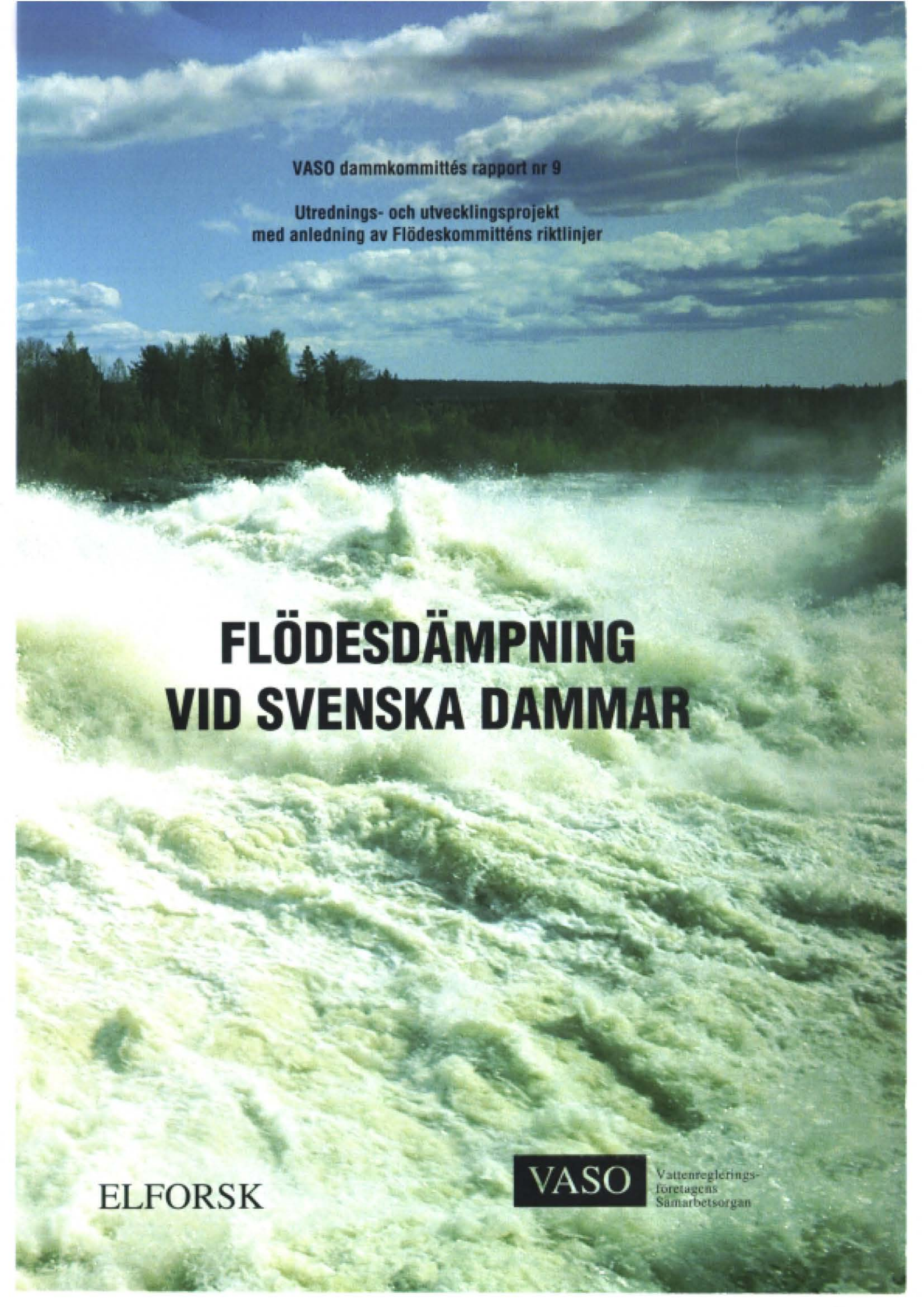




VASO dammkommittés rapport nr 9

Utrednings- och utvecklingsprojekt
med anledning av Flödeskommitténs riktlinjer

FLÖESDÄMPNING VID SVENSKA DAMMAR

ELFORSK

VASO

Vattenreglerings-
företagens
Samarbetsorgan

VASO dammkommittés rapport nr 9

**Utrednings- och utvecklingsprojekt
med anledning av Flödeskommitténs riktlinjer**

FLÖESDÄMPNING VID SVENSKA DAMMAR

**Karl Rytters, VBB Anläggning AB
John-Edvin Sandell, Vattenfall Vattenkraft**

Omslagsfoto: Bengt Johansson, Vattenfall
Grafisk form: Fras&Form
Tryck: Spånga Tryckeri AB 1995
ISSN 1400-7827

INNEHÅLLSFÖRTECKNING

FÖRORD	i
SAMMANFATTNING	iii
SUMMARY	vi
1. INLEDNING	1
1.1. Bakgrund	1
1.2. Syfte	1
2. SÄKERHETSANALYS AV FLÖDESDÄMPNING	3
2.1. Dammsäkerhet i Sverige	3
2.2. Internationell dammsäkerhet	3
2.3. Erforderlig säkerhet vid flödesdämpning	4
2.4. Metodik	5
2.5. Övergripande säkerhetsanalys	6
3. DAMMTEKNISKA FÖRUTSÄTTNINGAR	9
3.1. Allmänt	9
3.2. Fyllningsdammar	9
3.2.1. Brottmekanismer	9
3.2.2. Ytlig erosion	9
3.2.3. Stabilitetsbrott	10
3.2.4. Inre erosion	11
3.2.5. Slutsatser	11
3.3. Betongdammar	12
3.4. Utskov	13
3.4.1. Allmänt	13
3.4.2. Hydraulisk kapacitet	13
3.4.3. Teknisk kapacitet	14
3.4.4. Reservutskov	15
4. HYDROLOGISKA FÖRUTSÄTTNINGAR	17
4.1. Allmänt	17
4.2. Vattenhushållningsbestämmelser	17
4.3. Tillfällig överdämning	18
4.3.1. Oväder som rör sig längs en älv	18
4.3.2. Upprepade flöden	18
4.3.3. Systemstyrd aktiv dämpning	20
4.3.4. Snabbt ökande inflöden	22
4.4. Förtappning	22
4.4.1. Allmänt	22
4.4.2. Kalenderbaserade förtappningar	23
4.4.3. Optimistiska tappningsstrategier	23
4.4.4. Prognosbaserade förtappningar	23

5.	OPERATIONELLA FÖRUTSÄTTNINGAR	27
5.1.	Allmänt	27
5.2.	Registrering och överföring av information	28
5.2.1.	Allmänt	28
5.2.2.	Nivåregistrering	28
5.2.3.	Flödesmätning	29
5.2.4.	Överföring av mätdata	29
5.2.5.	Bortfall av information	30
5.2.6.	Inverkan av höga flöden	30
5.3.	Analys och beslut	32
5.3.1.	Allmänt	32
5.3.2.	Beslutsunderlag	32
5.3.3.	Driftinstruktioner	33
5.3.4.	Den mänskliga faktorns betydelse	34
5.3.5.	Grundläggande förutsättningar	36
5.4.	Genomförande av driftåtgärd	36
5.5.	Operationell marginal vid aktiv dämpning	39
5.6.	Utrymning	41
6.	SLUTSATSER	43
7.	REFERENSER	47
8.	BILAGA	49

FÖRORD

Vattenkraftutbyggnaden och därmed byggande av stora dammar startade i stor skala i Sverige efter andra världskriget och var mest omfattande under 50- och 60-talen.

Principerna för utformning och konstruktion av dammanläggningarna under denna intensiva utbyggnadsperiod äger i huvudsak sin giltighet fortfarande.

Vad avser krav på utskovens avbördningsförmåga har dessa föreslagits av dammägarna och (efter eventuella justeringar) fastställts av vattendomstol med SMHI som sakkunnig. Kriterierna i detta avseende kan därför sägas ha etablerats gemensamt av dammägarna och SMHI.

Under 1980-talet ifrågasattes i Sverige, såsom tidigare skett i många andra länder, de etablerade principerna för utskovsdimensionering. Flödeskommittén, som tillsattes av kraftindustrin och SMHI för att utreda flödesriskerna, föreslog i sin slutrapport ett nytt sätt att beräkna dimensionerande tillrinning. Kriterierna innebär att dammar med allvarliga brottkonsekvenser skall kunna klara ett påtagligt högre tillflöde än vad man tidigare räknat med.

För att på ett säkert och kostnadseffektivt sätt kunna anpassa dammbeståndet till de nya kraven har ett stort antal utredningar och utvecklingsprojekt genomförts. Dessa projekt har genomförts på uppdrag av VASO dammkommitté, som är kraftindustrins gemensamma organ i dammsäkerhetsfrågor och bland annat har till uppgift att samordna dammarnas anpassning till de nya riktlinjerna. Den styrgrupp som lett arbetet har bestått av Harald Eriksson – Sydkraft, som varit ordförande, Sten Lasu – Svenska Kraftverksföreningen, Lennart Markland – Vattenregleringsföretagen samt Malte Cederström och Urban Norstedt – Vattenfall.

För varje projekt finns en rapport och därtill finns en sammanfattande rapport över hela arbetet, huvudrapporten (nr 1), vilken även innehåller en sammanställning över de rapporter som ingår i serien.

Föreliggande studie har genomförts av Karl Rytters, VBB Anläggning AB under medverkan av John-Edvin Sandell, Vattenfall Vattenkraft. Projektets styrgrupp har bestått av Lennart Markland, Vattenregleringsföretagen och Urban Norstedt, Vattenfall Vattenkraft.

Dämpning kan vara ett sätt att utjämna flödet i samband med höga flöden och därigenom minska skadeverkningarna och samtidigt minska behovet av att utöka avbördningskapaciteten. Syftet med denna studie är att inventera och värdera de särskilda svårigheter som kan vara förknippade med dämpning av flöden samt att ge underlag för generella rekommendationer vad gäller hur långt sådan dämpning kan drivas med acceptabel säkerhet. Utredningen avsåg ursprungligen aktiv dämpning, men har under arbetets gång utvidgats till att avse dämpning generellt, dvs såväl aktiv som passiv.

En riskinventering av detta slag kan lätt ge ett negativt intryck, något som ligger i sakens natur. Inte desto mindre är det nödvändigt att så långt som möjligt sammanställa tänkbara risker för värdering. Utredarna har kommit långt härvidlag, vilket dock inte utesluter att andra riskelement kan finnas – verkligheten överträffar ibland fantasin.

När det gäller värderingen av de enskilda riskerna måste denna ofta baseras på bedömningar, som naturligtvis kan göras olika. Vad gäller de rekommendationer som en sådan inventering och värdering kan ge anledning till är utrymmet för olika värderingar naturligtvis ännu större. Rekommendationerna har i denna studie givits formen av förutsättningar som anses nödvändiga för att dämpning av olika slag skall anses tillfredsställande säker.

Flera av de områden som berörs i denna studie har analyserats i andra rapporter i denna serie och i flera fall kommer fortsatt utvecklingsarbete att ske. I andra fall kommer de gemensamma riktlinjer för dammsäkerhet, som är under utarbetande, att behandla frågan.

Sammanfattningsvis visar studien att de svårigheter som är förknippade med aktiv dämpning kan vara så stora att denna typ av strategi för flödeshantering i möjligaste mån bör undvikas och att systemstyrd aktiv dämpning, vilken förutsätter säkra mätningar, säker informationsöverföring och därpå baserade säkra åtgärder i hela systemet och under hela flödesförloppet bör uteslutas. Denna slutsats stämmer väl överens med ICOLDs rekommendationer.

VASO dammkommitté

SAMMANFATTNING

Denna studie bygger på flera väsentliga förutsättningar. Dels förutsätts att den dammsäkerhetsnivå som Flödeskommittén rekommenderat bör gälla även för andra orsaker till dammbrott än höga flöden. Vidare antas flödesdämpning komma att bli aktuellt som mest vart 50:e till vart 100:e år vid en given anläggning. Endast flödesdämpning i avsikt att tillgodose dammsäkerheten för dammar i Flödeskommitténs riskklass 1 behandlas.

Den tillämpade metodiken är i huvudsak en förenklad sannolikhetsbaserad säkerhetsanalys med primärt syfte att identifiera och kontrollera dominerande riskfaktorer.

Utredningen granskar såväl de dammtekniska förutsättningarna för flödesdämpning som de hydrologiska och de rent operationella förutsättningarna för dämpning genom tillfällig överdämning och förtappning.

I fallet tillfällig överdämning behandlas såväl passiv dämpning som lokalt styrd och systemstyrd aktiv dämpning. Med passiv dämpning menas då överdämning med utskoven helt öppna. Med aktiv dämpning avses att man (aktivt) ökar överdämningen och dämpningen genom att inte helt öppna utskoven.

De dammtekniska och hydrologiska förutsättningarna för flödesdämpning i svenska dammar kan sammanfattas som följer:

- Tillfällig överdämning bör endast ske mot dammar som utsatts för en fördjupad teknisk granskning och befunnits lämpliga. Många svenska fyllningsdammar torde kräva byggnadstekniska åtgärder för att uppfylla detta kriterium.
- Den fördjupade tekniska granskningen bör fastlägga den dammtekniskt säkra överdämningsnivån och den tillåtna överdämningsnivån vid aktiv respektive passiv dämpning.
- Överdämning bör bedrivas så att den tillåtna överdämningsnivån vid aktiv respektive passiv dämpning inte överskrids.
- Det bör dessutom kontrolleras att oacceptabel våguppspolning inte kan komma att ske och den dammtekniskt säkra överdämningsnivån inte kan komma att överskridas vid dimensionerande vindförhållanden eller vid oplanerad reduktion av utskovskapaciteten pga osäkerhet i kapacitetsbestämningen eller igensättning med drivgods.
- För fyllningsdammar av vanlig typ som befinns lämpade för tillfällig överdämning torde den dammtekniskt säkra överdämningsnivån i bästa fall kunna sättas i nivå med överytan av sandfiltret ovanför tåtkärnan.
- Den tillåtna överdämningsnivån vid aktiv dämpning i lämpliga torde i bästa fall sammanfalla med tåtkärnans överkant minskad med fribord för vinddenivellering.
- Den tillåtna överdämningsnivån vid passiv dämpning i lämpliga fyllningsdammar torde i bästa fall sammanfalla med överytan i ovanför tåtkärnan minskad med fribord för vinddenivellering.

- Den tillåtna överdämningsnivån mot lämpliga betongdammar på berg kan i bästa fall tänkas sammanfalla med dammkrönet vid passiv dämpning; vid aktiv dämpning minskat med fribord för vindnivellering. Planerad överströmning bör endast tillåtas efter fördjupad teknisk granskning.
- Överdämningsmagasin som behövs av dammsäkerhetsskäl för dämpning av höga flöden kan normalt inte utnyttjas för skadereduktion vid mer normala högflöden.
- De reella möjligheterna till förtappningar är synnerligen begränsade medan möjligheterna till passiv dämpning är goda och vissa möjligheter till aktiv dämpning finns.
- Aktiv dämpning och förtappning med skadeframkallande tappningar kan endast bedrivas med mätningar i vattendragen av flöden och magasininnehåll som underlag.
- Passiv dämpning ger goda möjligheter att använda befintligt eller nyskapat utrymme för tillfälliga överdämningar intill den tekniska kapaciteten förutsatt en väl känd avbördningsförmåga.
- Strategier för aktiv dämpning bör vara robusta, dvs bygga på få styrande parametrar, ha demonstrerat god förmåga att förutsäga även höga flöden som utvecklas annorlunda än Flödeskommitténs dimensionerande sekvenser samt innehålla marginaler för rådande osäkerheter i kommande flödesutveckling.

En genomgång av *de operationella förutsättningarna för flödesdämpning* leder till följande slutsatser, som delvis är av allmän karaktär men får särskild betydelse vid *aktiv dämpning*:

- Driftorganisationen och driftinstruktionen bör vara väl dokumenterad och säkerhetsanalyserad, bl a på basis av förhållandena under höga flöden. Instruktionen måste vara heltäckande och tydligt ange gränser mellan normal produktionsdrift och säkerhetsdrift vid speciella situationer eller störningar. Driftorganisationen bör fortlöpande övas på hantering av bl a höga flöden och haverier.
- Brister i informationsöverföringen mellan projektering, byggande och drift för befintliga dammar behöver undanröjas genom fördjupade dammsäkerhetsanalyser och rekonstruktion/förbättring av dokumentationen.
- Dammsäkerhetsansvariga personer bör finnas på sådan organisationsnivå att de har reella möjligheter att verkligen bedöma rådande dammsäkerhet och dessutom påverka de ekonomiska förutsättningarna för upprätthållande av dammsäkerheten.
- Det är viktigt att särskilda utbildningskrav ställs på dammsäkerhetsansvariga och på driftpersonalen och det är särskilt viktigt att varje dammägare har en tydligt formulerad dammsäkerhetspolicy.
- Ett systematiskt, heltäckande system för registrering och bearbetning av drifterfarenheter och information beträffande incidenter och fel bör inrättas.
- Oberoende reservsystem för manövrering och kraftförsörjning av samtliga dammsäkerhetsmässigt betydelsefulla luckor bör finnas.

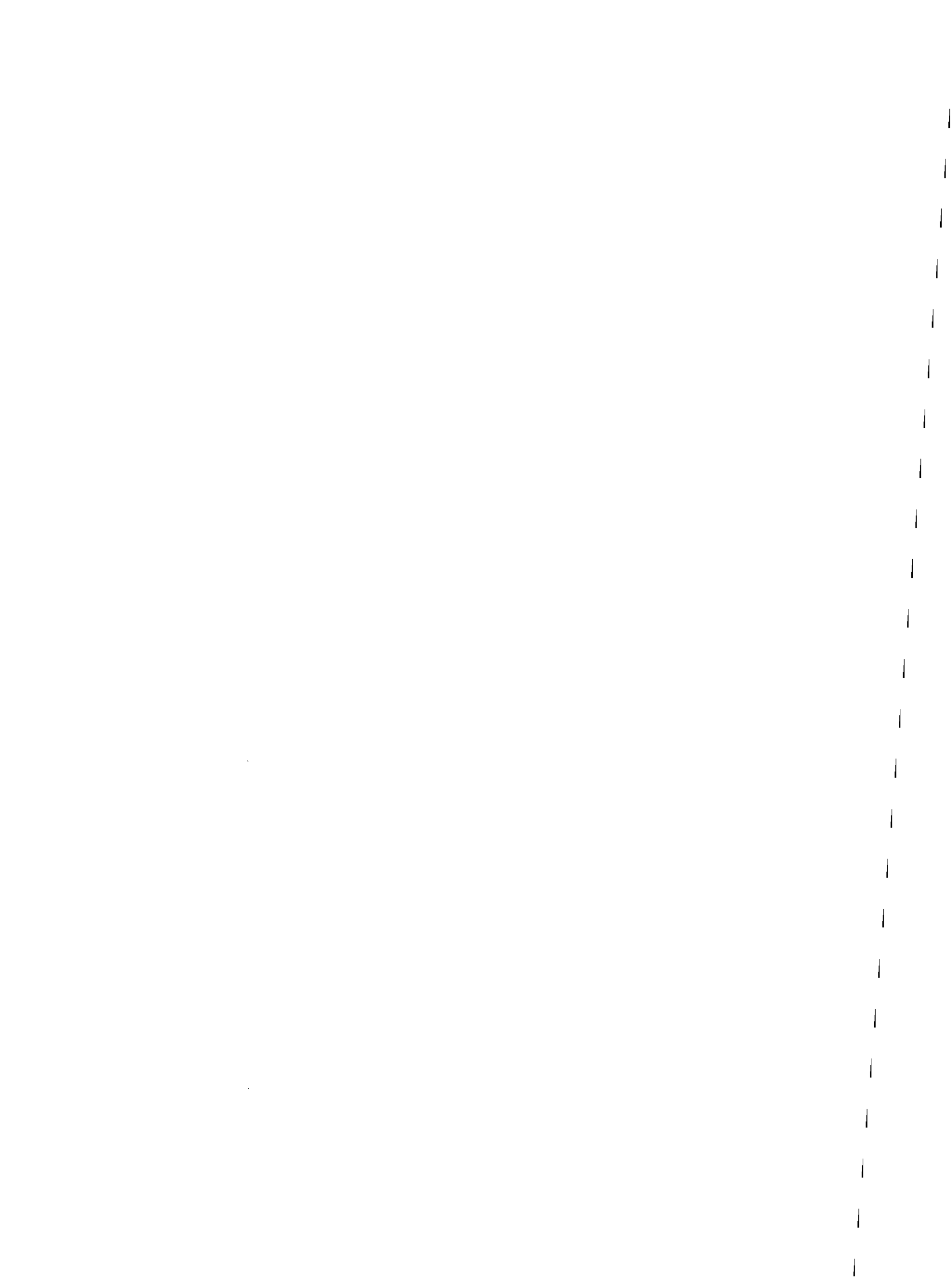
- Kontinuerlig bemanning bör finnas på plats vid dammar där aktiv dämpning sker under hela dämpningsoperationen och genomförande av driftåtgärder för aktiv dämpning skall alltid ske genom lokal manövrering av luckor.
- En från den enskilde dammägaren fristående, övergripande granskning av dammsäkerheten behövs vid aktiv dämpning.
- Systemstyrd aktiv dämpning bör endast övervägas om fördelarna som kan uppnås därmed är betydande. Sannolikt blir det endast fallet i mycket stora avrinningsområden.

SUMMARY

The present study deals with the possibility of flood mitigation as a means of improving dam safety at existing high-hazard dams in Sweden. The investigation method employed is a simplified probabilistic safety analysis which aims at identifying and controlling of dominating risk factors.

The investigation reveals that many Swedish dams will require construction measures in order to permit safe flood surcharges above the present upper retention levels. Thus, thorough safety evaluations will be required for those existing dams which are considered for flood surcharge. These studies should define technically safe surcharge levels and also acceptable levels for planned surcharges with regard to proposed usage frequency and required safety margins. Operational shortcomings due to technical problems, human errors and external climatic impact are to be considered. The risk of losses in discharge capacity due to blockage by floating debris, mostly uprooted trees, is found to be of singular importance.

It is further noted that the most developed form of active flood mitigation, based on current hydraulic information from different parts of a flood system, will put extreme demands on the system, as well as the organisation and planning for dam operation. The conclusion is that such practices should be considered only where the potential benefits are substantial and the flow development is slow, i.e. in very large drainage areas.



1. INLEDNING

1.1. Bakgrund

Flödeskommitténs riktlinjer innebär ökade krav på förmågan att säkert hantera höga flöden vid många svenska dammar. Detta kan uppnås antingen genom att *den säkra avbördningsförmågan ökas* eller genom att *flödena dämpas* så att en lägre utskovskapacitet räcker eller genom *kombinationer* därav.

Flödesdämpning anses i flera fall preliminärt kunna vara en bättre totallösning än en ökning av utskovskapaciteten.

Dämpning kan göras genom *förtappning* och genom magasinering av flödestoppar, t ex genom *tillfällig överdämning*. Sådana åtgärder vid en anläggning kan gynnsamt påverka situationen längs stora delar av en älv, men lokalt ge upphov till skador eller risk*) för skador. Den valda strategin för flödesdämpning har följaktligen stor betydelse.

För att man skall kunna ta ställning till lämpligheten av flödesdämpande åtgärder genom tillfällig överdämning krävs ett brett synsätt. För det första måste man ha klarlagt till vilken nivå överdämning säkert kan ske mot dammarna. För det andra måste man ha analyserat de faktorer som kan leda till att vattnet vid en överdämningsoperation oplanerat stiger till en högre nivå. En planerad överdämning innebär ju att man, helt eller delvis, tar i anspråk fribord, som ursprungligen var avsett som säkerhetsmarginal för oförutsedda eller svårbedömda laster som tjälning, vågor mm.

Ur dammsäkerhetsynpunkt är det väsentligt att skilja på tillfällig överdämning som sker passivt, **passiv dämpning**, med samtliga utskov helt öppna och tillfällig överdämning där man aktivt söker öka dämpningen, **aktiv dämpning**, genom att hålla utskoven endast partiellt öppna eller helt stängda.

1.2. Syfte

Utredningen avses på en övergripande nivå inventera och analysera faktorer som kan påverka dammsäkerheten vid flödesdämpning samt skapa underlag för och ge förslag till *generella* rekommendationer beträffande dammsäkerhetsmässigt acceptabel flödesdämpning i svenska dammar, i första hand genom tillfällig överdämning. Dessa rekommendationer avses beröra såväl tekniska som organisatoriska förhållanden.

*) I denna rapport används begreppet **risk** i betydelsen sannolikhet för att en viss icke-önskvärd händelse, t ex dammbrott eller annan skada, skall inträffa. Risken anges som regel med ett uppskattat värde per dammår eller per tillfälle.

2. SÄKERHETSANALYS AV FLÖDESDÄMPNING

2.1. Dammsäkerhet i Sverige

Många av de större dammarna som byggts i Sverige har kommit att påverka samhällets utveckling i betydande omfattning. Inte bara genom sitt primära ändamål, dvs kraftförsörjning, utan även genom den reglering och därmed dämpning av årliga högflöden som skett. Det senare har möjliggjort utveckling av infrastruktur inom strandnära områden som annars varit omöjliga att bebygga. Kanske har i själva verket allför många områden bebyggts. En konsekvens av denna utveckling är att många dammar i praktiken är svåra, i det närmaste omöjliga att avveckla även om andra kraftproduktionsmetoder någon gång i framtiden skulle slå ut vattenkraften.

Man bör således ur samhällets synpunkt se dammsäkerheten som en fråga på lång sikt och dammarna har att möta var tids krav på säkerhet.

Flödeskommitténs arbete har resulterat i tämligen detaljerade riktlinjer beträffande vissa dammsäkerhetsfrågor. Kommitténs uppdrag var i första hand att initiera en förbättring av säkerheten vid svenska dammar genom att föreslå en ny praxis för bestämmande av dimensionerande flöden vid kraftverks- och regleringsdammars. Kommitténs riktlinjer bygger på en klassificering av dammarna på basis av dammbrottskonsekvenserna.

För dammar i riskklass I, innebärande icke försumbar risk för förlust av människoliv eller risk för annan allvarlig skada vid dammbrott, anges att utskoven dimensioneras för ett flöde beräknat på visst sätt med hjälp av hydrologisk modellteknik.

Den metodik som använts för att bestämma det dimensionerande flödet bygger på en statistisk bearbetning av faktiskt uppmätta nederbördsmängder och innehåller ingen maximering av styrande meteorologiska parametrar. Det dimensionerande flödet har sålunda inte karaktären av probable maximum flood, PMF, trots att det ofta felaktigt betecknas på detta vis.

Kommitténs samlade bedömning är att modellflödet har en återkomsttid överstigande 10 000 år, motsvarande en årlig sannolikhet som understiger 10^{-4} per dammår. Internationella försök att beräkna återkomsttiden av PMF har gett resultat varierande från ca 10 000 år till mer än en miljon år.

2.2. Internationell dammsäkerhet

För *nya dammar* som vid dammbrott kan innebära ökad risk för förlust av människoliv inom bebyggda områden rekommenderar ICOLD, dvs International Commission on Large Dams, att utskoven dimensioneras för probable maximum flood, PMF, med fribord för effekter av vind. Om storleken av detta flöde är osäker på grund av brister i det hydrologiska materialet bör flödet ökas med hänsyn härtill. Endast under speciella omständigheter, t ex om dammen tål överströmning bör en lägre kapacitet väljas.

Utskovskapaciteten bör enligt ICOLD få reduceras med hänsyn till flödesdämpning genom överdämning om denna magasinvolym alltid finns tillgänglig för flödesdämpning, om mycket tillförlitliga drifrutiner och förutbestämda tappningsregler följs och om hänsyn tas till risken för upprepade flöden.

För *befintliga dammar* anger ICOLD att vissa lättnader i dessa dimensioneringskriterier kan vara nödvändiga, men dessa bör i så fall provas och godkännas av en statlig tillsynsmyndighet.

ICOLDS rekommendationer överensstämmer ganska väl med de dimensioneringskriterier som tillämpas i USA och Storbritannien. I båda dessa länder gäller sålunda PMF som dimensionerande flöde för dammar i högsta riskklassen med krav på visst fribord.

Tyska bestämmelser föreskriver dimensionering för 1 000-årsflöden medan fransk praxis utgår från ett flöde med 1 000 till 10 000 års återkomsttid, i båda länderna med uttalade krav på fribord. I Frankrike antas inte bara kraftverksturbinerna utan även en utskovslucka vara ur funktion.

De australiensiska reglerna är intressanta därför att flera olika kriterier utnyttjas så att dammarna dimensioneras inte bara för höga flöden (för högsta riskklassen väljs dimensionerande flöde inom intervallet PMF – 10 000-års flöde) med fribord för vind utan även kombinationer av lägre flöden och andra ovanliga händelser beaktas, t ex ej fungerande utskov.

Det norska regelverket som innebär krav på avbördning av PMF är f n under förändring så att riskklassificering av dammarna införs och så att igensättning av utskov inte längre kommer att behandlas som olyckslast.

I Finland används flöden med återkomsttid mellan 5 000 och 10 000 år för dimensionering i kombination med något strängare krav på fribord till dammkrön respektive tätkärnans överkant än de som tillämpas i andra länder.

Sammanfattningsvis innebär internationell praxis i västvärlden f n att en säkerhet motsvarande en risk för dammbrott pga extrema flöden av högst 10^{-4} à 10^{-5} per dammår anses acceptabelt för nya dammar i högsta riskklassen. För befintliga dammar accepteras ibland vissa lättnader i dimensioneringskraven. Samtidigt kan man notera en viss tendens att allt mer undvika den relativt grova förenkling som en gruppering av dammar i ett fåtal riskklasser innebär.

2.3. Erforderlig säkerhet vid flödesdämpning

Flödeskommitténs riktlinjer får anses ligga väl i linje med nu gällande internationell praxis.

Flödeskommittén gör i sin slutrapport en jämförelse med andra självvalda och inte självvalda dödsrisker i samhället och konstaterar att den valda säkerhetsnivån ingalunda är för hög samtidigt som den innebär en skärpning av hittills tillämpade kriterier. I första hand jämförs dödsriskerna vid dammbrott med motsvarande risker vid användning av allmänna kommunikationsmedel, t ex tåg, flyg och fartyg.

Säkerheten är alltså vald utifrån samhällets beredskap att acceptera risker av detta slag och inte utifrån samhällsekonomiska eller företagsekonomiska grunder.

Säkerheten mot dammbrott av andra orsaker än extrem tillrinning bör väljas på minst samma nivå som säkerheten mot dammbrott pga enbart extrem tillrinning. En lägre nivå skulle förutsätta att samhället såg annorlunda på dammbrott av just dessa andra orsaker och därför vore berett att acceptera högre risker. Det finns ingen grund för ett sådant antagande.

Med denna utgångspunkt bör man för närvarande kräva att flödesdämpning vid svenska dammar i riskklass I skall bedrivas så att risken för dammbrott av andra orsaker än enbart extrema flöden med säkerhet understiger 10^{-4} per dammår.

2.4. Metodik

Bland de olika metoder som finns för säkerhetsanalys intar probabalistisk säkerhetsanalys, PSA, en omdiskuterad särställning. Metoden har vissa inneboende svagheter som gör att resultaten kan ifrågasättas. Det är framförallt svårigheter att behandla osäkerheter i olika sannolikhetsbedömningar, att uppskatta sannolikheter för mänskligt felhandlande (den s k mänskliga faktorn) samt att garantera analysens fullständighet (har alla händelsekedjor som kan leda till brott identifierats?). Metoden anses emellertid numera väsentlig för upprätthållande av en god säkerhet och den rekommenderas därför numera för användning *som komplement* till andra tillgängliga metoder för identifiering och analys av risker, t ex deterministisk säkerhetsanalys, besiktningar, checklistor och naturligtvis sunt förnuft. Värdet i PSA ligger i första hand i metodens bidrag till att dominerande risker kan identifieras och kontrolleras.

Vid deterministisk säkerhetsanalys identifieras, liksom vid PSA, händelsekedjor som kan leda till brott och åtgärder sätts in, oavsett riskens storlek, för att så långt möjligt undvika att de inträffar och så långt möjligt mildra konsekvenserna om de trots allt inträffar. Det senare kan i dammsäkerhetssammanhang betyda att man postulerar dammbrott och identifierar möjliga metoder för att påverka själva dammbrottsprocessen (segt brott) eller skadeutvecklingen, t ex genom att skapa tidsmarginaler för att möjliggöra utrymning av hotade områden. Det rekommenderas att även denna metod utnyttjas för dammsäkerhetens befrämjande.

I fråga om tillämpningar på dammsäkerhet finns, speciellt i samband med flödesdämpning, särskilda svårigheter att f n tillämpa PSA på grund av det synnerligen bristfälliga statistiska underlaget avseende olika felfrekvenser och inverkan av olika exceptionella klimatfaktorer. Trots detta görs här ett preliminärt försök till förenklad säkerhetsanalys för flödesdämpning i huvudsak med probabalistiskt synsätt i avsikt att *identifiera och kontrollera dominerande risker*. Analysen och förslagen bör naturligtvis ses över om kommande undersökningar för att förbättra det statistiska underlaget för bedömning av felsannolikheter visar på väsentliga skillnader mot här gjorda antaganden och bedömningar.

2.5. Övergripande säkerhetsanalys

I denna studie förutsätts primärt att flödesdämpning för upprätthållande av dammsäkerheten blir aktuellt högst en gång vart 50:e till vart 100:e år vid en given dammanläggning, dvs med en årlig frekvens av $1-2 \times 10^{-2}$. Motivet för detta antagande är dels att Flödeskommittén anger att ett 100-årsflöde i normalfallet skall kunna avbördas vid dämningens gränsen och dels eventuella, framtida begränsningar i de lagliga möjligheterna till skadereglering i efterhand.

Vid analys av dammsäkerheten med flödesdämpning som alternativ till utbyggnad av ytterligare säker avbördningskapacitet kan man särskilja följande tre driftsituationer:

- A. Extrema flöden, dvs flöden som överskrider riktlinjernas dimensionerande flödesförlopp.
- B. Höga flöden, dvs flöden med återkomsttid från 50 år upp till riktlinjernas dimensionerande sekvens.
- C. Andra förhållanden.

Det är lätt att inse att skillnader i dammsäkerhet med och utan flödesdämpning uppstår vid höga flöden, dvs i situation **B**, dvs den situation som åtgärden egentligen avser, och analysen bör därför i första hand behandla just denna situation.

Väsentliga effekter kan emellertid uppstå även i andra situationer och det är rimligt att ta hänsyn även till det vid en slutlig värdering och val av metod för att uppfylla riktlinjerna för en viss älv eller anläggning.

Exempelvis kan en dammhöjning eller andra tekniska åtgärder, som genomförs för att möjliggöra tillfällig överdämning, innebära att konsekvenserna av ett eventuellt dammbrott i situation **A** förvärras genom att den vattenvolym som frisläpps ökar så att skadornas omfattning eller karaktär förändras.

Säkerheten mot dammbrott i situation **C**, som innefattar både normala driftförhållanden och onormala förhållanden av annat slag än naturliga höga flöden, förbättras om man för att uppfylla Flödeskommitténs riktlinjer väljer att bygga ytterligare utskov, framförallt om de nya utskoven är av en typ som inte är känsligt för samma slags störningar som de äldre, t ex igensättning, brand eller sabotage. Säkerheten i denna situation förbättras emellertid även om dammens fribord ökas för att möjliggöra tillfällig överdämning genom att bättre tidsmarginal skapas för att man skall hinna komma till rätta med eventuell funktionssvikt hos utskoven och genom att risken minskas för t ex överspolning av vågor genererade av vind eller skred.

Sannolikheten för att ett dammbrott skall inträffa i en given damm stiger naturligtvis med ökande magasinsvattenstånd. Den fortsatta diskussionen förutsätter att man för varje damm där flödesdämpning övervägs, genom en särskild, fördjupad teknisk granskning av anläggningen med hänsyn till dammsäkerheten, bestämmer *den tillåtna överdämningsnivån vid passiv respektive aktiv dämpning*.

Dessutom skall man vid den fördjupade granskningen bestämma den högsta vattennivån som dammen tekniskt *kan förväntas motstå*. Den senare nivån benämns i denna studie *den dammtekniskt säkra överdämningsnivån*. Adjektivet *säker* används i detta begrepp för att klargöra att det inte är den *troliga* brottnivån som avses; möjligen en mycket konservativt uppskattad brottnivå. Trots det antas i följande beräkningar att dammbrott faktiskt inträffar om denna nivå skulle överskridas. Denna marginal anses fin erfordrig med hänsyn till svårigheterna att bestämma väsentliga sannolikheter och beräkningarnas ofullständiga natur.

Den metodik som föreslås innebär att överdämning vid flödesdämpning av riktlinjernas dimensionerande flöde får planeras ske maximalt upp till respektive *tillåtna överdämningsnivåer*, men att man dessutom har att kontrollera att sannolikheten för att den *dammtekniskt säkra överdämningsnivån* oavsiktligt kan komma att överskridas är tillräckligt låg.

Vid *aktiv* dämpning kan överdämningsnivåer nära den *tillåtna* nivån nås vid relativt många dämpningstillfällen genom att man, på olika sätt, aktivt försöker maximera eller öka dämpningseffekten. Ur dammsäkerhetssynpunkt bör därför den *tillåtna* överdämningsnivån vid aktiv dämpning därför vara lägre än motsvarande nivå vid passiv dämpning så att motsvarande högre säkerhet uppnås vid varje dämpningstillfälle.

Om frekvensen av dammbrott i driftsituation **B** med säkerhet skall understiga 10^{-4} per dammår, måste sannolikheten för dammbrott vid tillfällen med *aktiv* dämpning med ovan angiven frekvens med säkerhet understiga $(5-10) \times 10^{-3}$ per tillfälle. Ett flertal olika händelseförlopp kan leda till dammbrott i den aktuella situationen. Vid en genomgång av dessa olika förlopp används i denna studie sannolikheten 1×10^{-3} per tillfälle som övre gräns. Enskilda händelsekedjor som inte *med säkerhet* kan förväntas innebära en lägre risk för dammbrott än så betraktas således som oacceptabla vid aktiv dämpning.

Vid *passiv* dämpning uppnås däremot definitionsmässigt den *tillåtna* överdämningsnivån endast vid dämpning av det dimensionerande flödet. Enskilda händelsekedjor som vid just detta tillfälle inte med säkerhet kan förväntas innebära en sannolikhet av högst 0,1 betraktas sålunda som oacceptabla.

För såväl aktiv som passiv dämpning syftar de här föreslagna gränserna till att sannolikheten för dammbrott i en enskild händelsekedja med säkerhet skall understiga 1×10^{-5} . Inget försök görs däremot att summera sannolikheten för dammbrott över alla olika händelsekedjor, eftersom denna uppgift inte bedöms vara genomförbar idag på ett meningsfyllt sätt, framförallt inte på en generell nivå.

Händelsekedjor med avsevärt lägre förväntad risk för dammbrott, säg en till två tiopotenser lägre än ovan angivna gränser, anses i denna studie som tolerabla och de kan därför avföras från fortsatt diskussion. Händelseförlopp med förväntad risk inom denna zon om en eller två tiopotenser bör i princip analyseras närmare och om möjligt och rimligt undanröjas eller minskas*).

Det bör observeras att om aktiv flödesdämpning utförs med lägre frekvens än en gång vart

*) Principen brukar kallas ALARA, vilket är en förkortning av *As Low As Reasonably Achievable*.

50:e till vart 100:e år kan en högre sannolikhet för dammbrott *per tillfälle* accepteras med samma krav på säkerhetsnivå.

I det följande kapitlet ges synpunkter och vissa generella rekommendationer både beträffande lämpliga *tillåtna* överdämningsnivåer vid dämpning och beträffande den *dammtekniskt säkra* överdämningsnivån. Dessutom görs i de följande tre kapitlen ett försök att analysera förutsättningarna för att en sådan dämpningsoperation i ett verkligt läge skall kunna utföras utan att den *dammtekniskt säkra* överdämningsnivån överskrids av någon orsak. Ett antal kontrollberäkningar specificeras som bör göras i detta avseende. Analysen avser driftsituation **B**. Den initialhändelse som betraktas är således högt naturligt inflöde med åtföljande höga tappningar och vattenstånd eventuellt i kombination med höga vindhastigheter.

Endast dammar hörande till Flödeskommitténs riskklass I och endast dammsäkerhetsmässigt betingad flödesdämpning behandlas.

3. DAMMTEKNISKA FÖRUTSÄTTNINGAR

3.1. Allmänt

De dammtekniska möjligheterna till säker överdämning varierar naturligtvis från damm till damm beroende bl a på de ursprungligen använda projekteringsförutsättningarna samt på dammens och undergrundens beskaffenhet. Dessa frågeställningar täcks som regel inte in av normala rutiner för årliga besiktningar och inspektioner, som mer inriktas på att identifiera förändringar av betydelse för den löpande säkerheten.

Varje damm och varje utskov som avses användas för tillfälliga överdämningar bör därför utsättas för en *fördjupad teknisk granskning* utgående från de undersökningar och utredningar som gjordes när dammen en gång byggdes. Även senare iakttagelser och mätningar i damm och undergrund av deformationer, porttryck, läckvattenflöden mm bör sammanställas och analyseras vid denna granskning så att anläggningens kondition och säkerhet kan bedömas. Omfattningen av företagna grundundersökningar och kvaliteten på dokumentationen från projekteringen, byggnationen och från driftskedet är av stor betydelse. Tillfällig överdämning bör komma ifråga endast vid anläggningar som vid sådan granskning visats lämpliga för ändamålet.

Den fördjupade tekniska granskningen har bl a som mål att bestämma den dammtekniskt säkra överdämningsnivån och sätta gränser för tillåtna överdämningsnivåer vid aktiv respektive passiv dämpning.

3.2. Fyllningsdammar

3.2.1. Brottmekanismer

En närmare beskrivning och analys av de dammtekniska förutsättningarna för flödesdämpning genom tillfällig överdämning mot svenska fyllningsdammar ges i en VASO-studie av Nilsson och Nilsson [1]. De händelser som studerats är högt magasinsvattenstånd och vindgenererade vågor. Generellt sett finns tre olika förlopp som kan leda till dammbrott:

- Ytlig erosion i dammens uppströmsslänt och krön.
- Stabilitetsbrott i nedströmsslänten.
- Inre erosion i dammkropp eller undergrund.

Dessa brottmekanismer kan samverka, så att ett brott som inleds med t ex vågerosions-skador på dammkrönet, överströmning av tåtkärna och filter eller hydraulisk uppspräckning av tåtkärnan, leder till inre eller yttre erosion och/eller stabilitetsbrott i nedströmsslänten. Studien visar att förutsättningar och kritiska förlopp varierar med dammens konstruktion och aktuella kondition, faktorer som är unika för varje anläggning.

3.2.2. Ytlig erosion

Gångse dimensioneringskriterier för erosionsskydd på fyllnadsdammars uppströmsslänt bygger på försök och erfarenheter avseende utformning av vågbrytare. Kriterierna innebär

att begränsade skador tillåts uppkomma under en storm och förutsätter att reparationer därefter utförs snarast.

Säkerheten mot dammbrott på grund av vågerosion vid överdämning kan preliminärt bedömas vara acceptabel, om nu gällande kriterier för erosionsskydd beträffande minsta stenstorlek, erforderlig tjocklek etc. uppfylls och vågor inte når dammkrönet. Erosionsskyddets utformning, kvalitet och kondition på befintliga fyllnadsdammars uppströmsslänt och krön bör emellertid granskas med tanke på att bergmaterial med bra styckefall och beständighet ofta varit svårt att uppbära och med tanke på omfattningen av redan inträffade skador på erosionsskydd vid svenska dammar. Gällande rutiner för underhåll och reparation av inträffade skador kan behöva ses över och utvecklas.

De krav på fribord för vågor som man dammsäkerhetsmässigt behöver ställa beror på om dammkrönet är uppbyggt så att det har ringa motståndskraft mot vågerosion, om tillträde till eller trafik på krönet behöver ske vid tillfällen med höga vindhastigheter eller om där finns säkerhetsmässigt väsentliga installationer som kan skadas. Om dammkrönet är förstärkt och om ingen av de övriga begränsningarna föreligger, bör man rimligen kunna acceptera att vågor under dimensionerande förhållanden avseende vattenstånd och vind faktiskt når krönet med vissa tidsintervall. Fribordet för våguppspolning bör då kunna väljas motsvarande den beräknade uppspolningen av vågor med en höjd av ca 1,7 gånger signifikant våghöjd vid aktuella vindförhållanden. Om dessa gynnsamma förutsättningar inte föreligger bör fribordet ökas, lämpligen så att det motsvarar uppspolningen av vågor inom intervallet 2,0–2,5 gånger signifikant våghöjd. Frågor om vindnivellerings, vågors uppspolning samt dammkrönets och uppströmssläntens förmåga att motstå vågangrepp behandlas utförligare i två VASO-rapporter [2, 3].

3.2.3. Stabilitetsbrott

Under förutsättning att vågornas uppspolning och erosion kontrolleras och nedströms stödfyllning har tillräcklig genomsläpplighet blir säkerheten mot dammbrott vid överdämning beroende av genomsläppligheten av materialet i dammkrönet ovanför tät kärnan, erosionsmotståndet hos materialet i nedströms dammtå och den koncentration av utflödet som kan ske av topografiska skäl. Erforderlig säkerhet mot dammbrott uppnås lämpligen genom att den dammtekniskt säkra överdämningsnivån begränsas så att materialet i dammtå med viss säkerhetsmarginal *beräkningsmässigt* förblir stabilt vid förväntat utflöde. Denna marginal torde kräva att man medvetet gör antaganden på säkra sidan beträffande t ex materialegenskaper i dammtå och tät kärna. Den reella säkerheten är dessutom känslig för fel i bedömningen av koncentrationen av utströmning och fel i antagna nivåer för materialgränser i dammkrönet.

Om nedströms stödfyllning innehåller väsentliga halter av mer finkornigt material, dvs om det består av sand, grus och kanske även normalt svenskt tunnelberg kan stabiliteten hos nedströmsslänten bli kritisk innan erosionen i dammtå startar. En särskild undersökning och stabilitetsberäkning krävs i detta avseende, se vidare [1].

3.2.4. Inre erosion

Inre erosion i dammkropp och undergrund är internationellt och historiskt sett en av de dominerande orsakerna till brott i fyllningsdammar. Den internationella statistiken utgör följaktligen den bästa tillgängliga grunden för att bedöma riskerna för inre erosion. Statistiken har studerats flitigt. På basis av studier av Londe [4] och Schnitter [5] och norska studier [6] kan sannolikheten för ett sådant dammbrott uppskattas till omkring 10^{-4} à 10^{-5} per dammår vid normal drift av dagens fyllningsdammar. Man kan (något konservativt) uppskatta risken till samma värde *per tillfälle* med full dämning i regleringsmagasinet.

Vid överdämning ökar risken för inre erosion dels på grund av stigande tryckskillnad och högre gradienter och dels därför att dammkrönet belastas.

Krönpartiet är smalare än dammens huvuddel, vilket ökar betydelsen av lokala avvikelser. Materialegenskaperna nära krönet kan dessutom ha förändrats av upprepade frysning och upptining. Plötsliga förändringar av situationen kan uppstå vid överdämning, t ex på grund av hydraulisk uppspräckning eller därför att vattnet når nya inläkningsområden, men ofta kan en god instrumentering ge förvarning om kommande problem.

En tillfällig överdämning får delvis samma karaktär som den första fyllningen av magasinet. Detta är erfarenhetsmässigt en del av en fyllningsdamms liv med kanske 10–20 gånger högre dammbrottsfrekvens än normalt. Den första fyllningen utförs därför som regel med särskild mätutrustning, tekniskt kvalificerad personal och entreprenadmaskiner på plats, dvs med hög beredskap att upptäcka problem och sätta in motåtgärder. Vid en tillfällig överdämning för flödesdämpning har man i ett verkligt läge små eller inga möjligheter att avbryta ”dämningsupptagningen”. Däremot *kanske* man känner dammens och undergrundens tekniska egenskaper bättre än vid den första dämningsupptagningen. Sannolikheten för dammbrott på grund av inre erosion skulle sålunda på historiska grunder generellt kunna uppskattas till ca 2×10^{-3} à 10^{-4} per tillfälle vid överdämning mot fyllningsdammar. Den högsta delen av detta register innebär med här använda förutsättningar en oacceptabel risknivå.

Inre erosion i dammkroppen kontrolleras effektivt av väl dimensionerade och väl utförda filter nedströms tät kärnan, av en god kontaktzon mellan kärna och undergrund, av god genomsläpplighet hos nedströms stödfyllnad och av bra erosionsmotstånd hos dammtån. Inre erosion i undergrunden kan var svårare att kontrollera, men ett bra filter mellan nedströms stödfyllning och undergrund och på andra tänkbara utflödesområden för läckagevatten är av betydelse. Kvaliteten i dessa avseenden avgör i huvudsak om risken för dammbrott i en fyllningdamm skall uppskattas vid intervallets övre eller nedre gräns. Detta är frågor som lämpligen belyses vid den fördjupade tekniska granskningen.

3.2.5. Slutsatser

Tillfällig överdämning bör komma i fråga endast vid fyllningsdammar som vid en fördjupad teknisk granskning visats vara lämpliga i detta avseende. För många svenska dammar torde det innebära att kompletterande tekniska åtgärder behöver vidtas för att denna lämplighet skall uppnås.

Det är dessutom nödvändigt att en hög beredskap beträffande personal, utrustning och material hålls vid alla tillfälliga överdämningar.

I [1] diskuteras vidare några av de åtgärder som kan komma ifråga för att förbättra fyllningsdammars förmåga att tåla tillfälliga överdämningar.

Den *dammtekniskt säkra överdämningsnivån* för lämpliga svenska fyllningsdammar av konventionellt slag torde i bästa fall komma att ligga vid den lägsta nivån hos sandfiltrets överkant över tåtkärnan.

Den tillåtna överdämningsnivån vid *passiv* dämpning bör för lämpliga fyllningsdammar av konventionellt slag *ur dammteknisk synvinkel* maximalt kunna motsvara den lägsta nivån för sandfiltrets överkant minskad med erforderligt fribord för vindnivellering med vind enligt Flödeskommitténs riktlinjer.

Den tillåtna överdämningsnivån vid *aktiv* dämpning bör på motsvarande sätt *ur dammteknisk synvinkel* maximalt få motsvara den lägsta nivån för tåtkärnans överkant minskad med erforderligt fribord för vindnivellering enligt Flödeskommitténs riktlinjer.

Vid *aktiv* dämpning bör dimensionerande vind bestämmas mer konservativt än vid *passiv* dämpning, eftersom de högsta magasinsvattenstånden kan förväntas uppnås vid fler tillfällen och under längre sammanlagd tid. Den ovan föreslagna övre gränsen för tillåten överdämningsnivå vid *aktiv* dämpning torde innebära att kravet på fribord till den dammtekniska säkra överdämningsnivån relativt ofta tillgodoses automatiskt även för vindnivellering vid denna högre vindhastighet.

Kravet på fribord för våguppspolning *eller* andra tekniska eller operationella begränsningar som behandlas i följande avsnitt av denna studie kan leda till att lägre nivåer blir aktuella.

Flödesdämpning genom **förtappning** ställer normalt inga särskilda dammtekniska krav förutsatt att magasinets vattennivå inte avsänks så fort att det innebär risker för stabiliteten hos dammens uppströmsslänt eller magasinets stränder. Dock bör säkerheten mot erosion uppströms utskoven undersökas med tanke på att stora tappningar kan krävas vid oförutsett låga magasinsvattenstånd.

3.3. Betongdammar

Större betongdammar uppvisar internationellt sett en något högre dammsäkerhet än fyllningsdammar och svenska betongdammar grundlagda på berg bör vara väl ägnade att motstå begränsade, tillfälliga överdämningar förutsatt att en fördjupad teknisk granskning inte avslöjar särskilda svagheter.

Denna granskning bör förutom stabilitetsfrågor bl a innefatta en bedömning av dammens och undergrundens aktuella och framtida kondition med hänsyn till olika åldringsprocesser som t ex kemiska angrepp, erosion med kalkurlakning, frostsador; dessa frågor behandlas utförligare av Andersson [7]. Den långsiktiga effektiviteten av olika åtgärder för att kontrollera porttryck i undergrunden kräver regelmässigt en särskild utvärdering.

Den fördjupade tekniska granskningen bör lägga fast *den dammtekniskt säkra överdämningsnivån*, bl a med hänsyn till tillgängliga fribord innan funktionen hos eller tillträde till väsentlig teknisk utrustning påverkas. Dammens och dess grundläggnings stabilitet och förmåga att motstå överdämning, överspolning av vågor och överströmning bör studeras särskilt. Svaga punkter kan även finnas i dammens krönparti nära ordinarie dämningssgräns, men framförallt i lägre anslutningsdammar, stödfyllningar och spärrdammar.

Tillåtna överdämningsnivåer bestäms så att den dammtekniskt säkra överdämningsnivån inte kan komma att överskridas genom vindnivellering vid relevant vindstyrka eller på grund av annan teknisk eller operationell begränsning som behandlas i följande avsnitt.

Den tillåtna överdämningsnivån vid passiv dämpning mot lämpliga betongdammar av vanligt slag grundlagda på berg bör inte överstiga dammkrönets nivå.

Den tillåtna överdämningsnivån vid aktiv dämpning för sådana dammar bör inte överstiga dammkrönets nivå minskad med fribord för vindnivellering enligt Flödeskommitténs riktlinjer.

Betongdammar (nya som befintliga), som planeras utsättas för överströmning, skall klassas som nödutskov och skall därför utsättas för en fördjupad teknisk granskning även avseende teknisk förmåga att motstå förekommande hydrauliska belastningar, verklig avbördningskapacitet mm på samma sätt som andra utskov enligt följande avsnitt.

3.4. Utskov

3.4.1. Allmänt

De höga tappningar som krävs för avbördnings av Flödeskommitténs dimensionerande flöden medför att såväl utskovens, vattenvägarnas och anslutande konstruktioners hydrauliska och tekniska kapacitet bör kontrolleras oavsett om flödesdämpande åtgärder planeras eller inte. Förutsättningarna för analysen blir dock något annorlunda vid tillfällig överdämning och vid förtappning. De olika faktorer som bör beaktas diskuteras närmare i en VASO-rapport av Johansson och Rytters [8].

3.4.2. Hydraulisk kapacitet

För att den erforderliga säkerheten mot dammbrott inte skall äventyras måste man även kontrollera att den *dammtekniskt säkra överdämningsnivån* inte kan komma att överskridas pga en felaktigt bedömd kapacitet hos utskoven. Utskovs hydrauliska kapacitet kan genom en kvalificerad utredning i bästa fall bestämmas med en noggrannhet (standardavvikelse) av omkring 2–5% beroende på aktuella förutsättningar och använd metod.

För att begränsa risken för överskridande av den dammtekniskt säkra överdämningsnivån vid *passiv* dämpning av dimensionerande flöde till den högsta acceptabla sannolikhetsnivån 10% krävs då att man kontrollerar att *den dammtekniskt säkra överdämningsnivån* inte kan komma att överskridas om den verkliga avbördningskapaciteten skulle vara omkring 3–7% lägre än den bedömda.

Vid tillfällen med *aktiv* dämpning är den acceptabla risken för över- skridande naturligtvis betydligt lägre (per dämpningstillfälle) och det krävs därför betydligt större marginaler. I praktiken torde en särskild studie av möjliga fel och osäkerheter i kapacitetsbestämningen och konsekvenserna därav erfordras.

Det är på motsvarande sätt väsentligt för säkerheten vid nedanförliggande dammar som skall dra nytta av flödesdämpning att utskovens kapacitet inte heller har underskattats.

3.4.3. Teknisk kapacitet

En rad tekniska och säkerhetsmässiga faktorer som kan leda till att utskovs verkliga avbördningskapacitet kan vara lägre eller t o m väsentligt lägre än den hydrauliska diskuteras i den ovan nämnda VASO-rapporten [8]. Det kan vara t ex erosion, kavitation, oväntade översvämningar, stabilitetsproblem eller dålig teknisk uthållighet samt dessutom risken att utskovens egentliga kapacitet reduceras genom igensättning med drivgods. Eftersom sådana reduktioner i avbördningskapacitet kan bli avsevärda krävs en hög säkerhet mot underskridanden. Avgörande är hur stor del av den totala utskovskapaciteten som kan slås ut av någon enstaka faktor eller grupp av samhörande faktorer och hur ofta denna kapacitet behöver tas i anspråk. En damm med få utskovsöppningar är naturligtvis känslig för påverkan som innebär att en lucka inte kan öppnas medan en damm med samma utskovskapacitet uppdelad på många små öppningar kan vara känsligare för igensättning med flytgods. En damm med utskov av olika slag som inte rimligen kan påverkas av en enstaka faktor är ur denna aspekt säkrare än om samma damm hade enbart likadana utskov.

För att önskad säkerhet skall uppnås mot dammbrott orsakat av nedsatt avbördningsförmåga på grund av ovan nämnda faktorer kräver en fördjupad teknisk-hydraulisk granskning av utskoven och deras funktion under aktuella förhållanden.

Kunskaperna om trolig omfattning och karaktär av flytgods som transporteras med vattendragen under exceptionella flöden är begränsad. Intill dess särskilda studier visar annat, får man därför förutsätta att betydande transport av timmer, hela träd och annan bråte kommer att äga rum under stora flöden. Det bygger dels på svenska erfarenheter och dels på erfarenheterna från flödet 1987 i sydöstra Norge.

Flytgods som når ett vattenmagasin transporteras över detta med en hastighet som påverkas av aktuella strömningshastigheter, vågor och vindförhållanden. De antaganden som görs i Flödeskommitténs riktlinjer beträffande rådande vindhastigheter vid dimensionerande flöde är dock med god marginal sådana att flytgodset kan transporteras flera mil per dygn. Man tvingas därför förutsätta att flytgods kan nå utskoven om vindriktningen är ogynnsam.

Risken för igensättning av utskov med drivande hela träd har studerats i hydraulisk modell bl a av Johansson [9]. Studien visar att sannolikheten för att drivande träd skall fastna är betydande för utskov med i Sverige vanliga dimensioner. Om flera träd driver tillsammans ökar risken avsevärt.

Hänsyn till inverkan av flytgods kan tas på två sätt. Antingen genom att någon sorts förebyggande eller operativa åtgärder vidtas så att sannolikheten för igensättning blir så liten att en tillfredsställande säkerhet ändå kan upprätthållas eller genom att man kontrol-

lerar att igensättning och därmed reducerad utskovskapacitet inte kan leda till att den dammtekniskt säkra överdämningsnivån överskrids.

En utprovad metodik för att i fält planmässigt ta hand om stora mängder drivande träd vid ett flertal utskov i en älv under höga flöden saknas för närvarande, även om vissa preliminära försök utförts. Tills vidare synes därför endast den andra metoden vara tillämplig.

Graden av nedsättning av avbördningskapacitet hos utskov pga drivande brötar av träd har undersökts i modell [9]. Resultaten är osäkra men tycks peka på att kapacitetsminskningar vid igensättning av större utskov av storleksordningen *minst 10–15%* bör påräknas. Här krävs emellertid kompletterande undersökningar.

Såväl aktiv som passiv dämpning bör sålunda bedrivas så att vattenstånden i aktuella magasin kan hållas under den dammtekniskt säkra överdämningsnivån även om avbördningsförmågan skulle reduceras pga igensättning. Om inte särskilda undersökningar visar att risken för igensättning är obetydlig pga utskovens dimensioner, avrinningsområdets eller älvens karaktär eller av andra orsaker, bör man därför tills vidare kontrollera magasinsvattenstånden vid en nedsättning av kapaciteten med förslagsvis *minst 10%* av den teoretiska kapaciteten för passiv dämpning och *minst 20%* av kapaciteten för aktiv dämpning. För små utskov tvingas man kontrollera effekterna av ännu större kapacitetsbortfall om väsentliga mängder flytgods kan förväntas.

3.4.4. Reservutskov

Olika former av reservutskov, t ex eroderbara eller överströmningsbara dammar kan bli aktuella för användning även i samband med flödesdämpning. Dessa typer av utskov kräver en fördjupad teknisk granskning av delvis annorlunda slag, eftersom praktiska drifterfarenheter i stor utsträckning saknas. Särskilt olika erosionsförlopp behöver studeras. Förutsättningar för användning av, utformning och egenskaper hos eroderbara dammar, s k fuse plugs, har undersökts närmare i en utredning av Dan [10].

4. HYDROLOGISKA FÖRUTSÄTTNINGAR

4.1. Allmänt

Säkerheten vid flödesdämpning kräver att det planerade dämpningsförfarandet i förväg testas mot ett flertal olika tänkbara hydrologiska förlopp i det aktuella älvsystemet så att realismen i planerna kan demonstreras och utfallet värderas m h t dammsäkerhet, skador, mm. Dämpningssystemet måste kunna hantera även inflödeshydrografer med utseende som avviker från Flödeskommitténs dimensionerande förlopp i olika avseenden, utan att för den skull vara mer extrema, *inom ramen för tillåtna överdämningsnivåer för aktiv respektive passiv flödesdämpning*.

Flödesdämpning innebär generellt att de största flödena reduceras medan varaktigheten av relativt höga flöden ökas. Flödeskommitténs riktlinjer bygger på en dimensionerande sekvens av nederbörd om 14 dagars längd, som i princip gäller för alla vattendrag inom aktuell del av landet. Sekvensen gäller oberoende av omfattningen av nuvarande dämpning i sjöar och magasin i de olika vattendragen. Om ytterligare flödesdämpning genomförs kan dämpningen teoretiskt tänkas bli så hög att vattendragets karaktär inte längre ryms bland de förhållanden som legat till grund för Flödeskommitténs riktlinjer. Det bör alltså undersökas att dämpningen inte medför oskäligen risker, t ex på grund av upprepade flöden eller oväder som rör sig längs en älv.

Nu är ju spännvidden i dämpning i älvarna redan stor. Å ena sidan sparas vatten från snösmältningen till kommande vinter, vilket innebär betydande dämpning och just ökad känslighet för upprepade flöden, dvs sommar- och höstflöden. Å andra sidan är dämpningen av dessa senare flöden i det närmaste obefintlig för närvarande. En ökad dämpning av sommar- och höstflöden skulle kunna betraktas som en önskvärd återanpassning i riktning mot de ursprungliga naturliga flödesvariationerna i svenska vattendrag.

4.2. Vattenhushållningsbestämmelser

Vid prövning av planerade dämpningsåtgärder är det i första hand rimligt att förutsätta att gällande vattenhushållningsbestämmelser följs, t ex beträffande högsta tillåtna takt i ökning av tappningen. I en konkret flödessituation kan mätningar peka på mycket höga kommande inflöden och man kan då möjligen välja att avvika från bestämmelserna. Detta bör endast få påverka *bedömningen av planerna* om man i förväg klart kan demonstrera prognosmetodens pålitlighet.

Det kan naturligtvis bli aktuellt att begära omprövning av bestämmelserna så att snabbare ökning av tappningen kan göras, speciellt om den dimensionerande hydrografen faktiskt uppvisar en högre ökningstakt. Behovet och nyttan av olika varningssystem för höga tappningar kan behöva undersökas i detta sammanhang.

4.3. Tillfällig överdämning

4.3.1. Oväder som rör sig längs en älv

Riktlinjernas dimensionerande vädersystem förutsätts ligga stilla under den dimensionerande perioden. Om oväderscentrum istället hade rört sig på maximalt ogynnsamt sätt hade något högre flöden skapats. Omvänt kan man säga att dammarna tål en något mindre nederbörd under dessa förhållanden, vilket ansetts rimligt med tanke på att risken för maximalt ogynnsam fart och riktning på vädersystemen bedömts vara ganska liten; inga typiska rörelseriktningar har exempelvis kunnat identifieras.

Vid hög nederbörd sker "flodvågens" förflyttning längs svenska älvar med hastigheter som vanligen är av samma storleksordning eller lägre än typiska hastigheter för vädersystemens rörelser. Om flodvågens hastighet minskas ytterligare genom flödesdämpning påverkar det därför inte risken för att ett oväder skall röra sig på maximalt ogynnsamt sätt på ett avgörande sätt. Möjligen kan man hävda att risken ökas i någon mån genom att den känsliga perioden utsträcks. Flödeskommitténs riktlinjer gäller som sagt för svenska vattendrag oberoende av den nuvarande dämpningen i systemen och variationerna i dämpning är sådana att de helt överskuggar de förändringar som kan tänkas uppstå pga tillfälliga överdämningar.

Ytterligare dämpning är således ur denna synvinkel i princip ett acceptabelt sätt att reducera de dimensionerande flödena och höja dammsäkerheten.

Ökad dämpning innebär däremot inte alltid en verkligt ökad dammsäkerhet trots att modellberäkningar kan ge detta resultat. Hydrologiska modeller och riktlinjer innebär med nödvändighet en stark förenkling av verkliga förlopp och man måste därför alltid betrakta beräkningsresultaten med en viss försiktighet.

Den nytta som uppnås för området nedströms en damm där dämpning sker beror ju beräkningsmässigt på två förhållanden; dels på flödestoppens minskning och dels på dess förskjutning i tiden. Nyttan av denna tidsförskjutning kan ifrågasättas i små nederbördsområdena med snabb avrinning. En tidigareläggning eller senareläggning av den högsta tappningen med ett dygn eller mindre kan beräkningsmässigt leda till stor nytta vid tillämpning av riktlinjerna genom att tappningen inte drabbar nedströmsområdet samtidigt som den lokala tillrinningen till samma område. Den verkliga dammsäkerhetshöjande effekten kan dock vara betydligt mindre. Det är oundvikligt att olika dämpningsstrategier kommer att innehålla vissa tveksamma element av detta slag och det får man acceptera. Strategierna bör däremot naturligtvis väljas med omsorg så att tveksamma element inte utgör huvudingredienser i förslagen.

Vid kraftig dämpning i större älvsystem överskrids troliga livslängder för enstaka vädersystem, varför istället risken för upprepade flöden tar överhanden.

4.3.2. Upprepade flöden

Med gällande metodik kombineras riktlinjernas dimensionerande 14-dagarssekvens med alla flöden som mätts upp under en tioårsperiod. Förenklat kan man alltså säga att

riktlinjerna i viss mån tar hänsyn till risken för upprepade flöden, dock endast kombinationer av flöden med årlig frekvens av omkring 10^{-4} och 10^{-1} . Det är sannolikt att det lägre av dessa flöden ytterst sällan och i så fall endast marginellt påverkat den dimensionerande flödestoppen. Frågan kan då ställas om andra flödeskombinationer, t ex där båda flödena har en årlig frekvens av omkring 10^{-2} kan innebära större risker för dammbrott just vid flödesdämpning.

Sannolikheten att ett inträffat flöde med årlig frekvens av 10^{-2} skall efterföljas av ytterligare ett under samma år är naturligtvis strax under 10^{-2} förutsatt att händelserna är oberoende av varandra. Om man utgår ifrån att den "effektiva" perioden för höga flöden vid en viss anläggning är omkring 4 månader per år motsvarar sannolikheten att det andra flödet skall uppträda inom loppet av ca 2 veckor efter det första ungefär den här antagna största tolerabla risknivån för en händelsekedja, dvs 10^{-5} per år

Slutsatsen skulle då kunna bli att tillfälliga överdämningar som bedrivs med en frekvens av 10^{-2} per år eller lägre kan tillåtas vara minst 2 veckor vid varje tillfälle med bibehållet krav på dammsäkerhet. Överdämningar med andra frekvenser anpassas i utsträckning så att samma säkerhet bibehålls. Ett femhundraårsflöde skulle exempelvis teoretiskt kunna dämpas genom överdämning under 2,5 månader och ett femtiårsflöde under en vecka. Dessa bedömningar är med all sannolikhet konservativa.

Slutsatserna bygger emellertid på antagandet om oberoende mellan de två flödena och det finns anledning granska detta antagande närmare.

Höga flöden skapas i första hand av hög nederbörd och stora grundvatten- och snömagasin. Det är klart att veckorna efter t ex ett 100-årsflöde tenderar grundvattenmagasinen att vara välfyllda medan eventuella snömagasin däremot avklingat. Samtidigt finns måhända en förhöjd sannolikhet att den aktuella väderlekstypen förblir rådande under perioder av några dagar upp till någon veckas längd med allmänt sett liknande förutsättningar för bildande av lågtryck, fronter, åskväder och hög nederbörd. Vedin och Erikssons studie [11] av extrem arealnederbörd upptar 51 fall av hög nederbörd under den mer noggrant studerade perioden från 1927 till 1988. Statistiken visar en viss överrepresentation av fall med upprepade extrem nederbörd inom loppet av perioder om några dagar upp till omkring en vecka jämfört med det utfall man kunde ha förväntat sig, om nederbördstillfällena varit helt oberoende. Däremot finns inget som tyder på ett sådant förhållande vid längre tidsavstånd än en vecka. Om man utgår från detta, utan att bekymra sig om resultatens signifikans, och också autokorrelationen i markvattenmagasineringsringen tas med i bilden kan man *preliminärt och grovt* uppskatta att de beräknade tidsperioderna för acceptabel överdämning som angivits ovan bör reduceras till följande värden:

Överdämning med frekvens	Acceptabel överdämnings- period
1/50 år	3 dagar
1/100 år	1 vecka
1/500 år	2 månader

Passiv dämpning är alltid den bästa metoden för flödesdämpning om avsikten endast är att minska den lokalt erforderliga utskovskapaciteten vid en aktuell damm.

Vid aktiv dämpning i en damm utnyttjas denna för att dämpa flöden och reducera erforderlig utskovskapacitet vid andra, nedströms belägna dammar. Aktiv dämpning kan utföras på basis av enbart lokalt uppmätbara parametrar, exempelvis vattenstånd och/eller inflöde till eget magasin.

Ovan angivna tidsperioder för tillfällig överdämning torde inte innebära några begränsningar i önskad omfattning av passiv dämpning och troligen inte heller för lokalt styrd aktiv dämpning.

Däremot uppstår starka argument mot aktiv dämpning som verktyg för att reducera effekterna längs älvarna av mer vanligt förekommande flöden, såvida inte särskilda förutsättningar föreligger, t ex genom att magasinets volym avsatts speciellt för detta ändamål.

4.3.3. Systemstyrd aktiv dämpning

Aktiv dämpning kan även utföras på basis av information om aktuella förhållanden i andra delar av älvsystemet. Om t ex ett häftigt inflöde väntas till en damm med obetydligt magasin, kan tappningen från ett uppströms beläget magasin genom aktiv dämpning strypas på ett sätt som i bästa fall skapar en hydrograf som är en negativ bild av den förväntade inflödeshydrografen från andra delar av systemet (sk virtuell reglering). Systemstyrd aktiv dämpning innebär emellertid i viss mån en annan riskbild än den ovan behandlade.

Avgörande för risken är hur ofta denna typ av aktiv dämpning blir aktuell. Antag exempelvis att dämpningen styrs av endast ett, exakt uppmätbart flöde i en punkt någonstans i systemet (på avstånd från dammen där dämpningen skall utföras). Hela det tillgängliga överdämningsmagasinet kan då med bibehållande av en acceptabel risknivå användas för aktiv dämpning inom de tidsgränser som angivits i tabell ovan förutsatt att dammen där dämpningen genomförs har egen utskovskapacitet som inte kräver någon dämpning alls.

Situationen blir mer komplicerad om den aktiva dämpningen planeras ske utifrån två eller fler parametrar, t ex inflödet till egen anläggning och flödet i en eller flera andra punkter i systemet. Metoden innebär i princip att dämpning kommer att påkallas betydligt oftare. Om de styrande flödena vore sinsemellan helt oberoende, kunde man räkna med att för dämpning av flöden större än exempelvis ett 500-årsflöde vid en av fem mätpunkter skulle dämpning komma att krävas vart 100:e år. I realiteten tvingas man dock tillgripa dämpning ännu tätare (omkring vart 50:e år) för att gardera sig mot mätfel i de styrande flödena. Med tanke på risken för upprepade flöden minskar då den acceptabla överdämningstiden från 2 månader till omkring 3 dagar.

Nu kommer de styrande parametrarna emellertid knappast att vara helt oberoende från varandra utan istället uppvisa viss positiv korrelation. Det innebär att beräkningen av antalet tillfällen hamnar på säkra sidan. Å andra sidan är det troligt att flera av de styrande flödena samtidigt kommer att vara höga eller relativt höga.

Flödeskommittén behandlar frågan om areell korrelation, bl a genom reglerna för beaktande av dimensionerande förhållanden i en damms hela nederbördsområde respektive i det lokala nederbördsområdet eller i andra signifikanta delar därav. Reglerna innebär att flödestillskottet från övriga delar av området antas motsvara ungefär en 10-årsflod, när det dimensionerande tillflödet från ett delområde beräknas. Denna metodik borde i princip vara lika tillämpbar för de nya delområden som definieras av de styrande parametrarna som används för systemstyrd aktiv dämpning, förutsatt att aktuella överdämningsperioder begränsas på ovan angivet sätt med hänsyn till det verkliga antalet dämpningstillfällen.

För att systemstyrd aktiv dämpning skall vara effektivt krävs naturligtvis att de geografiska och tidsmässiga förutsättningarna föreligger, så att den aktiva dämpningen kan göras i tid för att reducera inflödet till aktuell damm när den lokala flödestoppen når dammen. Om detta skall lyckas beror på ett flertal faktorer. Det är viktigt att både den väntade flödestoppen från övriga delar av systemet kan förbestämmas med god noggrannhet i både tid och storlek och att inflödesbidraget av tappningen från dammen som dämpas aktivt kan beräknas till tid och storlek. Risken för misslyckande stiger med ambitionsnivån i planerna, ju större flödesutjämning planerna antas ge desto snävare marginaler tvingas man tillgripa och desto större är risken för misslyckande.

Mer avancerade dämpningsstrategier förutsätter utveckling eller anpassning av vattendragsmodeller för såväl planering som verifiering och drift av dämpningsrutinerna. Inte ens de bästa existerande datormodellerna ger emellertid någon exakt beskrivning av tidsutvecklingen av flöden längs vattendragen. Felet i "flodvågens" beräknade translationshastighet kan mycket väl överstiga 10% och därtill kommer osäkerheten i de prognoserade flödestopparnas storlek. Inte heller erfarenheter i fält från normala eller mindre flöden är någon exakt bas för uppskattningar av flödesutvecklingen eftersom t ex translationshastigheten som regel varierar med flödets storlek. Strategierna måste därför anpassas till dessa ofullkomligheter så att tillåtna överdämningsnivåer vid aktiv dämpning ändå kan innehållas.

Systemstyrd aktiv dämpning bör utgå från verkligen uppmätta vattenföringar och inte från mätningar eller prognoser av nederbörd eftersom precisionen annars blir så dålig att man riskerar säkerheten vid dammarna; antingen genom att dämpning tillämpas alltför ofta, vilket innebär ökade risker för anläggningen där överdämning bedrivs, eller genom att man underlåter att dämpa när nedströms belägna dammar faktiskt har behov av det. Denna fråga belyses närmare under avsnitt 4.4.4 nedan som primärt behandlar prognosbaserade förtappningar, men i stora drag gäller även vid systemstyrd aktiv dämpning.

Det är nödvändigt att parametrarna som skall styra den aktiva dämpningen väljs ut med omsorg. Endast ett fåtal styrande parametrar bör användas (helst bara en eller två) och deras förmåga att verkligen prognosera alla höga flöden i området bör demonstreras, inte bara för Flödeskommitténs dimensionerande sekvenser. Det finns inget principiellt hinder att t ex flöden mätas på ett flertal ställen adderas ihop så att summan kan användas som en styrande parameter. För varje nytt mätvärde ökar emellertid risken för bortfall av mätvärden och kraven på säker signalöverföring.

De bästa förutsättningarna för att reducera dimensionerande flöden genom systemstyrd aktiv dämpning har man naturligtvis en bit ner i älvsystemen. Framförallt dammar med små lokala nederbördsområden, där alltså kommande inflöden till stor del kan uppmätas i god tid längre uppströms, är lämpliga objekt för att dra nytta av aktiv dämpning. Dammen där

den aktiva dämpningen utförs måste dels ligga inom kort tidsavstånd uppströms dammen som skall skyddas och dels ha tillgång till ett lämpligt dämpningsmagasin.

Om tidsavstånden och de geografiska förutsättningarna är gynnsamma, kan dämpningsmagasinet teoretiskt skapas, delvis genom förtappning.

4.3.4. Snabbt ökande inflöden

Riktlinjerna behandlar dygnsnederbörd och avrinning från nederbördsområdet i sin helhet eller uppdelat i en lokal del och andra delar beroende på förekomsten av vattenmagasin mm. I verkligheten varierar nederbörden starkt även inom dessa delområden och tidsmässigt under dygnet. Dessutom varierar naturligtvis även avrinningen från olika delområden. Ett åskväder som ger regn över ett mindre område, exempelvis direkt på vattenytan i ett magasin, kan därför kortvarigt leda till snabbare ökning av inflödet och nivån i magasinet än den dimensionerande sekvensen. Det är emellertid osannolikt att en sådan förhöjning för någorlunda stora magasin skulle kunna uppgå till mer än omkring 50 mm. En tillfällig förhöjning av denna storleksordning bör utan särskilda kontroller kunna inrymmas inom den tillgängliga marginalen till den dammtekniskt säkra överdämningsnivån.

Ett snabbt ökande inflöde kan dessutom ställa till problem vid tillfällig överdämning, om utskovsluckorna inte är helt öppna och inte kan öppnas tillräckligt snabbt. Med hänvisning till resonemanget ovan borde det emellertid vara fullt tillräckligt att man tar hänsyn till Flödeskommitténs dimensionerande hydrograf(er) i detta avseende.

4.4. Förtappning

4.4.1. Allmänt

Förtappning kan vara ekonomiskt intressant som metod att minska kraven på avbördningsförmåga vid egen eller annan anläggning framförallt under vissa speciella förutsättningar, t ex om:

- Risken är liten att man efter avslutad dämpning inte kan fylla magasinet.
- Den tillfälliga magasinsavsänkningen innebär obetydliga eller inga produktionsförluster.
- Förtappningen inte rimligen kan antas medföra skador på motstående intressen.
- Förtappningsvattnet kan tappas genom kraftverksturbiner och alltså utnyttjas för kraftproduktion.

De två sista av dessa kriterier pekar båda på speciella fördelar om förtappningen kan genomföras vid vanligen förekommande storlekar på tappning, helst mindre än utbyggnadsvattenföringen. Det finns två metoder för detta, nämligen kalenderbaserade förtappningar och optimistiska tappningsstrategier. Dessa har det gemensamt att de i hög grad bygger på bearbetning av historiska erfarenheter snarare än på prognoser av nederbörd och andra hydrologiska parametrar för den närmaste framtiden. Det innebär att regleringen påverkas

under många år och det är nödvändigt att det görs på ett sätt som inte kan leda till återkommande domstolsbehandlingar. Metoderna kan tillämpas även på dammar vars inflöden inte kan prognoseras bra, t ex dammar i älvarnas övre delar.

4.4.2. Kalenderbaserade förtappningar

Denna variant innebär i princip att man frivilligt sänker ”dämningsgränsen” och föreskriver större tappningar vid god magasinsfyllnad *under viss del av året*, vanligen våren och del av sommaren. Magasinet mellan den lagliga och den frivilliga, lägre dämningsgränsen används under denna tid enbart för flödesdämpning. Det är en traditionell metod, även känd som reglering efter tappningsställare. Förutsättningen för att detta skall vara intressant är som regel att man trots allt har mycket goda möjligheter att lyckas fylla magasinet till den lagliga dämningsgränsen under sommaren eller hösten. Metoden är således huvudsakligen användbar för dämpning av vårflöden. Ingen särskild kännedom krävs om förväntade höghöjden, inga skador kan förväntas på motstående intressen och eventuell domstolsprövning borde som regel bli enkel. Metodens kostnadseffekter är lätta att beräkna.

4.4.3. Optimistiska tappningsstrategier

Flödeskommitténs riktlinjer förestavar att en realistisk tappningsstrategi skall tillämpas när det aktuella magasinet fylls upp under våren. Det borde inte finnas något hinder mot att en mer ”optimistisk” strategi föreskrivs, så att man om våren *planmässigt* förutsätter att den kommande tillrinningen blir större än vad man faktiskt har anledning förvänta sig utifrån aktuella snö- och grundvattenmagasin. Det innebär förstås också att man medvetet tar en ökad risk för att magasinet inte fylls och balanserar nettokostnaden för produktionsbortfallet mot vinsten av att inte behöva öka utskovskapaciteten så mycket och vinsten av flödesdämpningen i anläggningar nedströms. Metoden är naturligtvis i första hand användbar för dämpning av vårflöden. Eventuell domstolsbehandling avser i första hand metodens pålitlighet ur dammsäkerhetssynpunkt. Skador på motstående intressen kan förväntas bli ringa. Kostnadseffekterna kan således uppskattas ganska väl. Metoden kan naturligtvis kombineras med kalenderbaserad förtappning.

4.4.4. Prognosbaserade förtappningar

Förutsättningen för att man skall kunna bedriva förtappningar effektivare, dvs inte förtappa så mycket vid tillfällen när det strängt taget inte gör någon nytta, är att exceptionella inflöden till dammen kan prognoseras i tid. Metoden blir i så fall användbar både för vår och höstflöden, men kommer genom en kortare förvarningstid i allmänhet att kräva tappning av relativt höga vattenföringar, normalt långt högre än aktuella utbyggnadsvattenföringar och inte sällan skadeframkallande.

För att undvika återkommande skaderegleringar krävs att prognoserna är så bra att onödiga eller skadliga förtappningar inte blir legio. Prognoserna bör alltså inte överskatta kommande inflöden för ofta eller för mycket. Å andra sidan finns kravet att prognoserna inte får underskatta kommande inflöden eftersom detta kunde leda till ökad risk för okontrollerad höjning av magasinsvattenståndet och eventuellt dammbrott.

Den tolerabla risken att misslyckas med att prognosera ett högflöde som endast kan hanteras säkert med hjälp av förtappning beror på relationerna mellan den säkert tillgängliga avbördningskapaciteten och förekommande flöden. Om man t ex förutsätter att förtappning krävs för alla flöden större än 100-årsflödet blir med i denna studie använda kriterier en sannolikhet att misslyckas med prognosen som med säkerhet är mindre än 10^{-3} per tillfälle tolerabel.

En grov uppskattning av precisionen (standardavvikelsen) i möjliga korttidsprognoser av exceptionella inflödestoppar och volymer kan förslagsvis vara som följer, uttryckt i procent av *verkligt* flöde:

- Prognoser på basis av flöden mätta längre uppströms i älven och på aktuella magasininsnehåll, ± 3 à 7%.
- Prognoser på basis av uppmätt nederbörd och uppmätta markvattenmagasin (inkl. snömagasin), ± 20 à 30%.
- Prognoser på basis av förväntad nederbörd, $\pm 50\%$ eller sämre.

Om förtappning utförs för att reducera dimensionerande flöde vid egen anläggning kan man, åtminstone teoretiskt, välja att varje gång ett högt inflöde prognoseras förutsätta att Flödeskommitténs dimensionerande flöde kommer att inträffa och i princip öppna utskoven fullt. Dammsäkerheten blir då tillfredsställande för egen anläggning förutsatt att man lyckas prognosera högflödet. Samtidigt blir naturligtvis flödesdämpningen sämre än den teoretiskt möjliga om man i förväg känt kommande inflöde och anpassat regleringen optimalt vid varje aktuellt tillfälle. En sådan "optimal" förtappning minskar inte dimensionerande tappning vid egen anläggning, men skulle i vissa fall kunna göra det för andra, nedströms belägna dammanläggningar.

Prognosernas osäkerhet innebär att man tvingas tillgripa förtappning när man väntar ett något mindre inflöde än det för vilket förtappning egentligen krävs. För förtappning av flöden större än 100-årsfloden måste dämpning ske när prognosen på basis av *mätningar i älv och magasin* anger ett omkring 7–20% mindre flöde för att önskad säkerhet skall uppnås för egen anläggning. Detta motsvarar i mycket runda tal en 50-årsflod. För 1 000-årsfloden måste dämpning av samma skäl ske vid prognos om ungefär en 500-årsflod. Metoden att alltid förtappa maximalt leder rent matematiskt till att man vid mer än hälften av de genomförda förtappningarna förvärrar situationen nedströms. Det är knappast acceptabelt och det är därför nödvändigt att förtappningen begränsas till ett lägre flöde än den maximala kapaciteten. I realiteten begränsas naturligtvis förtappningen ofta av det lägre magasinsvattenståndet under förtappningen, vilket medför lägre avbördningsförmåga hos utskoven.

Om man behöver utföra förtappning för flöden större än 100-årsfloden bör förtappningen sålunda förslagsvis begränsas till maximalt ca 70% av denna och vid förtappning för flöden större än 1000-årsfloden begränsas förtappningen till maximalt ca 80% av densamma fortfarande under förutsättning att i stort sett hela prognosen bygger på uppmätningar i älv och magasin. Dessa begränsningar medför att antalet tillfällen då förtappningen ökar största vattenföringen nedströms minskar markant, uppskattningsvis till omkring ett fall av tio. Dessutom bör man kontrollera att säkerheten vid nedströms belägna dammar inte kompro-

meteras otillbörligt vid sådana tillfällen. Kraftigare begränsningar av förtappningarna kan således bli aktuella. Det kan finnas anledning påminna om att inte bara den största tappningens storlek avgör omfattningen av eventuella skador; även en utsträckt varaktighet av höga vattenstånd och tappningar har betydelse.

I praktiken är det f n knappast möjligt att använda förtappning med skadeframkallande vattenföringar på annat huvudsakligt underlag än mätningar i älv och magasin uppströms den aktuella dammen som medel för att uppfylla Flödeskommitténs riktlinjer. Utrymmet för planerade, "optimalt" anpassade förtappningar i syfte att maximera fördelarna för nedströms belägna anläggningar vid denna process verkar vara synnerligen begränsat.

Om man väljer att sätta gränsen för förtappningar med skadeframkallande vattenföringar till dammar, där kommande höglöden till minst 80–85% kan prognoseras utifrån mätningar i vattendrag och magasin blir man i praktiken hänvisad till älvarnas nedre delar och till dammar med måttliga lokala nederbördsområden. Inlödet från en damms lokala nederbördsområde är svårhanterligt på grund av den korta tiden mellan nederbörd och inlöde i det aktuella magasinet. Dammar med små lokala nederbördsområden och samtidigt stora magasin som gör dämpning intressant är dock minst sagt ovanliga, speciellt i älvarnas nedre delar. Det innebär att förtappning med skadeframkallande vattenföringar har en mycket begränsad potential och endast undantagsvis skulle kunna bli intressant som metod för att tillgodose Flödeskommitténs riktlinjer för svenska dammar.

Däremot kan förtappning med lägre vattenföringar naturligtvis utföras på basis av vagare indikationer, t ex känd nederbörd och kända markvattenmagasin. Förtappning med utgångspunkt från nederbördsprognoser verkar däremot f n inte vara en realistisk metod för flödesdämpning såvida inte tappningarna hålls under aktuella utbyggnadsvattenföringar. Inverkan på dammarnas erforderliga avbördningskapacitet av förtappningar på dessa grunder torde vara ringa. Sammanfattningsvis kan sägas att prognosbaserade förtappningar har sin största nytta för att minska skador av mer normala och oftare förekommande flöden.

5. OPERATIONELLA FÖRUTSÄTTNINGAR

5.1. Allmänt

Driftåtgärder för flödesreglering i en älv kräver i princip att följande *delmoment* genomförs:

- Registrering av älvsystemets tillstånd.
- Överföring av information till (och från) driftcentralen.
- Sammanställning och analys av tillgänglig information samt beslut om lämplig driftåtgärd.
- Genomförande av beslutad åtgärd.

Ett fel i något av dessa delmoment kan leda till felaktig eller utebliven driftåtgärd. Damm-brottsrisken beror på den tid som kan gå innan felet upptäcks och korrigerande driftåtgärd sätts in samt naturligtvis på den aktuella flödessituationen.

I princip gäller resonemanget här för alla typer av flödesreglering, men det är uppenbart att olika situationer föreligger vid helt passiva system, som t ex fasta trösklar med fri avbördning och luckutskov där passiv eller aktiv dämpning skall bedrivas.

Tillfällen med högt vattenstånd i magasinet och snabba förändringar i inflödet dominerar riskbilden. Vid passiv dämpning sker erforderliga lucköppningar etc i princip innan vattennivån stigit över den ordinarie dämmningsgränsen. Vid aktiv dämpning kan däremot sådana åtgärder komma att krävas när tillgängliga marginaler är väsentligt sämre. *Den följande diskussionen avser således i första hand förhållandena vid aktiv dämpning av höga naturliga flöden*, dvs i driftsituation **B** enligt tidigare införd nomenklatur. Övriga driftsituationer behandlas endast som bakgrund där systemens uppbyggnad och därmed även deras funktion i situation **B** påverkas på ett avgörande sätt.

Under förutsättning att flödesdämpning vid en anläggning genomförs med en frekvens av högst en gång per 50–100 år kräver den föreslagna tolerabla risknivån att sannolikheten för dammbrott med säkerhet skall understiga $(5-10) \times 10^{-3}$ vid varje dämpningstillfälle.

Vid varje tillfälle med flödesdämpning kommer kanske ett flertal driftåtgärder att behövas, t ex därför att utskovsluckorna skall öppnas i flera steg. Som regel domineras dock dammbrottsrisken av endast en driftåtgärd, utförd eller utebliven. Åtgärden kan eventuellt innefatta manöver med flera luckor.

Vid genomgång av de ovan uppräknade fyra delmomenten i en driftåtgärd används här nivå 1×10^{-3} per behov som övre gräns för den tolerabla risken i vart och ett av de ovan angivna delmomenten för fel som inte (kan) korrigeras innan den dammtekniskt säkra överdämningskapaciteten överskrids.

Delmomenten behandlas i princip var för sig, som om de vore helt oberoende. Emellertid

visar det sig att det finns en del yttre faktorer som samtidigt påverkar sannolikheten för fel i flera av delmomenten. Det tvingar fram vissa övergripande antaganden.

5.2. Registrering och överföring av information

5.2.1. Allmänt

Ett älvsystems tillstånd under drift beskrivs av vattenstånd som mäts i olika punkter, av registrering av aktuell öppning på turbiner och luckor samt av överföring av dessa registreringar till aktuell driftcentral.

Två typer av fel kan förekomma, dels utebliven information och dels felaktig information. Vanligen är utebliven information mindre allvarligt ur dammsäkerhetssynpunkt än felaktig information därför att felet upptäcks snabbare.

5.2.2. Nivåregistrering

Tillförlitligheten i ett elektriskt system för registrering av vattennivå beror både på dess konstruktion och underhåll, klimatfaktorer och på intervallet mellan kontroller av att instrumentet ger rätt information. Förutsatt att kontroll sker regelbundet varje vecka kan man *preliminärt* uppskatta att sannolikheten för fel ligger inom intervallet 3×10^{-4} till 3×10^{-3} per behov för goda system under *normala* förhållanden. Den undre gränsen finns statistiskt belagd för kvalificerade inomhusinstallationer inom andra industrigrenar [12] medan den övre gränsen är en bedömning som bygger på begränsad felstatistik från vattenkraft-installationer [13].

Dessa felnivåer är så stora att väsentliga mätsystem vid alla klass I-dammar med avstängningsbara utskov i praktiken behöver vara kompletterat av minst ett *oberoende* system för att fel inte skall kunna leda till dammbrott. Det sekundära systemet bör vara av annan typ eller konstruktion och rumsligt och elektriskt separerat.

Registreringarna från de olika systemen jämförs lämpligen mer eller mindre kontinuerligt eller åtminstone med så täta intervall att skadliga nivåförändringar inte hinner ske innan fel upptäcks och åtgärder vidtas.

Systematisk, visuell avläsning av pegelskalor genom TV-övervakning eller av dammvakter på plats vid dammen kan utgöra ett av systemen förutsatt att denna övervakning kan genomföras med tillräckligt täta, regelbundna och pålitliga observationer. Beroende på aktuell magasinstorlek kan det innebära att avbrott för nätter, helger, sjukfrånvaro, utbildning, semester, mm inte är acceptabla.

Automatiska nivåvakter och trendövervakare av olika slag kan i vissa fall användas som komplement. För att den erforderliga säkerheten skall uppnås krävs dock att funktionskontroll av dessa anordningar kan göras och görs med korta, regelbundna intervall.

5.2.3. Flödesmätning

Korrekt registrering av aktuell avbördning genom utskov och turbiner är av betydelse för dammsäkerheten vid aktiv dämpning. Felaktig registrering leder ju dels till en felaktig bild av det aktuella tillståndet i älven och därmed kanske till ett felaktigt beslut om åtgärder. Framförallt om en väsentlig del av avbördningskapaciteten finns samlad bakom en enda lucka kan denna typ av fel vara av stor betydelse. Erfarenheterna visar att tillförlitligheten i använda system för angivande av luckpositioner inte är särskilt hög. Sannolikheten för fel kan kanske uppskattas till omkring 1×10^{-3} à 1×10^{-2} per behov under normala förhållanden. För väsentliga utskov, dvs i första hand utskov som hanterar en betydande del av den totala kapaciteten kan tillförlitligheten behöva förbättras genom tätare kontroller, genom installation av reservsystem eller eventuellt genom modifiering av reglersystemets uppbyggnad.

Sambandet mellan aktuell lucköppning, vattenstånd och avbördning kan normalt fastställas med en relativt god noggrannhet. Sämre precision blir det dock ofta vid vissa luckställningar eller vid indämning. Hänsyn till den förväntade precisionen i tappning och utskovskapacitet bör tas när strategier och regler för dämpning utarbetas.

5.2.4. Överföring av mätdata

Signalöverföring från aktuella mätpunkter till platsen för analys och beslut om driftåtgärd kan ske med flera olika metoder. På kortare avstånd, t ex inom anläggningsområdet används som regel särskilda signalkablar. Signalerna från olika kompletterande mätsystem inom en anläggning bör vidarebefodras olika vägar eller skyddas mycket väl. Vid signalöverföring på längre distanser används bärvågssystem, radioöverföring eller överföring via det allmänna telenätet. Funktionssäkerheten hos sådana system som används för den normala driften kan uppskattas med en felsannolikhet från omkring 5×10^{-4} för det säkraste systemet, bärvågssystem på större högspänningsledningar, över radio och telesystem till omkring 5×10^{-3} för det minst säkra systemet, dvs separata signalkablar. Dominerande felkällor är fysisk åverkan (avgrävning), åska, is, vind och systemens kraftförsörjning. Det är ganska vanligt att system kopplas i slingor så att alternativa sambandsvägar finns om avbrott uppstår i den normala vägen.

Fel i signalöverföringen innebär som regel total avsaknad av den aktuella registreringen, vilket normalt är mindre allvarligt än en felaktig registrering, eftersom det lättare uppmärksammas i tid. Förutsättningen för detta är dock att datasystemet inte automatiskt och utan larm ersätter saknade signaler med senast emottagna signal. För att dammsäkerheten skall kunna upprätthållas krävs också att systematisk granskning och analys sker av inkomna signaler.

Alternativet att sända meddelanden med helikopter, väg- eller terrängfordon är tänkbart som komplement, där tillräcklig tidsmarginal finns för att hantera förekommande komplikationer vid sådan trafik. För att man skall kunna påräkna tillgång till mörkerflygande helikopter och pilot med kort varsel krävs dock särskild kontraktering och prioritering i förväg. Dessutom bör hänsyn tas till ekipagets icke-tillgänglighet vid t ex underhåll, vid andra pågående uppdrag, vid sjukdom och semester, etc.

Det är också möjligt att en eventuell mer allmän utbyggnad i Sverige av ett system för akuta sjuktransporter med helikopter enligt t ex norsk modell skulle kunna samutnyttjas även för speciella persontransporter till dammar. För sjuktransporter krävs 2-motoriga maskiner inte bara vid mörkerflygning utan även dagtid och antalet sådana maskiner är mycket begränsat. Alternativt kan utnyttjande av militära helikoptrar tänkas ske.

5.2.5. Bortfall av information

När datainsamlingen om älvsystemets tillstånd inte fungerar, t ex vid bortfall av signal eller vid olika signal från parallella mätsystem måste nödvändiga driftåtgärder hinna vidtas innan fara föreligger.

Ett alternativ är installation av ytterligare, oberoende system för signalöverföring och nivåmätning innebärande att driften kan ske på basis av informationen från de system som fortfarande fungerar när ett system fallerar eller ger avvikande information. Sannolikheten för samtidiga fel i systemen kan då kanske hållas så låg att detta skulle kunna accepteras utan att korregerande driftåtgärder kan vidtas i tid.

Säkerheten kan ibland förbättras om luckorna automatiskt öppnas partiellt (till icke-skadeframkallande tappning) vid bortfall av pålitlig information om t ex magasinsvattensstånd. Detta förutsätter dock ett lokalt placerat och fungerande datorsystem. Vid dammar som skall bedriva aktiv dämpning är metoden inte självklart användbar pga riskerna för andra dammar i älven.

5.2.6. Inverkan av höga flöden

Driftsituation **B**, dvs höga flöden, är av naturliga skäl knappast representerat i den tillgängliga driftstatistiken som utgjort grund för de felsannolikheter som diskuterats ovan. Däremot finns vissa erfarenheter samlade från tillfällen med höga flöden i olika älvar. I bilaga 1 redovisas sålunda såväl internationella som skandinaviska erfarenheter från ett antal höga flöden. Erfarenheterna från olika länder är anmärkningsvärt samstämmiga.

Det bör poängteras att de flödestillfällen som beskrivs i bilagan var ganska godartade i jämförelse med de flöden dammarna enligt riktlinjerna skall dimensioneras för. Problem sammanhängande med sammanbrott i samhällsfunktioner och infrastruktur och utnyttjande av externa resurser kan därför förväntas bli ännu värre vid dimensionerande flödestillfällen.

I situation **B** kan man sålunda förvänta sig lägre tillförlitlighet hos de olika mätsystemen för vattennivå och luckställning, bl a därför att "nytt" mätregister kan bli aktuellt pga tillfällig överdämning eller stora, sällan förekommande lucköppningar, vilket också ger större sannolikhet för både mekaniska och elektriska fel.

Dessutom finns större risk för annan yttre påverkan (regn, stänk, vågor, drivgods och blixtnedslag) än under normala förhållanden. Även "nya" systemfel kan uppträda, t ex oväntad nivåskillnad mellan vattenytan vid pegel och magasin, översvämningar, erosion, etc. Dessa faktorer kontrolleras bäst genom prov av utrustningen under relevanta förhållanden och/eller särskild analys av driftförhållandena för de olika systemen vid höga flöden

och hårt väder och genom att man därefter, där tveksamhet föreligger, vidtar lämpliga åtgärder för att förbättra systemen och uppnå eftersträvad säkerhet.

Även de vanliga systemen för signalöverföring uppvisar sämre tillförlitlighet än normalt. Allmänna tele och radiosystem kan sålunda slås ut, t ex av överbelastning. Hög nederbörd och relativt kraftig vind och höga vattenstånd innebär att risken ökar för störningar t ex av åska, nedfallande träd, kortslutning, mm. En grov uppskattning kan kanske vara att felsannolikheten ökar med en faktor av minst 10, förslagsvis till en storlek av 5×10^{-3} à 2×10^{-1} . Underlaget för denna bedömning är dock svagt.

Erfarenheter från inträffade höglöden pekar dessutom på att olika reservsystem ofta har ännu sämre tillförlitlighet just därför att de inte använts för den normala driften. Detta leder till att funktionskontroller kommer att göras mera sällan och dessutom till att personalen naturligtvis har både sämre kännedom om och beredskap för att använda systemen. Detta är emellertid faktorer som kan påverkas genom lämpligt utformade drifttrutiner.

Möjligheterna att använda vägtrafik för överföring av information och personal till och från en anläggning begränsas i driftsituation **B** av problem med framkomlighet pga översvämningar, skred, omkullblåsta träd och liknande. Sannolikheten för att störningar av detta slag kraftigt sätter ner reshastigheten eller t o m förhindrar tillfart tycks allmänt sett vara stora under höga flöden, förmodligen av storleksordningen 5–50%, naturligtvis beroende på lokala terrängförhållanden och rådande vädersituation.

Där vägtrafik anses nödvändigt under höga flöden, krävs således en *särskild utredning* om de troliga förhållandena längs aktuell tillfartsväg och den antagna reshastigheten får anpassas därtill. För många idag befintliga tillfartsvägar innebär detta sannolikt reshastigheter av 0–20 km/h. Det kan naturligtvis också bli aktuellt att vidta särskilda åtgärder för att förbättra vägens framkomlighet i driftsituation **B**.

Tillgång till en alternativ tillfartsväg löser knappast problemet. Med tanke på den mycket stora risken för avbrott i de ordinarie kraftleveranserna kan även bränsledepåer med tillgång till särskild reservkraft alternativt anordningar för handpumpning behöva förberedas, eftersom vanliga bensinstationer normalt inte är förberedda för drift vid strömavbrott.

Terrängfordon kan vara ett acceptabelt komplement vid måttliga avstånd och under förutsättning att en säker tillfartsled, fri från översvämningar och med säkra broar, kan identifieras och markeras i förväg i terrängen. Reshastigheten sjunker dock troligen med en faktor 5 à 10 jämfört med normala vägtransporter. Samtidigt uppkommer frågan om underhåll och beredskap för lämpliga fordon. Om dessa inte kan utnyttjas också för den normala driften kan man ifrågasätta trovärdigheten i systemet.

Driftsäkerheten beror av många faktorer i uppbyggnaden av olika förekommande system för mätning och signalöverföring som är specifika för varje anläggning och därför kan värderas endast efter en särskild undersökning. Allmänt sett får man dock anta att det kan vara svårt att visa på tillfredsställande driftsäkerhet för anläggningar där *aktiv dämpning* skall bedrivas om de inte kan hållas kontinuerligt bemannade under driftsituation **B**.

Följaktligen bör sådan bemanning krävas. Det är självklart lättare att få personalen på plats om det sker i god tid, innan eventuella väderproblem sätter in och situationen blir pressad.

Beroende på tidsskalan i det hydrologiska förloppet kan även övernattningmöjligheter behöva förberedas. Undantag från bemanningskravet bör medges endast om särskilda utredningar visar att säkerheten kan vidmakthållas ändå.

För en del dammar kommer tidsramen kanske inte att medge att bemanning sker i god tid och då blir det aktuellt att studera och eventuellt förbättra tillfartsmöjligheterna under extrema väderförhållanden. Kan inte tillfredsställande säkerhet uppnås på detta vis, bör avbördningsanordningarna anpassas därtill, så att de automatiskt träder i funktion vid behov. Det åstadkoms bäst genom utskov med fasta trösklar, alternativt utskov med eroderbara dammar eller möjligen genom system för automatisk lucköppning.

De slutsatser som kan dras av erfarenheterna från olika flödestillfällen enligt redovisningen i bilaga 1 gäller inte bara tillförlitligheten i metoder för registrering och överföring av information utan driftsystemen i sin helhet, alltså även t ex organisations- och utbildningsfrågor. Dessa frågor behandlas närmare i följande avsnitt.

5.3. Analys och beslut

5.3.1. Allmänt

Omfattningen av den analys som behövs för beslut om en driftåtgärd varierar i hög grad beroende på vilka parametrar som är styrande.

Det enklaste fallet innebär att regleringen vid en damm under höga flöden sköts automatiskt t ex genom avbördning med helt öppna luckor och över fasta utskov, *passiv dämpning*. Det kräver ingen operationell analys alls.

Därnäst kommer reglering utifrån en enda, lokalt uppmätbar parameter, som regel vattenståndet i magasinet. Anvisningar för hur denna reglering skall bedrivas kan uttryckas enkelt t ex i diagramform och hållas tillgängliga såväl lokalt vid dammen som vid aktuell driftcentral, *lokalt styrd aktiv dämpning*.

Mer komplicerade fall uppstår om regleringen skall påverkas av flödessituationen längs andra delar av vattendraget, alltså *systemstyrd aktiv dämpning*. I detta fall skall en data-mängd sammanställas och analyseras. Eventuellt skall beräkningar utföras av flödesutvecklingen och dammsäkerhetsläget och hur dessa förhållanden påverkas av olika tänkbara, alternativa driftåtgärder.

5.3.2. Beslutsunderlag

För att önskad säkerhet skall kunna vidmakthållas i analys och beslut om driftåtgärder krävs bl a ett gott och väl dokumenterat beslutsunderlag samt i förväg bestämda rutiner och tillvägagångssätt.

Ett gott beslutsunderlag skall innefatta lättillgänglig, aktuell dokumentation avseende en dammanläggnings tekniska utformning och funktionssätt, drifterfarenheter och aktuell status. Brister i dokumentationen kan i många fall återföras till en bristande överlappning

mellan de olika faserna, projektering, byggande och drift. Detta kan ta sig uttryck i dålig dokumentation och/eller redovisning av olika undersökningar och antaganden gjorda under projekteringen om fysiska förhållanden som kan förväntas råda, t ex vid höga flöden. På motsvarande sätt saknas ofta redovisning av väsentliga faktorer härrörande från byggskedet. Dessa saknade redovisningar är speciellt viktiga idag, när det av naturliga skäl finns en sämre förståelse för många dammbyggnadstekniska frågor hos många dammägare än det gjorde under vattenkraftens utbyggnadsskede i Sverige.

Utan återkoppling till projekterings- och byggskedet finns en farlig tendens att driftorganisationen bygger upp egna referensramar för bedömning av dammars säkerhet grundade enbart på egen erfarenhet, vilket regelmässigt utesluter flöden i närheten av de dimensionerande.

Ett systematiskt, heltäckande system för rapportering av fel och incidenter vid svenska dammar är en viktig del av ett gott beslutsunderlag. *Ett sådant system saknas för närvarande och bör snarast komma till stånd.* Idag betraktas fel i delsystem där reserver finns inte som fel i alla organisationer. Bl a detta har lett till underlåtenhet att rapportera faktiska fel och incidenter. Som en följd härav har beslut om dammsäkerhetsmässigt väsentliga förhållanden inte alltid tagits av personer som har tillgång till bästa information och kunskap om de faktiska förhållandena. Det krävs alltså klara definitioner av vad som är rapporteringsvärt.

5.3.3. Driftinstruktioner

Det är uppenbart att de analyser och beslut som krävs för genomförande av driftåtgärder vid flödesdämpning måste utföras enligt i förväg undersökta och definierade regler. I största möjliga utsträckning bör också själva analysen vara utförd i förväg. Reglering ad hoc måste begränsas för att dammsäkerheten inte skall komprometteras. Det krävs en fastställd plan med klara driftinstruktioner. Utan en sådan plan kan sannolikheten för felaktiga beslut och därmed dammsäkerheten inte bedömas i förväg. Planen måste naturligtvis vara väl dokumenterad för att den skall kunna värderas, studeras, övas och användas.

Planen (driftinstruktionen) bör i själva verket vara baserad på en noggrann förstudie av olika tänkbara, dammsäkerhetsmässigt väsentliga händelser och kombinationer av händelser, t ex hög tillrinning med olika utveckling i tid och rum, extrema vädermässiga förhållanden, fel och brister i utrustning av olika slag samt avsaknad av eller felaktig information. Det är emellertid också uppenbart att *alla* möjliga händelser och kombinationer inte kan undersökas och kanske inte ens förutses. Trots detta måste driftinstruktionen utformas heltäckande och distinkt på en generell nivå. Ingen tvekan skall behöva råda om vilka instruktioner som i varje ögonblick gäller, så att bemanning och beredskap, ansvar, befogenheter, prioriteringar, driftåtgärder och information kan anpassas därtill.

Det är särskilt viktigt att planen tydligt anger dammsäkerhetsmässigt betingade gränser för driftåtgärder i syfte att mildra andra konsekvenser av hög vattenföring och höga vattenstånd. Dessutom krävs att gränser preciseras för produktionsbetingade driftåtgärder under höga flöden.

Planen bör även behandla situationen *under och efter* ett eventuellt dammbrott och ange lämpliga åtgärder för att mildra effekterna, t ex utfärdande av varningar eller t o m utrymning.

Det förefaller av flera orsaker olämpligt, svårt eller åtminstone tveksamt att fullständigt automatisera beslutsfattande angående driftåtgärder i samband med aktiv dämpning. Sålunda förutsätts här, trots risken för mänskliga misstag, att de aktuella besluten slutgiltigt tas eller åtminstone godkänns av ansvarig person.

5.3.4. Den mänskliga faktorns betydelse

Insikten att mänskliga misstag är en väsentlig haveriorsak har på senare år vuxit inom samhället och inom många industrigrenar i en sådan omfattning att det närmast kan beskrivas som en trend, se t ex [23]. Inom många verksamheter anses mellan 50 och 90% av alla incidenter och olyckor vara orsakade av den s k mänskliga faktorn. Det är naturligtvis i hög grad en definitionsfråga.

Att mänskliga misstag lätt blir fatala beror naturligtvis på den komplexitet och sårbarhet som numera kännetecknar samhället. I tiden närliggande haverier som anses ha orsakats helt eller delvis av mänskliga misstag är kärnkraftolyckorna i Three Mile Island (feldiagnos) och Tjernobyl (missbruk), den kemiska katastrofen i Bhopal och olyckan vid uppskjutningen av Challenger (i båda fallen brister i organisation och ledning) samt i Sverige t ex spårvagnsolyckan i Göteborg (brister i organisation, ledning och utbildning) och flygolyckan i Gottröra (med liknande orsaker).

Katastrofen i Bhopal i Indien har lett till kraftiga skärpningar av lagstiftningen i USA rörande industriell verksamhet. Inom EU har katastrofen i Seveso haft motsvarande inverkan. Det s k Seveso-direktivet [24] reglerar sedan 1982 kraven på och procedurerna för säkerhetsanalys och ställer krav på myndigheternas granskning av farlig verksamhet inom EU. Detta direktiv torde ha påverkat svensk lagstiftning redan före vårt inträde i EU. Direktivet har förändrats flera gånger så att det numera täcker de flesta industriella verksamheter. Vattendammar omfattas dock inte direkt.

Statistiken från inträffade dammolyckor pekar på att mänskliga misstag har stor betydelse också för dammsäkerheten. Misstag begås såväl under projektering, som vid byggande och drift av anläggningarna. I det följande diskuteras i första hand fel och försummelser som begås i samband med driften och vid föregående analys och projektering av driftsystemet.

Beskrivning och kvantifiering av "den mänskliga faktorn" är en av de stora svårigheterna i probabalistisk säkerhetsanalys. En mängd olika metoder har föreslagits; de har emellertid alla det gemensamt att resultatet påverkas väsentligt av subjektivitet hos undersökaren. En tydlig slutsats är dock att säkerheten beror i hög grad av den aktuella personalens utbildningsnivå, kunskap och motivation. Det gäller kunskap om anläggningens funktion, om den fastlagda planen/instruktionen och om den aktuella driftsituationen. Personalens motivation, inställning och arbetstillfredsställelse är synnerligen väsentlig. Även dessa förhållanden påverkas naturligtvis av utbildningsnivån, men dessutom av en rad andra faktorer som företagets organisation och säkerhetspolicy. Det får inte råda något tvivel om vilken säkerhetspolicy som råder.

En följd härav är att säkerheten mot mänskliga misstag inte gärna låter sig analyseras och kvantifieras generellt; analys förutsätter kännedom om förhållandena vid en speciell anläggning med identifierbar personal, organisation, mm.

Kontrollerade laboratorieexperiment [25] visar att kvalificerade försökspersoner i medeltal löper en risk av storleksordningen 30 till 50% att inte omedelbart känna igen eller kunna relatera en given uppgift i ett normalt informationsflöde till inlärd handlingsmönster. Det är därför nödvändigt att bättra på oddsen. Det sker normalt genom mycket tydlig presentation av styrande parametrar i kontrollrum, t ex genom prioritering av säkerhetsmässigt väsentliga larm och signaler, genom operatörens egenkontroll och korrigering av felaktiga åtgärder, genom utbildning, övning och motivationshöjande personalåtgärder, mm.

Det tål att upprepas att en nödvändig och självklar förutsättning för upprätthållande av en god säkerhet är att driftinstruktionen också tydligt anger rådande ansvarsförhållanden och befogenheter.

Även om man i *vissa fall* kanske lyckas minska den ovan angivna felfrekvensen med en eller två tiopotenser, kvarstår en betydande variation mellan olika individer. Genom särskilt urval av operatörer kan även denna variation nedbringas. Det kan i förbigående noteras att personer mellan 25 och 50 års ålder (speciellt kvinnor) regelmässigt uppvisar den lägsta frekvensen misstag.

Man kan dela in mänskliga misstag efter olika kriterier, t ex beroende på om de inträffar före, i anslutning till eller efter en initierande händelse.

Den första gruppen av fel utgörs t ex av felaktig utformning av utrustning, datorprogram etc och av försummelser på underhållssidan som kan leda till att senare störningar i viktiga funktioner förblir oupptäckta.

Till de andra grupperna av fel hör t ex uteblivet eller felaktigt ingripande från operatörens sida i en störningssituation samt oförmåga att känna igen att en störningssituation föreligger. Här spelar systemets komplexitet och kvaliteten och fullständigheten hos den fastlagda planen en stor roll. Dessa typer av fel är ofta direkt kopplade till den initierande händelsen. Det beror bl a på att sannolikheten för felaktiga eller uteblivna beslut ökar markant i ovanliga driftsituationer där personalen ställs inför frågeställningar och problem som man inte har vana att hantera. Det kan i viss mån bemötas genom återkommande övningar. Andra faktorer som negativt påverkar säkerheten vid störningar är en alltför hög stressnivå, som kan orsakas av t ex yttre påverkan, beslutets stora betydelse, tidsbrist eller mental överbelastning. Här hjälper tyvärr inte övning lika bra, eftersom den riktiga stressituationen är svår att skapa i en övning.

Kombinationer av mänskliga misstag före och efter en initierande händelse är en ganska vanlig haveriorsak inom industriell verksamhet, exempelvis designfel i olika datorprogram följda av tveksamma operatörsingripanden, jfr diskussionerna om haveriet med JAS Gripen i Stockholm 1993.

5.3.5. Grundläggande förutsättningar

Av resonemangen ovan torde det tydligt framgå att man inte *generellt* kan eller bör ange lämplig utformning av system för sammanställning, analys och beslut om driftåtgärder. Däremot kan vissa grundläggande förutsättningar omedelbart läggas fast för att dammsäkerheten skall kunna upprätthållas vid t ex aktiv flödesdämpning.

Det är sålunda alldeles nödvändigt att driftsituationer som innebär ökade risker kan identifieras snabbt och säkert så att beredskapsnivån hinner anpassas till lämplig nivå. Med den här antagna frekvensen av flödesdämpande åtgärder och den förutsatta tolerabla risknivån för dammbrott bör driftinstruktionen föreskriva oberoende kontroller av dammsäkerhetsmässigt väsentliga analyser, beslut och ingripanden under driftsituation som gäller vid aktiv flödesdämpning. Här gäller det dessutom att se till att kontrollerna verkligen görs oberoende; två personer som *tillsammans* genomför en viss analys eller tar ett visst beslut påverkar varandra och säkerheten blir då lägre än om de arbetat var för sig parallellt eller i ordning efter stigande tjänsteställning.

Trots dessa kontroller kommer en del felaktiga driftåtgärder att vidtas beroende på brister i beslutsunderlaget eller i själva utförandet av åtgärderna. Det är rimligt att driftsystemen utformas så att möjlighet ges att upptäcka och korrigera sådana fel.

Vidare är det nödvändigt att såväl driftinstruktionen som driftorganisationen utformas speciellt med tanke på förhållandena under höga flöden och aktiv dämpning och efter granskning läggs fast tillsammans med hela strategin för dämpningen.

Organisationsplanen bör bl a ange krav på utbildningsnivå för olika befattningar, ansvar och befogenheter samt omfattning och karaktär av återkommande övningar. Det är nödvändigt att dammsäkerheten generellt ges en hög prioritet bl a genom att särskild ansvarig person utses för dammsäkerheten hos de olika ägarföretagen.

Vid tillämpning av aktiv dämpning är det särskilt angeläget att det omgivande samhället, inklusive övriga dammägare i älven, har full tilltro till att den eller de dammägare som åtar sig att utföra flödesdämpning också har förmåga och förutsättningar att driftmässigt genomföra den på ett säkert sätt. All erfarenhet pekar på att ambitionsnivån och den systematiska utvärderingen avseende dammsäkerhet varierar mellan olika organisationer. För att önskad dammsäkerhet skall upprätthållas krävs emellertid att dominerande risker identifieras. Dessa förhållanden talar för behovet av någon form av från den enskilde dammägaren fristående, övergripande dammsäkerhetsmässig granskning.

5.4. Genomförande av driftåtgärd

Genomförande av en beslutad driftåtgärd kan generellt sett förhindras av t ex fel i kraftförsörjning, manöverorgan eller i själva luckorna. Dessutom krävs naturligtvis tillträde till aktuellt manöverutrymme eller signalkontakt vid fjärrmanövrering. Det finns också exempel på att fel i datorsystem förhindrat full öppning av utskovsluckor genom fjärrmanövrering.

En särskild utredning om avbördningsanordningars funktionssäkerhet redovisas i [26].

Luckorna i ytutskov och bottenutskov i större svenska dammar är numera vanligen av typen segmentluckor, men även nedåtgående sektorluckor, hjulluckor, glidluckor och valsluckor förekommer.

Funktionshindrande mekaniska fel på själva luckorna är tämligen ovanliga under sommarförhållanden förutsatt regelbunden funktionskontroll och underhåll. Vintertid förekommer

fastfrysning av luckor eller manöveranordningar däremot i ganska hög omfattning. Även andra typer av klimatpåverkan förekommer.

Mest utsatta för fel är luckhjul och andra delar av luckorna som kan blockeras av t ex skräp i falsarna, men känsliga är också luckarmar som sveper utefter betongytor som kan täckas av svallis. Automatisk vattenståndsreglering har i ett antal fall lett till orimligt många luckrörelser och därmed till abnormt snabb förslitning av lager i hjul och luckarmar eller andra mekaniska fel.

Andra feltyper som rapporterats internationellt, såsom fastkilning på grund av stora deformationer eller sättningar förekommer normalt inte i Sverige bl a på grund av förmånliga grundläggningsförhållanden. Fastkilning på grund av t ex förslitning är däremot inte ovanligt för mindre luckor, typ spetluckor.

Vanliga manövreringsanordningar är linspel, kedjespel, kuggstänger och hydraulcylindrar. Fel i manövreringsanordningarna och deras kraftförsörjning är under normala förhållanden dominerande orsak till att utskov inte kan öppnas vid behov.

Styva linor och kedjor som inte kan dras in i magasin eller som dras av brytskivor kan ge problem framförallt vid brister i underhåll och provning. Speciellt utsatta är anordningar fästa på luckornas uppströmssida under vatten. Luckor med linor eller kedjor är också känsliga för fastkörning/kilning mot flytgoods eller annat skräp eftersom luckorna sedan inte kan tryckas fria.

Kuggstänger förslits relativt snabbt. Särskilt vid fjärrmanövrering eller korttidsreglering med automatik kan detta innebära problem. Det krävs gott underhåll med täta intervall för att kontrollera denna effekt.

Förslitna motorer eller kraftöverföringselement är en relativt frekvent feltyp för ovan nämnda manöverdon. Hydraulcylindrar har däremot den fördelen att motorerna kan arbeta mot överströmningsventiler som förhindrar överbelastning om luckan fastnar eller vid annat mekaniskt stopp, t ex fastfrysning. Eftersom bristande funktion hos gränslägesbrytare och lucklägesgivare är vanliga fel, är detta en väsentlig fördel. Brytare för luckors toppläge används sällan och de måste kontrolleras systematiskt för att vara tillförlitliga.

Hydraulcylindrar har sålunda normalt en väsentligt bättre livslängd än t ex kuggstänger.

Ofta är endast en eller ett par luckor försedda med uppvärmning för vinterdrift för att kompensera frånslag. Trasiga pumpar för cirkulation av värmemediet har lett till fastfrysning och funktionssvikt.

Anordningarna för luckmanövrering drivs ofta elektriskt direkt från nätet, men det är rätt vanligt att någon lucka är likströmsmatad från intilliggande kraftstation.

Den tillgängliga statistiken över dammluckors tillförlitlighet är inte särskilt omfattande. Tillgängliga erfarenheter pekar emellertid på att sannolikheten för funktionshinder under normala förhållanden kan ligga mellan 1×10^{-2} och 3×10^{-3} per behov för luckor av aktuella typer vid användning av ordinarie manöverdon. Det betyder att oberoende reservkraft och reservmanöverdon i lämplig form måste finnas för väsentliga utskovsluckor

vid alla klass I-anläggningar. Med all sannolikhet är funktionssäkerheten säsongsberoende, med tyngdpunkten på problemen vintertid. Det kan finnas anledning kontrollera vinterkapaciteten på utskoven, inte bara avseende frånslag.

Funktionshindrande fel uppkommer eller upptäcks oftast vid försök till luckmanöver. En vanlig konsekvens av ett sådant fel är således att önskad driftåtgärd inte kan genomföras. En ännu allvarligare konsekvens är att fel åtgärd kan bli utförd. Det kan t ex ske om att anordningarna för manövrering överbelastas och havererar. Ett försök att öka avbördningen genom ett utskov kan således leda till att flödet stryps istället.

Vid höga flöden kan man förvänta sig sämre tillförlitlighet än normalt hos luckorna och deras olika delsystem på grund av ovanligt stora lucköppningar och höga vattenstånd i kombination med ogynnsamma väderleksförhållanden. Dessutom är sannolikheten stor för avbrott i kraftförsörjningen via elnätet. Tillgängliga erfarenheter visar att batterikapaciteten på likströmsmatningen ibland är planerad för mindre luckrörelser under kortare strömavbrott. Det samma gäller bränsleförråden till befintliga stationära dieselaggregat för reservkraftförsörjning.

Ofta finns dessutom mobila bensin- eller dieseldrivna aggregat som kopplas direkt på lämplig axel. De mobila aggregaten är ibland gemensamma för flera luckor och flera anläggningar. Bränsleförsörjningen och transporterna behöver då planeras.

Reservkraft för luckmanövrering finns som regel i form av handvevar. Handvevning av luckor är emellertid en långsam och mödosam process, som inte utnyttjas frivilligt. Följaktligen är risken betydande att rätt vev saknas eller att metoden på annat sätt gjorts obrukbar när behovet kallar.

Installation av reservkraft löser inte problemen om mekaniska fel uppstår i det ordinarie manöverdonet, t ex om en ställins dragits av eller om en kedja är alltför styv. Om möjlighet finns att lyfta luckan med hjälp av endast den återstående linan eller kedjan uppnår man en viss förbättring av säkerheten men risken är stor att den faktor som fick den ena linan att brista kan påverka även den andra. Beroende på luckdimensionerna kan lyftning endast på den ena sidan kräva en lucka som är torsionsstyv alternativt hjullagrad i tvärled.

Bäst är ett fullständigt oberoende manövreringssystem, t ex möjlighet att lyfta luckan med mobilkran. Erfarenheterna från Noppikoski visar dock att tillgång till extern mobilkran med kort varsel under högflöden inte kan förutsättas utan vidare. Dessutom krävs naturligtvis fungerande tillfartsvägar med god bärighet under besvärliga klimatförhållanden. Lämpligen bör i så fall mobilkran föras till dammen som en del av mobiliseringen innan aktiva dämpningsåtgärder vidtas vid en damm. Flera dammar tillåter idag inte användning av mobilkran vid utskoven pga begränsningar i bärighet.

Förberedelser för sprängning av luckor eller annan dammdel är en tänkbar sista utväg för att uppnå önskad avbördningskapacitet om luckorna inte kan avlägsnas med andra tillgängliga medel. Sprängning kräver möjlighet till aptering av sprängmedel i förberedda positioner under besvärliga yttre omständigheter och naturligtvis tillgång till yrkesfolk och sprängmedel; alltså förplanering.

Även reservutskov som aktiveras automatiskt vid högt vattenstånd är en tänkbar säkerhets-

åtgärd. Det gäller då emellertid att kunna garantera att aktiveringen inte medför nya risker för nedanförliggande anläggningar på grund av ökad total tappning.

Det förefaller tills vidare tveksamt om man under pågående hög tappning kan avlägsna större mängder träd och annat drivgods som blockerat ett utskov.

Ett närbesläktat problem är fastkilning av luckor på grund av att drivgods fastnar i falsarna eller mellan brobana och lucka. Denna feltyp kan befaras bli väsentligt mer frekvent just vid aktiv dämpning, eftersom lucköppnandet då skjuts upp till en tidpunkt då dels ett förhöjt vattenstånd råder och dels större mängder flytgods kan tänkas ha nått luckan. Fjärrmanövrering av luckor bör undvikas vid aktiv dämpning och krav på god belysning med pålitlig kraftförsörjning vid utskoven bör ställas.

Höga vattenstånd, tappningar och stora mängder drivgods kan även medföra nya risker för mekaniska skador på luckor och manöverdon, t ex pga överströmning av luckorna. Betongkonstruktionerna som omger luckorna bör självklart kontrolleras avseende deformationer och risk för klämning av luckorna om överdämningar planeras.

5.5. Operationell marginal vid aktiv dämpning

Enligt Flödeskommitténs riktlinjer får endast medräknas avbördningen hos sådana anordningar som med full säkerhet kan tas i anspråk med kort varsel. Det måste alltså finnas tidsmarginaler för säker funktion i takt med avbördningsbehovet.

För dammar som **utför** aktiv dämpning domineras risken för dammbrott på operationella grunder av någon driftåtgärd eller händelse vid den egna dammen. För dammar som drar nytta av aktiv dämpning men **inte utför** aktiv dämpning är den kritiska driftåtgärden däremot inte en åtgärd vid egen anläggning, eftersom de egna utskovsluckorna i princip bör öppnas helt så snart dämningensgränsen överskrids. En sådan damms operationella säkerhet blir alltså huvudsakligen beroende av beslut om åtgärder och händelser vid en uppströms liggande damm.

Kraven på en anläggning som utför aktiv dämpning måste således sättas inte bara utifrån tillgängliga marginaler vid egen anläggning utan även utifrån tillgängliga marginaler vid alla andra anläggningar som för sin säkerhet är beroende av denna aktiva dämpning.

För driften av dammar som inte själva utför aktiv dämpning uppkommer däremot primärt inga nya krav, såvitt inte dämpningen förutsätter tillgång till aktuell information även från dessa dammar.

Om flera dammar i en älv skall bedriva aktiv dämpning uppstår en ganska komplicerad kedja av krav på dessa dammar. I realiteten blir naturligtvis dammen med den minsta marginalen dimensionerande.

Säkerheten vid aktiv dämpning förutsätter att olika reserver skapas för att ersätta fallerande system för olika delmoment i driftåtgärderna. Det är självklart också nödvändigt att tillräcklig tid verkligen finns för att, under de yttre förhållanden som kan förväntas råda vid exceptionella flöden, upptäcka ett fel, aktivera aktuellt reservsystem och utföra önskad driftåtgärd.

Genomgången ovan visar att flera typer av felaktiga driftåtgärder kan förekomma vid aktiv dämpning. En dominerande feltyp är dock att önskad driftåtgärd uteblir eller blir försenad och detta bör därför normalt användas som karaktäristiskt fel när tillgängliga marginaler beräknas.

En operationell marginal, beräknad som framgår i följande avsnitt, skall således finnas så att rimliga förseningar i driftåtgärder vid flödesdämpning inte leder till att den dammtekniskt säkra överdämningsnivån överskrids vid någon damm.

Erfarenheterna visar att det finns störningar under just höga flöden som samtidigt kommer att påverka flera av delsystemen. Följaktligen bör beräkningen av tidsåtgången för driftåtgärder under höga flöden alltid göras utifrån följande *allmänna förutsättningar*:

- Kraftförsörjningen via elnätet är avbruten i området.
- Allmänna telenät är utslagna.
- Tillfartsvägarna är obrukbara om inte särskild utredning visar på annat.
- Fjärrmanövrering av luckor kan (skall) inte ske.

Övriga fel som man enligt genomförd säkerhetsanalys har att ta hänsyn till för att upprätthålla den önskade säkerhetsnivån kan däremot antas drabba *ett i taget* av de olika delmomenten, dvs:

- Registrering av älvsystemets tillstånd.
- Överföring av information till (och från) driftcentral.
- Sammanställning, analys och beslut om lämplig åtgärd.
- Genomförande av denna åtgärd.

Det betyder exempelvis att delmomentet ”genomförande” antas ske med det långsammaste av de system som kan behöva utnyttjas för att den erforderliga säkerhetsnivån skall kunna bibehållas. Det kan innebära att t.ex. en mobil dieselenhet skall anslutas, användas och flyttas mellan de olika luckorna, att reservmotor skall anslutas, att mobilkran skall tas till platsen och användas eller att sprängladdningar skall apteras och detoneras. När den totala tidsåtgången beräknas antas de övriga delmomenten då löpa problemfritt med iakttagande av de allmänna förutsättningarna ovan.

I delmomentet ”sammanställning, analys och beslut” kan tidsåtgången vid felaktigt beslut med åtföljande tid för kontroll och omprövning bli avgörande.

För olika anläggningar kommer naturligtvis fel i olika delmoment att bli dimensionerande för den maximala tidsåtgången. I fall där regleringen sköts helt och hållet lokalt utifrån endast det egna magasinet vattennivå blir tiden vid fel i delmomentet ”genomförande” helt dominerande.

Utöver största tidsåtgång som på detta sätt kan beräknas, bör förslagsvis, för att i möjligaste mån undvika mänskliga misstag orsakade av alltför hög stressnivå, en säkerhetsmarginal av minst 2 till 6 timmar finnas innan den dammtekniskt säkra överdämningsnivån överskrids. Säkerhetsmarginalen bör väljas med utgångspunkt i komplexiteten i den aktiva dämpningen och konsekvenserna vid misslyckande.

5.6. Utrymning

Det är inte orimligt att ta hänsyn till möjligheterna för utrymning av nedströms liggande områden, när förutsättningarna undersöks för dämpning, speciellt aktiv dämpning. Den verkliga magasinssvattenyta vid dammbrott är med stor sannolikhet något högre än den "dammtekniskt säkra överdämningsnivån". Härigenom och genom den ovan föreslagna marginalen om 2 till 6 timmar vid aktiv dämpning skapas i praktiken möjligheter för utrymning av hotade områden under någorlunda kontrollerade former, om ett dammbrott trots allt verkar svårt att undvika. Det gäller naturligtvis speciellt om dammbrottet sker i en damm belägen på visst avstånd i tid och rum från bebodda trakter.

Erforderlig förvarningstid för utrymning, från beslut till genomförande, är troligen mellan 4 och 10 timmar. Den tid som behövs beror naturligtvis på omfattningen och på de förberedelser som vidtagits, t ex för att kunna larma de berörda människorna. Utveckling av RDS-system för att nå boende genom den vanliga rundradion kan vara av intresse i detta sammanhang, förutsatt att kraftförsörjningen till radioapparaterna kan upprätthållas.

Internationella erfarenheter visar att utrymning förutsätter att de boende i förväg informeras löpande om *aktuella* risker och tänkbara skador.

6. SLUTSATSER

Denna studie bygger på några väsentliga förutsättningar. Dels antas den dammsäkerhetsnivå som Flödeskommittén rekommenderat gälla även för dammbrott av andra orsaker än höga flöden. Vidare antas flödesdämpning komma att bli aktuellt som mest vart 50:e till vart 100:e år vid en viss anläggning. Endast flödesdämpning i avsikt att tillgodose dammsäkerheten för dammar i riskklass I enligt Flödeskommitténs riktlinjer behandlas i utredningen.

De dammtekniska förutsättningarna för flödesdämpning i svenska dammar kan sammanfattas som följer:

- Tillfällig överdämning bör endast ske mot dammar och utskov som utsatts för en fördjupad teknisk granskning och befunnits lämpliga för ändamålet.
- Många svenska fyllningsdammar torde kräva byggnadstekniska åtgärder för att uppfylla detta kriterium.
- Den fördjupade granskningen bör fastlägga den dammtekniskt säkra överdämningsnivån och i förekommande fall den tillåtna överdämningsnivån vid aktiv respektive passiv dämpning.
- Överdämning utförs så att den tillåtna överdämningsnivån vid aktiv respektive passiv dämpning inte överskrids.
- Dessutom kontrolleras att den dammtekniskt säkra överdämningsnivån inte överskrids eller oacceptabel våguppspolning sker vid dimensionerande vindförhållanden eller vid oplanerad reduktion av utskovskapaciteten pga osäkerhet i kapacitetsbestämningen eller igensättning med flytgods.
- För fyllningsdammar av vanlig typ som befinnas lämpade för tillfällig överdämning torde den dammtekniskt säkra överdämningsnivån inte kunna sättas högre än överytan av sandfiltret ovanför tät kärnan.
- Den tillåtna överdämningsnivån vid *aktiv* dämpning i lämpliga fyllningsdammar torde i bästa fall sammanfalla med tät kärnans överkant minskad med fribord för vindnivellering.
- Den tillåtna överdämningsnivån vid *passiv* dämpning i lämpliga fyllningsdammar torde i bästa fall sammanfalla med överytan i sandfiltret ovanför tät kärnan minskad med fribord för vindnivellering.
- Den tillåtna överdämningsnivån vid *passiv* dämpning mot betongdammar på berg torde i bästa fall kunna sammanfalla med dammkrönet.
- Den tillåtna överdämningsnivån vid *aktiv* dämpning mot betongdammar på berg torde i bästa fall kunna sammanfalla med dammkrönet minskad med fribord för vindnivellering.

- Betongdammar, som planeras utsättas för överströmning, skall klassas som nödutskov och utsättas för en fördjupad teknisk-hydraulisk granskning.

De hydrologiska förutsättningarna för flödesdämpning i svenska dammar kan sammanfattas som följer:

- De reella möjligheterna till *förtappning* är synnerligen begränsade.
- *Förtappning* med skadeframkallande tappningar kan inte bedrivas på basis av nederbördsprognoser eller ens mätningar av nederbörd eller markvattenmagasin. Mätningar i vattendragen av flöden och magasinssinnehåll krävs som underlag.
- Överdämningsmagasin som behövs av dammsäkerhetsskäl för dämpning av exceptionella flöden kan normalt inte utnyttjas för skadereduktion vid mer normala högflöden.
- Möjligheterna till *passiv* dämpning är goda.
- Möjligheter till *aktiv* dämpning finns. Endast mätningar av flöden och magasinssnivåer i vattendragen kan med tillräcklig säkerhet tjäna som underlag.
- Strategier för *aktiv* dämpning bör vara robusta, dvs bygga på få styrande parametrar, ha demonstrerat god förmåga att förutsäga även höga flöden som utvecklas annorlunda än Flödeskommitténs dimensionerande sekvenser samt innehålla marginaler för rådande osäkerheter i kommande flödesutveckling.

En genomgång av *de operationella förutsättningarna för aktiv dämpning* leder till följande slutsatser:

- Dämpning skall bedrivas så att den dammtekniskt säkra överdämningsnivån inte kan komma att överskridas vid någon damm pga operationella svårigheter och så att marginalerna medger utrymning under ordnade former av eventuellt hotade områden.
- Driftorganisationen och driftinstruktionen bör vara väl dokumenterad och säkerhetsanalyserad, bl a på basis av förhållandena under höga flöden.
- Driftinstruktionen måste vara heltäckande och tydligt ange gränser mellan normal produktionsdrift och säkerhetsdrift vid speciella situationer eller störningar.
- Brister i informationsöverföringen mellan projektering, byggande och drift för befintliga dammar behöver undanröjas genom fördjupade dammsäkerhetsanalyser och rekonstruktion/förbättring av dokumentationen.
- Dammsäkerhetsansvariga personer bör finnas på sådan organisationsnivå att de har reella möjligheter att verkligen bedöma rådande dammsäkerhet och dessutom påverka de ekonomiska förutsättningarna för upprätthållande av dammsäkerheten.
- Det är viktigt att särskilda utbildningskrav ställs på dammsäkerhetsansvariga och driftpersonal.

- Det är viktigt att dammägarna har en tydligt formulerad dammsäkerhetspolicy.
- Driftorganisationen bör fortlöpande övas på hantering av bl a höga flöden och haverier.
- Oberoende reservsystem för manövrering och kraftförsörjning av samtliga dammsäkerhetsmässigt betydelsefulla luckor skall finnas.
- Ett systematiskt, heltäckande system för registrering och bearbetning av drifterfarenheter och information beträffande incidenter och fel bör inrättas.
- En från den enskilde dammägaren fristående, övergripande granskning behövs för att säkerställa att åtaganden avseende *aktiv* flödesdämpning kan fullföljas.
- Kontinuerlig bemanning skall finnas på plats vid dammar där *aktiv* dämpning sker under hela dämpningsoperationen.
- Genomförande av driftåtgärder för *aktiv* dämpning skall alltid ske genom lokal manövrering av luckor.

Sammanfattande kommentarer och slutsatser blir följande:

Alla överdämningar förutsätter en genomgripande analys av bl a befintliga dammar, utskov och vattenvägar. Beroende på förhållandena mellan befintliga utskovs säkra avbördningskapacitet och den erforderliga kan kompletterande kapacitet behövas. Genom att tillskapa denna i utskov med fasta trösklar utan luckor kan en lämplig sammanlagd avbördningskurva ofta uppnås utan att aktiv dämpning behöver tillgripas; i princip kan den lokalt styrda aktiva dämpningen överföras i passiv dämpning. Passiv dämpning ger goda möjligheter att använda befintligt eller nyskapat utrymme för tillfälliga överdämningar intill anläggningens tekniska kapacitet förutsatt att dammens och utskovens funktionssätt är väl kända. Systemstyrd aktiv dämpning bör endast övervägas om fördelarna som kan uppnås därmed är betydande. Sannolikt blir det endast fallet i mycket stora avrinningsområden.

Eftersom det förefaller sannolikt att dammtekniska åtgärder behöver sättas in vid många av de dammar som avses användas för tillfälliga överdämningar, kan man ifrågasätta om inte de förbättringar som görs, t ex i form av höjning/kvalitetsförbättring av filter, tåtkärna, vågskydd, frostskydd, dammtå och liknande bör tas till med viss marginal så att möjliga framtida förändringar, t ex beträffande klimatinverkan, kan ackommoderas utan ytterligare byggnadsåtgärder. Sådana marginaler är naturligtvis också ett sätt att väsentligt förbättra de operationella förutsättningarna vid dämpning och därigenom minska påfrestningar och krav på driftorganisationen.

Det framstår som ytterligt väsentligt att riskerna för igensättning av utskov med olika dimensioner och med olika lucköppning undersöks vidare. Där större mängder drivgods kan förväntas produceras under höga flöden kommer sannolikt många befintliga utskov inte kunna betraktas som tillräckligt säkra utan ombyggnadsinsatser. För utskov där man kan räkna med att endast behöva hantera mindre mängder drivgods i flödessituationer behövs en i förväg utprovad metod för detta. En avgörande faktor är alltså den sannolika drivgodsproduktionen under höga flöden. Här behövs undersökningar av hur olika terräng-

typer kan förväntas förhålla sig i detta avseende och huruvida drivgoodsproduktionen kan påverkas genom särskilda åtgärder inom nederbördsområdet.

Som inledningsvis poängterades bygger denna studie på idag tillgängligt, bristfälligt underlag beträffande frekvensen av fel och incidenter. Det är därför angeläget att pröva slutsatserna på nytt, när bättre underlag och därmed bättre förutsättningar för en mer omfattande säkerhetsanalys föreligger för olika dammanläggningar.

Flera av de förslag till riktlinjer och regler som skisserats ovan kan formuleras annorlunda. Exempelvis är det möjligt att genom olika schablonmässiga antaganden förenkla analysförfarandet betydligt. Det är inte gjort här, delvis därför att det ligger ett stort värde i att nu initiera en mer detaljerad säkerhetsanalys. Det hindrar dock inte att man i en framtida genomförandefas kan överväga vissa förenklande schabloner.

7. REFERENSER

- [1] VASO dammkommitté, rapport nr 15, Nilsson och Nilsson, *Fyllningsdammars förmåga att tåla överdämning*, 1995
- [2] VASO dammkommitté, rapport nr 11, *Erosionsskydd för fyllningsdammars uppströmsslänter*, 1995
- [3] VASO dammkommitté, rapport nr 12, *Fyllningsdammars förmåga att tåla överspolande vågor*, 1995
- [4] Londe, *Safety Evaluation Using Reliability Analysis*, International workshop on dam safety evaluation, 1993
- [5] Schnitter, *Dam Failures Due to Overtopping*, International workshop on dam safety evaluation, 1993
- [6] NVE-T og VR, Projekt Damsikkerhet, Hovedrapport, 1992
- [7] VASO dammkommitté, rapport nr 19, Andersson, *Betongdammars förmåga att tåla överströmning*, 1995
- [8] VASO dammkommitté, rapport nr 5, Johansson och Rytters, *Verklig avbördningskapacitet*, 1995
- [9] VASO dammkommitté, rapport nr 6, Johansson, *Drivgods vid dammar*, 1995
- [10] VASO dammkommitté, rapport nr 8, Dan, *Fuse plugs– Eroderbara dammdelar*, 1995
- [11] SMHI, Vedin och Eriksson, *Extrem arealnederbörd i Sverige 1881–1988*, Nr 76, 1988
- [12] ATV och Studsvik AB, *T-boken*, Version 3, 1992
- [13] Vattenfall, *Riskstudie över avbördningsystemet i Stadsforsen*, 1990
- [14] Kleivan, Torblaa: *Opinions on Ungated vs Gated Spillway for Embankment Dam*, ICOLD Q63 R9, 1988
- [15] Held, *An Unexpected Flood at the Wloclawek Reservoir in 1982*, ICOLD Q63 R11, 1988
- [16] Diacon, Stenatiu, Mircea: *Improvement of Design Criteria and Operation Instructions for Gated Dams Based on the Analysis of the Belci Dam Overtopping Failure*, ICOLD Int. Symp. on Dams and Extreme Floods, B20, 1992
- [17] Sauri-Pujol, Pou-Planas, Ribas-Palom: *A case study of the Boadella reservoir in the La Muga Basin (Girona, Spain)*, ICOLD Int. Symp. on Dams and Extreme Floods, B21, 1992

- [18] Martin Haggström: *Översiktlig sammanställning av den geografiska fördelningen av skador främst på dammar i samband med septemberflödet 1985*, SMHI Hydrologi Nr 5, augusti 1986
- [19] Bengt Skog: *Dammbröttet i Noppikoski*, VAST-Vattenfall–SWEDCOLD Dammsäkerhetssem. '90
- [20] Audun Björkenes: *Flomsituationer*, NNCOLD *Flommer og flomavledning ved dammar*, april 1989
- [21] Vidar Nebdal Svendsen: *Flomavledning ved dammer. Erfaringer fra oktoberflommen 1987*, Vassdragsdirektoratet V18, 1989
- [22] Gunnar Brox: *Flommen på sør-östlandet i Norge*, VAST-Vattenfall–SWEDCOLD Dammsäkerhetssem. '90
- [23] Allen, Garwick, Hayns and Taig, *The Management of Risk to Society from Potential Accidents*, 1992
- [24] EEC, *Major Accident Hazards of Certain Industrial Activities*, Council Directive 85/501/EEC, 1982
- [25] Taylor-Adams and Williams, *Characterising, predicting and controlling human variability for system reliability assessments*, Safety and Reliability '92
- [26] VASO dammkommitté, rapport nr 7, *Utskovsluckors funktionssäkerhet*, 1995

8. BILAGA

ERFARENHETER FRÅN INTRÄFFADE HÖGFLÖDEN

1. Internationell rapportering

Internationell rapportering av incidenter och olyckor har skett bl a i en rad rapporter till ICOLD, t ex [14,15,16,17]. Exempel på angivna fel och riskmoment är:

- Verklig avbördningskapacitet mindre än förväntad pga indämning, kavitation, erosion, vibrationer, luftmedrivning etc.
- Öppna utskov blockerade av flytgoods.
- Flytgoods förhindrar lucköppning.
- Luckor blockerade av is, sediment, sättningar.
- Bortfall av manöverkraft för luckor.
- Reservkraftaggregat fungerar ej.
- Manöverorgan (motorer) dränkta.
- Fel i automatiskt system för lucköppning.
- Fel i fjärrkontrollsystem.
- Driftpersonalen kan ej nå utskoven pga högt vattenstånd, avskurna tillfarter e d.
- Driftpersonalen upptagen av räddningsarbete.
- Driftpersonalen ej på plats pga strejk e d.
- Driftpersonalen följer ej anvisningar för luckreglering/tappning pga lokala påtryckningar.
- Anvisningarna för luckreglering/tappning otillräckliga (snabbare tappningsökning nödvändig än förutsett och tillåtet).
- Olämplig organisation.
- Otillräcklig information om händelseförloppet.

2. Flödet i mellansverige i september 1985

Händelseförloppet har beskrivits av Martin Häggström, SMHI [18] samt av Bengt Skog, Korsnäs AB [19].

Den 3–4 september passerade ett lågtryck i nordostlig riktning de mellersta delarna av Sverige och följdes av ytterligare ett den 6–7 september. Lågtrycken gav som mest nederbördsmängder om 70–100 mm vardera. Berörda områden var norra Värmland, Dalarna, Gästrikland och södra Hälsingland. Största lokala dygnsnederbörd kan uppskattas till 75–90 mm.

Över Noppikoskis avrinningsområde på 520 km² i Oreälven beräknas den största dygnsnederbörden till ca 60 mm, dvs mindre än hälften av den största dygnsnederbörden i riktlinjernas dimensionerande sekvens.

Regleringsmagasinen i området var efter idogt regnande under juli-augusti nästan helt fyllda och mark- och grundvattenreservoarer ovanligt välfyllda och inom vissa områden helt mättade. Avrinning skedde inom vissa områden på bred front på markytan.

Nederbörden och skadorna fördelades över Ljusnans, Dalälvens och Klarälvens avrinningsområden. Minst 17 dammar inom området rasade och flera andra dammar, vägar och annan infrastruktur skadades. Den sammanlagda skadekostnaden kan uppskattas ha överstigit 200 Mkr.

I Oreälven överströmmades och raserades dammen i Noppikoski, en ca 21 m hög jorrdamm med en magasinerad vattenvolym av 1 Mm³. Den uppströms belägna större dammen i Väsinkoski med mer än 70 Mm³ vatten klarade sig trots att vattennivån steg något över dammens tåtkärna. Längre nedströms i älven skadades flera dammar. Dammen i Hansjö genombröts.

Orsakerna till händelseutvecklingen kan på basis av i första hand Bengt Skogs rapportering, utan inbördes rangordning, sammanfattas som följer:

- Två kraftiga nederbördsområden följde efter varandra och markvattenmagasinen var redan tidigare välfyllda.
- Utskovskapaciteten var otillräcklig.
- Avstängningsanordningarna för utskoven (sättar) svårmanövrerade.
- Mekaniskt fel i manöverutrustningen för dessa avstängningsanordningar.
- Reservmanövreringsanordningar saknades.
- Stora svårigheter att rekvirera extern maskinhjälp bl a på grund av tidpunkten (fredagkväll).
- Tillfartsvägarna avskurna av ”små” bäckar innebärande att personal, verktyg och maskiner inte kunde nå dammen samt och därmed informationsproblem.
- Rekvirerad helikopter kunde (fick) ej flyga om natten.
- Det allmänna telefonnätet sattes ur funktion.
- Radiosystemen inte koordinerade och med otillräcklig räckvidd och otillräcklig passning.
- Kraftstation kunde ej köras pga brott i kraftledning.
- Kraftstation översvämmades och kunde ej köras pga överdämning i magasinet.

- Reservutskov kunde ej öppnas pga höga vattenstånd i älven.
- Reservutskov kunde ej öppnas pga överdämning.
- Massmediabevakning störande och osaklig.
- Otillräcklig beredskapsplanering innebärande att olika inblandade myndigheter och organisationer inte fungerade tillsammans.
- Trötthet hos personalen.
- Svårigheter att rekvirera personell hjälp pga helg.
- Otillräcklig bemanning.

Den sista punkten kan belysas med förhållandet att samma dag överströmmades och rasade även den närliggande Sundsjödammen, varvid ca 2 Mm³ vatten, dubbelt så mycket som från Noppikoski-dammen, frisläpptes. Luckorna i denna damm öppnades aldrig helt eftersom dammvakterna var fullt sysselsatta med åtgärder vid dammarna i Noppikoski och Vässinkoski.

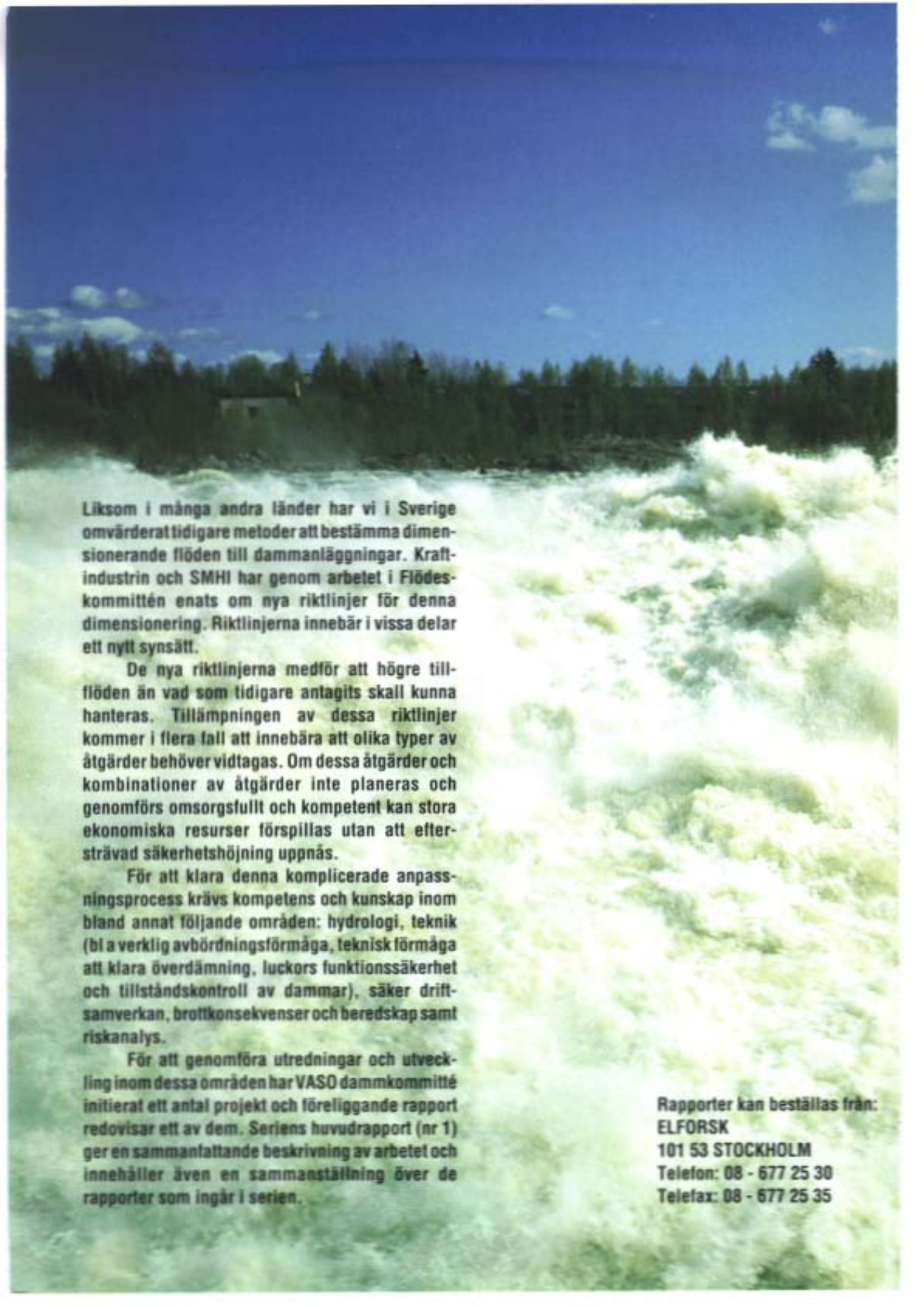
3. Flödet i oktober 1987

Efter en tids regnande utsattes sydöstra Norge i mitten av oktober 1987 för ett intensivt nederbördsområde. Den största dygnsnederbörden över-steg 70 mm. Flödet beräknas ha haft en återkomsttid på ca 100 år i det värst drabbade området. Ovädret gav dessutom mycket kraftiga vindar. Händelserna har beskrivits närmare av Audun Björkenes [20], Vidar Nebdal Svendsen [21] och Gunnar Brox [22].

Under flödet rasade en damm. Ytterligare två dammar anmäldes som rasade men visade sig när floden lade sig trots allt stå kvar. Praktiskt taget samtliga dammägare uppgav sig ha haft problem av något slag vid sina anläggningar. Problemen kan sammanfattas som följer:

- Tillfartsvägar avskurna, översvämmade eller blockerade av ras, vindfällan eller skadade broar
- Kraftstationer tidvis omöjliga att köra pga brott på kraftledningar, igensatta kylvattenfilter och intagsgrindar
- Reservkraftaggregat fungerade dåligt, aggregat startade inte trots gott underhåll och regelbundna provstarter, aggregat startade men slutade fungera, bränsle tog slut, nytt bränsle inte möjligt få från lokal bensinstation då pumparna inte gick pga strömavbrottet
- Handmanövrering av luckor fungerade sämre än tänkt pga svårigheter finna rätt vev, avlägsna mekaniska hinder, styva kedjor och sliten personal
- Sambandsproblem ledde till bortfall av vattenståndsregistreringar, bristande kontakt med driftpersonal, dålig överblick över akuta problem, svårigheter rekvirera ytterligare personal och utrustning

- Allmänna mobiltelefonnät fungerade dåligt pga dålig täckning och överbelastning, interna kommunikationssystem fungerade bättre
- Sambandsutrustning fanns ofta inte på plats, för få apparater, batterierna urladdade och reservbatterier inte medförda, personalen saknade kunskaper i handhavande
- Svårigheter att fatta beslut om lucköppning pga problem avväga effekterna uppströms och nedströms under starkt tryck från lokalintressen
- Utskov kunde inte öppnas pga högt vattenstånd (sätter överströmmades, når svåra att avlägsna, luckor fastnat och lyftanordning överbelastad)
- Utskov blockerade av drivgods i öppningen, mellan segmentlucka och brobana och på nedströmssidan



Liksom i många andra länder har vi i Sverige omvärderat tidigare metoder att bestämma dimensionerande flöden till dammanläggningar. Kraftindustrin och SMHI har genom arbetet i Flödeskommittén enats om nya riktlinjer för denna dimensionering. Riktlinjerna innebär i vissa delar ett nytt synsätt.

De nya riktlinjerna medför att högre tillflöden än vad som tidigare antagits skall kunna hanteras. Tillämpningen av dessa riktlinjer kommer i flera fall att innebära att olika typer av åtgärder behöver vidtagas. Om dessa åtgärder och kombinationer av åtgärder inte planeras och genomförs omsorgsfullt och kompetent kan stora ekonomiska resurser förspillas utan att eftersträvad säkerhetshöjning uppnås.

För att klara denna komplicerade anpassningsprocess krävs kompetens och kunskap inom bland annat följande områden: hydrologi, teknik (bl a verklig avbördningsförmåga, teknisk förmåga att klara överdämning, luckors funktionssäkerhet och tillståndskontroll av dammar), säker driftsamverkan, brottkonsekvenser och beredskap samt riskanalys.

För att genomföra utredningar och utveckling inom dessa områden har VASO dammkommitté initierat ett antal projekt och föreliggande rapport redovisar ett av dem. Seriens huvudrapport (nr 1) ger en sammanfattande beskrivning av arbetet och innehåller även en sammanställning över de rapporter som ingår i serien.

Rapporter kan beställas från:
ELFORSK
101 53 STOCKHOLM
Telefon: 08 - 677 25 30
Telefax: 08 - 677 25 35