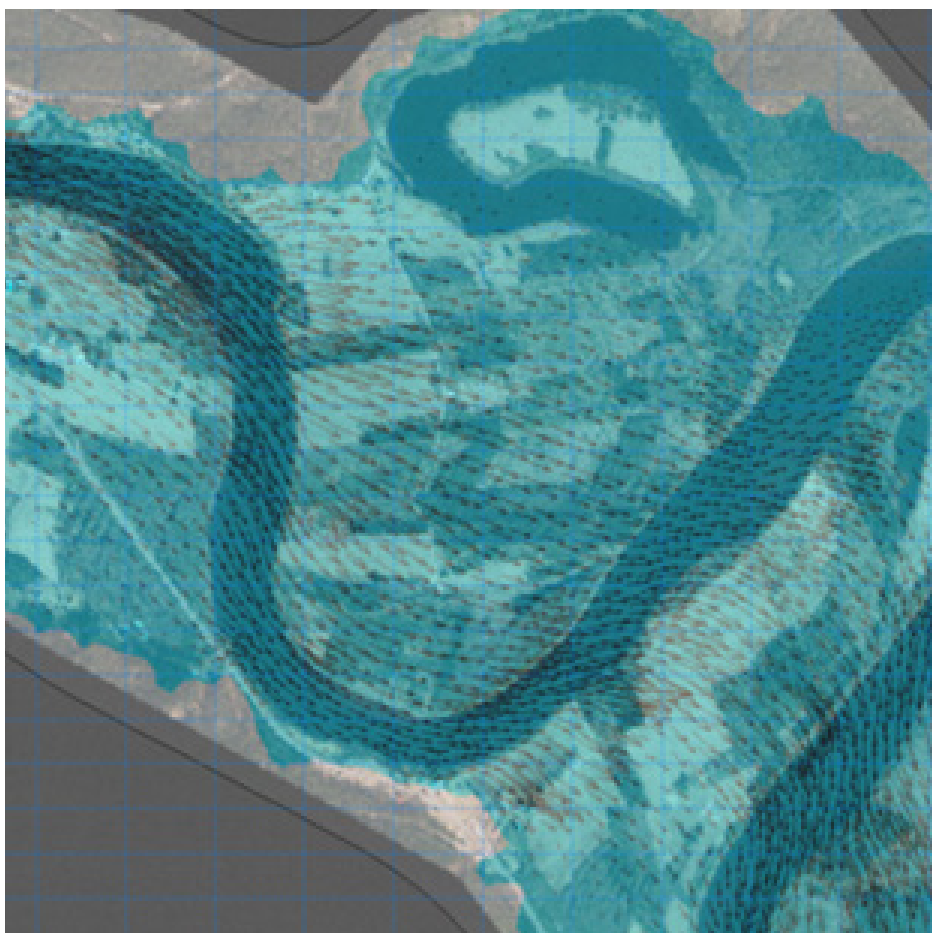
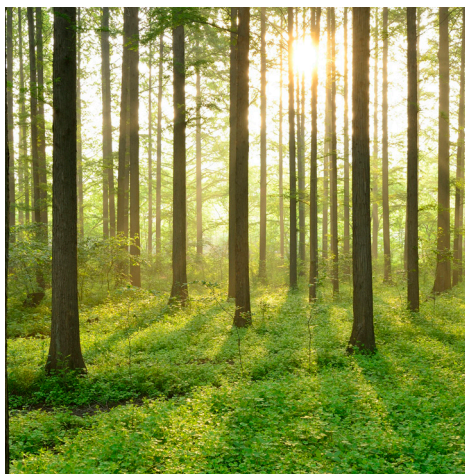


# BERÄKNING AV DAMMHAVERI OCH ÖVERSVÄMNINGSKARTERING

RAPPORT 2015:119





# Beräkning av dammhaveri och översvämningsskartering

Metodik och erfarenheter

MAGNUS JEWERT  
FINN MIDBÖE  
ANDERS SÖDERSTRÖM  
STINA ÅSTRAND

ISBN 978-91-7673-119-2 | © 2015 ENERGIFORSK

Energiforsk AB | Telefon: 08-677 25 30 | E-post: [kontakt@energiforsk.se](mailto:kontakt@energiforsk.se) | [www.energiforsk.se](http://www.energiforsk.se)



## Förord

Beräkningar av dammhaverier och karteringar av översvämningar är viktiga delar av arbetet med beredskapsplanering och med konsekvensutredningar för dammhaverier.

Rapporten sammanställer den metodik och arbetsgång för dammhaveriberäkningar och översvämningsskarteringar som har utvecklats genom åren.

Arbetsgången som beskrivs kan tillämpas i beredskapsplanering. Den kan också tillämpas i konsekvensutredning som underlag för konsekvensklassificering enligt RIDAS eller som underlag för att bestämma dammsäkerhetsklass enligt 2 § förordning (2014:214) om dammsäkerhet.

Anders Söderström, SWECO, Magnus Jewert, Norconsult, Finn Midböe, HydroTerra och Stina Åstrand, WSP har på uppdrag av Energiforsk genomfört projektet. Projektet har ingått i Energiforsks dammsäkerhetstekniska utvecklingsarbete med medverkan från vattenkraftföretag och Svenska kraftnät.

Stockholm oktober 2015



Cristian Andersson

Energiforsk

## Sammanfattning

Dammhaveriberäkningar och översvämningskarteringar har blivit en viktig del av beredskapsplanering för dammhaverier och konsekvensutredningar. I den här rapporten ges en sammanställning av den metodik och arbetsgång som utvecklats genom åren och de erfarenheter detta bygger på. Rapporten visar vilket underlag som behövs i form av anläggningsdata, topografiska och hydrologiska data och vad som bör beaktas vid platsbesök och fotodokumentation av en anläggning när dammhaveriberäkningar ska genomföras.

Olika dammtyper går igenom med avseende på möjliga orsaker till haveri och hur karaktäristiska öppningar i dammkroppen utvecklas vid ett haveri. Vidare diskuteras beräkning av dammhaveriflöden och hur val av beräkningsverktyg utifrån de förutsättningar som finns bör göras. Andra viktiga aspekter vid beräkning av utflöde vid dammhaveri är de hydrologiska förutsättningar som råder och hur utskoven hanteras tillsammans med den magasinvolym som dammen håller.

Metodval för bestämning av dammhaveriflödets utbredning kan göras utifrån hur strömningsförhållandena nedströms i vattendraget ser ut med stigande komplexitet från en rent erfarenhetsbaserad bedömning, med handboksformler eller med volymetrisk routing av dammhaveriflöden till dynamiska beräkningar med en hydraulisk modell. I beräkningar med en hydraulisk modell blir modellens utbredning, terrängdata och kalibreringsunderlaget viktiga begränsningar för resultatet och betydelsen av dessa ingående delar diskuteras i rapporten. Regleringsstrategiers inverkan liksom antaganden för att beskriva dominoeffekter efter ett dammhaveri diskuteras i rapporten. Ett avsnitt i rapporten behandlar utflöde vid dammhaveri i gruvdammar.

Resultat från dammhaveriberäkningar presenteras ofta som vattenutbredningsskikt framställda från den beräknade maximala nivån i ett GIS-verktyg eller på kartor i olika skalor. I beredskapsprojekten har egenskaper hos dammhaveriflödet beskrivits i en tabellsammanställning.

I ett avslutande kapitel diskuteras erfarenheter från projekt för beredskapsplanering i de olika älvarna. Arbetsgången i projekten från behovsanalys, insamling av underlag, genomförande av platsbesök samt till hur val av orsak till haveri och bestämmande sektion för utflödet av vatten beskrivs. Erfarenheter från konsekvensutredningar och speciella överväganden för dammhaveriberäkningar vid konsekvensklassificeringar diskuteras. Rapporten avslutas med erfarenheter från skadeinventering vid dammhaveri med geografiska informationssystem (GIS).

## Summary

Dam break simulations and flood mapping has become an important part of emergency action planning for dam break accidents and studies of dam failure consequences. This report summarizes the methodology and working process developed over the years and a description of the experiences upon which they are based. The report shows the need for background data and identifies various aspects, which need to be during a field survey at a dam site prior to performing the dam break simulations.

Different dam types are reviewed with focus on the possible causes of failure and on the corresponding breaching processes. Furthermore, a discussion about the calculation procedure of flood wave propagation along the river and the choices of available calculation tools are presented. Other important aspects with dam break simulations are the hydrological conditions at the time of failure, and how spillways regulate the reservoir.

The choice of routing method of the dam break flood wave has to be based on the hydraulic characteristics of the river downstream. Single dams with a simple hydraulic setup may be calculated using simplified methods such as handbook formulas or volumetric routing. However, whereas for complex river configurations or in a system with several dams in a river cascade, a numerical hydraulic model is required. When using hydraulic modelling, the model extension, the quality of terrain data and calibration data are important features affecting the quality of the results. The importance of handling regulation strategies and domino effects is discussed in the report. One chapter presents the conditions for dam break simulations of tailings dams.

Results from dam break simulations are often presented as flood maps based on the maximum water level. Flood maps are produced using GIS software.

The final chapter compiles the experiences acquired from eleven large-scale emergency action plan projects for dam break accidents, carried out in Sweden during 2003-2014. The assertions and calculation parameters are presented in Appendix 1. Experience from consequence studies and special considerations made for dam break simulations are discussed. The report ends with a summary of experiences made for damage inventories using GIS-systems.

# Innehåll

<b>1</b>	<b>Inledning</b>	<b>8</b>
1.1	Ordlista	9
<b>2</b>	<b>Arbetsgång för dammhaveriberäkningar och översvämningskartering</b>	<b>11</b>
<b>3</b>	<b>Underlag</b>	<b>13</b>
3.1	Huvuddata och ritningar	13
3.2	Utskovsbeskrivningar	13
3.3	Topografisk information	13
3.4	Beskrivning av batymetri	14
3.5	Hydrologiska data	14
3.6	Platsbesök och fotodokumentation	14
<b>4</b>	<b>Bestämning av brottöppning</b>	<b>16</b>
4.1	Gravitations- & massivdammar	17
4.2	Lamelldammar	18
4.3	Valvdammar	20
4.4	Fyllningsdammar	20
4.5	Gruvdammar	22
4.6	Stenmurkverksdammar	23
4.7	Trädammar	23
4.8	Sammansatta dammar	23
4.9	Utskovspartier	24
<b>5</b>	<b>Beräkning av dammhaveriflöde</b>	<b>25</b>
5.1	Förutsättningar och val av beräkningsverktyg	26
5.2	Hydrologiska förutsättningar och utskovshantering	27
5.3	Magasinsvolym	28
5.4	Fallförluster upp- & nedströms dammhaveriet	28
5.5	Beräkning med tidssteg i Excel	29
5.6	Hydraulisk modell	29
<b>6</b>	<b>Beräkning av dammhaveriflödets utbredning</b>	<b>31</b>
6.1	Utan beräkning, baserat på erfarenheter	31
6.2	Beräkning med handboksformel	32
6.3	Volymetrisk routing	32
6.4	Hydraulisk modellering	33
6.4.1	Modellutbredning	34
6.4.2	Terrängdata	34
6.4.3	Initiala förhållanden	37
6.4.4	Kalibrering och validering	37
6.4.5	Avgränsningar	37
6.5	Regleringsstrategier	38
6.6	Dominoeffekter/sekundärT dammhaveri	39



6.7	Utflöde vid dammhaveri i gruvdammar	39
<b>7</b>	<b>Redovisning av resultat från dammhaveriberäkningar</b>	<b>41</b>
7.1	Vattenutbredningsskikt	42
7.2	Vattennivåer i beräkningssektioner	44
7.3	Vattenståndsprofiler	45
7.4	Kartmaterial	45
	7.4.1 Översiktskarta	45
	7.4.2 Detaljkartor	46
7.5	Tabellsammanställning	47
<b>8</b>	<b>Erfarenheter</b>	<b>48</b>
8.1	Samordnad beredskapsplanering	48
	8.1.1 Behovsanalys för samordnad beredskapsplanering	50
	8.1.2 Underlag och platsbesök	50
	8.1.3 Bestämning av brottmod, läge och begränsande sektion	52
	8.1.4 Beräkning av dammhaveriflöde	54
	8.1.5 Beräkning av dammhaveriflödets utbredning nedströms	55
	8.1.6 Redovisning av resultat	57
8.2	Konsekvensutredningar	59
	8.2.1 Överväganden vid konsekvensklassificeringar	59
	8.2.2 Vattnets djup och hastighet	60
	8.2.3 Skadeinventering med GIS-analys	60
<b>9</b>	<b>Referenser</b>	<b>62</b>

# 1 Inledning

**Denna rapport sammanfattar de metoder och principer som tillämpats för beräkningar av dammhaveri och översvämningskarteringar i de beredskapsprojekt som genomförts i Sveriges tio största älvar och Lagan samt vid framtagande av underlag för konsekvensklassificeringar. Beredskapsprojekten som presenteras i denna rapport har utförts under åren 2003-2014.**

Uppdraget har huvudsakligen innehållit två delar:

- Att samla in och dokumentera de metoder och principer som använts för dammhaveriberäkningar i beredskapsplaneringsprojekten samt i älvar utan sammanhängande modell för älvsystemet.
- Att beskriva lämplig arbetsgång och metodik för dammhaveriberäkningar och översvämningskartering.

Arbetsgången kan tillämpas på godtyckliga dammar och vattendrag i Sverige för dammhaveriberäkningar. Tyngdpunkten i rapporten ligger dock på dammhaveriberäkningar som underlag för beredskapsplanering och/eller konsekvensutredning.

I kapitel 2 redovisas arbetsgången kortfattat och därefter beskrivs de huvudsakliga momenten utförligare i enskilda kapitel. I kapitel 3 listas lämpligt underlag och beskrivs med resonemang kring osäkerheter och förfarande med platsbesök. I kapitel 4 följer resonemang kring hur dammhaveriet antas ske, val av dammenheter för beräkning och hur begränsande sektion tas fram för olika typer av dammar. I kapitel 5 ges en redogörelse av olika alternativ för att beräkna utflödet av vatten och/eller annat material från magasinet.

I kapitel 6 beskrivs tillvägagångssätt för att bedöma till vilka nivåer vattnet kan stiga i nedströmsområdet samt vilka områden som kan översvämmas vid ett dammhaveri. Ofta tas även uppgifter fram om översvämningsens fortplantning nedströms samt eventuella dominoeffekter. Rapporten innehåller förslag till under vilka förutsättningar respektive metod är lämplig, en beskrivning av metoden och vilka avgränsningar som görs. I kapitel 7 beskrivs hur resultat från dammhaveriberäkningar kan dokumenteras och presenteras på lämpligt sätt.

Slutligen innehåller rapporten kapitel 8 som beskriver de särskilda beräkningsförutsättningar som har använts i projekten med framtagande av underlag för beredskapsplanering i de stora älvarna. Syftet med denna beskrivning är att ge exempel på principer som använts och resonemang som förts vid projektens genomförande. Beskrivningen är viktig för att öka förståelsen för hur underlaget kan användas. I kapitlet ingår också några speciella erfarenheter från dammhaveriberäkningar inom konsekvensutredningar.

## 1.1 ORDLISTA

Nedan följer en förklaring av vanliga termer som förekommer i denna rapport.

<b>Teknisk term:</b>	<b>Förklaring:</b>
100-årsflöde	Ett flöde som statistiskt återkommer en gång per 100 år.
Ankomsttid	Den tid det tar för flodvågen att nå en specifik plats. Tiden räknas från det att dammhaveri konstaterats tills att vattennivån börjar stiga på den specifika platsen.
Brottöppning	Den öppning som uppstår i en damm som havererar.
Bräsch	Som ovan, den öppning som uppstår i en damm som havererar.
Damm	Den konstruktion som dämmer vatten. Exempel är stenfyllningsdamm, jordfyllningsdamm och betongdamm.
Dammanläggning	En dammanläggning består av en eller flera dammar som tillsammans dämmer upp ett magasin och/eller skyddar lägre liggande områden från översvämning. Begreppet innefattar även dammar som reglerar vattenytor i an-slutning till magasinet.
Dammenhet	En damm kan vara uppbyggd av olika delar. Varje enskild del benämns dammenhet. Begreppet <i>damm</i> del förekommer också.
Dammhaveri	När en dämmande konstruktion rasar och detta leder till ett okontrollerat utflöde av vatten eller annat indämt material. Den vedertagna benämningen <i>dambrott</i> avser dammhaveri.
Dimensionerande vattenstånd	Det högsta magasinsvattenstånd som uppkommer vid dimensioneringsberäkningen i enlighet med riktlinjer för dimensionerande flöden för dammanläggningar. För fullständig metodik hänvisas till referens Svenska Kraftnät, Svensk Energi och SveMin, 2015 [1]
Dominoeffekt	När en eller flera dammar nedströms en havererad damm rasar till följd av att det utströmmande vattnet får vattnet att stiga okontrollerat längs ett vattendrag. Se även sekundärt dammhaveri nedan.
Drivvattenförling	Den maximala vattenförling som en kraftstation är byggd för att producera elkraft ifrån. Begreppet utbyggnads-vattenförling förekommer också.
Flodvåg	Den vattenståndshöjning som rör sig nedåt i älven, orsakad av t.ex. ett dammhaveri.
Hydraulisk modell	En matematisk modell över ett vattendrag som beskriver vattnets rörelse i rummet och tiden. Beräkningarna redovisar främst vattenförling, vattennivåer och vattenhastighet.
Högsta högvattenförling, HHQ	Den högsta vattenförling som registrerats på en plats.
Högsta högvattenstånd, HHW	Det högsta vattenstånd som registrerats på en plats.
Klass I-flöde	Ett extremt högt flöde som generellt tas fram genom hydrologiska simuleringar där bl. a snösmältning, markens mätnad och stor nederbörd kombineras på ett mycket ogynnsamt sätt. Tillrinningssekvensen som är en mycket osannolik händelse blir specifik för varje dammanläggning/magasin. För fullständig metodik hänvisas till referens Svenska Kraftnät, Svensk Energi och SveMin, 2015 [1]. Myndigheten för samhällsskydd och beredskap (MSB) benämner detta flöde Beräknat högsta flöde (BHF) i det nationella projektet "Översiktlig översvämningsskartering".

<b>Teknisk term:</b>	<b>Förklaring:</b>
Medelvattenföring, MQ	Den statistiska medelvattenföringen för en specifik plats.
Medelvattenstånd, MW	Det statistiska medelvattenståndet för en specifik plats eller ett magasin.
Normalflöde	Med normalflöde avses i allmänhet medelvattenföringen (MQ).
Primärt dammhaveri	Det dammhaveri som initierar en okontrollerad utströmning av vatten i ett vattendrag.
Sekundärt dammhaveri	Dammhaveri som sker nedströms en havererad damm på grund av att vattnet stiger okontrollerat längs ett vattendrag.
Snedställning	Den vattenståndshöjning som sker på grund av att vindens friktion mot vattenytan trycker upp och därmed snedställer vattenytan.
Terrängmodell	En modell som beskriver hur terrängen i ett område ser ut i tre dimensioner, d.v.s. både dess utsträckning i plan och i höjddled.

## 2 Arbetsgång för dammhaveriberäkningar och översvämningskartering

**Detta kapitel beskriver kortfattat den övergripande arbetsgången vid dammhaveriberäkning och översvämningskartering. Delmomenten beskrivs mer ingående längre fram.**

Dammhaveriberäkningar utförs av olika anledningar. Syftet med beräkningarna påverkar metodval, krav på noggrannhet och redovisningssätt. De vanligaste anledningarna har i Sverige varit:

- Dammhaveriberäkningar och eventuell översvämningskartering som underlag för konsekvensutredning. Utredningen beskriver vad som faktiskt kan tänkas hända vid dammhaseri, beräkning av flöden och vattennivåer, hur en översvämning breder ut sig, vilka objekt som skadas etc. Konsekvensutredningar kan utgöra underlag för konsekvensklassificering enligt RIDAS, eller för bestämmande av dammsäkerhetsklass enligt 2 § förordning (2014:214) om dammsäkerhet.
- Dammhaveriberäkningar och översvämningskartering som underlag för beredningsplanering. Ett planeringsunderlag framställs för en del av eller ett helt vattendrag och innehåller uppgifter om ett antal dammanläggningar.

Ytterligare anledningar att utföra dammhaveriberäkningar kan exempelvis vara i utvärderingssyfte vid planerad ombyggnad av anläggningar, hydrologisk dimensionering mm.

Arbetsgången innehåller normalt följande moment:

### 1) Behovsanalys

Utifrån syftet utförs en behovsanalys som ligger till grund för metodval och med vilken noggrannhet och detaljeringsgrad efterföljande moment genomförs.

### 2) Insamling av bakgrundsmaterial, platsbesök och fotodokumentation

Ritningar, gamla bilder, kartor, topografi/batymetri, magasinskurvor etc. samlas in och analyseras. Dammanläggningen besöks därefter för att verifiera befintligt material genom eventuell inmätning och fotodokumentation. Det har visat sig vara svårt och osäkert att bedöma eller beräkna dammhaseri utan att i verkligheten ha sett anläggningen. Om syftet med beräkningarna är att göra en konsekvensutredning kombineras vanligen platsbesöket med en inventering av potentiella skadeobjekt.

### 3) Val av metod, modellavgränsning och förutsättningar

Vid beräkningar för konsekvensutredningar styr faktiska förhållanden kring dammen och skadeobjekten nedströms val av beräkningsmetoder. Finns en hydraulisk modell sedan tidigare tillgänglig kan dock denna med fördel användas. Modellavgränsningen sträcker sig från magasinet uppströms dammen och utreds så långt nedströms som betydande konsekvenser av dammhaseriet kan tänkas uppkomma. Förutsättningar väljs enligt RIDAS och med utgångspunkt att valda scenarier ska de utgöra de värsta tänkbara ur konsekvenssynpunkt.

Vid samordnad beredskapsplanering bestäms vilka delar av vattendraget som ska ingå i planeringsunderlaget, vilka hydrologiska förutsättningar som ska gälla, hur dominoeffekter hanteras o.s.v.

#### 4) Antagande för dammhaveri

En tänkbar händelsekedja för dammhaveri tas fram. Momentet inkluderar oftast att utifrån en elevation av dammbyggnaden bedöma vilket scenario som ger största tänkbara brottöppning. För fyllningsdammar kan brottöppningen beräknas med en erosionsbaserad modellbeskrivning som en integrerad del de hydrauliska beräkningarna, eller i vissa fall med empiriska formler.

#### 5) Beräkning av dammhaveriflöde

Dammhaveriflödet beror av brottöppningens utveckling, antagen nivå och nivåförändringar i magasinet (som orsakas av själva dammhaveriet, men även genom avbördning via utskov och tillrinning), hur magasinvolymen beror av nivån i magasinet, eventuella fallförluster uppströms dammen och motdämning på nedströmssidan.

#### 6) Beräkning av dammhaveriflödets fortplantning och utbredning nedströms

Ett dammhaveri ger i de flesta fall upphov till en översvämning nedströms. Översvämningens storlek, flöden och vattenhastigheter påverkas av dammhaveriets storlek, magasinvolym, topografi nedströms och förekomst av sjöar eller andra områden där dammhaveriflödet kan dämpas.

#### 7) Redovisning

Resultaten av beräkningarna redovisas som en beskrivning av händelseförloppet, med referenser till påverkade områden och skadeobjekt, eller som översvämningsskator, fallprofiler eller nivåangivelser i enskilda punkter och sektioner.

Resultaten tolkas sedan och används för det syfte som beräkningarna är avsedda för, exempelvis:

- Vid konsekvensklassificering och/eller flödesdimensionering jämförs vattenutbredningen för flödesscenarier med och utan dammhaveri. Om dammhaveriberäkningarna gjorts med hydraulisk modell framställs oftast översvämningsskator för denna jämförelse. Potentiella skadeobjekt identifieras och skadeverknigen beskrivs. Det värsta scenariot jämförs därefter med kriterier för konsekvensklassificering och flödesdimensionering.
- För beredskapsplanering används resultaten som underlag för lokala beredskapsplaner för enskilda anläggningar eller för samordnad beredskapsplanering längs ett helt vattendrag.

## 3 Underlag

I kapitlet redogörs för vilket underlag som behövs för studier av dammhaveri, vad olika delar av underlaget används till och vad som är viktigt att fånga upp. Det material som listas nedan finns inte alltid tillgängligt för alla anläggningar. Kvaliteten varierar och delar av informationen saknas ibland. Generellt finns mer underlagsmaterial för stora vattenkraftanläggningar jämfört med till exempel mindre dammanläggningar som tillhört industrier vars ursprungliga verksamhet inte längre finns kvar.

### 3.1 HUVUDDATA OCH RITNINGAR

Ett viktigt moment när arbetet startar är insamling av bakgrundsmaterial. Det underlag som är av intresse är normalt följande:

- DTU-manual
- Dammregister
- Elevationer
- Sektioner

Härigenom fås förståelse för hur hela anläggningen är uppbyggd, var olika dammar är belägna, magasinvolym, flödesförhållanden, dammarnas uppbyggnad, grundläggningsförhållanden mm.

### 3.2 UTSKOVSBEKRIVNINGAR

Genom att samla in uppgifter om avbördningskapacitet, lucktyper, luckor med fjärrstyrning, luckor med katastrofskydd (KAS) och nivåreglerade luckor fås förståelse för avbördningsanordningens funktion, kapacitet, drifrutiner, regleringsstrategier för att följa vattendomar, handhavanderutiner vid höga flöden (spettluckor som kan ta lång tid att öppna) mm.

### 3.3 TOPOGRAFISK INFORMATION

Genom den rikstäckande laserskanning som Lantmäteriet genomför 2009-2015 inom projekt Nationell höjdmodell kommer högupplöst höjddata för hela landet att finnas tillgängligt. Det finns ingen anledning att använda grundunderlag med lägre noggrannhet för att upprätta terrängmodeller som stöd för hydraulisk modellering. Äldre dammhaveriberäkningar baserade på topografiska kartserier bör utvärderas avseende kvalitet, särskilt i de fall översvämningskartor med vattenutbredning av dammhaveriflöden framställts.

### 3.4 BESKRIVNING AV BATYMETRI

Djupdata av vattendrag, sjöar och kraftverksmagasin kan bestå av en mängd dataformat av olika kvalitet, framförallt:

- Ekolodning
- Sjökartor

Det finns punktdata i form av pejlingar och lodningar som utförts vid tiden för vattenkraftutbyggnaden eller vid senare tillfällen. Ofta är vattendjup uppmätt utan att det anges en tydlig referens till vattenytans läge i rikets höjdsystem vid tillfället för mätningen.

Ibland redovisas djupkurvor utan källa till ursprunglig inmättningsdata vilket kan ge en uppfattning av bottennivåer men det är svårt att bedöma noggrannheten i höjd på höjdkurvorna.

Det finns även bottenkänningsutrustning (multibeam-ekolod) som kan mäta hela bottenpartier med stor punkttäthet.

### 3.5 HYDROLOGISKA DATA

Som underlag till hydrauliska utredningar används i allmänhet beräknade flöden som finns framtagna för anläggningen, oftast redovisas medelvattenföring, högsta högvattenföring, 100-årsflöde och klass I-flöde.

Om anläggningen och flödesuppgifterna baseras på gammalt underlag eller är ofullständigt redovisade kan kompletterande flödesberäkningar behöva utföras. Till stöd för det arbetet finns flödesstatistik hos SMHI samt beräkningsanvisningar från både kraftindustrin (dimensionering av dammanläggningar) och Trafikverket (hydraulisk dimensionering). Finns ytterligare observerad vattenföringsstatistik från anläggningen tillgänglig bör denna användas.

Som hydrologiska data betraktas också historisk information från inträffade högflöden, såsom fotografier, beskrivningar av inträffade översvämningar etc.

### 3.6 PLATSBESÖK OCH FOTODOKUMENTATION

Efter att materialet i Kapitel 3.1-3.5 är genomgången utförs lämpligen platsbesök och fotodokumentation. Det kan vara svårt och ge upphov till osäkerheter att bedöma eller beräkna dammhaveri utan att i verkligheten sett anläggningen. Det är viktigt med lokalkännedom och värdefullt om personer med kunskap om anläggningen och vattendraget deltar vid platsbesök. Platsbesök kan med fördel kombineras med en inventering av potentiella skadeobjekt vid konsekvensklassificering.

Beträffande underlag redovisat i Kapitel 3.1-3.2 så är det viktigt att på plats vid anläggningen kontrollera att ritningar och andra uppgifter stämmer med verkligheten samt att inga ytterligare faktorer som påverkar ett dammhaveri föreligger. Detta kan exempelvis vara trånga sektioner i omgivande terräng, etc.

Topografisk information enligt Kapitel 3.3 kan också behöva kontrolleras vid anläggningsnära områden där laserskanningen kanske inte fångat upp alla detaljer eller att bortfiltrering av mätvärden för vatten, vegetation, byggnader mm. lämnat luckor i underlaget.



Bottendata enligt Kapitel 3.4 kan vara svårt att kontrollera på plats men ofta kan bestämmande sektioner identifieras genom att studera förträngningar, trösklar och vattnets strömningsmönster på olika platser längs ett vattendrag.

Hydrologiska data enligt Kapitel 3.5 kan vara svårt att kontrollera i fält men bör om möjligt jämföras med fotografier, inmätningar och observationer från tidigare högflöden kan inhämtas. Det är ofta ett viktigt underlag för att kalibrera och kvalitetssäkra beräkningar av högflöden och därmed konsekvenserna av att dammhaveriflöden rinner fram längs vattendraget. Förutom dammägare så finns ofta kunskap om vattendraget inom Räddningstjänsten, Länsstyrelsen och kommuner, särskilt om höga flöden inträffat de senaste åren.

## 4 Bestämning av brottöppning

**Detta kapitel beskriver de metoder och tankesätt som används för att bedöma var och hur ett dammhaveri uppstår för olika dammtyper (där dammen rasar uppstår en s.k. bräsch eller brottöppning). De antaganden som görs kommer att avgöra brottöppningens storlek och läge i dammen, samt hur snabbt händelseutvecklingen sker. Resultatet utgör den viktigaste förutsättningen för att sedan beräkna utflödet av vatten. De antaganden som görs avseende brottöppningens storlek och utvecklingstid utgör dock en stor osäkerhet vid beräkningar av dammhaveri. Osäkerheten utgörs bland annat av att ett dammhaveri kan starta på olika sätt, på olika ställen i dammen, de material som finns inne i dammen kan vara okända etc.**

Med dammtyp menas i dessa hänseenden den typ av konstruktion som utgör dammkroppen, exempelvis olika typer av fyllningsdammar och betongdammar. Benämning av olika dammtyper kan också göras utifrån dammens användningsområde, såsom kraftverksdamm, gruvdamm, spegeldamm, invallningsdamm, sluss etc. Användningen kan ha betydelse för det scenario som väljs för att dammen ska haverera, medan konstruktionstypen är av betydelse för hur brottöppningen uppstår och utvecklas. Gruvdammar särskiljer sig dock eftersom den speciella användningen medför speciella konstruktioner, vilket beskrivs i Kapitel 4.5.

Metoden kan skilja sig beroende på i vilket syfte dammhaveriberäkningen utförs. Vid dammhaveriberäkning för framtagande av underlag för beredskapsplanering har vanligen den högsta dammen vid en anläggning antagits haverera. Förutom för dominoeffekt vid anläggningar med fyllningsdammar, där antas istället den damm eller dammenhet med lägst krönnivå antagits haverera. Vid konsekvensklassificering enligt RIDAS ska alla dammar vid en anläggning klassificeras individuellt, och dammhaveri antas därför för varje damm.

Gemensamt för de flesta dammhaveriberäkningar är att ett värsta tänkbara scenario söks. Det innebär att triviala dammhaverier, exempelvis läckage som inte utvecklas till en större brottöppning, om möjligt väljs bort. Detsamma gäller orealistiska eller fysiskt omöjliga dammhaverier, exempelvis att en gravitationsdamm med hög säkerhet mot stabilitetsbrott ska stjälpas. Genom att redovisa några olika scenarion som leder fram till dammhaveri, med beskrivning av hur de utvecklas, kan man undvika att orealistiska händelseförlopp ligger till grund för beräkningar och bedömningar längre fram. För att scenariot ska vara realistiskt undviks exempelvis att en dammpelare som normalt är belastad från stängda luckor havererar samtidigt som luckor är öppna exempelvis i en högflödessituation, eller att dammhaveri som uppstår till följd av hög islast inträffar i en högflödessituation. Rådande flödesförhållanden, väderlek, tillgång till personal och andra omständigheter som kan ha inverkan på scenariot ska om så bedöms relevant beaktas och redovisas.

Vid dammhaveriberäkning för konsekvensutredningar måste också en preliminär bedömning av skadeobjekt i dammens omedelbara närhet göras, då enskilda objekt kan innebära att ett scenario med brottöppning på ena sidan av dammen ur ett skadeperspektiv väsentligt skiljer sig från om motsvarande, eller större brottöppning skulle uppstått på andra sidan dammen.

Vid haveri på fyllningsdammar eller stora gravitations- och lamelldammar har ofta även det utströmmande vattnet en inverkan på brottöppningens storlek. Bedömningar och beräkningar

får då göras så att även dessa faktorer fångas upp i den mån som det är möjligt och motiverat, se Kapitel 5.

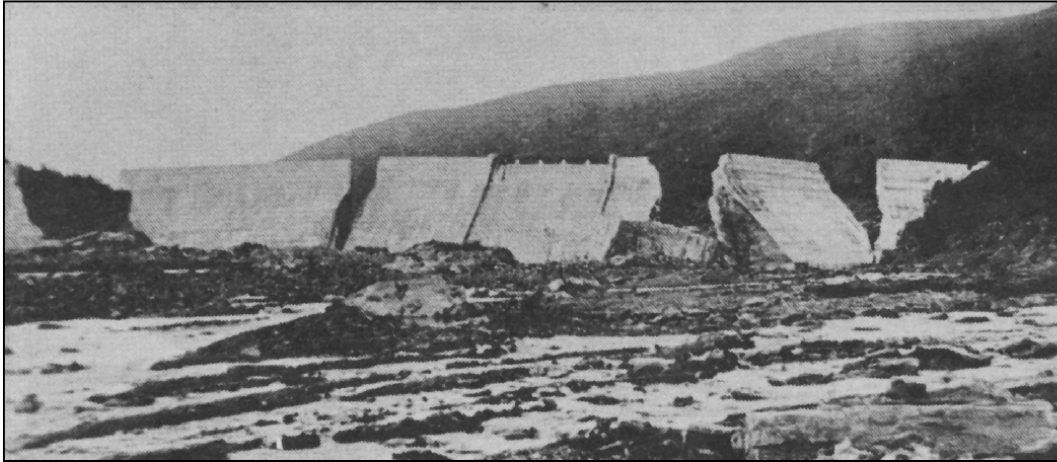
Ett antal empiriska modeller/formler för att beräkna brottöppningens storlek och utvecklingstid (liksom maximalt utflöde, se Kapitel 5) finns beskrivna (Froehlich, Fread, m.fl.). De flesta avser dock endast fyllningsdammar. Formlerna är empiriskt framtagna genom analys av ett antal inträffade dammhaveri och beskriver bräschens bredd och utvecklingstid som funktioner av damm- eller dämningshöjd samt magasinets storlek. De förutsätter att brottöppningen kan utvecklas fritt utan att begränsas av naturlig mark och utskovspartier eller bromsas upp på grund av reducerade vattenhastigheter till följd av fallförluster uppströms och nedströms brottöppningen. Formlerna kan användas men resultaten ska alltid kontrolleras mot verkliga geometrier och faktiska omständigheter vid anläggningen i fråga. Det har ofta visat sig den brottöppning som erhålls ur formeln är väsentligt större än vad dammkroppens storlek medger.

Nedan redovisas några typiska scenarion och antaganden för olika dammtyper. Vid bedömningar av brottöppningen måste dock stor hänsyn tas till förhållanden och omständigheter specifika för den aktuella dammen, och antaganden baseras på ritningar, uppmätningar och observationer från platsbesök.

#### 4.1 GRAVITATIONS- & MASSIVDAMMAR

Brottöppningen ansätts enligt tolkningar av ritningar och/eller uppmätningar. Normalt antas den betongmonolit som ger det största utflödet av vatten haverera genom brott i grundläggningsytan eller i berget under dammen med avgränsning i dilatationsfogar. Om brottet antas ske i undergrunden bör beaktas om slag eller försvagningar finns som istället kan orsaka att flera betongmonoliter omfattas av brottöppningen, vilket i så fall ska antas. Beroende på i huvudsak terrängen nedströms dammen kan ibland antas att hela eller delar av den berörda betongmonoliten efter dammhaveriet kommer att ligga kvar i brottöppningen och delvis begränsa utflödet. I Figur 1 visas Bayless Dam som ofta brukar nämnas som exempel på en gravitationsdamm som havererat.

Brottöppningen antas utvecklas förhållandevis snabbt, men vid beräkningen av utflödet, se Kapitel 5, behöver ofta en utvecklingstid på några minuter ansättas för att undvika numerisk instabilitet. För dammar med liten indämd volym måste dock en realistisk tid för brottöppningens utveckling användas för att inte dammhaveriflödet ska underskattas.

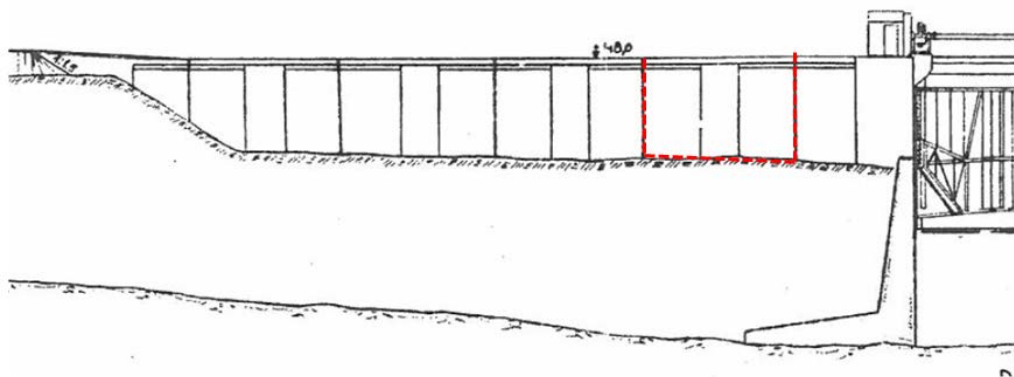


**Figur 1.** Bayless dam, Austin PA, USA. Dammhaveriet är ett exempel på att större delen av dammen havererade, men betongmonoliter låg kvar i brottöppningen och begränsade utflödet av vatten. Olyckan inträffade i september 1911 och 78 människor miste livet. Händelsen förleddes av att kraftiga regn fått nivån att stiga över dammens krönnivå. Ögonvittnen berättade att en plugg i dammens nedre del ca 30 m från höger landanslutning "sköts ut" och att angränsande dammenheter därefter öppnades "som portar". Beskrivningarna av haveriförloppet och det faktum att vissa delar som rubbats "tagit med sig" sin grundläggning tyder på att det fanns glidplan under dammen som bidrog till förloppet.

För gravitationsdammar med hög säkerhet mot stabilitetsbrott, kan det ofta vara svårt att hitta ett realistiskt haveriscenario. Om dammen är grundlagd på jord kan ibland det värsta tänkbara dammhaveriet uppstå genom underspolning av dammen, så att vattnet strömmar ut under dammen utan att själva dammkroppen berörs. Brottöppningen får då antas med beaktande av läckagevägens längd och magasinets dämningnivå.

#### 4.2 LAMELLDAMMAR

För lamelldammar antas en eller flera stöd haverera enligt samma princip som för gravitationsdammarnas monoliter. Angränsande sektioner av frontplattan antas då också haverera, se Figur 2.

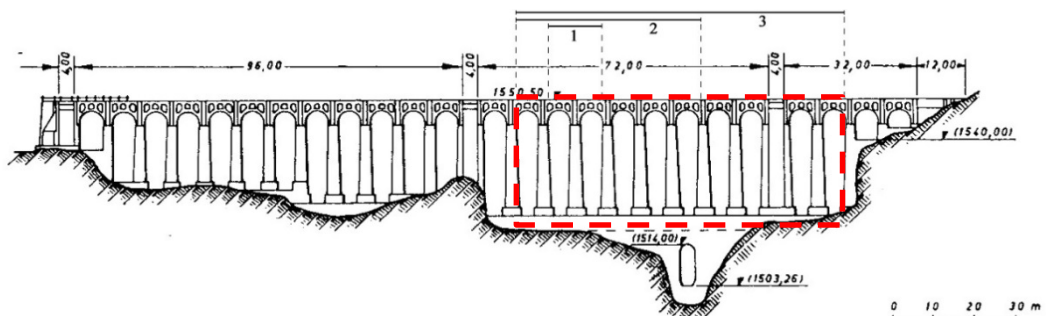


**Figur 2.** Illustration av hur en dammenhet kan antas rasa (en monolit med frontplatta). Detta är ett rimligt antagande för låga lamelldammar.

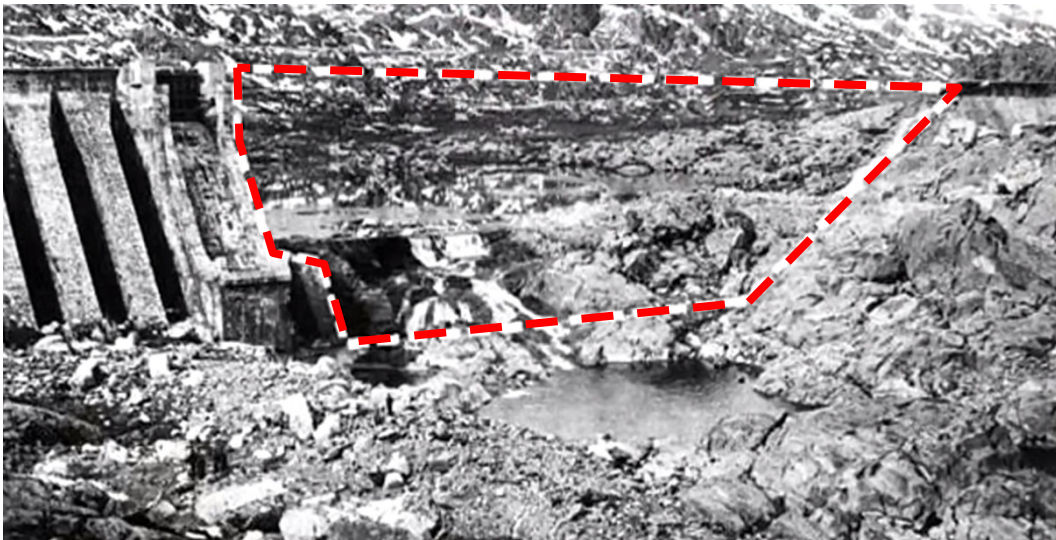
För höga dammar med smala lameller, i förhållande till dammens storlek, är sannolikheten att flera lameller berörs större (se exempel nedan). De antaganden som görs får baseras på erfarenheter och bedömningar av faktiska förhållanden vid den aktuella dammen.

Bräschen kan antas utvecklas förhållandevis snabbt, men ibland kan en längre tid för ansättas behöva antas för att undvika numerisk instabilitet, på samma sätt som för gravitationsdammar, se Kapitel 4.1.

Vid de historiska händelser då höga lamelldammar havererat är erfarenheten att ett stort antal lameller dras med efter att dammhaveriet initieras. Vid haveriet på Glenodammen i Italien 1923 berördes 9 lameller och brottöppningen kom till slut att begränsas av att marken låg högre upp utanför brottöppningen, se Figur 3. När dammen Vega de Tera i norra Spanien havererade 1959 kollapsade 17 lameller, se Figur 4.



**Figur 3.** Nedströmssektion av Glenodammen i norra Italien som havererade 1923. Den röda markeringen visar området som raserades. Dammhaveriets utveckling är förhållandevis väl beskriven eftersom dammvakten fanns på plats och observerade hela förloppet. Utredningar efter dammhaveriet kom fram till att dålig betongkvalitet vid lamellernas grundläggning orsakade olyckan, 365 människor omkom.



**Figur 4.** Dammen Vega de Tera, Spanien havererade 1959, där brottöppningen markerat med rött. Olyckan krävde 144 dödsoffer. Brottöppningen kom att omfatta 17 lameller och begränsades till höger av utskovsdelen som var utformad på ett annorlunda sätt än lamellerna. Orsaken till kollapsen sades vara dålig betongkvalitet i lamellerna. Det kan också anmärkas att dammen byggdes med nästan vertikal uppströmssida, vilket medför att lastupptagningen delvis kan liknas vid den hos en gravitationsdamm.



### 4.3 VALVDAMMAR

Hos valvdammar förs den horisontella lasten vidare genom kroppen ut i anfangen. Vid ett brott eller en stor skada på valvet eller anfangen antas normalt hela dammen kollapsa. Det mest kända dammhaveriet vid en valvdamm är franska Malpasset där i princip hela dammkroppen bröts loss och frigjorde hela det naturliga tvärsnittet i dammläget för utströmning av vatten, se Figur 5. Ett haveri hos en valvdamm får antas ske mycket snabbt, men numeriska hänsyn kan behöva tas på samma sätt som för gravitationsdammar, se Kapitel 4.1.



**Figur 5.** Resterna av Malpassedammen i Frankrike som gick till brott fem år efter dess färdigställande, 1959, med följd att 423 personer förolyckades. Orsaken till dammhaveriet tros ha varit en kombination av höga grundvattenttryck och förkastningar i undergrunden. I princip hela dammkroppen bröts loss från dammläget.

### 4.4 FYLLNINGSDAMMAR

Dammhaveri i fyllningsdammar kan uppstå av olika orsaker såsom inre erosion i dammkroppen, läckage i grundläggningen eller överströmning av dammkrön.

Dammhaveri i fyllningsdammar sker i allmänhet som okontrollerade erosionsförlopp, d.v.s. vatten som strömmar igenom eller över ett jordmaterial med en viss hastighet kan frigöra material av olika storlek från dammen så att det följer med vattenströmmen. Anledningen till att vattnet letar sig igenom dammkroppen eller undergrunden kan vara att delar av dammen rört sig sedan den byggdes eller att materialet i dammen har kompakterats varpå håligheter eller sprickor har uppstått där vattnet kan leta sig fram.

Det krävs en viss kritisk vattenhastighet för att ett jordmaterial ska följa med strömmen. Hög vattenhastighet förmår flytta grövre material, sten mm. medan låga vattenhastigheter endast kan flytta finkornigt material som sand och silt.

Läckage genom undergrund och dammkropp som medför borttransport av jordmaterial kan pågå under lång tid, sannolikt under flera år och kanske årtionden, tills dess ett hålrum eventuellt uppstår där vattenhastigheten ökar lokalt och skyndar på erosionsförloppet. Om en skada har uppstått där vatten rinner fram mer tydligt genom dammen, undergrunden eller över en yta så kan dammhaveriförloppet gå relativt snabbt och ett komplett haveri uppstå under en tidsrymd av minuter eller timmar.

Vid måttlig överströmning av dammkrönet, där vattenhastigheten är låg, kan en fyllningsdamm i vissa fall motstå erosion under lång tid. Avgörande faktorer förutom vattenhastigheten är vilken typ av material som finns på dammens yta, om den är gräsbeväxt etc.

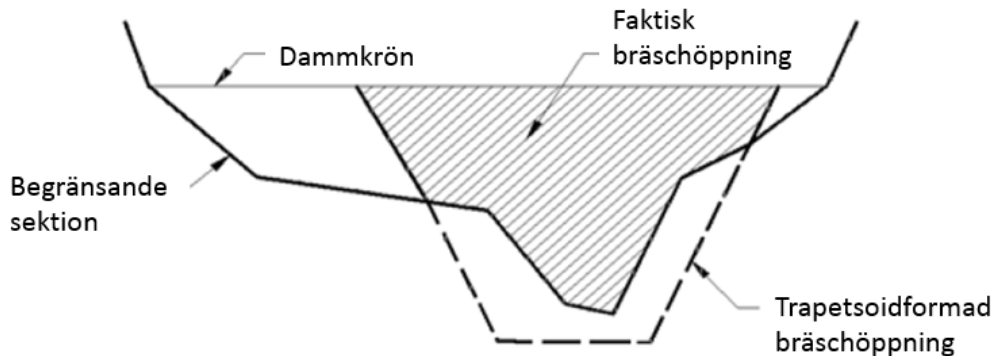
Se exempel, Teton-dammen i USA som rasade 1976, i Figur 6 nedan.



**Figur 6.** Fotografi taget då Teton-dammen rasade 1976. Dammen rasade under första uppfyllnadsfasen. Effekterna av dammhaveriet utreddes aldrig officiellt men elva människor miste livet. Orsaken har inte gått att fastställa men läckage genom grundläggningen och/eller tät kärnan är troliga orsaker.

Brottöppningen i en fyllningsdamm som rasar begränsas i allmänhet av berg eller morän i undergrunden, höjdryggar i anslutningarna eller av anslutande betongkonstruktioner. När magasinet tömts och nivån sjunkit avstannar erosionsförloppet även om delar av dammen finns kvar. Erosionsförloppen kan dämpas om förträngningar upp- och nedströms brottöppningen påverkar vattenhastigheten i brottöppningen och därmed påverkar erosionsprocessen.

I Figur 7 beskrivs hur beräkningsprogrammet MIKE11 hanterar brottöppningens successiva utveckling i dammen och hur den begränsande sektionen avgränsar den slutliga bränschen. Vatten antas strömma ut genom tvärsnittsarean där trapetsoid och begränsande sektion sammanfaller.



**Figur 7.** Bräschens teoretiska trapetsoidformade utseende och hur det hanteras genom en begränsande sektion. Ur referensmanual för MIKE11 [2].

#### 4.5 GRUVDAMMAR

Haveri i gruvdammar medför en del speciella förutsättningar jämfört med vattenkraftdammar både vad gäller dammtyp och det material som magasineras bakom dammen.

Dammar som byggts för att inrymma ett s.k. klarningsmagasin kan vanligen betraktas som en vanlig vattenkraftdamm. Klarningsmagasinets funktion är att eftersedimentera finmaterial som inte avsatts i sandmagasinet innan vattnet återförs till gruvans anrikningsprocess eller avbördas till recipient. Det kan således ligga en mängd finmaterial på botten av klarningsmagasinet som skulle kunna frigöras vid ett damm haveri.

Dammar som byggts för att inrymma anrikningssand (benämns vanligen sandmagasin) från processen kan byggas upp av olika material, både naturliga moränmaterial o.d. men även anrikningssand kan användas. Speciellt för sandmagasin är att anrikningssand är det dominerande materialet som finns bakom dammen. Dammarna kan byggas upp kontinuerligt under gruvans driftperiod med en övervägande andel sand och en liten mängd vatten i magasinet eller som ett till större delen vattenfyllt magasin från början som sedan fylls upp med sand under driftperioden. För sandmagasin måste dammhaverianalysen innehålla en bedömning av mängden vatten och mängden sand för det skede då damm haveri ska beräknas.



#### 4.6 STENMURKVERKSDAMMAR

Stenmurverksdammar består normalt av en central kärna av mager betong, ofta med stor andel sparsten. Dammens utsidor är klädda med ett stenmurverk som på uppströmsidan fogats tätt. Ur ett dammhaveriperspektiv kan stenmurverksdammar betraktas som betongdammar, oftast av typen gravitationsdamm. Dock förekommer även andra typer såsom grova lamelldammar och valvdammar av stenmurverk. Det bör vid antagande om dammhaveriscenario beaktas att kärnan vanligen är oarmerad och dammkroppen därmed har dålig skjuv- och draghållfasthet.

#### 4.7 TRÄDAMMAR

Trädammar består normalt av stenkistor av knuttimrat virke med en uppströmsvägg av spontat trä. Anläggningarnas livslängd är förhållandevis kort, och konstruktionen utförs normalt inte längre i Sverige. Detta medför att endast ett fåtal trädammar finns kvar. Dammhaveriscenario får antas efter konstruktionens specifika förutsättningar.

#### 4.8 SAMMANSATTA DAMMAR

Med sammansatta dammar menas i dammhaverihänseende dammar där den antagna brottöppningen omfattar eller påverkas av flera delar av olika dammtyp. För sammansatta dammar väljs det dammhaveri som ger störst dammhaveriflöde eller konsekvens utifrån relevanta delar beskrivna i Kapitel 4.1 – 4.4 och 4.6 – 4.7. För fyllningsdammar som innehåller utskovsdelar av betong, stenmurverk eller trä kommer dock ofta andra scenarion, specifika för sammansatta dammar, att vara utslagsgivande. Ett typiskt exempel är en damm som består av en utskovsdel i dammens högsta del samt anslutande fyllningsdammar, se Figur 8.

Det värsta dammhaveriscenariot blir vanligen att utskovets ena sida havererar, endera som den utlösande händelsen, eller till följd av ett brott på anslutande fyllningsdamm. Om haveriet initialt sker hos fyllningsdammen riskerar erosion mot utskovspelarens utsida och/eller grundläggning att leda till att pelaren/utskovssidan havererar, ofta med följd att utskovet öppnas för vattengenomströmning. Brottöppningen kommer då att omfatta en del av fyllningsdammen, utrymmet där dammpelaren tidigare fanns, samt utskovet.



**Figur 8.** Exempel på en sammansatt damm, där utskovsdelens pelare består av knuttimrade träkistor fyllda av sten, med anslutande fyllningsdammar på båda sidor. Om en av utskovspelarna havererar kommer utskovet att öppnas för vattengenomströmning, men det kan även antas att den anslutande fyllningsdammen som exponeras kommer att erodera så att brottöppningen vidgas väsentligt.

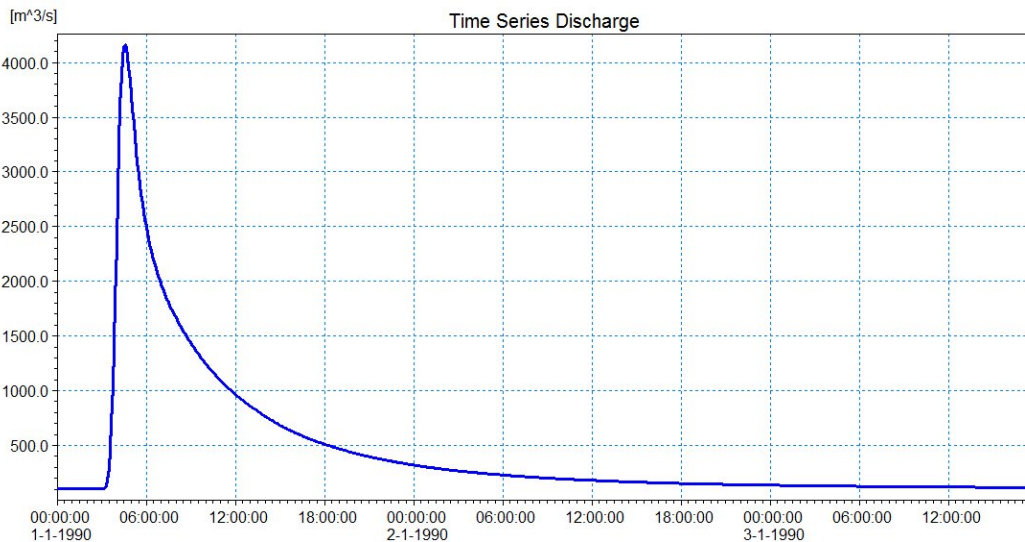
#### 4.9 UTSKOVSPARTIER

Ibland får antas att det värsta scenariot inträffar vid haveri på en utskovsdel. Haveriet kan ske på en lucka, vilket medför att utskovsöppningen utgör brottöppning. Dammhaveriet kan även tänkas ske på en dammpelare, vilket oftast får antas medföra att angränsande utskovsöppningar öppnas för vattengenomströmning. Exempel där dessa scenarion särskilt bör beaktas är äldre flottningsdammar, där kapaciteten hos två intilliggande utskov kan vara mycket stor i förhållande till de flöden som normalt förekommer, och små dammar där utskovsdelarna utgör en väsentlig del av den dämmande konstruktionen.

## 5 Beräkning av dammhaveriflöde

Detta kapitel beskriver hur utflödet av vatten kan beräknas vid ett dammhaveri. Grundläggande förutsättningar är brottöppningens storlek och utveckling (se Kapitel 4), tillflöden, magasinets storlek samt förekomst av begränsande förträngningar upp- och nedströms brottöppningen. Beräkningsmetod väljs dels utifrån dammtyp och det dammhaveri som antagits, dels utifrån vilka resultat som efterfrågas, såsom noggrannhet och om endast ett maxflöde eller en hydrograf ska räknas fram.

När en damm brister uppstår en flodvåg av vatten som strömmar ut ur magasinet. Den generella formen är en hydrograf där ett maximalt flöde uppnås hastigt. Därefter avklingar flodvågen under en viss tidsrymd beroende på hur stort magasinet är, se Figur 9.



Figur 9. Flodvåg för utströmmande vatten nedströms en damm.

Dammhaveriflödet kan i enklare fall, och om endast en uppskattning av maxflödet ska göras, beräknas för hand med hjälp hydrauliska eller empiriska formler. I praktiken utförs beräkningarna av utflödeshydrografer oftast i Excel eller i programvara för hydraulisk modellering (MIKE, HEC-RAS, m.fl.). De bakomliggande ekvationerna är i huvudsak desamma, men användningen av beräkningsverktyg möjliggör en beskrivning av dynamiska förlopp vilket gör att effekter av att magasinet sänks av under dammhaveriets utveckling och effekten av fallförluster upp- eller nedströms brottöppningen kan fångas upp.

Empiriska formler för beräkning av dammhaveriflödet storlek finns framtagna på liknande sätt som för bräschens bredd och dammhaveriets utvecklingstid, se Kapitel 4. Erfarenheter från användning av dessa formler visar att de ibland ger orimliga resultat, och bör därför alltid kontrolleras med en enkel hydraulisk utströmningsberäkning baserad på verkliga geometrier.

## 5.1 FÖRUTSÄTTNINGAR OCH VAL AV BERÄKNINGSVERKTYG

De förutsättningar som behövs för att beräkna dammhaveriflödet är följande:

- Brottöppningens storlek, läge och utvecklingstid, se Kapitel 4.
- Antaganden om hydrologiska förhållanden såsom tillflöden och utflöden från magasinet (exempelvis genom utskov, parallellt med dammhaveriet), se Kapitel 3.5.
- Magasinets storlek och storleksvariation med vattenståndet, se Kapitel 5.3.
- Övriga faktorer som påverkar utflödet, exempelvis genom att fallförluster uppstår upp- eller nedströms brottöppningen (motdämning), se Kapitel 5.4.

Förutsättningar och de resultat som efterfrågas styr vilket beräkningsverktyg som väljs.

Om beräkningen ska utföras för en enskild damm, geometrierna inte är alltför komplicerade och brottöppningen inte ska beräknas som ett erosionsbaserat förlopp kan Excel användas för att med beräkningar i tidssteg få fram en hydrograf som beskriver dammhaveriflödet. Vissa enklare fall där flera på varandra följande dammar havererar kan även beräknas på detta sätt, men komplexiteten ökar snabbt. Excelberäkningar är oftast tillräckliga om syftet är att utföra en konsekvensutredning för en enskild anläggning som ska utgöra underlag för konsekvensklassificering enligt RIDAS.

Om brottöppningens geometri blir mera komplicerad, en längre älvsträcka behöver inkluderas på grund av fallförluster eller om ett större system behöver beskrivas måste en hydraulisk modell användas. Dammen och dammhaveriet kommer då endast att utgöra en del av modellbeskrivningen, som då också omfattar vattenmagasin, dämpning utmed älvsträckor och översvämningssområden, friktion/fallförluster etc. Modellen kan omfatta en kortare sträcka av vattendraget kring den aktuella dammen, eller långa sträckor med flera dammanläggningar längs vägen. Exempel på det senare är de genomförda beredskapsprojekten, se Kapitel 8.

Om en hydraulisk modell finns tillgänglig som omfattar den damm som studeras används den med fördel. Det är dock viktigt att hydrologiska förutsättningar anpassas så att de stämmer överens med beräkningarnas eventuellt förändrade syfte.

MIKE 11 inkluderar funktioner för att utföra en erosionsbaserad modellering av brottöppningens utveckling i fyllningsdammar. Ska denna metod användas för beräkning av brottöppningen måste därför MIKE 11 eller annan programvara med motsvarande funktionalitet användas.

## 5.2 HYDROLOGISKA FÖRUTSÄTTNINGAR OCH UTSKOVSHANTERING

Vid beräkningen av dammhaveriflödet måste hydrologiska förutsättningar antas. Avgörande faktor för dammhaveriflödet är dels tillrinningen, som om den är betydande medför att vatten tillförs magasinet under dammhaveriet och därigenom påverkar utflödet, dels hur utskoven antas hanteras i det dammhaveriscenario som antas. Vid dammhaveriberäkning för konsekvensklassificering behöver ibland även konsekvenser av dammhaveriet beaktas vid val av flödessituation, eftersom den antagna flödessituationen tillsammans med dammhaveriet ska ge upphov till det värsta tänkbara scenariot.

I de flesta fall är det då en enskild anläggning betraktas tillräckligt att anta ett konstant inflöde till magasinet. Vid simulering av dammhaveri i högflödessituationer i större system med flera magasin och längre gångtider fordras dock att hydrografer ansätts, dels som uppströms randvillkor, dels som tillflöden längs vägen. Detta har dock i huvudsak betydelse för vattnets utbredning nedströms dammhaveriet, och för eventuella dominoeffekter, se Kapitel 6.6.

I samband med flödessituationer kommer utflödet från själva brottöppningen i många fall att adderas till det vatten som avbördas genom anläggningens utskov i det antagna scenariot. På samma sätt som vid antagande om brottöppning, se Kapitel 4, bör i de flesta fall ett värsta tänkbara scenario antas. Detta kan innebära att utskov kan antas vara öppna vid dammhaveriet i en högflödessituation, men det kanske inte bedöms som realistiskt att en fyllningsdamm havererar genom överströmning, samtidigt som utskoven står öppna om utskovskapaciteten är tillräcklig för att avbörda det aktuella flödet. Många olika faktorer kan påverka utskovens öppningsgrad, och samtidigt behöva beaktas vid antaganden rörande brottöppningen. Vid ett mindre dammhaveriflöde från ett stort magasin är det tänkbart att utskovsluckor kan stängas efter att dammhaveriet inträffat för att reducera det utflödande vattnet, vilket kan ha betydelse för eventuella dominoeffekter nedströms. Realistiska scenarion måste därför tas fram och beskrivas.

Vid konsekvensklassificering enligt RIDAS ska det dammhaveri som ger de största konsekvenserna beaktas. Därför söks även de hydrauliska förutsättningar som tillsammans med ett dammhaveri ger dessa konsekvenser. Detta kan vara allt från en normalsituation med helt stängda utskov, då ett dammhaveri med större sannolikhet kommer som en överraskning, till en extremflödessituation motsvarande ett klass I-flöde. För fyllningsdammar med begränsad utskovskapacitet kan ibland antas att dammen kommer att överströmmas och haverera långt innan ett klass I-flöde uppnås. Då får ett lägre flöde antas för att ett värsta tänkbara scenario ska erhållas.

Ett annat scenario kan vara att ett dammhaveri i en extrem flödessituation endast medför en marginell ökning av dammhaveriflödet, och att stora områden redan är översvämmade innan dammhaveriet uppstår. Samtidigt kanske ett dammhaveri vid samma anläggning om det inträffar vid en mera vanligt förekommande väderhändelse orsakar en översvämning med större konsekvenser.

Vid dammhaveriberäkning för konsekvensklassificering enligt RIDAS bör alltid minst två scenarion redovisas, dels en normalflödessituation, dels en högflödessituation. Många gånger måste dock flera olika högflödessituationer, med olika scenarion för tillflöden och utskovshantering, kontrolleras för att säkerställa att det värsta tänkbara scenariot identifierats.

I beredskapsprojekten har tre flödesscenarier (normalflöde, 100-årsflöde och klass I-flöde) valts ut för att få en enhetlig bild av analysen i olika vattendrag. Dessa scenarier innebär olika



hydrologiska förutsättningar som kan leda till dammhaveri i olika delar av systemet. Ibland kan olika scenarier leda till olika stora dammhaverier i en och samma damm. I vissa fall har klass I-flödet kombinerats med ett scenario där en lucka antas vara satt ur bruk på grund av drivgods eller annan oförutsedd händelse, det s.k. N-1-fallet, d.v.s. antal luckor (N) minus en lucka (-1).

### 5.3 MAGASINSVOLYM

För att dammhaveriflödet ska beräknas på ett korrekt sätt måste magasinets area- och volymförhållanden beskrivas. Normalt används magasinsskurvor som kan behöva extrapoleras över dämningssgräns och under sänkningsgräns. Om magasinsskurvor saknas får ett area-volymförhållande antas utifrån kartmaterial, magasin i liknande topografi och fältobservationer. Vid enklare överslagsberäkningar kan ibland vertikala stränder antas, d.v.s. att magasinetsvolymen står i ett linjärt förhållande till dämningssnivån.

### 5.4 FALLFÖRLUSTER UPP- & NEDSTRÖMS DAMMHAVERIET

Om fallförluster uppstår så att vattennivån precis uppströms brottöppningen blir markant lägre än i magasinet, eller om fallförluster på nedströmssidan gör att vattnet bromsas och ger upphov till motdämning i brottöppningen måste beräkningarna kompenseras för detta.

En tumregel är att motdämning från nedströmssidan riskerar att påverka utströmningen ur brottöppningen om vattennivån nedströms stiger över halva höjden av uppströmsvattenytan relativt brottöppningens tröskelnivå.

Om geometrin i tvärsnittet uppströms och nedströms dammen beskrivits verklighetstroget och rätt val av ingående parametrar kring den dämmande strukturen gjorts i HEC-RAS eller MIKE 11 kommer programvaran att inkludera effekten av motdämning. Om Excel används får fallförluster upp- och nedströms brottöppningen uppskattas genom att en prismatisk kanal ansätts och fallförlusten beräknas med Mannings formel för öppen kanalströmning. Ett typiskt exempel då detta måste göras är när en kanalbank antagits haverera i nedströmsänden, och en betydande nivåskillnad uppstår i kanalen mellan magasinet och brottöppningen.

### 5.5 BERÄKNING MED TIDSSTEG I EXCEL

En beräkning i Excel utformas så att vattennivå och utflöde från magasinet beräknas i tidssteg. Tidssteget väljs i relation till magasinets storlek och den antagna (eller beräknade) brottutvecklingshastigheten så att tillräcklig upplösning erhålls för att beskriva utflödet utan att numerisk instabilitet uppstår.

Utflödet beräknas i de enklaste fallen enligt (1), vilket motsvaras av utflödet genom ett rektangulärt ytutskov med den fria bredden  $b$ . Formeln kan modifieras och exempelvis anpassas till att beskriva utflödet från en öppning med lutande sidor. Utströmningskoefficienten  $\mu$  väljs med ledning av den antagna brottöppningens utseende, oftast till i storleksordningen 0,4 – 0,55.

$$Q_{ut} = \frac{2}{3}\mu \times b \times (vy - tröskel)\sqrt{2g(vy - tröskel)} \quad (1)$$

Därefter beräknas magasinensnivån efter ett tidssteg enligt (2). Magasinsarean,  $A_m(vy)$ , är en funktion av magasinensnivån och beror på strändernas lutning i magasinet.

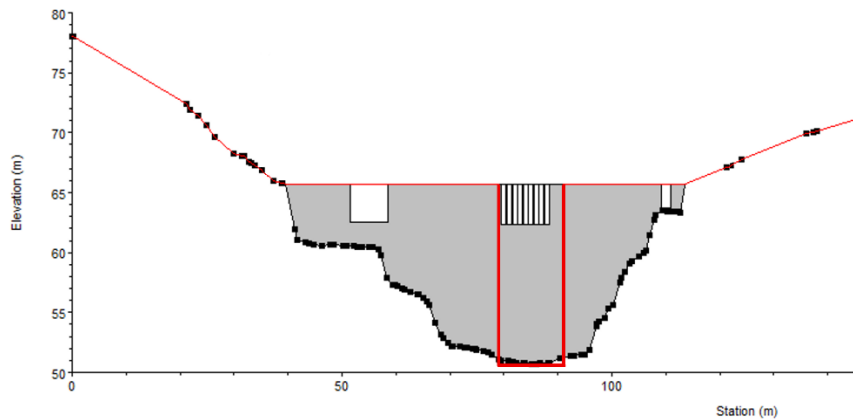
$$vy(t_{n+1}) = vy(t_n) - \frac{Q_{ut}(t_n) - Q_{in}(t_n)}{A_m(vy(t_n))} \quad (2)$$

I enklare fall kan beräkningarna utökas till att inkludera fallförluster uppströms dammen, genom att  $vy$  i (2) reduceras i förhållande till magasinensnivån beroende på flöde och vattenstånd, vilket i sin tur beräknas med Mannings formel för öppen kanalströmning, se Kapitel 5.4. Vid undersökning av dammhaveriflöden som dominoeffekt kan flera magasin kopplas samman genom att ytterligare kolumner adderas till Excelberäkningen och  $Q_{ut}$  tillsammans med eventuell ytterligare tillrinning får utgöra  $Q_{in}$  till nästa nedströms liggande magasin.

### 5.6 HYDRAULISK MODELL

Vid mera komplicerade geometrier kring brottöppningen och trånga sektioner uppströms dammen, om erosionsbaserad beräkning av brottöppning i en fyllningsdamm ska göras, eller om motdämning från nedströmssidan bedöms påverka utströmningen kan det vara nödvändigt att sätta upp en hydraulisk modell i HEC-RAS eller MIKE. Om ett större system av magasin ska modelleras, som gjorts vid framtagandet av underlag för beredskapsplanering, måste också en hydraulisk modell användas.

Dammar beskrivs i de hydrauliska modellerna som beräkningsstrukturer som placeras mellan två angränsande tvärsnitt. I dammen definieras sedan en brottöppning geometriskt, se Figur 10.



**Figur 10.** En damm beskriven som 'structure' i HEC-RAS med en definierad brottöppning (röd tjock linje).

I modellen ansätts sedan en utvecklingstid för dammhaveriet, samt en utvecklingskurva. För betongdammar antas vanligen att brottöppningen utvecklas linjärt under några minuter. Det finns få observerade dammhaverier men det troliga är att en betongdamm bryts sönder i delar under loppet av några minuter. Glenodammen i Figur 3 rasade under loppet av 15 minuter. Vid beräkningar som innefattar dominoeffekter kan ett sådant kriterium exempelvis (hos en fyllningsdamm) vara när vattennivån i magasinet når tätkärnans överkant eller dammkrönet.

Om en erosionsbaserad metod används för att beräkna brottöppningens utveckling integreras beräkningen i den hydrauliska modellen, se Kapitel 6.4. Vattenhastighet och vattennivå i brottöppningen hämtas från den hydrauliska delen av beräkningen i varje tidssteg och används för att bestämma hur mycket brottöppningen vidgas. Den nya och, så länge brottet fortsätter att utvecklas, större brottöppningen används sedan i den hydrauliska beräkningen i nästa tidssteg. Då brottöppningen når konturen av den begränsande sektionen eller vattenhastigheten i brottöppningen avtar kommer dammhaveriets utveckling att avstanna.

De viktigaste ingående parametrarna i en dammhaveriberäkning är:

- För fyllningsdammars anges dammens dimensioner (bredd, längd och nivå på dammkrön, släntlutning upp- och nedströms). En begränsning här är att upp- och nedströms släntlutning måste ansättas lika över hela slänten från krön till dammtå. Även dammens materialparametrar ansätts (kornstorlek, densitet, porositet, kritisk skjuvspänning). En begränsning här är att materialparametrarna måste ansättas lika i hela dammkroppen. Dambrottet initieras genom överströmning av tätkärna eller dammkrön alternativt ansätts parametrar motsvarande ett förlopp med inre erosion.
- För betongdammars anges ett tidsberoende brottförlopp. En viss förutbestämd öppning, ex. arean motsvarande en betongmonolit, öppnas upp under ett antal sekunder eller minuter.
- Avgränsning av dammens geometri (lägsta nivå för brott, största bredd, största sidolutning i bräschan). Avgränsningen kan även göras för en oregelbunden yta såsom en stålspons eller bergyta.



## 6 Beräkning av dammhaveriflödets utbredning

Detta kapitel beskriver olika tillvägagångssätt för att bestämma vattnets utbredning nedströms dammhaveriet. Syftet med beräkningen, hydrografen som beskriver dammhaveriflödet och de geometriska förutsättningarna nedströms styr vilken metod som är lämplig att använda. Andra viktiga faktorer som kan behöva ingå i beräkningen av dammhaveriflödets utbredning är eventuella dominoeffekter, regleringsstrategier, terrängens flödesmotstånd, förekomst av broar och andra byggnader som kan orsaka lokal dämning samt tillrinning till vattendraget nedströms dammhaveriet. För gruvdammar, som inte bara innehåller vatten, behöver vissa speciella hänsyn tas.

Som metod väljs av effektivitetsskäl den enklaste metod som, i förhållande till syftet, tillräckligt bra kan beskriva vattnets utbredning. Metoderna kan förenklat beskrivas enligt nedan:

- |  |                |
|--|----------------|
| 1. Utan beräkning                                | (enklast)      |
| 2. Handboksformler                               |                |
| 3. Volymetrisk routing (Excel eller motsvarande) |                |
| 4. Hydraulisk modell (MIKE 11, HEC-RAS, etc.)    | (mest komplex) |

Undantag kan vara när en hydraulisk modell som beskriver vattendraget redan finns tillgänglig. I sådana fall kan den ofta effektivt användas, även om tillräcklig noggrannhet skulle kunna uppnås med en enklare metod.

### 6.1 UTAN BERÄKNING, BASERAT PÅ ERFARENHETER

I en del fall där vattnets påverkan på ett mindre område eller några enstaka skadeobjekt ska bedömas kan detta göras erfarenhetsmässigt. Detta gäller speciellt om dammhaveriflödet är i samma storleksordning som vid tidigare högflöden och observationer finns från dessa tillfällen, endera hos personer som var med vid händelsen, eller annan dokumentation som foton, filmer, inristade vattenmärken, rapporter eller andra skriftliga källor finns tillgängliga.

Om uppskattningar av vattennivåer och utbredning görs utan information om tidigare vattenstånd måste beaktas att osäkerheten kan vara betydande. Sådana bedömningar bör endast göras då syftet med utredningen inte påverkas nämnvärt av den exakta nivån eller utbredningen. Exempel på detta kan vara uppenbara fall, där den uppskattade vattennivån ska jämföras med mycket högt belägna byggnader eller då skadeobjekt är belägna nära brottöppningen och man med stor säkerhet kan bedöma att de kommer att påverkas av utströmningen.

## 6.2 BERÄKNING MED HANDBOKSFORMEL

I några fall kan enklare handboksformler användas för att beräkna vattenståndet nedströms till följd av dammhaveriet.

### 1. Då översvämningen kan beskrivas med hjälp av det naturliga vattendjupet

Då sträckan längs vattendraget där vattennivån ska beräknas kan beskrivas som en lång prismatisk kanal där likformig stationär strömning råder kan vattendjupet beräknas med passning enligt (3).

$$Q = MR_n^{2/3} A_n \sqrt{S_b} \quad (3)$$

där

- $Q$  = flöde [ $\text{m}^3/\text{s}$ ]
- $M$  = Mannings  $M$  [ $\sqrt[3]{\text{s}}/\text{m}$ ]
- $R_n$  = hydraulisk radie för naturligt vattendjup [m]
- $A_n$  = tvärsnittsarea för naturligt vattendjup [ $\text{m}^2$ ]
- $S_b$  = bottens (och vattenytans) lutning [-]

$R_n$  och  $A_n$  inkluderar vattendjupet på olika sätt beroende på tvärsnittets utseende.

### 2. Då vattenståndet bestäms av en dämmande sektion

Om dammhaveriflödet är långvarigt och vattennivån runt en mindre vattenspegel nedströms ska beräknas kan detta göras genom beräkning av erforderligt vattenstånd över den bestämmande sektionen som vattnet kommer att rinna över. Metoden fordrar att stationära förhållanden råder, d.v.s. att vattenspegeln är tillräckligt liten i förhållande till flödestoppens längd.

Ytterligare handboksformler kan användas vid beräkning av vattennivå omedelbart uppströms speciella byggnader i vattendraget, såsom vägtrummor, broar eller dammar som helt eller delvis bedöms stå kvar vid ett dammhaveri längre uppströms.

Utifrån den beräknade vattennivån uppskattas sedan vattnets utbredning i förhållande till omgivande terräng.

## 6.3 VOLYMETRISK ROUTING

Metoden används när dämpningen i huvudsak kan beskrivas med hjälp av en serie vattenmagasin med definierade avbördningskurvor. Exempel på sådana fall är där magasinerna ligger nära varandra och de huvudsakliga frågeställningarna rör hur högt vattennivån kan tänkas stiga i magasinerna och om dominoeffekter uppstår. För beräkningen används Excel eller andra numeriska analysverktyg.

#### 6.4 HYDRAULISK MODELLERING

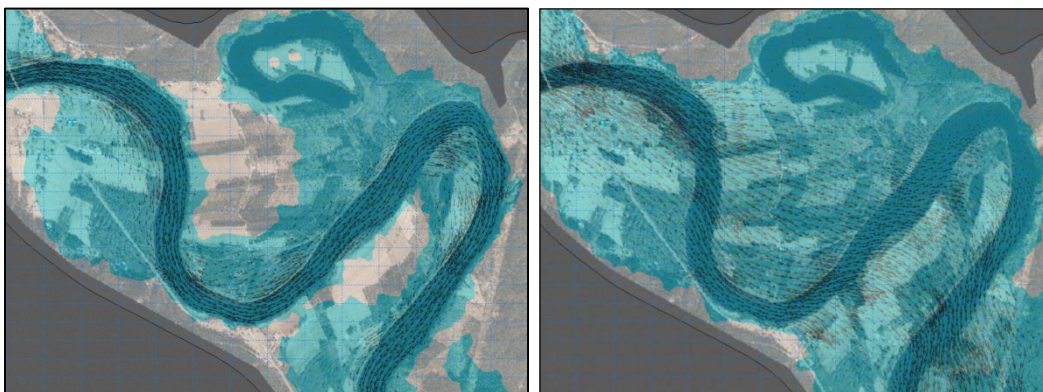
Flöden från dammhaveri då vatten strömmar från den havererade dammen nedströms i älven är snabba och högst varierande förlopp. Moderna beräkningsprogramvaror som används för att simulera dammhaveriflöden bygger på de partiella differentialekvationer som Barré de St. Venant beskrev redan år 1871. Ekvationerna har dock förenklats för att kunna lösas när flöden i en oregelbunden älv ska beskrivas. Med dagens datorkapacitet finns ingen anledning att använda annat än fullt dynamiska beräkningar som bygger på att ekvationer av hög ordning används även när hela älvsystem simuleras. I dessa dynamiska beräkningar tas exempelvis bakvatteneffekter med så att flodvågen dämpas på ett korrekt sätt.

Hydrauliska modeller som MIKE och HEC-RAS har blivit standardverktyg som används för att beskriva hur dammhaveriflöden rör sig nedströms i älven.

Kortfattade definitioner av olika slags hydrauliska modeller ges nedan:

- 1D-modell: Endimensionell numerisk modell där vattennivåer beräknas i ett antal definierade tvärsektioner längs vattendraget. Vattennivå och vattenhastighet är lika i hela tvärsektionen.
- 2D-modell: Tvådimensionell modell där ett grid eller ett nätverk av beräkningsceller skapas med hjälp av en komplett terrängmodell. Vatten tillförs modellen via ansatta randvillkor och följer terrängen ner mot lägre nivåer. Djup och hastighet beräknas i varje cell/punkt. Vattnet rörelser beskrivs dock inte i vertikal led utan endast horisontellt (jämför med 3D-modell). Vattenhastigheten är lika i djupled i varje beräkningscell.
- 3D-modell: Tredimensionell modell där vattnet modelleras i celler i x-, y- och z-led. Detta tillåter att vattenhastigheten beskrivs i vertikalled och gör att komplicerade strömningsmönster kan fångas upp, exempelvis vertikala virvlar i vattendragets krökar eller inströmningen till en tunnel.

En 1D-modell räcker i många fall till för att beskriva dammhaveriflöden i våra älvdalar men ibland behövs en 2D-modell. Ett exempel när en 2D-modell behövs är under höga flöden när det är svårt att förutse var nya vattenvägar bildas till exempel i breda älvdalar eller när ett meandrande vattendrag översvämmas och vattnet bryter igenom och hittar en ny rakare sträcka (se Figur 11).



**Figur 11.** Exempel på 2D-modell med hastighetsvektorer som beskriver flödet, i bilden till vänster under ett höglöde och till höger efter ett dammhaveri då flodvågen passerar och vattnet tar en ny rakare sträcka.

3D-modeller används sällan för att beskriva dammhaveriflöden, ofta av beräkningstekniska och kostnadmässiga skäl. Det kan dock finnas fall då en 3D-modell behövs för att beskriva vattenflöden från dammhaverier. Det handlar då oftast om detaljerade studier av vattennivåer och vattenhastigheter lokalt nedströms dammen.

Att upprätta en hydraulisk modell omfattar vanligen följande moment.

#### 6.4.1 Modellutbredning

För beredskapsprojekten är det geografiska området ofta bestämt från ett uppströmsläge i älven som ett årsmagasin eller någon annan damm/magasin högt upp i systemet ner till antingen havet eller en stor sjö som Väneren, där vattennivån kan förbli opåverkad av dammhaveriflödet. Om modellen ska användas vid konsekvensklassificering väljs i stället ett lämpligt område från den aktuella dammen och nedströms till en plats där översvämningar till följd av dammhaveri bedöms ha ebbat ut. Här kan modellens nedströmsrand vara en plats där ett väldefinierat samband mellan flöde och nivå kan fastställas som vid en damm eller bro.

Viktigt är att beskriva de vattenvägar som kan tänkas uppstå vid dammhaveriflöden. Om en flodvåg kan breda ut sig i terräng eller torrfåror där vatten vanligen inte rinner måste detta beaktas särskilt. I en 1D-modell görs detta genom att förgreningar läggs in även för sträckor där vatten skulle rinna vid ett dammhaveri men där normalt inget vatten finns. Om det är svårbedömt vilken väg vattnet kommer att ta kan området som beskrivits ovan analyseras med en 2D-modell.

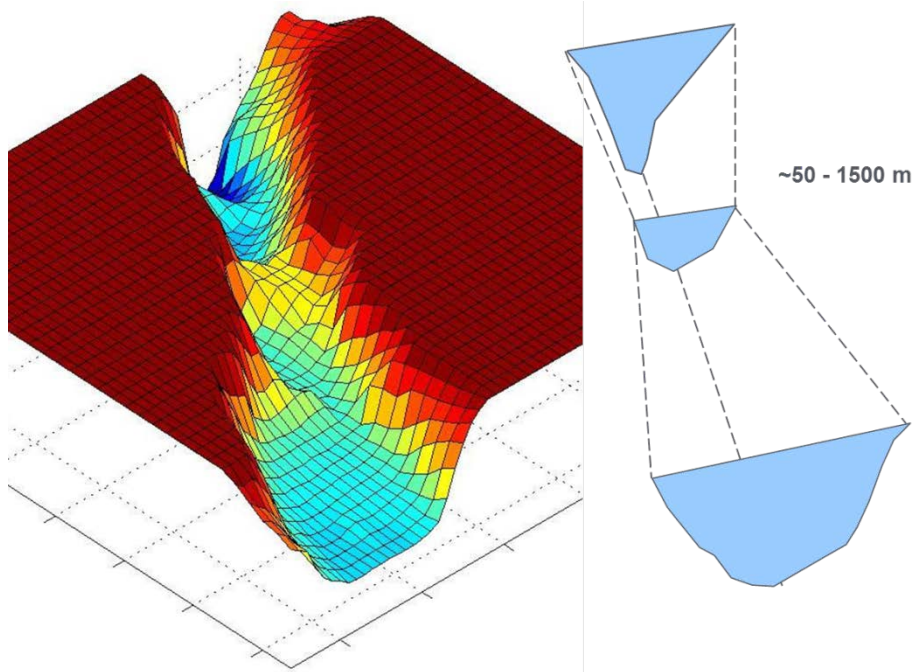
Dammanläggningar läggs in i modellen i form av *structures* där utskovens avbördning och dammens brottegenskaper beskrivs. På varje dammanläggning kan flera dammar beskrivas. En damm kan ge det största utflödet vid haveri medan en annan har ett lägre dammkrön och alltså överströmmas först. Utskoven beskrivs, om enheterna inte ligger långt från varandra, ofta gemensamt i form av en nivå-flödestabell. Uppgifter om utskovens avbördning utgör en betydande osäkerhet i beräkningarna.

#### 6.4.2 Terrängdata

Älvens geometri beskrivs i 1D-modeller genom att så kallade tvärsektioner skapas med hjälp av en terrängmodell. Tvärsektionerna läggs vinkelrätt mot den huvudsakliga strömningsriktningen och beskriver den area som vattnet flödar genom. Sektionernas lägen väljs så att älvens geometri beskrivs både i plan och i profil, se Figur 12. Det är mycket viktigt att fånga upp både förträngningar i plan, t.ex. i brolägen, och i djup, som på ställen med grunda partier. Här stannar vattnet upp och sådana trånga sektioner är avgörande för hur dammhaveriflödet fortsätter nedströms.

Ett lämpligt arbetssätt är att information om terrängens höjd och vattendragets djup samlas i en heltäckande digital terrängmodell som sedan används till att skapa tvärsektioner. Höjddata består oftast av laserskannad terränginformation och botten­data av ekolodningar, men även andra källor kan användas, se Kapitel 3.3 - 3.4. Vid avsaknad av inmätt botten­nivå måste antaganden om vattendragets djupförhållanden göras. Övergången från höjddata till botten­data är viktig för terrängmodellens kvalitet och de olika dataseten bör definieras geografiskt genom att en strandlinjekartering används innan en hopslagning sker. Tvärsektionerna digitaliseras i ett GIS-verktyg och i processen extraheras nivå­data i det givna snittet utifrån terrängmodellen. Speciell uppmärksamhet bör ges åt att sektionerna är breda

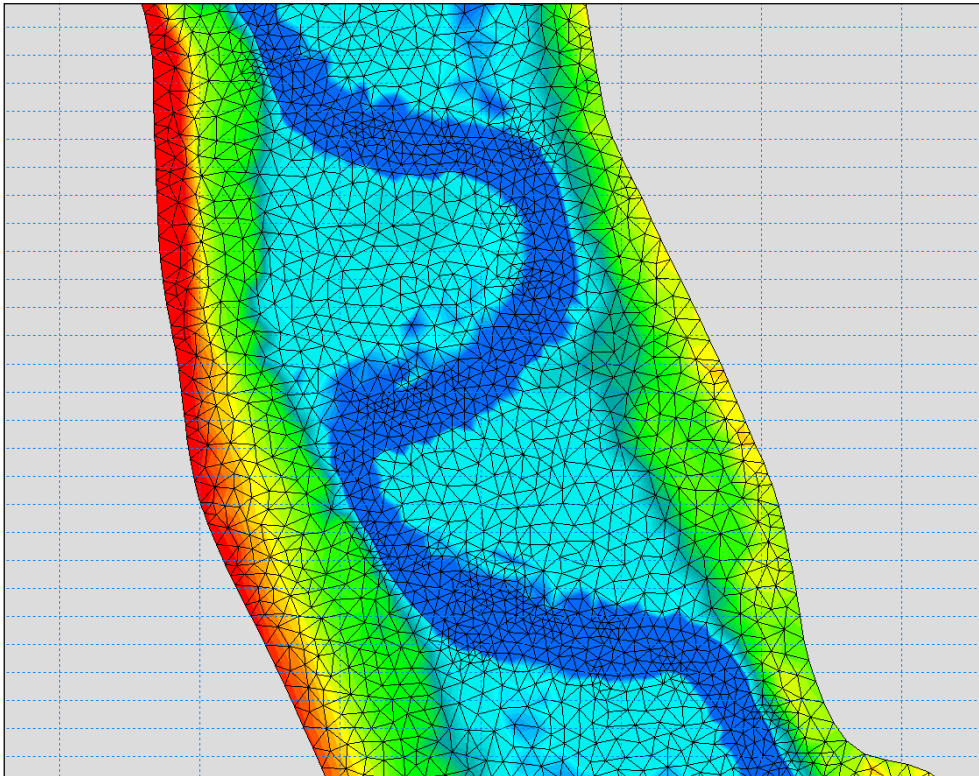
nog för att täcka in den nivå en förväntad vattennivåökning kan nå upp till, vilken inte alltid är uppenbart under dammhaveriflöden. Sektionerna jämförs i efterhand mot beräkningsresultatet för att verifiera att vattennivåökningen ryms inom sektionen. Tvärsektioner som representerar det aktuella sjöar och magasin är också viktiga då de representerar indämda vattenvolymer, vilket exempelvis påverkar den totala lösläppta vattenvolymen vid ett dammhaveri. En kontroll av volymen i det beräknade dammhaveriflödet under förloppet när magasinet töms verifierar att tvärsektionerna beskriver volymerna i magasinet på ett korrekt sätt. På vissa ställen kan det bli aktuellt med manuella justeringar av sektioner på grund av modelltekniska skäl för att undvika instabiliteter i beräkningarna som annars kan ge upphov till volymfel, se Figur 12.



**Figur 12.** Exempel på hur sektionerna placerats i en 1D-modell för att fånga upp förändringar i älvens geometri.

I en 2D-modellering används inte tvärsektioner då vattnet i stället strömmar i ett grid eller nätverk av beräkningspunkter skapat med hjälp av en terrängmodell (se Figur 13). Val av upplösning eller avståndet mellan beräkningspunkterna blir viktigt eftersom antalet celler/beräkningspunkter är avgörande för beräkningstiden. Det finns därför ingen anledning att ha en mer detaljerad modell än vad de strömningstekniska aspekterna av beräkningen kräver. Med ett nätverk där olika avstånd mellan beräkningspunkterna tillåts kan beräkningstid sparas genom att en högre upplösning används enbart där detta är motiverat. Inte sällan behöver en lokal 1D-modell upprättas även vid 2D-modellering då dammhaverimodulerna oftast är mer utvecklade i 1D-modeller. Den lokala 1D-modellen omfattar då magasinet och en viss sträcka nedströms dammen. Resultatet (vattenföringen) från 1D-modellen införs som nytt randvillkor (inflöde) i 2D-modellen. Eftersom 2D-modeller av beräkningstekniska skäl är mer lokala än 1D-modeller får ofta nedströmsrandvillkoret stor betydelse och tid bör läggas på att välja en lämplig plats och verifiera att nedströmsrandvillkoret är giltigt.





Figur 13. Ett exempel på hur ett beräkningsnätverk kan se ut i en 2D-modell.

De förhållanden som råder uppströms och nedströms den hydrauliska modellen benämns randvillkor. Randvillkoren utgörs oftast av ett inflöde i vattendraget, enligt det hydrologiska scenariot, där modellen börjar och en vattennivå eller ett fixt förhållande mellan vattennivå och flöde i nedströmsranden. Vid nedströmsranden kan alternativt antas att ett strömningsförhållande som kritiskt djup eller naturligt djup (baserat på lutningen på sträckan) råder. I beredskapsplaneringen antas nedströmsranden vid normalflöde vara medelvattennivån i havet och vid högflöden ansätts en förhöjd havsvattennivå ofta med 100 års återkomsttid.

En viktig parameter i hydraulisk modellering är hydraulisk råhet. Hydraulisk råhet anges som Mannings tal och beskriver friktionsförluster på vattendragets botten. Vanliga värden för Manningstal är  $M = 25-35 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$  men såväl högre som lägre värden kan förekomma på vissa sträckor. Ett lägre värde gäller ofta i mindre älvfåror med stenig och blockig botten medan ett högre värde erhålls i större mer morfologiskt utvecklade älvpartier exempelvis med sandig botten eller i schaktade kanaler. Den hydrauliska råheten är också till viss del årstidsberoende och lägre värden fås när vegetationen breder ut sig eftersom den ökar motståndet för vattnet. En uppdelning av den hydrauliska råheten mellan ytor där vattnet normalt strömmar, där det normalt är mindre strömningsmotstånd, och tillfälliga översvämningsytor är lämpligt. Möjligen går det att bortse från detta i dammhaveristudier som sannolikt medför att markområden eroderas och förändras geometriskt, samt sly, skog och annan vegetation kan spolas med dammhaveriflödet. En anpassning av Mannings tal används för att kalibrera modellen och inkluderar då även andra strömningsförluster (än hydraulisk råhet) som inte

beskrivs på annat sätt i modellen. I amerikansk litteratur används i stället Mannings tal  $n$ , som är det inverterade värdet av  $M$ .

#### 6.4.3 Initiala förhållanden

Startvillkor för beräkningen ställs in så att vattennivåerna i vattendraget och dämmningsnivåerna i magasinerna motsvarar det hydrologiska scenario som dammhaveriet ska studeras för. Magasinsytorna antas i regel ligga vid dämmningsgräns om aktuell tillrinning i förhållande till anläggningens kapacitet tillåter detta. Vid normalflöde går vattnet genom kraftverkens aggregat alternativt genom något eller några av utskoven. Vid höga flöden antas driften vara stoppad så att vattnet istället passerar dammens utskov. Stationära flödesförhållanden antas i älven.

#### 6.4.4 Kalibrering och validering

Kalibrering utförs genom anpassning av modellen till inmätta vattennivåer vid något tillfälle med känd vattenföring. Som nämnts ovan används ofta den hydrauliska råheten, genom en justering av Mannings tal, för att kalibrera modellen för överensstämmelse med observerade vattennivåer. Det är önskvärt att kalibrera med nivåer från tidigare höglöden då översvämningar ägt rum. Kvaliteten på beräkningsmodellen avgörs till stor del på vilket underlag som funnits tillgängligt för kalibrering. Även fotografier kan vara till nytta i kalibreringen. Vid översvämningar som inträffat finns ibland digitala fotografier tagna från marknivå eller från flygplan eller helikopter av Polisen, Kustbevakningen, Länsstyrelsen eller annan organisation. Ett sådant underlag i kombination med samt inmätta vattennivåer kan ge en gott underlag för kalibrering.

Något som bör observeras är hur randvillkoret nedströms i modellen påverkar nivåerna som styrs av detta. Dämmningsnivåerna kan vara olika i en kalibrering jämfört med det scenario som ska räknas. Även om ett observerat flöde kan likna de flöden som ska simuleras i magnitud t.ex. ett flöde med 100-års återkomsttid kanske havsnivån vid observationstillfället varit en helt annan. Om det finns flera inmätningar av vattennivåer vid olika flödestillfällen kan något av dessa tillfällen användas som validering av de kalibrerade parametrarna. De extrema flöden som simuleras har med få om ens något undantag aldrig observerats. Modeller kan därför inte valideras för denna del av flödesregistret, istället får modellen så gott det går anpassas med de observationer som finns.

#### 6.4.5 Avgränsningar

Följande avgränsningar görs i allmänhet vid hydrauliska beräkningar för dammhaveri:

- Älvfåran antas ha konstant geometri genom beräkningarna och påverkas alltså inte av erosion eller tillfälliga fördämningar, samtliga beräkningar är baserade på befintlig marknivå. I verkligheten sker sannolikt erosion längs stränderna och på älvens botten (morfologiska förändringar) men detta förlopp kan inte medräknas på grund av dess komplexa natur.
- Simuleringarna bygger på att vattnet är rent. I verkligheten följer dock träd, buskar, jord, båtar, bryggor etc. (benämns vanligen drivgods) med vid extremt höga flöden vilket medför risk för igensättning av dammarnas utskov. Sådana förlopp är svåra att förutse och inkluderas ofta inte. I vissa fall görs dock antaganden om nedsatt avbördningskapacitet på grund av att drivgods vilket leder till förhöjd magasinsnivå.

- Bropelare och brofundament ger dämning men brobanor och brobalkar antas ofta inte utgöra hinder för vattnet i beräkningarna. Ibland kan dock brobanor läggas in i modellen när bronns dämningseffekt behöver belysas.
- Vågor och vindsnedställning i magasinen medräknas i regel inte. I fallet Göta älv togs dock hänsyn till detta.
- Turbinvattenföringen medräknas inte som avbördning.

## 6.5 REGLERINGSSTRATEGIER

Vattenkraftmagasin styrs ofta av regleringsstrategier bestämda utifrån hydrologiska förutsättningar, produktionsplanering, dammsäkerhet, hänsyn till verksamheter i vattendragen, villkor i vattendomar etc. vilket måste beaktas i modellkörningarna.

Dimensionerande flöde kan exempelvis ofta förväntas inträffa på våren då fjällmagasinen är på årets lägsta nivå. Att kombinera klass I-flöde med magasinsnivån på dämningssgräns kan då bli en osannolik kombination. För anläggningar där klass I-flödet bedöms inträffa på hösten kan dock beräkning med magasin vid en nivå på dämningssgräns vara en rimlig ansats.

Hantering av utskovsluckor och eventuell drift av kraftstationer måste också beaktas och ett aktivt val måste göras av vad som ska beskrivas av modellen.

Följande generella regler gäller för hanteringen av utskovsluckor i beredskapsprojekten:

- Alla magasin antas i början av beräkningarna ligga på dämningssgräns, eller den nivå som krävs för att avbörda det tillrinnande vattnet. Detta oavsett om en anläggning normalt ligger på en lägre driftnivå.
- Tillrinningen avbördas och magasinen hålls så länge som möjligt vid dämningssgränsen. Maximal avbördningskapacitet utnyttjas så fort vattenytan stiger ovanför dämningssgränsen. Undantag kan vara då utskovskapaciteten reduceras genom igensättning av drivgods eller för svårmanövrerade utskov med låg tillgänglighet.
- Vid ett dammhaveri behåller luckorna det läge de hade innan dammhaveriet inträffade (gäller den anläggning där dammhaveriet sker samt anläggningar uppströms).
- Vid anläggningar nedströms den anläggning där dammhaveriet sker öppnas luckorna fullt när vattenytan stiger över dämningssgränsen (undantag kan göras om t ex gångtiden är mycket kort). Förutsättningen för att utskovsluckor ska hinna öppnas är dock att anläggningen har dämningsskydd.

Särskilda luckmanövreringsstrategier, exempelvis aktiv dämning, kan bli aktuella i specifika fall, efter diskussioner med dammägaren. Om en anläggning t.ex. har ett stort antal handmanövrerade utskovsluckor kan särskild hänsyn behöva tas till att det tar tid innan full avbördningskapacitet kan uppnås. Om flodvågens gångtid till nedströmsliggande anläggning är mycket kort och dämningsskydd saknas kan hänsyn också behöva tas till detta.

Ett exempel är en regleringsstrategi som tillämpats på anläggningar med kort gångtid från anläggning där dammhaveri beräknas vid ett dammhaveri under normalflöde. Bakgrunden till detta är att ett dammhaveri vid flödessituationen normalflöde sker överraskande, och att inställelsetiden till anläggningen gör att full avbördningskapacitet inte kan förväntas. Här måste en bedömning göras av hur snabbt driftpersonal kan vara på plats. Utifrån detta görs antaganden att automatluckor vid anläggningen kan nyttjas till full kapacitet men att övriga luckor som kräver manuell hantering stannar i det läge de hade innan primärbrottet initieras vid anläggningen uppströms.



I beredningsprojekten har de allmänna förutsättningarna avseende dämmningsgränser, avbördningskapacitet och liknande använts. Beräkningsfallet klass I-flöde kan i vissa fall kombineras med bortfall av en lucka, det s.k. N-1-scenariot (se Kapitel 5.2), för att beskriva detta fall. I olika flödesscenarier kan det värsta scenariot inträffa vid olika dammenheter på anläggningen.

## 6.6 DOMINOEFFEKTER/SEKUNDÄRT DAMMHAVERI

Jorddammar som riskerar att överströmmas vid ett dammhaveri uppströms ansätts i beräkningarna med sekundärt dammhaveri. Dammhaveri antas först och främst ske vid den lägsta jorddammen eftersom den kommer att överströmmas före dammar med högre krön vid anläggningen. Om alla dammar har lika hög krönnivå så har den dammenhet där konsekvensen anses bli störst valts, därefter har dammhaveri i ytterligare dammenhet/dammenheter möjliggjorts i ordning efter bedömd konsekvens. Nivån för lägsta dammkrön har i regel använts men i vissa fall har efter samråd med dammägarna tät kärnans nivå används.

Betongdammar antas ofta stå emot överströmning varför sekundärhaveri inte alltid antas kunna ske. Efter enskilda bedömningar (dåliga grundläggningsförhållanden, stabilitetsproblem vid kraftig överströmning etc.) har vissa betongdammar bedömts kunna haverera vid överströmning. Sekundärhaveri antas då ske på grund av otillräcklig stabilitet när vattenytan vid en överströmning når en betydande höjd. Ett exempel från Klarälven är att utgångspunkten i bedömningen har varit att otillräcklig stabilitet kan inträffa vid en överströmning på 0,4 x dammhöjden men en värdering har gjorts från fall till fall utifrån aktuell dammtyp och för förhållandena på plats.

## 6.7 UTFLÖDE VID DAMMHAVERI I GRUVDAMMAR

Dammar som omger sandmagasin (gruvdammar) kan dämna upp en mängd material med olika egenskaper. Generellt sett dämmer en damm i ett sandmagasin upp en stor mängd vattenmättad anrikningssand. Det vanliga är att den damm som är belägen vid utskovsanordningar har en stående vattenyta mot dammkroppen. Den fria vattenvolymen är oftast inte kontinuerlig från vattenytan ner till dammens dammtå uppströms. De översta metrarna utgörs av vatten och undertill utgörs volymen av magasinerad och vattenmättad sand. Det medför att dammhaveriberäkningen behöver behandla en relativt liten vattenmängd jämfört med hur stor och hög en gruvdamm ofta är (i Sverige). Dammar som geografiskt ligger åtskilt från utskoven dämmer ofta endast en stående vattenmättad anrikningssand eller har relativt torr sand stående emot sig. I dessa dammar kan möjligen ett dammhaveri medföra något som kan liknas med ett jordskred som sker utan att en stor mängd vatten forsar ut. Skadorna blir då lokalt avgränsade till dammens närområde.

Möjligen kan nybyggnation av gruvdammar leda till att den första uppfyllningsfasen av magasinet kommer medföra att det magasineras mer vatten i början av anläggningens driftperiod.

Vid beräkning av dammhaveri i en hydraulisk modell kan sanden påläggas den frigjorda vattenvolymen som en koncentration suspenderat material med olika fraktioner av kornstorlek. Här måste platsspecifika förhållanden beaktas för att bedöma vilka mängder sand som kan frigöras med en utströmmande vattenvolym. Platsspecifika förhållanden kan vara hur dammen är uppbyggd, materialegenskaper hos anrikningssanden, bottenografi i

sandmagasinet och i terrängen nedströms, mängden fritt stående vatten som står mot dammen och även om vattenmängden utgörs av en liten yta med stort djup eller en stor yta med grunt djup kan påverka ett potentiellt dammhaveriförlopp.

## 7 Redovisning av resultat från dammhaveriberäkningar

**Ett dammhaveriförlopp med vattnets framfart i älven och terrängen runt vattendraget kan skildras på olika sätt. Kapitlet beskriver hur egenskaper hos det okontrollerade flöde som skapas av ett dammhaveri redovisas i olika underlag. Vanligtvis är information om vattennivåer, flöden, vattenhastigheter, hur snabbt vattnet stiger och drar sig tillbaka på olika platser samt vattenutbredningen i terrängen viktig karaktäristika av ett dammhaveri.**

Om en enklare metod för dammhaveriberäkning har valts (se Kapitel 5) kan resultatet bestå av en beräknad nivå vid enstaka platser där skadeobjekt ligger. Det kan handla om nivåer vid ett bostadshus eller vid ett vägavsnitt och resultat från dammhaveriberäkningen redovisas då i form av nivåer i text, sammanställning i en tabell eller på en karta. Även foton med en inritad markering till vilken nivå vattnet från ett dammhaveri kan nå kan illustrera resultatet. Om en hydraulisk modell använts i dammhaveriberäkningen kan resultat redovisas som en vattenståndsprofil med inlagda lägen och nivåer på skadeobjekt och referenspunkter längs vattendraget.

Det finns fördelar med att använda ett geografiskt informationssystem (GIS) för att redovisa resultat då det både ger möjlighet att kartera översvämningsutbredningen av det utströmmande vattnet och ge platsbunden information om nivåer, flöden, vattenhastigheter mm. GIS har valts som verktyg för att redovisa resultatet av de hydrauliska beräkningarna i beredskapsplaneringsunderlagen som där består av:

- Vattenutbredningsskikt
- Vattennivåer i beräkningssektioner
- Vattenståndsprofiler
- Tabellsammanställning

I beredskapsunderlagen har vattenutbredningsskikten och vattennivåer i beräkningssektioner sammanställts i en GIS-viewer, tillsammans med kart- och objektdata för orientering. GIS-viewern, inklusive kartor och databas, levereras på digital media.

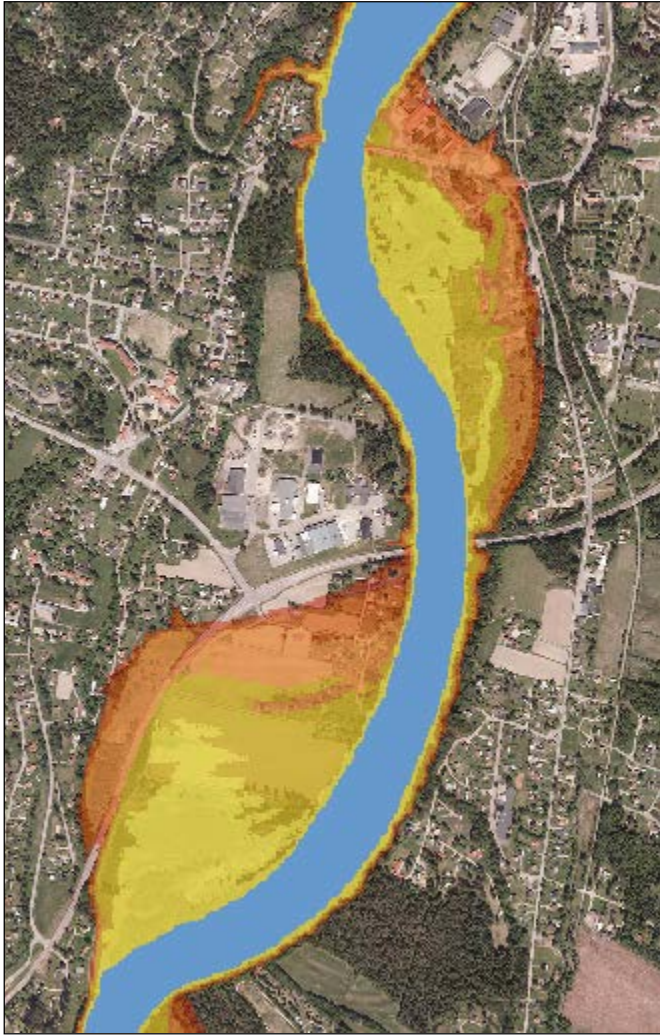
I en konsekvensutredning tillkommer som beskrivits ovan en inventering av skadeobjekt. I inventeringen jämförs resultatet av dammhaveriberäkningen med avseende på maxnivåer, vattenhastigheter och varaktigheter för de lägen där skadeobjekten finns. En hydraulisk modell ger tillsammans med en detaljerad terrängmodell möjlighet att ta fram mer data än de som redovisas i beredskapsprojekten. Vattendjupet vid skadeobjekten behöver karteras eftersom det tillsammans med vattenhastighet är en viktig faktor som avgör om fara för människoliv kan tänkas uppstå. Vattenutbredningsskikt kan tillsammans med en terrängmodell användas för att framställa djupdata. Terrängmodellen bör då ha liknande upplösning som använts då vattenutbredningsskiktet framställts. De fel i höjdded som finns i terrängmodellen behöver beaktas i detta sammanhang. Vattenhastigheten beräknas i 1D-modeller som en funktion av flödet och den vattenförande arean, vilket medför att vattenhastigheten överskattas längs stränder och underskattas i mitten av älvsfåran.

## 7.1 VATTENUTBREDNINGSSKIKT

För beräknade scenarier tas vattenutbredningsskikt fram, se exempel i Figur 14. Skikten visar den maximala utbredningen vid respektive scenario. Ett vattenutbredningsskikt skapas genom att beräknade maxvattennivåer interpoleras med hjälp av en terrängmodell. Noggrannheten i karteringen beror på hur densiteten av mätpunkter från skanningen tillvaratagits i terrängmodellens raster. En lämplig upplösning på terrängmodellen väljs alltså i förhållande till antalet mätpunkter per m<sup>2</sup> som skannats och storleken på det område som utbredningsskikt ska tas fram för. Idag finns detaljerad laserskannad markdata tillgänglig över nästan hela landet (Lantmäteriets ambition är att hela landet ska vara skannat under 2015). Nationella höjddata "2m+" har en noggrannhet på ±0,1-0,2 m där en flackare terräng generellt har en större noggrannhet och en brantare lite mindre. De laserskanningsmätningar som utförts inom ramen för beredskapsprojekten håller i stort samma noggrannhet. För större älvmråden har laserskanningsdata i regel bearbetats om till en upplösning på terrängmodellen om 5 m. För kortare älvar har en högre (2 m eller 2,5 m) upplösning kunnat användas. I något fall har en upplösning om 10 m valts för vissa sträckor i obebodda områden av mindre intresse för beredskapsplanering.

Utifrån samtliga beräknade dammhaveriscenarier har sedan ett maxvattenutbredningsskikt skapats för hela älven som visar den maximala utbredningen vid varje enskilt punkt.

Vattenutbredningsskikten har inkluderats i GIS-viewern som vektordata (polygoner).

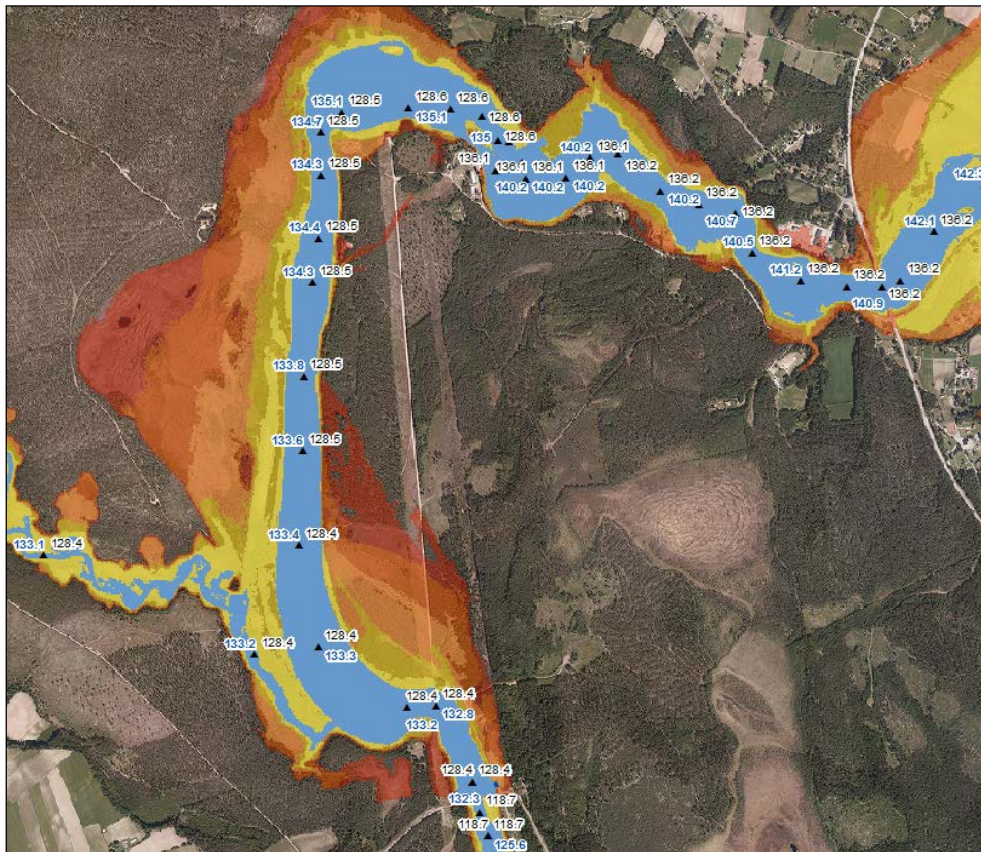


**Figur 14.** Exempel på vattenutbredningsskikt. De olika färgerna representerar olika flödes- och dammaveriscenarier. Normalnivå för älven visas i blått medan högflöden och dammaveriflöden visas i gula och röda färger.



## 7.2 VATTENNIVÅER I BERÄKNINGSSEKTIONER

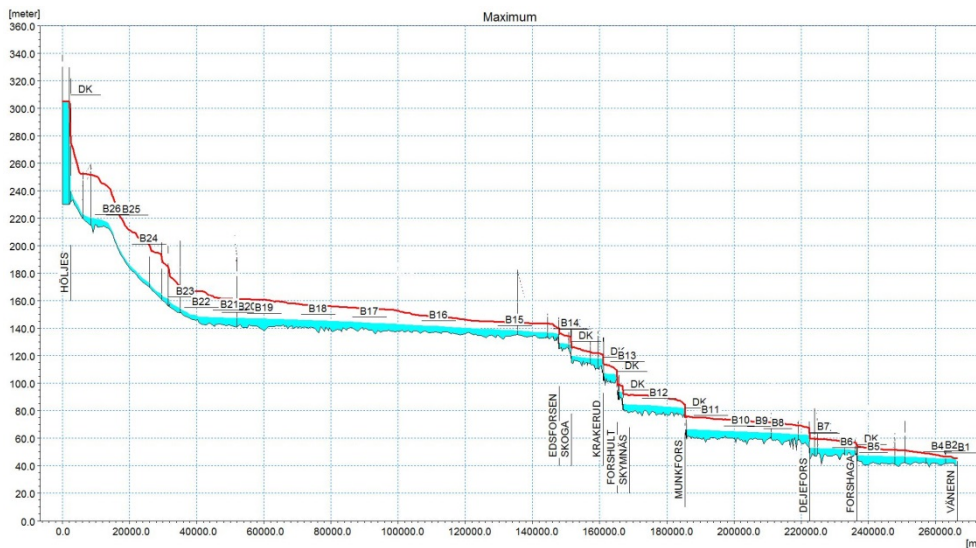
I varje tvärsektion i den hydrauliska modellen beräknas vattennivåer. Beräkningssektionerna visas i GIS-viewern i form av ett punktskikt med beräknade maximala nivåer för de olika beräkningsscenarierna som attribut till den geografiska lägesbeskrivningen. Maximala nivåer redovisas med färgkodade etiketter där varje beräkningsscenario har en egen färg, se exempel i Figur 15. Ett punktskikt med sammanlagda maximala vattennivåer för hela älven visas i ett maxvattenutbredningsskikt.



Figur 15. Exempel på hur vattennivåer i beräkningssektionerna redovisas i GIS-viewern.

### 7.3 VATTENSTÅNSPROFILER

Vattenståndsprofiler som visar normalvattenytan samt den maximala vattennivån vid dammhaseri finns på översiktskartan i beredskapsplaneringsunderlagen. Ungefärliga nivåer för broarnas underkant samt dammarnas läge och krönnivå finns markerade i profilerna. Ett exempel på en vattenståndsprofil redovisas i Figur 16.



Figur 16. Exempel på vattenståndsprofil. Röd linje markerar den maximala vattennivån.

### 7.4 KARTMATERIAL

Kartmaterial i olika skalor och med varierande bakgrund ger information om vattnets utbredning och nivå jämfört med den omgivande terrängen. På kartorna visas i plan hur samhällen, hus, vägar och andra anläggningar kan komma att påverkas av vattnet. Terrängkartan och fastighetskartan är två vanliga kartor som används till bakgrund för vattenutbredningsskikten men även ortofoton används. I beredskapsunderlagen finns en översiktskarta för hela älvsystemet och detaljkartor för utvalda samhällen längs älven. I konsekvensutredningar kan kartor ingå där skadeobjektens lägen refererar till beskrivningar och fotografier.

#### 7.4.1 Översiktskarta

Översiktskartan beskriver den maximala vattenutbredningen med samtliga modelleringsscenarioer kombinerade och innehåller:

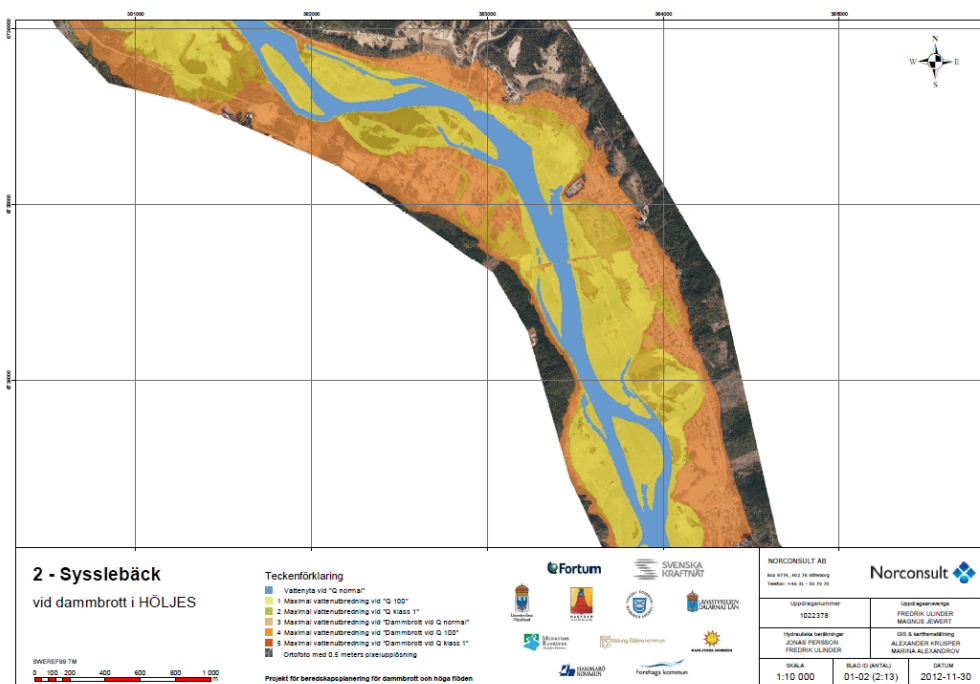
- Profil med normal och maximal vattennivå längs älven samt lägen och nivåer för broar och dammkrön.
- Plan med vattenutbredningsskikt för normal- och maxflöde. Vattenutbredningsskikten är transparenta och ligger ovanpå ortofoton. I planen visas också läge för broar och dammar samt gränser för områden som visas i detaljkartor.
- Beskrivning av modelleringsscenarioer.

Översiktskartan redovisas i beredskapsplaneringsunderlagen både i PDF-format på digitalt media och som färgutskrift i format A0. Skalorna varierar mellan älvarna mellan skala 1: 175 000 - 1: 300 000.

### 7.4.2 Detaljkartor

Detaljkartor över tätorter och samhällen längs älven redovisas som PDF-filer i formatet A2 med en skala 1:10 000. Detaljkartorna innehåller vattenutbredningsskikt för samtliga modelleringsscenarioer för en aktuell damm med ortofoton som bakgrund. Områden med detaljkarta markeras med röd rektangel i översiktsskartan. PDF-filerna är i några fall länkade till GIS-viewern.

Ett exempel på en detaljkarta presenteras i Figur 17.



Figur 17. Exempel på en detaljkarta.



## 7.5 TABELLSAMMANSTÄLLNING

Tabeller med sammanställning över flodvågens egenskaper vid olika punkter i älven redovisas i ett separat dokument. Respektive damms tabellsammanställning inleds med en kortfattad övergripande beskrivning av flodvågens egenskaper i älvdalen och särskilda förhållanden som har betydelse för flodvågens utbredning. För respektive damm redovisas även en tabell över vilka sekundärt dammhaveri de olika flödesscenarierna bedöms resultera i. I en annan tabell sammanfattas resultat av beräkningssimuleringen med längd vid krön på brottöppningen, vilken nivå botten på öppningen får samt vilka maxflöden som beräknats nedströms dammen. Därefter följer fler tabeller över flodvågens egenskaper (se uppgifter nedan) i nedströms utvalda punkter som påverkas av flodvågen.

Tabellerna innehåller följande uppgifter om flodvågen:

<b>Ankomsttid</b>	Tiden från att dammhaveriet konstateras tills att vattennivån börjar stiga vid en given punkt nedströms.
<b>Kulmination</b>	Tiden från att dammhaveriet konstateras tills att vattennivån når sitt maximum vid en given punkt nedströms.
<b>Varaktighet</b>	Tiden från att vattenytan börjar stiga vid en given punkt tills att flodvågen har passerat.
<b>Maximalt flöde</b>	[m <sup>3</sup> /s]
<b>Maximal vattenhastighet</b>	[m/s]
<b>Maximal vattennivå</b>	[m]

## 8 Erfarenheter

**Detta kapitel beskriver särskilda erfarenheter som finns dels från dammhaveriberäkningar och översvämningskartering med större sammanhängande modeller över älvar i beredskapsplaneringsprojekten och dels från utredningar av enskilda dammar. Vidare beskrivs även övergripande resonemang kring särskilda moment och beräkningsförutsättningar som har använts i beredskapsplaneringsprojekten i syfte att öka förståelsen för vilka osäkerheter som finns i relation till hur underlaget kan användas.**

### 8.1 SAMORDNAD BEREDSKAPSPLANERING

Underlag för samordnad beredskapsplanering har tagits fram för Sveriges 10 största älvar under åren 2006-2015. Underlag finns framtaget för Luleälven, Skellefteälven, Umeälven, Ångermanälven, Indalsälven, Ljungan, Ljusnan, Dalälven, Klarälven och Göta älv. Dessutom har underlag tagits fram för Lagan, som representerar ett av de mindre sydligare vattendragen. Arbetet har finansierats av berörda dammägare tillsammans med Svenska Kraftnät. Dessa aktörer har ingått i en arbetsgrupp för projekten tillsammans med länsstyrelse och kommuner som samtliga förfogar över det framtagna underlaget. Beräkningar och sammanställning av resultat har utförts av konsulter. Tabell 1 visar en översikt av älvarna.

Som utgångspunkt för metodiken i projekten har Pilotprojekt Ljusnan [3] använts. Därefter har anpassningar gjorts utifrån lokala förutsättningar i varje älv samt anläggningsspecifik information från respektive dammägare. Antaganden och modellparametrar för beräkningarna i respektive älv diskuteras övergripande här. I de fall det finns variationer mellan de olika älvarna förs ett resonemang kring betydelsen av dessa. Arbetet har i princip följt den arbetsgång som presenteras i denna rapport. Pilotprojekt Ljusnan slutrapporterades i januari 2006. Efter att flera projekt utförts i ytterligare några älvar gjordes en uppföljning och uppdatering av metodbeskrivningen. Uppdateringen syftade främst till att fånga upp teknikutveckling som skett och nå en ökad enhetlighet i arbetet med beredskapsplanering och slutrapporterades i februari 2011 [4].

**Tabell 1.** Vattendrag för vilka underlag för samordnad beredskapsplanering tagits fram under åren 2006-2015.

Vattendrag	Årtal	Beställare	Konsult	Antal PDH* / (SDH**)	Antal PDH* i fyllningsdamm	Antal PDH* i betongdamm	Total sträcka i modellen
Ljusnan	2006 (2014)	Ljusnans VRF	Vattenfall Power Consultant (Sweco)	11 / (2)	11 / 15	0 / 8	469 km (728 km)
Göta älv	2008	Vattenfall	Vattenfall Power Consultant	18 / (0)	10	8	325 km
Ljungan	2009	Ljungans VRF	WSP	18 / (-)	16	2	300 km
Luleälven	2010	Vattenfall	Vattenfall Power Consultant	16 / (0)	16	0	818 km
Dalälven	2011	Dalälvens VRF	Grontmij/ Vattenfall Power Consultant/Norconsult	22 / (15)	20	2	830 km
Indalsälven	2012	Indalsälvens VRF	WSP	36 / (-)	26	10	500 km
Klarälven	2012	Fortum	Norconsult	29 / (10)	28	1	650 km
Skellefteälven	2012	Skellefteälvens VRF	Sweco	24 / (2)	22	2	554 km
Lagan	2013	Statkraft	Sweco	14 / (4)	11	3	320 km
Umeälven	2015	Umeälvens VRF	WSP	22 / (1)	17	5	500 km
Ångermanälven	2015	Ångermanälvens VRF	WSP	50 / (3)	43	7	1000 km
<b>Totalt</b>				<b>272 / (37)</b>	<b>224 (82%)</b>	<b>48 (18%)</b>	<b>6525 km</b>

\*PDH = Primärt dammhaveri, \*\*SDH = Dammar där endast sekundärt dammhaveri beräknats.

### 8.1.1 Behovsanalys för samordnad beredskapsplanering

I uppstartsfasen av projekten har en behovsanalys utförts för att bestämma vilka delar av älven samt vilka dammanläggningar och dammar som ska ingå. Oftast har dammar i konsekvensklass 1+, 1 och 2 valts ut för analys av primärhaveri. I vissa särskilda fall har även dammar i konsekvensklass 3 räknats. När det gäller dominoeffekter i nedströms liggande dammar har utgångsläget oftast varit att samtliga dammar nedströms ingår. Ett aktivt val har sedan gjorts av vilka dammenheter som ska ingå och vilken konfiguration av sekundärhaveri som är relevanta att analysera för anläggningar med flera fyllnings- och betongdammar med olika krönnivåer. Dammhaveri i olika dammar inom en dammanläggning kan även ge utflöde av vatten åt olika håll och även utanför vattendragets huvudfåra vilket beaktas särskilt i det inledande skedet med behovsanalys.

### 8.1.2 Underlag och platsbesök

Underlag för beredskapsprojekten har sammanställts av dammägarna och överlämnats till konsulten. Erfarenheter är att detta kan bli ett tidsödande moment och att det är viktigt att tidigt klargöra vilken dokumentation som är relevant.

Utifrån ritningsunderlag, tidigare kända svagheter på dammar samt rådande förhållanden vid de givna beräkningsscenarierna har en analys av tänkbara förlopp och värsta scenarier gjorts tillsammans med dammtekniskt sakkunnig. Dessutom har platsbesök gjorts vid alla anläggningar i samtliga projekt. Ljusnan inventerades inte som en del i det första pilotprojektet men där har platsbesök genomförts under 2014/2015 års uppdatering av beräkningarna. Som nämnts tidigare bedöms platsbesöket vara en viktig del i analysen av de värsta scenarierna för dammhaveri.

#### *Avbördning*

Avbördningskurvor för fullt öppna utskov har konstruerats utifrån tillgängliga uppgifter, oftast avbördningen vid dämningssgräns och dammkrön, tillsammans med uppgifter om utskovens dimensioner och egenskaper. Underlag innefattar företagsinterna sammanställningar, utdrag ur dammregister, samt ritningar. I vissa fall har avbördningskurvor erhållits av dammägarna.

#### *Flödesuppgifter och hydrologiska data*

Underlag för de flöden som används i modellen kan komma från kraftindustrins dammregister, SMHI eller vattenregleringsföretag. Som normalflöde har utbyggnadsvattenföring eller, där denna ligger långt över det flöde som normalt går i älven, medelvattenföring (MQ) använts. En erfarenhet från de stora älvarna är att 100-årsflöden kan skilja sig mycket mellan olika källor. Detta beror främst på att flödena är framtagna från tidsserier av olika längd och med olika metodik för frekvensanalys. Klass I-flöden finns framtaget för de flesta anläggningar i de stora älvarna och för mindre vattendrag där dammar i konsekvensklass 1 enligt RIDAS är belägna.

### *Terrängmodellering*

För beredskapsprojekten har sammanhängande terrängmodeller tagits fram för hela det område som kan påverkas av vattenutbredningen. Terrängmodellen är uppbyggd av två delar:

- en markmodell skapad av markklassad data från flygburen laserskanning.
- en bottenmodell med underlag från tillgängliga data och tolkning av bottentopografin.

Markmodellen och djupmodellen har skapats genom triangulering eller rasteranalys av bearbetat laserdata och bottendata. De sammanfogas till en sammanhängande terrängmodell med strandlinjen som begränsningslinje. Den sammanhängande modellen består av ett raster-dataset (Esri GRID-format) med 2-5 meters upplösning (i något fall 10 m i vissa områden).

Terrängmodellen av markytan har byggts upp av laserskannade punkter från 2 000 - 2 300 m flyghöjd med en täckning som motsvarar 0,3-0,5 punkter/m<sup>2</sup>. Den framtagna markmodellens medelavvikelse i höjd understiger gränsvärdet 0,5 m.

För bottenmodellerna har befintliga ekolodningar och analoga djupkartor använts. De flesta uppgifterna är digitaliserade och inskannade (punkter och linjer har lagrats digitalt med höjdvärden). Utöver djupkartor har bottenprofiler från exempelvis brorritningar och dammritningar använts. Om inget transformerbart koordinatsystem funnits angivet har överföring gjorts genom inpassning mot strandlinjer eller andra definierbara objekt. De digitaliserade djupen har omräknats till gällande höjdsystem. För de områden av älven där underlag för djupdata saknas har nivåerna i modellen anpassats till anslutande delar med djupdata samt ytterligare tolkning med stöd av ortofoton, den omgivande terrängens lutning, mm. Tillgången och kvaliteten på underlag varierar mycket mellan och inom vattendragen. I Göta älv och Klarälvens huvudfåra kommer 100 % från ekolodningar medan det i andra vattendrag kan vara under 10 %. Där är det främst magasin som täcks in av djupkurvor från gamla sjökort och kartor. För älvsträckor har tillgången på underlag generellt varit mindre. I uppbyggnad av bottenmodellen har särskild vikt lagts vid att fånga upp och beskriva trånga sektioner. Dessa har därför studerats i samband med platsbesök och i några fall har särskilda inmätningar gjorts i samband med beredskapsprojekten.

Framtagandet av terrängmodellen och ingående data etc. har dokumenterats i en teknisk rapport. För några älvar har ett GIS-skikt eller kartbild tagits fram där det framgår vilken typ av bottendata som använts i olika delar av modellen. Detta är ett bra underlag för att bedöma var osäkerheter kan finnas och eventuella förbättringar kan göras vid en uppdatering av modellen.

### *Konvertering av höjdsystem*

Projekten har utförts i RH00 (2 st.), RH70 (8 st.) eller RH2000 (1 st.). I dammritningar och övrigt dataunderlag anges ofta nivåer i RH00 eller SMHIs höjdsystem. För konvertering till det höjdsystem som skall användas har närliggande geodetiska punkter från Lantmäteriet använts som referens samt inmätningar utförda av dammägare.

Avvägningen som ligger till grund för höjdsystemet RH00 har dålig täckning och kvalitet [5]. Det finns därför en viss osäkerhet både i konverteringen till RH70 och även i höjdangivelsen i sig. Höjdsystem som utgår från domfixar kan betraktas som lokala

och kan ligga både under och över RH00. Beredskapsprojekten har i flera fall lett till att dammägare genomfört inmätningar för att förankra dammanläggningen till ett nationellt höjdsystem.

Det är svårt att bedöma vad de eventuella avvikelserna har för betydelse för resultatet av dammhaverisimuleringarna. Om dammen hamnar för högt relativt terrängen överskattas den indämnda volymen och därmed även beräknade vattennivåer vid dammhaveri. För samma damm underskattas risken för sekundärt dammhaveri. Om en damm ligger för lågt i förhållande till terrängen underskattas den indämnda volymen men risken för sekundärt dammhaveri överskattas.

### 8.1.3 Bestämning av brottmod, läge och begränsande sektion

De dammhaveriberäkningar som utförts inom beredskapsprojekten har utgått från att primärt dammhaveri ansatts i den dammenhet som bedöms ge störst utflöde. Ofta är detta den högsta dammenheten vid anläggningen men i vissa fall kan en lägre damm med betydande längd ge större dammhaveriflöde. Om dammhaveri antas ske till följd av överströmning ansätts dammhaveri i den dammenhet som har lägst krönnivå i de fall olika krönnivåer förekommer. Begränsande sektion för utflödet av vatten har valts ut av konsult i samråd med respektive dammägare.

#### *Betongdammar*

Primärt dammhaveri har ansatts i betongdammar för 48 av de ingående dammanläggningarna. Betongdammar har delats upp i olika typer för vilka antagandena skiljer sig något åt. För gravitations-, massiv- och lamelldammar har antagits att de 1-3 högsta monoliterna stjälp/er/glider. För valvdammar har antagits en total kollaps. Vissa dammanläggningar är byggda så att ett haveri av utskoven ger det största utflödet, särskilt vid lägre flöden då luckorna inte redan är öppna. I några fall har en pelare mellan två utskovsluckor antagits ge vika så att två luckor havererar. Det förekommer även att utskovströskeln, skibordet i sig, antas kollapsa och ta med sig luckan men inte pelarna. I Göta älvs beredskapsprojekt ingick ett haveri för var och en av slussarna vid Brinkebergskulle, Trollhättan och Lilla Edet. I scenariot för slushhaveriet antogs slussportarna tryckas upp av ett fartyg på drift.

#### *Fyllningsdammar*

Haveri i fyllningsdamm är den vanligast ansatta haveritypen i beredskapsprojekten för de stora älvarna. I Skellefteälvens beredskapsprojekt ingick även gruvdammar vid Hötjärnsmagasinet i Boliden. Den högsta dammen som beräknats (Trängslet) har en höjd på 125 m från krön till grundläggning och för den lägsta är dammhöjden 1,5 m (Ämtan).

Dammhaveri i jord- och stenfyllningsdammar antas i beräkningarna initieras genom inre erosion eller överströmning. I fyllningsdammar med tätspont eller betongskärm har inre erosion och sjunkhål antagits kunna uppstå även för de beräkningsscenarioer där vattenytan inte stiger över spanten.

Dammhaveri till följd av överströmning initieras generellt då vattenytan når dammkrön både för primärt och sekundärt dammhaveri. I de fall det förekommer betongdammar med lägre krön än anslutande fyllningsdammar antas erosion ske i nivå med betongdamm eller då vattenytan når en viss nivå över krönet på anslutningen.

Generellt har den valda dammenhetens hela längd tillåtits haverera och begränsning i sidled har utgjorts av anslutande betongdelar eller naturlig mark. I de flesta fall har grundläggningsdjup använts som begränsande för djupet. För dammar grundlagda på morän förekommer även att erosionen tillåtits fortskrida ner till berg eller en bit ner i undergrunden. Undantag har även gjorts med hänsyn till om naturlig mark uppströms och/eller nedströms är av stor mäktighet.

#### *Brottöppningens utveckling*

För betongdammar har en tidsstyrd dammhaveriutveckling ansatts. Tiden det tar för haveriet att utvecklas fullt har angetts till 10 sek. - 15 min. i de olika älvarna. Variationen beror främst på vad som har krävts för att inte få instabiliteter i beräkningen. Den dammenhet som beräknats haverera finns inte kvar som en begränsning i strömfåran.

För fyllningsdammar har en erosionsbaserad metod använts för dammhaveriutvecklingen. Metoden innebär att tidsförloppet beräknas i en hydraulisk modell utifrån vattenhastigheten i brottöppningen och materialparametrar för dammens fyllningsmaterial. Erosionen avstannar när en på förhand bestämd begränsande sektion nås alternativt när magasinet är tömt eller förutsättningarna för betydande materialtransport inte längre finns. Inre erosionsbrott har i alla älvar utom Ljusnan behandlats som överströmningsbrott till följd av sjunkhål i krönet. Detta innebär att den initiala öppningen kan vara flera meter djup räknat från dammkrön, dock oftast med en bredd om 0,5 m.

Parametrarna ansätts som ett värde för hela dammkroppen vilket innebär förenklingar av faktiska förhållanden där olika material och olika slänflutningar etc. kan förekomma på olika delar av en damm. Dammens material antas i beräkningarna representera dammens tätjord (morän/sand/jord). Stödfyllning som utgörs av sprängsten o.d. förenklas således såsom mer finkorniga material.

Det har förekommit små variationer i parametrarna för materialegenskaper såsom kornstorlek, porositet och skjuvspänning mellan jord-och stenfyllningsdammar inom en älv och viss variation mellan olika älvar. Erfarenheten är då kornstorleken ansätts större än 0,01 m så kommer i de flesta fall inte erosionen igång. När dammhaveriet väl kommit igång har ingående värden en viss betydelse för hur snabbt utvecklingen sker och därmed även på maxflödet.

Förutom materialparametrarna anges ett antal parametrar som styr bräschens utveckling i sid- och djupled (bräschens antas vara trapetsoidformad i beräkningen). Det finns en viss variation i hur förhållandet mellan utvecklingen nedåt och i sidled har angetts inom de olika älvarna. Ju brantare sidlutning desto snabbare utvecklas haveriet i djupled och desto högre blir maxflödet. En brantare lutning bedöms bäst motsvara det utseende och utveckling som studerats vid de norska dammhaveriförsöken [6].

## 8.1.4 Beräkning av dammhaveriflöde

*Hydrologiska förutsättningar/flöden och vattenstånd*

Totalt har upp till sex olika scenarier simulerats inom ramen för beredskapsplaneringsprojekten, samma scenarier som i Pilotprojekt Ljusnan [3]. Samtliga scenarier beskrivs i Tabell 2.

**Tabell 2.** Scenarier som beräknats inom beredskapsplaneringsprojekten.

Scenario	Beskrivning
Normalflöde	Flödena motsvarar normala produktionsförhållanden i älven. Vattenstånden längs älven är normala.
100-årsflöde	Flödena i älven motsvarar beräknade 100-årsflöden, vilket i många fall är i nivå med vad som hittills uppmätts. Översvämningar inträffar på sina ställen längs älven.
Klass I-flöde	Flödena i älven motsvarar beräknade klass I-flöden. Dessa flöden är avsevärt högre än vad som hittills har uppmätts och leder till omfattande översvämningar längs stora delar av älven.
Dammhaveri vid normalflöde	Dammhaveri inträffar vid normala förhållanden. Dammhaveriet antas bero på inre erosion, läckage eller liknande genom den dammenhet vid anläggningen som kan ge störst konsekvenser.
Dammhaveri vid 100-årsflöde	Dammhaveri inträffar i samband med flöden motsvarande 100-årsflöde. Dammhaveriet antas bero på inre erosion, läckage eller liknande genom den dammenhet vid anläggningen som kan ge störst konsekvenser.
Dammhaveri vid klass I-flöde	Dammhaveri inträffar i samband med flöden motsvarande klass I-flöde. Dammhaveriet antas antingen bero på överströmning eller, om dammen inte överströmmas, inre erosion, läckage eller liknande genom den dammenhet vid anläggningen som kan ge störst konsekvenser.

Både normalflöden och 100-årsflöden antas vara konstanta under så lång tid att stationära förhållanden hinner etableras, det vill säga att avbördningen från ett magasin blir lika stor som tillrinningen. Detta innebär att flöden ökar nedströms åt i vattendragen. Det förekommer specialfall där större dämpningar sker i magasin och flöden därmed minskar nedströms. Det förekommer också att summan av 100-årsflödet i biflöden med olika flödeskaraktäristik överstiger det sammanlagda 100-årsflödet i huvudfåran. Detta har i förekommande fall hanterats genom att eventuellt överskott "dras bort" från modellberäkningen i den punkt där sammanslagning sker så att det statistiska 100-årsflödet nedströms en förgrening blir korrekt.

Klass I-flödet läggs in som en hydrograf i magasinet uppströms anläggningen. I beräkningar med klass I-flöden skiljer sig antaganden om flöden i övriga delar av älven åt. Basflöde vid klass I-flöde är antingen MHQ (6 av 11 älvar) eller 100-årsflöde (5 av 11 älvar). Båda antagandena är rimliga, vilket som är det mest passande att använda beror av karaktäristiken i respektive vattendrag. Älvar med betydande biflöden måste beaktas särskilt.

Det finns olika alternativ för hur ett värsta scenario vid klass I-flöde har beräknats. I tre älvar har dammhaveri initierats vid dimensionerande nivå, det vill säga den nivå som krävs för att avbörda klass I-tillrinningen utan störningar. För vissa fjällmagasin har dammhaveri vid klass I-flöde beräknats vid förväntad högsta nivå vid tidpunkt på året för dimensionerande tillfälle. Det kan innebära att magasinet ligger under dämpningsgräns för detta scenario om dimensionerande tillfälle är på våren eller sommaren. Om klass I-flöde inte kan avbördas utan överströmning initieras



dammhaveri vid dammkrön för fyllningsdammar eller för betongdammar vid den nivå där flödet kulminerar.

För flera älvar har ett värsta scenario för dammhaveri vid klass I-flöde beräknats med nedsatt avbördningskapacitet så att en högre magasinsnivå och eventuell överströmning fås. Detta scenario har beslutats i samråd mellan dammägare och konsult. En princip som tillämpats i många fall är att i magasin med snabb stighastighet och risk för igensättning av utskov med drivgods sätts avbördningskapacitet ner proportionellt så att flödet kulminerar vid den nivå där dammen antagits haverera på grund av överströmning (oftast dammkrön). Om magasinet har en mycket långsam stighastighet och liten sannolikhet för igensättning av drivgods så sätts avbördningskapaciteten ned med N-1 och dammhaveri initieras vid den nivå där flödet kulminerar eller som högst vid den nivå där dammen antas haverera p.g.a. överströmning (oftast dammkrön).

För några älvar har två scenarion (med och utan nedsättning av avbördningskapacitet) redovisats för dammhaveri vid klass I-flöde.

#### *Magasinsvolym*

För dammar vars magasin ligger inom den framtagna terrängmodellen består magasinsvolymen av den volym som beskrivs av uppströms liggande tvärsektioner. Denna kontrolleras mot magasinvolym angiven i dammregistret eller annat underlag. För uppströmsmagasin som inte täcks in av terrängmodellen har volymkurvor, som beskriver magasinvolym under DG, uppskattats från magasinstabeller, kartmaterial och magasinsvolymer i dammregistret och lagts in som "additional storage area". Det är mycket viktigt att kontrollera denna då det kan få stor betydelse för konsekvenserna nedströms om dammen.

#### 8.1.5 Beräkning av dammhaveriflödets utbredning nedströms

I dessa projekt har det varit en förutsättning att en hydraulisk modell används eftersom hela älvsystemet ska studeras och för detta har den hydrodynamiska 1D-modellen MIKE11 använts. Tvärsektioner har digitaliserats längs älvsträckorna med mellan 10 och 1500 m avstånd, med ett medelavstånd av ca 150-500 m.

I Klarälven, Lagan och Skellefteälven har i tillägg till 1D-modellen även en 2D-modell byggts upp. I de två första fallen för att se om tider för dammhaveriets förlopp påverkades om vattnet tilläts ta "raka vägen" på en meandrande sträcka, se Figur 11 tidigare. I det sista fallet för att kunna beskriva vattenutbredning nedströms där dammen inte ligger i en älvfåra.

#### *Randvillkor*

Nedströms randvillkor i havet är satt till medelvattenyta (MW) vid normalflöde och högsta högvattenyta (HHW) eller 100-årsnivå (HHW100) vid högre flöden. Då Väneren utgör randvillkor för Klarälven har nivån satts till högsta dämningssgräns i sjön. Karaktäristiska värden för havsvattenstånd är erhållna från SMHI. Erfarenheter från projekten är att havsvattenståndet är viktigt för att analysera konsekvenser av dammhaveri för dammen längst ner i vattendraget. Det är viktigt att använda aktuella värden justerade för landhöjning.

*Kalibrering*

På ett fåtal platser har peglar med mätdata (flöde och nivå) använts för kalibrering och beroende på regleringsgrad styrs olika stora delar även av magasinsnivåer vid olika avbördning. På flera sträckor saknas dock uppgifter. Kalibrering har därför även utförts för normalflödet utifrån ortofoto (kräver eg. att flödessituationen vid fototillfället är känd).

*Regleringsstrategier och avgränsningar*

Regleringsstrategier har för de flesta älvar i angetts i enlighet med reviderat Kapitel 3 i Ljusnanrapporten [3], vilket beskrivs i denna rapport Kapitel 6. Inom de beräknade älvarna förekommer dock undantag från dessa principer.. Det förekommer att luckor stängs i en damm som rasar och uppströms samt att samtliga luckor nedströms förblir i samma läge. Vid Porjus och Suorva i Luleälven samt Hornavan och Storavan i Skellefteälven tillämpas aktiv dämpning vid klass-I flöden. I två av vattendragen medräknas ingen stationstappning vid normalflöde. I vissa älvar antas broar spolats bort helt. Det är viktigt att dokumentera de regleringsstrategier som använts i beräkningarna för utskov och intag. Dokumenteringen medför en möjlighet att bedöma om uppdateringsbehov finns, t.ex. om s.k. dämningsskydd (KAS) byggs ut.

*Dominoeffekter/sekundärt dammhaveri*

Inom de beräkningar som utförts inom beredskapsprojekten har betongdammar generellt inte antagits gå till sekundärt dammhaveri men en bedömning görs från fall till fall utifrån aktuell dammtyp och förhållanden på plats.

För fyllningsdammar gäller att dammenhet med lägsta dammkrön antas haverera vid överströmning (generellt vid dammkrön). I de fall det förekommer betongdammar med lägre krön än anslutande fyllningsdammar antas erosion ske i ev. "oskyddade" anslutningar och dammhaveri har då initierats då vattenytan är 0-0,5 m över krönet på betongdammen.

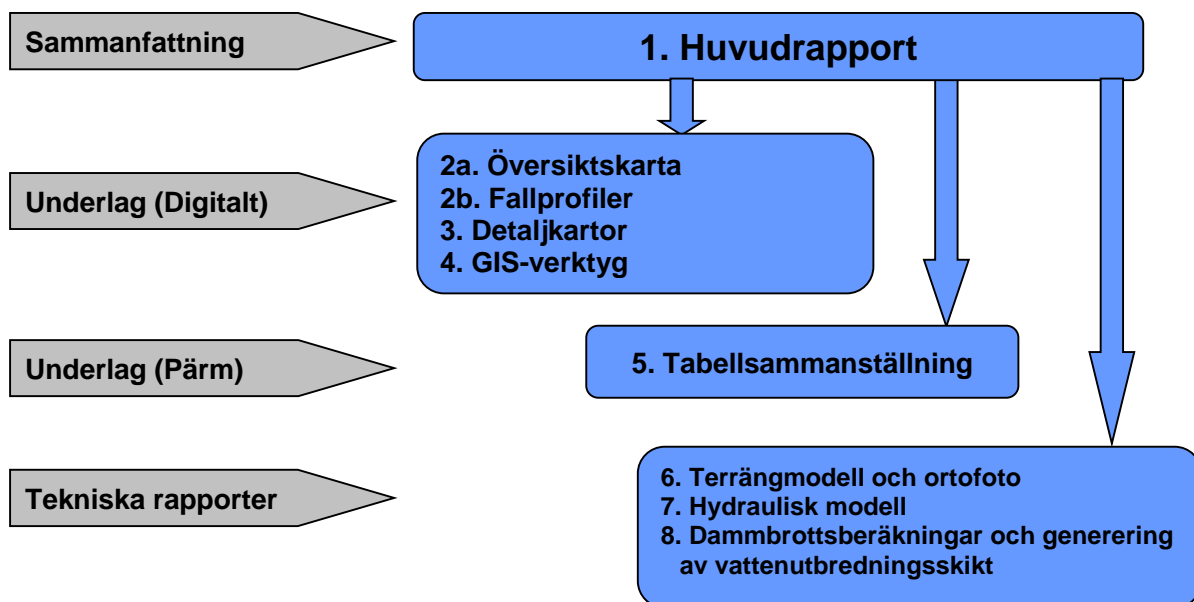
I några älvar antogs alla dammar med samma krönnivå havererar när vattenytan når dammkrön. I de flesta älvar har dock en prioriteringsordning införts så att första dammenhet havererar vid DK, andra vid DK+5 cm, tredje vid DK+10 cm etc.

*Översvämningskartering*

En erfarenhet från de stora sammanhängande älvarna är att MIKE11:s verktyg för att generera vattenutbredningsskikt inte alltid fungerat tillfredsställande. För att kunna ta fram översvämningskikt med erforderlig upplösning och kvalitet har de konsulter som arbetat med dessa projekt tagit fram egna GIS-baserade verktyg för detta. Det nya GIS-verktyget MIKE Hydro 2014 har dock medfört en hel del förbättringar av karteringsrutinen.

## 8.1.6 Redovisning av resultat

Resultatet av de hydrauliska beräkningarna består av vattenutbredningsskikt, vattennivåer i beräkningssektioner, vattenståndsprofiler och tabellsammanställning och redovisas på det sätt som beskrivits i Kapitel 7. Figur 18 beskriver strukturen hos det framtagna materialet.



Figur 18. Struktur i samordnad beredskapsplanering enligt i Ljusnanrapporten.

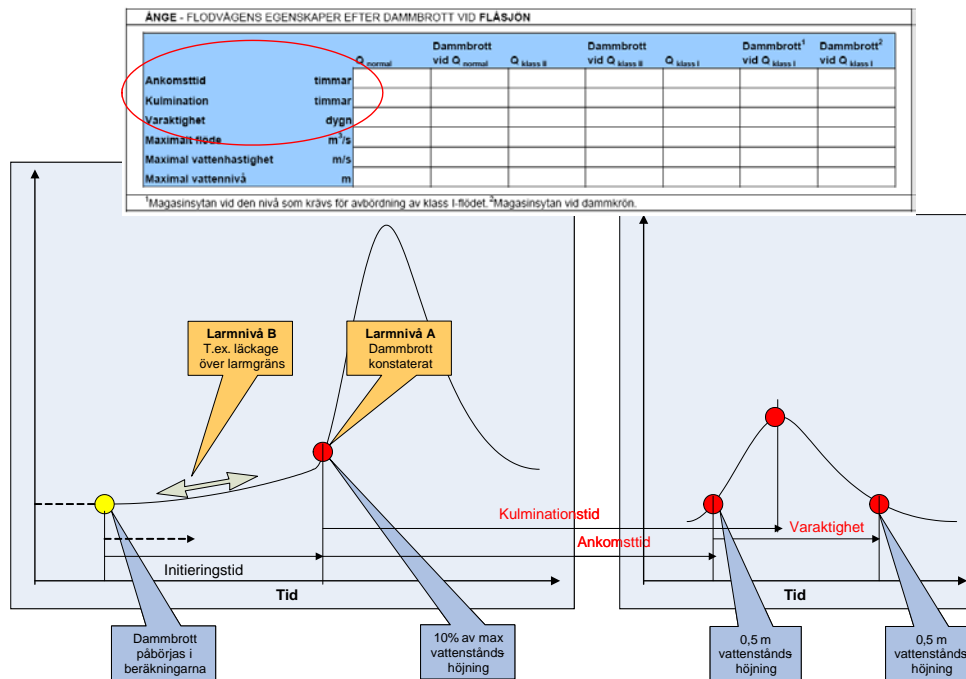
Förutom det underlag som beskrivits i kapitel 7 ingår en huvudrapport som syftar till att ge en översiktlig beskrivning av det underlag som tagits fram. Det tas även fram tekniska rapporter med detaljerade beskrivningar av de olika delarna. Dessa ingår inte i den officiella leveransen av underlaget men tillställs beställaren i form av arkiverat arbetsmaterial.

#### Tabellsammanställning

Tabellerna innehåller olika uppgifter om flodvågen. Ankomsttiden beräknas från två osäkra tidpunkter: tidpunkten när dammhaveriet konstateras och tidpunkten när vattennivån börjar stiga i en punkt nedströms, se Figur 19. Båda tidpunkterna har bedömts utifrån kurvor som beskriver vattenståndets utveckling. Definitionen av ankomsttid varierar inom de olika älvarna och flera skiljer sig från den definition som anges i rapporten för pilotprojekt Ljusnan, där flodvågens ankomsttid till en given plats nedströms räknas som tiden från att vattenytan omedelbart nedströms dammen har stigit 10 % av den totala stigningen tills att vattenytan har stigit 0,5 m vid den plats för vilken tiden skall beräknas. Både för de dammar som omedelbart nedströms ger en liten vattennivåhöjning (<1 m) och de som ger en mycket stor (>10 m) har det inte bedömts rimligt att använda 10 % vattennivåhöjning som starttid. Med anledning av detta har ankomsttiden istället utgått från när vattennivån nedströms det primära dammhaveriet ökat till en viss nivå (0,1-0,5 m över ursprunglig nivå).

Tidpunkten för ankomst till flodvågspunkter nedströms i systemet har bedömts utifrån när vattennivån vid varje punkt har stigit 0,2-0,5 m. Om vattennivåökningen till följd av det primära dammhaveriet inte ger en sådan ökning uppskattas ingen ankomsttid

för den flodvågspunkten. Det är viktigt att denna definition ger en rimlig marginal för när dammhaveriet kan antas upptäckas i förhållande till när vattnet börjar stiga vid nedströms belägna samhällen.



Figur 19. Definition av ankomsttid enligt reviderat kap 3 i Ljusnanrapporten.

I scenariot dammhaveri vid klass I-flöde innehåller flodvågen två överlagrade komponenter, en från klass I-sekvensen och en från dammhaveriflödet. Dessa kan inte på något enkelt sätt separeras. I detta fall har då ankomsttid och varaktighet uppskattats visuellt ur vattenståndskurvan, se Figur 20.



Figur 20. Vattennivåökning till följd av ett dammhaveri vid klass I-flöde. I grafen återfinns vattennivån på y-axeln och tiden på x-axeln.

## 8.2 KONSEKVENsutredningar

Vid konsekvensklassificering utreds konsekvenser av ett dammhaveri vid en anläggning vad gäller risk för människoliv vid t ex bostadshus, arbetsplatser eller trafikerade vägar. Dessutom beskrivs skador på ekonomiska och miljömässiga värden. Vattendjup och vattenhastighet är avgörande egenskaper hos översvämningar när risk för människoliv bedöms. Nedan beskrivs hur översvämningsskator tas fram för att användas som underlag för en konsekvensklassificering och hur en skadeinventering kan göras med hjälp av dessa.

### 8.2.1 Överväganden vid konsekvensklassificeringar

Dammhaveriberäkningar i syfte att utgöra underlag till konsekvensklassificeringar är en analys av hur dammhaveriet påverkar dammar, infrastruktur, bebyggelse, miljö etc. nedströms och hur människor kan komma att beröras. Vid konsekvensklassificering söks det dammhaveriscenario som ger störst konsekvenser. Sekundära dammhaverier på anläggningar nedströms är viktiga att analysera då även dessa effekter ska beaktas vid konsekvensklassificeringen. Eftersom flera antaganden ofta görs i dammhaveriberäkningar och betydande osäkerheter inte sällan finns kan det vara motiverat att genomföra en känslighetsanalys. Flera beräkningar genomförs då med olika antaganden för att på så sätt belysa hur antaganden inverkar på resultatet. Det kan t.ex. finnas osäkerheter i hur trånga sektioner påverkar flöden och nivåer eller hur en dammanläggning på vägen nedströms kan förväntas haverera och inverka på nivåerna vid ett visst skadeobjekt.

Resultat från dammhaveriberäkningar från beredskapsunderlagen kan användas för analyser och underlag till konsekvensklassificering av dammanläggningar. De flödesscenarier som dammhaveri beräknats för i beredskapsunderlagen motsvarar det värsta scenariot vid en dammanläggning då dammhaveri sker under normala driftförhållanden och vid höga flöden. Det finns således dammenheter för vilka dammhaveri inte beräknats i beredskapsprojekten. I vissa fall kan de utförda beräkningarna i beredskapsunderlagen användas som stöd för att konsekvensklassa andra dammenheter vid samma anläggning och för vissa fall kan beredskapsprojektets analys vara otillräcklig. Det kan även finnas anläggningsspecifika förutsättningar och situationer som är relevanta att beakta då en konsekvensklassificering ska utföras, t.ex. dammhaveri vid andra flöden än vad som räknats i beredskapsprojekten.

Kompletterande simuleringsberäkningar med den hydrauliska modellen kan då bli aktuellt att utföra. De hydrauliska modellerna i beredskapsunderlagen är inte alltid byggda i en skala som kan användas i konsekvensklassificeringssyfte då nivåer på vissa sträckor vid enskilda skadeobjekt kan bli missvisande. Modellerna kan då behöva förfinas genom att tvärsektioner läggs till eller att en viss sträcka kompletteras med en 2D-modell för att beskriva vattendjup och vattenhastighet inom ett översvämat område.

För majoriteten av dammanläggningarna i Sverige finns inget beredskapsunderlag och för många anläggningar finns inga genomförda dammhaveriberäkningar att utgå ifrån. För en del vattendrag finns hydrauliska modeller som kan användas om de utvecklas eller kompletteras med information om dammhaveri. Myndigheten för samhällsskydd och beredskap (MSB, tidigare Räddningsverket) har tagit fram hydrauliska modeller för översvämningsskartering av många vattendrag. I de äldre modellerna användes dock höjddata med stort medelfel varför resultat från dessa modeller måste användas med stor försiktighet. MSB uppdaterar nu modellerna med höjddata från nationella

höjddatabasen vilket gör att översvämningarnas utbredning får större tillförlitlighet. Erfarenheter från arbete med MSB:s modeller visar att modellerna måste kontrolleras så att dammarnas avbördningskapacitet är korrekt beskriven, hur broar är representerade i modellerna samt hur kalibreringen är gjord. Ingen information om dammanläggningarnas dammhaveriegenskaper finns i modellerna som alltså måste kompletteras med en beskrivning av dammhaveriet. Modellerna kan med beaktande av ovanstående beaktat användas för att beräkna dammhaveriutflödets utbredning.

### 8.2.2 Vattnets djup och hastighet

För anläggningar där ett haveri drabbar ett eller några enstaka skadeobjekt nära dammen kan en erfarenhetsbaserad metod (se Kapitel 6.1) eller beräkningar med handboksformler (6.2) användas som underlag till en konsekvensklassificering. Då bedöms eller beräknas vattenytan och vattenhastigheten vid skadeobjekten. I ett specialfall där skadeobjekten uteslutande ligger vid ett nedströmsmagasin och där magasinerna ligger nära varandra kan volymetrisk routing (6.3) användas. Med en hydraulisk modell (6.4) kan en vattenytprofil skapas där nivåer på skadeobjekt längs vattendraget läggs in. För anläggningar med mer långtgående påverkan används GIS-data med max-nivåer och vattenutbredning vilket tagits fram för anläggningar som ingår i beredskapsplaneringsunderlagen. Shape-filerna med hjälp av terrängmodellen kan även användas för att generera djupdata för översvämningen. Djupdata används sedan för att tolka vattendjupet vid de skadeobjekt som berörs. Den maximala vattenhastigheten tas fram som "additional results" i beredskapsunderlagen där den redovisas för utvalda punkter. Värden finns dock för samtliga tvärsektioner i den hydrauliska modellens resultatfiler. Med hjälp av data över vattendjup och vattenhastighet kan en jämförelse mot skadeobjekt göras.

### 8.2.3 Skadeinventering med GIS-analys

För konsekvensanalyser av haverier på större dammanläggningar, med översvämningar på en längre sträcka nedströms har en GIS-baserad analysmetod uppenbara fördelar. I analysen fastställs marginalskan genom att översvämningsskikten analyseras mot en skadedatabas i en så kallad "overlay"-operation. Skadedatabasen skapas från ett urval av geografisk information från fastighetskartan med bebyggelse, vägar och kraftledning, från länsstyrelsernas GIS-data för områden av riksintresse för friluftsliv, Natura 2000, naturvård och kulturmiljövård och för fritidsanläggningar som campingar och badplatser. Även andra data som lägen för ställverk används i analysen. GIS-analysen bygger på höjder i terrängmodellen och de träffar som erhålls i analysen för t.ex. bostadshus kan skilja sig från de faktiska bostadsplanen i husen. Bostadsplanets nivå bör mätas in om tveksamheter finns och om informationen är avgörande för resultatet. Vägbanornas höjd är väl representerad i terrängmodellen.

Några erfarenheter från att använda resultat från beredskapsunderlagen i konsekvensanalyser:

- Vattenhastigheten som beräknats med endimensionell modell är en medelhastighet för den studerade tvärsektionen och kan antas vara större i älvfåran och betydligt mindre på översvämningsskiktet där bostadshus och andra skadeobjekt är belägna. När risk för människoliv utvärderas ska därför en bedömning av hastighetsfördelningen i den studerade tvärsektionen göras.

- En "overlay"-analys av berörda riksintresseområden ger en indikation på hur stor del av området som kan komma att påverkas. Analysen måste kompletteras med en kvalitativ bedömning som utgår från vilken typ av riksintresse som berörs och graden av skada som kan förväntas.
- I fastighetskartan är inte alltid hus med samhällsfunktion rätt kodade. Det bör verifieras vilken funktion sådana hus har.
- Kraftledningars sträckning finns i fastighetskartan men inte stolplägen. Om störningar i elförsörjning ska bedömas kan analysen kompletteras genom studier av flygbilder och fältbesök.
- Viktiga samhällsfunktioner såsom sjukhus och vatten- och reningsverk och viktig infrastruktur såsom broar, som kan påverka allmänna kommunikationer och leda till att områden isoleras, studeras särskilt under fältbesök.

En metod för att identifiera och kartlägga objekt och verksamheter som kan påverkas av dammhaveri eller översvämningar togs fram i ett Elforsk-projekt [5]. I metodiken beskrivs olika aktörers behov, ansvar och roller med avseende på identifiering och kartläggning av konsekvenser av höga flöden och dammhaverier. Ett 60-tal geodataskikt från Lantmäteriet, länsstyrelserna, Trafikverket och Naturvårdsverket m.fl. analyseras med avseende på dammhaveriets inverkan på människor, samhällsviktig verksamhet och miljö. Metoden har testats för pilotanläggningar i de större kraftverksälvarna där beredskapsplanering genomförts. GIS-data från beredskapsplaneringsunderlagen har använts som underlag. Resultaten med metoden utgörs av tabeller och kartor som visar antalet berörda människor och skadeobjekt inom rutor om 250×250 m.



## 9 Referenser

- [1] Svenska Kraftnät, Svensk Energi och SveMin, 2015. Riktlinjer för bestämning av dimensionerande flöden för dammanläggningar. Nyutgåva 2015.
- [2] DHI, 2014. MIKE 11, A modelling system for rivers and channels: rivers and channels: Reference Manual. Hørsholm, Danmark: DHI
- [3] Elforsk, 2006. Beredskapsplanering för dammbrott – Ett pilotprojekt i Ljusnan. Elforsk rapport 05:38, 2006, samt reviderat avsnitt 3.1 och 3.2, daterad 2011-02-03
- [4] Elforsk, 2011. Beredskapsplanering för dammbrott – Ett pilotprojekt i Ljusnan. Elforsk rapport 05:38, samt reviderat avsnitt 3.1 och 3.2, daterad 2011-02-03
- [5] Elforsk, 2014. Metod för identifiering och kartläggning av objekt som kan påverkas av dammhaveri. Elforsk rapport 14:55. Elforsk rapport 14:55
- [6] Energi Norge, 2005. DP2: Stabilitet og bruddforløp av dammer. Publikasjonsnr: 186-2005.
- [7] <http://www.lantmateriet.se/sv/Kartor-och-geografisk-information/GPS-och-geodetisk-matning/Referenssystem/Hojdsystem/>

# BERÄKNING AV DAMMHAVERI OCH ÖVERSVÄMNINGSKARTERING

Beräkningar av dammhaverier och karteringar av översvämningar är viktiga delar av arbetet med beredskapsplanering och med konsekvensutredningar för dammhaverier.

Rapporten innehåller en sammanställning av den metodik för dammhaveriberäkningar och översvämningsskarteringar som har utvecklats genom åren.

Arbetsgången som beskrivs kan tillämpas i beredskapsplanering. Den kan också tillämpas i konsekvensutredning som underlag för konsekvensklassificering enligt RIDAS eller som underlag för att bestämma dammsäkerhetsklass enligt 2 § förordning (2014:214) om dammsäkerhet.

## Ett nytt steg i energiforskningen

Energiforsk är en forsknings- och kunskapsorganisation som samlar stora delar av svensk forskning och utveckling om energi. Målet är att öka effektivitet och nyttiggörande av resultat inför framtida utmaningar inom energiområdet. Vi verkar inom ett antal forskningsområden, och tar fram kunskap om resurseffektiv energi i ett helhetsperspektiv – från källan, via omvandling och överföring till användning av energin. [www.energiforsk.se](http://www.energiforsk.se)