

Simulering av översvämningar i Byälven

Finn Midbøe
Håkan Persson

Referat

Simulering av översvämningar i Byälven

Finn Midbøe och Håkan Persson

Allvarliga översvämningar i samband med höstregn år 2000 väckte frågan om det går att vidta åtgärder för att minska skadorna vid höga flöden i området runt Glafs fjorden och längs Byälvens sträckning ner till Vänern. Ett alternativ är att med åtgärder längs älven underlätta vattnets utflöde och på så sätt minska den högsta vattennivå ett givet flöde orsakar. God kunskap om hydrauliska och hydrologiska förhållanden behövs för att bedöma nyttan av olika åtgärdsalternativ. För att kunna avgöra effekterna av olika åtgärdsalternativ har en 1-dimensionell strömningsmodell satts upp för Byälven i programverket *MIKE 11*. Modellen är mer detaljerad, framförallt beträffande höjdinformationen, än tidigare modeller som använts för studier av Byälven varit. Randvillkor till modellen utgörs av registrerade inflöden, Vänerns vattenstånd och avrinning modellerad med *HBV*-modellen. Modellen har kalibrerats för två översvämningssituationer och god anpassning uppnåddes för de vattenstånd som dessa situationer representerar och med dess hjälp har sedan älven studerats och områden som bromsar flödet har kunnat identifieras. Med kunskap om vilka områden som begränsar flödet mest har ett antal olika åtgärder simulerats i modellen, både var för sig och kombinerade med varandra. Randvillkoren för översvämningen år 2000 behölls och förändringarna lades in i modellen. De extremaste åtgärderna som simulerats resulterade i minskningar av de högsta vattennivåerna i de två största vattenmagasinen Glafs fjorden och Harefjorden med 78 respektive 97 cm. Mer realistiska åtgärdspaket gav minskningar med i storleksordningen 48 respektive 84 cm och även relativt små ingrepp gav minskningar på några decimeter. Simuleringsresultaten ger god vägledning för vidare undersökningar av och beslut om konkreta åtgärder i Byälven. Dessutom utgör modellen ett bra verktyg för att ta fram översvämningsskartor och för att prognostisera vattennivåer vid nya översvämningssituationer.

Nyckelord: *Byälven, Arvika, översvämning, ickestationär kanalströmning, endimensionell hydraulisk simulering, MIKE 11*

Abstract

Flood simulations in the river Byälven

Finn Midbøe and Håkan Persson

Severe floods caused by heavy autumn rains in year 2000 raised the question whether measures to reduce the damage from high water levels, in the area surrounding lake Glafs fjorden and along the river Byälven down to lake Vänern, are possible. One option is to reduce flow resistance along the river and thereby lower the maximum water level a given inflow would cause. Good knowledge of hydraulic and hydrological conditions is necessary in order to estimate the effect of such flow-reducing measures. In order to quantify such effect a 1-dimensional hydraulic flow model has been set up for the river Byälven using the software package *MIKE 11*. The model is more detailed, especially concerning topography and bathymetry, than earlier models used for studies of the river. Boundary conditions consist of measured inflows, the level of the lake Vänern and runoff calculated using the *HBV*-model. The model was calibrated for two different floods and a good fit to measured water levels was obtained for both these periods. Using the calibrated model critical sections, causing much flow resistance during high floods, were identified. With that knowledge different measures to reduce high water levels was adopted to the model both individually and combined with each other and the model was run with boundary conditions mainly from the flood in year 2000. The most radical measures simulated resulted in a lowering of the maximum water in the two largest reservoirs Glafs fjorden and Harefjorden with 78 and 97 cm respectively. A more modest combination of measures gave water levels 48 and 84 cm lower than a model run without changes. Some combinations of relatively small measures lowered the maximum water level by a few decimeters. The simulation results give good guidance to further investigations and decisions of actual changes. The model constitutes a useful tool when making flood maps of the area and if water level forecasts would be needed during future floods.

Keywords: The river Byälven, Arvika, flood, varied unsteady flow, open channel hydraulics, one dimensional hydraulic simulation, MIKE 11

Department of earth sciences
Uppsala University
Villavägen 16
SE-752 36 Uppsala
Sweden

ISSN 1401-5765

Förord


Detta projekt har initierats av Arvika kommun och finansierats av densamma genom EU-projektet FLOWS. Arbetet har genomförts som ett 20 poängs examensarbete inom utbildningen Miljö- och vattenteknik vid Uppsala universitet, under handledning av Torbjörn Svensson som tillhör Nätverket för älvsäkerhet på Karlstads universitet. Ämnesgranskare och examinator på Uppsala universitet har varit Allan Rodhe respektive Conny Larsson. Andra som har bidragit till genomförandet är Barbara Blumenthal och Jan Forsberg, Karlstad universitet och framförallt Anders Norrby, Arvika kommun.

Under projektets gång har vi ofta kommit i kontakt med folk som varit intresserade av det pågående arbetet. Det gäller såväl boende längs Byälven och SVT Värmland som folk inom ämnesområdet både i Sverige och i Norge; då främst på NVE, Sjöfartsverket, SMHI och Räddningsverket.

Förutom handledare, ämnesgranskare och andra som visat intresse för arbetet vill vi speciellt tacka Räddningsverket för tillgång till tidigare modell över Byälven och avdelningen Natur och miljö på Karlstads universitet som upplåtit lokal åt oss och bjudit på kaffe.

Författarna ansvarar av på grund av examination individuellt för de kapitel var och en står bakom. Indelningen är sådan att Håkan ansvarar för kapitlen 3 - 3.4.3, 3.4.7 - 3.5, 5, 5.3 - 5.4.1, 6 - 6.1, 7.5 - 7.5.1, 7.7 - 7.10, 8.4 - 8.4.5, A.2, A.7 och Finn ansvarar för kapitlen 2 - 2.3, 3.4.4 - 3.4.6, 4 - 4.3, 5.1 - 5.2, 7 - 7.4, 7.6, 7.11, 8 - 8.3.3, A.1, A.3 - A.6, A.8, B.1. Övriga kapitel har skrivits tillsammans.

Med förhoppningar om intressant läsning!
Karlstad december 2004
Finn & Håkan

 Mycket viktigt att tänka på vid läsning av denna rapport är att alla höjdangivelser anges i referenssystemet Rikets Höjdsystem 1970, RH70, där inget annat anges. Många diskussioner kring vattennivåer i Arvika och Säffle refererar till vattennivåer i RH00, vilka är cirka 3 dm lägre än motsvarande nivåer beskrivna i RH70. Således anges i denna rapport den högsta registrerade vattennivån i Arvika under översvämningen 2000 till 48,67 m ö.h. i RH70 vilket motsvarar en nivå på 48,36 m ö.h. i RH00

1 INLEDNING	1
2 FÖRUTSÄTTNINGAR.....	5
2.1 KAU-MODELLEN	5
2.2 RÄDDNINGSVÄRKETS MODELL.....	6
2.3 MÖJLIGA FÖRBÄTTRINGAR	7
3 MJUKVARA	7
3.1 ARCVIEW OCH ARCGIS.....	8
3.2 IHMS	8
3.3 MIKE 11 GIS	9
3.4 MIKE 11	9
3.4.1 Editorer i MIKE 11	9
3.4.2 Structure operations.....	9
3.4.3 Flödesmotstånd.....	10
3.4.4 Hydrodynamiska grundekvationer.....	10
3.4.5 Bestämmande sektioner och stråkande vatten.....	13
3.4.6 Lösningmodell	14
3.4.7 Stationär, kvasistationär och dynamisk modellering	15
3.4.8 Stabilitet samt relation mellan tidssteg beräkningsavstånd	16
3.5 MIKE VIEW	17
4 HÖJDMODELL.....	17
4.1 HÖJDDATA	18
4.1.1 GSD-Höjddata	18
4.1.2 Laserscanning.....	18
4.1.3 Ekolodning.....	18
4.1.4 Djup från sjökort - FM.....	18
4.2 DATAREDUKTION	19
4.3 SAMMANFOGNING	19
5 FLÖDEN.....	20
5.1 INFLÖDEN FRÅN REGLERADE AVRINNINGSSOMRÅDEN.....	20
5.2 FLÖDE I SÄFFLE	21
5.3 SLUSSEN	22
5.3.1 Beräkning av flöde.....	23
5.4 INFLÖDEN FRÅN OREGLERADE AVRINNINGSSOMRÅDEN	27
5.4.1 IHMS.....	28
6 VATTENSTÅND	29
6.1 VÄNERNS VATTENNIVÅ	30
7 FINKAN-MODELLEN	32
7.1 TVÄRSNITT	33
7.1.1 Magasinens area som funktion av vattennivå	34
7.2 ÖVRE OCH NEDRE RANDVILLKOR	34
7.3 INFLÖDEN	35
7.4 DÄMMET.....	35
7.5 SLUSSEN	36
7.5.1 Hantering av slussen i olika scenarier.....	36
7.6 ÖVERSVÄMNINGSOMRÅDEN	37
7.7 BROAR.....	38

7.8 VAL AV TIDSSTEG OCH AVSTÅND MELLAN BERÄKNINGSPUNKTER.....	39
7.9 KALIBRERING AV MODELLEN.....	40
7.9.1 Kalibrering mot två oberoende perioder	40
7.9.2 Jämförelse med osäkra mätningar.....	41
7.10 OSÄKERHETSKONTROLL AV MODELLEN	43
7.11 FELKÄLLOR	45
8 RESULTAT AV KÖRDA SIMULERINGAR	46
8.1 YTTERLIGARE FELKÄLLOR.....	46
8.2 ENSKILDA ÅTGÄRDER FÖR MINSKAT VATTENSTÅND.....	46
8.2.1 Ökat flöde genom slussen.....	47
8.2.2 Borttagning av invallningar.....	48
8.2.3 Vidgning vid Hökeströmmen	48
8.2.4 Effekter av förändrad vattendom	50
8.2.5 Ändrat flödesmotstånd i zon 2 och 3	50
8.2.6 Ändrat flödesmotstånd i zon 1.....	52
8.2.7 Muddring	52
8.2.8 Ökat flöde genom dämnet.....	53
8.3 SIMULERINGAR MED FÖRHÖJDA VATTENSTÅND.....	54
8.3.1 Barriär mellan Kyrkviken och Glafsforden.....	54
8.3.2 Stängd sluss.....	54
8.3.3 Effekter av klimatförändring.....	55
8.4 KOMBINERADE ÅTGÄRDER	57
8.4.1 Ombyggt dämme	58
8.4.2 Kompensationsåtgärder vid barriärbygge.....	58
8.4.3 Negativa effekter i Harefjorden	59
8.4.4 Realistiskt åtgärds paket	59
8.4.5 Extremt åtgärds paket.....	60
9 DISKUSSION OCH SLUTSATSER.....	60
REFERENSER.....	64
BILAGOR	
A.1 ÅTERKOMSTTID	
A.2 EDITORER I MIKE 11	
A.3 EKOLODNING	
A.3.1 Vattenytor och höjdfixa	
A.3.2 Djupbestämning vid GPS-position	
A.3.3 Atmosfäriska störningar och systematisk förskjutning	
A.3.4 Beräkning av bottennivåer i gemensamt höjdsystem	
A.3.5 Datagenomgång	
A.3.6 Interpolering av 3D-modell	
A.4 SMHIS BERÄKNING AV FLÖDE GENOM DÄMMET	
A.5 PARAMETERVÄRDEN FÖR IHMS	
A.6 ÅREAUTVECKLING FÖR VATTENMAGASIN	
A.7 KALIBRERINGSPARAMETRAR FÖR FINKAN-MODELLEN	
A.8 TABELL ÖVER KOMBINERADE ÅTGÄRDER	
B.1 RADIAL GATE	
C.1 ÖVERSIKTSKARTA	
C.2 DELAVRINNINGSSOMRÅDEN	
C.3 ORIENTERINGSKARTA	

1 Inledning

Under senhösten år 2000 och därpå följande vinter översvämmades Byälvens vattensystem i västra Värmland. I sjön Glafsforden steg vattennivåerna mer än tre meter över medelvattenstånd vilket drabbade intilliggande infrastruktur och fastigheter hårt (se fig. 1 - 1 och bilaga C1 - C3).



Figur 1 - 1 Turistbyrån i Arvika var ett av de hus som totalförstördes under översvämningen hösten 2000.

Stora insatser gjordes med hjälp av invallning och pumpning för att hålla vattnet borta och sannolikt lyckades man rädda stora värden samtidigt som vatten- och elförsörjningen säkrades och avloppssystemet hölls operationellt. Trots insatserna skedde direkta skador på fastigheter och dessutom orsakades ekonomisk skada genom att mycket näringsverksamhet fick avbrytas eller flyttas under perioden och tågtrafiken stoppades då banvallens säkerhet inte kunde garanteras. Den totala kostnaden för översvämningen har inte fastställts, kommunens utgifter har dock uppskattats till 89 miljoner kronor; skador på allmänna och enskilda vägar har av Länsstyrelsen i Värmland beräknats till cirka 150 miljoner kronor för hela Värmland (Svensson m.fl., 2002). Försäkringsbolagens kostnader uppskattas, enligt muntlig information från Länsförsäkringar (Olsson, 2004), till 100 miljoner kronor. Dessutom tillkommer kostnader för drabbade privatpersoner och företag. De största insatserna för att begränsa vattnets skadeverkningar ägnades Arvika stad (se fig. 1 - 2) även om högt vattenstånd orsakade stora problem även på andra ställen, runt Glafsforden och ner längs Byälvens sträckning till Harefjorden, Säffle och Väneren.



Foto: KommunTeknik / Arvika kommun 2000

Figur 1 - 2 Temporära invallningsanordningar byggdes upp för att hålla nere vattennivåerna i vissa områden i Arvika. Pumpar pumpade vatten för att kompensera för läckage genom vallar och mark.

Orsaken till översvämningen år 2000 var de stora regnmängder som föll under hösten. Det var en lång sammanhängande regnig period med en sammanlagd nederbörd på 388 mm i Arvika under oktober-november vilket motsvarar mer än tre gånger den normala nederbörden. Nedre delen av Byälvens avrinningsområde karaktäriseras av tämligen stora vattenmagasin som dräneras av ett vattendrag med liten lutning. Vid längre perioder av ihållande tillrinning fylls vattenmagasin som sedan tar lång tid att tömma. Höga vattenstånd i Glafs fjorden har förekommit tidigare. Den högsta registrerade nivån i Glafs fjorden var tidigare från 1904, då vattnet stod nästan lika högt som år 2000 (se fig. 1 - 3). Återkomsttid för det högsta vattenståndet år 2000 behandlas i bilaga A.1.



Figur 1 - 3 Fotografiet från 15 maj 1904 föreställer området öster om det nya stadshus som höll på att byggas i Arvika. Vattennivån nådde nästan lika högt som under översvämningen år 2000.

Även om räddningsinsatsen som genomfördes i samband med översvämningen kan betecknas som lyckad blev händelseförloppet en väckarklocka för kommunen, som beslöt att utreda vilka åtgärder som kan vidtas för att man ska vara bättre förberedd, nästa gång en översvämning inträffar. Dessutom beslöts att utreda möjligheterna att minska framtida högvattenstånd. Som ett led i detta arbete sammanställdes en rapport av Nationellt centrum för älvskadeteknik¹ som innehåller fältinventeringar, sammanställning av hydrologiska data, flödesanalys samt en översikt över åtgärdsalternativ (Svensson m.fl., 2002). Bland åtgärder som föreslagits för att minska framtida högvattenstånd kan nämnas ökning av magasinskapaciteten högre upp i avrinningsområdet, en ökning av Byälvens avbördningsförmåga och specifikt för Arvika stad en invallning av Kyrkviken.

Rapporten från Nationellt centrum för älvskadeteknik redovisar resultaten från en enkel hydraulisk strömningsmodell (fortsättningsvis kallad KaU-modellen) som antyder att en minskning av extremnivåerna i storleksordningen 1-4 dm skulle gå att åstadkomma med åtgärder längs Byälven.

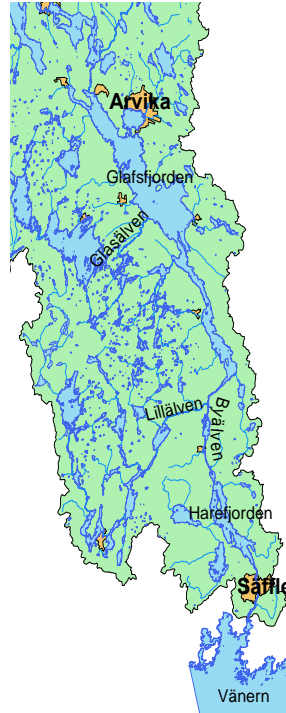
Arvika kommun har främst utrett möjligheterna att valla in Kyrkviken, vilket skulle kunna begränsa de högsta vattennivåerna vid en översvämning i Arvika till cirka 46,8 m ö.h. En önskan att på ett mera detaljerat sätt utreda åtgärdsalternativ för att sänka vattenytan i hela Glafs fjorden har funnits, vilken realiserats i och med detta projekt i form av en hydraulisk modell. Modellen ska fungera som verktyg för att identifiera flödesbegränsningar i Byälven och bedöma effekter och konsekvenser av förändringar i dessa.

¹ Numera Nätverket för älvsäkerhet (NÄS)

Utöver detta ska den även kunna simulera konsekvenserna av minskad magasinskapacitet i Glafs fjorden orsakad av en eventuell invallning av Kyrkviken och fungera som underlag för att ta fram detaljerade översvämningsskator. Modellen är hädanefter refererad till som FINKAN-modellen.

Byälven och dess avrinningsområde

Byälven utgör vattnets väg från Glafs fjorden och ut i Vänern (se fig. 1 - 4). Det totala avrinningsområdet omfattar 4 785 km² varav 3 709 km² eller 77,5 % svarar mot avrinning som passerar minst en kraftstation innan de når Vänern. Cirka 28,5 % av avrinningsområdet ligger i Norge. Glafs fjorden utgör ett vattenmagasin med en yta av cirka 100 km² från vilket Byälven utgör utloppet. Till Glafs fjorden kommer vatten genom turbiner eller spill från kraftstationerna i Jössefors och Glava samt genom direkt avrinning från oreglerade avrinningsområden. Från Glafs fjorden rinner Byälven söderut; inflöde sker från Lillälven (efter cirka 3,5 km) och sedan passerar älven de mindre magasinerna Gillbergasjön och Dösslingen innan den efter 9 km rinner ut i Harefjorden, vilken har en yta på cirka 15 km². Efter Harefjorden smalnar vattendraget åter av och rinner in i Säffle, där vattnet passerar Sjöfartsverkets anordning för reglering av flöde, kallad dämnet. Parallellt med detta finns en sluss som sjöfarten begagnar sig av vid passage upp och ner genom systemet. Efter att vattnet passerat dämnet och sedan Backeströmmen återförenas huvudfåran med slusskanalen och rinner vanligen relativt lugnt ytterligare 5 km innan vattnet slutligen når Vänern. Detaljerade kartor återfinns i bilaga C. Karta C.1 är en översiktsskarta, C.2 visar delavrinningsområden och C.3 är en orienteringsskarta längs älvsträckningen med platser och objekt som nämns i rapporten utsatta. En mer detaljerad beskrivning av hydrologiska, hydrografiska och geologiska förhållanden i Byälvens avrinningsområde har gjorts av Svensson m.fl. (2002).



Figur 1 - 4 Översiktlig karta över Byälvens sträckning.

Målsättning

Målet har varit att sätta upp en hydrologisk och hydraulisk modell av Byälvens nedre del, att med modellens hjälp identifiera flödesbegränsande faktorer, simulera förändringar av dessa för att beskriva ökad avbördningsförmåga i älven, vilket skulle minska risken för höga vattenstånd högt upp i älvsystemet. Modellen skall även kunna användas för att ta fram detaljerade översvämningsskator för de områden där den topografiska informationen är tillräckligt bra och för att simulera andra typer av händelseförlopp, exempelvis en barriär mellan Glafs fjorden och Kyrkviken. Modellens randvillkor och vattennivåer som används vid kalibrering ska i möjligaste mån vara korrigerade för felaktigheter i höjdsystem. En ambition fanns också att undersöka skillnader mellan *HBV*-modellen och

Rainfall runoff, vilka båda är modeller avsedda för avrinningsberäkningar. Resultatet av arbetet skall slutligen, förutom att i form av en rapport redogöra för genomförda simuleringar, också innefatta en dokumenterad modell för fortsatt utveckling och användning. Modellen ska kunna användas inom NÄS för vidare hydrauliska studier av Byälven och på SMHI även för att prognostisera vattennivåer vid framtida översvämningssituationer.

2 Förutsättningar

Redan innan arbetet med FINKAN-modellen inleddes existerade två hydrauliska modeller för Byälvsystemet. Dessa skiljer sig både i avseende på konceptuell uppbyggnad och i det att olika modellverktyg använts. Den ena (KaU-modellen) togs fram på Karlstad Universitet, vid NÄS, främst av Jan Forsberg för att undersöka möjligheterna att påverka höga vattenstånd i Glafs fjordens med åtgärder längs Byälven (Svensson m.fl., 2002). Den andra (Räddningsverkets modell) byggdes upp i samband med att Räddningsverket gjorde en översiktlig översvämningsskartering av Byälvens vattensystem (Räddningsverket, 2002). Möjlighet att närmare studera båda modellerna fanns under arbetets gång, KaU-modellen helt öppet och Räddningsverkets modell genom avtal mellan Räddningsverket och Arvika kommun.

2.1 KaU-modellen

Modellen bygger på Bernoullis ekvation för inströmning och Mannings formel för flöde i öppen kanal och utgör en 1-dimensionell modell som är att betrakta som kvasistationär (se kap. 3.4.7). I princip bygger modellen på tre vattenmagasin motsvarande Glafs fjorden, Gillbergasjön och Harefjorden, sammanbundna av två prismatiska kanaler. Beräkningarna utförs för dessa fem celler där vattenstånd och flöde beräknas för varje tidssteg som i modellen satts till ett dygn. Modellen är konstruerad med simuleringssverktyget *Simulink* som är en modul i programvaran *MATLAB*. Inflöden i form av avrinning och punktinlopp utgörs av punktkällor in i magasinerna och i ett fall (Lillälven) till en kanalsträcka. Som inflöden användes uppmätta flöden där sådana finns i samband med vattenkraftstationer. För delavrinningsområden där inga flödesregistreringar fanns att tillgå beräknades avrinning utifrån nederbörd så att ett registrerat dygns nederbörd avtagande påverkade avrinningen under fyra dygn framåt. Dessutom multiplicerades avrinningen med en avrinningskoefficient som ökades i takt med att markfuktigheten ökade under hösten. Som utflöde och nedre randvillkor användes en av SMHI uppskattad hydrograf för Säffleströmmen placerad i det nedersta magasinets nedre rand, vilket i verkligheten motsvarar att SMHIs flödesuppskattning för Säffle flyttats upp till Harefjordens utlopp. Modellen innefattar också en grunddam/tröskel mellan mellersta och nedre vattenmagasinet, tänkt att motsvara Hökeströmmen.

KaU-modellen kalibrerades sedan så att vattennivån, i första hand i Glafs fjorden, i andra hand i Harefjorden, sammanfaller med uppmätta värden. Som kalibreringsparametrar användes förutom älvsträckans råhet² också ett antal parametrar som beskriver kanalernas utseende och tvärsnittsarea. Eftersom denna modell använder flödet i Säffleströmmen som nedre randvillkor kan detta flöde inte användas för att kalibrera modellen. För att

² Råheten beskriver hur skrovlig en yta är och därmed hur mycket friktionsmotstånd som uppstår vid flöde

uppnå samma höga vattenstånd som registrerats i Arvika under översvämningen minskades också Glafs fjordens magasineringssjöarea med 8 %. Anpassningen av modellen till vattenstånd i Glafs fjorden blev mycket bra medan anpassningen till vattenstånd i Harefjorden överensstämmer mindre bra. Modellen kalibrerades under översvämningsperioden 2000-09-01 – 2000-12-31 och avviker under denna period mindre än 15 cm från uppmätta nivåer i Glafs fjorden. KaU-Modellen ligger som helhet i höjdreferenssystem RH00 och hänsyn har inte tagits till variation i detta höjdsystem mätplatser emellan.

Modellen är uppbyggd så att parametrar som man har dålig kännedom om kan sättas till ett uppskattat värde som sedan justeras vid kalibrering så att modellen får bra överensstämmelse med verkligheten. Många gånger kan flera parametrar som motsvarar olika fysikaliska egenskaper i verkligheten påverka exempelvis vattenstånd på samma sätt. Att som i fallet med denna modell ha ett stort antal parametrar att kalibrera modellen med gör att man kan få en god överensstämmelse till uppmätta vattenståndsserier på flera olika sätt. Exempelvis kan en smal och slät kanal bidra med samma genomströmning som en bred och skrovligare kanal. För att få en robust modell som uppför sig på ett bra sätt även i andra situationer än den som använts vid kalibreringen är det viktigt att i så stor utsträckning som möjligt ha värden på de individuella parametrarna som stämmer med verkligheten och inte bara få bra överensstämmelse jämfört med de nivåer man kalibrerar mot. Eftersom kunskapen om Byälvens botten- och strandtopografi var dålig då KaU-modellen byggdes upp ändrades kanalutseendet vid kalibreringen. Med dåvarande kunskapsbas var detta nödvändigt men med bättre kunskap om topografien kan man reducera mängden kalibreringsparametrar och få en modell mera trogen verkligheten. Eftersom det nedre randvillkoret i KaU-modellen utgörs av ett flöde som uppskattats av SMHI, är flödet helt bestämt för perioden och påverkas inte av variabler i modellen som exempelvis vattenståndet i Harefjorden, vilket i verkligheten är en av de viktigaste styrande parametrarna för utflödet. Detta innebär att modellen måste simulera vattennivån i Harefjorden helt rätt för att utflödet skall stämma, och även detta antagande bygger på att SMHIs uppskattning av flödet är helt korrekt. Effekten blir att modellen är mycket känslig för en felaktigt simulerad vattennivå i Harefjorden eftersom den kompensande effekten av en för hög simulerad vattennivå skulle dämpas av ett ökat flöde uteblir.

De modellsimuleringar som utfördes med KaU-modellen visar att åtgärder längs Byälven mycket väl kunde minska de maximala vattennivåerna vid en översvämning men modellen har inte tillräcklig upplösning för att kunna identifiera specifika sådana åtgärder. De minskningar av vattenytan i Glafs fjorden som simuleringarna med KaU-modellen resulterat i varierar mellan cirka 1 - 4 dm.

2.2 Räddningsverkets modell

Räddningsverket har med hjälp av SMHI konstruerat en modell över Byälven i *MIKE 11*, vilket är samma simuleringsverktyg som används i arbetet med FINKAN-modellen. Modellen togs fram för att fungera som verktyg då översiktliga översvämningskartor skulle tas fram för området. Den är uppbyggd av tvärsnitt som tagits fram med hjälp av höjdkurvor från Gröna Kartan, broritningar och sjödjupskartor (Räddningsverket, 2002).

Totalt spänns modellen upp av 65 tvärsnitt längs en sträcka av 76,2 km. Räddningsverkets modell sträcker sig hela vägen ner till Väneren vars vattennivå används som nedre randvillkor. Då modellen satts upp med tvärsnitt och randvillkor konstaterades att en körning av modellen med standardinställning av flödesmotstånd gav vattenstånd som under den simulerade perioden, 2000-11-07 – 2000-12-06, avvek mindre än 20 cm från uppmätta värden. Ingen vidare justering gjordes enligt muntliga uppgifter från SMHI för att ytterligare anpassa modellen till förhållandena i det modellerade vattendraget. Räddningsverkets modell ligger som helhet i höjdreferenssystem RH70. (Yacoub, 2004)

2.3 Möjliga förbättringar

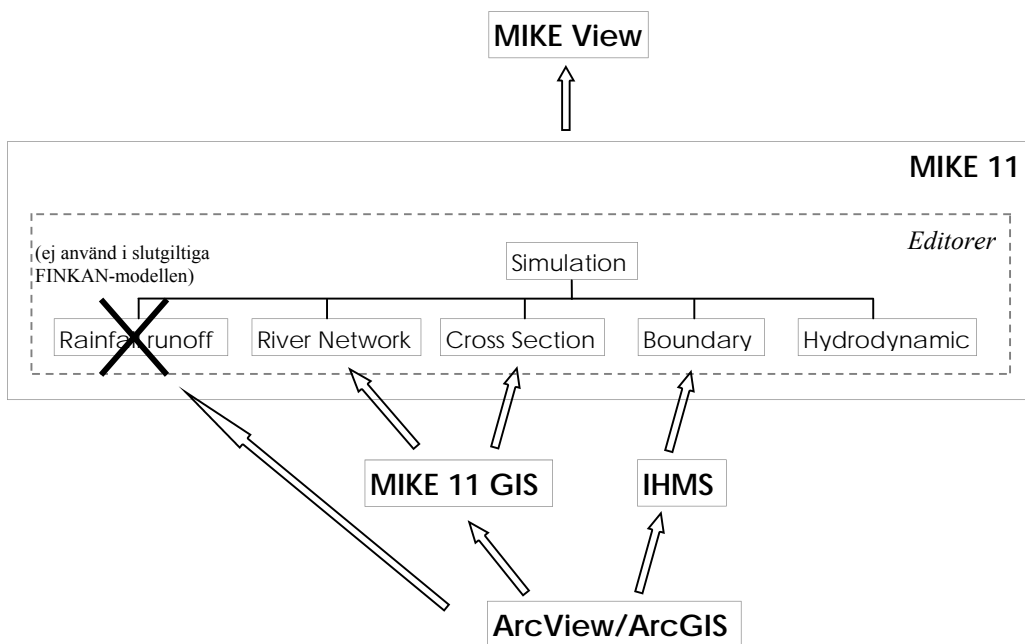
De viktigaste förbättringarna i relation till tidigare modeller är att bygga FINKAN-modellen på exaktare och mer topografisk information. En modell baserad denna höjdinformation kan bättre beskriva flödessamband jämfört med Räddningsverkets modell och minska antalet kalibreringsparametrar jämfört med KaU-modellen. Med en modell som fysikaliskt bättre beskriver verkligheten finns också större möjligheter att kunna använda den på flödessituationer som skiljer sig från dem som rådde under den period modellen kalibrerats för. Detta är en förutsättning för att den skall kunna användas för att studera intressanta förändringar av förhållanden längs älven.

Då arbetet inleddes rådde en ganska spridd förvirring angående i vilka referenssystem olika vattennivåer som användes vid kalibrering och som randvillkor i de tidigare modellerna var registrerade i. Även avrinningsberäkningar och randvillkor i form av inflöden skulle visa sig gå att förbättra jämfört med tidigare modeller.

3 Mjukvara

I FINKAN-modellen beskrivs hydrologiska och hydrauliska processer. För teoretisk beskrivning av hydrologiska processer hänvisas till litteratur inom området, de hydrauliska samband som används vid modellerandet redogörs för i kapitel 3.4.4 efter en översikt av använda program.

I arbetet har framförallt tre olika programpaket använts. Höjdmodellen har konstruerats i GIS-programmen *ArcView 3.1* och *ArcGIS 8.2/9.0* från ESRI med tilläggen (eller *Extensions*) *Spatial Analyst 1.1* och *3D Analyst 1.0*. Beräkning av avrinning från områden där flöden inte finns uppmätta har gjorts med *IHMS 4.5* från SMHI. Det hydrauliska modelleringsprogram som använts är *MIKE 11 2003b, SP3* från DHI Water & Environment med insticksprogrammet *MIKE 11 GIS 2002, SP2* och tillbehöret (eller *Add-On Module*) *Structure operations*. Analys av resultat från *MIKE 11* har gjorts i *MIKE View 2003*. En schematisk bild av programanvändandet visas i figur 3 - 1.



Figur 3 - 1 Översikt av de program som har använts för att skapa FINKAN-modellen samt hur information har överferts mellan dem. Vid konstruktion av modellen har arbetet i princip utförts från nedre delen av figuren och uppåt.

3.1 ArcView och ArcGIS

För databehandling vid framställning av höjddmodell, hydrologiska modellparametrar till *IHMS*, illustrationer av topografi och kartor har *ArcView* och *ArcGIS* licensierat vid Karlstad universitet använts. Tillgång fanns även till en demoversion av *ArcGIS*. Programmen är mycket spridda och för mera detaljerad information hänvisas till generalagenten, ESRI Sweden.

3.2 IHMS

För avrinningsberäkningar från de områden som inte är reglerade och för vilka det därmed inte finns flöden registrerade användes modelleringsverktyget *IHMS*, för vilket tillgång fanns till en studentlicens. Verktöget bygger på den konceptuella *HBV*-modellen som ursprungligen utvecklades på SMHI 1976 (Bergström, 1976) och vidareutvecklades till en uppdaterad modell, kallad *HBV-96*, på SMHI 1996 (Lindström m.fl., 1996). Modellverktyget har genom dess stora spridning blivit standard för avrinningsmodellering i Sverige. Kort kan modellen beskrivas som en konceptuell ickedistribuerad boxmodell. Ett visst mått av areell distribution kan åstadkommas genom att flera delavrinningsområden kan kopplas ihop till ett större avrinningsområde för att efterlikna verkliga förhållanden. För mer detaljerad information om *IHMS* hänvisas till manualen (SMHI, 2004).

3.3 MIKE 11 GIS

MIKE 11 GIS utgör ett insticksprogram³ till *ArcView* och fungerar både som ett kommunikationsverktyg mellan GIS-miljön och *MIKE 11* för att överföra topografisk information och som ett verktyg för att geografiskt analysera resultat från översvämningssimuleringar i *MIKE 11*. Programmet är långsamt då stora datamängder hanteras, vilket är fallet med stora och detaljerade höjdmodeller. Dessutom är programmet buggigt och havererar ofta. Licens för *MIKE 11 GIS* och *MIKE 11* fanns tillgänglig vid Karlstad universitet, genom en ekonomisk uppgörelse med Arvika kommun.

3.4 MIKE 11

MIKE 11 är ett modelleringsprogram som används för att beskriva vattendrags hydrauliska egenskaper bl.a. utifrån information om vattendragets topografi, inflöden och utflöden. *MIKE 11s* beskrivning av vattendrag är 1-dimensionell, vilket innebär att hänsyn endast tas till skeenden i vattendragens flödesriktning. Fel kan uppkomma om förenkling av strömning till en dimension inte beskriver verkliga situationer på ett nöjaktigt sätt. Exempelvis i situationer där det i verkligheten orsakas en vattenström på tvärs mot huvudflödet, vilken "skär av" huvudflödet och minskar den effektiva tvärsnittsarean som bidrar till älvens flöde.

3.4.1 Editorer i MIKE 11

Då en modell skapas görs detta i flera separata editorer som var och en beskriver en del av modellen (se fig. 3 - 1). *Simulation Editor* är den centrala delen i *MIKE 11*, där de olika editorerna länkas samman. Där specificeras simuleringsinformation som simuleringsperiod och tidssteg och det är även därifrån som simuleringar startas. Vattendragets övergripande utseende som dess längd och positioner för förgreningar specificeras i *River Network Editor*, vilket även gäller speciella anordningar som exempelvis broar. I *Cross Section Editor* beskrivs vattendragets topografi med tvärsektioner utspridda längs hela vattendraget. Randvillkor specificeras i *Boundary Editor* och består vanligtvis av flödesserier eller vattenståndsserier. Förutom nödvändiga randvillkor i början och slutet av modellen beskrivs också andra randvillkor, som exempelvis inflöden längs vattendraget. I *Hydrodynamic Editor* specificeras bl.a. initialvärden för flöden och vattenstånd, flödesmotstånd och speciella simuleringsinställningar. Skärmdumpar från de olika editorerna finns i bilaga A.2.

3.4.2 Structure operations

Möjligheter att beskriva speciella anordningar i ett vattendrag som påverkar flödet och inte kan beskrivas endast med tvärsektioner finns tillgängliga i tillbehöret *Structure operations* och specificeras i *River Network Editor*. En mängd olika anordningar som exempelvis trösklar, pumpar, kulvertar och broar finns att välja på som beskriver specifik flödespåverkan från dessa. Dessa speciella anordningar kan ge upphov till snabba förändringar av flöden och vattenstånd, med vågbildning som följd. Detta gör att de lätt orsakar numerisk instabilitet, vilket förstärks av att de påverkar flödet på en specifik plats och inte längs en sträcka. Då *Structure operations* används kan därför kortare tidssteg

³ Tillbehör till ett program.

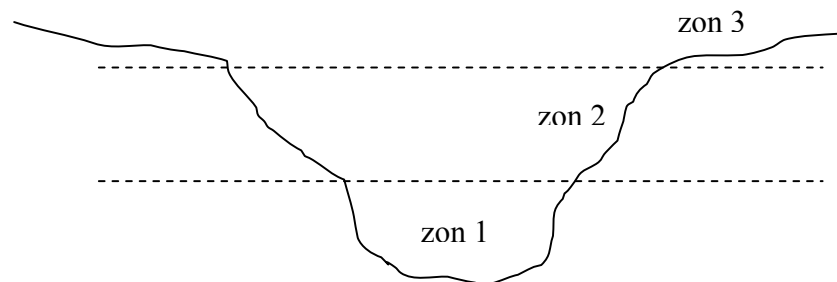
vara nödvändigt och dessutom kan simuleringsinställningar i *Hydrodynamic Editor* behöva justeras (DHI, 2003b).

3.4.3 Flödesmotstånd

Flödesmotståndet kan i *MIKE 11* anges på flera olika sätt:

- Enligt Mannings beskrivning av flödesmotstånd där motståndet anges som Mannings M (Mannings tal) eller Mannings n , där $n = M^{-1}$
- Enligt Chézys beskrivning där flödesmotståndet anges som Chézys koefficient C
- Mannings n anges som en funktion av lokala och tidsspecifika parametrar som vattenhastighet, hydraulisk radie och vattendjup
- Mannings n hämtas ur en tabell där det anges för olika vattenhastigheter ur vilken n linjärinterpoleras för aktuell vattenhastighet

Flödesmotstånd kan varieras fritt längs älvsträckningen. I tvärsnitten kan motståndet varieras på ett antal olika sätt: oberoende av vattenstånd, med en indelning där flodfåran delas in i tre olika höjdzoner för vilka olika motstånd kan anges (se fig. 3 - 2) eller helt fritt.



Figur 3 - 2 Tvärsnitt av ett vattendrag med indelning av höjdzoner, i vilka olika flödesmotstånd kan specificeras.

3.4.4 Hydrodynamiska grundekvationer

Att *MIKE 11* är ett 1-dimensionellt simuleringsverktyg betyder att strömningsförhållanden varieras endast längs älvsträckningen och inte med avstånd till botten eller strandkant. Grunden i *MIKE 11* beskriver ickestationär kanalströmning med Saint Venants ekvationer för bevarande av massa och rörelsemängd i en dimension (DHI, 2003b). Olika lösningsmetoder för dessa ekvationer finns tillgå i simuleringsprogramvaran. Då vågapproximation *Fully Dynamic* eller *Higher Order Fully Dynamic* väljs löser *MIKE 11* alla termer i Saint Venants ekvationer för varje beräkningsspunkt och varje tidssteg. För att förkorta beräkningstiden finns ytterligare två vågapproximationer, *Diffusive Wave* och *Kinematic Wave*. De senare är förenklingar av de förra och används för att minska simuleringstiden då det kan säkerställas att en förenkling av våg-

approximationen inte påverkar beräkningarna alltför mycket. *Diffusive Wave* bortser från rörelsemängd hos vattnet och *Kinematic Wave* antar jämvikt mellan gravitationskrafter och friktionskrafter vid flöde (DHI, 2003b). Generellt rekommenderas användning av *Higher Order Fully Dynamic* om inte speciella omständigheter motiverar något annat (DHI, 2003a).

Fully Dynamic och *Higher Order Fully Dynamic* skiljer sig i det att den senare innehåller en beskrivning av friktionstermer i Saint Venants momentekvation av högre grad som gör att längre tidssteg kan användas med bibehållen numerisk stabilitet. Emellertid tillåter inte *Higher Order Fully Dynamic* i *MIKE 11* att flödesmotståndet specificeras olika för olika höjdzoner i ett och samma tvärsnitt på det sätt som beskrivs i kapitel 3.4.3.

Då *MIKE 11* löser Saint Venants ekvationer med vågapproximationen *Fully Dynamic* beskrivs flödet med följande antaganden:

- Vattnet är inkompressibelt och homogent (konstant densitet)
- Bottenlutningen är liten
- Våglängder är stora i förhållande till vattendjupet vilket innebär att strömningen kan anses vara parallellt med botten vilket betyder att vertikala accelerationskrafter ignoreras och att hydrostatisk tryckvariation antas längs den vertikala vattenprofilen
- Flödet är subkritiskt (strömmande)

För en rektangulär kanal (med bredd b och höjd H) skrivs Saint Venants ekvationer för bevarande av massa (3 - 1) respektive rörelsemängd (3 - 2) som:

$$\frac{\partial(\rho b H \bar{v})}{\partial x} + \frac{\partial(\rho b H)}{\partial t} = 0 \quad (3 - 1)$$

$$\frac{\partial(\alpha' \rho b H \bar{v}^2 + \frac{1}{2} \rho b g H^2)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho b H \bar{v})}{\partial t} = 0 \quad (3 - 2)$$

med följande beteckningar:

α'	vertikal hastighetsfördelningskoefficient [-]
ρ	vattnets densitet [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]
b	kanalens bredd [m]
g	tyngdacceleration [$\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$]
H	vattendjupet [m]
\bar{v}	medelhastighet [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$]
$\frac{\partial}{\partial t}$	partiell derivata med avseende på tid [s^{-1}]

$\frac{\partial}{\partial x}$ partiell derivata längsmed älvsträckningen [m^{-1}]

För att hantera varierande kanalbredd längs älvsträckningen, $\frac{\partial b}{\partial x}$ [-], och lutande botten, I_b [-], läggs två termer till rörelsemängdsekvation (3-2) vilket ger:

$$\frac{\partial(\alpha' \rho b H \bar{v}^2 + \frac{1}{2} \rho b g H^2)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho b H \bar{v})}{\partial t} + \frac{\partial b}{\partial x} \left(\frac{\rho g H^2}{2} \right) + \rho b g H I_b = 0 \quad (3-3)$$

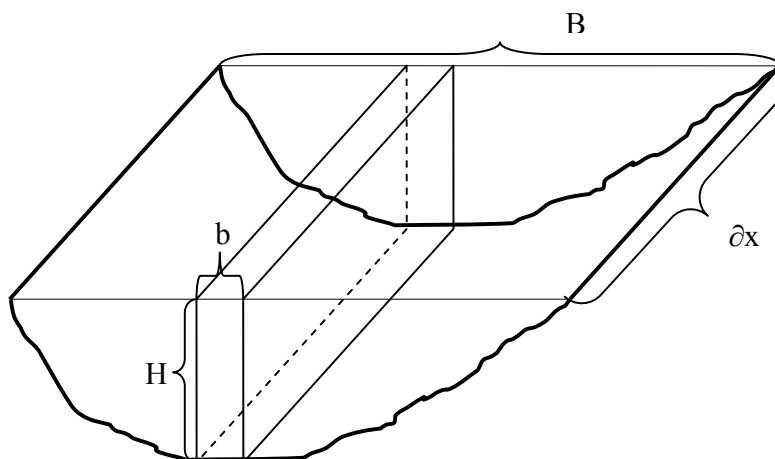
Eftersom modelluppbyggnaden sker kring en given höjddreferensnivå och inte relativt älvens bottennivå substitueras vattendjupstermen mot en vattennivåterm. Vattenytans lutning relativt en höjddreferensnivå blir då lika med bottenlutningen I_b plus vattenytans lutning mot botten $\frac{\partial H}{\partial x}$ (se ekv. (3-4)). Slutligen divideras ekvationerna (3-1) och (3-3) med ρ och ekvationerna (3-5) och (3-6) erhålls.

$$\frac{\partial h}{\partial x} = I_b + \frac{\partial H}{\partial x} \quad (3-4)$$

$$\frac{\partial(bH\bar{v})}{\partial x} + \frac{\partial(bH)}{\partial t} = 0 \quad (3-5)$$

$$\frac{\partial(\alpha' b H \bar{v}^2)}{\partial x} + b g H \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{\partial(bH\bar{v})}{\partial t} = 0 \quad (3-6)$$

Dessa ekvationer beskriver 1-dimensionellt flöde genom tvärsnitt med godtyckligt utseende då det delas upp i ett antal parallella tvärsnitt enligt figur 3-3.



Figur 3 - 3 Principskiss över ett godtyckligt tvärsnitt i ett vattendrag med en beräkningscell markerad och beteckningar utskrivna.

Följande storheter införs:

$$B \quad \text{total bredd över tvärsnitt [m]}$$

$$A = \int_0^B Hdb \quad \text{tvärsnittsarea [m}^2\text{]} \quad (3-7)$$

$$Q = \int_0^B H\bar{v}db = A\bar{v} \quad \text{totalflöde [m}^3\text{s}^{-1}\text{]} \quad (3-8)$$

Integrering av ekvationerna (3-5) och (3-6) med avseende på b och insättning av (3-7) och (3-8) ger om den vertikala hastighetsfördelningskoefficienten är lika för hela tvärsnittet (enl. villkor (3-9)) ekvationerna (3-5) och (3-6).

$$\alpha' = \alpha \quad (3-9)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} = 0 \quad (3-10)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial \left(\alpha \frac{Q^2}{A} \right)}{\partial x} + Ag \frac{\partial h}{\partial x} = 0 \quad (3-11)$$

För att slutligen få fram de ekvationer som *MIKE 11* använder läggs laterala flöden q till massbalansekvationen (3-10) för att beskriva till och frånflöden från det modellerade vattendraget längs dess sträckning. Friktionsmotstånd läggs till rörelsemängdsbalans-ekvationen (3-11) och beskrivs exempelvis med motstånd enligt Mannings formel⁴ med termen $\frac{gQ|Q|}{AM^2R^{4/3}}$ (DHI, 2004). Detta ger:

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} - q = 0 \quad (3-12)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial \left(\alpha \frac{Q^2}{A} \right)}{\partial x} + Ag \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{gQ|Q|}{AM^2R^{4/3}} = 0 \quad (3-13)$$

Där $M [\text{m}^{1/3}\text{s}^{-1}]$ betecknar Mannings M och R [m] är den hydrauliska radien.

3.4.5 Bestämmande sektioner och stråkande vatten

Ekvationerna i kapitel 3.4.4 beskriver endast subkritiskt flöde och *MIKE 11* simulerar i egentlig mening inte stråkande vatten. För att ändå efterlikna bestämmande sektioner och stråkande vatten modifieras rörelsemängdsbalansen (3-13) så att accelerationstermen (den andra termen i ekvation (3-13)) gradvis försvinner då Froudes tal (F) närmar sig 1 (flödet närmar sig stråkande):

⁴ Absolutbeloppet i Mannings formel tillkommer av beräkningstekniska skäl i *MIKE 11*.

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \beta \frac{\partial \left(\alpha \frac{Q^2}{A} \right)}{\partial x} + Ag \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{gQ|Q|}{AM^2 R^{4/3}} = 0 \quad (3-14)$$

där β är en faktor som beskriver dämpningen av accelerationstermen. β bestäms av F så att för fall då den horisontella upplösningen i modellen är grov och/eller avståndet mellan beräkningspunkterna är mycket större än vattendjupet.

$$\beta = \begin{cases} 1 - F^2 & \text{för } F \leq 1 \\ 0 & \text{för } F > 1 \end{cases} \quad (3-15)$$

Konstruktionen har bra stabilitetsegenskaper men har visat sig ge en sämre beskrivning av flöden och vattenstånd för fall med höga F då djupet varit stort i förhållande till avståndet mellan beräkningspunkterna. För sådana fall bestäms β av F så att

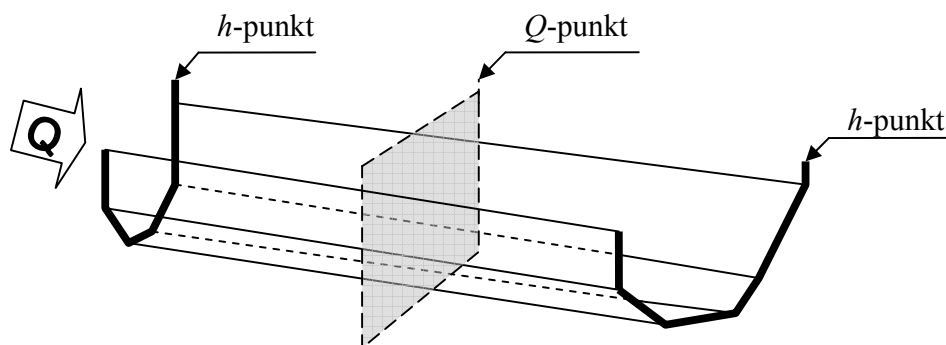
$$\beta = \begin{cases} 1 & \text{för } F \leq Max \\ \frac{1}{(F + 1 - Max)^{FroudeExp}} & \text{för } F > Max \end{cases} \quad (3-16)$$

där Max och $FroudeExp$ utgör parametrar som kan varieras inom en bestämd domän men rutinmässigt sätts till 1,0 respektive 2,0. Konstruktionen har något sämre stabilitetsegenskaper än den förra men ger en mer korrekt beskrivning av flödesförhållanden för höga F .

Test har visat att båda metoderna ger relativt goda approximationer av vattenstånd och flöden precis uppströms och nedströms en övergång från stråkande till subkritisk strömning men inte korrekt beskrivning av det vattensprång som utgör den egentliga övergången (DHI, 2003b).

3.4.6 Lösningssmodell

Ekvationslösningen i *MIKE 11* är principiellt likvärdig oberoende av vilken vågapproximation som används (se kap. 3.4.4). Grundläggande för lösningssmodellen är det schema av beräkningspunkter, Q - och h -punkter, som sätts upp i modellen. Det definierar de punkter där flöde respektive vattennivå beräknas i varje tidssteg. Modellpraktiskt går det till så att en h -punkt automatiskt sätts i varje definierat tvärsnitt samt eventuellt på ytterligare ställen där användaren definierat tvingade h -punkter. Dessutom sätts fler punkter jämnt fördelade där avståndet mellan h -punkter är längre än vad som tillåts i modellen. Därefter definieras Q -punkter automatiskt mitt emellan alla h -punkter. Upplägget är illustrerat i figur 3 - 4. Modellen sätter upp ekvation (3-12) och (3-13) i ett beräkningsschema så att vattennivåer beräknas i varje h -punkt och flöde i varje Q -punkt för varje tidssteg.



Figur 3 - 4 Skissen föreställer en bit av den modellerade älvsträckan mellan två tvärsnitt, vid vilka h -punkter är placerade. Mitt emellan h -punkterna är en Q -punkt definierad. Tvärsnitten är markerade som tjocka svarta linjer.

Den numeriska lösningsmodellen baseras sedan på en implicit finit differensmetod kallad 6-punkters Abbot-schema (Abbot och Ionescu, 1967) som närmare beskrivs i *MIKE 11s* referensmanual (DHI, 2003b).

Tidssteget kan endera definieras som konstant, tabellerade tidssteg eller med så kallat *Adaptive Time step*. Med den sista varianten anpassas tidssteget automatiskt så att snabba och drastiska händelseförlopp simuleras på ett detaljerat sätt samtidigt som längre och mindre föränderliga perioder simuleras med längre tidssteg.

3.4.7 Stationär, kvasistationär och dynamisk modellering

Vid stationär modellering beräknas flöden och vattenstånd längs ett vattendrag utifrån ett övre och ett nedre randvillkor, där båda randvillkoren är konstanta. Om stationär beräkning görs för flera efter varandra följande tidssteg, där randvillkoren tillåts ändras mellan varje tidssteg, kallas modelleringen kvasistationär. Dynamisk modellering sker efter samma princip som kvasistationär modellering, med skillnaden att hänsyn tas till accelerationstermer i de hydrauliska grundekvationerna (se kap. 3.4.4). Då det sker snabba förändringar av flöden och vattenstånd kan accelerationstermer inte försummas och alltså måste dynamisk modellering användas. Detta gäller exempelvis vid dammbrott och därav uppkomna vågor. Dessa vågor fortplantas med en hastighet som beskrivs av:

$$v_{våg} = \sqrt{gy} \quad (3 - 17)$$

med följande beteckningar:

g	tyngdacceleration [$m \cdot s^{-2}$]
y	vattendjup [m]

För att kunna beskriva fortplantning av vågor får en kontrollvolym vatten inte transporteras förbi mer än en till två beräkningspunkter per tidssteg, vilket kan uttryckas av villkoret (DHI, 2003b):

$$\frac{v\Delta t}{\Delta x} \leq 1 \text{ (eller 2)}$$

(3 - 18)

med följande beteckningar:

v	vattnets hastighet [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$]
Δt	tidssteg vid modellering [s]
Δx	avstånd mellan beräkningspunkter [m]

Vid stationär och kvasistationär modellering behöver ingen hänsyn tas till villkoret i ekvation (3 - 18) för val av tidssteg utan detta görs istället utifrån hur ofta randvillkoren ändras, vilket innebär att betydligt längre tidssteg kan användas. Om randvillkoren specificerats glesare än längden på ett tidssteg interpoleras de i *MIKE 11* till varje tidssteg (DHI, 2003b). Detta innebär att simuleringen blir mer detaljerad då tidssteg kortare än tiden mellan specificerade randvillkor används, även då kvasistationär modellering används. Om dynamisk modellering används med tidssteg som är mycket längre än beräknat med ekvation (3 - 18), fås i praktiken kvasistationär modellering. Detta eftersom hög tidsupplösning krävs för att beskriva vågbildning, och vågorna hinner klinga av under ett alltför långt tidssteg.

MIKE 11 är främst avsett för dynamisk modellering, men möjligheter finns även till kvasistationär modellering.

3.4.8 Stabilitet samt relation mellan tidssteg beräkningsavstånd

Stabiliteten hos modellen beror framförallt på förhållandet mellan intilliggande beräkningspunkter Δx och tidssteg Δt . Då avståndet mellan intilliggande beräkningspunkter minskas bör också tidssteget minskas (DHI, 2003b). Alltså är det en fördel om antalet beräkningspunkter kan hållas lågt och därmed ett långt tidssteg kan användas, vilket ger kort simuleringstid. Dock måste tvärsnitt, och därmed h -punkter, specificeras med tillräckligt kort avstånd för att förändringar av botten- och strandtopografin längs älvsträckningen ska beskrivas.

Ett kriterium för val av Δx och Δt är att de ska vara tillräckligt små för att kunna beskriva icke-linjära förändringar i läge och tid. Ett riktmärke för val av Δx är att ett tillräckligt antal (30-50 st.) beräkningspunkter behövs per våglängd, där en våglängd definieras i (3 - 19) och en plötslig flödestopp orsakad av kraftigt regnfall kan ha en vågperiod på ett par timmar (DHI, 2003b).

$$L_{våg} = T_{våg} \sqrt{gy}$$

(3 - 19)

med följande beteckningar:

$L_{våg}$	våglängd [m]
$T_{våg}$	vågperiod [s]
g	tyngdacceleration [$\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$]
y	vattendjup [m]

För att få en indikation om lämpligt tidssteg vid dynamisk modellering kan Courant-talet C_r användas, vilket definieras som:

$$C_r = \frac{(v + \sqrt{gy})\Delta t}{\Delta x}$$

(3 - 20)

med följande beteckningar:

v	vattnets hastighet [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$]
g	tyngdacceleration [$\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$]
y	vattendjup [m]
Δt	tidssteg [s]
Δx	avstånd mellan närliggande h -punkter [m]

Courant-talet uttrycker hur många beräkningspunkter en våg orsakad av en liten störning passerar under loppet av ett tidssteg. Den finita differensmetoden som används i *MIKE 11* tillåter Courant-tal upp till 10-20 om flödet är klart subkritiskt. I vissa mycket speciella fall har simuleringar kunnat göras med Courant-tal på 250 (DHI, 2003b). Anledningen till att stabilitet kan fås för så stora Courant-tal är att beräkningsmotorn i *MIKE 11* innehåller avancerade lösningsmetoder anpassade för just detta. Även val av vågapproximation har betydelse för vilka Courant-tal som är nödvändiga för att uppnå god stabilitet.

3.5 MIKE View

För att studera resultatfiler från *MIKE 11* måste det separata programmet *MIKE View* användas. I detta kan resultatfiler visualiseras och analyseras; simuleringar kan vid kalibrering jämföras med uppmätta serier. *MIKE View* har även använts för att exportera data som lämpat sig bäst för analys och presentation i andra program.

4 Höjdmodell

I detta kapitel behandlas förfarandet då en detaljerad höjdmodell togs fram för att ha som underlag för det vidare arbetet med simuleringarna. För att göra hydrauliska beräkningar i vattendrag behövs god kännedom om botten- och strandtopografi. Botten och strändernas utformning bestämmer hur stort tvärsnitt vattnet kommer att rinna genom vid olika vattenstånd, samtidigt som olika utseenden på tvärsnitt ger olika flödesförhållanden. Vid tidigare beräkningar för Byälven har broritningar och enstaka direkt i älven uppmätta tvärsnitt använts (se kap. 2.2). I andra fall har vissa parametrar i tvärsnittens utseende använts som kalibreringsparametrar vid modellanpassningen (se kap. 2.1). För att minska denna felkälla har mer detaljerad höjddata sammanställts till en heltäckande höjdmodell ur vilken man kan ta fram tvärsnitt för valfri plats längs älvsträckan. Höjdmodellen som konstruerats täcker den svenska delen av Byälvens avrinningsområde och endast topografin ovanför normalt vattenstånd. För sjöar och vattendrag som är speciellt intressanta för hydrauliska beräkningar i FINKAN-modellen finns även information om botten- och strandtopografin. Upplösningen varierar från att vara hämtad från Lantmäteriets GSD⁵-höjddata med grov upplösning och relativt stora fel till högupplösta höjddata från laserbaserad helikopterscanning längs Byälven. Variationen är sådan att modellen är högupplöst i för modellen kritiska områden och grov i områden som inte alls eller mycket lite påverkar modellen.

⁵ GSD är Geografiska Sverigedata från Lantmäteriet

4.1 Höjddata

Fyra olika typer av höjddata har inhämtats för att ge en tillräckligt detaljerad men samtidigt hanterbar digital höjdmmodell.

4.1.1 GSD-Höjddata

Höjddata i rutor om 50×50 meter finns tillgängliga för hela Sverige hos Lantmäteriet. Höjdfelet är relativt stort. Ett geometriskt medelfel på högst 2,5 m eftersträvas (Lantmäteriet, 2004) vilket gör att information från GSD-höjddata lämpar sig bra för illustrationer och beräkningar av exempelvis vattennivå-volym-förhållanden i större vattenmagasin men inte är tillräckligt detaljerad för att utgöra grund till tvärsnitt i vattendraget eller detaljerad översvämningsskartering. GSD-höjddata beskriver sjöar som plana ytor motsvarande vattenytan. Datamängden för hela avrinningsområdet (svenska delen) upptar drygt 13 Mbyte. Vid konstruktion av topografisk modell sattes höjdpunkter i mitten av de rasterrutor om 50×50 m som de representerar.

4.1.2 Laserscanning

Topografien över landområden längs vattendraget som kan komma att översvämmas vid höga flöden är mycket viktig för de hydrauliska beräkningarna, eftersom den bestämmer vilka områden som kommer att bidra till flöde och vilka som inte kommer att göra det. För att med hög noggrannhet kartera strandzonen anlätades, genom Arvika kommuns försorg, SWECO som genom sin entreprenör TopEye utförde helikopterbaserad laserscanning och flygfotografering av utvalda områden längs Byälven. Från 400 meters flyghöjd registrerades knappt 11 miljoner höjdpunkter med stor noggrannhet (<20 cm). Mätpunkterna är slumpmässigt placerade i mätområdet men motsvarar en ungefärlig datatäthet på 0,3 - 0,4 punkter per kvadratmeter. Datamängden upptar hela 334 Mbyte.

4.1.3 Ekolodning

Ekolodning av intressanta partier längs älvsträckan utfördes på uppdrag av Arvika kommun 2004-04-21 – 2004-04-27. Fältarbetet utfördes inte som en del av detta examensarbete och tillvägagångssätt beskrivs i detalj i bilaga A.3. Sammanfattningsvis resulterade lodningsarbetet i en bottenkarta med varierad detaljrikedom. Trånga och varierande älvsträckor kartlades mera noggrant än uniforma och breda sektioner. Ekolodning gjordes från Björnöflagans nedre del ner till Harefjorden och från Harefjorden och fram till kanalöns norra ände i Säffle och vidare ner i slusskanalen fram till övre slussluckan. Av praktiska skäl lodades inte området strax ovanför dämnet och Backeströmmen. Sträckan från slussen ner till Vätern ekolodades inte heller.

4.1.4 Djup från sjökort - FM

För att få en grov uppfattning om bottenpogografien för sjöarna Glafs fjorden och Harefjorden samt Byälvens utlopp i Vätern digitaliserades ett antal djuppunkter från sjökort. Digitalisering gjordes av djup från Sjökort #134 "Arvika-Säffle-Köpmannebro" (Sjöfartsverket, 2000). Djupen på sjökorten gäller från två vattennivåer, 43,80 m ö.h. nedanför slussen i Säffle och 44,90 m ö.h. ovanför. Djuppunkterna subtraherades från korresponderande vattenyta vilket gav ett mindre antal nivåpunkter som beskrev bottenpogografien på ställen där noggrannheten inte behöver vara hög.

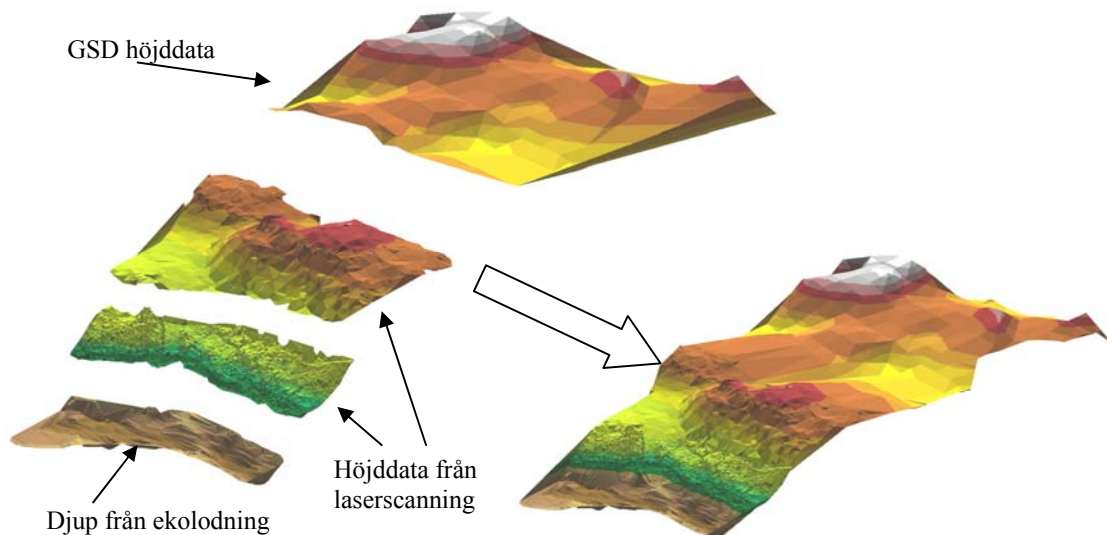
4.2 Datareduktion

Totalt upptar rådata i form av höjdinformation för området över 350 Mbyte. Med tillgänglig beräkningskapacitet är så stora datamängder inte hanterliga, dels inte av själva simuleringsprogramvaran, men framförallt inte av den GIS-mjukvara som används vid databearbetning. Mycket av de rådata som finns är dock överflödigt eller onödigt detaljerad och den topografiska modellen går därför att förenkla. Data från laser-scanningen representerar den största datamängden. För att kunna reducera datamängden utan att förlora detaljrikedom i de viktigaste områdena, närmast älvfåran, delades laser-datamängden upp i två kategorier; höjdpunkter närmare än 100 m från älvfåran respektive höjdpunkter längre bort än 100 m från älvfåran⁶. Höjdpunkter inom buffertzonen runt älven behölls medan punkterna längre bort reducerades slumpmässigt med 95 %.

4.3 Sammanfogning

För att slutligen konstruera en sammanhängande höjdmodell för hela området kombinerades de fem olika tidigare förberedda (se kap. 4.1 och 4.2) datamängderna (GSD-höjddata, gles laserdata utanför buffertzona, tät laserdata från buffertzona, från sjökort digitaliserade bottendata och ekoloddata) till en sammanhängande modell.

Höjdpunkter från de fem olika skikten kombinerades och användes som noder vid triangulering till en sammanhängande TIN (*Triangulated Irregular Network*)-modell. Kombinationen av fyra av datakategorierna illustreras för ett utsnitt strax norr om Säffle tätort i figur 4 - 1.



Figur 4 - 1. Den kompletta höjdmodellen (t.h.) grundar sig på data med olika kvalitet från olika källor. Komponenterna (t.v.) har olika upplösning och hämtas för olika områden så att kritiska områden täcks av detaljerad topografisk information medan mindre kritiska områden endast beskrivs med en grov höjdmodell. Bilden visar ett utsnitt en bit norr om Säffle centrum.

⁶ Urskiljningen gjordes i GIS-miljö med buffertzoner runt vattendraget istället för med höjdvillkor av praktiska skäl.

5 Flöden

Viktiga komponenter i hydrauliska modeller är in- och utflöden, då de kan användas som randvillkor. Vissa inflöden till Byälven är kontinuerligt registrerade sedan en längre tid, andra finns i kortare tidsserier. Inflöden från mindre vattendrag och direktavrinning finns inte registrerade. För att få heltäckande information om inflödena till Byälvssystemet har två metoder använts:

- Förlängning av befintliga flödesserier genom skalning och reprisering⁷
- Konceptuell avrinningsmodellering

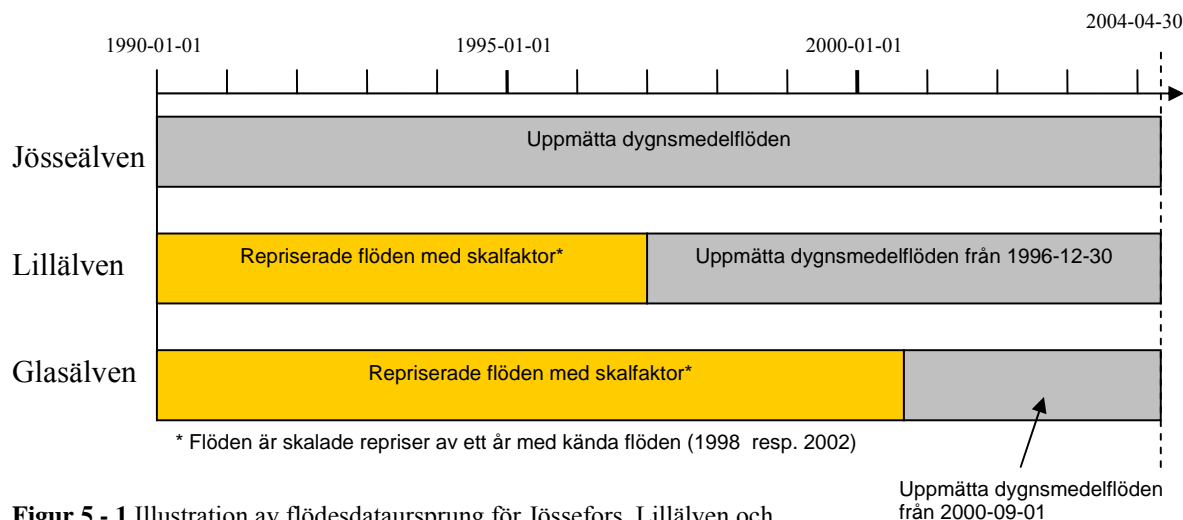
På så sätt har kontinuerliga inflödesserier till Byälvssystemet mellan 1990-01-01 och 2004-04-30 konstruerats.

5.1 Inflöden från reglerade avrinningsområden

Vid tre större tillflöden (Jössefors (Jösseälven), Glava (Glasälven) och Blixbol (Lillälven)) till Byälvssystemet registreras flöden kontinuerligt i samband med elproduktion. Sådana mätningar har emellertid inte gjorts under hela den period som behövdes till FINKAN-modellen. Tillgången på flödesdata redovisas i figur 5 - 1. Dygnsmedelflöden för kraftstationerna har inhämtats från Fortum⁸. För perioder som saknar dygnsmedelflöden repriserades skalade flöden för ett år med kända flöden för samma vattendrag, enligt ekvation (5 - 1) och (5 - 2). För repriseringen valdes hydrografer från år 2002 för Glasälven och från år 1998 för Lillälven. Dessa år representerar hydrografer som någorlunda väl beskriver ett normalår med avseende på ackumulerad avrinning. Visserligen kan nederbörden se mycket olika ut från år till år men alternativet till den valda metoden, att skala om ett flöde för samma period men gällande för ett annat avrinningsområde, bedömdes som ett ännu sämre alternativ eftersom tappningsstrategierna kan skilja sig avrinningsområdena emellan. Vidare finns verkliga flöden registrerade under den för modellen viktigaste perioden, översvämningen år 2000. Repriseringsförfarandet kommer således inte att påverka inflöden från reglerade avrinningsområden under denna period. För den simulerade perioden under våren år 1999 är det endast Glasälven som har repriserad data. Slutresultatet påverkas därmed mycket lite av repriseringen.

⁷ Uppreppning av tidigare mätvärden, beskrivs närmare i kapitel 5.1

⁸ Tidigare Birka Energi



Figur 5 - 1 Illustration av flödesdataursprung för Jössefors, Lillälven och Glasälven. Uppmätta dygnsmedelflöden har rapporterats från Fortum.

$$Q_{Glasälven}(datum) = Q_{Glasälven}(datum_{2002}) \frac{\bar{Q}_{Jösseälven \text{ aktuellt år}}}{\bar{Q}_{Jösseälven \text{ 2002}}} \quad (5-1)$$

$$Q_{Lillälven}(datum) = Q_{Lillälven}(datum_{1998}) \frac{\bar{Q}_{Jösseälven \text{ aktuellt år}}}{\bar{Q}_{Jösseälven \text{ 1998}}} \quad (5-2)$$

Med följande beteckningar:

Q dygnsmedelflöde [m^3s^{-1}]

\bar{Q} årsmedelflöde [m^3s^{-1}]

Vidare saknades värden för Lillälven vecka 39 år 1999 och flödet sattes då till $0 m^3s^{-1}$. Dubbla, ej exakt överensstämmande, data rapporterades för vecka 27 1998. Dessa daterier var dock i samma storleksordning och den ena valdes utan motivering att utgöra underlag för vidare beräkningar. Båda dessa förenklingar bedöms ha en helt försumbar inverkan på resultaten av det fortsatta arbetet.

5.2 Flöde i Säffle

Flöden registreras kontinuerligt i Säffle av Sjöfartsverket och mätvärden finns för hela perioden 1990-01-01 – 2004-04-30. Metoden för att registrera flöden i Säffle är emellertid indirekt och bygger på en ekvation som utifrån vattenstånd, mätta vid peglarna benämnda Dämmet och Backeströmmen (se bilaga C.3), och dammluckornas läge beräknar flödet. Ekvationen är framtagen av SMHI på uppdrag av Nordic Paper, som driver ett större pappersbruk ett stycke norr om Säffle centrum. SMHIs beräkningsformel redovisas i detalj i bilaga A.4.

Emellertid tyder mycket på att dessa siffror stämmer dåligt med verkligheten. Tidigare modeller såväl som en flödesmätning gjord med akustisk dopplermätare av SMHI under

översvämningen 2000 och sedermera FINKAN-modellen (se kap. 7.9.2) visar att flödet kraftigt underskattas av denna beräkningsmetod, speciellt vid höga flöden. Utifrån beräkningsmetodens ursprungliga funktion, att beräkna låga flöden med acceptabel precision (då Nordic Paper riskerade att genom utsläpp orsaka för höga halter av oönskade ämnen i vattnet) finns ingen större anledning att ifrågasätta tillvägagångssättet men vid höga flöden beskriver den inte de verkliga förhållandena på ett bra sätt. En trolig delförklaring är att de peglar på vilka de ingående variablerna avläses, Dämnet och Backeströmmen, sitter placerade för nära den västra dammluckan vilket gör att den dämmer vattenytan vid pegelplaceringen. En effekt av detta vittnar kanalmästaren om då han berättar att en minskning av lucköppningen i den västra luckan genererar en så stor lokal dämning vid pegeln att det beräknade flödet ökar istället för att minska (Tapio, 2004). Detta på grund av att den av dämningen orsakade ökningen i nivåskillnad mellan mätplatserna orsakar en ökning av det beräknade flödet som är större än minskningen på grund av den minskade genomströmningsarean. Vid högre flöden styrs troligtvis flödet i hög grad av andra faktorer än nivåskillnaden på den korta sträckan mellan peglarna, vilken är cirka 30 m.

Intill dämnet finns en sluss som normalt inte bidrar till avbördningen i Byälvsystemet. Under den dramatiska översvämningen i området hösten 2000 öppnades under en period dock slussen så att även denna bidrog till flödet. SMHI har konstruerat en hydrograf som ersätter formlerna för beräkning av flöde genom dämnet under perioden 2000-09-01 – 2000-12-31. Förutom de formler som används för beräkning av flöde genom dämnet hade SMHI tillgång till en avrinningsmodell och resultatet av en akustisk dopplermätning 27 november då ett flöde på $401 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ uppmättes (standardavvikelse $\sigma = 6 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$). Hydrografen konstruerades av SMHI och bygger enligt muntliga uppgifter på "kvalificerade gissningar" (Jansson, 2004) vilket innebär att osäkerheten i hydrografen är ganska stor. Flöden runt 27 november 2000, då dopplermätningen gjordes, är dock att beteckna som tillförlitliga.

5.3 Slussen

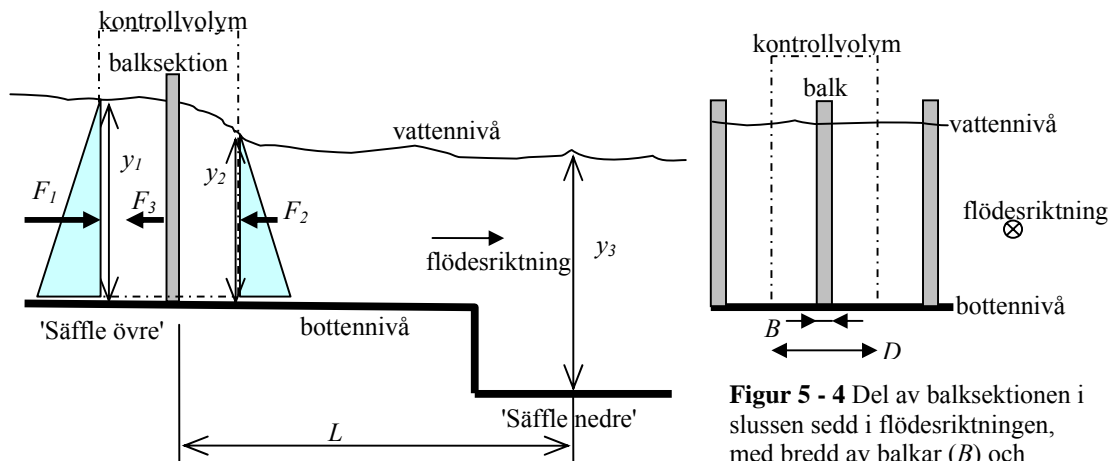
Under översvämningen hösten 2000 steg vattennivåerna så mycket att det beslutades att försöka öppna slussen i Säffle för fri vattengenomströmning. Detta hade aldrig tidigare gjorts då slussen endast använts för fartygstrafik. För att kunna öppna slussportarna sattes en fördämning ned strax uppströms den övre slussporten. Fördämningen bestod av åtta vertikala stålbjälkar, mellan vilka tre rader med vardera sju luckor placerats vilket ses i figur 5 - 2. Då slussportarna öppnats återstod att lyfta upp de 21 luckorna medan vattnet flödade fritt mellan de bjälkar där luckorna tagits bort. Arbetet inleddes den 13 november med att de fem mittersta luckorna i översta raden togs bort. De tre nästföljande dagarna togs resterande luckor i översta raden, samt luckorna i mellersta raden bort. För att lyfta upp luckorna från den understa raden krävdes mer tekniska förberedelser och först den 22 och 23 november kunde detta arbete genomföras (Svensson m.fl., 2002). Därefter strömmade vattnet genom slussen med motstånd endast från slusskanalens råhet och bjälkarna som luckorna suttit fästa mellan. I mitten av januari 2001 hade vattenståndet och flödet minskat så mycket att man beslutade att stänga slussen, vilket gjordes den 23 januari.



Figur 5 - 2 Balksektionen uppströms övre slussporten i Säffle sluss den 13:e november 2000. Arbetet med att öppna slussen har påbörjats och tre av de 21 luckorna har tagits bort.

5.3.1 Beräkning av flöde

Flödet genom slussen, då samtliga luckor är borttagna, kan beräknas med kraftekvation för en kontrollvolym som innesluter balkarna (Nakayama och Boucher, 1999; Svensson m.fl., 2002). Eftersom flödessituationen är lika kring alla balkar kan beräkningarna göras för ett strömrör som innehåller en balk och avgränsas i sidled mitt emellan balkarna. Denna beräkning kan sedan användas för samtliga balkar, varav sex balkar är fristående och omgivna av vatten men där det dessutom tillkommer en halv kontrollvolym längst ut på varje kant av kanalen och alltså motsvaras hela balksektionen av sju kontrollvolymmer. Kontrollvolymens avgränsningar och använda beteckningar framgår av figur 5 - 3 och figur 5 - 4.



Figur 5 - 3 Balksektionen i slussen sedd från sidan. Kontrollvolymen är liten men har ritats stor för ökad tydlighet. Krafterna F_1 och F_2 verkar alltså i princip direkt på balksektionen. Vattenståndet vid pegeln Säffle övre (y_1) motsvarar vattenståndet uppströms balksektionen, nedströms balksektionen beräknas vattenståndet y_2 utifrån mätningar vid pegeln Säffle nedre (y_3). Avståndet L mellan balksektionen och Säffle nedre är också markerat.

Figur 5 - 4 Del av balksektionen i slussen sedd i flödesriktningen, med bredd av balkar (B) och kontrollvolym (D) markerade.

Krafterna på kontrollvolymen består av tryckkrafter på upp- och nedströmssidorna (F_1 och F_2) samt reaktionskrafter från vattnets strömning förbi balkarna (F_3). Eftersom rörelsemängden bevaras är förändringen av vattnets rörelsemängd lika med krafternas verkan på kontrollvolymen, se ekvation (5 - 3). Utöver detta måste hänsyn tas till friktionsförluster då vattnet passerar balksektionen.

$$(F_1 - F_2 - F_3) = \frac{m(v_2 - v_1)}{t} \quad (5 - 3)$$

med följande beteckningar:

$F_{1,3}$	krafter på kontrollvolym och balksektion [N]
m	vattnets massa [kg]
$v_{1,2}$	vattnets medelhastighet vid y_1 respektive y_2 i figur 5 - 3 [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$]
t	tid [s]

Krafterna F_1 och F_2 beräknas från vattnets tryck på kontrollvolymen:

$$F_1 = p_1 \cdot A_1 = \frac{\rho \cdot g \cdot y_1}{2} \cdot D \cdot y_1 = \frac{1}{2} \rho g D y_1^2 \quad (5 - 4)$$

$$F_2 = p_2 \cdot A_2 = \frac{\rho \cdot g \cdot y_2}{2} \cdot D \cdot y_2 = \frac{1}{2} \rho g D y_2^2 \quad (5 - 5)$$

med följande beteckningar:

$p_{1,2}$	medelvattentryck på kontrollvolymen vid y_1 respektive y_2 [$\text{N}\cdot\text{m}^{-2}$]
$A_{1,2}$	kontrollvolymens area vinkelrätt mot flödet vid y_1 respektive y_2 [m^2]

ρ	densitet för vatten [kg·m ⁻³]
g	tyngdacceleration [m·s ⁻²]
D	bredd på kontrollvolym [m]

Kraften F_3 beräknas enligt (Nakayama och Boucher, 1999):

$$F_3 = C_D A_{balk} \frac{\rho \cdot v^2}{2} = \frac{1}{2} C_D \rho B y_1 \left[\frac{Q_{tot} / 7}{(D - B) y_1} \right]^2 = \quad (5-6)$$

$$= \frac{1}{2} C_D \rho B \frac{Q_{tot}^2}{49 (D - B)^2 y_1}$$

med följande beteckningar:

C_D	koefficient som finns tabellerad för olika flödeshinder [-]
A_{balk}	tvärsnittsarea på en balk [m ²]
B	bredd på balkar [m]
Q_{tot}	totalt flöde genom slussen [m ³ s ⁻¹]

Högerledet i ekvation (5-3) skrivs om:

$$\frac{m(v_2 - v_1)}{t} = \rho \cdot (Q_{tot} / 7) \cdot \left(\frac{Q_{tot} / 7}{D y_2} - \frac{Q_{tot} / 7}{D y_1} \right) = \frac{\rho Q_{tot}^2}{49 D} \left(\frac{1}{y_2} - \frac{1}{y_1} \right) \quad (5-7)$$

Ekvationerna (5-4) – (5-7) insatta i ekvation (5-3) ger:

$$\frac{1}{2} \rho g D (y_1^2 - y_2^2) - \frac{1}{2} C_D \rho B \frac{Q_{tot}^2}{49 (D - B)^2 y_1} = \frac{\rho Q_{tot}^2}{49 D} \left(\frac{1}{y_2} - \frac{1}{y_1} \right) \quad (5-8)$$

$$g D (y_1^2 - y_2^2) - C_D B \frac{Q_{tot}^2}{49 (D - B)^2 y_1} = \frac{2 Q_{tot}^2}{49 D} \left(\frac{1}{y_2} - \frac{1}{y_1} \right) \quad (5-9)$$

$$g D (y_1^2 - y_2^2) = \frac{Q_{tot}^2}{49} \left[C_D B \frac{1}{(D - B)^2 y_1} + \frac{2}{D} \left(\frac{1}{y_2} - \frac{1}{y_1} \right) \right] \quad (5-10)$$

$$Q_{tot} = \sqrt{\frac{49 g D (y_1^2 - y_2^2)}{\frac{C_D B}{(D - B)^2 y_1} + \frac{2}{D} \left(\frac{1}{y_2} - \frac{1}{y_1} \right)}} \quad (5-11)$$

Eftersom vattenståndet inte finns uppmätt intill balksektionen på nedströmssidan, utan pegeln Säffle nedre är placerad ett stycke nedströms, måste y_2 beräknas utifrån vattenståndet vid Säffle nedre (y_3) (se fig. 5 - 3). Detta görs genom att beräkna friktionsförluster h_f som uppkommer mellan balksektionen och Säffle nedre. Vattenståndet y_2 kan då beräknas som:

$$y_2 = y_3 + h_f \quad (5-12)$$

Slutligen sätts ekvation (5-12) in i (5-11):

$$Q_{tot} = \sqrt{\frac{49gD[y_1^2 - (y_3 + h_f)^2]}{\frac{C_D B}{(D-B)^2 y_1} + \frac{2}{D} \left(\frac{1}{y_3 + h_f} - \frac{1}{y_1} \right)}} \quad (5-13)$$

För att beräkna flödet måste en iterativ beräkning göras tillsammans med friktionsförlusterna h_f . Flödet genom slussen beräknas först utifrån antagandet att inga förluster sker; då detta flöde beräknats kan friktionsförlusterna beräknas med Mannings formel i ekvation (5-14) (Reinius, 1962) och iterering görs tills konvergens erhålles.

$$h_f = \frac{v^2 L}{M^2 R^{4/3}} = \frac{Q_{tot}^2 \cdot L}{A_{kanal}^2 M^2 R^{4/3}} = \frac{Q_{tot}^2 \cdot L}{B_{kanal}^2 \cdot \left(\frac{y_1 + y_2}{2} \right)^2 M^2 R^{4/3}} \quad (5-14)$$

med följande beteckningar:

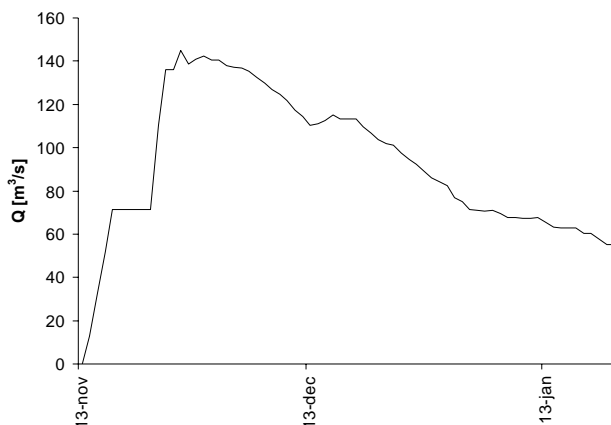
v	flödes hastighet i slusskanalen [$m \cdot s^{-1}$]
L	avstånd mellan y_2 och y_3 [m]
M	Mannings M för kanalen [$m^{1/2} s^{-1}$]
R	hydraulisk radie [m]
Q_{tot}	totalt flöde genom slussen [$m^3 s^{-1}$]
A_{kanal}	tvärsnittsarea på kanalen [m^2]
B_{kanal}	bredd på kanalen vid balksektionen [m]

De parametrar som är omnämnda i förra stycket och som används för beräkning av flödet genom slussen har värden enligt tabell 5 - 1. Då dessa sätts in i ekvationerna (5-13) och (5-14) kan flödet genom slussen beräknas, vilket har gjorts från 24 november 2000 till 22 januari 2001. Från 13 till 23 november har flödet inte kunnat beräknas eftersom samtliga luckor då inte var borttagna. För denna period har flödet anpassats vid kalibrering för att ge god överensstämmelse med uppmätta vattennivåer i Säffle övre och nedre (se kap. 7.9). Beräknade och från kalibrering bestämda flöden ses i figur 5 - 5.

Tabell 5 - 1 Parametervärden använda för att beräkna flödet genom slussen (Svensson m.fl., 2002)

Parameter	Värde
g	9,81
D	1,17
C_D	1,8
B	0,30
L	50
b	8
M'	45

¹ Uppskattning av Mannings M från Reinius (1962)



Figur 5 - 5 Flöde genom slussen för den period 2000/2001 då den hölls öppen. Från 24 november och framåt är flödet beräknat, dessförinnan är flödet uppskattat i samband med kalibrering.

Beräkningen av flödet genom slussen är relativt osäker. De kraftekvationer som använts förutsätter ideala förhållanden och ger förmodligen inte en helt korrekt beskrivning av de verkliga förhållandena. Dessutom finns osäkerheter i uppskattningarna av flödesmotståndskoefficienten C_D och Mannings M . Ett felaktigt flöde genom slussen kompenseras dock till viss grad av flödet genom dämnet. Orsaken till detta är att slusskanalen och huvudgrenen genom dämnet binds samman endast ett hundratal meter uppströms från slussen.

5.4 Inflöden från oreglerade avrinningsområden

För att beräkna inflöden från de avrinningsområden det inte finns flödesmätningar från torde det bästa sättet vara att sätta upp en avrinningsmodell som beräknar avrinningen. Tillgång fanns i detta arbete till två olika konceptuella modellverktyg: *IHMS* från SMHI och *Rainfall runoff* som är ett i *MIKE 11* integrerat modellverktyg.

Båda modellerna sattes upp för att beskriva aktuella avrinningsområden och kopplades till de hydrauliska delarna. Efter jämförelser och diskussioner beslutades att endast *IHMS* skulle användas i den slutgiltiga FINKAN-modellen. Detta främst eftersom bättre kunskap finns kring värden på kalibreringsparametrar för *IHMS* än för *Rainfall runoff*, vilket beror på att *IHMS* har använts i Sverige under lång tid. Konstateras kan dock att *Rainfall runoff* är en modell uppbyggd på ett liknande sätt, men som har ett betydligt

modernare och mer lättanvänt gränssnitt med exempelvis automatisk kalibrering. För att *Rainfall runoff* ska kunna användas på ett effektivt sätt bör den till att börja med användas på ett flertal områden, där både nederbörd över området såväl som flödet ut från detta är känt. På så sätt kan en god uppfattning av storleken på modellens parametrar fås och utifrån dessa erfarenheter kan *Rainfall runoff* sättas upp för nya områden där avrinningen inte är känd.

5.4.1 IHMS

IHMS används för att beräkna avrinning utifrån kunskap om bl.a. nederbörd, temperatur, avdunstning, höjd och markegenskaper i ett avrinningsområde. Avrinningsmodellen byggdes upp av fem delavrinningsområden och tre givna inflöden (se kap. 5.1). Nödvändig information om de fem delavrinningsområdena togs fram med hjälp av GSD. För varje delavrinningsområde delades marken upp i två kategorier, öppen mark (*field*) och skog (*forest*), vilka i sin tur indelades i max 3 höjdzoner vardera. Därutöver beräknades två sjöareor för varje delområde, en för sjöar som inte utgör avrinningsområdets nedre vattenmagasin (*ilake*) och en för sjöar som gör det (*olake*). För varje kategori angavs area och medelhöjd, vilket gav mellan 6 och 8 olika zoner för varje delavrinningsområde. Avrinningsområdet och i *IHMS* använda delavrinningsområden presenteras i bilaga C.2.

Fysikaliska indata i form av tidsserier till modellen utgörs av väderinformation från SMHI. Nederbördsmätningar varje dygn kommer från fyra mätstationer: Arvika, Stömne, Svaneholm och Säffle. Temperaturmätningar varje dygn kommer från två mätstationer: Arvika och Säffle. Potentiell evapotranspiration angavs som månatligt medel för Karlstad Flygplats (Eriksson, 1981). Viktningen av nederbörd- och temperaturstationernas representation för olika delavrinningsområden gjordes genom att området delades upp i Thiessen-polygoner.

De flöden som beräknas för dämnet är behäftade med fel (se kap. 5.2) och bör inte användas vid kalibrering. Eftersom flödet är reglerat i dämnet är det dessutom inte lämpligt att kalibrera mot dessa flöden då *IHMS* förutsätter oreglerat flöde. Utöver detta har även regleringsstrategin för dämnet ändrats efter översvämningen 2000, vilket gör kalibrering mot dessa flöden än mer olämplig. Istället för kalibrering användes standardvärden och regionalt typiska värden, vilka erhållits från tidigare modellkalibreringar för avrinningsområden i närheten (Bergström, 1990). Tilläggas kan att tillgången till för regionen typiska parametervärden inte var speciellt god men värden för området uppskattades genom viktning av dessa för intilliggande områden. Använda parametervärden finns listade i bilaga A.5 tillsammans med SMHIs regionala uppskattningar, vilka dock inte fanns till hands då avrinningsberäkningarna gjordes.

Den utdata som är intressant utgör den specifika avrinningen från delavrinningsområdena benämnda: Åmotfors, Arvika, Stömne, Svaneholm och Säffle. Kompletta tidsserier för avrinningen från dessa områden genererades med modellen för användning som indata i *MIKE 11*. Den simulerade avrinningen var i samma storleksordning, relativt delavrinningsområdets storlek, som från de reglerade områdena (se tab. 5 - 2). Det är främst *Arvika* och *Lillälven* som utmärker sig med något lägre avrinning.

Tabell 5 - 2 Medelavrinning från varje oreglerat delavrinningsområde beräknad med *IHMS* samt avrinning från reglerade avrinningsområden. Jämförelse av relativ avrinning visar att storleksordningen på avrinningen är densamma från de oreglerade som från de reglerade avrinningsområdena.

	Namn i FINKAN-modellen	Area [km ²]	Medelavrinning 1995-2000 [m ³ s ⁻¹]	Specifik avrinning [mm·år ⁻¹]
Oreglerade avrinningsområden	Åmotfors	23,41	0,24	329
	Arvika	392,95	3,06	245
	Stömne	384,98	5,18	424
	Svaneholm	75,66	1,02	426
	Säffle	198,51	2,57	408
Reglerade avrinningsområden	Jösseälven	2979	37,83	401
	Lillälven	439	4,13	297
	Glasälven	290	5,02	546

Marken i området var under hösten 2000 tämligen vattenmättad och nederbörden som föll i de oreglerade avrinningsområdena resulterade snabbt i avrinning ut i Byälven. Inverkan av felaktiga kalibreringsparametrar för markvattenmagasinen i *IHMS* bör då ha liten effekt. Eftersom byälvssystemet har tämligen stora lagringsmöjligheter sker dessutom en utjämning av effekter orsakade av felaktiga inflödeshydrografer. Det bör också understrykas att osäkerheten i FINKAN-modellen som kommer uppkommer av felaktiga avrinningsberäkningar är begränsad av att endast 22,5 % av det totala avrinningsområdet omfattas av dessa beräkningar. Övriga 77,5 % utgörs av reglerade delavrinningsområden för vilka mätserier finns i olika omfattning. Känsligheten för fel i avrinningsberäkningar finns undersökta i kapitel 7.10.

6 Vattenstånd

För att de vattenståndsmätningar som gjorts i Säffle och i Arvika skulle kunna användas justerades dessa till höjdsystemet RH70. Pegeln i Arvika mättes in av tekniker på Arvika kommun och en av peglarna i Säffle (Säffle övre) har tidigare mätts in av tekniker på Säffle kommun. Dessa inmätningar visar att de lokala höjdsystemen (RH00) skiljer sig åt några centimeter mellan Arvika och Säffle⁹ och att skillnaden mellan RH70 och RH00 var ungefär 30 cm. Hur de uppmätta värdena korrigerats för att stämma med RH70 framgår av tabell 6 - 1. För att säkerställa att peglarna Säffle övre och Säffle nedre är placerade i samma höjdsystem gjordes en kontroll av detta. Denna inmätning gjordes på ett mycket enkelt och inte särskilt noggrant sätt då peglarna antingen bör sitta i samma höjdsystem eller i system markant skilda åt. Med en noggrannhet på några centimeter kunde konstateras att peglarna är monterade i samma höjdsystem.

Tabell 6 - 1 Omräkning mellan höjdsystemen RH00 och RH70 för Arvika och Säffle kommuner

	Adderas till höjder beskrivna i RH00 för konvertering till RH70 [m]
Arvika Kommun	0,307
Säffle Kommun	0,286

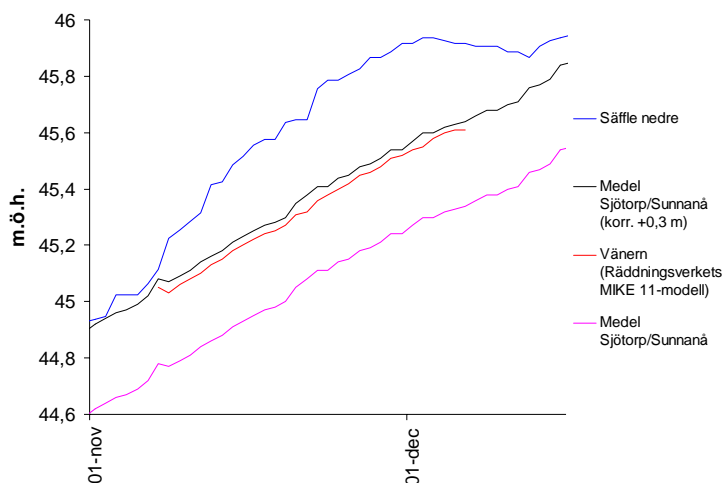
⁹ Det har i tidigare studier observerats att uppmätt vattenstånd i Säffle varit högre än i Arvika, vilket då har tolkats som en effekt av vindpåverkan. Orsaken till detta är dock förmodligen skillnaden mellan de lokala höjdsystemen.

6.1 Vänerns vattennivå

I FINKAN-modellen utgörs nedre randvillkor av Vänerns vattenstånd. Direkta mätvärden från avvägd pegel finns dock inte tillgängliga vid Byälvens utlopp. Istället används värden från andra platser där kontinuerliga mätserier registrerats, utifrån vilka en användbar nivå för Väneren kan beräknas.

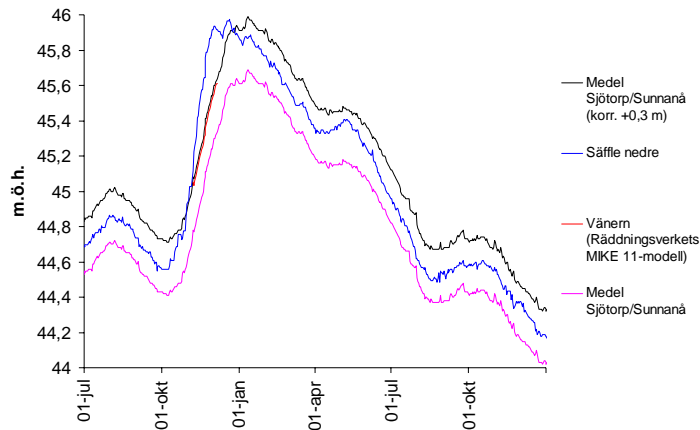
De mätningar som finns för Vänerns vattenstånd är gjorda långt ifrån Byälvens utlopp i Väneren och avviker förmodligen från det verkliga vattenståndet vid älvens utlopp. Vattenfall mäter vattenståndet i Sjötorp och Sunnanå, som ligger på östra respektive västra sidan av Väneren, ungefär halvvägs mellan Vänerns nord- och sydspets. Dessa mätningar uppvisar god samstämmighet. Hur peglarna i Sjötorp och Sunnanå är relaterade till kända höjdsystem som RH70 eller RH00 är oklart. Enligt muntlig information från Sjöfartsverket (Dyberg, 2004) är pegeln i Sjötorp monterad för sjöfartsändamål så att den visar +43,8 m ö.h. då vattennivån är 3,6 m över Sjötorps nedre slusströskel. Pegeln i Sunnanå har sedan anpassats för att ge samma mätvärde som i Sjötorp, genom anpassning av monteringshöjden då vädret varit lugnt en tid och Vänerns vattennivå kan förväntas vara horisontell. Dessa peglar ger tillräcklig kunskap om vattenstånd för sjöfarten, men den oklara avvikelser från RH70 medför problem då vattennivån används som randvillkor vid hydraulisk modellering.

Enligt muntlig information från SMHI (Ehlert, 2004) anges vattenståndet på peglarna i Sjötorp och Sunnanå i RH00 och cirka 0,3 m ska adderas till dessa värden för att beräkna vattennivåerna i RH70. Då 0,3 m adderas till medelvärdet av vattenståndet i Sjötorp och Sunnanå fås vattennivåer för Väneren som visas i figur 6 - 1. Dessa verkar stämma överens med den vänernivå som används i Räddningsverkets *MIKE 11*-modell (se kap. 2.2), så när som på en förskjutning på några centimeter.



Figur 6 - 1 Olika versioner av Vänerns vattennivå.

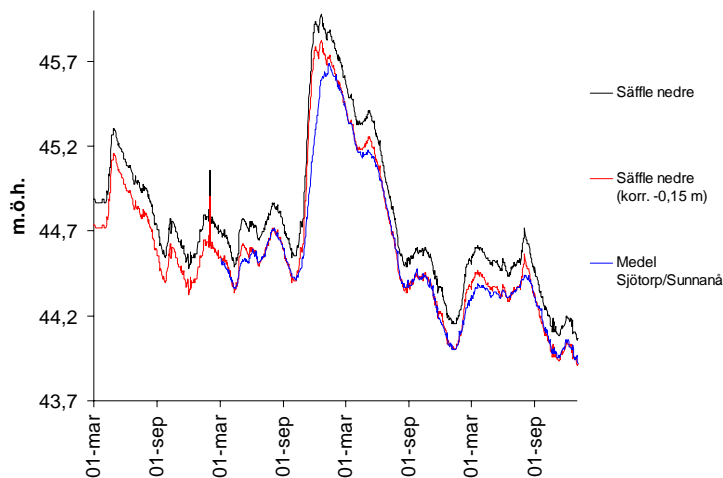
Vid en betraktelse av vattenstånd utritade i figur 6 - 1 över en längre tidsperiod framkommer att denna metod för beräkning av vänernivåer i RH70 är helt orimlig. Det skulle innebära att vattenståndet i Vänern är högre än i Säffle nedre för alla tidsperioder utom översvämningen år 2000 (se fig. 6 - 2) och att vattnet då skulle rinna från Vänern till Säffle, vilket inte är fallet.



Figur 6 - 2 Olika versioner av Vänerns vattennivå.

Eftersom den föreslagna korrigeringen inte stämmer kan vattenstånden som avläses på peglarna i Sjötorp och Sunnanå inte vara i RH00, utan i ett höjdsystem där avvikelser från RH00 respektive RH70 är okänd. Dessa avvikelser kan tas reda på genom invägning av peglarna till RH70, vilket dock ligger utanför detta projekt. Istället har medelvärdet av de nivåer som Vattenfall mätt upp i Sjötorp och Sunnanå använts i okorrigerat skick. Detta kan tyckas vara en grov förenkling, men vid kalibrering har anpassning gjorts till vattenståndet i Säffle nedre. Detta innebär att älvsträckan mellan Säffle och Vänern kan vara något ofysikaliskt beskriven, men ovanför Säffle har detta ingen effekt.

För den andra perioden som simulerats, våren 1999, finns inte uppmätta vänernivåer tillgängliga. Vattenfall som levererat vattenståndsmätningarna gjorde tidigare endast manuell registrering på papper, vilka finns tillgängliga hos Vattenfall i Trollhättan, men skulle innebära en stor arbetsinsats att leta reda på och digitalisera vilket därför inte gjorts. SMHI har dessa mätningar digitaliserade men rekviderades inte därifrån eftersom den därifrån ökade modellprecisionen inte bedömdes motivera kostnaderna. I stället användes en något konstlad metod, vilken dock bör ge ett nöjaktigt resultat. I figur 6 - 3 följer vattennivåerna vid Säffle nedre och i Vänern varandra tämligen väl men med en förskjutning på omkring 0,15 m, vilket alltså är fallhöjden mellan Säffle nedre och Vänern. För att enkelt få tillgång till en serie med vattenstånd som någorlunda stämmer överens med Vänerns vattenstånd har alltså 0,15 m subtraherats från Säffle nedre. Känslighetsanalys av Vänerns vattenstånd som beskrivs i kapitel 7.10 visar att modellens känslighet för variationer av nedre randvillkoret är relativt liten och därför bedöms den använda metoden vara tillförlitlig. Den från vattenståndsberäkningen ökade osäkerheten hos modellen bör alltså vara liten.

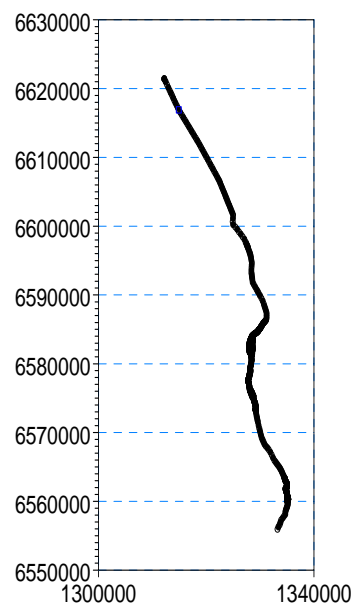


Figur 6 - 3 Beräknat vattenstånd för Vänern genom justering av mätningar vid Säffle nedre.

7 FINKAN-modellen

I detta kapitel finns en detaljerad redogörelse för uppbyggandet av den hydrauliska modellen. Det första steget i uppbyggandet av en modelluppställning i MIKE 11 är att definiera det geografiska område man arbetar i samt ange älvsträckningen. Älvsträckningen anges i Rikets Nät 1990, RT90, men har ingen direkt beräkningsmässig inverkan på modellen utan utgör främst ett orienteringsverktyg under arbete med modell- och resultatfiler. Den älvsträckning som används i FINKAN-modellen redovisas i figur 7 - 1. Till denna översikt läggs sedan övriga för beräkningarna nödvändiga modellkomponenter. I modellen inkluderas vattenmagasinen Glafs fjorden och Harefjorden som älvsträcka och vattendraget i figur 7 - 1 sträcker sig därmed från Jössefors ner till Vänern. Flödet är riktat neråt i figuren.

För simuleringarna med FINKAN-modellen används vågapproximationen *Fully Dynamic*, då den tillräckligt väl beskriver flödet i älven samtidigt som den datorkraft som fanns tillgänglig, en standard-PC, är tillräcklig för att simulera intressanta översvämningförlopp med tillräckligt kort tidssteg. Vågapproximation *Higher Order Fully Dynamic* kunde inte användas på grund av det sätt som flödesmotståndet definierats (se kap. 3.4.3 och 3.4.4)



Figur 7 - 1 Modellöversikt över Byälvens sträckning i *Network Editor* från FINKAN-modellen. Koordinater angivna i RT90.

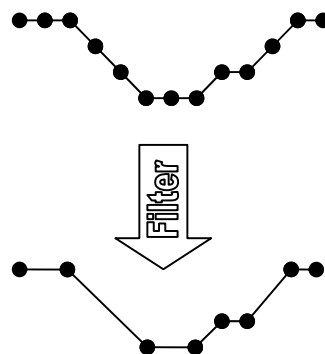
7.1 Tvärsnitt

Efter att ha definierat älvsträckning läggs tvärsnitt till modellen för att beskriva älvens topografi. Utifrån den TIN-modell som förberetts (se kap. 4) extraherades tvärsnitt med hjälp av *MIKE 11 GIS*. Proceduren var omständig, mycket beroende på att TIN-modellen som användes var mycket stor och *ArcView*, programmet i vilket *MIKE 11 GIS* utgör ett insticksprogram, inte riktigt orkade med. Vidare uppkom problem med att mjukvaran havererade med jämna mellanrum då *MIKE 11 GIS* laddats. Problemet löstes genom att alla filer sparades med mycket täta intervall för att minimera dubbelarbete i samband med mjukvarukrascher. Vid export av tvärsnitt från *MIKE 11 GIS* till *MIKE 11* kunde endast cirka 10 tvärsnitt i taget exporteras eftersom programmet annars kraschade.

Den *MIKE 11*-licens som under arbetets gång fanns tillgänglig är begränsad såtillvida att maximalt 450 *h*-punkter tillåts vid simulering. Varje tvärsnitt utgör vid simuleringen en *h*-punkt. Utöver dessa har ytterligare några *h*-punkter lagts in. Denna gräns utgör den viktigaste begränsningen i antalet tvärsnitt som kan användas tillsammans med det praktiska faktum att ett ökat antal tvärsnitt ger längre simuleringstider. FINKAN-modellen byggs upp av 327 tvärsnitt.

Valet av tvärsnittsplacering gjordes med flera aspekter i åtanke. Visuell inspektion av TIN-modellens utseende på den aktuella platsen utgjorde den viktigaste, men hänsyn togs också till tidigare kunskaper om var trängre partier misstänks finnas. Tätare placering av tvärsnitt användes vid förträngningar och där tvärsnittets utseende varierade starkt. Vid längre uniforma älvpartier och i större vattenmagasin glesades tvärsnitten ut betydligt. Exakt area som funktion av vattenstånd hos magasin längs älvsträckningen hanterades inte genom tvärsnitt utan separat (se kap. 7.1.1). Endast ett fåtal tvärsnitt användes för att beskriva de större vattenmagasinen Glafs fjorden och Harefjorden.

TIN-formatet medger varierad upplösning på de data som hanteras. Denna princip att hantera data används dock inte när det gäller tvärsnittsextraktion i *MIKE 11 GIS* som från början konstruerats för hantering av höjdmodeller i rasterformat med uniform upplösning. Då ett tvärsnitt genereras i *MIKE 11 GIS* samplar mjukvaran höjdnivån från TIN-modellen med ett givet intervall längs sträckningen av det av användaren angivna tvärsnittet. Då tvärsnitten för FINKAN-modellen extraherades samplades sträckningen som standard varje meter förutom för de tvärsnitt som spänner upp Glafs fjorden och Harefjorden där tvärsnitten istället samplades var tionde meter. Vid extraktionen var dock ett gränsvärde på 300 samplingspunkter, även kallade *XZ*-punkter, per tvärsnitt satt. Då detta antal punkter överskreds initierades en filterrutin för att reducera mängden *XZ*-punkter. Filterrutinen var inställd så att *XZ*-punkter vilka gjorde att tvärsnittssektionens lutning ändrades med mindre än 0,1 % rensades bort och den aktuella delen istället representerades av en linjär interpolation mellan kringliggande *XZ*-punkter. Effekten av filterrutinens beskrivs i



Figur 7 - 2 Illustration av filterfunktionen för reducering av *XZ*-punkter vid tvärsnittsextraktion med *MIKE GIS*.

figur 7 - 2. Aktivering av filterrutinen är den enda åtgärd som MIKE 11 GIS vidtar då antalet XZ-punkter överskrider specificerat maximalt antal. Därför kan antalet XZ-punkter på ett tvärsnitt mycket väl överstiga 300 om det visar sig att filterrutinen med givna inställningar inte reducerar antalet så att de understiger 300 till antalet. Sammanfattningsvis bedöms modellpåverkan av förenklingen som filtreringen innebär vara helt försumbar.

7.1.1 Magasinens area som funktion av vattennivå

Då vattnet stiger i de större magasinerna längs älvsträckan varierar magasinens volym på ett specifikt sätt beroende på strändernas lutning i magasinerna. Där täta tvärsnitt används för att beskriva älvens topografi beskrivs detta bra men i de områden där tvärsnitt endast beskriver en grov modell av vattenkroppen förloras precisionen. För att kompensera för detta läggs en extra lagringsvolym i form av en horisontell area till varje höjdnivå för Glafs fjorden och Harefjorden vilken beräknats som skillnaden mellan den verkliga arean och den area som en modell som spänns upp av tvärsnittet ger. Dessa ytor beräknades för vattenstånd mellan 45,1 och 48,9 m ö.h. i Harefjorden och mellan 45,1 och 49,9 m ö.h. i Glafs fjorden. Resultaten, och skillnaden som sedan adderas korresponderande vattenmagasin i modellen redovisas i bilaga A.6.

7.2 Övre och nedre randvillkor

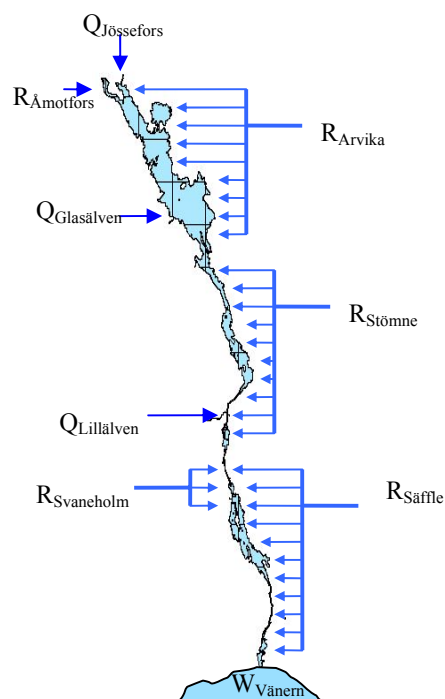
Övre randvillkor utgörs av ett inflöde vid modellens början och är lika med av summan av tappning och spill från Jössefors kraftstation. Nedre randvillkor utgörs av Vänerens vattennivå enligt beskrivning i kapitel 6.1 och är placerat 75 815 m nedströms från modellens startpunkt, vilket motsvarar Byälvens utlopp i Väneren.

Tabell 7 - 1 Randvillkor till FINKAN-modellen. I benämningarna representerar Q punktinflöden, R oreglerad avrinning och W en plan vattenyta.

Benämning	Typ av randvillkor	Placering ¹
$Q_{\text{Jössefors}}$	övre randvillkor	0
$R_{\text{Ämottfors}}$	punktkälla	10
R_{Arvika}	distribuerat inflöde	10 - 20 290
$Q_{\text{Glasälven}}$	punktkälla	17 263
$R_{\text{Stömne}}$	distribuerat inflöde	20 290 - 50 295
$Q_{\text{Lillälven}}$	punktkälla	45 615
$R_{\text{Svaneholm}}$	distribuerat inflöde	50 295 - 55 854
$R_{\text{Säfte}}$	distribuerat inflöde	50 295 - 74 831
$W_{\text{Vänern}}^2$	vattenyta	75 815

¹ placeringen angiven i meter nedströms från modellens övre randvillkor

² vattennivån justerad enligt kapitel 6.1



Figur 7 - 3 Schematisk beskrivning av randvillkors placering längs vattendraget. Inflöden benämnda enligt tabell 7 - 1.

7.3 Inflöden

Inflöden till FINKAN-modellen utgörs förutom av övre randvillkor dessutom av ett antal andra flöden in i systemet. Detta dels i form av punktkällor som representerar Lillälven, Glasälven och det oreglerade delavrinningsområdet som bidrar med vatten längst upp i Glafs fjorden (Åmotfors) och dels i form av inflöden som är utspridda längs vattendragets sträckning. Inflödet från oreglerade avrinningsområden beskriver ett gradvis ökat flöde längs älvsträckan genom direkt bidrag från grundvatten, ytavrinning och avrinning genom mindre bäckar och diken som inte representeras av någon punktkälla. Alla inflödens placering längs modellens älvsträckning anges i tabell 7 - 1 och illustreras geografiskt i figur 7 - 3.

7.4 Dämmet

Dammluckorna i Säffle består av tre konvexa luckor som individuellt regleras så att de sänks ner mot en tröskel på dämmets botten för att begränsa flödet. Luckorna är vardera 10,6 m breda och är placerade bredvid varandra, men med cirka en decimeter avstånd till ytterkanterna på vardera sida, så att konstruktionen då luckorna inte används består av en 32 m bred öppning med en cirka 75 cm hög tröskel på botten.



Figur 7 - 4 Dämnet som är en konstruktion under strömbron som förbinder östra Säffle centrum med kanalön. Bilden till vänster är tagen vid lågt vattenstånd då alla luckorna används för att begränsa flödet och bilden till höger är tagen vid högt vattenstånd då alla luckor är uppfällda för att lämna vattnet en så fri passage som möjligt.

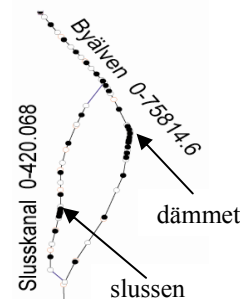
Konstruktionens utseende och funktion beskrivs mera i detalj i bilaga B.1 där dämnet studerats mera ingående i ett försöka att modellera dynamiken i samband med att luckornas reglering försökte efterliknas i FINKAN-modellen. Luckorna i dämnet syns i figur 7 - 4. Problem med numerisk instabilitet i samband med en dylik detaljmodellering gjorde dock att dessa försök övergavs. Eftersom FINKAN-modellens främsta syfte är att undersöka förhållanden under höga vattenstånd och uteslutande kalibrerades under perioder då alla dammluckor var öppna kunde dock konstruktionen med rörliga luckor tas bort utan att det påverkar flödessituationen. För att modellera dämmets egenskaper då luckorna hölls öppna ersattes det i modellen med en ränna som antas motsvara konstruktionens verkliga mått och nivåer. Dämmets hydrauliska egenskaper beskrivs inte fysikaliskt korrekt. Istället beskrivs rännans egenskaper med hjälp av botten och kanternas flödesmotstånd på sträckan vilket ändrades fritt vid kalibrering. För att

modellkonstruktionen skulle uppföra sig korrekt ansattes extremt höga flödesmotstånd i rännan (se bilaga A.7). Sammantaget innebär detta att dämnet modelleras som en trång sektion med högt flödesmotstånd men utan speciella strukturer i form av trösklar eller liknande som orsakar turbulens. Tack vare tillförlitliga vattennivåmätningar vid peglarna benämnda Säffle övre och Säffle nedre har man dock god uppsikt över dämmets påverkan på vattennivåerna och torde därmed kunna efterlikna dess totala flödespåverkan relativt väl. Detaljstudier av flödesförhållanden inom konstruktionen som representerar dämnet är dock inte möjliga med detta modellupplägg.

7.5 Slussen

Slusskanalen konstruerades som en älvgren parallell med dämnet, vilket ses i figur 7 - 5 från *River Network Editor*. Kanalen beskrivs av tvärsnitt från höjdmodellen samt mätningar och uppgifter vilka muntligen meddelats från Sjöfartsverket (Dyberg, 2004). Mannings M som beskriver flödesmotståndet sattes till $45 \text{ m}^{1/3}\text{s}^{-1}$, vilket bedömdes vara rimligt utifrån att delar av kanalen är stensatt och resten består av en jämn, brant slänt med kort gräs (Reinius, 1962).

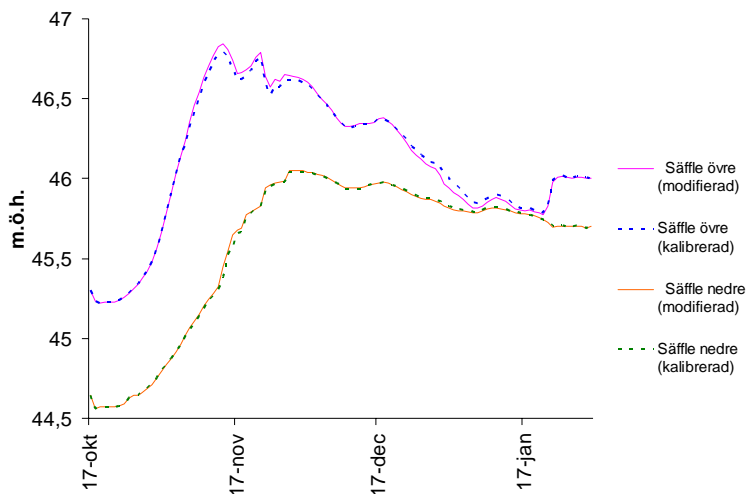
För att beskriva effekten av att slussen öppnades beräknades, som beskrivet i kapitel 5.3, flödet utifrån kraftekvationer och modellerades inte i *MIKE 11*. Orsaken till detta var att det var svårt att beskriva balksektionen och borttagandet av luckorna på ett bra sätt; försök som gjordes orsakade instabiliteter i modellen. För att implementera den beräknade avbördningen genom slussen infördes en *Structure operation* kallad *Regulating Structure - Function of Time* i slusskanalen. Denna funktion tvingar fram ett flöde definierat i en tidsserie, vilket endast påverkas av tidsserien. Det framtvingade flödet påverkar dock modellerade vattennivåer och flöden i resten av modellen.



Figur 7 - 5 Älven delas upp i en slusskanal och en huvudgren som rinner genom dämnet.

7.5.1 Hantering av slussen i olika scenarier

I de simuleringar där hanteringen av slussen utförs på samma sätt som under översvämningen hösten 2000 måste beaktas att flödet genom slussen i verkligheten förändras om vattennivåerna i Säffle övre och Säffle nedre förändras. Vattenståndet i Säffle påverkas av åtgärder i älven och undersökning måste göras av vilken effekt dessa vattenståndsförändringar har för flödet genom slussen. Nivåerna vid Säffle övre och Säffle nedre vid den simulering som gav störst förändring i vattenstånd vid Säffle övre, av de scenarier där slussen hanteras som under översvämningen år 2000, redovisas i figur 7 - 6 tillsammans med vattennivåerna för den kalibrerade och oförändrade modellen. De små skillnaderna i vattenstånd som förändringarna i scenariot gav upphov till har marginell effekt på flödet genom slussen. Slussflödet behålls därför, som det beräknats utifrån verkliga uppmätta nivåer, vid simuleringen av alla enskilda åtgärder där slussen hanteras på samma sätt som under översvämningen 2000.

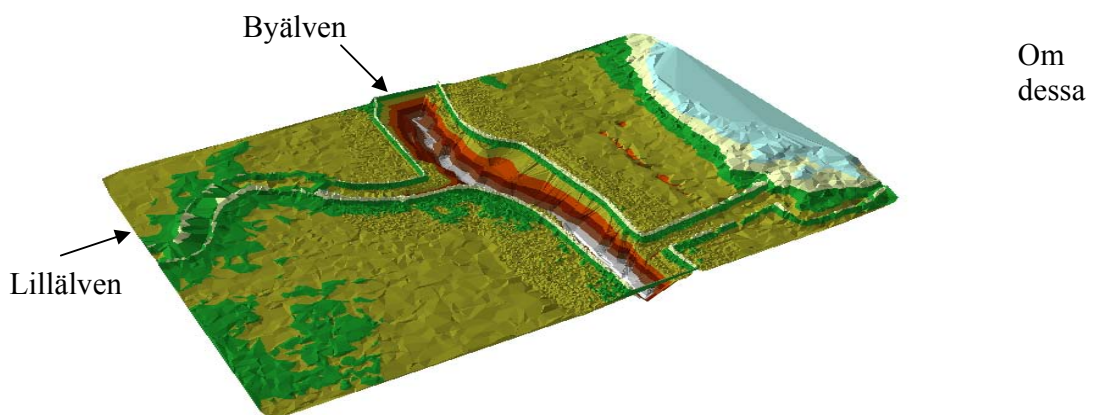


Figur 7 - 6 Vattenstånd vid Säffle övre och Säffle nedre. 'modifierad' är den simulering som orsakar störst ändring av vattenståndet vid Säffle övre och 'kalibrerad' är den kalibrerade och oförändrade modellen.

För öriga scenarier som simulerar översvämningen 2000 med vidtagna åtgärder, har slussen antingen hållits stängd eller helt öppen. Även balksektionen som fanns kvar under översvämningen 2000 har tagits bort, och flödet bromsas då endast av flödesmotståndet orsakat av råheten hos slusskanalens botten och kanter. Slussen har dessutom hållits öppen under samma tidsperiod som luckorna i dämnet varit helt uppfällda, vilket innebär att den är öppen under hela simuleringsperioden. Anledningen till detta förfarande är att det bedömdes osannolikt att hanteringen och öppningen av slussen skulle ske på ett identiskt sätt vid en ny översvämningssituation.

7.6 Översvämningssområden

På ett par sträckor längs älven finns invallningar som hindrar vatten från att översvämma åkermark. Detta gäller främst ett område strax norr om Gillberga kyrka, där båda sidor om älven är invallade och ett område drygt en kilometer söder om Nysäter, där främst östra sidan är invallad. Vallarna syns tydligt i figur 7 - 7 så som de är representerade i höjdmodellen som beskriver området topografi (se kap. 4).



Figur 7 - 7 Bilden visar höjdstrukturen på ett utsnitt norr om Gillberga kyrka som inkluderar Lillälvens utlopp. Vallarna som byggts för att skydda omkringliggande åkermark framgår mycket tydligt.

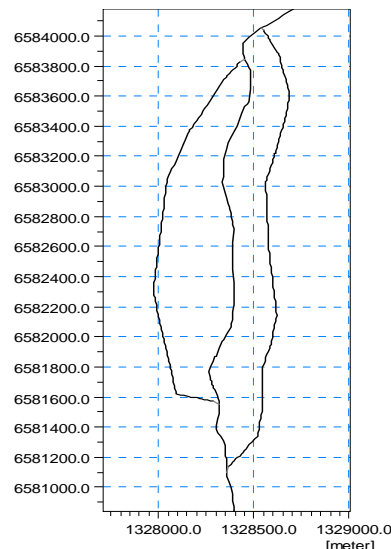
områden i *MIKE 11* skulle representeras av endast tvärsnitt vinkelräta mot älvsträckningen kommer de låglänta ytorna utanför vallarna att bidra till flöde så fort vattnet når dess nivå, även om vallarna fortfarande inte är översvämmade. För att lösa detta problem delades älven upp i flera grenar, en som utgör huvudfåran, och sidogrenar som utgör flödet över vallarna till översvämningssområdena och tillbaka till huvudfåran. Modellkonstruktionen illustreras för området norr om Gillberga kyrka i figur 7 - 8. Sidogrenarna börjar och slutar med tvärsnitt som utgör en digitalisering av ryggen på den vall som utgör hindret för inflöde respektive utflöde av vatten till/från översvämningssområdet. På så sätt hindras vatten från att äntra området så länge vattenståndet i huvudfåran är lägre än vallarna.

Sammanfattningsvis har därmed separata älvgränar som representerar översvämningssområdena byggts upp. Förändrade förhållanden kan enkelt simuleras genom att flödesmotstånd och tvärsnitt ändras för dessa.

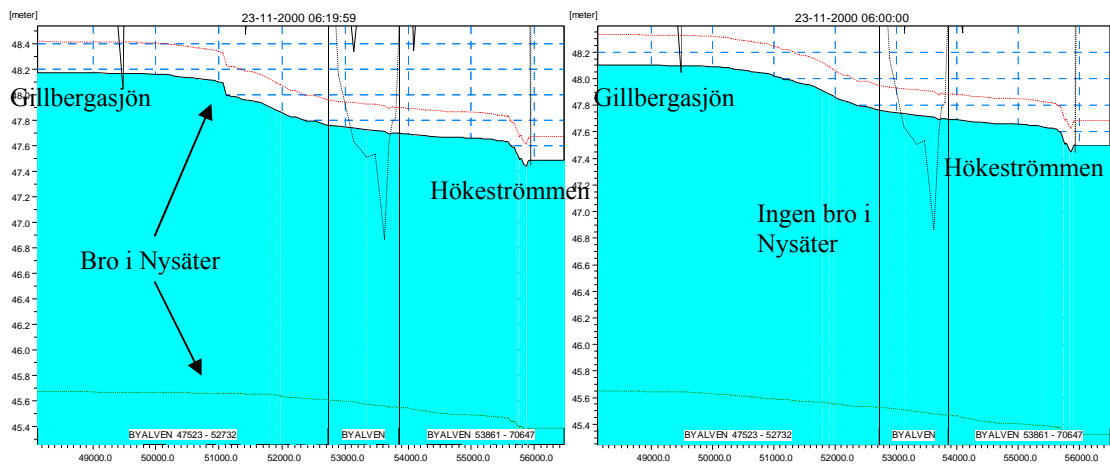
7.7 Broar

Beskrivning av broar görs i *MIKE 11* med *Structure operations*. Med de funktioner som är avsedda att beskriva broar med är det dock svårt att beskriva broarna som korsar Byälven. Detta främst eftersom det är svårt att få översikt över hur de tillgängliga funktionerna ska ställas in för att en specifik bro ska beskrivas korrekt. Brofunktionerna verkar inte heller vara särskilt välanvända. Vid konsultation av DHI talade de om att en funktion för att beskriva parallella kulvertar använts i vissa fall, istället för tillgängliga brofunktioner (Vikström, 2004); denna metod har även SMHI använt enligt muntlig uppgift från Andersson (2004). Då NVE (Norges vassdrags- och energidirektorat) simulerat broar i *MIKE 11* har funktioner för beskrivning av trösklar på botten använts. Anledningen till att brofunktionerna inte används i större utsträckning är förmodligen helt enkelt för att de är dåliga.

Eftersom tillförlitliga vattenståndsmätningar kring broar i Byälven inte finns är det svårt att, utifrån kalibrering av andra funktioner (som trösklar eller kulvertar), beskriva broar. Försök gjordes att använda brofunktionerna, men resultaten bedömdes som otillförlitliga, och i den slutliga FINKAN-modellen detaljsimuleras därför inte broar. Det flödesmotstånd som bropelare och liknande utgör beskrivs istället av ökat motstånd mot botten, utspjutt över hela älven. Detta förfarande kan, förutom felaktigt flödesmotstånd mot botten, tänkas ge upphov till felaktiga vattennivåer i närheten av broar, då språng i vattenstånd kring dessa inte beskrivs utan jämnas ut över en längre sträcka. Ändringar i vattennivå illustreras i figur 7 - 9 som visar en simulering där bron i Nysäter har försökt beskrivas med en av brofunktionerna.



Figur 7- 8 Figuren visar hur älvsträckningen delar sig i tre grenar av vilka sidogrenarna utgör översvämningssområden och mittgrenen utgör huvudfåran. Flödesriktningen är neråt och siffrorna längs axlarna är RT90-kordinater.



Figur 7 - 9 I den vänstra figuren visas ett språng i vattenytan orsakat av simulerad bro i Nysäter. Språnget syns inte alls vid låga vattenstånd men framträder vid höga vattenstånd, då även flödet ökar och således flödesmotståndet orsakat av bropelarna ökar. I den högra figuren visas en motsvarande simulering, utan specifik beskrivning av bron i Nysäter. Siffrorna längst ned visar avståndet i meter från Jössefors. (De svarta vertikala strecken kan ignoreras)

7.8 Val av tidssteg och avstånd mellan beräkningspunkter

Den licens för *MIKE 11* som fanns tillgänglig under arbetet stöder endast dynamisk modellering och således har detta använts. I Byälven sker dock långsamma förändringar av vattenstånd och flöden, vilket också gäller modellens randvillkor. Detta innebär att dynamisk modellering inte är nödvändig och att långa tidssteg kan användas. I de allra flesta simuleringar har 30 min tidssteg använts, vilket i praktiken innebär (se kap. 3.4.7) att modelleringen är kvasistationär¹⁰. För att modelleringen ska kallas dynamisk behövs betydligt kortare tidssteg. Ett vattendjup på 8 m, vilket var typiskt för Byälven under översvämningen 2000, innebär att vågor fortplantar sig (enl. ekv. (3-17)) med en hastighet av cirka $9 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Avstånden mellan intilliggande beräkningspunkter är på vissa platser i FINKAN-modellen mindre än 10 m och det tar då i storleksordningen 1 s för vattnet att passera en beräkningscell, vilket teoretiskt innebär (enl. ekv. (3-18)) att ett tidssteg på ungefär 1 s måste användas för att kunna beskriva vågfortplantning.

Lämpligt avstånd mellan intilliggande beräkningspunkter kan, som beskrivs i kapitel 3.4.8, beräknas utifrån att det bör finnas 30-50 beräkningspunkter per våglängd. Denna våglängd definieras i ekvation (3-19) och ger tillsammans med ett vattendjup på 8 m och 50 beräkningspunkter per våglängd att avståndet mellan beräkningspunkterna bör vara knappt 1 300 m. I FINKAN-modellen är avståndet mellan intilliggande beräkningspunkter i sjöarna upp till 1 000 m medan det i de trånga älvsektionerna är betydligt mindre, ibland mindre än 10 m där älvtopografin behöver beskrivas noggrant.

¹⁰ I några simuleringar krävdes betydligt kortare tidssteg och dynamisk modellering. Detta noteras i förekommande fall i kapitel 8.

Värt att notera är att Froudes tal aldrig överstiger 0,6 i den kalibrerade modellen. Innebörden av detta är att flödet alltid är subkritiskt och att det inte förekommer någon bestämmande sektion.

7.9 Kalibrering av modellen

Även om verklig topografi och verkliga randvillkor har försökt efterliknas i största möjliga utsträckning i FINKAN-modellen, behöver anpassning till tidigare mätningar i Byälven göras. Anpassningen är gjord mot höga vattenstånd för att modellen ska beskriva översvämningssituationer på ett korrekt sätt; anpassning för låga vattenstånd har inte gjorts.

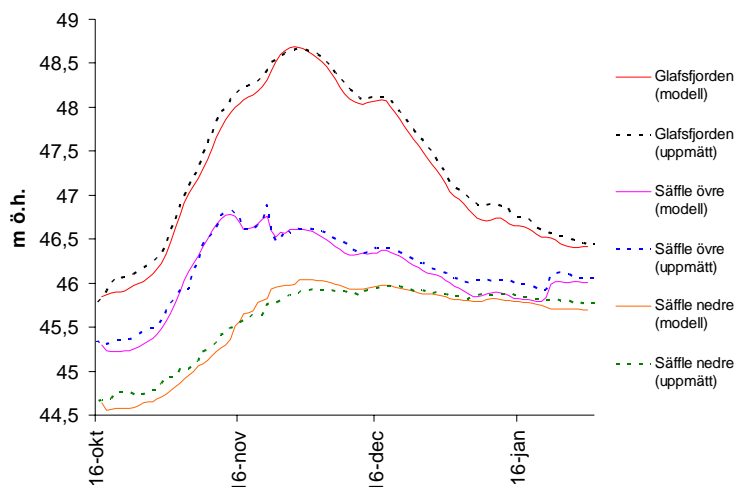
Kalibreringen av modellen görs genom att botten råhet justeras. Råheten kan ändras varsomhelst längs älven och definieras separat i tre olika höjdzoner, för vilka gränserna mellan zonerna kan väljas (se kap. 3.4.3). Att råheten kan ändras så fritt ger stora kalibreringsmöjligheter. För att få så bra anpassning som möjligt för höga vattenstånd valdes högt liggande zoner, vilket innebär att den nedersta zonen sträcker sig en bra bit över normalvattenstånd och den mellersta och översta zonen är, vid normalt vattenstånd, uppe på land. De råheter och den zonindelning som gav bäst anpassning till uppmätta vattenstånd visas i bilaga A.7. En annan möjlighet är att göra zonindelningen på ett fysikaliskt mer välförankrat sätt, så att exempelvis nedersta zonen är under den höjd där vass växer, mellersta zonen är vassbevuxet område och den översta zonen är ovanför vassen. Denna metod valdes dock bort då den gav sämre anpassning vid höga vattenstånd.

Eftersom tillgången av data från perioder med högt vattenstånd är dålig har samtliga perioder, som bedömts vara användbara för anpassning till översvämningssituationer, använts för kalibrering. Därmed har ingen möjlighet funnits till validering av modellen.

7.9.1 Kalibrering mot två oberoende perioder

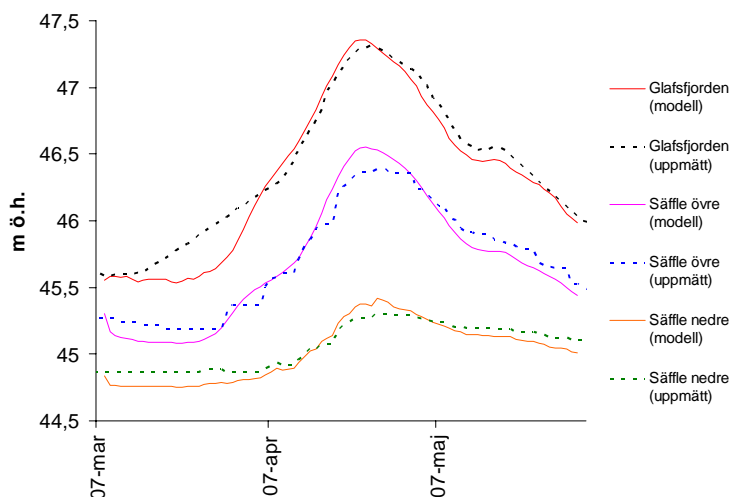
Modellen har kalibrerats mot två oberoende perioder för att få en bättre överensstämmelse med verkligheten än om endast en period använts. Den kalibreringsperiod vilken bedömts som viktigast är översvämningssperioden oktober 2000 – januari 2001. Den andra perioden är mars – maj 1999 då tämligen höga vattenstånd rådde i byälvs-systemet, om än inte lika höga som under översvämningen 2000. Det maximala vattenståndet för Glafs fjorden var under våren 1999 ungefär 1 m lägre än vid översvämningen 2000.

Kalibreringen av modellen har gjorts mot uppmätta vattennivåer och i viss mån mot en flödesserie från SMHI för översvämningen 2000. För våren 1999 finns ingen användbar flödesserie att tillgå. Modellen har anpassats för att ge så god överensstämmelse som möjligt för vattennivåer, både för perioden 1999 och perioden 2000, dock med betoning på 2000. För att kalibreringen av våren 1999 skulle bli acceptabel gjordes avkall på vissa delar av anpassningen under översvämningen 2000. Effekten av detta är att modellerade vattenstånd är för låga strax innan samt strax efter tidpunkten för maximalt vattenstånd i Glafs fjorden, samt under månaderna oktober och januari (se fig. 7 - 10).



Figur 7 - 10 Kalibrering av vattenstånd i Glafs fjorden samt vid Säffle övre och Säffle nedre för översvämningsperioden 2000.

För simuleringen under 1999 underskattas vattenstånden något vid låga vattenstånd och omvänt är de maximala vattenstånden, främst vid Säffle övre, för höga (se fig. 7 - 11).

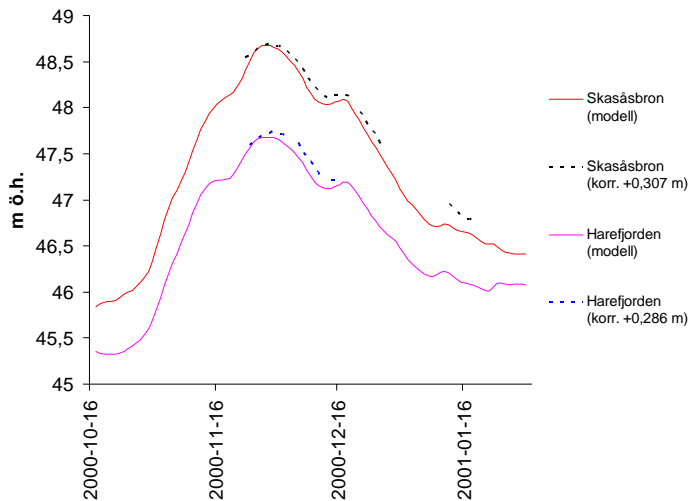


Figur 7 - 11 Kalibrering av vattenstånd i Glafs fjorden samt Säffle övre och Säffle nedre för den simulerade perioden våden 1999. Den stora avvikelsen för Glafs fjorden under slutet av mars beror på att vattennivåer inte har mätts under denna tid och interpolering har gjorts mellan en nivå i mitten av mars och en i mitten av april.

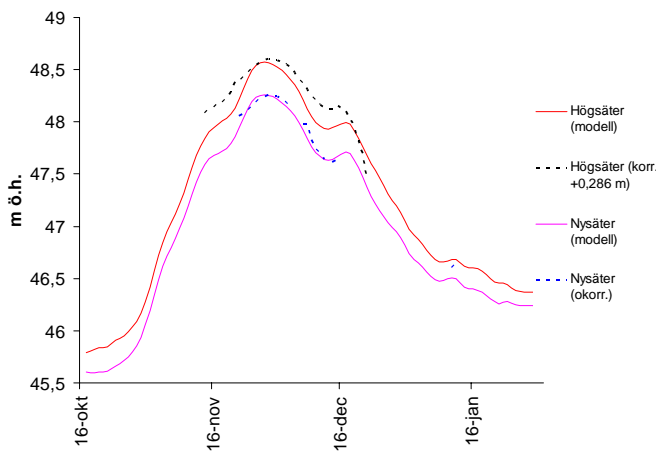
7.9.2 Jämförelse med osäkra mätningar

Peglarna i Arvika och Säffle är invägda i RH70 och därför har mätningar från dessa använts vid kalibrering. Mätningarna vid övriga peglar har endast använts för jämförelse, eftersom monteringshöjderna för dessa är osäkra. Höjderna är i samtliga fall utom för Nysäter korrigerade med den för aktuell kommun rådande differensen mellan RH00 och RH70, då de antas vara monterade i RH00 (se kap. 6). För Nysäter kan mätningarna inte vara gjorda i RH00 eftersom justering med differensen mellan RH70 och RH00 ger helt felaktiga värden. Tämligen god överensstämmelse med simulerade nivåer fås för Nysäter

då ingen korrektion görs, vilket tyder på att pegeln är monterad i RH70. Jämförelse mellan beräknade och uppmätta vattenstånd visas i figurerna 7 - 12 och 7 - 13. Som tidigare ger modellen, i jämförelse med mätvärden från översvämningen 2000, något låga värden strax före och strax efter tidpunkten för maximal vattennivå.

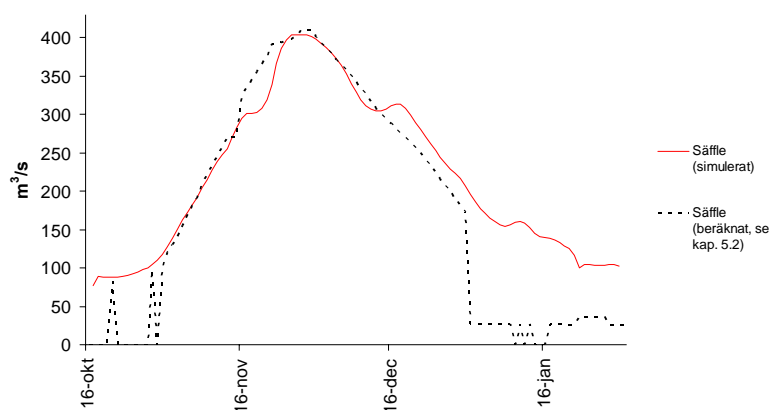


Figur 7 - 12 Jämförelse mellan uppmätta vattenstånd vid Skasåsbron och i Harefjorden med motsvarande simulerade vattenstånd för översvämningsperioden 2000.



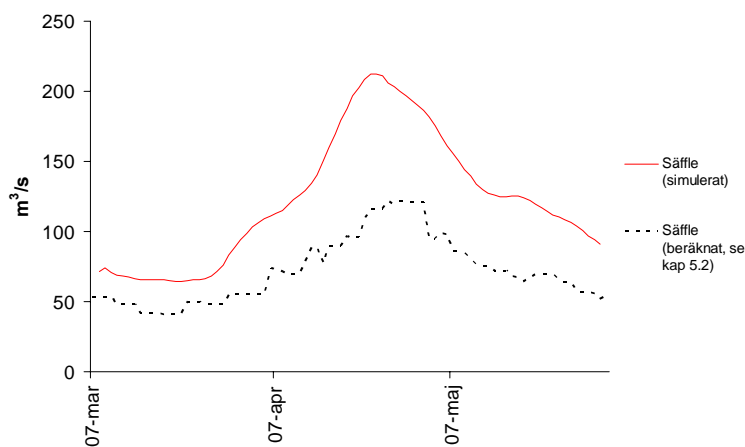
Figur 7 - 13 Jämförelse mellan uppmätta vattenstånd vid Högsäter och Nysäter med motsvarande simulerade vattenstånd för översvämningsperioden 2000. Observera att vattenståndet vid Nysäter inte är korrigerat till RH70, men att god överensstämmelse fås, vilket förmodas bero på att pegeln i Nysäter är monterad i RH70.

För Byälven finns inga flödesmätningar gjorda, med undantag av ett fåtal specialmätningar som gjordes av SMHI under översvämningen 2000. För perioden september – december 2000 gjorde SMHI dessutom en uppskattning av flödet genom Säffle. Osäkerheten i denna uppskattning är dock så stor (se kap. 5.2) att simulerat flöde endast jämförts med uppskattningen och ingen egentlig kalibrering har gjorts (se fig. 7 - 14).



Figur 7 - 14 Simulerat flöde genom Säfte i jämförelse med tillgänglig hydrograf för översvämningssperioden år 2000. Den plötsliga minskningen av flöde i hydrografen beror på att SMHI gjorde en uppskattning av flödet från 1 september till 31 december, därefter är flödet beräknat enligt tillvägagångssättet beskrivet i bilaga A.4 vilket kraftigt underskattar flödet.

För våren 1999 finns endast flödesberäkning enligt bilaga A.4 gjord vilken kraftigt underskattar stora flöden. Som ses i figur 7 - 15 är det simulerade flödet drygt $100 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ större än det beräknade flödet, av vilka det simulerade bör vara tämligen korrekt.



Figur 7 - 15 Simulerat flöde genom Säfte i jämförelse med tillgänglig hydrograf för den simulerade perioden år 1999. Den stora skillnaden mellan simulering och hydrograf beror på att flödet i denna är beräknat enligt tillvägagångssättet beskrivet i bilaga A.4 vilken kraftigt underskattar flödet.

7.10 Osäkerhetskontroll av modellen

För att beskriva modellens känslighet för variationer i indata bör osäkerhetsanalys göras. Eftersom det i *MIKE 11* inte finns någon automatik för tillbörlig osäkerhetsanalys, som exempelvis Monte Carlo-simulering¹¹, har istället en mycket enkel känslighetsanalys gjorts.

¹¹ I *MIKE 11 2004* finns verktyg för detta, vilka ej har hunnit utvärderas då denna version blev tillgänglig allt för sent.

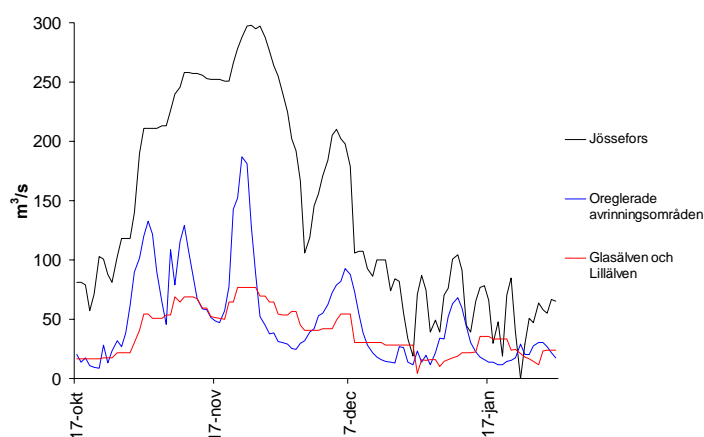
I en känslighetsanalys studeras inte de kumulativa osäkerheterna, som i en osäkerhetsanalys, utan osäkerheten i utdata orsakad av förändring hos endast en indatavariabel i taget. I modellen finns ett mycket stort antal variabler behäftade med osäkerhet, för vilka känslighetsanalys skulle kunna göras. För att rationalisera arbetet analyserades dock modellens känslighet endast för variationer i inflöden samt för variationer av Vänerns vattenstånd. De variabler i utdata som studerats är maxflödet nedanför kanalön i Säffle och Glafs fjordens maxnivå, båda år 2000. Inflödena har ändrats +/-20 %. Vänerns vattenstånd har varierats +/-0,184 m, vilket motsvarar storleken på variansen för Vänerns vattennivå, för den period som modellerats. Resultat från känslighetsanalysen visas i tabell 7 - 2.

Tabell 7 - 2 Resultat från känslighetsanalys, där ändring av maximalt vattenstånd i Glafs fjorden samt ändring av maximalt flöde genom Säffle studeras. Storleken på ändringarna av maximala vattenstånd och flöden ökar nedåt i tabellen, vilket betyder att modellens känslighet för förändringar i given indata ökar nedåt i tabellen¹².

Ändring av variabler i indata	Ändring av Glafs fjordens maxnivå hösten 2000 [m]	Ändring av maxflödet i Säffle hösten 2000 [%]
Vänern (-0,184 m)	-0,01	-0,2
Vänern (+0,184 m)	+0,01	+0,2
Glasälven och Lillälven (0,8·Q _{uppmätt})	-0,09	-3,6
Glasälven och Lillälven (1,2·Q _{uppmätt})	+0,08	+3,4
Oreglerade avrinningsområden (0,8·Q _{IHMS})	-0,12	-5,1
Oreglerade avrinningsområden (1,2·Q _{IHMS})	+0,11	+5,4
Jössefors (0,8·Q _{uppmätt})	-0,41	-14,7
Jössefors (1,2·Q _{uppmätt})	+0,35	+13,9

Orsaken till att modellens känslighet skiljer kraftigt mellan olika inflöden är främst att storleken på dessa inflöden skiljer sig kraftigt åt (se fig. 7 - 16) och stora inflöden således ger upphov till stora effekter vid känslighetsanalys. En annan bidragande orsak kan vara att inflödena sker på olika platser längs Byälven. De relativt stora förändringar av maxnivå i Glafs fjorden och maxflöde i Säffle som visas i tabell 7 - 2 som resultat av förändrad indata måste relateras till de felkällor som finns för respektive indata. En variation på +/-20 % är betydligt större än de osäkerheter som kan väntas i inflöden från reglerade avrinningsområden, men möjligtvis rimlig för oreglerade avrinningsområden även om någon egentlig uppskattning av det inte gjorts.

¹² Känslighetsanalysen för vattennivå och inflöden kan egentligen inte jämföras eftersom de är varierade på olika sätt.



Figur 7 - 16 Jämförelse mellan de olika inflöden till Byälven som har använts då känsligheten undersökts.

7.11 Felkällor

Inverkan av olika felkällor bör beaktas innan slutsatser dras från simuleringar med FINKAN-modellen. Många felkällor härrör från felaktigheter i indata och beskrivs där de förekommer i kapitel 4, 5 och 6. Dessutom innebär 1-dimensionell modellering i sig förenklingar som kan orsaka fel (se kap. 3.4). Modelluppsättningen som den ser ut i FINKAN-modellen innebär dessutom att ytterligare fel införs. Den begränsade tillgången till nivåer och flöden för kalibreringspunkter längs Byälven gör felen svåra att lokalisera. En översikt och bedömning av de modellspecifika fel som kan tänkas behäfta FINKAN-modellen följer:

- En viktig felkälla utgör flödesmotståndet i form av alla de kalibreringsparametrar vars värden är resultatet av det kalibreringsförfarande som beskrivs i kapitel 7.9. Förutom de fel som kalibreringsförfarandet resulterar i kan tänkas att flödesmotståndet varierar med årstiden då växtligheten varierar.
- Dämmet är inte fysikaliskt korrekt beskrivet (se kap. 7.4). Detta gör att fel här kan tänkas bli ganska stora vid vattenstånd utanför de nivåer som modellen kalibrerats och dämmet kan då utgöra en stor felkälla.
- Att broar inte har modellerats i detalj utgör en felkälla vilket beskrivs i kapitel 7.7.
- Flödet genom slussen som är beräknat enligt kapitel 5.3 är behäftade med osäkerheter.
- De översvämningssområden som beskrivs i kapitel 7.6 bidrar till flöde då vattennivån stiger över vallarnas nivå. Här inverkar topografiska felkällor extra mycket då små fel beträffande vallarnas nivå får ganska stor inverkan på flödet då vattennivån precis når över vallarnas nivå. Dessutom innebär det sätt som vallarna implementerats på i modellen osäkerheter.

- Tvärsnitten som spänner upp topografin utgör en förenkling av de verkliga höjdförhållandena. FINKAN-modellen beskrivs med ett stort antal tvärsnitt och felet på grund av detta modelleringsförfarande bedöms generellt vara litet då tvärsnitten placerats för att minimera denna typ av fel (se kap. 7.1).
- Det exportförfarande som används i *MIKE 11 GIS* orsakar ett fel genom den i kapitel 7.1 diskuterade filterrutinen. Detta bedöms dock som helt försumbart.

8 Resultat av körda simuleringar

Huvudsyftet med framställningen av FINKAN-modellen var att simulera hur olika förändringar påverkar strömningsförhållanden i Byälven. Nedan följer en redogörelse för olika sådana förändringar. Generellt bedöms bara de hydrauliska aspekterna av åtgärder och resultaten som FINKAN-modellen ger. Huruvida åtgärder är praktiskt, ekonomiskt eller politiskt genomförbara bedöms inte. Simuleringarna är indelade i:

- Enskilda åtgärder för minskat vattenstånd
- Simuleringar med förhöjda vattenstånd
- Kombinerade åtgärder

8.1 Ytterligare felkällor

Förutom de felkällor som FINKAN-modellen, i sitt kalibrerade tillstånd, är behäftad med (se kap. 7.11) innebär förändringar i systemet ibland att nya felkällor införs. Generellt kan sägas att simuleringar som hamnar utanför de vattennivåer och flöden som modellen kalibrerats för har sämre tillförlitlighet. Osäkerheten ökar ju större avvikelserna från dessa nivåer är. I andra fall kan speciella omständigheter i den simulerade förändringen innebära ytterligare ökad osäkerhet. I de fall en åtgärd bedöms orsaka ytterligare osäkerheter görs en anmärkning om detta i aktuellt kapitel.

8.2 Enskilda åtgärder för minskat vattenstånd

För att undersöka hur åtgärder för att minska effekterna av en översvämningssituation likt den år 2000 påverkar systemet införs förändringar i den färdigkalibrerade FINKAN-modellen. Simulerade resultat för varje enskild åtgärd redovisas i tabell 8 - 1 och ett urval beskrivs i kapitel 8.2.1 – 8.2.7. Som jämförelse ger modellen 2000-11-28 då inga förändringar införs maximala vattenstånd på 48,68 m ö.h. i Glafs fjorden, 47,68 m ö.h. i Harefjorden och ett maximalt flöde på $405 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ i Säffle.

Tabell 8 - 1 Lista över de simuleringar av enskilda åtgärder som gjorts och resultat av dessa vid simulering med samma flöde som hösten år 2000. Siffrorna under rubriken beteckning motsvarar de kapitel som beskriver respektive simulering och övrig teckenförklaring finns i respektive kapitel.

Beteckning	Glafsforden		Hareforden		Kort beskrivning
	Maximalt vattenstånd [m ö.h.]	Förändring [m]	Maximalt vattenstånd [m ö.h.]	Förändring [m]	
7.8	48,68	0,00	47,68	0,00	Kalibrerad modell
8.2.1	48,46	-0,23	47,25	-0,42	Ökat flöde genom slussen
8.2.2	48,68	+0,01	47,67	+0,01	Borttagning av invallningar
8.2.3 a	48,67	-0,01	47,68	<0,01	Ö vid Hökeströmmen borta
8.2.3 b	48,65	-0,03	47,69	+0,01	Förträngning vid Hökeströmmen borta
8.2.3 c	48,65	-0,04	47,69	+0,01	Båda ovanstående tillsammans
8.2.4	48,65	-0,03	47,65	-0,03	Effekter av förändrad vattendom
8.2.5 A +2	48,65	-0,03	47,69	+0,01	M ändrat i zon 2 och 3 (+2)
8.2.5 A +5	48,61	-0,07	47,70	+0,02	M ändrat i zon 2 och 3 (+5)
8.2.5 B +2	48,65	-0,03	47,69	+0,01	M ändrat i zon 2 och 3 (+2)
8.2.5 B +5	48,62	-0,06	47,70	+0,03	M ändrat i zon 2 och 3 (+5)
8.2.5 C +2	48,66	-0,03	47,60	-0,08	M ändrat i zon 2 och 3 (+2)
8.2.5 C +5	48,63	-0,06	47,51	-0,17	M ändrat i zon 2 och 3 (+5)
8.2.5 AB +2	48,62	-0,06	47,70	+0,02	M ändrat i zon 2 och 3 (+2)
8.2.5 AB +5	48,55	-0,13	47,73	+0,05	M ändrat i zon 2 och 3 (+5)
8.2.5 AC +2	48,62	-0,06	47,61	-0,07	M ändrat i zon 2 och 3 (+2)
8.2.5 AC +5	48,55	-0,13	47,53	-0,14	M ändrat i zon 2 och 3 (+5)
8.2.5 BC +2	48,63	-0,06	47,61	-0,07	M ändrat i zon 2 och 3 (+2)
8.2.5 BC +5	48,56	-0,12	47,54	-0,14	M ändrat i zon 2 och 3 (+5)
8.2.5 ABC +2	48,59	-0,09	47,62	-0,06	M ändrat i zon 2 och 3 (+2)
8.2.5 ABC +5	48,49	-0,20	47,56	-0,12	M ändrat i zon 2 och 3 (+5)
8.2.6 ABC +5	48,68	<-0,01	47,67	<-0,01	M ändrat i zon 1 (+5)
8.2.7	48,67	-0,01	47,68	<+0,01	Muddring
8.3.1	48,72	+0,03	47,71	+0,03	Barriär till Kyrkviken
8.3.2	48,80	+0,12	48,03	+0,36	Stängd sluss
8.3.3 HC-A2	49,00	+0,3	48,00	+0,3	Effekter av klimatförändring
8.3.3 HC-B2	49,30	+0,6	48,29	+0,6	Effekter av klimatförändring
8.3.3 MPI-A2	49,86	+1,2	48,88	+1,2	Effekter av klimatförändring
8.3.3 MPI-B2	49,67	+1,0	48,68	+1,0	Effekter av klimatförändring

8.2.1 Ökat flöde genom slussen

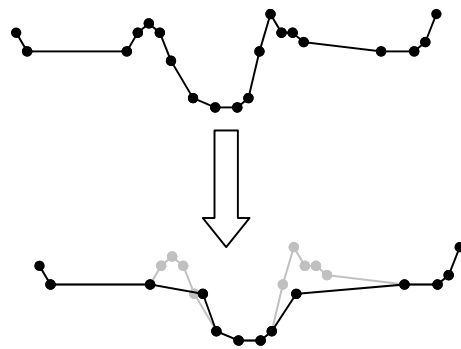
Under översvämningen år 2000 beslöt man att öppna slussen, som normalt endast används för att slussa båtar förbi dämnet och Backeströmmen i Säffle. Tekniska problem gjorde att slussen inte kunde öppnas helt förrän 2000-11-23. Vidare kunde slussen av konstruktionsskäl inte öppnas utan att ett temporärt skelett av balkar installerades vilket bidrog till att bromsa flödet genom slussen. Hade en annan konstruktion funnits som underlättat en total öppning hade man i ett tidigare skede kunnat öppna slussen och öppna den helt, utan att installera balkar. Detta kan tänkas innebära att byta ut de hydrauliska styranordningar som reglerar slussluckorna mot en mekanism så kraftig att den kan öppna luckorna under det att vatten strömmar genom lucköppningen samtidigt som resten av slusskonstruktionen säkras för de påfrestningar detta skulle innebära. Simulerings-scenario 8.2.1 innebär att slussen öppnas helt (utan balkar) i samband med att risken för

översvämning uppmärksammades, d.v.s. 16 oktober (då luckorna i dämnet öppnades). Scenariot ger maximala vattenstånd på 48,46 m ö.h. och 47,26 m ö.h. för Glafs fjorden respektive Harefjorden och ett maximalt flöde på $388 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. Detta motsvarar en minskning av den högsta nivån vattnet nådde med 23 cm i Glafs fjorden och 42 cm i Harefjorden. Simuleringarna innebär att modellens känslighet för flödesmotstånd och topografi i slusskanalen ökar något.

8.2.2 Borttagning av invallningar

Längs älvsträckningen finns på några platser vallar som hindrar vattnet från att översvämma framförallt åkermark. En närmare beskrivning av dessa finns i kapitel 7.6. Dessa vallar påverkar översvämningssituationer på flera sätt. Dels hindrar vallarna, så länge de inte översvämmas, vattnet från att utnyttja den lagringsvolym som de skyddade områdena utgör, dels minskar de den tvärsnittsarea som flödet kan ta i anspråk då vallarna inte översvämmas eftersom vattnet då endast kan flöda i huvudfåran. Då vallarna översvämmas bromsas flödet genom översvämningssområdena eftersom det måste passera över vallarna. Vallar förekommer längs Byälven främst norr om Gillberga kyrka och norr om Dösslingen. Vallarna togs bort ur modellen genom att tvärsnitten visuellt inspekterades och modifierades där vallar hindrade vattnet för att nå översvämningssytor enligt figur 8 - 1. De separata älvgrenar som utgjorde översvämningssområdena beskrivna i kapitel 7.6 togs bort helt.

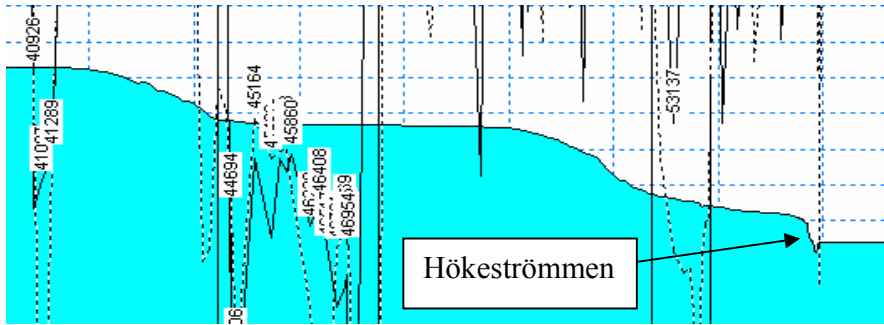
Åtgärden simuleras i och med dessa åtgärder på ett ganska drastiskt sätt och nya osäkerheter uppkommer i samband med detta. Simuleringen ger ensamt en marginell ökning av maximalt vattenstånd i både Harefjorden och Glafs fjorden trots att en minskning av vattenståndet i Glafs fjorden förväntats. De simulerade förändringarna i vattenstånd är emellertid små och kan härröra från införda fel i modellen. Borttagning av vallarna i modellen ger större förändringar vid lägre vattenstånd där större effekter av förändringen simuleras (se kap. 8.4.4).



Figur 8 - 1 Skiss som beskriver hur invallningar togs bort genom modifikation av tvärsnitt.

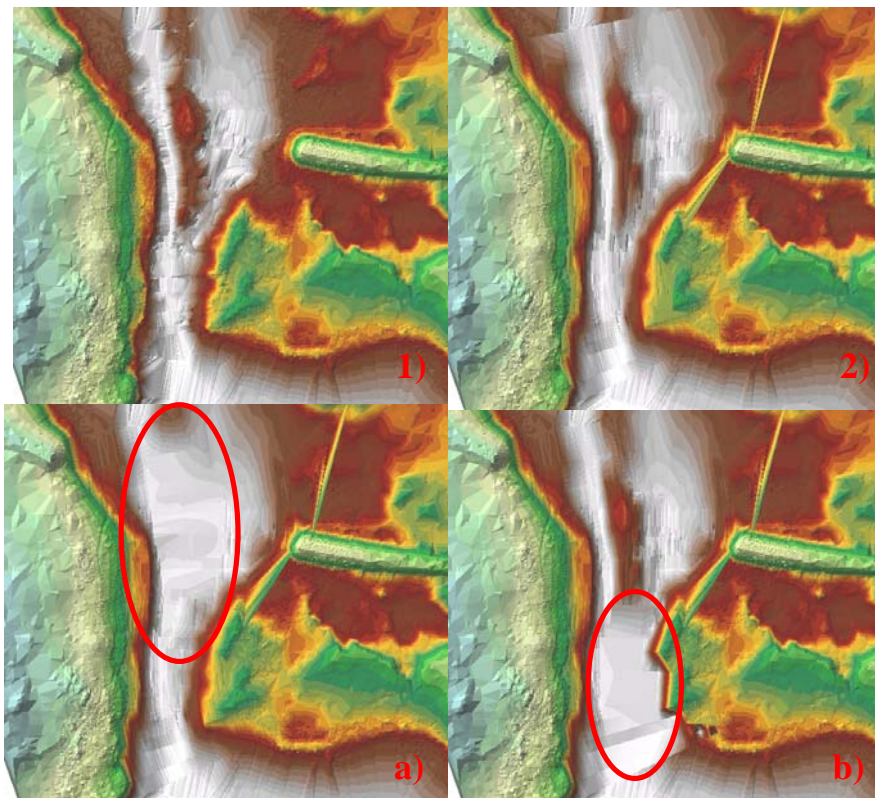
8.2.3 Vidgning vid Hökeströmmen

Namnet Hökeströmmen antyder att speciella strömningsförhållanden skulle råda på denna plats. En visualisering av vattenytan längs Byälven så som den varierar i FINKAN-modellen visar också på signifikanta energiförluster i detta parti (se fig. 8 - 2), vilket gör platsen intressant för eventuella åtgärder. Platsen utgör Byälvens utflöde i Harefjorden och består av en ö som delar älvfåran i två grenar som följs av en horisontell förträngning med relativt stort djup.



Figur 8 - 2 Vattenytans lutning mellan Högsäter (t.v.) och Harefjorden (t.h.) 27 november enligt FINKAN-modellen. Markerat i figuren är speciellt nivåspränget vid Hökeströmmen. (De svarta vertikala strecken samt siffrorna kan ignoreras.)

Utan att praktiska hänsyn har tagits simuleras två åtgärder i Hökeströmmen individuellt och i kombination. **a)** motsvarar avlägsnning av ön och **b)** vidgning av förträngningen strax nedströms ön. **c)** motsvarar en kombination av dem båda. Modifieringen skedde genom att XZ-punkter på de tvärsnitt som spänner upp den topografiska modellen för området avlägsnades. Figur 8 - 3 visar förändringarna i topografin.



Figur 8 - 3 Topografiska kartor föreställande: **1)** topografin vid Hökeströmmen enligt höjdmodellen, **2)** topografin som den spänns upp av tvärsnitten i FINKAN-modellen för samma område, **a)** topografin i modellen då ön tagits bort och **b)** topografin i modellen då förträngningen nedanför ön tagits bort. På bilderna syns brofästet (t.h.) där E18 korsar Byälven.

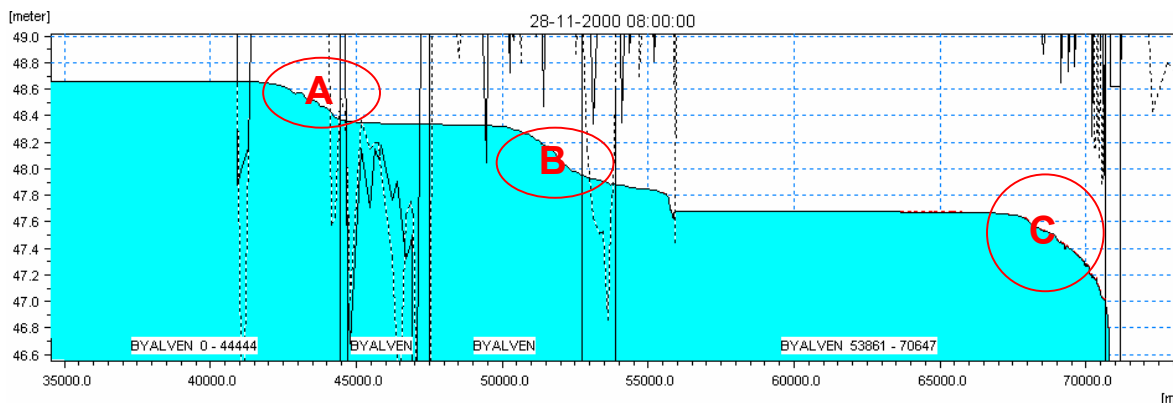
Effekten på högsta vattennivå i Glafs fjorden blir för dessa åtgärdsalternativ en minskning med 1 cm då ön tas bort och 3 cm då förträngningen vidgas. Båda dessa åtgärder ger tillsammans en minskning av högsta vattennivån i Glafs fjorden med 4 cm. Alla tre simuleringarna innebar en marginell ökning av högsta vattennivån i Harefjorden. Topografiändringen innebär inte införande av någon ytterligare osäkerhetsterm.

8.2.4 Effekter av förändrad vattendom

Det åligger Sjöfartsverket att manövrera dammluckorna i Säffle så att den maximala djupgången som finns angiven på sjökort ovanför slussen i Säffle bibehålls vilket skall ske i enlighet med gällande vattendom. Ett sätt att lindra effekterna av en översvämning som diskuterats är att minska den nivå som vattennivån hålls på så att en större buffert finns i systemet då stora vattenmängder tillförs Glafs fjorden. Ett inofficiellt förslag från Sjöfartsverket är att sänka det garanterade djupgången från nuvarande 3,0 m till 2,5 m. Eventuellt kan denna sänkning gälla endast på vintern så att nuvarande djupgång gäller på sommaren, då båttrafiken är intensivare. För att undersöka effekterna av en ändrad vattendom sänktes vattennivån i hela systemet med 50 cm så att Glafs fjorden låg på 45,34 m ö.h. 2000-10-17. Med denna utgångsnivå ger FINKAN-modellen ett högsta vattenstånd i Glafs fjorden på 48,65 m ö.h. vilket motsvarar en minskning med 3 cm jämfört med fallet utan åtgärd. Scenariot bygger på antagandet att en generell minskning av den maximala djupgången i en situation som den hösten 2000 skulle ha inneburit en initial vattenyta 50 cm under den som verkligen förelåg. Huruvida en ändring av vattendomen i realiteten skulle leda till en generell minskning av vattennivån med 50 cm bedöms inte.

8.2.5 Ändrat flödesmotstånd i zon 2 och 3

En profil av vattenytan under översvämningsförloppet så som den simuleras i FINKAN-modellen visar på några partier längs Byälven där lutningen är brantare än genomsnittslutningen utan att tydliga språng kan urskiljas. De tre tydligaste exemplen på sådana partier är markerade A, B och C i figur 8 - 4.



Figur 8 - 4 Vattenytans profil ur FINKAN-modellen 2000-11-28, 08:00. Älvavsnitt som genererar brantare lutning längs profilen utan att utgöra tvära språng som exemplet vid Hökeströmmen (se fig. 8 - 2) är markerade på tre ställen; A motsvarar ungefär sträckan 1 km norr om till 1 km söder om kabeljärnan i Högsäter, B motsvarar sträckan cirka 700 m norr om till cirka 1300 söder om bron i Nysäter, C motsvarar sträckan ett stycke nedströms utloppet ur Harefjorden i nivå med Återslöp fram till kanalön i Säffle. (De svarta vertikala strecken kan ignoreras.)

För dessa sträckor simulerades åtgärder för att minska flödesmotståndet i zon 2 och 3 (se kap. 3.4.3). Specifikt innebär simuleringarna att effekter av en ökning av Mannings M med 2 respektive 5 $\text{m}^{1/3}\text{s}^{-1}$ införs ovanför 46,60 m ö.h. på sträcka A och B respektive 46,40 m ö.h. på sträcka C. Detta motsvarar ytor som normalt inte står under vatten. Ökning av Mannings M med 2 $\text{m}^{1/3}\text{s}^{-1}$ motsvarar en marginell påverkan av flödesmotståndet som förvisso är svår att översätta i specifika åtgärder men mycket väl skulle kunna motsvaras av mindre omfattande selektivt röjningsarbete. En ökning av M med 5 $\text{m}^{1/3}\text{s}^{-1}$ skulle kunna åstadkommas genom att mera systematiskt ta bort bromsande växtlighet som högt gräs, buskar, skog och sly på de berörda sträckorna. Detta resonemang gäller i synnerhet sträcka A och B där älven kantas av mycket växtlighet. På sträcka B finns också bilbron i Nysäter vilken bidrar med flödesmotstånd. En hel del växtlighet återfinns också i de övre delarna av sträcka C medan nedre delen är väldigt påverkad av bebyggelse i Säffle, stränder är stensatta och en del flödesmotstånd utgörs av bropelare, bryggor och liknande. Att påverka flödesmotståndet här kan möjligen vara svårare och/eller dyrare. Resultaten av simuleringar med minskat flödesmotstånd presenteras i tabell 8 - 2.

Tabell 8 - 2 Förändringar av maximalt vattenstånd i Glafs fjorden vid minskat flödesmotstånd. (Staplarna är skalensliga men saknar skala att refereras till, jämförs istället med tillhörande siffror.)

Förändring av högsta nivå i Glafs fjorden 2000 [m] ¹	Förändring av <i>M</i> i sektion A zon 2 och 3	Förändring av <i>M</i> i sektion B zon 2 och 3	Förändring av <i>M</i> i sektion C zon 2 och 3
-0,20	+5	+5	+5
-0,13	+5	+5	-
-0,13	+5	-	+5
-0,12	-	+5	+5
-0,09	+2	+2	+2
-0,07	+5	-	-
-0,06	+2	+2	-
-0,06	+2	-	+2
-0,06	-	+5	-
-0,06	-	+2	+2
-0,06	-	-	+5
-0,03	+2	-	-
-0,03	-	+2	-
-0,03	-	-	+2

¹ Staplarna visar mera exakt minskning vid simulering än tabellsiffrorna som anger minskningen med centimeterprecision.

Resultaten visar att sänkning av flödesmotståndet längs de tre sträckorna var för sig ger ett minskat högsta vattenstånd i Glafs fjorden i samma storleksordning. En svag emergens¹³ kan skönjas då sänkning av flödesmotståndet görs längs flera älvsträckor samtidigt.

8.2.6 Ändrat flödesmotstånd i zon 1

Det är för Byälven tänkbart att växtlighet och därmed flödesmotstånd under normalt vattenstånd varierat med hur fartygstrafiken längs Byälven förändrats. Svallvågor och propellerturbulens från större båtar kan ha en hämmande effekt på vattenväxter. För att undersöka FINKAN-modellens känslighet för denna typ av påverkan ökades Mannings *M* med $5 \text{ m}^{1/3} \text{ s}^{-1}$ i zon 1 på de sträckor som benämns A, B och C i kapitel 8.2.5. Åtgärden bedöms som relativt drastisk och kan tänkas motsvara omfattande vassborttagning och rensning från andra typer av strömningsbegränsande hinder. Den simulerade effekten av en sådan förändring är dock liten, minskningen blir i Glafs fjorden och Harefjorden mindre än 1 cm för översvämningen 2000. Effekterna blir större då det mindre extrema översvämningförlopp som inträffade våren 1999 studeras, minskningen av de maximala vattennivåerna blev då istället 4 respektive 3 cm. Dessa skillnader är väntade eftersom flödesmotståndet i zon 1 förväntas ha större betydelse vid lägre vattenstånd.

8.2.7 Muddring

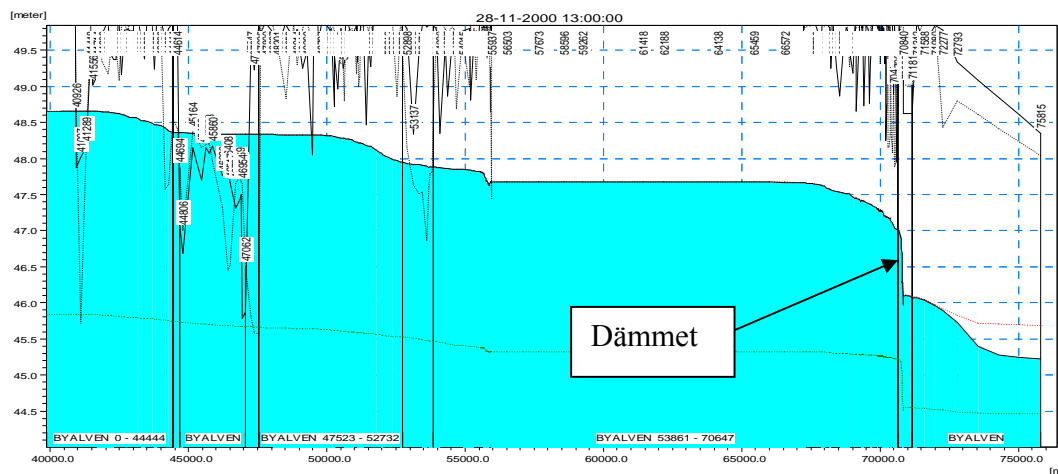
I diskussioner rörande flödet genom Byälven har föreslagits att flödet kanske kan begränsas av att älven slammat igen sedan den upphörde att muddras. Osäkerhet råder kring vilket djup kanalen muddrats till men de mätningar som gjorts i samband med

¹³ Emergens innebär att resultatet av två åtgärder i kombination är större än summan av den effekt åtgärderna ger var för sig. Termen synergieffekter används för att beskriva samma fenomen i ekonomiska sammanhang.

arbetet med FINKAN-modellen (se bilaga A.3) visar att kanalen på inget ställe är grundare än den på sjökortet angivna maximala djupgången 3,0 m plus 0,3 m marginal. Således torde ingen allvarigare sedimentation ha påverkat djupet i den muddrade mitt-rännan. För att undersöka effekterna av ytterligare muddring konstruerades ett scenario där en mitträna muddrades till 4 m djupgång (+41,21 m ö.h.) relativt sjökortsnivån där detta djup inte redan förelåg. I sådana fall muddrades en 20 m bred ränna. I modellen motsvarades detta av att en sammanlagt drygt 4 km lång sådan ränna rensades, vilket är att beteckna som ett omfattande muddringsföretag. Den sammanlagda effekten av denna förändring i modellen är en minskning av den maximala vattennivån i Glafsforden med drygt 1 cm och en marginell ökning (<1 cm) av den maximala vattennivån i Harefjorden för översvämningen 2000. Effekterna är små och domineras av att en 20 m bred ränna i realiteten innebär en breddning av huvudfåran i Hökeströmmen.

8.2.8 Ökat flöde genom dämnet

En kraftig vattennivåminskning (se fig. 8 - 5) sker under hela översvämningsförloppet över dämnet i Säffle. Samtidigt som detta är dämmets syfte under lågvattenperioder utgör det ett problem vid höga flöden då man eftersträvar en så fri utströmning för vattnet som möjligt.



Figur 8 - 5 Vattennivån från den kalibrerade FINKAN-modellen mellan Björnöflagan (t.v.) och Vänern (t.h.) när vattenytan låg som högst under översvämningen år 2000, utom närmast Vänern där högsta nivå inföll något senare. Vattennivåminskningen över dämnet är markerat. (De svarta vertikala strecken samt siffrorna kan ignoreras.)

I dagsläget hindrar dämnet flödet även då luckorna är helt uppfällda bl.a. genom en cirka 75 cm hög tröskel på botten som luckorna vilar mot i nedfällt läge. Möjligen finns också en naturlig tröskel lite längre uppströms. Av olika skäl innehåller FINKAN-modellen inte en detaljmodell av dämnet och Backeströmmen utan istället en ränna med mycket högt flödesmotstånd som kalibrerats så att nivåerna uppströms och nedströms modellkonstruktionen stämmer väl överens med uppmätta nivåer under de översvämningsförlopp som använts vid kalibrering (se kap. 7.9.1). Eftersom flödesförhållanden genom dämnet är tätt sammankopplade med vad som sker i slussen har inte simuleringar gjorts av en exakt upprepning av den slussöppning som gjordes 2000 tillsammans med ett ombyggt damme. Omkonstruktion av dämnet simuleras därför istället tillsammans med

förändringar av förhållandena i slussen och beskrivs i kapitel 8.4.1, där också resultaten presenteras.

8.3 Simuleringar med förhöjda vattenstånd

Målsättningen med arbetet med FINKAN-modellen har varit att åstadkomma en modell som kan hantera även andra frågeställningar än de som behandlar åtgärder för att minska vattennivåerna vid översvämningar. Förändrade förhållanden kan även leda till ännu högre vattenstånd än de som uppmättes år 2000. Några idéer om sådana scenarier har dykt upp under arbetets gång och resultaten av dessa simuleringar redovisas nedan.

8.3.1 Barriär mellan Kyrkviken och Glafs fjorden

Bygget av en barriär i sundet som förbinder Kyrkviken med Glafs fjorden är högst aktuellt och en aspekt är den påverkan ett sådant bygge skulle ha på vattennivån utanför Kyrkviken. Att hålla nivån i Kyrkviken nere och pumpa över vatten i Glafs fjorden innebär att man minskar Glafs fjordens magasinskapacitet och man kan därför förvänta sig att en invallning skulle ha gjort att vattennivåerna hade stigit ännu högre än de gjorde under hösten 2000 om en barriär funnits. Kyrkviken utgör mellan cirka 5,8 % och 6,3 % av Glafs fjordens totala area beroende på vattenstånd. Emellertid är det inte troligt att hela den förlorade lagringsvolymen skulle bidra till ökat vattenstånd i Glafs fjorden eftersom ett ökat vattenstånd även bidrar till ökad avbördning. Effekten av en barriär beror på till vilken nivå som vattenytan inne i Kyrkviken tillåts stiga. För simuleringen har nivån +46,80 m ö.h. valts då denna bedömts som "högsta acceptabla vattenstånd för att inte allvarliga skador skall uppstå" (HydroTerra, 2002, omräknat till RH70). Simuleringen ger ett högsta vattenstånd utanför barriären på +48,71 m ö.h. vilket skulle innebära att en sådan barriär skulle höja vattenståndet i Glafs fjorden med ytterligare drygt 3 cm jämfört med den verkliga översvämningen 2000. Simuleringen visar också att vattenstandsökningen skulle bli ungefär densamma, 3 cm, för Harefjorden. Simuleringar av minskad sjöarea i innebär i princip ingen ökad osäkerhet alls.

8.3.2 Stängd sluss

En intressant frågeställning är vad som hänt om slussen inte öppnats då vattnet steg dramatiskt under översvämningen 2000. Beslutsförfarandet då slussen öppnades är ännu inte utrett och för att man i framtiden skall kunna ta ställning till liknande åtgärder är det intressant att veta vad som hade hänt om slussen inte öppnats. För att simulera en helt stängd sluss sätts bestämmande flödesreglering i slusskanalen till $0 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ under hela översvämningförloppet. Att slussen stängs ökar flödet genom dämnet drastiskt. Dämnet orsakar lätt numerisk instabilitet och förändringen innebär att tidssteget behövde sänkas till 2 s för att lösningen skulle hållas stabil. Detta innebär en övergång till dynamisk simulering där ekvation (3-20) ger $C_r = 3,5$ (se kap. 7.8, 3.4.7 och 3.4.8). De maximala vattennivåer som Glafs fjorden respektive Harefjorden uppnår i detta scenario är +48,80 respektive +48,04 m ö.h. vilket motsvarar 12 respektive 36 cm högre vattenstånd än vad som verkligen uppmättes. Värt att notera är den dramatiska ökningen av vattennivån i Harefjorden som sannolikt hade fått långtgående konsekvenser för boende runt Harefjorden och längs Byälven mellan Harefjorden och Säffle centrum. Simuleringen innebär att vattennivån stiger en bit utanför vad FINKAN-modellen kalibrerats för

samtidigt som dämnet utsätts för ett mycket stort flöde. Detta gör att osäkerheten vid dessa simuleringar är något större.

8.3.3 Effekter av klimatförändring

Främst för att exemplifiera hur FINKAN-modellen kan användas har simuleringar gjorts med avrinning och kraftstationstappning korrigerad för att efterlikna tänkbara effekter av den globala uppvärmningen. Vad som försöker efterliknas är nivåerna för ett flöde med samma återkomsttid som det år 2000 om det skulle inträffa om cirka 100 år med effekter av växthuseffekten inkluderade. Avrinning och tappning har multiplicerats med månatlig medelavvikelse i avrinning beräknad specifikt för Arvika, (59,36 N; 12,36 Ö), genom data från SWECLIMs klimatmodell, som levererats från Rossby Centre på SMHI i Norrköping. Beräkningarna motsvarar samma översvämning som skedde 2000 men med daglig avrinning och tappning multiplicerad med en faktor som motsvarar den för aktuell månad gällande medelförändringen i avrinning mellan perioderna 1960 – 1990 och 2070 – 2100 enligt data från Rossby Centre. För att undvika numerisk instabilitet i dämnet i samband med ökade flöden minskades tidssteget till 1 min.

Framförallt två invändningar kan direkt anföras mot detta förfarande. För det första ger SWECLIMs scenarioresultat ett varmare och nederbördsrikare klimat för området, vilket förutom att bidra till en ökad nederbörd, som resulterar i ett mera dramatiskt översvämningförlopp, också ökar avdunstningen. FINKAN-modellen har då de hydrauliska beräkningarna startar 2000-10-17 i det simulerade fallet samma initiala vattenmagasin som i den ursprungliga modellen; med högre avdunstning under sommaren och hösten kan man tänka sig att magasinen skulle vara mindre fyllda än de i verkligheten var. För det andra säger sig Rossby Centre kunna skönja tendenser till öknings och storlek av extremflöden. Sådana effekter skulle kunna ha förvärrat händelseförloppet 2000. Dessa båda effekter skulle i fallet med Byälven och översvämningförloppet 2000 verka i motsatt riktning även om man inte kan räkna med att de skulle ta ut varandra. Simuleringarna bedömdes trots dessa invändningar vara intressanta.

De data som använts är framtagna med hjälp av Rossby Centres regionalt kopplade klimatmodell RCAO kopplad till två globala klimatmodeller, HadAM3H vid Hadley Centre (HC) i Exeter, England, och ECHAM4/OPYC3 vid Max-Planckinstitutet (MPI) i Hamburg, Tyskland. Vidare har två olika globala klimatscenarion simulerats. De scenarier som använts är framtagna av FN:s klimatpanel IPCC och betecknas SRES A2 respektive SRES B2. De skiljer sig åt med avseende på befolkningstillväxt, ekonomisk utveckling och teknikanvändning, där SRES A2 beskriver ett värre scenario, men med det gemensamt att de båda beskriver ökad emission av växthusgaser under 2000-talet. Modellosäkerheten för denna typ av klimatmodellerna är stora, vilket tydligt illustreras av att de båda modellerna skiljer sig signifikant från varandra resultatmässigt, och resultat bör tolkas med detta i åtanke. (Graham, 2004; Kjellström, 2004; Räisanen m.fl. 2003; Räisanen m.fl., 2004)

Då den korrigerade avrinningen för översvämningssperioden 2000 ersätter den verkliga, vilket grovt kan beskrivas som händelseförloppet om motsvarande översvämning inträffar igen, om 100 år, visar FINKAN-modellen på en kraftigt förvärrad över-

svämningssituation. Den maximala vattennivån i Glafs fjorden uppgår för det värsta scenariot, SRES A2, då den tyska globala klimatmodellen används (MPI-A2) till +49,86 m ö.h. vilket motsvarar ett vattenstånd knappt 1,2 m högre än det som hittills uppnåtts. Samma simulering men med scenario SRES B2 (MPI-B2) ger vattenstånd 1,0 m över 2000 års nivåer. Om istället den brittiska globala klimatmodellen och scenario SRES A2 används (HC-A2) blir resultatet i FINKAN-modellen betydligt lindrigare, vattennivån i Glafs fjorden når drygt 30 cm högre än 2000 års vattennivåer. Den brittiska klimatmodellen förutspår däremot allvarligare konsekvenser för Byälven då det mindre dramatiska framtidsscenario SRES B2 antas (HC-B2), med vattennivåer som når drygt 60 cm över de nivåer som uppmättes hösten 2000. Ökningen är med FINKAN-modellens noggrannhet för dessa simuleringar lika för Harefjorden som Glafs fjorden.

I simuleringen har flödet genom slussen beräknats utifrån de nivåerna som vattnet nådde år 2000, vilket inte är korrekt. Förenklingen bedöms ändå som godtagbar eftersom det är svårt att i detalj bedöma hur flödet genom slussen skulle påverkas. Mestadels beror det på hur slussen hanteras vid ett sådant flöde då nivåerna i vissa fall skulle överstiga slussluckornas överkant. I verkligheten skulle troligtvis flödet genom slussen öka.

De vattennivåer som uppnås i dessa simuleringar avviker mycket från de nivåer modellen kalibrerats för vilket innebär att det förväntade felet också är stort. De indata som använts i dessa simuleringar är dock behäftad med stora osäkerheter och det är troligt att effekterna av dessa dominerar över fel orsakade av FINKAN-modellen.

Slutligen kan påpekas att klimatmodellerna som använts beräknar förväntad avrinningsökning mellan perioden 1960 – 1990 och 2070 – 2100. De flöden som denna förändring sedan appliceras på är uppmätta för år 2000, vilket ju är "en bit på väg" mellan dessa perioder. Effekten av detta torde dock vara försumbar med tanke på de stora osäkerheter som klimatmodellerna i övrigt uppvisar.

8.4 Kombinerade åtgärder

I kapitel 8.2 redovisades en mängd enskilda åtgärder i älven och vilka konsekvenser dessa får för maximalt vattenstånd i Glafs fjorden och Harefjorden. För att uppnå en större minskning av vattennivåerna kan flera av dessa åtgärder kombineras. För dessa kombinationer måste nya simuleringar göras eftersom den sammanlagda effekten inte blir lika med summan av varje förändring för sig. Exempelvis kan en åtgärd som ensam ger mycket begränsad effekt ha betydligt större inverkan i kombination med en annan åtgärd. Detta eftersom vattennivåerna förändras vilket gör att topografi och råhet i älven påverkar vattenstånd och flöden annorlunda. Av samma orsak kan också en åtgärd ge mindre effekt i kombination med andra åtgärder, än då den görs enskilt. I tabell 8 - 3 redogörs för några simulerade kombinationer och resultaten därifrån. Resultat från alla simulerade kombinationer finns i bilaga A.8. I följande kapitel redogörs mera detaljerat för åtgärds kombinationerna som presenteras i tabell 8 - 3. Kapitelnumreringen svarar mot kolumnrubrikerna i tabellen.

Tabell 8 - 3 Resultat av några åtgärds kombinationer som har simulerats. Samtliga resultat redovisas i bilaga A.8. Åtgärderna presenteras i kolumner betecknade K** /8.4.* (där K** betyder kombination nr. ** och 8.4.* syftar på motsvarande kapitel i rapporten). I kolumnerna är vidtagna åtgärder angivna med grå markeringar och resultat från simuleringar avläses i nedre delen av tabellen för respektive år.

Åtgärdsbeskrivning	Motsvarande enskild åtgärd	Kombinationsbenämning						
		K2 8.4.1	K9 8.4.1	K15 8.4.2	K17 8.4.2	K14 8.4.3	K26 8.4.4	K18 8.4.5
Ökat flöde genom slussen	8.2.1							
Borttagning av invallningar	8.2.2							
Vidgning av Hökeströmmen	8.2.3 c							
Effekter av förändrad vattendom	8.2.4							
M i zon 2 & 3 på sträcka A & B +2	8.2.5 AB +2							
M i zon 2 & 3 på sträcka A & B +5	8.2.5 AB +5							
M i zon 2 & 3 på sträcka A, B & C +10	(saknas)							
M i zon 1 på sträcka A, B & C +10	(saknas)							
Barriär till Kyrkviken	8.3.1							
M i zon 1 på sträcka A & B +5	(saknas)							
Stängd sluss	8.3.2							
M i dämnet ändrat till 25	(saknas)							
M i dämnet ändrat till 35	(saknas)							
Tröskel i dämnet borttagen	(saknas)							
År 2000								
Glafs fjorden: Maximal vattennivå [m ö.h.]		48,41	48,48	48,51	48,69	48,51	48,20	47,91
Glafs fjorden: Förändring av maximal vattennivå [m]		-0,28	-0,21	-0,18	<0,01	-0,18	-0,48	-0,78
Harefjorden: Maximal vattennivå [m ö.h.]		47,03	47,29	47,32	47,68	47,74	46,84	46,71
Harefjorden: Förändring av maximal vattennivå [m]		-0,65	-0,39	-0,36	<0,01	+0,06	-0,84	-0,97
År 1999								
Glafs fjorden: Maximal vattennivå [m ö.h.]		47,15	47,17	-	-	47,26	-	-
Glafs fjorden: Förändring av maximal vattennivå [m]		-0,21	-0,19	-	-	-0,10	-	-
Harefjorden: Maximal vattennivå [m ö.h.]		46,03	46,17	-	-	46,80	-	-
Harefjorden: Förändring av maximal vattennivå [m]		-0,74	-0,60	-	-	+0,03	-	-

8.4.1 Ombyggt dämme

För att simulera effekterna av en omkonstruktion av dämnet i Säffle sänktes botten, invid luckkonstruktionen, i dämnet till 42,50 m ö.h. och Mannings M sattes till $25 \text{ m}^{1/3}\text{s}^{-1}$, vilket motsvarar en grovt sprängd eller grävd kanal (Reinius, 1962). Exempel på åtgärder som skulle kunna bidra till att nå sådana förhållanden är muddring av rännan där den är grund, avlägsning av bergklackar och utstickande konstruktioner som hindrar flödet och att man ser till att inga trösklar eller liknande är begränsande. Scenariot simuleras dels utan att slussen öppnas, vilket motsvaras av scenariot beskrivet i kapitel 8.3.2, dels i kombination med helt öppen sluss enligt kapitel 8.2.1. Ett ombyggt dämme enligt angivna parametrar resulterar i en minskad högsta vattennivå i Glafs fjorden med 21 cm då slussen hålls stängd (K9). Om slussen hålls öppen (K2) blir minskningen istället 28 cm. Viktigt att tänka på är att simuleringen motsvarar en omkonstruktion av hela sträckan från kanalöns norra ände tills slusskanalen och huvudfåran återförenas nedanför slussen så att denna sträcka motsvarar de parametrar som simuleringen görs med. Åtgärderna innebär modellmässigt alltså inte en förändring utan i princip införandet av en ny älvsträcka med givna egenskaper. Osäkerheterna när det gäller strömningssituationen i själva dämnet blir stora samtidigt som osäkerheterna i hur resten av älven uppför sig vid simulerade åtgärder i dämnet inte ökar.

8.4.2 Kompensationsåtgärder vid barriärbygge

Vid simulering av effekterna av ett barriärbygge som skulle stänga av Kyrkviken från resten av Glafs fjorden (se kap. 8.3.1) konstaterades att en liten höjning är att vänta för resten av Byälvs systemet. FINKAN-modellen visar på en generell påverkan på vattennivåerna i Glafs fjorden och Harefjorden på +3 cm. Att åstadkomma en sänkning av den maximala vattennivån i samma storleksordning, för att kompensera för konsekvenserna av ett barriärbygge torde inte behöva innebära speciellt långtgående åtgärder. Nästan alla av de i kapitel 8.2 beskrivna individuella åtgärderna skulle var för sig kunna ge tillräcklig effekt. Ett exempel på en sådan åtgärds kombination vore en ombyggnation av dämnet enligt kapitel 8.4.1 som då den kombineras med ett barriärbygge i Kyrkviken (K15) ger en minskad högsta vattennivå på 18 respektive 36 cm för Glafs fjorden och Harefjorden även om luckorna i slussen hålls stängda under hela översvämningförloppet. Om man nöjer sig med att "i alla fall inte försämra" förhållandena utanför Kyrkviken vid ett barriärbygge kompenserar en ombyggnation av dämnet gott och väl för bygget. Även en mindre omfattande ombyggnation av dämnet än den som föreslås i kapitel 8.4.1 skulle räcka för att kompensera för en barriär till skydd för Kyrkviken.

Diskussioner har förts angående en förändring av vattendomen för Byälven och effekterna av en tänkbar effekt av detta simulerades i kapitel 8.2.4. Detta gav en simulerad minskning av den under översvämningen 2000 högsta vattennivån av samma storlek som den höjning ett barriärbygge skulle ge upphov till. Då båda dessa förändringar simuleras samtidigt (K17) visar FINKAN-modellen också att effekterna i princip skulle släcka ut varandra, resultatet visar avvikelser i vattennivåer med mindre än 1 cm jämfört med de som uppmättes 2000 om vattennivån inte tillåts stiga över 46,8 m ö.h. i Kyrkviken.

8.4.3 Negativa effekter i Harefjorden

De flesta individuella åtgärdscombinationer som simulerats uppvisar minskade högsta vattennivåer längs hela älvsträckningen. Åtgärder som omfattar enbart älvsträckningen mellan Glafs fjorden och Harefjorden orsakar dock generellt marginella höjningar av vattennivån i Harefjorden samtidigt som nivåerna i Glafs fjorden sjunker. Den största sådan effekt som åstadkommit vid de simuleringar som gjorts inträffar då man minskar flödesmotståndet i område A och B (se kap. 8.2.5 och 8.2.6) genom att öka Mannings M med $5 \text{ m}^{1/3} \text{ s}^{-1}$, tar bort ön i Hökeströmmen och vidgar älvfåran vid utloppet i Harefjorden enligt förfarandet i kapitel 8.2.3. De sammanlagda effekterna av dessa förändringar ger i FINKAN-modellen minskade vattennivåer i Glafs fjorden med 18 cm hösten 2000 och 10 cm våren 1999. Samma simulering visar på ökade maximala vattenstånd i Harefjorden med 6 respektive 3 cm och därmed skulle dessa åtgärder förbättra förhållandena runt Glafs fjorden på bekostnad av intressenter runt Harefjorden, om än ganska marginellt.

8.4.4 Realistiskt åtgärds paket

En kombination av åtgärder för att lindra effekterna av översvämningar skulle enligt FINKAN-modellen kunna ge signifikanta resultat. Nedan följer beskrivningen av en realistisk sådan kombination (K26) av åtgärder och en redogörelse för vilka effekter som uppnås. Åtgärds paketet är inte att betrakta som ett verkligt förslag utan inkluderas för att visa på emergens och hur en kombination av åtgärder skulle kunna se ut. Exemplet omfattar följande åtgärder:

- Slussen öppnas i ett tidigare skede och då helt (se kap. 8.2.1)
- Dämnet konstrueras om som beskrivet i kapitel 8.4.1
- Åtgärder vidtas i zon 2 och 3 på sträckorna A och B så att Mannings M ökas med i genomsnitt $2 \text{ m}^{1/3} \text{ s}^{-1}$ (se kap. 8.2.5)
- Det initiala vattenståndet minskas med 50 cm, vilket skall motsvara en konsekvens av ändrad vattendom (se kap. 8.2.4)
- Vallarna som skyddar åkermarken vid Gillberga och norr om Dösslingen schaktas bort (se kap. 8.2.2)

De sammanlagda effekterna av dessa åtgärder då de implementeras i FINKAN-modellen blir en minskning av de högsta vattennivåerna i Glafs fjorden och Harefjorden med 48 respektive 84 cm för översvämningen hösten 2000. Den största effekten syns alltså i Harefjorden. Intressant att notera är hur effekten av borttagandet av översvämningvallarna på grund av emergens ökat markant från att vara knappt märkbar som enskild åtgärd (se kap. 8.2.2) till att ge stora effekter (jämför simulering K26 och K24 i bilaga A.8). Orsaken till detta är förmodligen att vattennivåerna, då de ovan nämnda åtgärderna vidtagits, har sjunkit och därmed inte når så högt över vallarna som då inga åtgärder vidtagits. Effekten av borttagning av vallarna blir då kraftigare. Minskningen orsakad av borttagning av vallarna är för Glafs fjorden 11 cm och för Harefjorden 19 cm. Att vattenståndet minskar i Harefjorden verkar underligt och misstänks vara felaktigt.

8.4.5 Extremt åtgärdspaket

Också ett mycket extremt åtgärdspaket simulerades (K18) där alla individuella åtgärder som bidrar till lägre vattennivåer i systemet kombineras. Det innebär följande förändringar jämfört med det åtgärdspaketet som beskrivs i kapitel 8.4.4:

- Åtgärder vidtas i zon 2 och 3 på sträckorna A, B så att Mannings M ökas med i genomsnitt 10 istället för $2 \text{ m}^{1/3}\text{s}^{-1}$; åtgärder vidtas även i zon 1 på sträckorna A och B samt i alla zoner på sträcka C så att Mannings M ökas med $10 \text{ m}^{1/3}\text{s}^{-1}$
- Ön i Hökeströmmen tas bort helt (se kap. 8.2.3)
- Förträngningen i Hökeströmmen vidgas (se kap. 8.2.3)
- Dämnet konstrueras om som beskrivet i kapitel 8.4.1 men Mannings M i själva rännan ökas till $35 \text{ m}^{1/3}\text{s}^{-1}$

De sammanlagda effekterna av dessa åtgärder då de implementeras i FINKAN-modellen ger en minskning av de högsta vattennivåerna i Glafs fjorden och Harefjorden med 78 respektive 97 cm för översvämningen hösten år 2000. Det är viktigt att understryka att detta scenario representerar mycket drastiska åtgärder, speciellt i samband med åtgärderna för att minska flödesmotståndet på sträckorna, vilka sannolikt skulle innebära stora både ekonomiska och praktiska problem.

9 Diskussion och slutsatser

De förhoppningar och mål för projektet som skissades upp på ett tidigt stadium har i stor utsträckning uppnåtts: Att utifrån en detaljerad höjdmodell konstruera en väldokumenterad hydraulisk modell över Byälven; att med hjälp av modellen identifiera flödes-hämmande faktorer och att undersöka vilka effekter förändringar av dessa kan väntas ge på höga vattenstånd mellan Jössefors och Säffle. Jämförelsen mellan *IHMS* (*HBV*-modellen) och *Rainfall runoff* har inte genomförts som planerat, endast *IHMS* har använts i den slutgiltiga FINKAN-modellen.

Vilken noggrannhet och tillförlitlighet som kunde uppnås med FINKAN-modellen fanns inledningsvis dålig kunskap om. Hur kalibrering skulle göras för att, på ett rationellt sätt, uppnå god samstämmighet med mätvärden var oklart. Enträget kalibreringsarbete gjorde dock att anpassningen till uppmätta värden blev tillfredsställande. Tillförlitligheten i modellen bedöms vara god för vattennivåer inom kalibrerat område och minska utanför detta. Den detaljerade höjdmodellen som FINKAN-modellen bygger på gör dock att simuleringar utanför kalibreringsintervallet är möjliga i fall då kraven på precision inte är så höga.

Ett antal åtgärder längs älven identifierades och simulerades med FINKAN-modellen. Vissa av dessa innebär stora ekonomiska kostnader, några innebär kraftig påverkan på naturen och dessutom innebär en del av förslagen återgärder på privat mark. Mera omfattande ingrepp medför ofta andra konsekvenser än de som simuleras med FINKAN-modellen och dessa måste beaktas. En viss värdering av vilka åtgärder som skulle vara

effektivast har gjorts i kapitel 8. Fortsatt undersökning av vilka åtgärder som bedöms vara möjliga och önskvärda att genomföra ligger utanför detta arbete och diskuteras inte vidare. Några föreslagna åtgärds kombinationer har simulerats, men innan besluts fattas om vilken konkret åtgärds kombination som blir aktuell bör denna simuleras specifikt.

Resultat i relation till problem och tidigare undersökningar

De minskningar i vattenstånd mellan Glafs fjorden och Säffle som beräknas uppkomma som effekt av beskrivna åtgärder kan inte eliminera översvämningar. De simuleringar som gjorts visar på möjliga minskningar av maxnivåerna med knappt 80 cm i Glafs fjorden för hösten 2000 med den mest extrema återgårds kombinationen; för mer realistiska åtgärder kan minskningen väntas bli knappt 50 cm. Detta ska relateras till att vattenståndet under samma period var drygt 3 m över normalt vattenstånd i Glafs fjorden, och 1,9 m över vad som bedömts vara "högsta acceptabla vattenstånd för att inte allvarliga skador skall uppstå" (HydroTerra, 2002, omräknat till RH70). De vattenståndsminskningar som är möjliga att åstadkomma innebär dock att räddningsinsatsernas omfattning samt skador på byggnader och infrastruktur kan minska. Åtgärder längs älven kan även användas som kompensation för de ökade vattenstånd ett eventuellt barriärbygge vid Kyrkviken skulle ge upphov till. Dessa åtgärder behöver medföra en mycket liten sänkning av vattenståndet eftersom den förväntade vattenståndsökningen av ett barriärbygge endast är cirka 3 cm.

De minskningar av maximala vattenstånd som har beräknats i detta arbete bör relateras till tidigare undersökningar. Möjliga högvattennivåminskningar för byälvssystemet som beräknats av Svensson m.fl. (2002) är i samma storleksordning som de som beräknats med FINKAN-modellen. Den kraftigaste åtgärd som simulerades av Svensson m.fl. (2002) innebar ökning av flödet i Säffle med 15 % samt breddning och fördjupning av älvsträckan mellan Glafs fjorden och Harefjorden med 10 respektive 0,5 meter. Denna åtgärd gav minskningar av maximala vattenstånd för översvämningen år 2000 med 42 cm i Glafs fjorden, 34 cm i Gillbergasjön och 17 cm i Harefjorden. Den breddning och muddring av älvfåran som simulerats är dock inte realistiskt utan istället tänkt att motsvaras av mera lokala åtgärder längs älvsträckningen. KaU-modellens var inte tillräckligt detaljerad för att identifiera var specifika åtgärder skulle behöva sättas in.

Med FINKAN-modellen har dessa förändringar kunnat identifieras till specifika åtgärder på ett antal bestämda platser. Resultaten visar även att omfattande åtgärder skulle kunna sänka vattennivån vid en översvämningssituation ytterligare något jämfört med de simuleringar som gjordes med KaU-modellen. FINKAN-modellen har även kunnat användas för att simulera fler olika typer av åtgärder och har tack vara den mera detaljerade höjdinformationen större giltighet utanför de vattennivåer som modellerna kalibrerats för än både KaU-modellen (se kap. 2.1) och Räddningsverkets modell (se kap. 2.2).

Möjliga förbättringar

Eftersom kunskapen om vad som var möjligt att göra med programverktygen till en början var bristfällig var det svårt att konkretisera målen helt innan projektet inleddes och önskemål har under arbetets gång uppkommit från Arvika kommun bland annat om högre

detaljrikedom i simulering av dämnet. Det skulle möjliggöra en noggrannare undersökning av ombyggnation i dämnet än vad som är möjligt i den nuvarande FINKAN-modellen. Dessa önskemål har uppkommit i samband med att en diskussion kring luckbyte och ombyggnation i dämnet har inletts mellan Arvika kommun och Sjöfartsverket. Att denna högre detaljrikedom inte har kunnat beskrivas i den nuvarande modellen beror framförallt på att den funktion kallad *Radial gate* (se bilaga B.1) som testats för detta ändamål gav upphov till kraftiga instabiliteter, vilka inte heller DHI innan denna rapportes färdigställande kunnat råda bot på. Det är dock förmodligen möjligt att lösa instabilitetsproblemen med lämplig modellkonstruktion och kort tidssteg. Alternativt kan en separat studie göras av förhållandena enbart kring dämnet, där beräknade flöden genom dämnet kan relateras till ett motsvarande flöde i FINKAN-modellen och modellerna kan på så vis kopplas samman. För en detaljerad beskrivning av dämnet skulle dessutom en noggrann inmätning av bottendjup och kanalens form kring dämnet behöva göras; speciellt bör utredas om det finns någon tröskel vid kanalöns nordspets, vilket det finns misstankar om (Svensson m.fl., 2002). Om mer detaljerade undersökningar görs kring dämnet bör också älvsträckan mellan Säffle och Vänern studeras mer noggrant.

För att bättre beskriva effekterna som orsakas av ändring i flödesmotstånd längs älvsträckorna bör modellen också kalibreras för låga och normala vattenstånd. En mer verklighetstrogen beskrivning av bottenens råhet innebär att mer specifika åtgärder, i form av minskat flödesmotstånd, kan simuleras. Dessutom skulle detta innebära minskade osäkerheter i de simuleringar som gjorts. För att kunna kalibrera modellen vid lägre flöden och vattenstånd måste dock dämnet och dess luckor beskrivas. En annan modellförbättring som skulle bidra till mer exakt och mer tillförlitlig beskrivning av ändrat flödesmotstånd längs älven vore att specifikt beskriva de broar som korsar Byälven. Detta eftersom broarna orsakar flödesmotstånd, vilket i den nuvarande modellen kompenseras av ökat generellt flödesmotstånd.

För att förbättra FINKAN-modellen och göra historiska vattenståndsmätningar användbara för kalibrering samt underlätta framtida studier bör samtliga pglar längs Byälven vägas in i ett gemensamt höjdsystem. Det vore även önskvärt med en invägd pgl vid utloppet i Vänern såväl som på några fler ställen längs älvsträckningen. Om det inte finns möjlighet att avläsa samtliga pglar varje dag skulle ett rationellt system för avläsning av dessa kunna upprättas: vid normala vattenstånd avläses endast vissa pglar, men då vattennivåerna överstiger en bestämd nivå avläses samtliga pglar. Detta skulle innebära att betydligt mer data finns tillgänglig för kalibrering vid höga vattenstånd och en mer korrekt beskrivning av älven kan göras.

Andra användningsområden

FINKAN-modellen kan användas för fler applikationer än vad som hittills gjorts. Ett närliggande användningsområde är att göra översvämningsskartering längs Byälven. Höjddata finns för framställan av mycket detaljerade översvämningsskarteringar över de områden som laserscannats från Vänern till Harefjorden och mellan Harefjorden och upp till Björnöflagan. Om mer detaljerad höjdinformation inhämtas kan översvämningsskartering göras för hela systemet mellan Jössefors och Vänern. Detaljerad höjd-

information behöver inte nödvändigtvis komma från laserscanning. I städer finns ibland redan detaljerade höjdmodeller tillgängliga vilka om de justeras till korrekt höjdsystem kan användas för kartering.

FINKAN-modellen kommer att förvaltas av NÄS och ska vid behov att kunna användas för nya simuleringar. Modellen kommer även att finnas tillgänglig för Räddningsverket på SMHI och utgöra ett bra verktyg för att prognostisera vattennivåer vid eventuella nya översvämningssituationer i området.

Referenser

Litteraturreferenser

- Abbott, M.B., Ionescu, F., 1967. On Numerical Computation of Nearly -horizontal Flows, J. Hyd. Res., vol.5
- Bergström, S., 1976. Development and application of a conceptual runoff model for Scandinavian catchments, SMHI Report RHO 7, Norrköping
- Bergström, S., 1990. Parametervärden för HBV-modellen i Sverige, SMHI Hydrologi Nr. 28, 1990. Norrköping
- Chow, V. T., 1959. Open-channel Hydraulics, McGraw-Hill book company
- DHI, 2003a. MIKE 11 User Guide
- DHI, 2003b. MIKE 11 Reference Manual
- DHI, 2004. MIKE 11 Reference Manual
- Eriksson, B., 1981. Den potentiella evapotranspirationen i Sverige, RMK 28, SMHI
- Graham, L.P., 2004. Climate change effects on river flow to the Baltic Sea, Ambio
- HydroTerra, 2002. Förstudie - Invallning av Kyrkviken, Karlstad
- Kjellström, E., 2004. Recent and future signatures of climate change in Europe, Ambio
- Lantmäteriet, 2004. www.lantmateriet.se, produktblad GSD-Höjddata, åtkomst september 2004
- Lindström, G., Gardelin, M, Johansson, B., Persson, M., Bergström, S., 1996. HBV-96 - En areellt fördelad modell för vattenkrafthydrologin, SMHI Report RH 12, Norrköping
- Nakayama, Y., Boucher R. F., 1999. Introduction to Fluid Mechanics, London
- Reinius, E., 1962. Vattenbyggnad del 1 – Hydraulik, Stockholm
- Räddningsverket, 2002. Översiktlig översvämningskartering längs Byälven, Rapport nr 25, 2002-01-24
- Räisänen, J., Hansson, U., Ullerstig, A., Döscher, R., Graham, L.P., Jones, C., Meier, M., Samuelsson, P., Willén, U., 2003. GCM driven simulations of recent and future climate with the Rossby Centre coupled atmosphere - Baltic Sea regional climate model RAO SMHI Reports Meteorology and Climatology 101, SMHI

Räisänen, J., U. Hansson, A. Ullerstig, R. Döscher, L.P. Graham, C. Jones, H.E.M. Meier, P. Samuelsson, U. Willén, 2004 European climate in the late 21st century: regional simulations with two driving global models and two forcing scenarios, SMHI

Sjöfartsverket, 2000. Sjökort 134 Arvika-Säffle-Köpmannebro

SMHI, 2004. *IHMS* (Integrated Hydrological Modelling System) Manual, Version 4.5

Svensson, T., Andersson, J-O., Blumenthal, B., Forsberg, J., Hedelin, B., 2002. Projekt Byälven – Översvämningsrisker, förebyggande åtgärder och konsekvenser, Nationellt centrum för älvskadeteknik, Karlstads universitet

Muntliga referenser

Andersson, K., 2004. Samtal med Kerstin Andersson, SMHI, 2004-12-13

Dyberg, I., 2004. Telefonsamtal med Ingvar Dyberg, Sjöfartsverket Trollhättan, november 2004

Ehlert, K., 2004. Telefonsamtal med Kurt Ehlert, SMHI Norrköping, oktober 2004

Jansson, B., 2004. Telefonsamtal med Bertil Jansson, SMHI Norrköping, oktober 2004

Olsson, T., 2004. Samtal på Vattendagarna med Torbjörn Olsson, VD Länsförsäkringars Omvärldsenhet, 2004-11-23

Tapio, A., 2004. Samtal i Säffle med Arto Tapio, juni 2004

Vikström, M., 2004. e-post från Maria Vikström, DHI Göteborg, 2004-11-22

Yacoub, T., 2004. Telefonsamtal med Tahsin Yacoub, SMHI Norrköping, oktober 2004

A.1 Återkomsttid

En viktig frågeställning när det gäller översvämningar är hur ofta man kan förvänta sig att de inträffar. SMHI har beräknat vattenståndet i Glafs fjorden under översvämningen år 2000 att motsvara ett flöde med en återkomsttid på 500 år (Räddningsverket, 2002).

För beräkning av återkomsttid för högsta vattennivån år 2000 används tidsserier med årsmax för perioden 1935 - 2000 (med undantag för 1962 – 1965 som inte finns registrerade). En svagt positiv trend ($8,64 \cdot 10^{-7} \text{ m}\cdot\text{år}^{-1}$) avlägsnas från serien varefter den antas normalfördelad och har väntevärde $\bar{W} = 46,65 \text{ m}$ ö.h., och standardavvikelse $\sigma = 0,63 \text{ m}$. Normalfördelning har antagits på inte helt solida grunder och Gumbel- eller Pearsonfördelning skulle ge annorlunda återkomsttid.

Risken för en vattennivå lika med eller högre än den år 2000 definieras som:

$$P(W_{\text{Max}} \geq W_{\text{Max}(2000)}) = 1 - P(W_{\text{Max}} < W_{\text{Max}(2000)}) \quad (\text{A - 1})$$

där

$$W_{\text{Max}(2000)}^{14} = 48,64 \text{ m} \quad (\text{A - 2})$$

$$W_{\text{Max}} \sim N(46,65 \text{ m}; 0,63 \text{ m}) \quad (\text{A - 3})$$

$$P(W_{\text{Max}} < W_{\text{Max}(2000)}) = 0,9992 \quad (\text{A - 4})$$

vilket ger

$$P(W_{\text{Max}} \geq W_{\text{Max}(2000)}) = 1 - 0,9992 = 0,0008 \quad (\text{A - 5})$$

vilket ger en återkomsttid T enligt

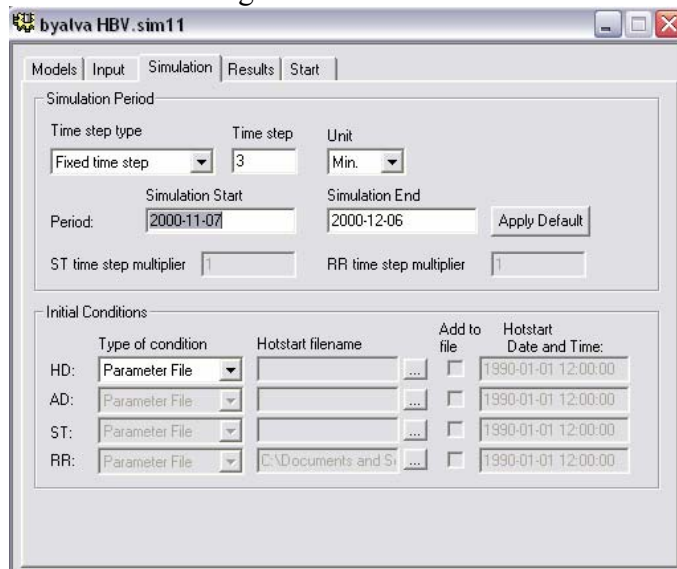
$$T = \frac{1}{P(W_{\text{Max}} \geq W_{\text{Max}(2000)})} = \frac{1}{0,0008} = 1250 \text{ år} \quad (\text{A - 6})$$

För det aktuella systemet är dock dessa beräkningar behäftade med problem eftersom förändringar i hur vattenstånden regleras från Säffle stör stokastiken i registrerade årsmax. Om detta påverkat statistiken så att hela serien inte kan anses komma från samma fördelning bör serien istället delas upp i kortare perioder. Svensson m.fl. (2002) har gjort detta och uppskattar den vattennivå som uppmättes 2000 till att ha en återkomsttid på mellan 60 och 170 år baserat på statistik mellan år 1966 och 2000. Detta förfarande minskar dock antalet mätvärden så att man närmar sig gränsen för när de statistiska metoder som använts är tillämpliga.

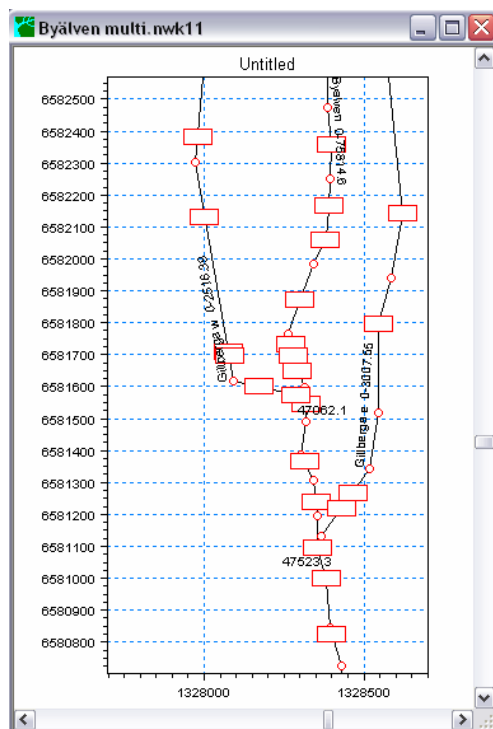
¹⁴ $W_{\text{Max}(2000)}$ är det uppmätta maximala vattenståndet med avdrag för trend i mätserien

A.2 Editorer i MIKE 11

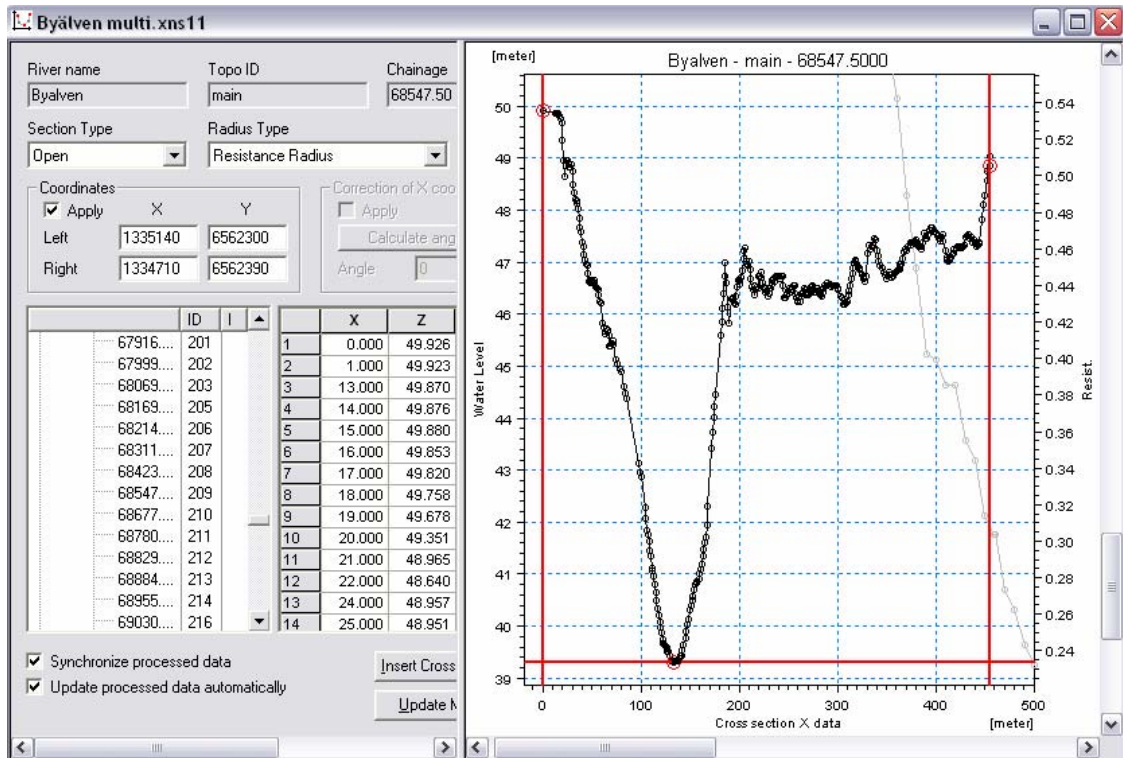
Skärmdumpar från de editorer i *MIKE 11* som använts under arbetet med FINKAN-modellen visas i figur A - 1 t.o.m. A - 6.



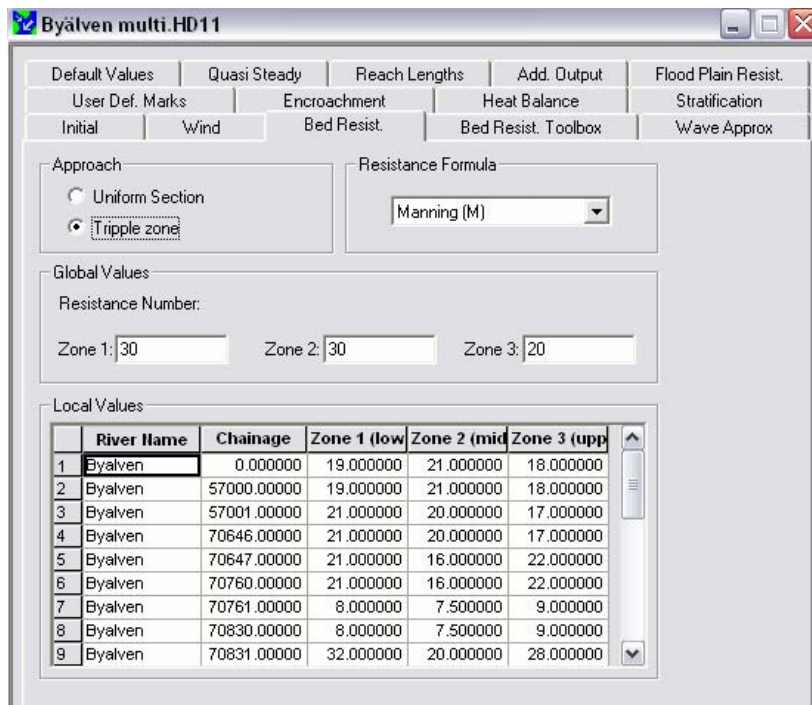
Figur A - 1 Skärmdump från *Simulation Editor* som bl.a. visar inställningsmöjligheter av tidssteg och simuleringsperiod.



Figur A - 2 Skärmdump från *River Network Editor* som visar nedre delen av översvämningssområdena vid Gillberga, med flödet riktat nedåt i figuren. Rektanglarna visar positioner där tvärsektioner är placerade.



Figur A - 3 Skärmdump från *Cross Section Editor* som visar en tvärsnitt, med XZ-punkter visade i tabell i mitten och grafiskt till höger.



Figur A - 4 Skärmdump från *Hydrodynamic Editor* där en tabell med flödesmotstånd specificerat som Mannings M visas.

byalva HBV.bnd11

	Boundary Description	Boundary Type	Branch Name	Chainage	Chainage	Gate ID	Boundary ID
1	Open	Inflow	Byalven	0	0		
2	Point Source	Inflow	Byalven	10	0		
3	Distributed Source	Inflow	Byalven	10	20290		
4	Point Source	Inflow	Byalven	17263	0		
5	Distributed Source	Inflow	Byalven	20290	50295		
6	Point Source	Inflow	Byalven	45615	0		
7	Distributed Source	Inflow	Byalven	50295	55854		
8	Distributed Source	Inflow	Byalven	50295	74831		
9	Structures	Regulating Structure	Byalven	70800	0	Slussen	
10	Open	Water Level	Byalven	75814.59	0	0	

Include HD calculation
 Include AD boundaries
 Mike 12

	Data Type	TS Type	File / Value	TS Info
1	Discharge:	TS File	infl-utfl.dfs0 ... Edit	Joessef

Figur A - 5 Skärmdump från *Boundary Editor* som visar randvillkor till modellen.

byalva2 v2.RR11 - Modified

Catchments NAM UHM SMAP Urban FEH DRIFT Timeseries

Catchment Definition

Catchment name

Rainfall runoff model type

Catchment area Calibration plot

Catchment Overview

	Name	Model	Area	Calculated Area	#ID
1	AAMOTFORS	NAM	23.4	23.5034	0
2	ARVIKA	NAM	392.9	400.321	0
3	STOEMNE	NAM	385	358.491	0
4	SAEFFLE	NAM	198.5	193.485	0
5	SVANEHOLM	NAM	75.7	75.3971	0
6	BYALVA	Combined	1051.2		0

Figur A - 6 Skärmdump från *Rainfall runoff Editor* med en tabell över delavrinningsområdena.

A.3 Ekolodning

Ekolodning av intressanta partier längs älvsträckan utfördes av mellan 21 och 27 april 2000. Ekolodning utfördes med ett NAVMAN DEPTH 3100 ekolod och en MAGELLAN WAAS-korrigerande GPS kopplade till en datainsamlare. Ytterligare en WAAS-korrigerande GPS, av märket GARMIN, kopplad till en annan datainsamlare fanns under mätperioderna placerad rakt över en fixpunkt inom några kilometers radie från mätbåten. För att sammanställa en djupmodell registrerades information om djup under mätbåt, vattenstånd, GPS-position och GPS-drift. Informationen sammanställdes sedan till en djupmodell i nationella referenssystem, RH70 och RT90.

A.3.1 Vattenytor och höjdfixar

För kunna registrera vattenytans lutning längs älvsträckan under mätningarna upprättades 11 höjdfixer som höjdbestämdes genom avvägning som utfördes av mättekniker från Arvika kommun. Höjdfixarnas placeringar är markerade i figur A - 7. Höjderna bestämdes i referenssystemet RH70 utifrån kända höjdfixer längs större vägar. Vattennivåerna vid höjdfixarna registrerades vid lodningen för de fixar som var aktuella för området som lodades. Registrerade vattennivåer vid olika tidpunkter redovisas i tabell A - 1. Utifrån registrerade vattenstånd linjärinterpolerades sedan vattenytor vilka representerades med plan i 3d så som vattennivån antogs ligga under mätperioderna.



Figur A - 7 Karta med markeringar där höjdfixar upprättades

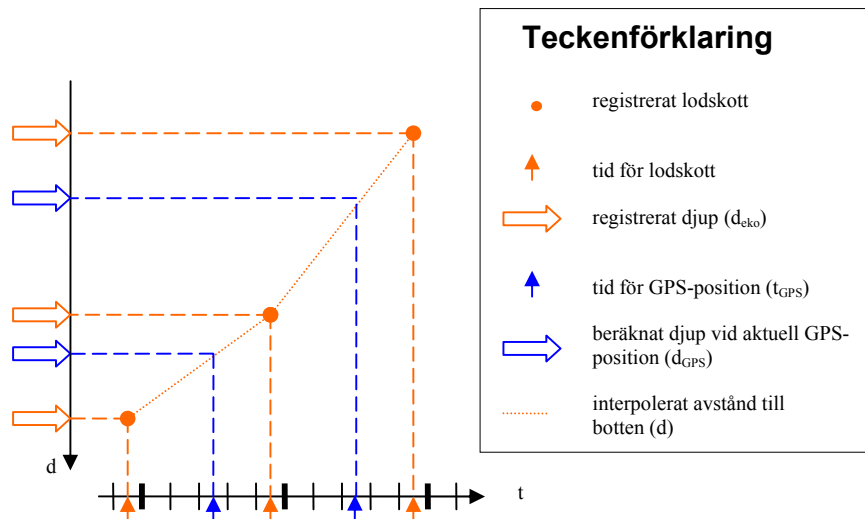
Tabell A - 1 Vattennivåregistreringar under lodning för bottenkartering listade från norr till söder.

Plats	Avläst nivå 2004-04-21 (m ö.h.)	Avläst nivå 2004-04-22 (m ö.h.)	Avläst nivå 2004-04-26 (m ö.h.)	Avläst nivå 2004-04-27 (m ö.h.)
Glafsajorden	45,825	-	-	-
Högsäter	45,785	45,770	-	-
Vid Gillberga Kyrka	-	45,679	-	-
Nysäter	-	45,625	45,542	-
Cirka 2 km söder om Nysäter	-	-	45,517	-
Dösslingen	-	-	45,463	-
Harefjorden (norra)	-	-	45,435	45,450
Nordväst om Rolfserudstorp	-	-	-	45,433
Rakt väster om Rolfserud	-	-	-	45,397
Sjöfalle, norr om Kanalön	-	-	-	45,369

A.3.2 Djupbestämning vid GPS-position

I mätbåten registrerades varje sekund aktuellt djup och aktuell GPS-position. Båten manövrerades så att trånga och oregelbundna sektioner kartlades noggrannare än breda

och uniforma sektioner som mindre påverkar strömningsberäkningar respektive approximeras bra genom interpolation. Exakt djup för varje GPS-position linjärinterpolerades mellan de två i tid närmast registrerade djuppunkter enligt ekvation (A-7). Principen för beräkningen illustreras i figur A-8.



Figur A-8 Illustration av hur djupet beräknas vid en specifik tidpunkt, som motsvarar den tidpunkt då en GPS-position registrerats.

$$d(t_{GPS}) = d(t_{eko}^-) + \frac{d(t_{eko}^+) - d(t_{eko}^-)}{t_{eko}^+ - t_{eko}^-} \cdot (t_{GPS} - t_{eko}^-) \quad (\text{A-7})$$

med följande beteckningar:

$d(t)$	djup vid tidpunkt t [m]
t_{GPS}	tidpunkt för registrerad GPS-position
$t_{eko}^{+/-}$	tidpunkt för ekolodmätning (+/- betecknar närmast efter/före aktuell tid t)

A.3.3 Atmosfäriska störningar och systematisk förskjutning

Under det att mätningar gjordes i mätbåten registrerades GPS-positionen för en mottagare placerad direkt över en i horisontalplanet känd fixpunkt inom några kilometers radie från aktuellt mätområde. Utifrån dessa mätningar kan det momentana felet härrörande från atmosfäriska störningar beräknas enligt:

$$\overrightarrow{fel}_{\text{atmosfärisk störning}}(t) = \overrightarrow{position}_{\text{GPS-fix}}(t) - \overrightarrow{position}_{\text{fix}}(t) \quad (\text{A-8})$$

Förfarandet är att likna vid vad som kallas differentiell GPS men skiljer sig något då man bortser från att båda GPS-stationerna inte nödvändigtvis har kontakt med exakt samma satellitkonstellation och att ingen korrigering för detta införs. Vidare kunde konstateras att de två GPS:er som användes inte gav samma resultat utan koordinater systematiskt förskjutna från varandra. För exakt positionsbestämning är denna situation inte den bästa men begränsade resurser och tid gjorde att befintlig utrustning ändå användes.

För att kompensera för förskjutningen registrerades ett antal koordinater med båda GPS:erna och förskjutningen beräknades till 7,2 m (standardavvikelse $\sigma = 1,5$ m) i x -led och - 6,8 m (standardavvikelse $\sigma = 1,3$ m) i y -led (RT90). Därmed kunde det dessa systematiska fel sammanfattas med en vektor i planet som beskriver felet.

$$\overrightarrow{fel}_{\text{förskjutning}} = [7,2 ; -6,8] \quad (\text{A-9})$$

Korrigerade positioner i planet beräknades slutligen enligt:

$$\overrightarrow{position}(t) = \overrightarrow{position}_{\text{GPS-rover}}(t) - \overrightarrow{fel}_{\text{atmosfärisk störning}}(t) + \overrightarrow{fel}_{\text{förskjutning}} \quad (\text{A-10})$$

där

$$\overrightarrow{position}(t) = [x(t), y(t)] \quad (\text{A-11})$$

A.3.4 Beräkning av bottenivåer i gemensamt höjdsystem

För att beräkna absolut höjdnivå vid varje registrerad position projicerades positionen på en 3d-polygon som spänns upp av den registrerade vattennivån vid mättillfället. Från denna projicerade punkts z -koordinat z_0 subtraheras sedan djupet vid motsvarande tid $d(t)$. Denna differens ger absoluta höjden vid given position vid tiden t_{GPS} .

$$z(t) = z_0(t) - d(t) \quad (\text{A-12})$$

$$\overrightarrow{position}_{3d}(t) = [\overrightarrow{position}(t), z(t)] = [x(t), y(t), z(t)] \quad (\text{A-13})$$

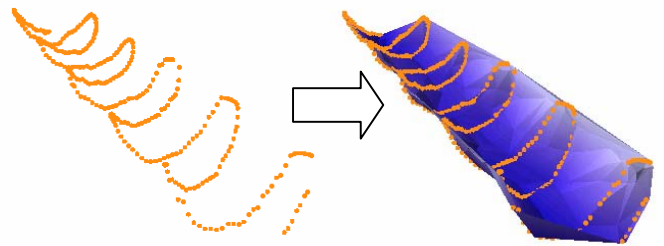
A.3.5 Datagenomgång

Bland registrerade höjdpunkter finns en del brus som härrör från felaktiga registreringar av lodskott. Exempel på sådana fel är då ekot från ekolodet reflekterats i båtens botten och studsat två gånger ner till botten, i sådana fall syns avvikande djuppunkter på dubbla omgivande djup. I andra fall har ekolodet "hakat upp sig" och givit helt orealistiska värden. Vid mycket tät bottenvegetation, exempelvis då mätbåten kördes genom vassruggar och liknande skall ekolodet egentligen ge en felsignal men ibland registrerades dock felaktiga mätvärden. Dessa typer av felregistrerade djup går till största delen att visuellt identifiera och rensa bort då data representeras i 3d. Karaktäristiska utseenden på felaktiga djupregistreringar är förutom starkt avvikande mätpunkter också orealistiskt långa serier med exakt samma registrerade djup. Felaktiga mätpunkter avlägsnades genom visuell genomgång och datamängden reducerades därmed från 55 619 registrerade djup till 52 429 korrekt registrerade djup, vilket motsvarar 94 % av det ursprungliga antalet djuppunkter.

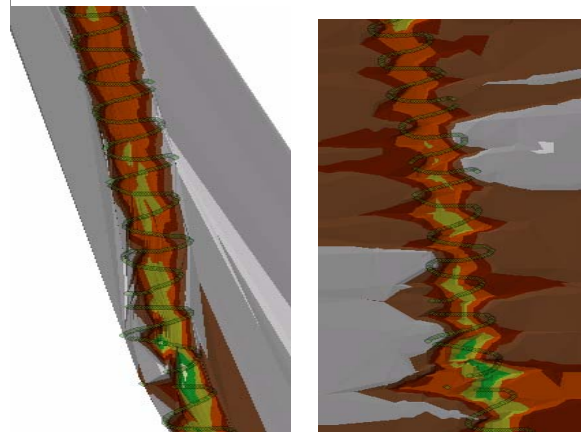
A.3.6 Interpolering av 3D-modell

För att utifrån registrerade absoluta höjdpunkter så bra som möjligt representera den verkliga botten utseende konstruerades en 3d-modell genom direkt triangulering mellan registrerade djuppunkter. Metoden, som utifrån ett antal punkter i tre dimensioner skapar en tredimensionell yta går till så att man i GIS-programvara konstruerar en TIN-fil som utgör ytan. Hur ytan konstrueras utifrån punkterna illustreras i figur A - 9. Även andra interpolationsmetoder undersöktes men exempelvis Kriginginterpolation påverkades mycket av att mätpunkterna låg i ett sicksack-mönster eftersom interpolationsmetoden viktat närliggande mätpunkter omvänt exponentiellt mot det radiella avståndet. Med direkt triangulering ger mätpunkternas distribution endast upphov till en mindre veckning av älvfåran. Skillnaden syns tydligt i figur A - 10.

Slutligen erhöles en triangulerad yta som beskriver botten i lodade sektioner av älvfåran med drygt 50 000 noder. Datamängden upptar knappt 10 Mbyte lagringsutrymme.



Figur A - 9 Principen vid direkt triangulering beskrivs av figuren. Mätpunkterna får utgöra noder i en yta som består av en stor mängd trianglar. Ytan representeras av en TIN-fil.



Figur A - 10 Topografin till vänster är direkt triangulerad, effekten av mätpunkternas (markerade som gröna punkter) sicksack-distribution blir endast marginell. Topografin till höger föreställer samma älvsträcka men interpolerad med Kriginginterpolation, vilket ger en sicksack-liknande utseende på älvfåran.

A.4 SMHIs beräkning av flöde genom dämnet

Avbördningen sker över en fast tröskel mot vilken tre luckor kan nedsänkas för att dämna uppströms. Arrangemanget, kallat dämnet, beskrivs närmare i kapitel 7.4 och bilaga B.1. För att beräkna avbördningen har SMHI använt några olika hydrauliska formler beroende på rådande strömningsförhållanden. Strömningsförhållandena för varje lucka delas upp i tre möjliga fall

- Fall A - flödet regleras av luckställning, inträffar då luckans nederkant är lägre än vattenytan
- Fall B - dammluckan påverkar inte flödet som istället bestäms av skillnaden i vattennivå uppströms och nedströms luckan; detta inträffar då luckan är helt uppfälld och $h_2 > \frac{2}{3} h_1$
- Fall C - dammluckan påverkar inte flödet som istället bara bestäms av vattennivån uppströms dämnet eftersom vattennivåskillnaden är så stor att en bestämmande sektion antas uppstå i dämnet; detta inträffar då luckan är helt uppfälld och $h_2 < \frac{2}{3} h_1$

med följande beteckningar:

- h_1 vattennivå ovanför tröskeln [m] (mätt vid pegel benämnd Dämnet)
 h_2 vattennivå nedanför tröskeln [m] (mätt vid pegel benämnd Backeströmmen)

där flödet beräknas på följande sätt:

$$\mathbf{A} \quad q = \mu_1 B h \sqrt{2g(h_1 - h_2)} \quad (\mathbf{A - 14})$$

$$\mathbf{B} \quad q = \mu_1 B h_1 \sqrt{2g(h_1 - h_2)} \quad (\mathbf{A - 15})$$

$$\mathbf{C} \quad q = \frac{2}{3} 0,97 \mu_1 B h_1 \sqrt{2gh_1} \quad (\mathbf{A - 16})$$

med följande beteckningar:

- q flöde [m^2s^{-1}]
 μ_1 utströmningskoefficient [-]
 h lucköppning [m]
 B dammluckans bredd [m]
 g tyngdaccelerationen [$\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$]

Flöden beräknas individuellt för de tre dammluckorna med parametervärden från tabell A - 2 och summeras därefter.

Tabell A - 2 Parametervärden använda vid beräkningar av flöde genom dämnet.

Parameter	Värde
B	10,6
g	9,81
μ_1	0,7

A.5 Parametervärden för IHMS

Tabell A - 3 Värden på kalibreringsparametrar i IHMS

Parameter	Värde använda i FINKAN-modellen	Värden för området enligt SMHI
'pcorr '	1,0	0,850
'pcalt '	0,10	0,10
'pcaltl '	0,0	-
'tcalt '	0,60	0,60
'rfcf '	1,0	1,0
'sfcf '	1,0	1,0
'fosfcf '	1,0	0,90
'cfmax '	3,5	2,60
'focfmax '	1,0	0,60
'tt '	0,0	0,0
'dtm '	0,0	0,0
'tti '	2,0	2,0
'cfr '	0,050	0,050
'whc '	0,10	0,10
'sfdistfo '	0,20	0,20
'sfdistfi '	0,50	0,20
'sclass '	3,0	3,0
'fc '	200,0	200,0
'lp '	0,90	0,90
'beta '	2,0	2,70
'cflux '	1,0	-
'cevpfo '	1,0	1,150
'athorn '	0,0	0,220
'stf '	0,0	2,0
'k4 '	0,020	0,070
'perc '	1,0	0,20
'khq '	0,170	0,090
'hq '	3,0	3,0
'alfa '	1,0	1,0
'maxbas '	6,0	4,0
'cevppl '	1,10	1,10
'lakedays '	0,0 ¹	30,0
'critstep '	1,0	1,0

¹ Värdet avviker starkt mellan FINKAN-modellen och SMHIs parametrar. Parametern sattes av misstag till 0 i FINKAN-modellen men undersökning av detta visade att effekt på avrinning därav är mycket marginell.

A.6 Förhållanden mellan vattennivå och area för vattenmagasin

Tabell A - 4 Förhållanden mellan vattennivå och area för vattenmagasinen Glafs fjorden och Harefjorden.

Vattennivå [m ö.h.]	Verklig area Glafs fjorden [km ²]	Modellarea Glafs fjorden [km ²]	Differens Glafs fjorden [km ²]	Verklig area Harefjorden [km ²]	Modellarea Harefjorden [km ²]	Differens Harefjorden [km ²]
45,1	95,06	77,51	17,55	14,99	12,17	2,82
45,3	96,15	78,10	18,06	15,29	12,43	2,86
45,5	97,21	78,69	18,52	15,59	12,69	2,89
45,7	98,17	79,26	18,91	15,86	12,94	2,92
45,9	99,04	79,80	19,24	16,08	13,18	2,90
46,1	99,93	80,32	19,61	16,27	13,41	2,86
46,3	100,61	80,83	19,77	16,43	13,63	2,79
46,5	101,26	81,34	19,93	16,58	13,85	2,73
46,7	101,90	81,84	20,06	16,73	14,07	2,66
46,9	102,52	82,33	20,18	16,88	14,28	2,60
47,1	103,55	82,82	20,73	17,07	14,49	2,58
47,3	104,19	83,30	20,90	17,22	14,69	2,53
47,5	104,83	83,78	21,05	17,38	14,90	2,48
47,7	105,46	84,26	21,20	17,54	15,12	2,42
47,9	106,08	84,73	21,35	17,70	15,34	2,36
48,1	107,42	85,23	22,19	18,09	15,60	2,49
48,3	108,07	85,77	22,30	18,29	15,83	2,46
48,5	108,72	86,33	22,38	18,51	16,05	2,46
48,7	109,35	86,89	22,46	18,72	16,25	2,48
48,9	109,97	87,44	22,53	18,95	16,44	2,51
49,1	110,99	88,04	22,95	-	-	-
49,3	111,61	88,62	22,98	-	-	-
49,5	112,22	89,20	23,02	-	-	-
49,7	112,83	89,77	23,06	-	-	-
49,9	113,43	90,32	23,11	-	-	-

A.7 Kalibreringsparametrar för FINKAN-modellen

Tabell A - 5 Resultat från kalibrering. Gränser mellan de zoner där flödesmotstånd specificeras. Värderna interpoleras mellan specificerade positioner.

Beskrivning	Älvgren	Position [m]	Zon 1-2 ¹ [m ö.h.]	Zon 2-3 ² [m ö.h.]
Jössefors	Byalven	0,0	46,6	47,3
Harefjorden	Byalven	57 000,0	46,6	47,3
"	Byalven	57 001,0	46,4	46,8
Nordspetsen av kanalön i Säffle	Byalven	70 646,0	46,4	46,8
"	Byalven	70 647,0	45,8	46,55
40 m uppströms dämnet	Byalven	70 760,0	45,8	46,55
"	Byalven	70 761,0	45,8	46,55
Sydspetsen av kanalön i Säffle	Byalven	70 830,0	45,8	46,55
"	Byalven	70 831,0	45,4	45,85
Vänern	Byalven	75 814,6	45,4	45,85

¹ Gränsen mellan nedersta och mellersta zonen

² Gränsen mellan mellersta och översta zonen

Tabell A - 6 Resultat från kalibrering. Mannings M för de zoner där flödesmotstånd specificeras. Värderna interpoleras mellan specificerade positioner.

Beskrivning	Älvgren	Position [m]	$M_{zon 1}$ [$m^{1/3}s^{-1}$]	$M_{zon 2}$ [$m^{1/3}s^{-1}$]	$M_{zon 3}$ [$m^{1/3}s^{-1}$]
Jössefors	Byalven	0,0	19,0	21,0	18,0
Harefjorden	Byalven	57 000,0	19,0	21,0	18,0
"	Byalven	57 001,0	21,0	20,0	17,0
Nordspetsen av kanalön i Säffle	Byalven	70 646,0	21,0	20,0	17,0
"	Byalven	70 647,0	21,0	16,0	22,0
40 m uppströms dämnet	Byalven	70 760,0	21,0	16,0	22,0
"	Byalven ¹	70 761,0	8,0	7,5	9,0
Sydspetsen av kanalön i Säffle	Byalven ¹	70 830,0	8,0	7,5	9,0
"	Byalven ²	70 831,0	32,0	20,0	28,0
Vänern	Byalven ²	75 814,6	32,0	20,0	28,0
Dösslingen	Doesslingen ³	0,0	18,0	18,0	18,0
"	Doesslingen ³	1 100,7	18,0	18,0	18,0
Norr om Gillberga kyrka	Gillberga e ³	0,0	18,0	18,0	18,0
"	Gillberga e ³	3 007,5	18,0	18,0	18,0
"	Gillberga w ³	0,0	18,0	18,0	18,0
"	Gillberga w ³	2 516,4	18,0	18,0	18,0
Slusskanalen i Säffle	Slusskanal ³	0,0	45,0	45,0	45,0
"	Slusskanal ³	420,1	45,0	45,0	45,0

¹ Mycket lågt Mannings M orsakat av att flödesmotstånd har använts för att kompensera frånvaron av turbulens, vilket egentligen skapas av tröskeln i dämnet

² Råheten för denna sträcka är ej helt realistisk vilket beror på att nedre randvillkoret förmodligen inte stämmer (se kap. 6.1)

³ För dessa områden är flödesmotståndet uniformt, d.v.s. varierar ej med höjd

A.8 Tabell över kombinerade åtgärder

Tabell A - 7 Tabellen redovisar resultaten av åtgärdskombinationer som simulerats. Åtgärderna presenteras i kolumner betecknade K** /8.4.* i vilka vidtagna åtgärder är angivna med grå markeringar och resultat för respektive år avläses i nedre delen av tabellen.

Åtgärdsbeskrivning	Motsvarande enskild åtgärd	Kombinationsbenämning														
		K1	K2	K3	K4	K5	K6	K7	K8	K9	K10	K11	K12	K13	K14	
		8.4.1	8.4.1	8.4.1	8.4.1	8.4.1	8.4.1	8.4.1	8.4.1	8.4.1	8.4.1	8.4.1	8.4.1	8.4.1	8.4.3	
Ökat flöde genom slussen	8.2.1															
Borttagning av invallningar	8.2.2															
Vidgning av Hökeströmmen	8.2.3 c															
Effekter av förändrad vattendom	8.2.4															
Mi zon 2 & 3 på sträcka A & B +2	8.2.5 AB +2															
Mi zon 2 & 3 på sträcka A & B +5	8.2.5 AB +5															
Mi zon 2 & 3 på sträcka A, B & C +10	(saknas)															
Mi zon 1 på sträcka A, B & C +10	(saknas)															
Mi zon 2 & 3 på sträcka A, B & C +5	8.2.5 ABC +5															
Mi zon 1 på sträcka A, B & C +5	8.2.6 ABC +5															
Mi zon 1 på sträcka A & B +5	8.2.6 AB +5															
Barriär till Kyrkviken	8.3.1															
Stängd sluss	8.3.2															
Mi dämmet ändrat till 25	(saknas)															
Mi dämmet ändrat till 35	(saknas)															
Tröskel i dämmet borttagen	(saknas)															
År 2000																
Glafsfjorden: Maximal vattennivå [m ö.h.]		47,44	48,40	48,26	48,24	48,21	48,15	48,11	48,10	48,48	48,10	48,05	47,96	48,07	48,51	
Glafsfjorden: Förändring av maximal vattennivå [m]		-0,25	-0,28	-0,43	-0,45	-0,48	-0,54	-0,57	-0,58	-0,21	-0,58	-0,72	-0,63	-0,61	-0,18	
Harefjorden: Maximal vattennivå [m ö.h.]		47,24	47,03	-	-	-	-	-	46,82	47,29	-	46,71	46,82	46,87	47,74	
Harefjorden: Förändring av maximal vattennivå [m]		-0,44	-0,65	-	-	-	-	-	-0,86	-0,39	-	-0,97	-0,85	-0,80	+0,06	
År 1999																
Glafsfjorden: Maximal vattennivå [m ö.h.]		47,17	47,15	-	-	-	-	-	47,00	47,17	-	46,92	-	46,99	47,26	
Glafsfjorden: Förändring av maximal vattennivå [m]		-0,19	-0,21	-	-	-	-	-	-0,36	-0,19	-	-0,44	-	-0,37	-0,10	
Harefjorden: Maximal vattennivå [m ö.h.]		46,12	46,03	-	-	-	-	-	45,93	46,17	-	45,87	-	45,96	46,80	
Harefjorden: Förändring av maximal vattennivå [m]		-0,65	-0,74	-	-	-	-	-	-0,85	-0,60	-	-0,90	-	-0,81	+0,03	

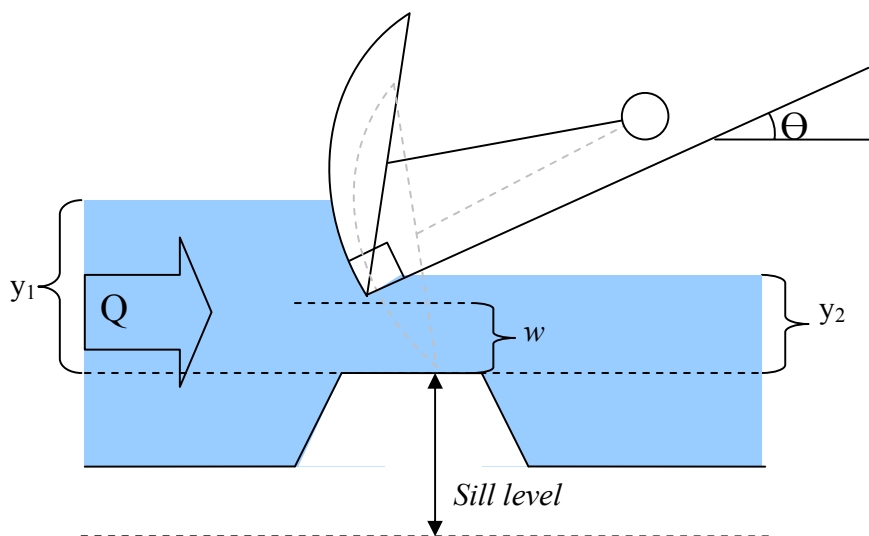
A.8 Tabell över kombinerade åtgärder

Tabell A - 7(forts) Tabellen redovisar resultaten av åtgärdskombinationer som simulerats. Åtgärderna presenteras i kolumner betecknade K**/8.4.* i vilka vidtagna åtgärder är angivna med grå markeringar och resultat för respektive år avläses i nedre delen av tabellen.

Åtgärdsbeskrivning	Motsvarande enskild åtgärd	Kombinationsbenämning													
		K15 8.4.2	K16	K17 8.4.2	K18 8.4.5	K19	K20	K21	K22	K23	K24	K26 8.4.4			
Ökat flöde genom slussen	8.2.1														
Borttagning av invallningar	8.2.2														
Vidgning av Hökeströmmen	8.2.3 c														
Effekter av förändrad vattendom	8.2.4														
Mi zon 2 & 3 på sträcka A & B +2	8.2.5 AB +2														
Mi zon 2 & 3 på sträcka A & B +5	8.2.5 AB +5														
Mi zon 2 & 3 på sträcka A, B & C +10	(saknas)														
Mi zon 1 på sträcka A, B & C +10	(saknas)														
Mi zon 2 & 3 på sträcka A, B & C +5	8.2.5 ABC +5														
Mi zon 1 på sträcka A, B & C +5	8.2.6 ABC +5														
Mi zon 1 på sträcka A & B +5	8.2.6 AB +5														
Barriär till Kyrkviken	8.3.1														
Stängd sluss	8.3.2														
Mi dämmet ändrat till 25	(saknas)														
Mi dämmet ändrat till 35	(saknas)														
Tröskel i dämmet borttagen	(saknas)														
År 2000															
Glafsfjorden: Maximal vattennivå [m ö.h.]		48,51	48,28	48,68	47,91	48,11	48,20	48,41	48,10	48,18	48,29	48,18			
Glafsfjorden: Förändring av maximal vattennivå [m]		-0,18	-0,40	<-0,01	-0,78	-0,57	-0,48	-0,28	-0,58	-0,50	-0,39	-0,50			
Harefjorden: Maximal vattennivå [m ö.h.]		47,32	47,06	47,68	46,71	46,87	46,83	47,04	46,85	46,82	47,02	46,83			
Harefjorden: Förändring av maximal vattennivå [m]		-0,36	-0,62	<-0,01	-0,97	-0,81	-0,84	-0,64	-0,82	-0,86	-0,66	-0,85			
År 1999															
Glafsfjorden: Maximal vattennivå [m ö.h.]		-	47,10	-	-	47,01	47,04	47,15	-	-	47,13	-			
Glafsfjorden: Förändring av maximal vattennivå [m]		-	-0,26	-	-	-0,35	-0,32	-0,21	-	-	-0,23	-			
Harefjorden: Maximal vattennivå [m ö.h.]		-	46,06	-	-	45,96	45,94	46,03	-	-	46,06	-			
Harefjorden: Förändring av maximal vattennivå [m]		-	-0,71	-	-	-0,81	-0,83	-0,74	-	-	-0,71	-			

B.1 Radial Gate

En speciell beräkningsmodul finns i *MIKE 11* att tillgå för beräkningar av flödesbegränsningar på grund av runda luckor som hindrar flödet genom att mot en tröskel på botten begränsa tvärsnittsarean, vilket är en konstruktion som motsvaras av dammluckorna i vad som kallas dämnet i Byälven. Figur B - 1 utgör en schematisk skiss med beteckningar över en sådan lucka sedd från sidan.



Figur B - 1 Skissen föreställer en av tre identiska luckor som används för reglering av flöde genom dämnet i Säffle sedd från väster.

I den av *Structure operations* som kallas *Radial Gate* delas flödet upp i ett flöde över och ett flöde under en konvex lucka. Luckregleringen i Säffle är emellertid sådan att något flöde över luckorna aldrig inträffar. Flödet under luckorna beräknas olika beroende på om anläggningen ger upphov till utströmning oberoende eller beroende av vattennivån på nedströmssidan dammluckan.

För fall med flöde oberoende av vattennivån nedströms, då $y_2 < y_{Limit} + y_{Tran,Bottom}$, gäller

$$Q_{free,underflow} = \tau \frac{\delta}{\sqrt{1 + \frac{\delta w}{y_1}}} a \sqrt{2gy_1} \quad (\text{B - 1})$$

och med flöde beroende av vattennivån nedströms, då $y_2 > y_{Limit} + y_{Tran,Bottom} + y_{Tran,Depth}$

$$Q_{submerge,underflow} = \tau \frac{\delta}{\sqrt{1 - \left(\frac{\delta w}{y_1}\right)^2}} a \sqrt{2g(y_1 - y_2)} \quad (\text{B - 2})$$

$$A = wB \quad (\text{B.1 - 3})$$

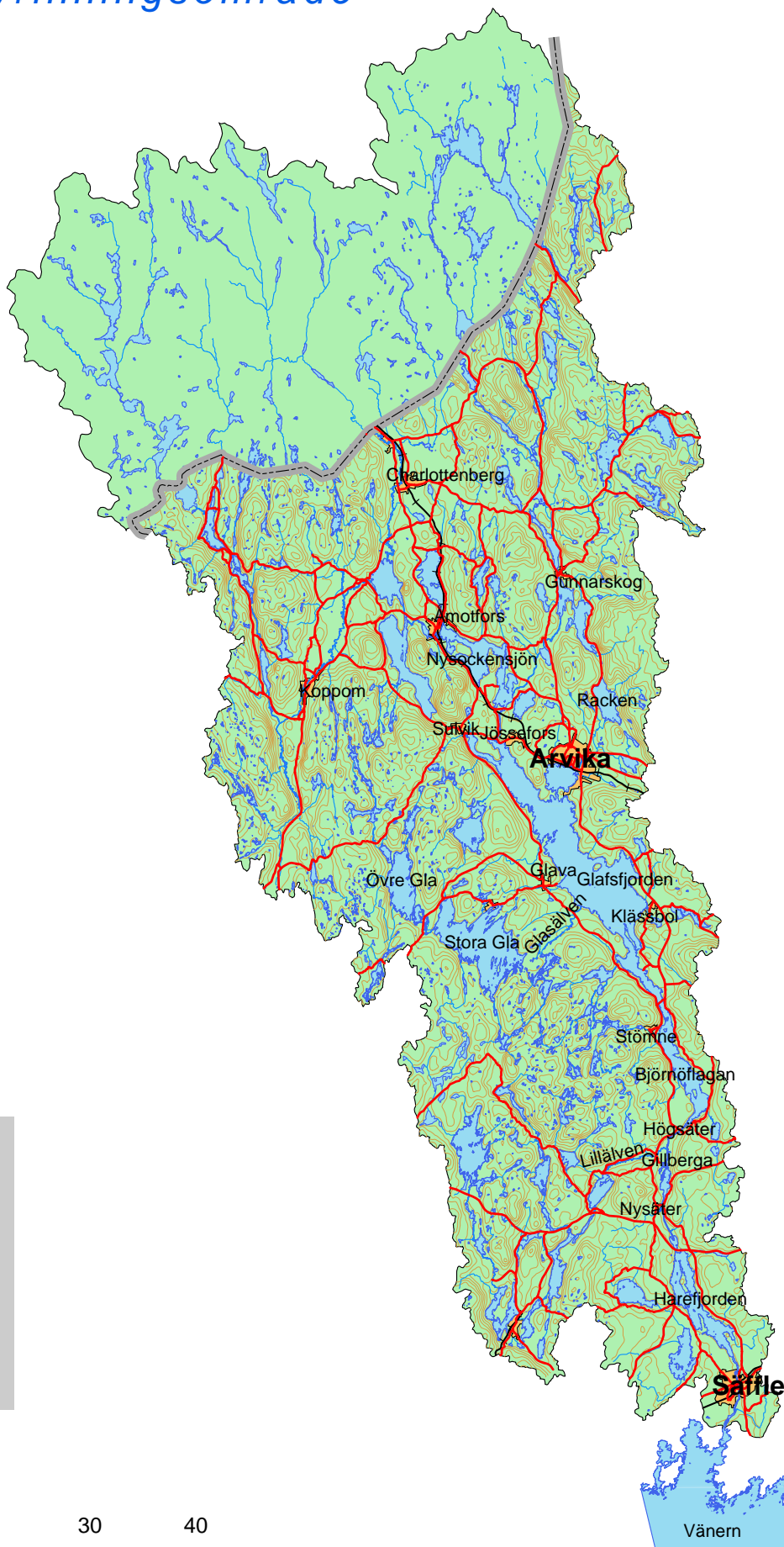
$$y_{Limit} = \frac{\delta w}{2} \left[\sqrt{1 + 16 \left(\frac{H}{\delta w} - 1 \right)} - 1 \right] \quad (\text{A.4 - 4})$$

$$\delta = 1 - 0,75 \frac{\theta}{90^\circ} + 0,36 \left(\frac{\theta}{90^\circ} \right)^2 \quad (\text{A.4 - 4})$$

med följande beteckningar:

y_1	vattennivå uppströms dammlucka, relativt tröskelnivå under lucka [m]
y_2	vattennivå nedströms dammlucka, relativt tröskelnivå under lucka [m]
τ	kalibreringsfaktor [-]
w	vertikal lucköppning [m]
B	luckbredd [m]
A	genomströmningsarea [m ²]
g	tyngdacceleration [m·s ⁻²]
θ	vinkel mellan bottenyta och normal till nedre luckkants tangent [°]
δ	kontraktionskoefficient [-]
H	uppströms energipotential [m]
$y_{Tran, Bottom}$	användardefinierad parameter [m]
$y_{Tran, Depth}$	användardefinierad parameter [m]

C.1 Översiktskarta - Byälvens avrinningsområde



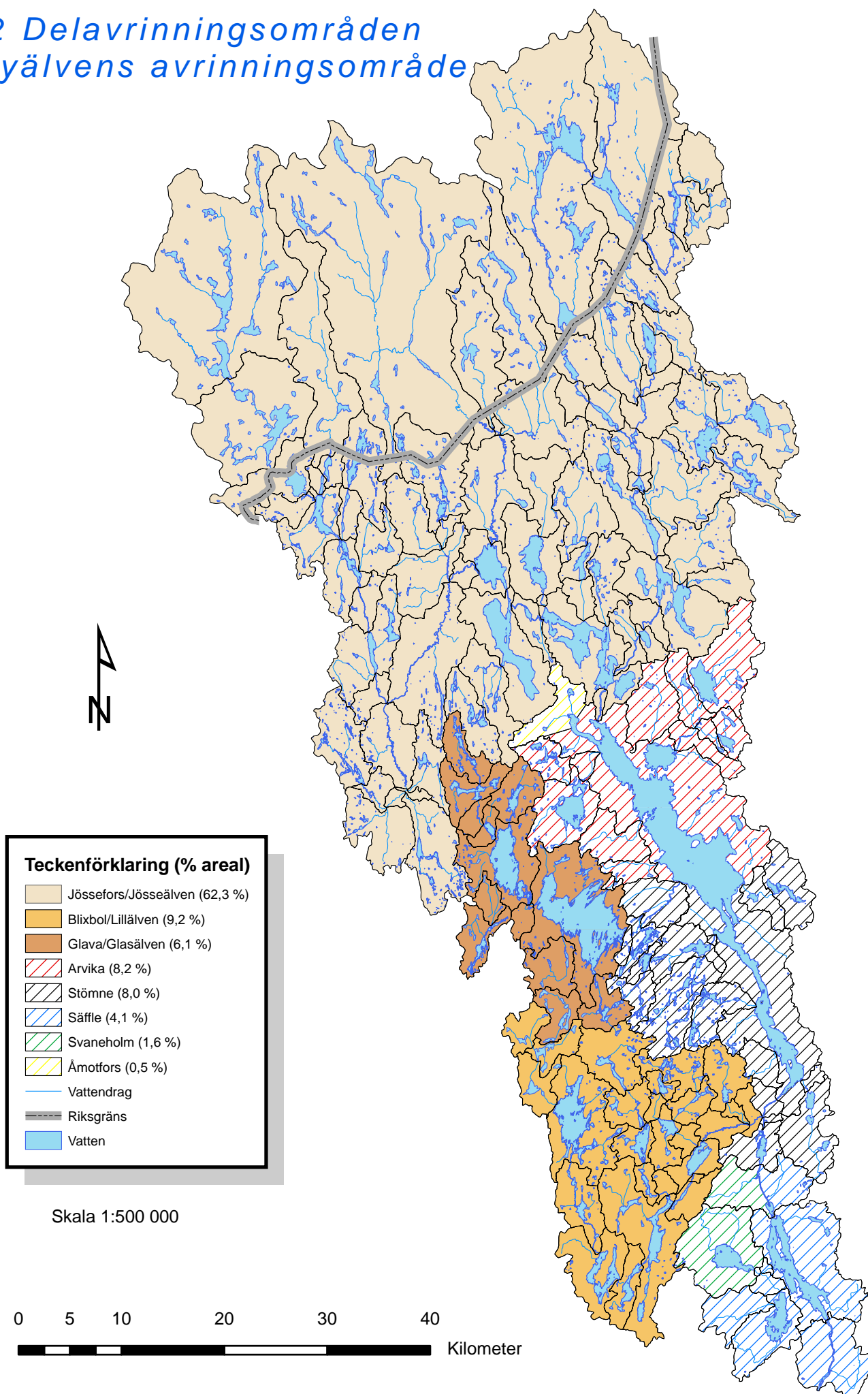
Teckenförklaring

- Allmän väg
- +— Järnväg
- - - Riksgräns
- Vattendrag
- Vatten
- Tätort
- Ekvidistans 25 m

Skala 1:600 000



C.2 Delavrinningsområden - Byälvens avrinningsområde



C.3 Orienteringskarta - Glafs fjorden & Byälven

Teckenförklaring

- Allmän väg
- +— Järnväg
- Vattendrag
- Vatten

Peglar

- A Arvika
- B Skasås
- C Högsäter
- D Nysäter
- E Harefjorden
- F Säffle övre
- G Säffle nedre
- H Dämmet
- I Backeströmmen

Skala 1:300 000

