

Simulering av översvämningar i Nedre Dalälven

Flood simulations in the Nedre Dalälven
area

Antti Vähäkari

Referat

Simulering av översvämningar i Nedre Dalälven

Antti Vähäkari

Mygg förekommer i extremt stora antal i området kring nedre delen av Dalälven. År 2000 var myggplågan särskilt stor vilket medförde att projekt Biologisk Myggkontroll bildades. Myggbekämpning har bedrivits i Nedre Dalälven sedan 2001 med ett biologiskt bekämpningsmedel, *Bacillus thuringiensis ssp israelensis* (BTI). Områdets myggfauna domineras av så kallade översvämningsmygg, en grupp stickmyggor som är mycket aggressiva och bildar nya generationer efter varje enskild översvämning under sommaren. För en effektiv bekämpning av mygglarverna krävs att man vet översvämningsens omfattning och lokalisering. En översvämning bedöms med avseende på hur högt vattenståndet når samt vid vilken tidpunkt hydrografens toppvärde inträffar. Det finns ett behov av ett verktyg som kan utföra korttidsprognoser av översvämningar i Nedre Dalälven. I denna studie har en hydraulisk modell i programvaran HEC-RAS använts, här kallad för HEC-RAS NEDA. Den hydrauliska modellen fungerar bra till att användas för prediktering av vattenstånd i Nedre Dalälven. Valideringen av modellen mot värden under en testperiod med stor amplitud i vattenståndet visade att modellerade vattenstånd var inom $\pm 0,05$ m från de uppmätta värdena. Modellen är stabil och klarar av att hantera 100-årsflöden med snabba flödesfluktuationer. HEC-RAS NEDA är ett noggrant och lätthanterligt predikteringsverktyg för översvämningar i Bysjön, Österviken och Färnebofjärden. Överensstämmelsen är god gällande nivån av vattenståndet och den fungerar bra för att studera hydrografens topp temporärt. Modellerade resultat har jämförts med karteringar som Sveriges meteorologiska och hydrologiska institut har gjort på Räddningsverkets begäran. Resultaten skiljer sig betydligt mellan HEC-RAS NEDA och Räddningsverkets modell, troligen på grund av att Räddningsverket har stora svagheter i indata till modellen. Räddningsverket har använt Geografiska Sverige Data-Höjddata och modellen HEC-RAS NEDA är framtagen med höjddata från en digital terrängmodell baserad på laserscanning. Areella studier i GIS över hur arean av vattenspegeln förändras med vattenståndet visar att Färnebofjärden under augusti år 2000 lade 55 km^2 under vatten.

Nyckelord: Nedre Dalälven, översvämning, översvämningsmygg, BTI, hydraulisk modell, vattenståndsprognoser.

Abstract

Flood simulations in the Nedre Dalälven area.

Antti Vähäkari

Mosquitoes are found in extremely large numbers in the lower parts of the River Dalälven. In the year 2000 the mosquito nuisance was especially high, resulting in foundation of the Biological mosquito control project. Since 2001 mosquito larvae are controlled by using a biological pesticide BTI (*Bacillus thuringiensis ssp israelensis*). The mosquito fauna in the area is dominated by flood water mosquitoes, a group of mosquitoes that are very aggressive and form new generations of mosquitoes during every single flooding event during the summer. To be able to efficiently control the mosquitoes it is essential to know the extension and locality of the flooding. A flooding event is evaluated by how high the water level will reach and at which time the top of the hydrograph is accruing. There is a need for a tool for short time prediction of flooding events in the Nedre Dalälven region. In this study a hydraulic model in the software HEC-RAS has been used, here called HEC-RAS NEDA. The hydraulic model came up with good results when predicting water surface levels. The validation process made from figures of a period with large amplitude in water levels showed that the modelled water level was within $\pm 0,05$ m from the observed water stands. It is a stable model that can handle 100-year flows with quick changes in the flow. The correspondence is good concerning the water levels and it functions well when studying the top of the hydrograph. HEC-RAS NEDA is an accurate and easy to manage tool for prediction of flooding in the lake of Bysjön, Österviken and Färnebofjärden. Modelled results have been compared with the model made by Swedish meteorological and hydrological institute on the request of Räddningsverket. The results from the two models shows large discrepancies, probably because of low accuracy data entered into the model from Räddningsverket. Räddningsverket has used the Geographical Sweden Data height data bank and I used the height data from a laser scanned digital terrain model. Area studies have also been made according to how the area of the water surface changes with the water stand. These studies show that during the flood in year 2000, 55 km² was flooded based on laserscanning in Färnebofjärden.

Keywords: Nedre Dalälven, flooding, flood water mosquitoes, BTI, hydraulic model, prediction of flooding.

Department of Earth Sciences

Uppsala University

Villavägen 16

SE-732 36 Uppsala Sweden

ISSN 1401-5765

Förord

Examensarbetet har initierats av Jan Lundström och Martina Schäfer som båda är forskare på Uppsala universitet, Institutionen för ekologi och evolution, Avdelningen för Populationsbiologi och Naturvårdsbiologi. Jan Lundström är projektledare och Martina Schäfer är operativ ledare för projekt Biologisk myggkontroll som organiserar och utför biologisk myggbekämpning vid Nedre Dalälven. Nedre Dalälvens utvecklings AB (NEDAB) administrerar Biologisk myggkontroll och projektet finansieras av staten och de sju berörda kommunerna.

Jan Lundström har varit handledare för examensarbetet på 20 poäng inom civilingenjörsutbildningen Miljö och vattenteknik vid Uppsala universitet. Han har gjort detta examensarbete möjligt och har varit en ständig inspirationskälla och bollplank.

Martina Schäfer har varit mycket hjälpsam och förklarat för mig hur GIS och den digitala terrängmodellen används.

Ämnesgranskaren Allan Rodhe på Uppsala universitet, Institutionen för geovetenskaper, Luft- och vattenlära tackas för allt stöd och guidning inom ämnet hydrologi och hydraulik.

Ett stort tack också till Peter Ljung på Vattenfall som bidragit med uppgifter på bl.a. in- och utflöden och vattenstånd i området mellan Näs och Söderfors. Utan de uppgifterna hade inte detta examensarbete varit möjligt att genomföra.

Fortum har också varit till stor hjälp och bidragit med värden på vattenståndet från pegeln Ista i Färnebofjärden.

Inte minst, tack till alla på NEDAB, speciellt Kalle Hedin som ordnade en kopia av sin djupkarta av Färnebofjärden från 1885.

OBS!

Det är mycket viktigt att förstå vid läsning av denna rapport, att alla höjdangivelser är angivna i referenssystemet Rikets Höjdsystem 1970 (RH70), samt att alla lägesangivelser är angivna i koordinatsystemet RT 90. Pegelvärden från vattenregleringsföretagen har inkommit i RH 00, som är ca 0,5 meter lägre än i RH 70 referenssystemet.

Innehållsförteckning

1. INLEDNING	1
2 MATERIAL OCH METODER	5
2.1 Lokalisering och terrängförhållanden	5
2.1.1 Geografi och topografi	5
2.1.2 Vattenflöden och översvämningar	6
2.2 Den hydrauliska modellen HEC-RAS NEDA	8
2.2.1 Den digitala terrängmodellen	8
2.2.2 Indata till den hydrauliska modellen	9
2.2.3 HEC-RAS hydrauliska beräkningar	9
2.2.4 Uppbyggnaden av HEC-RAS	9
2.2.5 Geometrisk indata	10
2.2.6 Tvärsektionernas data	12
2.2.7 Flödesdata	12
2.2.8 Kalibrering och känslighetsanalys av modellen	12
2.5 Framtagning av arean på magasinerna	14
2.5.1 Datareduktion	15
2.5.2 Vattenståndsmätningar	15
3 RESULTAT	16
3.1 Validering och känslighetsanalys av modellen	16
3.2 Den hydrauliska modellen HEC-RAS NEDA	17
3.2 Areal som funktion av vattenståndet	20
3.4 Vattenståndsmätningar	21
4 DISKUSSION	23
REFERENSER	26
BILAGA 1 GIS-FILER	28
BILAGA 2 LOKALA TILLRINNINGSOMRÅDEN	29
APPENDIX 1	30
Ekvationer för tryckkraften	31
Gravitationskrafter	32
Friktionskrafter	32
APPENDIX 2	34

Inledning

Under senare år har ett antal större översvämningar inträffat i Sverige och många andra europeiska länder. Snabbt stigande vattenytor kan orsaka betydande och kostsamma problem (SMHI, 2006a) för såväl individer som samhälle. Mot denna bakgrund har Sveriges meteorologiska och hydrologiska institut (SMHI) utfört övergripande beräkningar av översvämningssrisker i ett flertal Svenska vattendrag (Räddningsverket, 2006a). Dalälven, en av Sveriges största älvar översvämmar återkommande men oregelbundet områden i den nedre delen, främst i flacka och låglänta områden såsom älvängar och våtmarker i anslutning till älven. Den flacka nedre delen av Dalälven, sträckan från Avesta till Älvkarleby drabbas återkommande men oregelbundet av översvämningar sommartid.

Under sommaren 2000 inträffade en stor och en mycket stor översvämning i nedre delen av Dalälven. Vattenytan i Färnebofjärden steg med nästan två meter över medelvattenstånd, till 57,7 meter över havet då nivån var som högst i augusti. Det är vanligt att vattenståndet varierar över en meter i Färnebofjärden under ett år. Även vattenståndshöjningar på några decimeter gör att stora arealer hamnar under vatten. Effekten av en höjning på fyra decimeter syns i figur 1 och 2.



Figur 1. Nordmyra utanför Tärnsjö vid vattenståndet 55,9 meter i Färnebofjärden. Foto: Jan Lundström 05-06-27.



Figur 2. Nordmyra utanför Tärnsjö under översvämningen augusti 2005. Vattenståndet är 56,3 meter i Färnebofjärden. Foto: Jan Lundström 05-08-18.

Översvämningarna medför att myggproduktionen startar i området, speciellt de så kallade översvämningsmyggorna. Arten *Ochlerotatus sticticus* är mycket talrik vid översvämningar och orsakar stora problem för såväl människor som djur inom flera kilometer från våtmarkerna. Ett rekordantal mygg uppmättes i området år 2000. I området Valmbäcken, några kilometer öster om Österfärnebo noterades över 60 000 mygg i en fälla under en natt. Som jämförelse fångades 2000 – 4000 per fälla i våtmarken Sjaunja som ligger 60 kilometer SV om Kiruna. Redan 1000 mygg anses vara ett besvärande antal vid utomhusaktiviteter. Dåvarande miljöminister Kjell Larsson besökte området år 2000 och han ansåg att myggen var en sanitär olägenhet. Hösten 2000 startade projekt Biologisk Myggkontroll vid Nedre Dalälven. Sommaren 2001 genomfördes en provbekämpning i mindre skala för inställning av dos och kalibrering av utrustning. Sommaren 2002 genomfördes de första fullskaliga bekämpningarna.

Faktaruta om stickmyggor.

Stickmyggor (familjen Culicidae) innehåller ca 3 200 arter globalt och 47 av dessa förekommer i Sverige. Antalet arter är högst i södra Sverige och minskar mot norr men över nästan hela landet dominerar myggfaunan av någon eller några arter skogsmyggor av släktet *Ochlerotatus*. Skogsmyggorna övervintrar som frys- och torkresistenta ägg som behåller sin vitalitet under flera år. Äggen kläcks endast om de först konditioneras genom infrysning och därefter översvämmas under våren. Skogsmyggor producerar en generation per år och är anpassade för att kläckas i smältvattenpölar och andra temporära våtmarker under april-maj. De lämnar vattnet som vuxna stickmyggor under juni, då de förekommer rikligt i de flesta skogsområden, och är de stickmyggor som alla svenskar har egen erfarenhet av. På grund av att de bara flyger i en generation per sommar så medför deras relativt korta livslängd att mängden skogsmyggor efter

populationstoppen i juni minskar kraftigt under juli och att flertalet försvinner under augusti.

Områden med återkommande översvämningar under sommaren kan utveckla en unik stickmyggfauna som totalt domineras av översvämningsmyggor. Även arter av översvämningsmyggor övervintrar som frys- och torkresistenta ägg som behåller sin vitalitet i flera år. Men, dessa ägg behöver inte konditioneras genom infrysning utan kläcker direkt vid nästa översvämning. Därför kan larverna utvecklas vid varje sommaröversvämning och varje generation översvämningsmygghonor lägger ägg som fyller på äggförrådet i våtmarkerna. Optimala förhållanden för produktion av översvämningsmyggan *Ochlerotatus sticticus* i Nedre Dalälven är orsaken till områdets unikt stora och återkommande myggproblem.

För bekämpning av översvämningsmyggor används det biologiska bekämpningsmedlet *Bacillus thuringiensis ssp israelensis* (BTI) som är riktat mot myggornas larver. BTI binds till majs-korn för att kunna spridas med helikopter (se Figur 3). De mycket stora arealerna av svårframkomliga översvämningsområden innebär en stor utmaning för projekt Biologisk Myggkontroll. Bekämpning av mygg-larver med BTI kräver noggranna förberedelser där en kartering av bekämpningsytorna genomförs vid varje översvämningstillfälle. I början av projektet karterades hela vattenlinjen med GPS / DGPS, men metoden var för tidskrävande. Under våren år 2003, när vattennivån var låg, laserscannades hela Nedre Dalälven och dessa mätvärden användes till grund för en högupplösande terrängmodell över låglänta områden. Terrängmodellen används tillsammans med GPS och GIS för att bättre förstå topografin i området. När topografin är känd kan ett hydrauliskt prognosverktyg för översvämningar ytterligare underlätta förberedelserna, då man kan tillföra kunskap om vattenståndet vid olika flöden i Dalälven. En väl fungerande hydraulisk modell är ett kraftfullt pedagogiskt verktyg

som kan användas för att bättre förstå tidsaspekter och omfattning av översvämningar vid olika grad av förändring av inflöden. Detta är speciellt viktigt i stora och komplexa översvämningssmiljöer som Nedre Dalälven.



Figur 3. Helikopterbekämpning av myggor vid Nordmyran i Tärnsjö.
Foto: Jan Lundström.

Faktaruta om BTI

Forskning kring potentiella biologiska bekämpningsmedel mot stickmygglarver i Israel under 1976 gav det första fyndet av *Bacillus thuringiensis israelensis* (BTI) i en vattenpöl med döda mygglarver och experiment visade att denna bakterie var dödsorsaken. Detta fynd startade en intensiv period av forsknings- och utvecklingsarbete för att undersöka om och hur BTI påverkade olika organismer, för att klarlägga verkningsmekanismer, samt för att utveckla odlings och applikationstekniker.

Den aktiva beståndsdelen är ett pretoxin producerat av bakterien BTI och det förekommer i form av svårösliga proteinkristaller. Verkningsmekanismen kräver att proteinkristallerna sväljs, att kristallerna löses upp (behövs minst pH 9), att det lösta proteinet klipps av så att toxiner bildas (behövs specifika proteinaser), samt att de aktiverade toxiska substanserna påverkar organismens celler (bara om magtarmkanalens celler har receptorer som toxiner kan binda till). Den toxiska effekten av BTI är begränsad till insekter av underordningen Nematocera (Myggor). Larver av familjerna Culicidae (stickmyggor) och Simuliidae (knott) är mycket känsliga för BTI, men Simuliidae berörs inte av planerad bekämpning. Vid överdosering med mer än 10 ggr operativ dos mot

stickmygglarver i våtmarker finns möjligen viss risk för mortalitet hos underfamiljen Chironominae inom familjen Chironomidae (fjädermyggor). Övriga insekter, samt maskar, mollusker, kräftdjur, groddjur, fiskar, fåglar och däggdjur är inte känsliga för BTI. WHO har godkänt BTI som tillsats i dricksvatten för människor.

Bakterien BTI har en världsomspännande utbredning och förekommer naturligt i översvämningssvåmarker vid Dalälven.

Experimentell tillsats av levande BTI-bakterier i Nordmyra nära Tärnsjö visade att naturligt förekommande stammar konkurrerade ut den introducerade stammen. Temporärt utgjorde den introducerade stammen upp till 5 % av den totala BTI-mängden i jordproverna, men den konkurrerades snart ut av naturligt förekommande BTI. Studien i Nordmyran visade att andelen av den introducerade BTI-stammen reducerades till under bakgrunds-nivån av befintliga BTI-stammar inom sju veckor efter introduktion. Spridning av en vital stam av BTI medför därför inte någon dramatisk förändring av det mikrobiologiska samhället i våtmarkerna utan leder endast till en kortvarig ökning av en bakterie som förekommer naturligt i detta område.

Det finns goda möjligheter att simulera översvämningar med hjälp av olika dataprogram. Programvaran behövs klara av att hantera flöden och vattenstånd och det finns ett flertal sådana program på marknaden.

MIKE 11 är utvecklat av det Danska hydrauliska institutet, motsvarigheten till svenska SMHI. MIKE 11 är den mest använda hydrauliska modellen i världen för modellering av ytvatten i floder, älvar och sjöar. Programvaran kan kompletteras med ett flertal olika moduler som löser specifika uppgifter t.ex. sedimenttransport, vattenkvalitet, prediktion av översvämningar och modellering av händelseförlopp vid kollaps av kraftverksdammar. Modeller finns även för att lösa 2-dimensionella flöden där MIKE 21 är ett sådant (DHIgroup 2006).

Det finns även modellverktyg framtagna av den amerikanska U.S. Army Corps of Engineers, där HEC-RAS är ett endimensionellt verktyg liknande MIKE 11. Programvarorna är relativt lika varandra där utgångspunkten är att beräkna ekvationer för bevarande av massa och bevarande av rörelsemängd. Skillnader finns mellan de två programmen, men då de ständigt utvecklas och uppdateras används de ofta för att lösa liknande problem. Nya programvaror dyker ständigt upp på marknaden för att på ett mer detaljerat sätt studera flöden och vattennivåer. *River CAD 2000* är ett program från BOSS international där modelleringen görs i CAD-miljö. Fördelarna är ett snabbare arbetssätt och mer detaljerad information i form av 3-dimensionella resultat. (hecras, 2006)

Tidigare gjorda översvämningsskarteringar i Nedre Dalälven har gjorts av SMHI på uppdrag av Räddningsverket. (Räddningsverket, 2006b). Dessa rapporter har baserats på modellering i programvaran MIKE 11, som är en endimensionell hydraulisk modell.

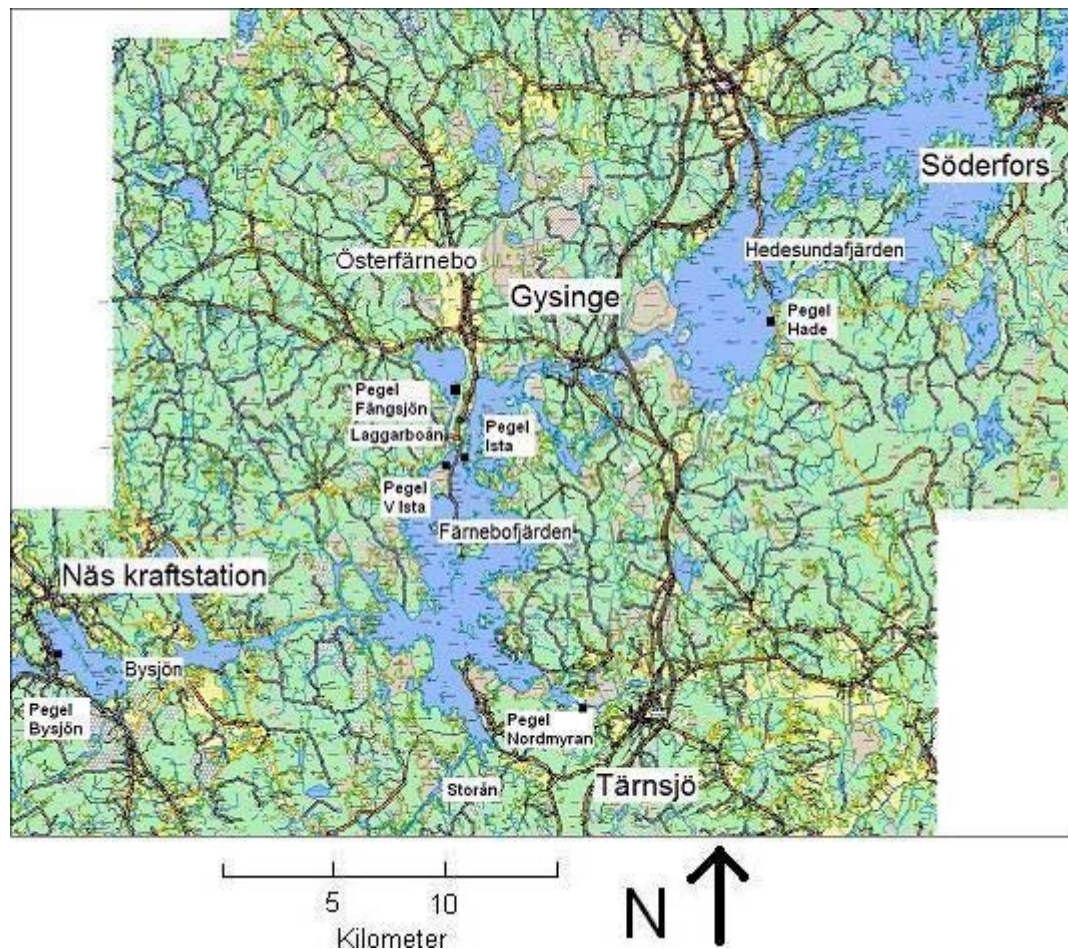
Geografiska Sverige Data (GSD) – Höjddata har använts för att bestämma terrängens höjd i Räddningsverkets modell. Noggrannheten är dock mycket begränsad i höjddatabanken, med ett eftersträvat geometriskt medelfel om högst 2,5 meter i höjddled (Lantmäteriet, 2006a).

Målsättningen med detta examensarbete är att, med utgångspunkt i en digital terrängmodell med en höjdupplösning på 0,2 meter, konstruera en modell som kan användas för att visa såväl temporära som rumsliga aspekter på vattenytans utsträckning i Bysjön, Österviken, Färnebofjärden och Hedesundafjärden. Vattenflöden från den uppströms liggande Näs kraftstation används som invärden i modellen. Metoden som används är en endimensionell hydraulisk modell i programvaran HEC-RAS.

2 Material och metoder

2.1 Lokalisering och terrängförhållanden

Nedre Dalälven är beläget mellan Älvkarleby och Avesta. Modelleringen av översvämningarna är koncentrerade i ett område mellan Näs kraftstation och Gysinge (se Figur 4). Sträckan uppgår till ungefär 30 km vattenvägen.



Figur 4. Karta över området Nedre Dalälven. Flödet går från sydväst till nordost i figuren.

2.1.1 Geografi och topografi

Området vid nedre delen av Dalälven har flacka stränder med miljöer som strandkärr, älvängar, översvämningssmark och gammelskog. Färnebofjärdens nationalpark är belägen mitt i området med en area på 10 100 hektar. De periodiska översvämningarna har avgörande betydelse för nationalparkens fauna och flora. Den flikiga strandkonturen innehåller mer än 200 öar och skär. Här möter myrmarker och barrskog med norrlandskaraktär sydliga naturförhållanden som lövskog med inslag av ek och lind. Forsarna vid Tyttbo i västra delen av Färnebofjärden och forsarna vid Gysinge i öster, har ofta stora flöden under våren, men kraftiga flöden inträffar också under sommar och höst.

Studieområdet inkluderar tre större vattenmagasin; Bysjön, Färnebofjärden och Hedesundafjärden. I Färnebofjärdens nordvästra hörn är Fängsjön belägen. Norr om Fängsjön rinner Norrån, som har flacka ständer i form av strandängar. I södra delen av Färnebofjärden, nordväst om Tärnsjö ligger Nordmyran med dess vidsträckta våtmarksområde som ofta översvämmas (Figur 1 och 2).

2.1.2 Vattenflöden och översvämningar

Merparten av inflödet till området sker via Näs kraftstation där flödet mäts kontinuerligt. Medelvattenföringen är 200-300 m³/s på årsbasis. Variationerna i vattenflödet från Näs sträcker sig normalt mellan 100 m³/s och 1200 m³/s. Den högsta observerade vattenföringen på 2430 m³/s var den 18 maj 1916 (Ljung, 2006a). Det beräknade 100-årsflödet vid Näs kraftstation uppgår till 1930 m³/s enligt Räddningsverket. Det beräknade högsta flödet enligt Flödeskommitténs riktlinjer för dammdimensionering av riskklass I dammar uppgår till 3692 m³/s (Räddningsverket, 2006c). År 2000 uppgick flödet som mest till 1250 m³/s. Vårflöden når vanligen till nivåer mellan 500 m³/s och 800 m³/s, och sommarflödena är vanligen ungefär 150 m³/s- 200m³/s, om inte kraftiga regn inträffar under sommaren.

Över en period på 20 år inträffade dubbla översvämningar under ett och samma år vid sex tillfällen; 1985, 1986, 1995, 2000, 2002 och 2005. Det högsta flödet sommartid under denna period var 1250 m³/s under augusti 2000.

Inflödet från lokala vattendrag är litet i jämförelse med flödet från Näs kraftverk. Det lokala avrinningsområdet uppgår endast till ungefär 6,5 % av det totala avrinningsområdet i Dalälven fram till Söderfors. Dalälvens avrinningsområde uppströms Näs kraftverk uppgår till 26 890 km² (SMHI, 1998).

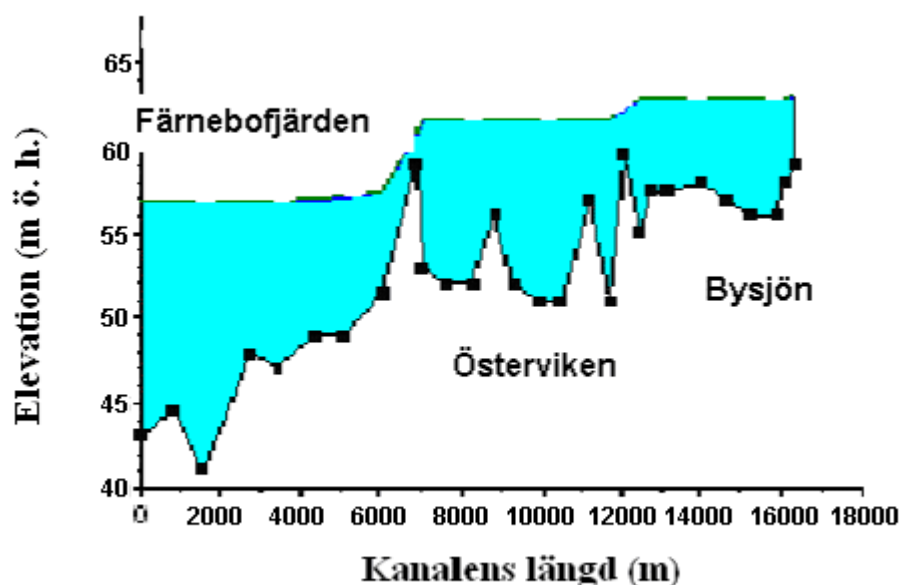
Utfödet från studieområdet mäts kontinuerligt i kraftverket i Söderfors, men det finns ingen kontinuerlig mätning av flödet i Gysinge. Färnebofjärden och Bysjön har ingen reglering av utfödet, vilket Hedesundafjärden har.

Arean på vattenytorna är störst i Hedesundafjärden följt av Färnebofjärden och Bysjön (Tabell 1).

Tabell 1. Beräknade areor på vattenytorna i Nedre Dalälven vid medelvattenstånd.

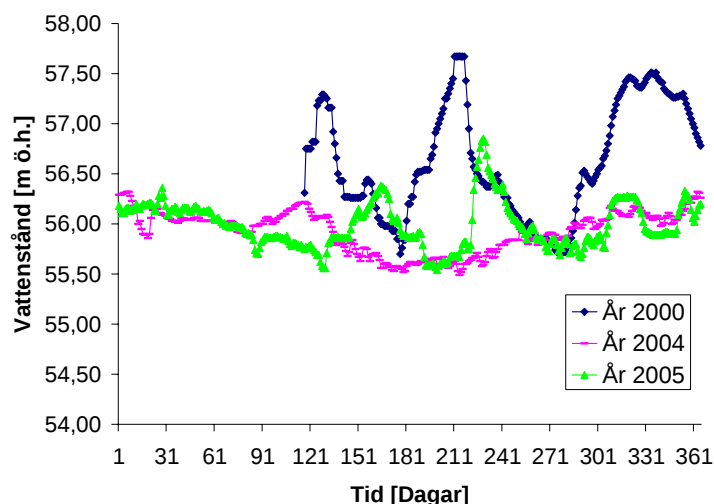
Vattenmagasin	Area [km ²]
Bysjön/Österviken	13,7
Färnebofjärden	53
Hedesundafjärden	88

Vattnets fallhöjd från Näs till Gysinge är ungefär 6-7 meter (se Figur 5). Till Söderfors faller vattnet ytterligare ca 5 meter.



Figur 5. En profilplot från modellringsverktyget HEC-RAS, där vattenståndet kan avläsas för 31 augusti, 2005. Längst till höger visas Bysjöns vattenstånd, sedan Österviken och längst till vänster vattenståndet vid Färnebofjärdens inlopp.

Vattenståndet i Färnebofjärden fluktuerar mycket under året (se Figur 6). Detta beror främst på att flödesvariationerna är stora vid inflödet i Näs och att Färnebofjärdens utlopp inte är reglerat. Vattendomar begränsar möjligheterna att reglera flödena vid Näs och vid Söderfors kraftstationer. Vattenytans nivå ovan Näs är kraftigt begränsad via vattendomar, vilket gör att flödesvariationerna blir stora, då lagringskapaciteten är liten. Vattenståndet i Hedesundafjärden fluktuerar inte lika mycket som i Färnebofjärden, då utflödet från Hedesundafjärden regleras i Söderfors.



Figur 6. Observerat vattenstånd i Färnebofjärden vid Ista-pegeln för åren 2000, 2004 och 2005.

2.2 Den hydrauliska modellen HEC-RAS NEDA

Det första angreppssättet för att modellera vattenytorna i Nedre Dalälven var att ta fram en vattenbalansmodell och kalibrera den. Data till en vattenbalansmodell togs fram och modellen kördes. Det visade sig att den blev instabil och behövde justeras och köras med kortare tidssteg för att minska instabiliteten. Detta skulle ha tagit mycket tid i anspråk och modellen lämnades till förmån för en hydraulisk modell. För att kunna prediktera vattenytorna mellan Näs kraftstation och Gysinge upprättades en hydraulisk modell. En snabb studie av olika datorprogram gjordes och valet föll slutligen på Hydraulic Engineering Center – River Analysis System (HEC-RAS). Fördelar med HEC-RAS är priset och tillgängligheten. Det visade sig vara ett relativt enkelt program att använda och bygga modeller med. Den framtagna hydrauliska modellen för Nedre Dalälven döptes till HEC-RAS NEDA. Parametrar som anges i modellen är topografi, inflöden, utflöden, vattenmagasinens storlek och koefficienter för friktion mm. Modellen är endimensionell, det vill säga att flödet är riktat åt ett håll, neråt i topografin. Detta ger inte helt verklighetstroga beskrivningar av vattnets rörelser i ett vattendrag. Till exempel kan flöden vara riktade tvärs emot huvudflödet vid grund eller öar, vilket kan leda till att effekten av huvudflödet minskar i älven då tvärsnittsaren minskar i älvfåran. Modellen har beräknats som ett subkritiskt flöde, med Froude-talet < 1 . Det finns dock möjlighet att beräkna även superkritiska flöden med ett Froude-tal > 1 .

2.2.1 Den digitala terrängmodellen

En digital terrängmodell över området mellan Näs kraftstation och Söderfors fanns framtagen då examensarbetet påbörjades. Terrängmodellen användes tillsammans med den digitala terrängkartan för att bearbeta information om topografi och för framtagning av tvärsektioner av vattendraget till den hydrauliska modellen. Terrängmodellen bygger på höjddata från laserscanning via flygplan utfört under april 2003. Scanningen genomfördes av Fotonor AS, Mätcenter i Örebro och BlomInfo. Uppdragsgivare var projekt Biologisk Myggkontroll inom Nedre Dalälvens Utvecklings AB (NEDAB).

Följande utrustning användes vid laserscanningen:

- Flygplan: Piper Navajo PA-31 med Tracker navigationssystem
- Laser: ALTM1210, svepfrekvens 28 Hz, svepvinkel $\pm 20^\circ$ och pulsfrekvens 33 kHz vid flyghöjden 1400 m och 10 kHz vid 1200 m.
- Tröghetsplattform IMU: Litton LN-200 A1
- GPS: Ashtech Z-Surveyor, 2-frekvensmottagare

Materialet från laserscanningen utgörs av mätpunkter med X,Y och Z koordinater. Områdesbegränsningar gavs i format Arcview Shape. Vattennivån i Färnebofjärden var vid mätningstillfället 56 m ö h.

Filen med mätpunkter har reducerats i storlek genom att glesa ut de vatten- och markklassificerade punkterna som inte tillför information. Detta resulterar i mindre, och mer lätthanterbar datamängd utan att detaljeringsgrad eller precision går förlorad i terrängmodellen. Utglesningen har skett i programmet Terra Scan med funktionen ModelKeyPoint. Laserdatat har efter utglesning en punkttäthet av 0,4 punkter per m^2 i öppen mark och 0,15 punkter per m^2 i skogsmark. Detta ger ett genomsnittligt punktavstånd i öppen mark på ca 1,6 meter och i skogsmark ca 2,5 meter. Höjdleds är precisionen på

terrängmodellen ca 2 dm för hårdgjorda ytor och 3 dm för natuorytor. För lägesprecisionen gäller precisionen < 1 meter.

Totalt har 420 km² laserscannats från Avesta till Älvkarleby där 210 km² utgörs av vattenytor (BlomInfo, 2003). I detta examensarbete har endast områdena mellan Näs och Söderfors som använts. Storleken på gridfilerna för terrängmodellen som använts är ca 500 MB.

2.2.2 Indata till den hydrauliska modellen

Sjökort från Hedesundafjärden och Färnebofjärden har använts för att bestämma vattendjupet i fjärdarna. Sjökortet i Färnebofjärden är framtaget under sommaren 1885 (Karta öfver Gysinge bruks fiskevatten efter Dalelfven 1885). Hedesundafjärdens sjökort är framtaget år 2005 (Nedre Dalälvens sjökortsförening). Inga djupdata finns för Bysjöns vatten.

Flödesmätningar gjorda av Vattenfall vid Näs kraftstation har använts. Relativt kompletta timvärden från kraftstationen finns för tiden november 2004 till januari 2006. En avbördningskurva i Färnebofjärden framtagen av Vattenfall är integrerad i den hydrauliska modellen som ett randvillkor i en tvärsektion av vattendraget.

Vattenståndsmätningar i Bysjön, Färnebofjärden och Hedesundafjärden har gjorts av vattenregleringsföretagen. Data i form av timvärden extraherades från tidsperioden mellan november 2004 och december 2005 till att kalibrera den hydrauliska modellen.

Flödesdata från kraftstationen i Näs och Söderfors har varit tillgängliga under åren 2004 och 2005. Timvärden från vattenregleringsföretagen har använts. Den specifika tillrinningen i området har hämtats från Tämnrån, som har en vattenföringsstation vid Stalbobäcken några kilometer söder om Tärnsjö. Där registreras vattenföringen kontinuerligt av SMHI. Dessa data har använts till att beräkna den lokala tillrinningen i Nedre Dalälven. Stalbobäckens avrinningsområde innehåller en ås som medför att en större lagring är möjlig i avrinningsområdet än i normalfallet vid Nedre Dalälven. Detta har dock en mindre betydelse då flödet från den lokala tillrinningen är mycket mindre än inflödet till Dalälven via Näs. Den specifika avrinningen i Stalbobäcken uppgår till ungefär 7,7 liter/(s*km²) som ett årsmedel under sex år (åren 2000 till 2006). (SMHI, 1996)

2.2.3 HEC-RAS hydrauliska beräkningar

Beräkningarna i HEC-RAS utgörs av många typer av ekvationer, där grunden utgörs av ekvationer för bevarande av massa (kontinuitetsekvationen) och bevarande av rörelsemängd. Då HEC-RAS är ett endimensionellt verktyg bevaras massan och rörelsemängden i en dimension, i rörelseriktningen (se appendix 1).

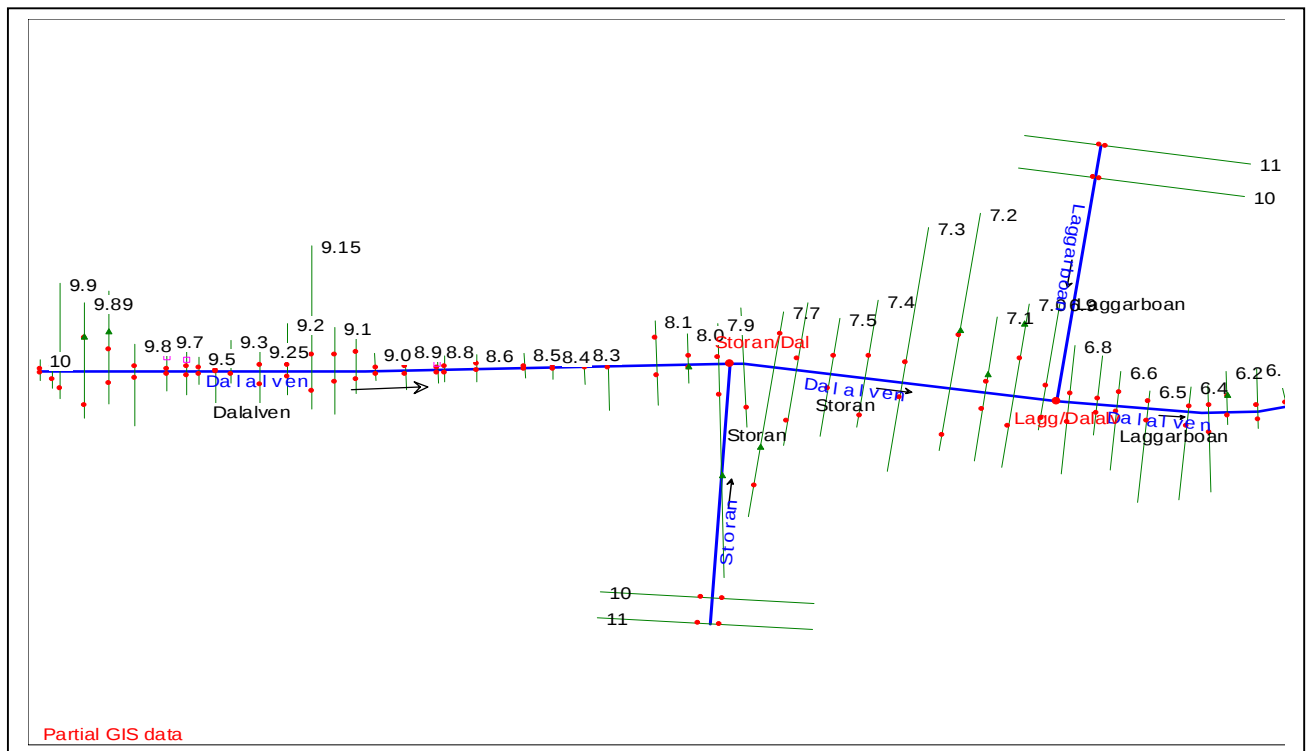
2.2.4 Uppbyggnaden av HEC-RAS

Programmet HEC-RAS består av enheter i vilka olika slags data lagras. Det finns en fil för geometriska data, en fil för flödesdata, en plan-fil och en projektfil. Projektfilen är den övergripande filen som öppnas då modellen skall köras. I projektfilen finns plan-filen som bland annat innehåller geometriska data och flödesdata. Projektfilen sparar alltid körningarna i en så kallad DSS-fil. DSS-filen rymmer information som gör att resultaten blir möjliga att presentera på många olika sätt. Denna hierarki används av programmet för att göra det möjligt att snabbt öppna plan-filer och exekvera dessa. I filen för geometriska data anges vattendragets geometriska struktur såsom bottenprofiler och strandnära markprofiler. Även

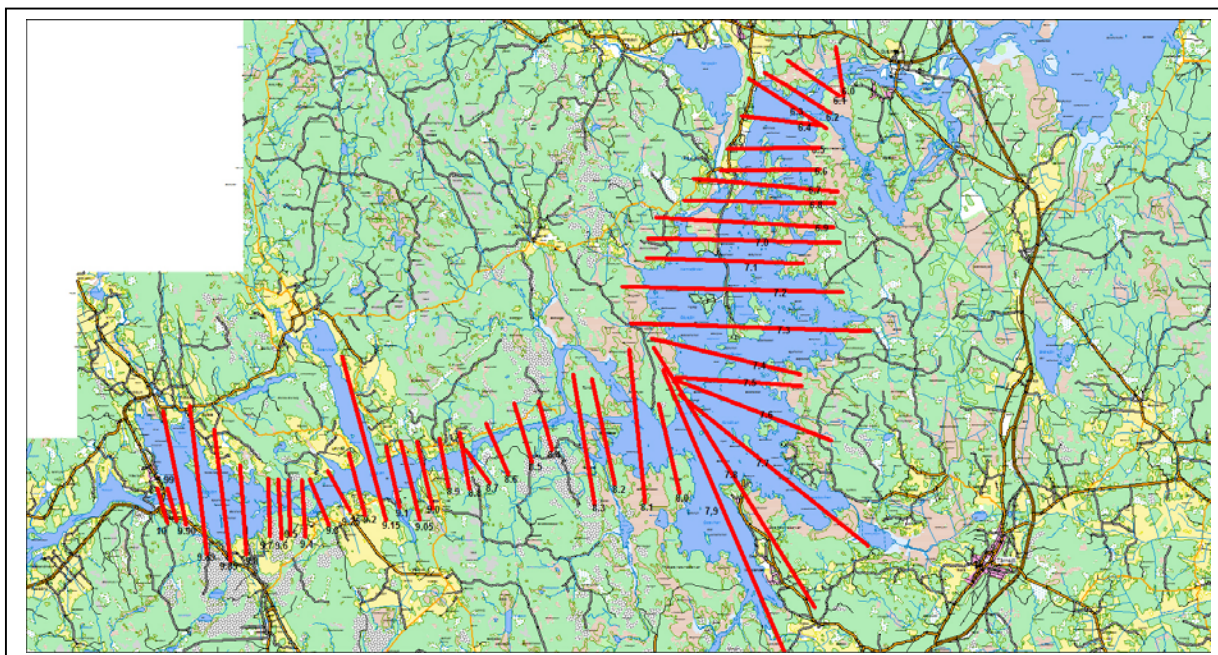
friktionskoefficienter och vattendragets krökning anges här. I filen för flödesdata anges initiala inflöden och flöden som ska användas för prediktion.

2.2.5 Geometriska indata

Geometriska data anges i en editor för geometriska data. Initialt ritas en schematisk bild av vattendraget i flödesriktningen (se Figur 7 och 8). I denna bild anger man sedan alla tvärsektioner, vilka man namnger och ger ett stationsnummer.



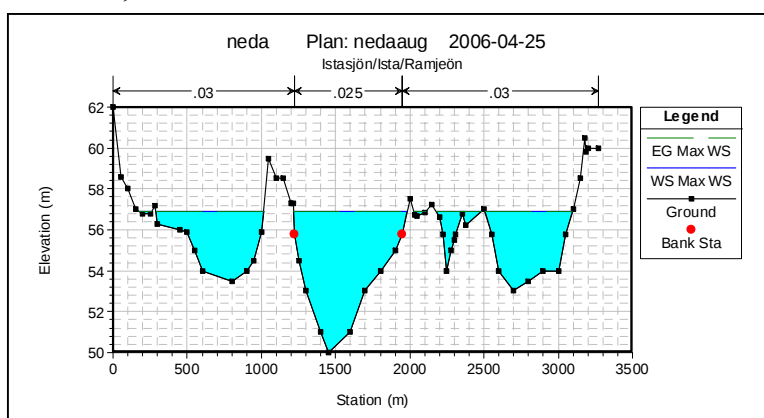
Figur 7. Schematisk skiss över Dalälven med tvärsektioner där flödet är riktat åt höger. Siffrorna motsvarar tvärsektionernas identifikationsnummer.



Figur 8. Tvärsektionerna inritade i den digitala terrängkartan.

Stationsnummer anges i en fallande skala i vattendragets flödesriktning. I modellen HEC-RAS NEDA har 57 tvärsektioner angetts, där avståndet från första till sista tvärsektionen är ungefär 28 kilometer, vilket ger ungefär två tvärsektioner per kilometer. I den geometriska editorn finns också funktioner som man kan använda för att kunna simulera verkliga flöden (broar, trösklar, broar, pumpar och kulvertar). Dessa funktioner gör ofta så att vattenstånd och flöden ändras snabbt. Vid sådana snabba förändringar blir beräkningarna lätt instabila. För att undvika instabilitet kan man minska tidssteget och därmed fånga upp de snabba förändringarna i vattendraget. Editorn ger också en möjlighet att använda sjöar och vattenmagasin som funktioner i modellen.

Flödesmotstånd har angivits såsom Mannings tal som finns i en tabell i modellen (se appendix 2). Tabellvärden finns för olika bottenar och växtlighet. Mannings tal anges i tre olika sektioner, i mittkanalen och i de två flodbankerna på var sida om huvudkanalen. I figur 9 har värdet 0,025 använts i kanalen och i flodbankerna har värdet 0,030 använts.



Figur 9. Tvärsektionen vid Ista hämtad ur i modellen.

2.2.6 Tvärsektionernas data

I HEC-RAS NEDA användes strandprofiler som hämtades manuellt ur terrängmodellen. Med kommandot cross section i Vertical Mapper avlästes strandkantens geometri och fördes in i HEC-RAS NEDA.

Bottenprofilerna var svårare att ange. Det finns inga detaljerade data på bottenprofilerna i den övre delen av systemet, från Näs till Färnebofjärden. Det finns lodade data på bottenprofilerna i Färnebofjärden från år 1885 som använts. Bottenprofiler i området mellan Näs och Färnebofjärdens inlopp är således relativt okända. Även om datamängden var knapp kunde en tillräckligt bra kalibrering uppnås.

2.2.7 Flödesdata

Flödesdata anges i en *editor* för flödesdata, i detta fall i *unsteady flow editor*. *Unsteady flow editor* används då hastigheten är föränderlig med tiden det vill säga att: $\frac{\partial V}{\partial t} \neq 0$.

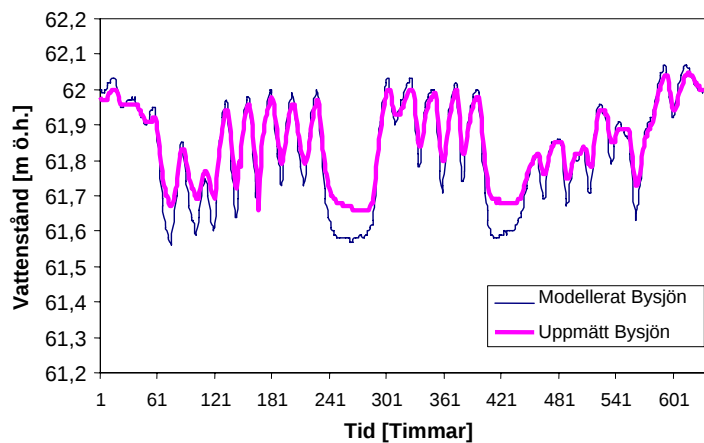
Initialt flöde anges för varje tvärsektion. Inflödet från Näs kraftstation anges för varje timme. Inflödet från Laggarboån och Storån har beräknats och angetts som initialt flöde och som randvillkor för åarna där inflödet motsvarar en specifik avrinning på ca 7,7 liter/km². Avrinningsområdenas storlek multipliceras med den specifika avrinningen för att bestämma medelvattenföringen i åarna. Medelvattenföringen var 1,74 m³/s i Laggarboån och 2,4 m³/s i Storån.

I modellen har följande randvillkor antagits:

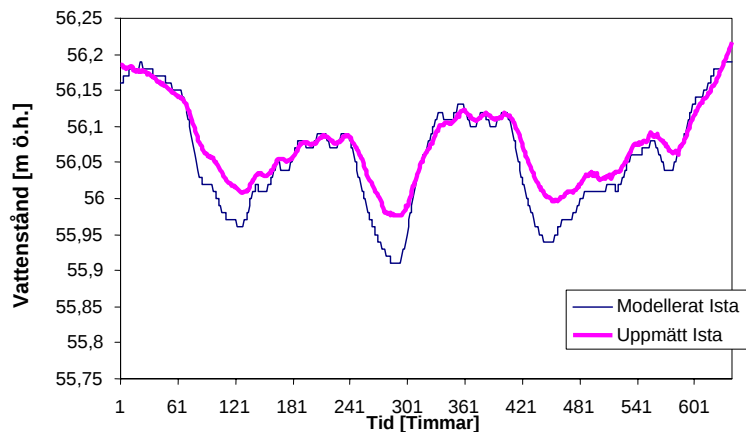
- Inflödena motsvarar flödena från Näs kraftstation och inflödet från Storån och Laggarboån.
- Utflödet från Färnebofjärden beror av en avbördningskurva i Färnebofjärden som har angetts i den näst sista tvärsektionen. (Ljung, 2006b)
- I den sista tvärsektionen har ett normaldjup med lutning på 1/1000 angetts.

2.2.8 Kalibrering och känslighetsanalys av modellen

Kalibrering av modellen har gjorts mot flödena och vattenstånden från november och december år 2004 (se Figur 10 och 11). Denna tidsperiod lämpade sig väl för en kalibrering men hade inga extrema flöden. Kalibrering utfördes främst genom att ändra på friktionskoefficienten, men även bottengeometrierna justerades, speciellt i vattnen före Färnebofjärden där datamängden över bottenprofiler var bristfällig. Det finns en tröskel under vattnet vid utflödet från Bysjön som bestämmer hur högt vattenståndet är i Bysjön. Denna tröskel höjdes och sänktes i modellen tills en bra överensstämmelse uppnåddes mot uppmätta värden. Nya tvärsektioner infogades och justerades in för bättre överensstämmelse med Dalälvens geometri. Ineffektiva flödesområden och levéer definierades i modellen. Med ineffektiva flödesområden menas områden som inte bidrar till flödet utan endast fungerar som ett lagringsområde av vatten. Levéerna beskriver tröskelvärden i höjdled som måste överskridas innan vatten kan flöda in i lägre terräng.



Figur 10. Kalibreringskurva i Bysjön. Taget från den sista anpassningen.



Figur 11. Kalibreringskurva i Färnebofjärden. Taget från den sista anpassningen.

En känslighetsanalys gjordes på modellen där flera olika tänkbara scenarier har antagits. Modellen klarar av inflöden på 2000 m³/s som inflöde utan att bli instabil med ett tidssteg på en timme. Som jämförelse kan nämnas att 100-årsflödet vid Näs uppgår till 1930 m³/s. Tvärsektioner har också adderats för att utröna om resultatet förändras signifikant. Då en tvärsektion adderas och en signifikant skillnad uppstår i resultaten, är modellen för känslig och fler sektioner måste adderas till modellen. Signifikanta skillnader har inte kunnat påvisas i HEC-RAS NEDA. Modellen kan också exekveras med olika tidssteg.

Då invärdena till modellen består av timvärden kan beräkningarnas tidssteg ändras från en sekund till en timme. Då tidssteg på en timme används har inga stabilitetsproblem upptäckts. Fördelen med att använda ett långt tidssteg är att beräkningarna tar mindre tid i anspråk. Om ett kort tidssteg används blir resultatet detsamma fast beräkningstiden mycket längre.

Enligt HEC-RAS *user manual* 2002, kan tidssteget bestämmas enligt följande:

$$C_r = V_w \frac{\Delta t}{\Delta x} \leq 1,0 \text{ , vilket betyder att,}$$

$$\Delta t \leq \frac{\Delta x}{V_w}$$

C_r = Courants tal

V_w = Flodvågens hastighet

Δt = Tidssteget

Δx = Avståndet mellan tvärsektionerna

V = Vattnets medelhastighet

För de flesta älvar eller floder kan flodvågens hastighet beräknas med:

$$V_w = \frac{dQ}{dA}$$

Men för att förenkla beräkningen av flodvågens hastighet kan man multiplicera medelhastigheten med en faktor. Man använder ofta olika faktorer för olika slags kanaler beroende på deras form.

Tabell 2

Kanalens form	Förhållandet V_w/V
Bred rektangulär	1,67
Bred parabolisk	1,44
Triangulär	1,33
Naturlig kanal	1,50

För medelstora vattendrag kan Courants tal ge för restriktiva tidssteg. Man kan i praktiken använda ett större tidssteg. Således finns ett sätt att även beräkna ett praktiskt tidssteg.

$$\Delta t \leq \frac{T_r}{20}, \text{ där } T_r = \text{Tiden det tar för flodvågen att nå toppvärdet.}$$

2.5 Framtagning av arean på magasinen

Aren på vattenmagasinen förändras med vattenståndet. Denna förändring är intressant för projekt Biologisk Myggkontroll då arean av bekämpningsområdena också förändras när vattenståndet fluktuerar.

Vattenmagasinen är tydligt avgränsade. Bysjöns vattenmagasin sträcker sig från Näs till inloppet av Färnebofjärden. Färnebofjärdens vattenmagasin sträcker sig från inloppet till utloppet vid Gysinge. Hedesundafjärdens vattenmagasin avgränsas från inloppet till kraftverket i Söderfors. Forsarna vid Gysinge mellan Färnebofjärdens utlopp och Hedesundafjärdens inlopp har inte beräknats.

Den digitala terrängmodellen användes för att beräkna förändringen av arean som funktion av vattenståndet i skikt om 0,2 meter. Enligt (personligt meddelande Lundströms & Schäfer) tidigare erfarenheter är 0,2 meter en tillräckligt bra noggrannhet.

Terrängmodellen ger utdata i form av grid-filer (Bilaga 1). Olika höjder i modellen motsvaras av olika färger. Framtagna filer fanns från början som var överlappande i varje vattenmagasin. Dessa sammanfördes initialt till en stor fil som täckte hela vattenmagasinet. Denna fil delades sedan upp i flera områden utan överlapp, då beräkningar av konturregioner gjordes (Bilaga 1). Höjdlinjerna är vektoriserade beräkningar där ett visst höjdområde representeras med linje eller som här med en area. Beräkningarna för areorna tog mycket tid i anspråk och datorn fick problem då beräkningarna blev alldeles för omfattande.

2.5.1 Datareduktion

En reducering av datamängden gjordes för att minska beräkningstiden. Första åtgärden var att minska pixelstorleken från det högupplösta 2 m x 2 m till det mer hanterbara 6 m x 6 m. Noggrannheten minskade bara med någon eller några procent på området kring Fängsjön väster om Österfärnebo och Tärnsjö. För att snabba upp beräkningshastigheten ytterligare delades varje vattenmagasin upp i ytterligare delar. Denna åtgärd leder till att beräkningarna av höjdlinjerna blir snabbare per areaenhet. Då höjdregionerna var framtagna kunde arean för varje höjdintervall beräknas i MapInfo med kommandot `redistrict window`.

Areorna för höjdintervallen beräknades från de olika områdena i samma vattenmagasin och adderades. Således kunde areaökningen för varje höjdintervall i vattenmagasinen studeras. Alla öar och halvöar i fjärdarna är inkluderade och ingår i beräkningarna.

2.5.2 Vattenståndsmätningar

För att förstå hur vattenståndet fluktuerar lokalt placerades peglar ut i Fängsjön några kilometer väster om Österfärnebo, vid Nordmyran några kilometer väster om Tärnsjö, i sydöstra Hedesundafjärden och strax väster om Istahalvön, några kilometer söder om Österfärnebo (se figur 4). Syftet med att placera ut peglarna var att ta reda på om vattnet stannar kvar länge i växtligheten efter en översvämning, eller om vattenytan sjunker likartat över hela vattenmagasinet. Peglarna kan också ge svar på om dämning sker lokalt som höjer vattenytans nivå.

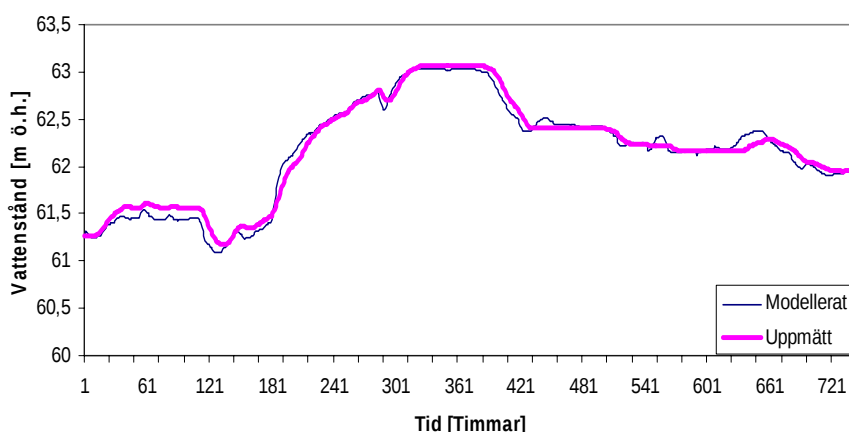
En pegel är en tryckgivare som kontinuerligt mäter trycket. Trycket översätts till en höjd på vattenpelaren ovanför givaren. Givaren som användes var Thermokon-Danelkos modell DL/N (Danelko, 2006). Denna modell har en tryckgivare med inbyggd logger. Information från tryckgivaren lagras i loggern som kan tömmas på information med en bärbar dator. Mätområdet valdes till 0-3 meter vattenpelare. Precisionen på mätområdet är 0,25 % vilket ger en precision på 7,5 mm på 3 meter vattenpelare. Tryckgivaren sänktes ner under vattnet inuti ett perforerat rör som monterades på mätplatsen på en trästolpe. Ett lock monterades på röret för att skydda loggern. Loggern och givaren strömförsörjdes med ett litiumbatteri. För att kunna referera mätningarna till en viss vattenhöjd mättes de in med ett avvägningssystem mot ett referenssystem via fixpunkter i terrängen.

3 Resultat

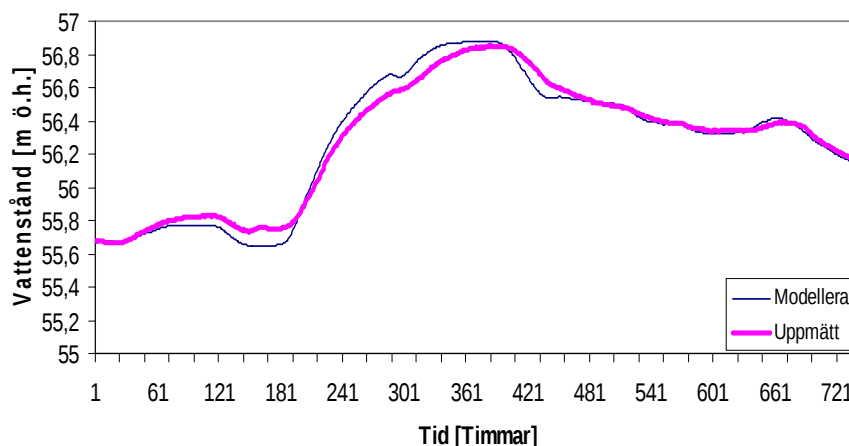
3.1 Validering och känslighetsanalys av modellen

Validering av modellen gjordes med data hämtade från åren 2004 och 2005. Försök att validera flödena från extremåret 2000 då höga flöden inträffade, kunde inte genomföras på grund av bristfälliga vattenståndsdata.

Stora mängder nederbörd under en lång tid orsakade en översvämning med snabba förändringar av vattenståndet under augusti 2005. Dessa värden användes för att validera modellen. De modellerade värdena visade sig vara nära de uppmätta (se Figur 12, 13, 14 och 15). Modelleringen av Bysjöns vattennivå under augusti 2005 ger nästan en perfekt passning mot uppmätta värden (se Figur 12). Det högsta vattenståndet i modellen jämfört med det högsta uppmätta värdet har en differens på 0,03 m i Färnebofjärden under augusti 2005. Tidsmässigt hamnar den modellerade toppen 12 till 24 timmar före den uppmätta vattenståndstoppen i Färnebofjärden. Modellen svarar snabbare på vattenståndsförändringar jämfört med uppmätta värden i Färnebofjärden, vilket gör att differenserna mellan modellerade värden och uppmätta värden blir större vid stigande eller sjunkande vattenstånd (se Figur 13).

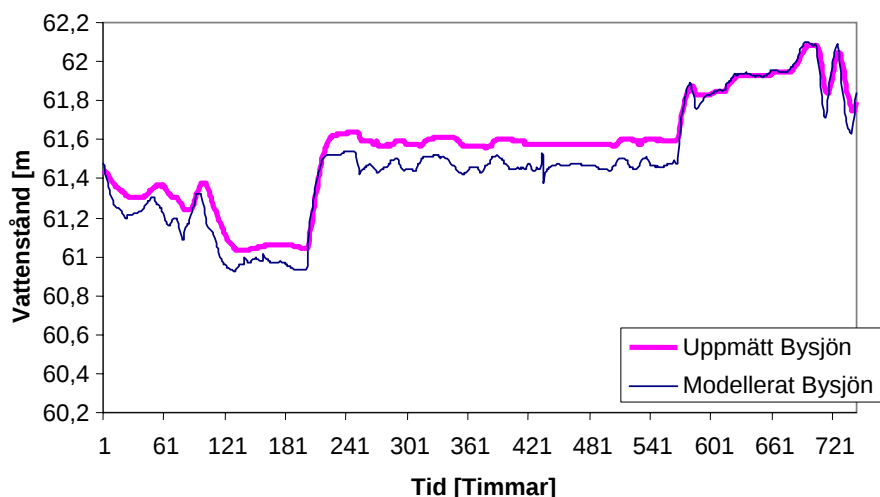


Figur 12. Modellerat vattenstånd jämförs med uppmätta värden i Bysjön under augusti 2005.

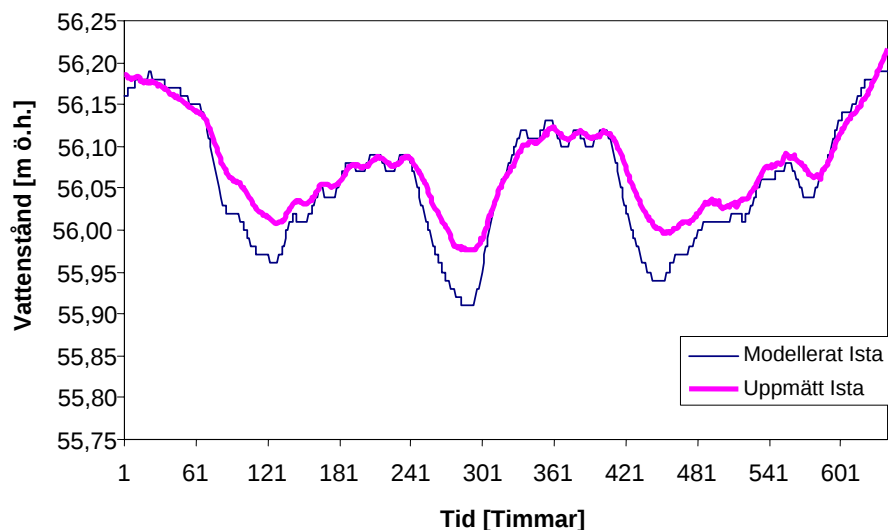


Figur 13. Modellerat vattenstånd jämförs med uppmätta värden från Ista i Färnebofjärden under augusti 2005.

Modellen validerades också för data från maj 2005. Modelleringen för Bysjöns vattennivå har en differens under stabila förhållanden, där modellen visar en nivå som är ungefär 0,1-0,15 meter lägre än uppmätta värden. Topparna under samma tidsperiod ligger dock nära de uppmätta värdena i Bysjön (Figur 14). I Färnebofjärden är de modellerade värdena lägre än de uppmätta värdena då vattenståndet sjunkit, men däremot är de modellerade topparna mycket nära de uppmätta (Figur 15). I modellen sjunker vattenståndet snabbare än de uppmätta värdena. Tidsmässigt rör det sig om ungefär 20 timmars differens. I



Figur 14. Modellerat vattenstånd jämförs med uppmätta värden i Bysjön under maj 2005.

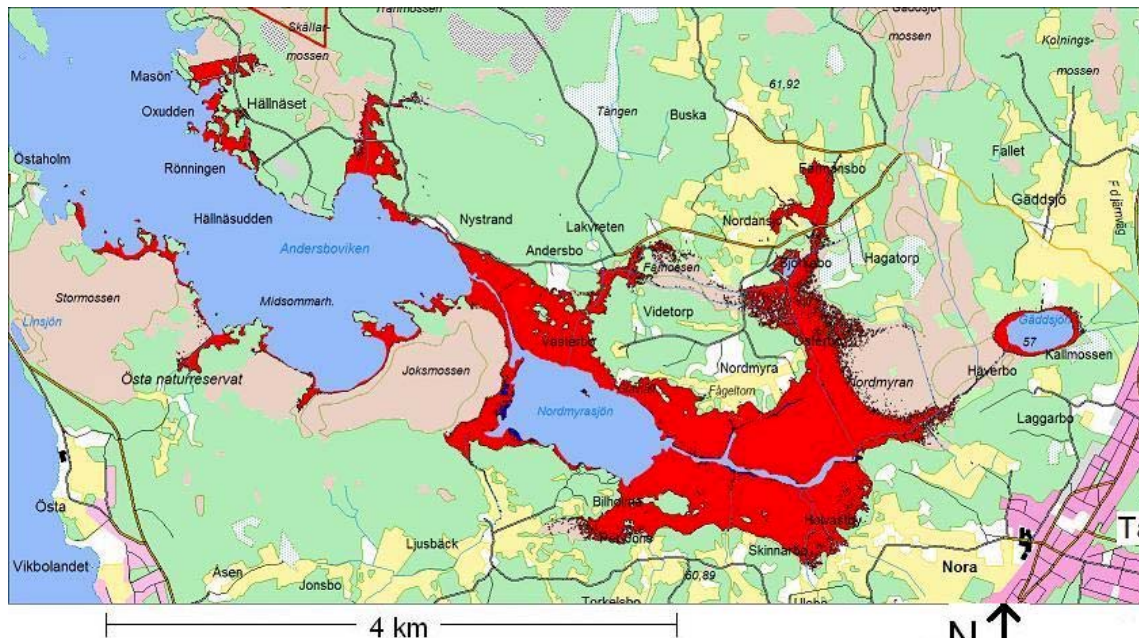


Figur 15. Modellerat vattenstånd jämförs med uppmätta värden från Ista i Färnebofjärden under maj 2005.

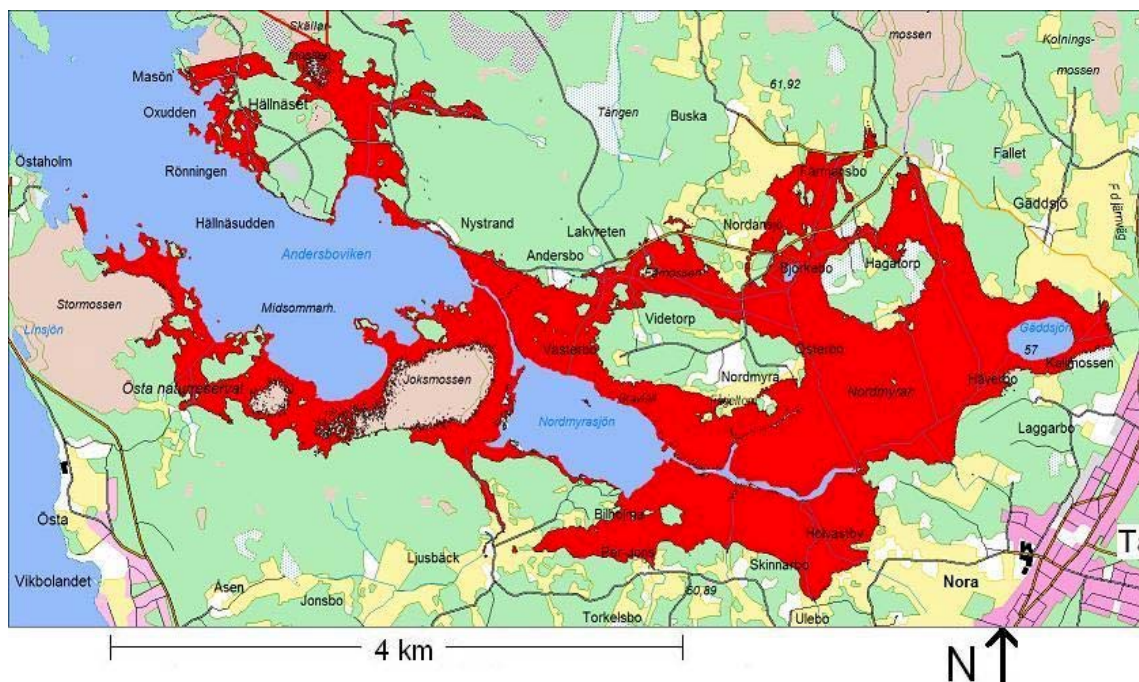
3.2 Den hydrauliska modellen HEC-RAS NEDA

Modellen är främst tänkt att användas för korttidsprediktioner likt en månad eller kortare. Förväntade värden för flöden anges i *unsteady flow editor* vartefter beräkningen görs av programmet. I alla tvärsektioner kan vattenståndet studeras i tiden, detta gäller också flöden.

För att förstå hur översvämningarna breder ut sig lokalt kan det högsta predikterade vattenståndet för en flödesperiod tas fram i den hydrauliska modellen HEC-RAS NEDA. Detta värde anges sedan i ett GIS-program där en yta av översvämningen beräknas fram. För att visualisera utbredningen av översvämningen färgläggs ytan (Figur 16 och 17).



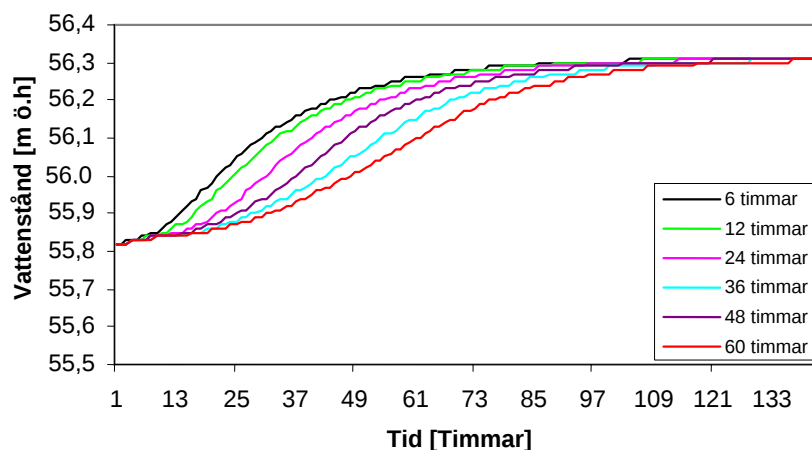
Figur 16. Översvämningen vid Tärnsjö under augusti 2005. Översvämningen täckte 3 km² landtytor. Det observerade vattenståndet var 56,85 m ö.h. i Färnebofjärden. Framtaget ur den digitala terrängmodellen. Kartan visas med tillstånd av Lantmäteriet.



Figur 17. Översvämningen vid Tärnsjö under augusti 2000. Översvämningen täckte 6,6 km² landtytor. Det observerade vattenståndet var 57,72 m ö.h. i Färnebofjärden. Framtaget ur den digitala terrängmodellen. Kartan visas med tillstånd av Lantmäteriet.

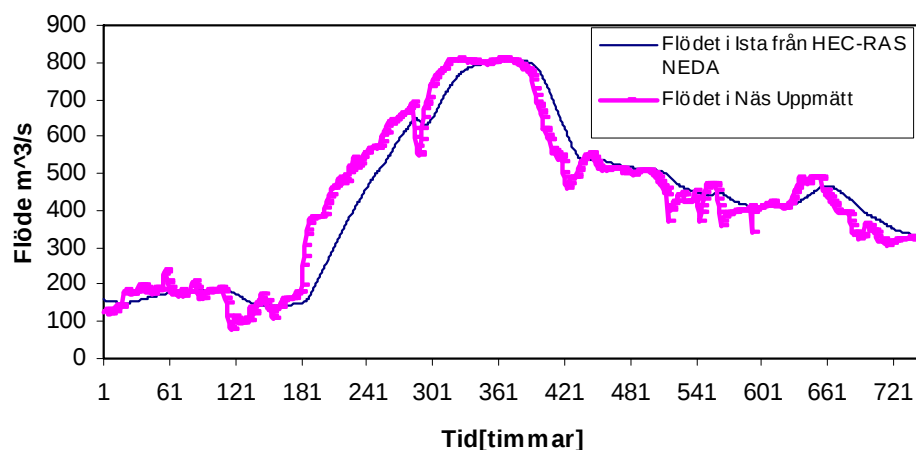
Området nära Tärnsjö och speciellt vid Nordmyra är flackt och stora områden täcks av vatten under översvämningarna.

Då flödet ökar vid Näs kraftverk, ökar vattenståndet nedströms i Färnebofjärden. Tiden det tar för att nå högsta vattenståndet vid en tvärsektion beror på hur snabbt flödet ökar och hur stor flödesförändringen är (Figur 18). Grafen är tillämpad på den specifika flödesökningen 200 m³/s till 600 m³/s, och kan ge en vägledning om tidsaspekten för en översvämning i Färnebofjärden efter en ökning av flödet vid Näs. Sådana flödesförändringar är vanliga vid en översvämning. Från modellerade värden ur HEC-RAS NEDA.



Figur 18. Vattenståndet vid Ista respons på flödesändringen vid Näs. Flödet vid Näs ökar linjärt från 200 till 600 m³/s under olika långa tidsintervall (6 timmar – 60 timmar). Enligt modell.

Flöden från olika tvärsektioner kan också jämföras. Enligt modellen är tidsfördröjning på flödesförändringen ungefär 20 – 30 timmar mellan Näs och Ista. (Se figur 19).



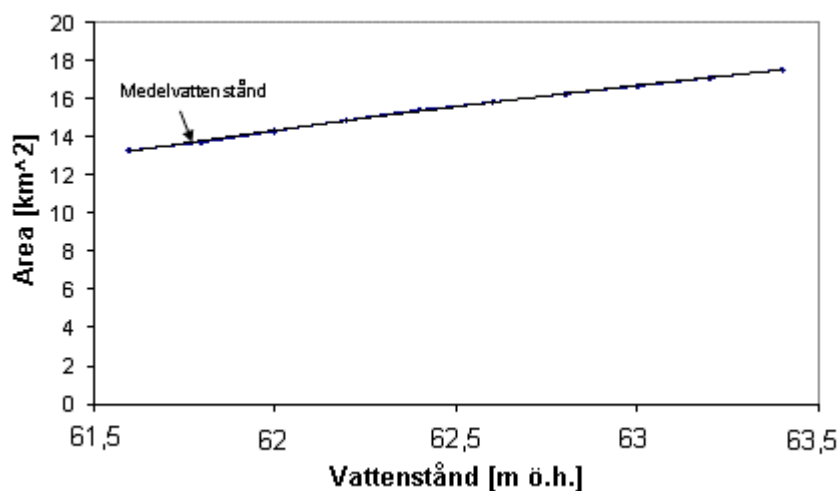
Figur 19. Flödet vid Ista jämfört med flödet i Näs, augusti 2005. Enligt modell.

Det finns många verktyg i HEC-RAS NEDA för resultattolkning, vilket uppmuntrar till en framtida användning av modellen. Modellen är också relativt enkel att använda vilket är positivt. Den kan kort beskrivas som en stabil hydraulisk modell med goda möjligheter till

prediktion av översvämningarnas omfattning, lokalisation och tidsaspekter i området mellan Näs kraftstation och Gysinge.

3.2 Areal som funktion av vattenståndet

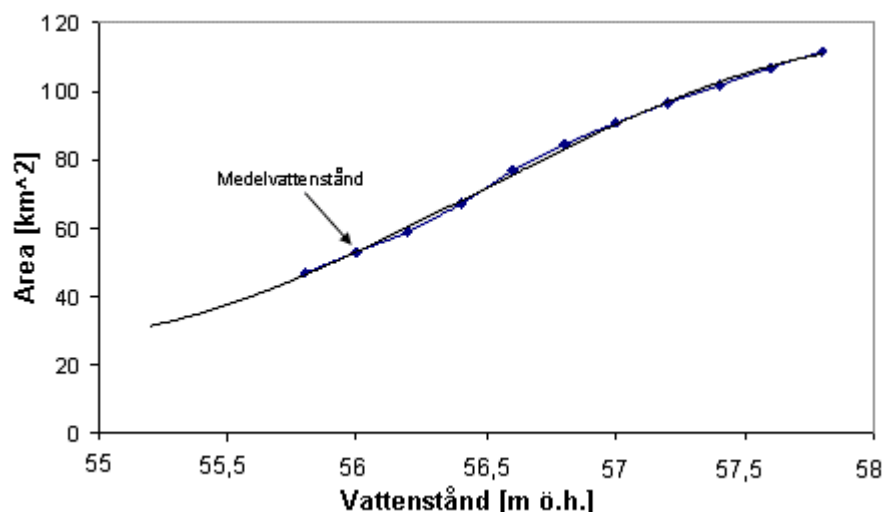
Areal i vattenmagasinen förändras med vattenståndet enligt figurerna 20, 21 och 22. Bysjöns magasin delades in i 0,2 meters skikt mellan 61,6 och 63,4 m ö.h. I Bysjöns vattenmagasin inkluderas två olika magasin. Bysjön på 61,6 m ö.h. och Österviken på 60 m ö.h. Antagandet att de två magasinerna översvämmas lika mycket av ett ändrat inflöde har gjorts. Det vill säga att vattenmagasinernas vattenyta höjs eller sänks med samma höjd vid fluktuationer av vattenytans nivå. I Bysjöns vattenmagasin ökar arean relativt rätlinjigt med avseende på vattenståndet. En ökning av vattenståndet med 0,2 meter ger en ökning av arean på vattenytan med ungefär $0,5 \text{ km}^2$.



Figur 20. Areal som funktion av vattenståndet i Bysjön.

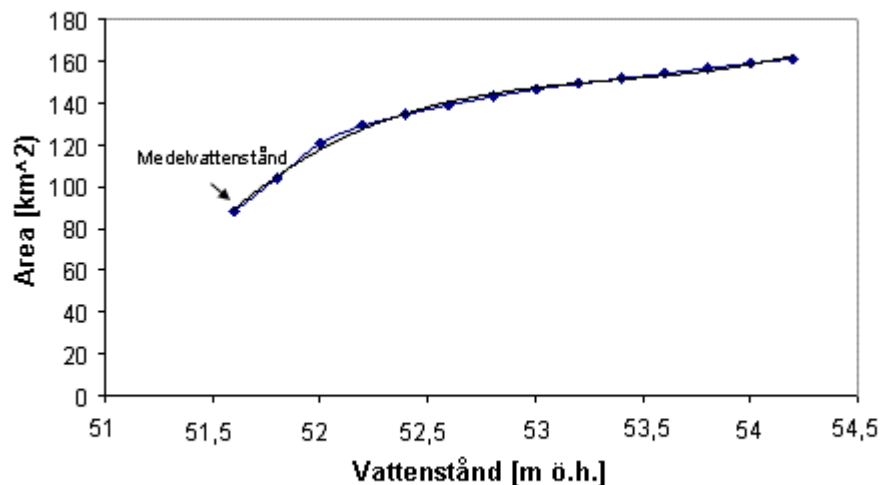
Färnebofjärdens magasin delades in i 0,2 m skikt mellan 55,2 och 57,8 m ö.h. Detta magasin innehåller de horisontella vattenytor som har medelvattenståndet 56 meter. I Färnebofjärden ökar arean snabbare med vattenståndet än i Bysjön då den totala arean av magasinet är större (Figur 21). I intervallet 56-57 m ö.h. ökar arean med ungefär 7 km^2 per 0,2 meters ökning av vattenståndet.

Under översvämningen år 2000 observerades vattennivåer i Färnebofjärden på drygt 57,7 meter, vilket indikerar att ca 55 km^2 lades under vatten jämfört med medelvattenstånd.



Figur 21. Arealen som funktion av vattenståndet i Färnebofjärden.

Hedesundafjärdens magasin delades in i 0,2 m skikt mellan 51,6 och 54,2 m ö.h. Detta magasin innehåller de horisontella vattenytan som har medelvattenståndet 51,6 meter. I Hedesundafjärden ökar arean med vattenståndet snabbt i intervallet 51,4 – 52,0 m ö.h. Ökningen av arean är då ungefär 15 km^2 per 0,2 meter vattenstånd. Därefter planar kurvan ut och ökningen är endast ca 2 km^2 per 0,2 meter vattenstånd efter 53 m ö.h. (Figur 22). År 2000 steg vattenytan med 0,6 meter över medelvattenstånd till 52,2 m ö.h. Denna vattenståndshöjning ger en ökning av vattenspegeln i Hedesundafjärden med 38 km^2 .



Figur 22: Arealen som funktion av vattenståndet i Hedesundafjärden.

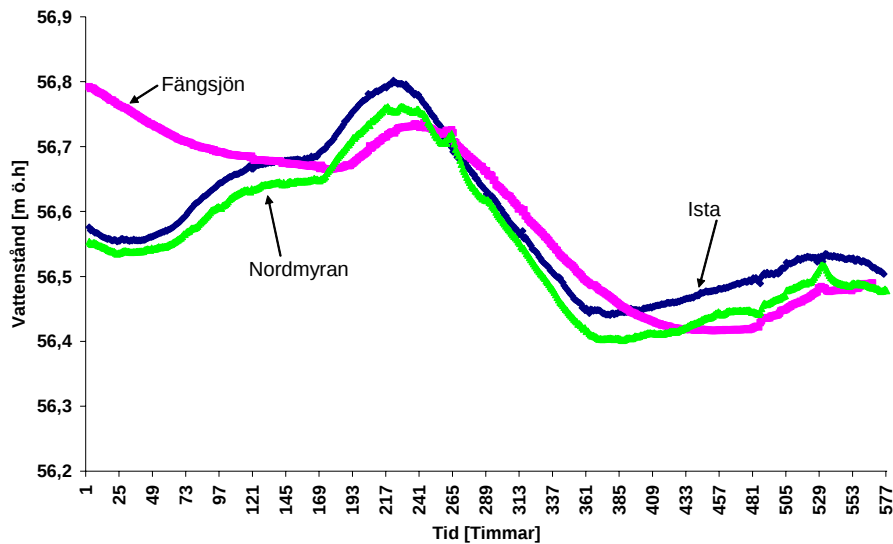
3.4 Vattenståndsmätningar

Resultatet av de egna mätningarna med pglar i olika delar av Färnebofjärden visar att vattenytornas höjd kan variera lokalt i samma vattenmagasin (Figur 23).

1. Fängsjön kan vid höga flöden från dess eget avrinningsområde få en förhöjd vattenyta jämfört med Färnebofjärden. Dynamiken i Fängsjöns vattenstånd är tidsmässigt förskjuten jämfört med de andra delarna av Färnebofjärden. Fluktuationerna i

vattenståndet sker senare i Fängsjön. En liten tidsdifferens kan också urskiljas mellan Nordmyran och Ista där Nordmyran reagerar något senare.

2. Mätningarna från Ista och Nordmyran är mycket lika varandra och ingen större skillnad går att avläsa under maj 2006. Vattenståndet kan inte avläsas som absolutvärden då avvägningen av peglarna inte varit tillräckligt noggrann.



Figur 23. Vattenståndsgraf från vattenytor i anslutning till Färnebofjärden ifrån 5:e till 26:e Maj 2006. Mätvärden från Nordmyran, Fängsjön och Ista.

4 Diskussion

Valideringskurvorna för HEC-RAS NEDA visar inga större differenser jämfört med uppmätta värden. Valideringen av modellen för tidsperioden augusti 2005 blev mycket bra, med differenser som inte överstiger skillnader i vattenståndet på mer än $\pm 0,05$ m. Modellen svarar snabbare på främst sänkningar av vattennivån men även höjningar av vattennivån påverkas snabbare än uppmätta värden. Tidsmässigt hamnar topparna i vattenståndsgrafen nära de uppmätta topparna. Det skiljer ungefär 12-24 timmar mellan modellens toppvärden och de uppmätta toppvärdena i vattenståndet, där modellen svarar snabbare. I en praktisk användning av modellen bör man tänka på att modellen svarar snabbare och ha detta i åtanke då resultaten tolkas. Figurerna 18 och 19 har således också ett inbyggt fel på tidsangivelserna där man bör addera 12-24 timmar till resultaten. Modellen visar att HEC-RAS NEDA är den bästa översvämningsmodellen som finns för området i dagsläget och den lämpar sig bra för korttidsprediktioner. Förmodligen skulle modellen vara användbar för flera samhällsaktörer, såsom Räddningsverket, länsstyrelser och kommuner i Nedre Dalälven.

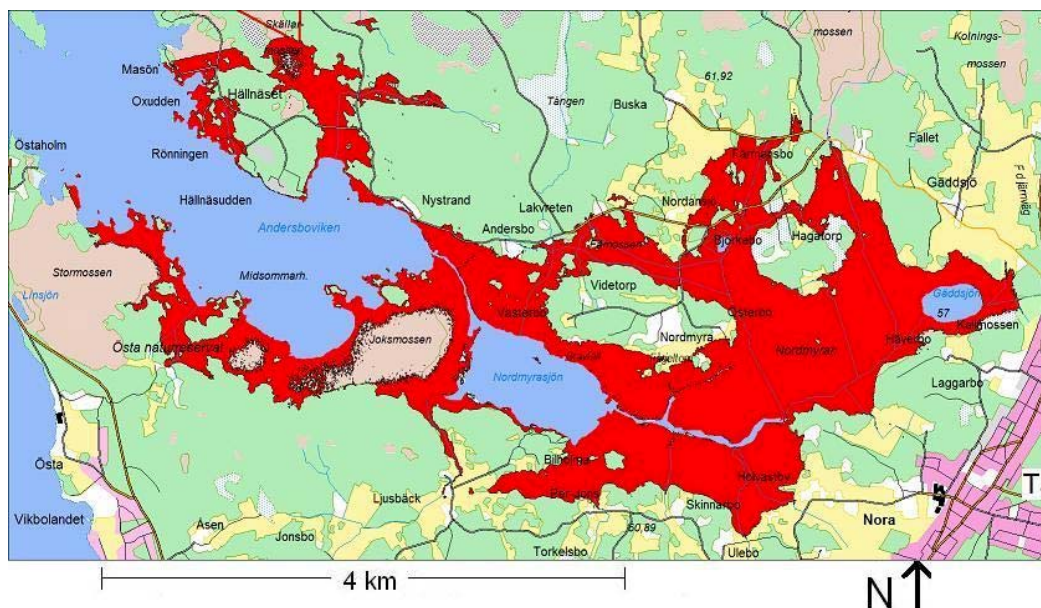
Ytor såsom älvängar och strandängar fångas inte i upp i sin helhet i modellen om de befinner sig mellan två tvärsektioner. Även mindre öar och grund blir osynliga för modellen i liknande fall. Dessa påverkar dock inte flödet i någon större omfattning så felet blir försumbart. De områden som har hamnat mellan tvärsektionerna är inte av större betydelse för flödet då dessa områden är mycket lika de områden som angetts i tvärsektionerna. Vid framtagning av tvärsektionerna har en noggrann studie gjorts för att få med alla de områden som är av större betydelse för flödet, det vill säga att alla trängre områden som kan hindra flödet är definierade, även låglänta områden, större öar, halvöar och så vidare är definierade.

Inflödet från Storån och Laggarboån är beräknade som årsmedel i modellen, men flödena i vattendragen är mycket små jämfört med Dalälvens flöde, vilket gör att utfallet av modellen påverkas i liten utsträckning. Vid mycket kraftiga regn i åarnas avrinningsområden kan dock vattennivån stiga lokalt i anslutning till Storån och Laggarboån. Eftersom modellen inte inkluderar nederbörd kan stora mängder nederbörd på Dalälvens vatten eller i avrinningsområdena till Storån och Laggarboån orsaka fel i prediktionen av vattenståndet, vilket bör observeras i den praktiska användningen av modellen.

Initialt var tanken att modellen skulle sträcka sig till Hedesunda. Då Hedesundafjärden är reglerad, kan man inte förutspå hur tappningen i fjärden går till i förväg. Denna korttidsreglering medför problem vid modellering, då det är svårt att i modellen få med de regleringsstrategier som används av regleringsföretagen. Då man tappar vatten finns flera variabler att ta hänsyn till. Bland annat förekommer vattendomar, marknadsstrategiska värden och förtappningar före stora flöden. Dessa variabler går inte att omsätta till entydiga utflöden från Hedesundafjärden, därav utelämnandet av denna fjärd i detta examensarbete. Troligen skulle det gå att modellera även Hedesundafjärden om man hade detaljerad kunskap om beslutsprocessen vad gäller tappning

Räddningsverket/SMHI har publicerat översvämningskartor för området, dels vid 100-årsflöden, dels vid högsta beräknat högsta flöde. En jämförelse mellan beräknade översvämningsytor enligt HEC-RAS NEDA och Räddningsverkets beräkningar visar på mycket stor diskrepans både vad gäller ytornas storlek, lokalisation och form. Modellen HEC-RAS NEDA gav en större översvämmad yta vid ett lägre flöde än Räddningsverkets modell.

1. Vattenståndet år 2000 var 57,7 m ö.h. i Färnebofjärden vilket medförde att 6,6 km² översvämmades i området runt Tärnsjö. Flödet under denna period var 1250 m³/s. Stora områden väster om Tärnsjö översvämmades (Figur 24).
2. I Räddningsverkets modell har man använt sig av det beräknade högsta flödet enligt Flödeskommitténs riktlinjer för dammdimensionering av riskklass I dammar, vilket motsvarar ett flöde på 3692 m³/s. Detta extremt höga flöde gav betydligt mindre översvämningsytor än översvämningen under år 2000. Formen på översvämningsytorna vid Tärnsjö är på vissa ställen spetsiga och rakt dragna, vilket verkar otroligt i ett låglänt område. Områdena strax väster om Tärnsjö översvämmas inte i Räddningsverkets modell (Figur 25).



Figur 24. Översvämningen i Tärnsjö under augusti 2000. Flödet var då 1250 m³/s. Framtaget från den digitala terrängmodellen.



Figur 25. Översvämningskartering vid Tärnsjö. De rosa områdena motsvarar 100-årsflödet 1930 m³/s och de randiga områdena motsvarar ett beräknat högsta flöde, 3692 m³/s. Bilden är tagen från Räddningsverkets hemsida, (www.raddningsverket.se).

Den stora skillnaden beror troligen på att HEC-RAS NEDA utgår ifrån en högupplösande (0,2 meter i höjdled) digital terrängmodell, medan Räddningsverkets modell utgår ifrån en lågupplösande (2,5 meter i höjdled) höjddatabas. Räddningsverkets modell konstruerades i programvaran MIKE 11 och i detta examensarbete användes HEC-RAS, men dessa endimensionella modellverktyg är likvärdiga och borde inte ge några betydande skillnader i resultat. De märkliga spetskonturerna i den av Räddningsverket beräknade översvämningsytan i Nordmyra (Figur 25) kan dock tyda på att denna modell är behäftad med andra problem än enbart lågupplösande höjddata. Troligen skulle dessa problem ha identifierats på ett tidigare stadium om resultaten hade kontrollerats mot form och lokalisation hos de låglänta våtmarksområden som finns med på Lantmäteriets terrängkarta 1:50 000.

Det är oroväckande att Räddningsverkets modell har så stora svagheter då utbyggnad av infrastruktur och stadsplanering ofta inkluderar studier av Räddningsverkets översvämningskarteringar. Det är mycket möjligt att felaktiga beslut tas i kommuner eller på Räddningsverket på grund av en översvämningsmodell med dålig noggrannhet.

Enligt Räddningsverket är deras översvämningskartering endast översiktlig och ger inga noggranna data på översvämningsområdenas utbredning.

HEC-RAS NEDA inkluderar endast ytor av Färnebofjärden där lutningen av vattnet är mindre än 1/1000. Gysinge, som ligger i området med kraftigare lutande vattenyta, finns därför inte med i modellen. Kraftigt sluttande vattenytor kräver mycket förarbete med korta avstånd mellan tvärsektionerna för att bygga upp en realistisk modell. Risken att modellen blir instabil är också stor. Räddningsverkets modell inkluderar även Gysinge och resultaten pekar på att denna ort kan drabbas mycket hårt vid såväl 100-årsflöden som högsta beräknade flöde. Mot bakgrund av de stora fel som Räddningsverkets modell ger på relativt lätt beräknade översvämningsytor vid Tärnsjö, samt att det är oklart hur denna modell tar hänsyn till vattenytans lutning i Gysinge, behövs nog en ny riskvärdering för detta område.

En avvägning av peglarna som placerades ut gjordes från fixpunkter i terrängen med ett avvägningsinstrument. Fixpunkterna vid Fängsjön och Ista var belägna inom 200 meter från vattenytan. Detta korta avstånd medger att få mätningar behövdes för att väga in vattenytan, vilket i sin tur gör att avvägningen blir mer noggrant utförd. Så var inte fallet vid Nordmyran. Där var avståndet ungefär 1,5 kilometer från fixpunkten till vattenytan. Mätningen kan inte anses vara lika noggrant utförd som de övriga. Noggrannheten i avvägningen anses vara någon eller några centimeter, beroende på långt avstånd och liten erfarenhet från tidigare avvägningar.

De mål och förhoppningar som skissades upp på ett tidigt stadium, att från en detaljerad höjdmodell konstruera en hydraulisk modell för korttidsprediktion av Dalälvens vattenstånd har uppfyllts. Med hjälp av modellen kan projektgruppen inom Biologisk myggbekämpning vid Nedre Dalälven få mer information om översvämningsdynamik i området. Modellen kan användas praktiskt för prediktering av vattenstånd även om viss diskrepans finns i modellen med avseende på tiden då högsta vattenstånd inträffar. Tillförlitligheten och noggrannheten för modellen inom kalibrerat område anses vara god. En jämförelse som gjordes mot Räddningsverkets översvämningskartering visade att HEC-RAS NEDA är ett noggrannare och mer tillförlitligt verktyg för att prediktera översvämnningar.

Referenser

Blominfo, 2003. Rapport Laserscanning Nedre Dalälven, Projektnummer W401194, Av Hans Strandberg, BlomInfo AB.

Danelko, 2006. <http://www.danelko.se/catalogue/industri/del3a.pdf>
Information från hemsidan 2006-06-22.

DHIgroup, 2006. www.dhigroup.com/Software/WaterResources.aspx, Information från hemsidan 2006-06-03.

HEC-RAS, 2002. (US Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center) water surface profile modelling, User's manual Version 3.1, November 2002.

HEC-RAS, 2006. <http://www.hecras.com/>, Information från hemsidan 2006-06-04.

Karta öfver Gysinge bruks fiskevatten efter Dalelven, 1885. Kopia av Kalle Hedin på NEDAB i Gysinge.

Lantmäteriet, 2006a. www.lantmateriet.se/upload/filer/kartor/kartor/hojddata.pdf information från hemsidan 2006-05-11

Ljung, 2006a. Vattenfall Vattenkraft, Driftledningen i Älvkarleby. Via e-post från Vattenfalls register 2006-05-24.

Ljung, 2006b. Vattenfall Vattenkraft, Driftledningen i Älvkarleby. Avbördningskurva skickades via e-post mars 2006.

Nedre Dalälvens sjökortsförening. Sjökort Gysinge – Söderfors. Utgiven 2005.

Räddningsverket, 2006a.
http://www.raddningsverket.se/templates/SRV_Page_14868.aspx
Information från hemsidan 2006-06-22.

Räddningsverket, 2006b.
<http://www.raddningsverket.se/upload/Förebyggande/naturolyckor/oversvamningskartering/Dalälven.pdf> Information från hemsidan 2006-05-29.

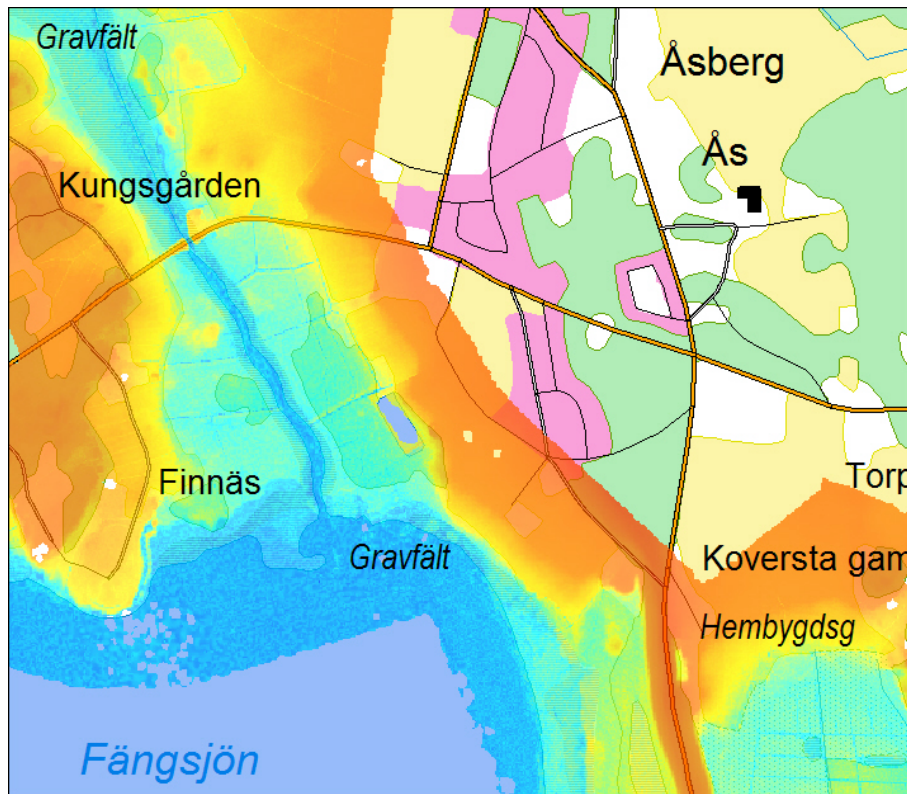
Räddningsverket, 2006c.
<http://www.raddningsverket.se/upload/Förebyggande/naturolyckor/oversvamningskartering/Dalälven.pdf> Information från hemsidan 2006-05-30.

SMHI, 1996. Svenskt Vattenarkiv (1995). Vattenföring i Sverige. Del 2. Vattendrag till Bottenhavet

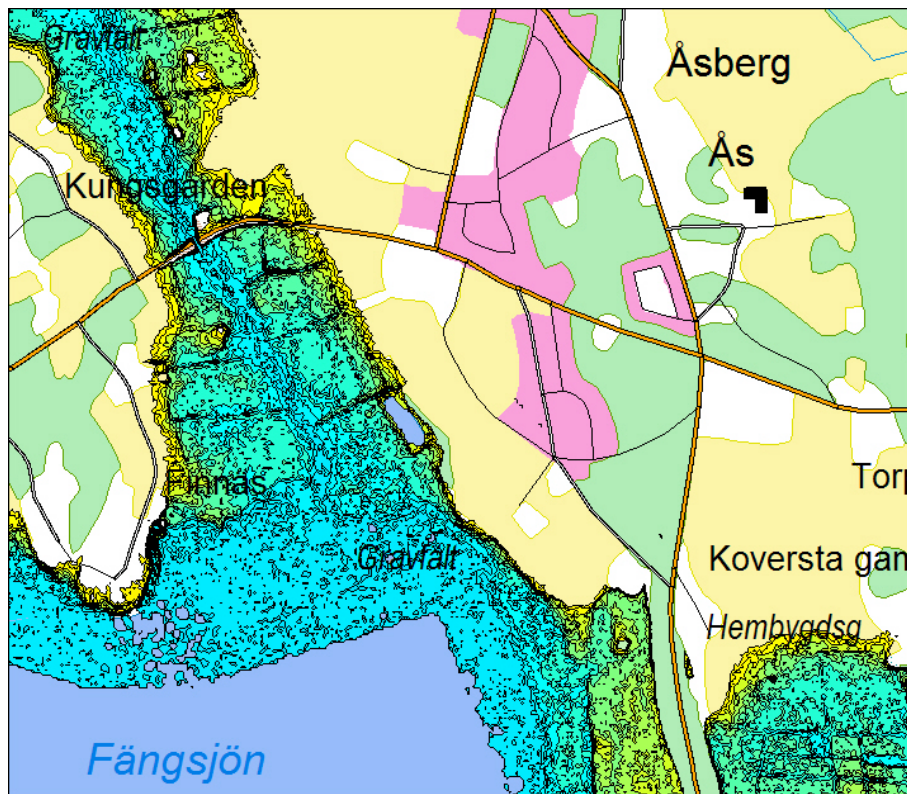
SMHI, 1998. Avrinningsområden i Sverige. Av, SMHI Version 1998 Svenskt vattenarkiv Del 2 Vattendrag till Bottenhavet, ISSN 0283-7722

SMHI, 2006a. Information från hemsidan www.smhi.se , faktablad 21, 2006-05-25.

Bilaga 1 GIS-filer



En gridfil på området runt Fängsjön sydväst om Österfärnebo.



En konturfil på området runt Fängsjön sydväst om Österfärnebo.

Bilaga 2 Lokala tillrinningsområden

Tabell 3. Area hos fjärdarnas lokala tillrinningsområden.

Vattendrag	Avrinningsområdets storlek [km ²]
Bysjön	217
Färnebofjärden	707
Hedesundafjärden	564

Tabell 4. Större vattendrag som mynnar i Bysjön.

Vattendrag	Avrinningsområdets storlek [km ²]
Årängså	146,1
Ånan	26,2

Tabell 5. Större vattendrag som mynnar i Färnebofjärden.

Vattendrag	Avrinningsområdets storlek [km ²]
Laggarboån	225,7
Storån	310,5

SMHI 1998, Avrinningsområden i Sverige

Appendix 1

Appendix 1 är baserat på HEC-RAS User's manual varifrån ekvationerna är hämtade.

Konsivering av massa i en definierad kontrollvolym innebär att nettoinflödet per tidsenhet är lika med förändringen av lagringen i kontrollvolymen. Inflödet ges av:

$$Q - \frac{\partial Q}{\partial x} \frac{\nabla x}{2} \quad (10)$$

Q = Flödet i centrum

x = Avståndet på kontrollvolymen

Således måste utflödet bli

$$Q + \frac{\partial Q}{\partial x} \frac{\nabla x}{2} \quad (11)$$

Och förändringen av lagringen blir

$$\frac{\partial A_T}{\partial t} \nabla x \quad (12)$$

A_T = Totala flödesarean av kontrollvolymen

Efter förenklingar kan kontinuitetsekvationen för transient flöde¹ kan skrivas enligt följande:

$$\frac{\partial A_T}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} - q_l = 0 \quad (13)$$

q_l = Lateralt inkommande flöde per längdenhet

Ekvationer för bevarandet av rörelsemängd.

Newtons andra lag:

$$\sum F_x = \frac{dM}{dt} \quad (14)$$

M = Rörelsemängd (momentum)

Konsivering av rörelsemängd för en kontrollvolym definieras som den inkommande nettorörelsemängden per tidsenhet (momentum flux) adderat med alla yttre krafter som påverkar kontrollvolymen, som skall vara lika med ackumuleringen av rörelsemängden i kontrollvolymen per tidsenhet.

¹ Då villkoret $\frac{\partial V}{\partial t} \neq 0$

Detta är en vektorekvation i X-led. Momentum flux beräknas som fluidens massa gånger hastighetsvektorn i flödesriktningen. Tre krafter blir i allmänhet beaktade. Tryckkraften, tyngdaccelerationen och friktionen.

Ekvationer för tryckkraften

Tryckets utbredning antas vara hydrostatiskt, det vill säga att trycket varierar linjärt med djupet och den totala tryckkraften blir således en integral av tryckareaprodukten i en tvärsektion.

Tryckkraften skrivs då

$$F_p = \int_0^h \rho g (h - y) T(y) dy \quad (15)$$

h = Djupet

y = Avståndet från kanalens botten

ρ = Fluidens densitet

g = Tyngdaccelerationen

$T(y)$ = En tvärsektions bredd som funktion av höjden över kanalens botten.

Om F_p är tryckkraften i X-riktningen vid mittpunkten på kontrollvolymen, kan kraften på uppströmssidan av kontrollvolymen skrivas som:

$$F_p - \frac{\partial F_p}{\partial x} \frac{\nabla x}{2} \quad (16)$$

och likaledes för nerströmssidan

$$F_p + \frac{\partial F_p}{\partial x} \frac{\nabla x}{2} \quad (17)$$

Summan av tryckkrafterna kan då skrivas som

$$F_{pn} = (F_p - \frac{\partial F_p}{\partial x} \frac{\nabla x}{2}) - (F_p + \frac{\partial F_p}{\partial x} \frac{\nabla x}{2}) + F_B \quad (18)$$

F_{pn} = Nettotryckkraften för kontrollvolymen

F_B = Motsvarar kraften som flodbanken utsätter flödet för i X-riktningen.

Ekvation (18) förenklas till

$$F_{pn} = - \frac{\partial F_p}{\partial x} \nabla x + F_B \quad (19)$$

Om man sedan deriverar ekvation (15) och använder Leibnitz regel, samt substituerar in den i ekvation 19 fås följande ekvation

$$F_{pn} = -\rho g \nabla x \left[\frac{\partial h}{\partial y} \int_0^h T(y) dy + \int_0^h (h-y) \frac{\partial T(y)}{\partial x} dy \right] + F_B \quad (20)$$

Den första integralen motsvarar arean A på tvärsektionen. Den andra integralen är tryckkraften som flodbanken utsätts för. F_B och den andra integralen multiplicerat med $-\rho g \nabla x$ har samma storlek fast motsatt tecken.

Slutligen fås följande tryckkraftekvation

$$F_{pn} = -\rho g A \frac{\partial h}{\partial x} \nabla x \quad (21)$$

A = Areal

Gravitationskrafter

Gravitationskrafterna kan skrivas som:

$$F_g = \rho g A \sin \theta \nabla x \quad (22)$$

F_g = Friktionskraften

Θ = Motsvarar vinkeln som kanalbotten avviker ifrån horisontalplanet. Vinkeln är mycket liten i naturliga floder

så $\sin \Theta \approx \tan \Theta = -\frac{\partial z_0}{\partial x}$ där z_0 är den inversa höjden.

Den slutliga ekvationen för tyngdaccelerationskraften blir således

$$F_g = -\rho g A \frac{\partial z_0}{\partial x} \nabla x \quad (23)$$

Friktionskrafter

Friktionskraften mot kanalens botten kan beskrivas som

$$F_f = \tau_0 P \nabla x \quad (24)$$

τ_0 = Kraften mot kanalens botten per areaenhet.

P = Den våta perimetern. (Areal som befinner sig under vattenytan).

Ekvation 24 kan skrivas om till

$$F_f = -\rho g A S_f \nabla x \quad (25)$$

S_f = Lutningen på kanalens botten.

Mannings ekvation avslutar således friktionsekvationerna där S_f definieras.

$$S_f = \frac{Q^2 n^2}{A^2 R^{\frac{4}{3}}} \quad (26)$$

Då man nu har definierat de tre krafterna så kan man till slut få fram en ekvation för bevarandet av rörelsemängden per tidsenhet, eller momentum flux. Den slutgiltiga ekvationen av rörelsemängdsflödet blir således

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial QV}{\partial x} + gA \left(\frac{\partial z}{\partial x} + S_f \right) = 0 \quad (27)$$

A = Areal

Q = Flödet

V = Hastigheten

g = Tyngdaccelerationen

S_f = Lutningen på kanalen

För närmare härledningar av formlerna se instruktionsboken (HEC-RAS User's Manual) och training manual för HEC-RAS programmet. Dessa ekvationer är endast ett axplock ur den stora skara ekvationer som programmet använder sig av men ger en idé om vilka faktorer som är viktiga.

Appendix 2

Värden på Mannings tal hämtad ur HEC-RAS NEDA.

Type of Channel and Description	Minimum	Normal	Maximum
A. Natural Streams			
1. Main Channels			
a. Clean, straight, full, no rifts or deep pools	0.025	0.030	0.033
b. Same as above, but more stones and weeds	0.030	0.035	0.040
c. Clean, winding, some pools and shoals	0.033	0.040	0.045
d. Same as above, but some weeds and stones	0.035	0.045	0.050
e. Same as above, lower stages, more ineffective slopes and sections	0.040	0.048	0.055
f. Same as "d" but more stones	0.045	0.050	0.060
g. Sluggish reaches, weedy. deep pools	0.050	0.070	0.080
h. Very weedy reaches, deep pools, or floodways with heavy stands of timber and brush	0.070	0.100	0.150
2. Flood Plains			
a. Pasture no brush			
1. Short grass	0.025	0.030	0.035
2. High grass	0.030	0.035	0.050
b. Cultivated areas			
1. No crop	0.020	0.030	0.040
2. Mature row crops	0.025	0.035	0.045
3. Mature field crops	0.030	0.040	0.050
c. Brush			
1. Scattered brush, heavy weeds	0.035	0.050	0.070
2. Light brush and trees, in winter	0.035	0.050	0.060
3. Light brush and trees, in summer	0.040	0.060	0.080
4. Medium to dense brush, in winter	0.045	0.070	0.110
5. Medium to dense brush, in summer	0.070	0.100	0.160
d. Trees			
1. Cleared land with tree stumps, no sprouts	0.030	0.040	0.050
2. Same as above, but heavy sprouts	0.050	0.060	0.080
3. Heavy stand of timber, few down trees, little undergrowth, flow below branches	0.080	0.100	0.120
4. Same as above, but with flow into branches	0.100	0.120	0.160
5. Dense willows, summer, straight	0.110	0.150	0.200
3. Mountain Streams, no vegetation in channel, banks usually steep, with trees and brush on banks submerged			
a. Bottom: gravels, cobbles, and few boulders	0.030	0.040	0.050
b. Bottom: cobbles with large boulders	0.040	0.050	0.070
B. Lined or Built-Up Channels			
1. Concrete			
a. Trowel finish	0.011	0.013	0.015
b. Float Finish	0.013	0.015	0.016
c. Finished, with gravel bottom	0.015	0.017	0.020

d. Unfinished	0.014	0.017	0.020
e. Gunite, good section	0.016	0.019	0.023
f. Gunite, wavy section	0.018	0.022	0.025
g. On good excavated rock	0.017	0.020	
h. On irregular excavated rock	0.022	0.027	
2. Concrete bottom float finished with sides of:			
a. Dressed stone in mortar	0.015	0.017	0.020
b. Random stone in mortar	0.017	0.020	0.024
c. Cement rubble masonry, plastered	0.016	0.020	0.024
d. Cement rubble masonry	0.020	0.025	0.030
e. Dry rubble on riprap	0.020	0.030	0.035
3. Gravel bottom with sides of:			
a. Formed concrete	0.017	0.020	0.025
b. Random stone in mortar	0.020	0.023	0.026
c. Dry rubble or riprap	0.023	0.033	0.036
4. Brick			
a. Glazed	0.011	0.013	0.015
b. In cement mortar	0.012	0.015	0.018
5. Metal			
a. Smooth steel surfaces	0.011	0.012	0.014
b. Corrugated metal	0.021	0.025	0.030
6. Asphalt			
a. Smooth	0.013	0.013	
b. Rough	0.016	0.016	
7. Vegetal lining	0.030		0.500
C. Excavated or Dredged Channels			
1. Earth, straight and uniform			
a. Clean, recently completed	0.016	0.018	0.020
b. Clean, after weathering	0.018	0.022	0.025
c. Gravel, uniform section, clean	0.022	0.025	0.030
d. With short grass, few weeds	0.022	0.027	0.033
2. Earth, winding and sluggish			
a. No vegetation	0.023	0.025	0.030
b. Grass, some weeds	0.025	0.030	0.033
c. Dense weeds or aquatic plants in deep channels	0.030	0.035	0.040
d. Earth bottom and rubble side	0.028	0.030	0.035
e. Stony bottom and weedy banks	0.025	0.035	0.040
f. Cobble bottom and clean sides	0.030	0.040	0.050
3. Dragline-excavated or dredged			
a. No vegetation	0.025	0.028	0.033
b. Light brush on banks	0.035	0.050	0.060

4. Rock cuts a. Smooth and uniform b. Jagged and irregular	0.025	0.035	0.040
	0.035	0.040	0.050
5. Channels not maintained, weeds and brush a. Clean bottom, brush on sides b. Same as above, highest stage of flow c. Dense weeds, high as flow depth d. Dense brush, high stage	0.040	0.050	0.080
	0.045	0.070	0.110
	0.050	0.080	0.120
	0.080	0.100	0.140