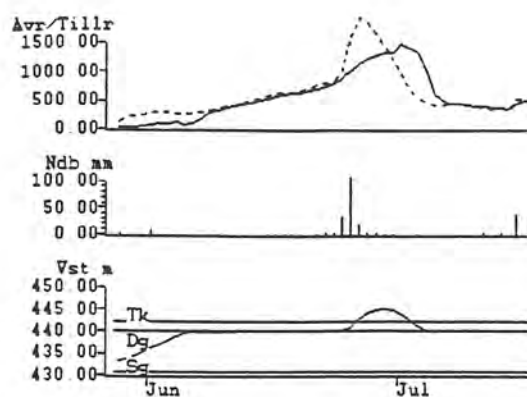
sioneringsändamål ägnades speciell uppmärksamhet åt parametrarna K0 (som styr högflödesrecessionen) och MAXBAS (som beskriver dämpningen inom ett område). För att möjliggöra jämförelser med övriga bilagor avser här alla uppgifter om K0 och ändringar i densamma K0 enligt det gamla systemet (i det nya IHMS beskrivs K0 som K0-K1 enligt det gamla systemet.) K0 inkalibrerades till  $0.4 \text{ dygn}^{-1}$  i samtliga områden utom Storuman och Umnässjön där K0 var  $0.2 \text{ dygn}^{-1}$  och Överuman där K0 var  $0.5 \text{ dygn}^{-1}$ . MAXBAS inkalibrerades till 1 dygn i alla områden utom de båda oreglerade områdena Tämsjö och Solberg där MAXBAS var 2 dygn. Rinntiden mellan magasinen eller områdena var 0 utom mellan Överuman och nedanförliggande områden där den var 1.

## Dimensioneringar

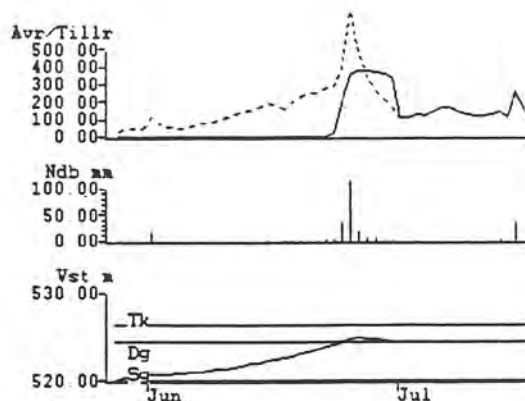
Dimensionerande vattenstånd beräknades utifrån det tidigare gjorda dimensioneringsarbetet vid de båda dammarna. En fullständig dimensionering gjordes, dvs samtliga möjliga placeringar under året av nederbördssekvensen testades. Dessa körningar utgjorde analysens referensvärden. Det dimensionerande tillfället för de båda dammarna illustreras i figurena 2 och 3. I de fall när vattenståndet stiger över tätkärmans krön förutsätter beräkningarna att dammen höjts tillräckligt för att klara vattenståndet.

Det värsta tillfället inträffade på våren och var en dag senare i Storuman (sekvensstart 850618) än i Ajaure (sekvensstart 850617). I Ajaure stiger vattenståndet 3.6 m över dammens tätkärna. I Storuman blir högsta vattenståndet 0.85 m över dämmningsgränsen dvs 1.45 m under tätkärmans krön. För båda dammarna gav total dimensionering det värsta tillfället och för båda var det värsta tillfället på hösten (d v s efter 1.8) betydligt lägre.

I figurena 2 och 3 illustreras även vattenståndsutvecklingen i övriga dammar i området. För Överuman är det dimensionerande tillfället i Ajaure som avses och för Gardiken, Abelvattnet och Bleriken är det Storumans värsta tillfälle. I tabell 2 listas för samtliga dammar i området det värsta tillfället för såväl tillrinning som vattenstånd och huruvida lokal eller total dimensionering respektive höst eller vår gav det värsta tillfället.

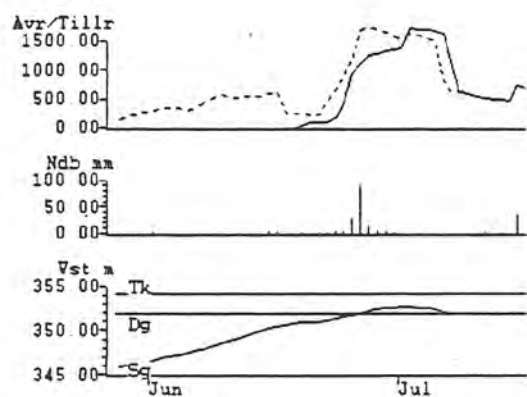


Ajaure

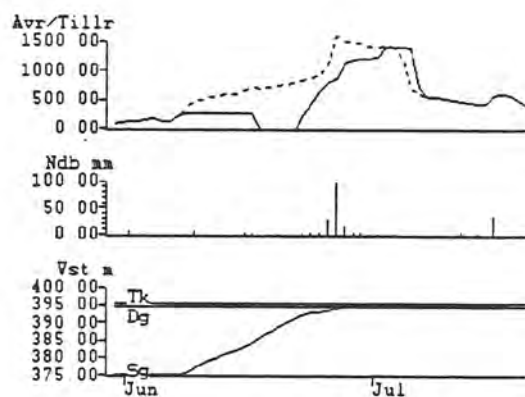


Överuman

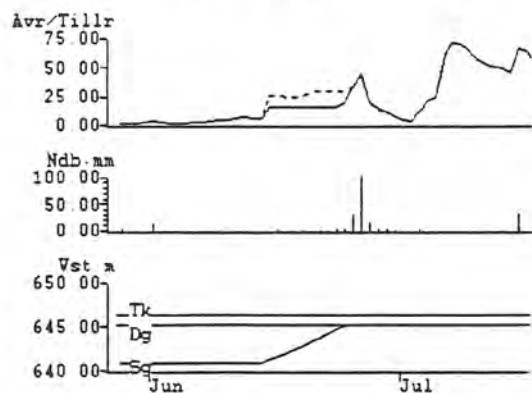
Figur 2. Det dimensionerande tillfället i Ajaure samt vattenståndsutvecklingen i Överuman samtidigt.



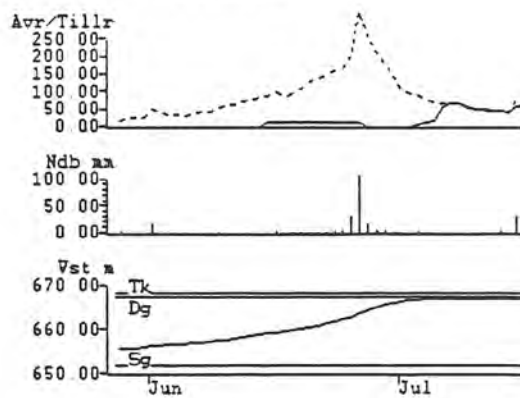
Storuman



Gardiken



Bleriken



Abelvattnet

Figur 3. Det dimensionerande tillfället i Storuman samt vattenståndsutvecklingen i Gardiken, Bleriken och Abelvattnet vid detta tillfälle.

Tabell 2. Sammanställning av värsta tillfällen.

| Damm        | Vattenstånd  | Tillrinning |
|-------------|--------------|-------------|
| Överuman    | Totalt/Vår   | Totalt/Vår  |
| Ajaure      | Totalt/Vår   | Totalt/Vår  |
| Abelvattnet | Totalt/Höst  | Totalt/Vår  |
| Bleriken    | Totalt/Höst* | Totalt/Vår* |
| Gardiken    | Totalt/Vår   | Totalt/Vår  |
| Storuman    | Totalt/Vår   | Totalt/Vår  |

\* ) Dimensionerad i en gemensam beräkning med Abelvattnet.

## KÄNSLIGHETSANALYS

Analysen genomfördes genom att ändra en faktor i taget från referenskörningarna. Ändringar gjordes i dimensionerande snötäcke och nederbörd, startvattenstånd, regleringsrutinerna samt i modellparametrarna.

Det dimensionerande snötäcket ändrades med  $\pm 20\%$  samt flyttades två veckor fram respektive tillbaka i tiden. För dessa ändringar gjordes en fullständig dimensionering med förflyttning av sekvensen. Detta gäller även de ändringar i regleringsrutinerna där tillrinningen tappas vid dämmningsgräns eller tätkärnans krön i ovanförliggande dammar. Övriga tester gjordes på de värsta tillfällen som konstaterats i referenskörningarna. Endast total dimensionering gjordes. Även den dimensionerande nederbörden ändrades med  $\pm 20\%$ .

Regleringens inverkan testades vidare genom att ändra startvattenståndet. Normalt sätts dessa till medelvärdet av minimivattenstånden under en lämplig period. Här sattes dessa istället till max- respektive minimivärdet av de lägsta vattenstånden.

En variant prövades där nolltappning sker upp till dämmningsgränsen, och en där full utskovstappning sker 1 m ifrån DG (kallas här förtappning). Till förändringar av regleringens inverkan kan även räknas simuleringarna med 20 % ökad respektive minskad utskovskapacitet samt de fall där extrapolation av magasinstabellen skett direkt från tabellen och inte som normalt genom att från karta uppskatta areaökningen vid ett högre vattenstånd.

Av parametrarna ändrades K0 med  $\pm 20\%$  och MAXBAS ökades med 1 dygn. Någon minskning av MAXBAS gjordes inte eftersom denna var 1 i alla områden utom i två av områdena. BLAG (eller LAG som den heter i det nya systemet) sattes till 0 på det enda ställe där den var större än 0 nämligen nedströms Överuman.

Ändringarna i snötäcket gjordes för hela området uppströms aktuell damm. De fall där tillrinning tappas uppströms den undersökta dammen omfattade självfallet endast uppströmsdammarna. Övriga ändringar gjordes dels för samtliga områden uppströms dammen och dels endast för den aktuella dammen (för modellkalibreringsparametrarna aktuellt kalibreringsområde). Detta kallas nedan samtliga områden respektive endast aktuell damm. Utskovskapaciteten ändrades förutom på dessa två sätt även genom att endast ändra ovanförliggande dammar.

## RESULTAT OCH DISKUSSION

Resultatet av simuleringarna sammanfattas nedan i tabellform. Enligt vad som sagts ovan gjordes vid ändringarna av snötäcket en fullständig dimensionering. Detta ledde till förskjutningar av det värsta tillfället på maximalt två dygn. När tillrinningen tappades från dammarna uppströms aktuell damm var det dock samma tillfälle som var det mest kritiska. Resultaten är uppdelade i tre tabeller, nr 3 snötäcke, nederbörd och startvattenstånd, nr 4 regleringsstrategier samt nr 5 modellparametrar.

Tabell 3. Ändringar i snötäcke, nederbörd och startvattenstånd.

| Ändring i referens                                      | Dimensionerande vattenstånd (m ovanför tåtkärnan) |          |
|---------------------------------------------------------|---------------------------------------------------|----------|
|                                                         | Ajaure                                            | Storuman |
| Referenskörningen                                       | +3.60                                             | -1.45    |
| 20 % större snötäcke                                    | +4.61                                             | -1.24    |
| 20 % mindre snötäcke                                    | +2.20                                             | -1.75    |
| 20 % högre dimensionerande nederbörd                    | +4.94                                             | -1.19    |
| 20 % lägre dimensionerande nederbörd                    | +2.24                                             | -2.02    |
| 2 veckor senare startdatum                              | +3.81                                             | -1.45    |
| 2 veckor tidigare startdatum                            | +3.06                                             | -1.57    |
| Startvattenstånd vid lägsta nivåer i samtliga magasin   | +3.47                                             | -1.45    |
| Startvattenstånd vid lägsta nivå i aktuell damm         | +3.60                                             | -1.46    |
| Startvattenståndet vid högsta nivåer i samtliga magasin | +3.82                                             | -1.23    |
| Startvattenstånd vid högsta nivå i aktuell damm         | +3.60                                             | -1.45    |

Tabell 4. *Ändringar i reglering, utskovskapacitet och magasinstabell.*

| Ändring i referens                                                        | Dimensionerande vattenstånd (m ovanför tåtkärnan) |          |
|---------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------|----------|
|                                                                           | Ajaure                                            | Storuman |
| Referenskörningen                                                         | +3.60                                             | -1.45    |
| Tappning av tillrinning vid DG i ovanförliggande dammar                   | +4.08                                             | -0.54    |
| Tappning av tillrinning vid TK i ovanförliggande dammar                   | *                                                 | -1.02    |
| 20 % ökad utskovskapacitet vid samtliga magasin inklusive aktuell damm    | +2.36                                             | -1.55    |
| 20 % minskad utskovskapacitet vid samtliga magasin inklusive aktuell damm | +5.0                                              | -1.36    |
| 20 % ökad utskovskapacitet vid samtliga utom aktuell damm                 | +3.92                                             | -1.01    |
| 20 % minskad utskovskapacitet vid samtliga utom aktuell damm              | +3.26                                             | -1.91    |
| 20 % ökad utskovskapacitet endast vid aktuell damm                        | +2.09                                             | -1.96    |
| 20 % minskad utskovskapacitet endast vid aktuell damm                     | +5.41                                             | -0.82    |
| Full utskovstappning 1m från DG (förtappning), samtliga magasin           | +3.72                                             | -1.20    |
| Full utskovstappning 1m från DG (förtappning), endast aktuell damm        | +3.45                                             | -1.92    |
| Nolltappning till DG, samtliga magasin                                    | +3.82                                             | -1.26    |
| Nolltappning till DG, endast aktuell damm                                 | +3.61                                             | -1.41    |
| Magasinsytan extrapolerad direkt från magasinstabellen                    | +3.79                                             | -1.45    |

\* Vattenståndet nådde ej över tåtkärnan i den ovanförliggande dammen (Överuman) vid aktuellt tillfälle.

Tabell 5. Ändring i kalibreringsparametrarna.

| Ändring i referens                      | Dimensionerande vattenstånd (m ovan tåtkärnan) |          |
|-----------------------------------------|------------------------------------------------|----------|
|                                         | Ajaure                                         | Storuman |
| Referenskörningen                       | +3.60                                          | -1.45    |
| K0 20 % större i alla områden           | +3.85                                          | -1.40    |
| K0 20 % större i aktuellt kalibr.område | +3.65                                          | -1.43    |
| K0 20 % lägre i alla områden            | +3.18                                          | -1.53    |
| K0 20 % lägre i aktuellt kalibr.område  | +3.48                                          | -1.49    |
| MAXBAS +1 i alla områden                | +3.50                                          | -1.48    |
| MAXBAS +1 i aktuellt kalibr.område      | +3.67                                          | -1.43    |
| BLAG 0 överallt                         | +3.96                                          | -1.43    |

## SLUTSATSER

Förändringarna i dimensionerande snötäcke och nederbörd ger som väntat störst effekt. Även startdatum har en viss betydelse framförallt när det flyttas framåt i tiden. Mindre betydelse har startvattenståndet. I det fall när man endast ändrar den aktuella dammen saknar det helt betydelse.

Utskovskapaciteten är uppenbarligen av stor vikt men förvärrar situationen nedströms om inte också dessa magasin får en utökad tappningskapacitet. För både Ajaure och Storuman är det mest gynnsamt att enbart öka utskovskapaciteten vid dessa dammar. Vattenståndet minskar då jämfört med referenskörningen med 1.51 m i Ajaure och respektive 0.51 m i Storuman. Tappningen innan vattenståndet når dämningssgränsen (d v s förtappning) är mindre betydelsefull än tappningskapaciteten från DG.

Av kalibreringsparametrarna visade sig K0 ha relativt liten betydelse jämfört med tidigare studier. En förändring på 20 %, som är en relativt kraftig förändring, ger 25 cm högre vattenstånd i Ajaure och endast 5cm i Storuman. Även i övriga dammar som inte är simulerade med sitt värsta tillfälle ger förändringar under 10 cm vid den aktuella ändringen av K0. Om man endast tittar på det lokala kalibreringsområdet och låser K0-värdena i de uppströms liggande områdena blir höjningen ännu mindre. En ökning av MAXBAS i alla områden sänker som väntat vattenståndet eftersom flödet dämpas ut. Om MAXBAS ändras endast i det lokala området ökar vattenståndet dock vilket förmodligen beror på att flödestopparna från de övre områdena då kommer mera tidsmässigt i fas med topparna i det nedre.

Tidsförskjutningen, BLAG eller LAG som den heter i nya systemet, som sattes till 0 överallt påverkar av naturliga skäl Ajaure mest, eftersom det i referenskömningen endast var mellan Överuman och Ajaure som det förelåg en förskjutning.

Att extrapolera magasinskurvan utan att ta hänsyn till den faktiska arealökningen får endast nämnvärd effekt i Ajaure. I Storuman samt de andra dammarna får detta endast marginell effekt. Det beror naturligtvis på att vattenståndet i Ajaure stiger betydligt högre över dämningssgränsen än i övriga dammar.

Slutligen kan man konstatera att oavsett vilka förändringar man gör inom rimliga gränser blir slutsatsen om dammarna densamma. Ajaure klarar sig inte medan Storuman klarar sig. Detta tyder på att beräkningarna är stabila och att de viktigaste faktorena är snö och nederbörd som fastlagts av Flödeskommittén.

## REFERENSER

Bergström, S., (1976).

Development and application of a conceptual model for Scandinavian catchments. Swedish Meteorological and Hydrological Institute, Report RHO No. 7, Norrköping, Sweden.

Flödeskommittén (1990).

Riktlinjer för bestämning av dimensionerande flöden för dammanläggningar. Slutrapport. Vattenfall, Svenska Kraftverksföreningen, SMHI.

# FLÖDESDIMENSIONERING I LULEÄLVEN

## Känslighetsanalys av de nya svenska riktlinjerna

Tekn Lic Claes-Olof Brandesten

Vattenfall HydroPower AB

Sverige

### ABSTRACT

A sensitivity analysis of the new Swedish guidelines for spillway design in Luleälven in northern Sweden is presented. The simulations were made using a system based on the HBV-model. The 25 000 km<sup>2</sup> basin was divided into 35 subbasins with 16 calibration points. 5 of 16 dams in the river were analysed. The results showed that changes in the hydrological model had only minor effects on the design water stages. Of greater importance was changes in the prescribed precipitation and snow-pack, as well as spillway capacities. Alterations in the reservoir regulation strategies as regards initial water stage before snowmelt can be of importance in the largest reservoirs. The use of a hydrological model for design flood calculations seem adequate as the major factors of importance, in a developed river system, can be treated systematically.

### INLEDNING

Nya riktlinjer för dimensionering av dammar och utskov är nyligen framtagna i Sverige (Flödeskommittén, 1990). Riktlinjerna stipulerar användandet av avrinningsmodeller med vilka olika klimathändelser, som hög nederbörd, kraftigt snötäcke, fyllda markvattenmagasin etc, kan kombineras. I praktiken är det HBV-modellen som kommer att utnyttjas även om det inte är ett krav enligt riktlinjerna. Jämfört med originalversionen av HBV-modellen, presenterad av Bergström 1976, har under de senaste åren rutiner för magasinshantering utvecklats, vilket gör det möjligt att simulera ett helt kraftverkssystem.

För att simulera dimensionerande flöden i ett flodsystem är det nödvändigt att kalibrera den hydrologiska modellen för olika delområden. Ett delområde görs för varje damm, för naturliga sjöar av betydelse ur magasineringssynpunkt samt där det eljest är påkallat ur hydrologisk synvinkel, t ex för större glaciärer med separat vattenbalans. Vid kalibreringen utnyttjas företrädesvis den lokala tillrinningen för resp delområde för en period av ca 10 år.

Vid simuleringen utnyttjas den kalibrerade modellen samt klimatdata (nederbörd och temperatur) för den senaste 10-årsperioden. Med tillämpning av riktlinjerna undersöks sedan hela denna period och sorteras fram det tillfälle som ger det högst beräknade vattenståndet i aktuellt magasin. Av detta följer att det dimensionerande vattenståndet beror dels av uppströms liggande kraftverk och deras avbördningsförmåga, och dels av vald regleringsstrategi.

I detta arbete har för fem dammar i Luleälven undersökts känsligheten i de dimensionerande vattenstånden med avseende på förändringar i modellkalibreringen, dimensionerande nederbörd och snötäcke, vald regleringsstrategi samt utskovskapaciteter. Beräkningarna utgår ifrån att samtliga av dessa dammar kommer att klassificeras som riskklass I dammar, vilket innebär högriskdammar. Metodiken är i huvudsak i överensstämmelse med den av Lindström och Harlin utnyttjade i ett liknande arbete för Ljusnan (Harlin, 1992)

## METODIK

### Dimensioneringsförfarande

I Fig 1 visas arbetsgången vid en dimensioneringsberäkning. I riktlinjerna skiljs mellan riskklass I dammar, med en beräkningsgång enligt övre delen av bilden, och riskklass II dammar, enligt nedre delen. En komplett beskrivning ges i Flödeskommittén 1990.

Den mest betydelsefulla faktorn i dimensioneringen är nederbördssekvensen om 14 dagar. Olika sekvenser har tagits fram för olika regioner med hänsyn till skillnader i nederbörds-klimatet. Sekvenserna, som ger arealnederbörden för ett område på 1 000 km<sup>2</sup>, justeras med hänsyn till aktuellt tillrinningsområdes storlek samt medelhöjd över havet. Vidare görs en justering för skillnader i nederbördsintensiteten under året.

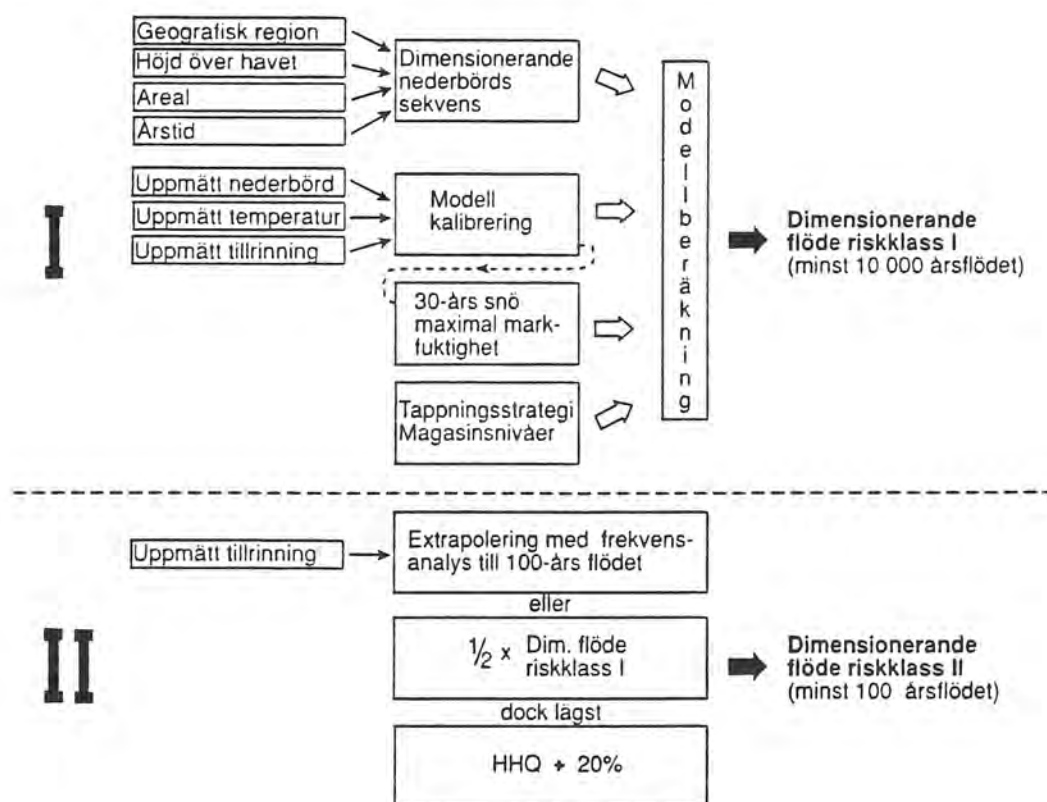


Fig 1. Arbetsgång vid dimensionering för riskklass I resp riskklass II dammar

Den hydrologiska modellen kalibreras utgående från uppmätta dygnsvärden på nederbörd, temperatur samt tillrinning. Därutöver utnyttjas också beräknade månadsmedelvärden på potentiell avdunstning. När modellen kalibrerats beräknas 30-årsvärdet av de av modellen beräknade årliga maxvärdena på snötäcket. Detta 30-årsvärde tillsammans med mättade markvattenmagasin utgör utgångspunkten inför vårfloden för de år som beräkningarna skall utföras.

En annan faktor av vikt är den regleringsstrategi som skall tillämpas. För de stora regleringsmagasinen väljs den startnivå som normalt föreligger då en kraftig vårflod förväntas. Vidare beskrivs i modellen den normala årsregleringen med hänsyn till de minimitappningsregler etc som gäller.

Med den upplagda modellen görs för en 10-årsperiod upprepade beräkningar då nederbördsekvensen får ersätta den uppmätta nederbörden i steg om ett dygn. Den härmed erhållna mest kritiska magasinutvecklingen blir den dimensionerande.

## Luleälven

Luleälven är ur energisynpunkt Sveriges viktigaste älv med en fjärdedel av vattenkraftproduktionen. I älven finns 16 kraftverk (Fig 2). Vattnet regleras i 6 större magasin belägna i älvens övre delar. Vid modellkalibreringen indelades älven i 35 delområden. Därvid utgicks från dammar, naturliga sjöar samt glaciärer. Modellen har kalibrerats i 16 punkter. Älven har två huvudgrenar, Stora resp Lilla Luleälven, med arealer på ca 11 300 resp 9 500 km<sup>2</sup>. Vid mynningen i Östersjön är avrinningsområdet 24 490 km<sup>2</sup>, sjöandelen 7,7 % och medelavrinningen ca 500 m<sup>3</sup>s<sup>-1</sup>.

I Tabell 1 anges data för de fem studerade dammarna. Tjaktjajaure och Suorva representerar regleringsmagasin i fjällområdet, Letsi och Messaure är exempel på kraftverk med begränsade magasin belägna i nedre delen av Lilla resp Stora Luleälv och Boden slutligen är ett typiskt strömkraftverk längst ned i älven.

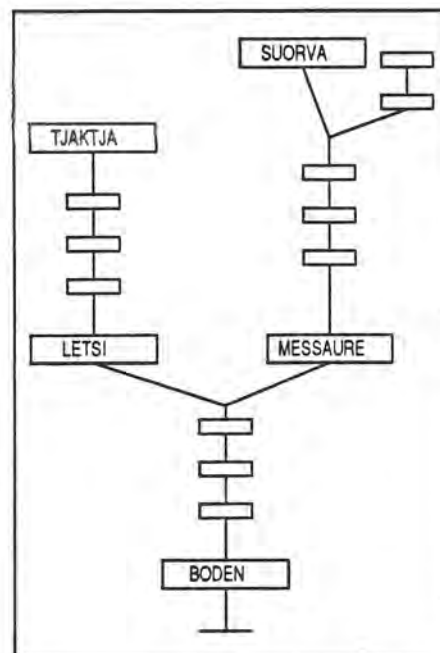


Fig 2. Skiss över dammarna i Luleälven

Tabell 1. Data för studerade dammar

|                                                          | Tjaktjajaure | Letsi | Suorva | Messaure | Boden  |
|----------------------------------------------------------|--------------|-------|--------|----------|--------|
| Tillrinningsområde (km <sup>2</sup> )                    | 2 267        | 9 520 | 4 680  | 11 300   | 24 490 |
| Magasinsvolym (Mm <sup>3</sup> )                         | 1 675        | 67    | 5 900  | 53       | 0.8    |
| Magasinsareal (km <sup>2</sup> )                         | 81           | 18    | 270    | 23       | 2.8    |
| Utskovkapacitet vid DG(m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> )  | 900          | 1 560 | 1 260  | 1 800    | 2 820  |
| Utskovstyp                                               | Yt + botten  | Yt    | Botten | Yt       | Yt     |
| Utbyggnadsvattenföring (m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> ) | 135          | 390   | 530    | 575      | 680    |

Till grund för analyserna ligger en inledande dimensioneringsberäkning för var och en av dammarna. Inför dessa referensberäkningar har modellkalibreringen slutförts samt har tagits fram en preliminär regleringsstrategi för älven som helhet. För att kunna ta hänsyn till hydrauliska effekter längs älven har en hydraulisk modell (DAMBRK) lagts upp för intressanta älvsträckor. Med denna beräknas, utöver dammbrotssimuleringar, dämpning i älven, ev motdämning vid dammarna samt vattenståndsprofiler längs älven.

Om inte annat anges så gäller för samtliga genomförda analyser att en faktor åt gången har analyserats och alla andra hållits konstanta i enlighet med referensberäkningen. I diagrammen redovisas vattenstånden som en avvikelse från en referenshöjd. Denna höjd utgörs av tät kärnans nivå. I en del fall når vattenytan upp över dammarnas faktiska krön. Beräkningarna har då utgått ifrån att dammarna varit tillräckligt höga föra att överrinning ej skall inträffa.

### Känslighetsanalys

Känslighetsanalysen avser för det första några hydrologiska modellparametrar samt inverkan av den hydrauliska modellen. För det andra analyseras förändringar i den dimensionerande nederbörden och snötäcket, samt justeringar avseende startvattenstånd inför vårfloden och sänkning av dämningssgränsen. För det tredje görs beräkningar om utskovskapacitetens inverkan på det dimensionerade vattenståndet samt effekten av begränsningar i överdämningen i de olika magasinerna.

Genom justeringar av några av den hydrologiska modellens parametrar erhålls en uppfattning om hur stabilt resultatet är med hänsyn till aktuell kalibrering. Av speciell vikt vid flödesdimensionering är den parameter som styr recessionen vid högflödesförloppen (K0). Känsligheten för K0 har studerats genom förändringar i steg om +/- 10 %. Denna förändring har gjorts för samtliga ingående delområden uppströms aktuell damm. Vidare har parametern MAXBAS, som beskriver dämpningen i ett område, studerats. MAXBAS anges i hela dygn och har dels ökats med ett dygn och dels minskats med ett dygn (där utgångs

värdet överstigit 1 dygn). Härutöver redogörs något för den hydrauliska modellens inverkan på flödeshydrograferna vid Letsi och Boden (övriga dammar omfattas inte av den hydrauliska modellen).

Den dimensionerande nederbördssekvensen samt 30-årssnötäcket har ändrats i steg om  $\pm 10\%$ . Dessa förändringar har gjorts för samtliga ingående delområden uppströms aktuell damm. Känsligheten i den framtagna regleringsstrategin har studerats genom förändringar i startvattenstånd inför vårfloden samt antaganden om sänkt dämningssgräns. Vad gäller Tjaktjajaure och Suorva har ändringarna i startvattenstånd gjorts i 4-meters steg. För övriga anläggningar har endast mindre förändringar varit möjliga med anledning av den begränsade regleringshöjden. Vad gäller sänkningen av dämningssgräns har ändringarna gjorts i 0.5-meters steg.

Som en tredje punkt har undersökts hur känsligt resultatet är med hänsyn till dammarnas utskovskapacitet. Två typer av analyser har genomförts. Vid den första har utskovens kapacitet justerats i steg om  $\pm 10\%$  med syfte att se inverkan på det dimensionerande vattenståndet vid aktuell anläggning. Vid den andra analysen har förutsatts att utskoven är ombyggda för att kunna avbörda tillrinningen dels vid dämningssgräns och dels vid tät kärnan. Det senare har gjorts för att undersöka hur stor tillrinningen ned genom älven blir om ingen dämpning kan tillåtas i uppströms belägna magasin.

## RESULTAT OCH DISKUSSION

### Referensberäkningar

Känslighetsanalyserna relateras till de referensberäkningar som genomförts för resp damm. I Fig 3 redovisas beräkningen gällande för Boden. Diagrammen för övriga dammar hänförs sig också till det dimensionerande tillfället för Boden. Nederbördssekvensen inleds den 5/8-81 och har sitt maxvärde med 93 mm den 13/8. Flödet i Boden kulminerar den 17/8. 30-årssnön's vatteninnehåll uppgår för Bodens hela tillrinningsområde till drygt 400 mm. Tillrinningshydrograferna för Tjaktjajaure och Suorva är förhållandevis spetsiga, medan motsvarande längre ned i systemet är betydligt trubbigare med en längre varaktighet av de högsta flödena.

### Känslighetsanalys

Den hydrauliska modellen fördröjer hydrograferna vid Letsi och Boden (Fig 4). Hydrografernas toppvärden är dock i stort sett lika. Här kan noteras att parametern  $BLAG$  i HBV-modellen, som beskriver tidsförskjutningen mellan två kalibreringspunkter, genomgående är noll i den dimensioneringsmodell som lagts upp för Luleälven. Därför torde den hydrauliska modellen, som matats med exakt samma tillrinningshydrografer som beräknats i den hydrologiska modellen, ge ett mer sannolikt flödesförlopp.

$K_0$  för de studerade områdena har värden i intervallet  $0.15-0.50 \text{ dygn}^{-1}$  med de högsta

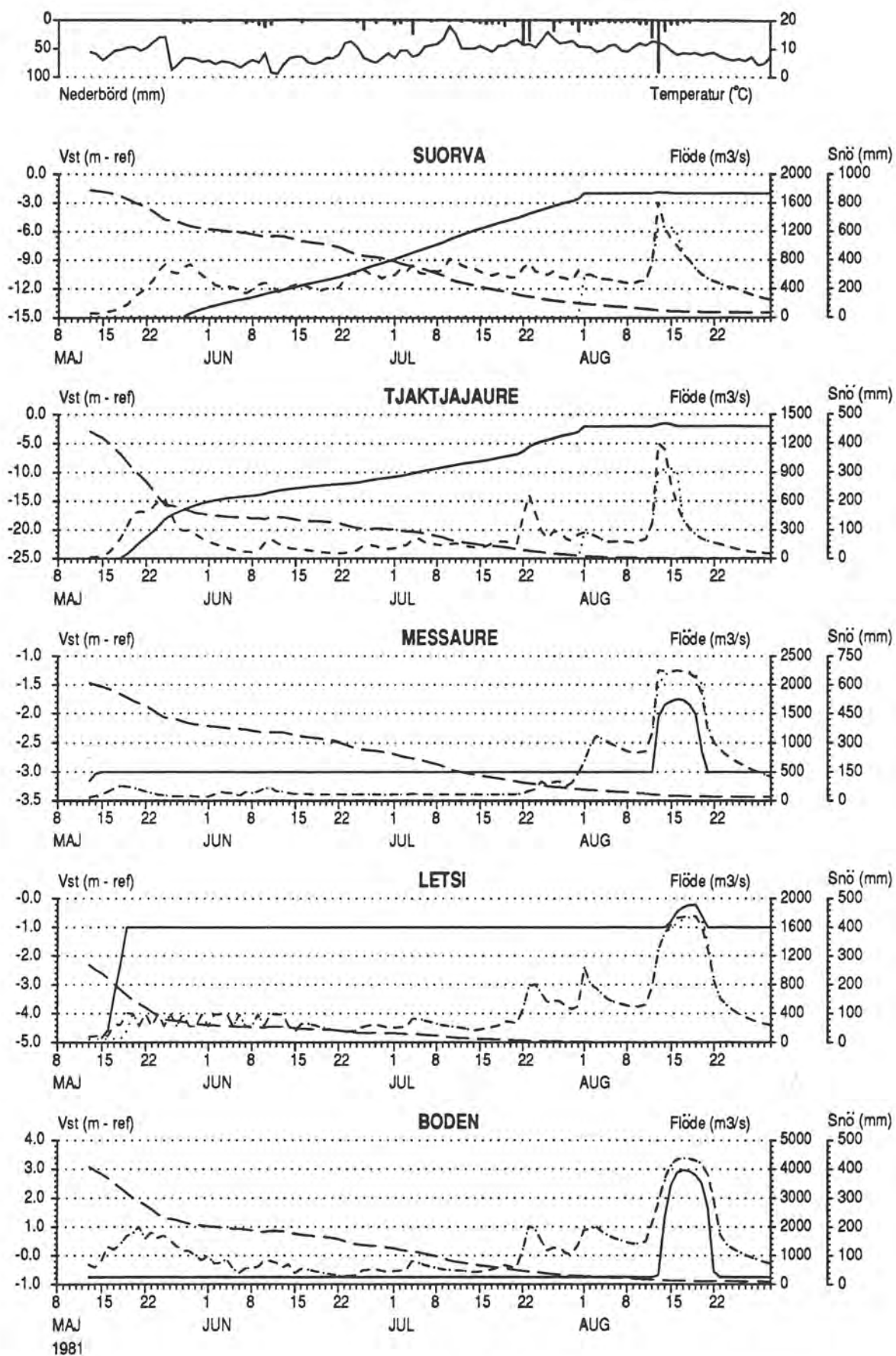


Fig 3. Flödes- och vattenståndsutvecklingen i de fem damarna vid det dimensionerande tillfället för Boden

värdena i fjällområdet. Kalibreringsnoggrannheten torde rymmas i intervallet  $\pm 10\%$  och därför kan de genomförda justeringarna anses vara kraftiga. En förändring av  $K_0$  med  $10\%$  påverkar vattenståndet med maximalt  $0.2\text{ m}$  (Tjaktjajaure), vilket kan bedömas som relativt lite. En justering av MAXBAS med  $\pm 1$  dygn har för alla dammar utom Tjaktjajaure en försumbar inverkan på vattenståndet (Fig 5). En orsak till att förändringen av de hydrologiska parametrarna  $K_0$  och MAXBAS endast leder till en begränsad påverkan på de dimensionerande vattenstånden är att tillrinningsområdena till dammarna består av flera delområden. Tillrinningen till magasinerna är därför en blandning av flera hydrografer. I de fall dammen är beläget i ett randområde (ej flera delområden) blir effekten av motsvarande förändring tydligare (jfr Harlin, 1992).

De dimensionerande vattenstånden är känsliga för ändringar av nederbördssekvensens volym. Effekten är knappt  $0.5\text{ m}$  per  $10\%$  för Tjaktjajaure, Letsi och Boden, medan den är ca hälften för Suorva och Messaure. En procentuell justering av snötäcket får störst volym-effekt i fjällområdet, eftersom snötäcket normalt är högst där. 30-årsvärdet för Suorva är hela  $1\,034\text{ mm}$ , vilket förklarar den kraftiga effekten trots Suorvas stora magasin. För Suorva och Tjaktjajaure inträffar den dimensionerande situationen i samband med vårflo-dens kulmination. För de tre nedre dammarna inträffar den dimensionerade situationen på hösten vilket förklarar den minimala effekten. En sänkning av magasinens vattenstånd inför en förväntad kraftig vårflood kan leda till lägre dimensionerande vattenstånd i de stora magasinerna. Det är dock sänkningar på åtskilliga meter som krävs. Om utskoven hålls öppna för fullt ett stycke under dämningssgränsen, erhålls lägre dimensionerande vatten-stånd för både Suorva och Tjaktjajaure. Effekten är nästan  $1\text{ på }1$ , dvs full tappning  $1\text{ m}$  under dämningssgränsen leder till knappt  $1\text{ m}$  lägre vattenstånd. Här måste emellertid observeras vad som händer nedströms samt att produktionsbortfallet av en sådan åtgärd är mycket stor. I de små magasinerna har förtappningen ingen som helst effekt (Fig 5).

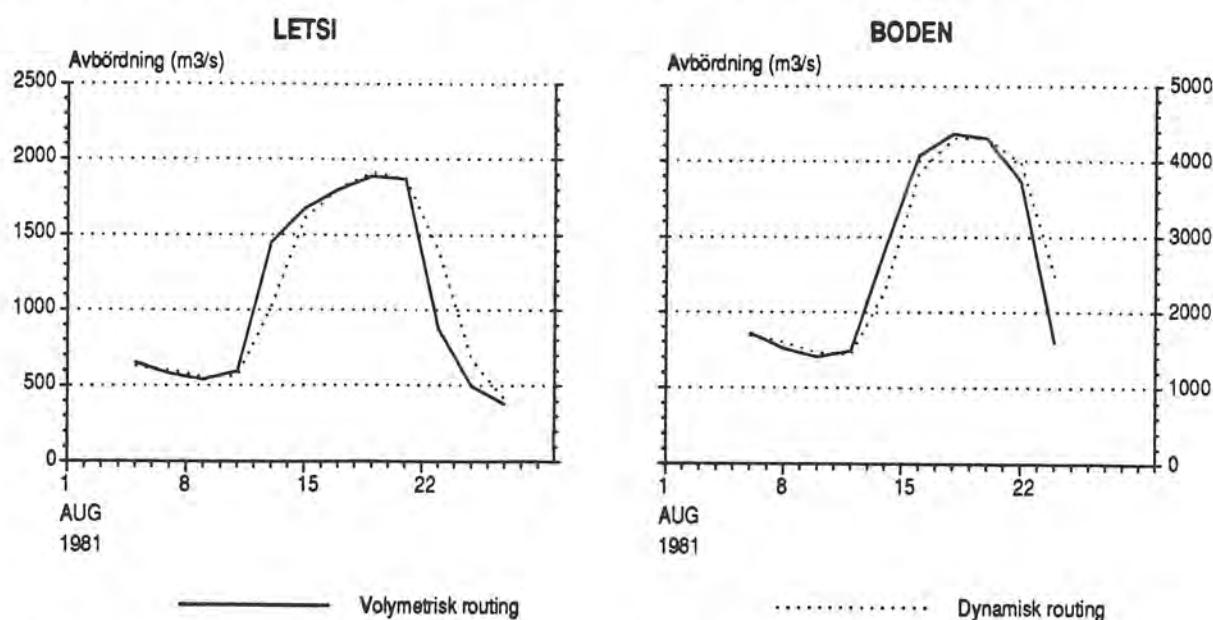


Fig 4. Den hydrologiska modellens volymetriska routing jämförd med den hydrauliska modellens dynamiska routing vid Letsi och Boden

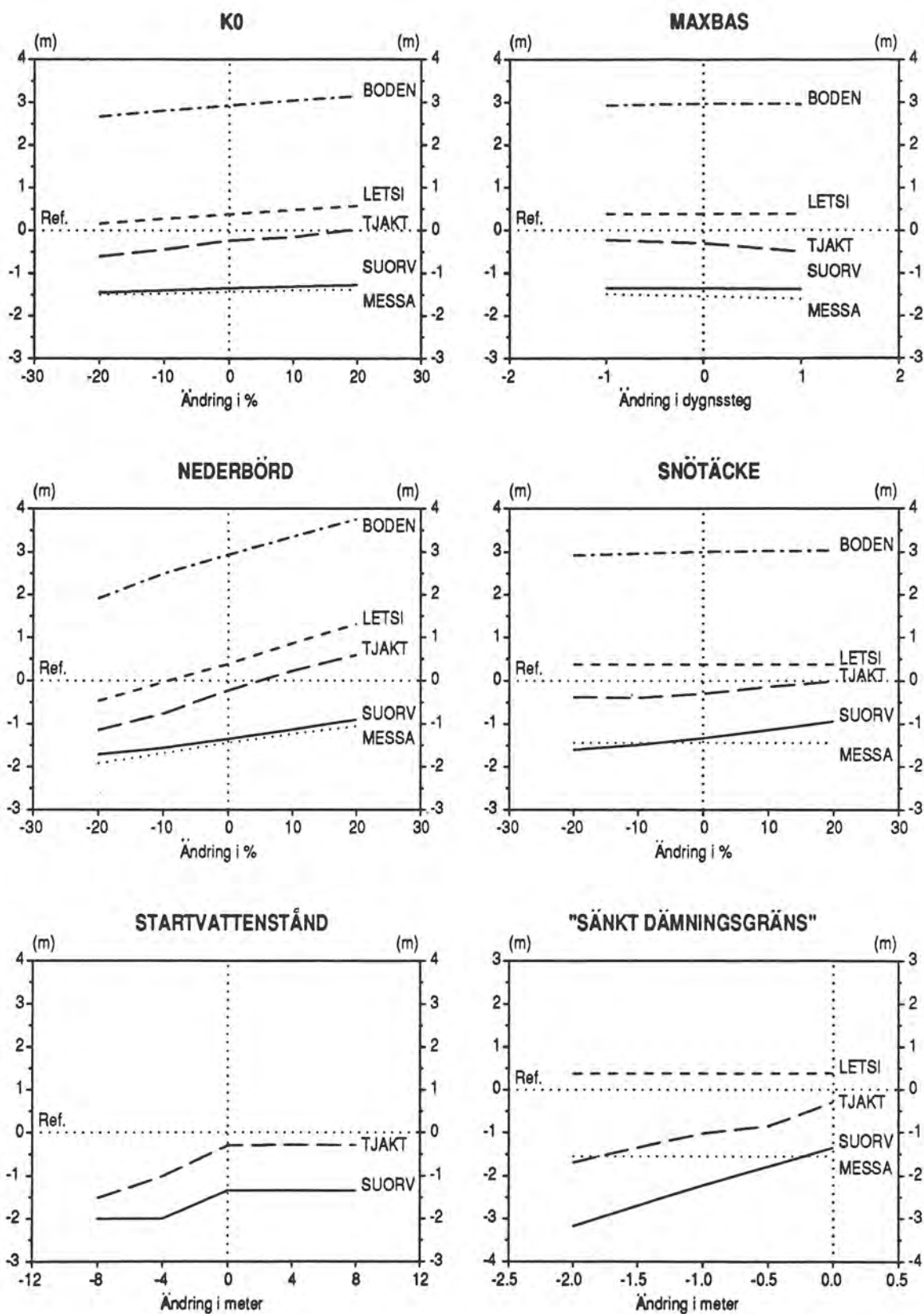


Fig 5. Det dimensionerande vattenståndets känslighet för förändringar av K0, MAXBAS, nederbörden, snötäcket, startvattenståndet samt sänkt dämmningsgräns.

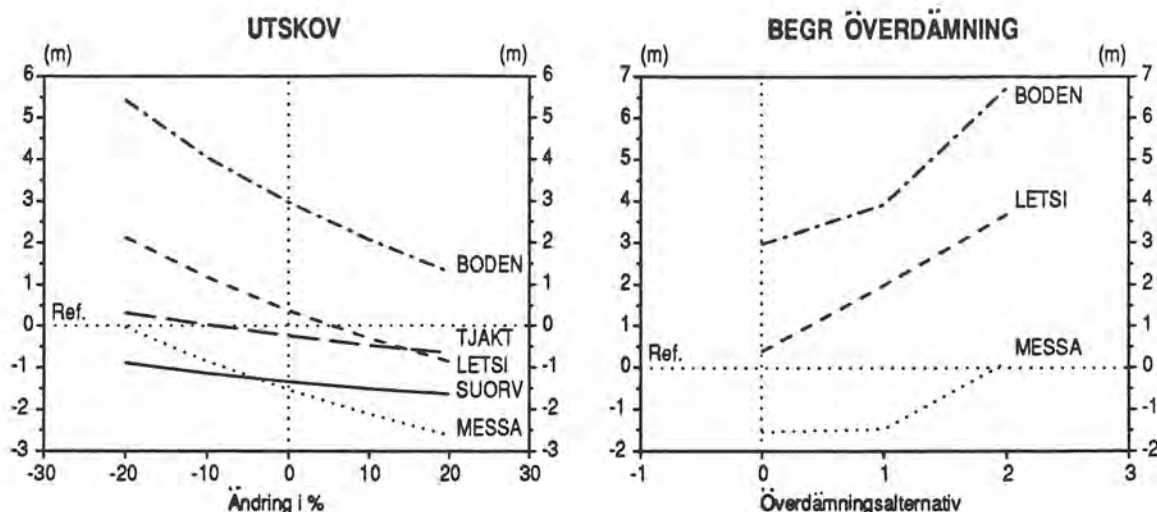


Fig 6. Det dimensionerande vattenståndets känslighet för förändringar av utskovskapacitet samt begränsningar av överdämningen i uppströms liggande magasin

Av stor vikt för de dimensionerande vattestånden är utskovens avbördningsförmåga (Fig 6). I de fall som avbördningsförmågan från början är relativt begränsad får en procentuell ökning en mindre effekt. Så är fallet med Tjaktjajaure och Suorva som delvis eller helt har bottenutskov. Ytterligare en variant på avbördnings temat är den figur som kallas begränsad överdämning. Här innebär 0 - referensberäkningen, 1 - att ingen överdämning görs över tåtkärnan på uppströms liggande dammar och 2 - att ingen överdämning görs över dämningssgränsen. De flöden som erhålls vid Boden för dessa tre alternativ är ca 4 400, 4 800 resp 6 200  $\text{m}^3\text{s}^{-1}$ . Som synes av resultaten så krävs en hel del magasinering över dämningssgränsen för att godtagbara nivåer skall nås i nedre delen av älven.

## SLUTSATSER

För de högst belägna dammarna inträffar den dimensionerande situationen på våren, medan höstflödena blir mest kritiska längre ned i systemet. I huvudsak är det samma tillfällen som blir dimensionerande vid flertalet av dammarna.

Känslighetsanalyserna visar att de dimensionerande vattenstånden generellt är kraftigt beroende av den dimensionerande nederbördens storlek och utskovens kapacitet. För de största magasinerna kan kraftigt sänkta startvattenstånd inför vårfloden leda till lägre dimensionerande vattenstånd. Justeringar av de hydrologiska modellparametrarna leder i ett komplext älvsystem endast till mindre förändringar av vattenståndet.

Användandet av en hydrologisk modell för flödesdimensionering synes vara ett lämpligt arbetssätt då de viktigaste faktorerna, såsom klimat, vald regleringsstrategi samt effekten av uppströms liggande dammar, kan behandlas på ett systematiskt sätt.

Detta arbete har finansierats av Vattenregleringsföretagens samarbetsorgan (VASO). Jag vill också rikta ett tack till mina kollegor Göran Sprinchorn och Pål Svendsen för värdefulla kommentarer på manuskriptet.

## REFERENSER

Bergström, S. , 1976. Development and application of a conceptual model for Scandinavian catchments. Sveriges Meteorologiska och Hydrologiska Institut., Report RHO No. 7, Norrköping, Sweden.

Flödeskommittén, 1990. Riktlinjer för bestämning av dimensionerande flöden för dammanläggningar. Slutrapport från Flödeskommittén. Statens Vattenfallsverk, Svenska Kraftverksföreningen, Sveriges Meteorologiska och Hydrologiska Institut.

Harlin, J. , 1992. Hydrological modelling of extreme floods in Sweden. Sveriges Meteorologiska och Hydrologiska Institut, Report RH No. 3, Norrköping, Sweden.

SMHI HYDROLOGI

| Nr | Titel                                                                                                                                                                                                | Nr | Titel                                                                                                                                                                                                          |
|----|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1  | Bengt Carlsson<br>Hydrokemiska data från de svenska fältforskningsområdena.<br>Norrköping 1985                                                                                                       | 21 | Martin Häggström, Göran Lindström, Luz Amelia Sandoval and Maria Elvira Vega<br>Application of the HBV model to the upper Río Cauca basin.<br>Norrköping 1988                                                  |
| 2  | Martin Häggström och Magnus Persson<br>Utvärdering av 1985 års vårflödesprognoser.<br>Norrköping 1986                                                                                                | 22 | Mats Moberg och Maja Brandt<br>Snökartläggning med satellitdata i Kultsjöns avrinningsområde.<br>Norrköping 1988                                                                                               |
| 3  | Sten Bergström, Ulf Ehlin, SMHI, och Per-Eric Ohlsson, VASO<br>Riktlinjer och praxis vid dimensionering av utskov och dammar i USA.<br>Rapport från en studieresa i oktober 1985.<br>Norrköping 1986 | 23 | Martin Gotthardsson och Sten Lindell<br>Hydrologiskt stationsnät.<br>Svenskt Vattenarkiv<br>Norrköping 1989                                                                                                    |
| 4  | Barbro Johansson, Erland Bergstrand och Torbjörn Jutman<br>Skåneprojektet - Hydrologisk och oceanografisk information för vattenplanering - En pilotprojekt.<br>Norrköping 1986                      | 24 | Martin Häggström, Göran Lindström, Luz Amelia Sandoval y Maria Elvira Vega<br>Aplicacion del modelo HBV a la cuenca superior del Río Cauca.<br>Norrköping 1989                                                 |
| 5  | Martin Häggström<br>Översiktlig sammanställning av den geografiska fördelningen av skador främst på dammar i samband med septemberflödet 1985.<br>Norrköping 1986                                    | 25 | Gun Zachrisson<br>Svåra islossningar i Torneälven. Förslag till skadeförebyggande åtgärder.<br>Norrköping 1989                                                                                                 |
| 6  | Barbro Johansson<br>Vattenföringsberäkningar i Södermanlands län - ett försöksprojekt.<br>Norrköping 1986                                                                                            | 26 | Martin Häggström<br>Anpassning av HBV-modellen till Torneälven.<br>Norrköping 1989                                                                                                                             |
| 7  | Maja Brandt<br>Areella snöstudier.<br>Norrköping 1986                                                                                                                                                | 27 | Martin Häggström and Göran Lindström<br>Application of the HBV model to six Centralamerican rivers.<br>Norrköping 1990                                                                                         |
| 8  | Bengt Carlsson, Sten Bergström, Maja Brandt och Göran Lindström<br>PULS-modellen: Struktur och tillämpningar.<br>Norrköping 1987                                                                     | 28 | Sten Bergström<br>Parametervärden för HBV-modellen i Sverige.<br>Erfarenheter från modellkalibreringar under perioden 1975 - 1989.<br>Norrköping 1990                                                          |
| 9  | Lennart Funkquist<br>Numerisk beräkning av vågor i kraftverksdammar.<br>Norrköping 1987                                                                                                              | 29 | Urban Svensson och Ingemar Holmström<br>Spridningsstudier i Glan.<br>Norrköping 1990                                                                                                                           |
| 10 | Barbro Johansson, Magnus Persson, Enrique Aranibar and Robert Llobet<br>Application of the HBV model to Bolivian basins.<br>Norrköping 1987                                                          | 30 | Torbjörn Jutman<br>Analys av avrinningsens trender i Sverige.<br>Norrköping 1991                                                                                                                               |
| 11 | Cecilia Ambjörn, Enrique Aranibar and Roberto Llobet<br>Monthly streamflow simulation in Bolivian basins with a stochastic model.<br>Norrköping 1987                                                 | 31 | Mercedes Rodriguez, Barbro Johansson, Göran Lindström, Eduardo Planos y Alfredo Remont<br>Aplicacion del modelo HBV a la cuenca del Río Cauto en Cuba.<br>Norrköping 1991                                      |
| 12 | Kurt Ehler, Torbjörn Lindkvist och Todor Milanov<br>De svenska huvudvattendragens namn och mynningspunkter.<br>Norrköping 1987                                                                       | 32 | Erik Amér<br>Simulering av vårflöden med HBV-modellen.<br>Norrköping 1991                                                                                                                                      |
| 13 | Göran Lindström<br>Analys av avrinningsserier för uppskattning av effektivt regn.<br>Norrköping 1987                                                                                                 | 33 | Maja Brandt<br>Snömätning med georadar och snötaxeringar i övre Luleälven.<br>Norrköping 1991                                                                                                                  |
| 14 | Maja Brandt, Sten Bergström, Marie Gardelin och Göran Lindström<br>Modellberäkning av extrem effektiv nederbörd.<br>Norrköping 1987                                                                  | 34 | Bent Göransson, Maja Brandt och Hans Bertil Wingren<br>Marklackage och vattendragstransport av kväve och fosfor i Roxen/Glan-systemet, Östergötland.<br>Norrköping 1991                                        |
| 15 | Håkan Danielsson och Torbjörn Lindkvist<br>Sjökart- och sjöuppgifter. Register 1987.<br>Norrköping 1987                                                                                              | 35 | Ulf Ehlin och Per-Eric Ohlsson, VASO<br>Utbyggd hydrologisk prognos- och varningstjänst.<br>Rapport från studieresa i USA 1991-04-22-30.<br>Norrköping 1991                                                    |
| 16 | Martin Häggström och Magnus Persson<br>Utvärdering av 1986 års vårflödesprognoser.<br>Norrköping 1987                                                                                                | 36 | Martin Gotthardsson, Pia Rystam och Sven-Erik Westman<br>Hydrologiska stationsnät/Hydrological network.<br>Svenskt Vattenarkiv.<br>Norrköping 1992                                                             |
| 17 | Bertil Eriksson, Barbro Johansson, Katarina Losjö och Haldor Vedin<br>Skogsskador - klimat.<br>Norrköping 1987                                                                                       | 37 | Maja Brandt<br>Skogens inverkan på vattenbalansen.<br>Norrköping 1992                                                                                                                                          |
| 18 | Maja Brandt<br>Bestämning av optimalt klimastationsnät för hydrologiska prognoser.<br>Norrköping 1987                                                                                                | 38 | Joakim Harlin, Göran Lindström, Mikael Sundby (SMHI) och Claes-Olof Brandesten (Vattenfall Hydropower AB)<br>Känslighetsanalys av flödeskommunens riktlinjer för dimensionering av hel älv.<br>Norrköping 1992 |
| 19 | Martin Häggström och Magnus Persson<br>Utvärdering av 1987 års vårflödesprognoser.<br>Norrköping 1988                                                                                                |    |                                                                                                                                                                                                                |
| 20 | Todor Milanov<br>Frysföruster av vatten.<br>Norrköping 1988                                                                                                                                          |    |                                                                                                                                                                                                                |







Sveriges meteorologiska och hydrologiska institut  
601 76 Norrköping. Tel 011-15 8000. Telex 64400 smhi s.