



UPPSALA
UNIVERSITET

UPTEC W04 005

Examensarbete 20 p
Februari 2004



Utveckling och tillämpning av en distribuerad GIS-baserad snösmältnings- och avrinningsmodell

Development and application of a distributed
GIS-based snowmelt and runoff model

Per Larsson



Referat

Utveckling och tillämpning av en distribuerad GIS-baserad snösmältnings- och avrinningsmodell

Per Larsson, SLU, Miljöanalys, Box 7050 (besök: Vallvägen 3) 75007 Uppsala

En distribuerad GIS-baserad snösmältnings- och avrinningsmodell har utvecklats. Modellen är baserad på rutinerna i den av SMHI (Sveriges meteorologiska och hydrologiska institut) utvecklade HBV-modellen. Rutinerna har till viss del ändrats, dels för att kunna implementeras distribuerat men även för att utnyttja de fördelar som ett distribuerat angreppssätt medför. Under utvecklingen har en rumslig upplösning på $250 \times 250 \text{ m}^2$ använts. De drivande parametrarna är dygnsvärden för temperatur och nederbörd, veckomedelvärden för NRI samt månadsmedelvärden för potentiell evapotranspiration. NRI är ett strålningsindex som använts för att ta hänsyn till lokala variationer i snösmältning och avdunstning. Modellen har utvecklats i PCRaster och den integrerar HBV-modellen med ett rasterbaserat geografiskt informationssystem fullt ut. Eftersom inga restriktioner på rumslig upplösning finns (beror på höjdmoddellens upplösning) ökas möjligheterna att beskriva variationerna inom ett avrinningsområde avsevärt. Den rasterbaserade modellen är dessutom ytterst väl lämpad för att använda fjärranalytiska data till uppdatering av modellen (d.v.s. som indata) eller utvärdering av modellresultat (d.v.s. vid kalibrering och validering). Det är ur dammsäkerhets- och kraftproduktionssynpunkt viktigt för Vattenfall att titta på alternativ till nuvarande metoder (HBV-96) för att förbättra avrinningssimuleringarna framför allt vid extrema tillrinningar i samband med till exempel snösmältning.

Modellen applicerades på Tjaktjajaure avrinningsområde som är ett av Luleälvens delavrinningsområden. Kalibrering gjordes enbart mot uppmätt avrinning. För simulerad avrinning erhöles under kalibreringsperioden (19901001-19960930) ett R_{eff} (Nash & Sutcliffe, 1970) på 0.83 och ett volymfel, V_E , på 1.2 %. Motsvarande värden för valideringsperioden (19961001-20031002) var 0.81 och 3.8 %. Under valideringsperioden studerades även snöutbredningen genom att modellerad snöutbredning jämfördes med en snöklassificerad Landsat-scen från den 28 maj 2002. Trots att kalibrering endast gjorts mot uppmätt avrinning visade jämförelsen en total klassningsnoggrannhet på närmare 90 % tillsammans med en god areell överensstämmelse. De lovande resultaten för både avrinning och snöutbredning uppmuntrar till att modellen sätts upp och utvärderas i fler områden.

Nyckelord: HBV, GIS, distribuerad hydrologisk modellering, PCRaster, NRI
ISSN 1401-5765

Abstract

Development and application of a distributed GIS-based snowmelt and runoff model

Per Larsson, SLU, Miljöanalys, Box 7050 (visit: Vallvägen 3) 75007 Uppsala

A distributed GIS-based snowmelt runoff model has been developed. The model is based on the routines of the HBV-model, developed by SMHI (Swedish Meteorological and Hydrological Institute). The routines have to some extent been changed to make it possible to implement them in a distributed fashion and to make use of the advantages that comes with a distributed approach. During the development a spatial resolution of $250 \times 250 \text{ m}^2$ was used. The driving parameters are daily values of temperature and precipitation, weekly values of NRI and monthly values of potential evapotranspiration. NRI is a radiation index that was used to take local variations in snowmelt and evaporation into account. The model has been developed in PCRaster and it fully integrates the HBV-model with a raster based geographical

information system. Since there are no restrictions on the spatial resolution (depends on the resolution of the digital elevation model) the possibilities to describe an area are increased considerably. The raster based model is well suited for using remote sensing data for model update (i.e. as input data) or model evaluation (i.e. during calibration and validation). From a dam safety and power production point of view it is important for Vattenfall to look at alternatives to current methods (HBV-96) to increase the predictive power in runoff simulations especially during extreme runoff events related for example to snow melt.

The model was applied in the Tjaktjajaure catchment, one of the Lule river sub catchments. The model was calibrated against observed runoff only. The calibration (19901001-19960930) resulted in a R_{eff} -value (Nash & Sutcliffe, 1970) of 0.83 and a volume error V_E of 1.2 %. The validation period (19961001-20031002) resulted in 0.81 and 3.8 % respectively. During the validation period the snow covered area was studied as well. Modelled snow covered area was compared with a snow classified Landsat scene from May 28, 2002. Despite the fact that calibration was made against observed runoff only the comparison showed a total classification accuracy of almost 90 % together with a good areal accuracy. The promising results encourage that the model is applied and evaluated in other areas as well.

Key word: HBV, GIS, distributed hydrological modelling, PCRaster, NRI
ISSN 1401-5765

Förord

Examensarbetet har utförts på SwedPower Hydrologi & GIS och finansierats av Vattenfall AB, Vattenkraft.Handledare på SwedPower har varit Thomas Hedvall. Jan Seibert på Institutionen för Miljöanalys, SLU, Ultuna har varit examinator men har även med sin hydrologiska och modelleringstekniska expertis haft en handledande funktion. Ett speciellt tack riktas till Stefan Uhlenbrook och övriga som ligger bakom utvecklandet av TAC-d-modellen samt till Jan Seibert för den frikostighet de visat genom att låta mig ta del av och använda mig av resultaten av deras arbete.

Ett stort tack riktas också till Claes-Olof Brandesten på Vattenfall Dammsäkerhet, alla på Swedpower Hydrologi & GIS, Mikael Sundby på Vattenfall Produktion, Johan Lundin och alla andra som på olika sätt har bidragit till förverkligandet av detta examensarbete.

Innehållsförteckning

| | |
|---|-----------|
| FIGURFÖRTECKNING | 2 |
| TABELLFÖRTECKNING | 2 |
| EKVATIONSFÖRTECKNING | 3 |
| 1 INLEDNING | 5 |
| 1.1 BAKGRUND | 5 |
| 1.2 MÅL OCH SYFTE | 7 |
| 2 MATERIAL OCH METODER | 8 |
| 2.1 MILJÖMODELLERING OCH PCRASTER | 8 |
| 2.2 OMRÅDESBESKRIVNING | 9 |
| 2.3 LANDKLASSIFIKATION | 11 |
| 2.4 NRI – NORMALIZED RADIATION INDEX | 12 |
| 2.5 METEOROLOGISKA DATA | 13 |
| 2.5.1 <i>Nederbörd och temperatur</i> | 13 |
| 2.5.2 <i>Evapotranspirationsdata</i> | 17 |
| 2.6 HYDROLOGISKA DATA | 17 |
| 2.7 MODELLERING AV SNÖ | 18 |
| 2.8 MODELLBESKRIVNING | 21 |
| 2.8.1 <i>Inledning</i> | 21 |
| 2.8.2 <i>Snörutin</i> | 21 |
| 2.8.3 <i>Markrutin</i> | 21 |
| 2.8.4 <i>Avrinnings- och routingrutin</i> | 23 |
| 2.8.5 <i>Modelldiskussion</i> | 24 |
| 2.9 KALIBRERING OCH VALIDERING AV MODELLER | 25 |
| 2.9.1 <i>Kalibrering</i> | 25 |
| 2.9.2 <i>PEST</i> | 27 |
| 2.9.3 <i>Validering</i> | 28 |
| 3 RESULTAT | 28 |
| 3.1 NRI | 28 |
| 3.2 AVRINNING | 29 |
| 3.2.1 <i>Kalibrering</i> | 29 |
| 3.2.2 <i>Validering</i> | 30 |
| 3.2.3 <i>Hur mycket påverkar NRI avrinningen?</i> | 31 |
| 3.3 SNÖ | 32 |
| 3.3.1 <i>Utbredning</i> | 32 |
| 3.3.2 <i>Vatteninnehåll</i> | 34 |
| 3.4 RESULTATDISKUSSION | 35 |
| 3.4.1 <i>NRI</i> | 35 |
| 3.4.2 <i>Avrinning</i> | 36 |
| 3.4.3 <i>Snö</i> | 38 |
| 4 DISKUSSION OCH SLUTSATSER | 40 |
| 5 REKOMMENDATIONER FÖR FRAMTIDEN | 42 |
| 6 REFERENSER | 43 |
| 7. APPENDIX | 47 |

Figurförteckning

| | | |
|-----------|---|----|
| Figur 1. | Modelleringsmiljö i PCRaster | 9 |
| Figur 2. | Tjaktjajuarens avrinningsområde. | 10 |
| Figur 3. | Normalized Radiation Index..... | 13 |
| Figur 4. | Höjtkorrigerad och interpolerad av temperatur och nederbördsdata...16 | |
| Figur 5. | NRI som funktion av tid och sluttningsriktning..... | 29 |
| Figur 6. | Observerat och simulerat flöde under kalibreringsperioden | 30 |
| Figur 7. | Observerat och simulerat flöde under valideringsperioden | 31 |
| Figur 8. | Skillnad i avrinning orsakad av NRI | 32 |
| Figur 9. | Modellerad och verklig snöutbredning 20020528..... | 33 |
| Figur 10. | Modellerad och uppmätt SWE..... | 35 |

Tabellförteckning

| | | |
|------------|---|----|
| Tabell 1. | Karakteristiska vattenföringar för Seitevare kraftstation | 10 |
| Tabell 2. | Områdeskaraktäristiska data för Tjaktjajaure avrinningsområde | 11 |
| Tabell 3. | Sluttningsriktningar i Tjaktjajaure | 12 |
| Tabell 4. | Månadsmedelvärden för evapotranspiration | 17 |
| Tabell 5. | Effektivitetsmått | 26 |
| Tabell 6. | Sluttningsriktningar | 29 |
| Tabell 7. | R_{eff} och V_e för kalibreringsperioden | 30 |
| Tabell 8. | R_{eff} och V_e för valideringsperioden | 31 |
| Tabell 9. | Felmatis för fallet med 1 pixel som gräns vid omsampling..... | 33 |
| Tabell 10. | Felmatis för fallet med 25 pixlar som gräns vid omsampling..... | 33 |
| Tabell 11. | Total karteringsnoggrannhet..... | 34 |
| Tabell 12. | Uppmätt och simulerat flöde runt 950606..... | 37 |
| Tabell 13. | R_{eff} och V_E då ett P_{CFMAX} används | 39 |

Ekvationsförteckning

| | |
|--|----|
| Ekvation 1. Normalized Radiation Index | 12 |
| Ekvation 2. Avståndsviktad medelvärdesinterpolering | 14 |
| Ekvation 3. Snötäckets energibalans ekvation | 18 |
| Ekvation 4. Grad-dag metoden | 19 |
| Ekvation 5. Smältmetod enligt Cazorzi och Dalla Fontana (1996) | 20 |
| Ekvation 6. Smältmetod enligt Hock (1999) | 20 |
| Ekvation 7. Modifierad grad-dag metod | 21 |
| Ekvation 8. Styrande ekvationer i markrutinen | 22 |
| Ekvation 9. FC som funktion av lutning | 22 |
| Ekvation 10. Avrinningsbildning i HBV-modellen | 23 |
| Ekvation 11. Total karteringsnoggrannhet | 34 |

1 Inledning

1.1 Bakgrund

Vid många sorters vattenanvändande är det viktigt att på ett bra sätt kunna prediktera vattenföringen. Beroende på syftet kan både kort- och långtidsprognoser vara nödvändiga. Vid till exempel översvänningsvarningar är det framför allt kortsiktiga prognoser som behövs. Långtidsprognoser kan till exempel behövas för att uppskatta den årliga kraftproduktionen vid ett vattenkraftverk. Utöver kort- och långtidsprognoser behövs uppskattningar av extrema flöden till exempel vid dimensionering och bestämning av lämpligt läge för dammar och infrastruktur. För att kunna göra ovanstående uppskattningar krävs ett lämpligt verktyg. Detta verktyg utgörs ofta av matematiska och/eller statistiska modeller.

Hydrologiska modeller delas in i olika kategorier beroende på hur de representerar verkligheten. Konceptuella modeller, vilka framför allt används i Sverige, bygger på en föreställning om hur det verkliga systemet fungerar. Rutinerna (delarna som bygger upp modellen) är fysikaliskt rimliga men syftar inte till att exakt beskriva de verkliga processerna. I de fysikaliska modellerna däremot används ekvationer och samband, vars applicerbarhet studerats i småskaliga experiment, för att beskriva flöden och energi- och massbalanser. Modellerna delas också in efter i vilken utsträckning de tar hänsyn till de ingående variabelernas rumsliga variationer. I en aggregerad (*eng. lumped*) eller icke-distribuerad modell ser man på hela området som en enhet. I en semidistribuerad modell tar man hänsyn till den rumsliga variationen genom att dela in området i hydrologiskt karakteristiska delområden. Den helt distribuerade modellen tar hänsyn till alla variabelers och parametrars rumsliga variationer (Seibert, 1999).

Vattenfall producerar elektricitet och värme och är en av Europas fem största elproducenter. Företaget arbetar med vattenkraft, kärnkraft, vindkraft och energiutvinning ur fossila bränslen, biobränslen och avfall. I Sverige är det vatten- och kärnkraft som utgör basen i elproduktionssystemet. Hela koncernens produktionskapacitet år 2002 var 32000 MW elektricitet och 13000 MW värme. Under åren 2002-2007 investerar Vattenfall drygt 1.2 miljarder kronor för att höja säkerheten vid ett antal vattenkraftverksdammar. Förstärkningarna syftar till att dammarna skall klara extremt höga flöden, de så kallade 10000-årsflödena. Dessa flöden är en kombination av olika extema förutsättningar som kan antas inträffa ungefär en gång vart tiotusende år. Kraftindustrin har tillsammans med bland andra Sveriges Meteorologiska och Hydrologiska Institut (SMHI) arbetat fram riktlinjer (af Klintberg *et al*, 1990) för vad dammarna skall klara av. Nederbördsstatistik och effekten av snösmältning har studerats och simuleringar av tänkbara scenarier har gjorts med hydrologiska modeller. De nya kraven ger upphov till att vissa dammar måste byggas om eller förstärkas på något sätt. Kraven gäller för dammar där ett dammbrott skulle medföra risk för människor eller annan stor skada (Vattenfall, 2003).

För Vattenfall är det alltså av stor vikt, dels ur dammsäkerhets-, men även ur kraftproduktionssynpunkt, att på ett bra sätt kunna modellera avrinningen. Ur dammsäkerhetssynpunkt är det framför allt de extrema avrinningarna som sker i samband med snösmältning och vårflood som är av intresse. Operationellt sett har HBV-modellen (se till exempel Bergström (1992)) använts för att simulera avrinning. Älvarnas regleringsföretag använder modellen för att göra lång- respektive korttidsprognoser. För långtidsprognoser utgår man från dagens hydrologiska situation men som indata till modellen används tidigare års väderutvecklingar. På detta sätt får man ett antal tänkbara flödesscenarier, som kan bearbetas statistiskt för att bedöma tillrinningen. För korttidsprognoserna används en

meteorologisk prognos för temperatur och nederbörd som indata till modellen (Bergström, 1993). Långtidsprognoserna används vid säsongsplanering av påfyllning respektive uttappning från magasinen. Korttidsprognoserna används för veckoplanering av tappning (Mikael Sundby, personlig kommunikation). Vid dammars flödesdimensionering används HBV-modellen för beräkning av en dimensionerande tillrinningsituation utifrån vissa fastställda förutsättningar. Beräkningen sker med en iterativ metod, där den mest kritiska kombinationen av klimat, hydrologi och reglering av hela systemet systematiskt letas fram (Bergström, 1993).

Den hydrologiska HBV-modellen (namnet HBV står för Hydrologiska Byråns Vattenavdelning, en avdelning som tidigare fanns på SMHI) har en lång historia och den har använts i olika applikationer i mer än 30 länder. Den första lyckade körningen med en tidig version av HBV-modellen utfördes våren 1972 (Bergström, 1992). Ursprungligen utvecklades HBV-modellen hos SMHI för att användas till avrinningsmodeller och hydrologisk prognostisering. Modellen har med tiden genomgått en del förändringar men den ursprungliga modelleringsfilosofin har förblivit intakt. Idag existerar många olika versioner av HBV-modellen. Standardversionen från SMHI har sedan länge varit en modell som bäst karaktäriseras som en semidistribuerad konceptuell modell. (Lindström *et.al*, 1997). Modellen använder delavrinningsområden som primär hydrologisk enhet och inom dessa en indelning i olika höjdzoner och en grov indelning av marktyp (skog, öppet och sjö) (Bergström, 1992). Modellen simulerar daglig avrinning utifrån dygnsmedelvärden för nederbörd och temperatur och månadsmedelvärden för potentiell evapotranspiration. Modellen består av olika rutiner i vilka snösmältning beräknas med en grad/dag-metod, påfyllning av grundvatten och verklig avdunstning är funktioner av aktuell mängd lagrat vatten i en markbox, avrinningsbildning representeras av tre linjära reservoarekvationer (i senare versioner har dessa ersatts med en linjär och en olinjär) och kanalrouting simuleras med hjälp av en triangulär viktningsfunktion.

1993 initierade Vattenregleringsföretagens samarbetsorgan (VASO) och SMHI en grundlig genomgång av modellen. Målet var att återutvärdera den existerande modellen och utveckla en ny modellversion för hydrologiska problem relaterade till vattenkraftsproduktion och design. Modellen skulle baseras på samma enkelhetsfilosofi men vara mer fysikaliskt rimlig och à jour med rådande hydrologiskt och meteorologiskt kunnande. HBV-96 är det slutgiltiga resultatet av denna modellrevision.

I HBV-96 har vissa ändringar jämfört med ursprungsmodellen gjorts (t.ex. en höjdkorrektion av evapotranspirationen baserad på Evremar (1994)) och modellen använder sig typiskt av delavrinningsområden med storleken 40 km² (Lindström *et al*, 1997). Trots att HBV-96 är mer distribuerad än sina föregångare kvarstår fortfarande problemet med areell återgivning vilket kraftigt begränsar användandet av distribuerad data. Alltså kan man inte säga att HBV-96 är en helt distribuerad modell. Åtminstone inte om man med en distribuerad modell avser en modell där lokala variationer i topografi och markanvändning kan urskiljas. Med en distribuerad modell finns det möjlighet att ta hänsyn till lokala variationer i topografi (höjd över havet, lutning och sluttning), marktyp med mera. Detta är variationer som högst avsevärt kan påverka temperaturen och nederbördens fördelning, snösmältning, avdunstning, lagring i marken och i slutänden naturligtvis också avrinningen.

Ur dammsäkerhetssynpunkt är det viktigt att titta på alternativ till nuvarande metoder (HBV-96) för att förbättra avrinningsmodeller vid extrema tillrinningar i samband med till exempel snösmältning. Eftersom snötäckets utbredning och mäktighet är av stor betydelse för vårflodens storlek är det viktigt att kunna modellera det på ett bra sätt. I HBV-96 behandlas i

stort sett all snö på samma sätt. Den enda skillnaden som görs är beroende på om snön ligger i skog eller inte. Med tanke på att processerna som styr ackumulation och smältning av snö är komplexa och att stora lokala variationer kan förekomma ter sig ovanstående angreppssätt som tämligen grovt. Med en distribuerad modell däremot skulle det vara möjligt att modellera snötäckets dynamik på ett bättre sätt eftersom man för varje pixel skulle kunna ta hänsyn till lokala variationer i till exempel instrålning. Som utdata från en distribuerad modell får man dessutom en detaljerad bild över snötäckets utbredning jämfört med HBV-96 där man bara får information om hur mycket snö som ligger inom de olika elevationsgränserna.

En annan stor fördel med en distribuerad modell är att dess struktur möjliggör ett optimalt användande av fjärranalytiska data (t.ex. snöutbredning och mäktighet, markfuktighet, vegetation eller markanvändning). Om man har satellitbilder eller annan fjärranalytisk data med hög rumslig upplösning bör man om möjligt använda sig av denna information för att förbättra sin modell. Försök har gjorts med HBV-modellen att använda sig av fjärranalytiska data för att förbättra vårflödesprognoserna men utan större framgång. En av de största anledningarna anses vara just HBV-modellens struktur. ”Svårigheterna att förbättra HBV-modellens vårflödesprognoser kan dels ha varit beroende på att HBV-modellens struktur inte är anpassad till att utnyttja denna typ av indata ...” (Andréasson *et al*, 2001). Vidare blir det med en distribuerad modell möjligt att direkt jämföra data från till exempel georadar, satellitbilder eller manuella mätningar med modellerade värden för den platsen. Data kan användas för att uppdatera modellen och/eller i validerings- och kalibreringsfasen.

1.2 Mål och syfte

Huvudmålet var att med utgångspunkt från HBV-modellen utveckla en distribuerad hydrologisk modell som bland annat simulerar daglig avrinning och snötäckets dynamik. Ett naturligt delmål som blir en konsekvens av huvudmålet var att utveckla en modell som har en struktur som fullt ut möjliggör integreringen med koordinatsatt data i allmänhet och högupplöst fjärranalytisk data i synnerhet. Den utvecklade modellen applicerades sedan på Tjaktjajaure avrinningsområde, som är ett av Luleälvens delavrinningsområden, för att undersöka dess förmåga att prediktera flöde och utbredning och mäktighet av snötäcket efter att ha kalibrerats enbart mot uppmätt avrinning. Modellen utvecklades i PCRaster, ett rasterbaserat GIS-program med dynamiska modelleringsmöjligheter.

Syfte var att det ur dammsäkerhets- och kraftproduktionssynpunkt är viktigt att titta på alternativ till nuvarande metoder (HBV-96) för att förbättra avrinningssimuleringarna framför allt vid extrema tillrinningar i samband med till exempel snösmältning. Genom att använda sig av en distribuerad modell var förhoppningen att bättre modelleringsresultat och förståelse för de hydrologiska processerna i avrinningsområdet skulle uppnås.

Modelleringen vävdes även samman med resultaten från olika fjärranalytiska angreppssätt. Problemet, att förbättra flödesprognoser genom att kartera och modellera snötäcket, har ingen enkel lösning men om man närmar sig det från olika håll ökar chanserna att nå bättre resultat. Det är också viktigt att poängtera kopplingen mellan denna modellering och det övriga arbete som av Swedpower utförs och är planerat inom ramen för det så kallade ”Snöprojektet”.

2 Material och metoder

2.1 Miljömodellering och PCRaster

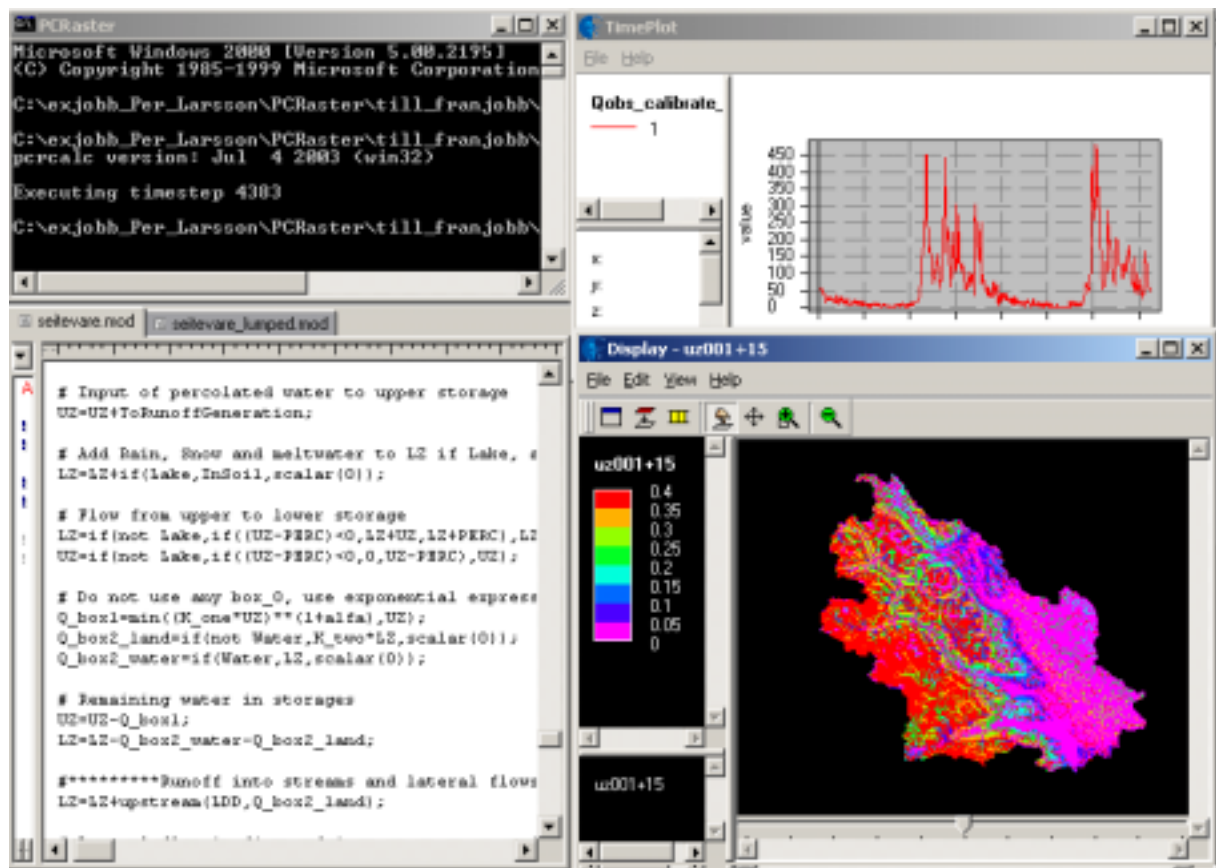
Att bygga datorbaserade miljömodeller är svårt eftersom en sådan modell måste kunna beskriva både rumslig och tidsmässig variation av naturliga fenomen. Dessutom måste den kunna hantera mycket stora mängder data som ofta har varierande ursprung. Data kan komma från fältmätningar, automatiska *data loggers* eller från fjärranalys. Ett annat problem är att frågan som skall besvaras är unik för varje problem. Detta gör att datamodeller som inte kan ändras av modelleraren ofta är otillfredsställande. Modellen måste lätt kunna anpassas till det problem som studeras.

Rasterbaserade geografiska informationssystem (GIS) är, till skillnad från vektorbaserade, på grund av sin enkla struktur och analytiska kraft de som företrädesvis används vid integrering mellan GIS och miljöprocessmodeller (Van Deursen, 1995). PCRaster är ett rasterbaserat GIS som tillhandahåller en lösning på ovan nämnda problem. PCRaster består av en uppsättning datorverktyg för att lagra, processera och analysera geografisk information. Skillnaden mot ett "vanligt" GIS är att detta dessutom kombineras med ett dynamiskt modelleringsspråk (DML, Dynamic Modelling Language). Detta språk är ett kraftfullt instrument för att bygga miljömodeller som kan anpassas till det aktuella problemet. Den "vanliga" GIS-delen av programmet tar hand om lagring, processering och visualisering av rum/tid-data i rasterformat. En stor fördel är att GIS och modell är sammankopplade. Detta medför att man slipper tidsödande utbyte av data mellan GIS och modell vilket ofta är fallet då GIS enbart används för att processera eller analysera data som sedan skall användas som indata till en modell skriven i en annan miljö.

DML är ett språk med syfte att användas vid miljömodellering. Det erbjuder en stor mängd kartoperatorer som kan kombineras på samma sätt som i matematiska beräkningar. Med dessa operatorer kan en dynamisk modell, som innehåller en struktur för iteration över tid, programmeras på samma sätt som man skulle programmera i ett lågnivåspråk som C eller Fortran. Skillnaden mot dessa språk är att DML är speciellt utvecklat för miljömodellering. Exempelvis för att få fram lutningen i ett område krävs ett kommando. Man låter helt enkelt operatören *slope* verka på en höjdkarta. Att göra samma sak i ett lågnivåspråk skulle kräva många rader programkod. Operatorerna har inte heller gjorts för allmänna, men genom att kombinera olika operatorer kan mycket komplexa modeller byggas. De två stora fördelarna med Dynamic Modelling Language är:

1. Inget specialistkunnande i programmering är nödvändigt. Allt som egentligen krävs är kännedom om den matematiska notationen.
2. Språket är inbäddat i PCRaster GIS vilket medför att datautbyte mellan modell och GIS inte är nödvändig. Vidare kan tid/rum data användas och sparas vid vilken tidpunkt som helst under körning av modellen.

Databasen har utvecklats så att den kan innehålla temporala data som till exempel högar (*eng. stacks*) av rasterkartor och tidsserier. Dessa kan direkt, utan datautbyte, efter körning av modellen visualiseras som tidsserieplottar eller animerade kartor. Detta möjliggör enkel identifiering, kalibrering och validering av modellen. Datautbyte med andra GIS stöds med enkla konverteringsfunktioner. I figur 1 illustreras PCRasters modelleringsmiljö. PCRaster har dessutom en geostatistisk modul Gstat som erbjuder avancerade metoder (2D or 3D (block-, co-) kriging, universal kriging) för interpolering av punktdata till rasterkartor. Gstat kan även användas för att beräkna felpropagering i GIS-operationer och miljömodeller.



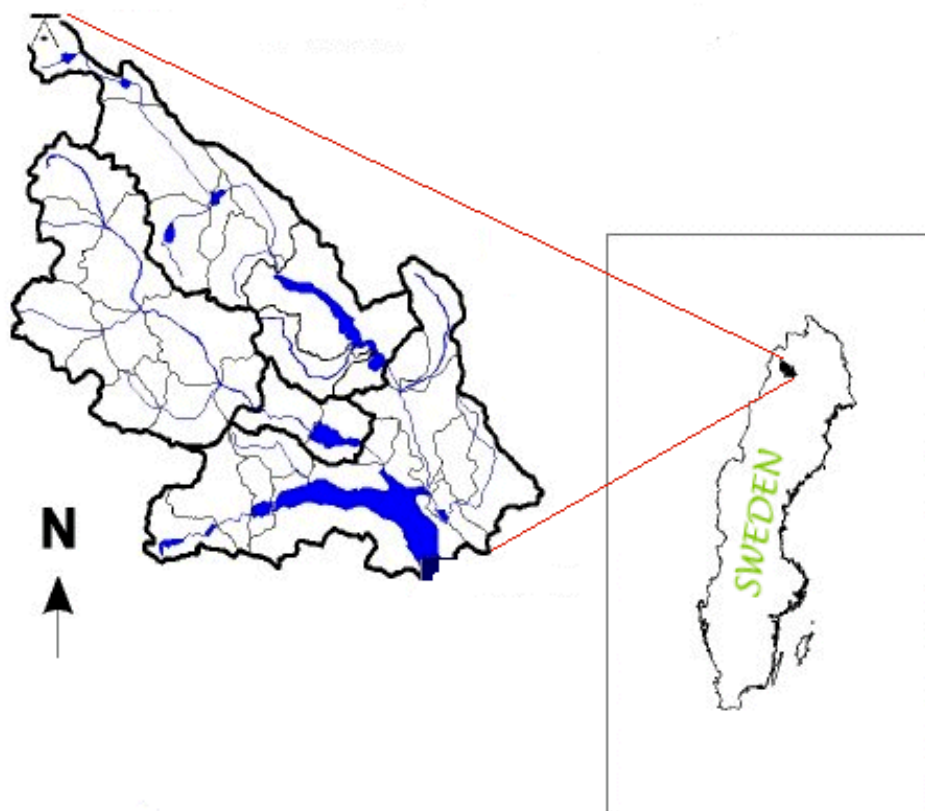
Figur 1. Modelleringsmiljö i PCRaster
 Kommandofönster (övre vänstra hörnet), modellkod (nedre vänstra hörnet), tidsserieplot (övre högra hörnet) och visualiseringsfönster (nedre högra hörnet).

PCRaster är resultatet av ett årtiondes forskning vid geovetenskapliga fakulteten vid universitet i Utrecht (Faculty of Geographical Sciences of Utrecht University) som är ett av världens ledande institut inom GIS och miljömodellering. Forskningsgruppen utgörs av forskare med skiftande bakgrund: geografer, hydrologer, matematiker och mjukvaruingenjörer. Deras forskningsområden täcker det breda spannet från teoretisk forskning till praktiskt fältforskning inom områden som geostatistik, GIS, markutvärdering, geomorfologi, hydrologi och markvetenskap (PCRaster Version 2 Manual, 2003; PCRaster website, 2003).

2.2 Områdesbeskrivning

Tjaktjajaure avrinningsområde är beläget mellan 67° och 67°30' nord och är en del av Luleälvens avrinningsområde, se figur 2. Området karakteriseras av kompakta massiv som omger en bred öppen dal med branta och smala sidodalar. Höjden över havet i området varierar mellan 450 och 2044 m och dess medelhöjd är 933 m. Huvuddelen av områdets 2250 km² ligger över trädgränsen varför andelen skog endast är 18 %. 6 % av områdets area utgörs av sjöar. I områdets övre delar ligger det små glaciärer vilka täcker 6 % av områdets totala area. Vegetationen underliggs av kvartära moränavlagringar. Över 1000-1200 m saknar marken nästan helt jordtäckte och utgörs till största del av stenar och berg i dagen. Inom

området finns en stark öst-västlig gradient i nederbörd: medelårsnederbörden varierar från nästan 2000 mm i väst till 700 mm i öst. Den årliga evapotranspirationen uppskattas till 200 mm och medeltemperaturen ligger omkring -3°C . Våldigt få människor bor i området (HydAlp, 1999). Tjaktjajaure var ett av de fyra testområden som ingick i HydAlp projektet. HydAlp (Hydrology of Alpine and High Altitude Basins) var ett "Shared Cost Action Project of the European Union DGXII Specific Programme for Climate and Environment (ENV-CT96-0364)" vars huvudmål var att ta fram ett underlag för användandet av EO-data (Earth Observation data) vid modellering och avrinningsprognostisering i alpina och nordligt belägna områden.



Figur 2. Tjaktjajaures avrinningsområde.
HydAlp (1999)

Tjaktjajaures utloppssjö, det vill säga dammagasinet, regleras kraftigt av Seitevare kraftstation som byggdes av Statens Vattenfallsverk och togs i drift 1967. Seitevare kraftstation är belägen i Blackälven, ett biflöde till Lilla Lule älv, mellan sjöarna Tjaktjajaure och Jäkkaure. Hela fallsträckan mellan dessa sjöar utnyttjas i anläggningen. Dämningsgränsen i Tjaktjajaure är +477 m och medelvattenytan i den nedströms belägna sjön är +295 m. Karakteristiska vattenföringar i oreglerat tillstånd sammanfattas i tabell 1

Tabell 1. Karakteristiska vattenföringar för Seitevare kraftstation

Vattenföringar gäller i oreglerat tillstånd för tidsperioden 1910-1919 och 1923-1966.
Tabell efter SMHI (1994).

| | Vattenföring (m^3/s) | Specifik vattenföring ($\text{dm}^3/(\text{s km}^2)$) |
|--------------------------|--|---|
| Högsta högvattenföring | 727 | 317 |
| Normal högvattenföring | 467 | 204 |
| Normal medelvattenföring | 59 | 26 |
| Lägsta lågvattenföring | 2 | 0.87 |

Regleringen av sjön Tjaktjajaure har medfört att regleringsvolymen beräknas uppgå till 1650 miljoner m³. Medelvattenföringen under vintern uppgår till 80 m³/s. Magasinsvariationen för reglering av sjön Tjaktjajaures uppgår till 34,5 m (BKP, 1973). Med en medelvattenföring på 58 m³/s blir den totala årliga medelavrinningen nästan 1830 miljoner m³ vilket innebär att regleringsvolymen uppgår till drygt 90 % av den totala årsavrinningen.

2.3 Landklassifikation

Höjddata från Lantmäterieverket användes i arbetet. Höjdmodellen som användes i arbetet hade en upplösning på 250 m (ursprungsdata hade 50 m upplösning). Denna höjdmodell användes först för att generera avrinningsområdets gränser. En Landsat-scen över området användes för att klassificera sjö, skog och glaciär. Klassificeringarna utfördes i fjärranalys- och GIS-programet ERDAS Imagine av Thomas Hedvall på Swedpower. Områdeskaraktäristiska data härledda utifrån ovan nämnda höjdmodell och Landsat-scen redovisas i tabell 2.

Tabell 2. Områdeskaraktäristiska data för Tjaktjajaure avrinningsområde

| | |
|---------------------------|------|
| Area (km ²) | 2300 |
| Maximal elevation (m.ö.h) | 1996 |
| Minimal elevation (m.ö.h) | 428 |
| Medelelevation (m.ö.h) | 928 |
| Skog (%) | 16 |
| Sjö (%) | 4 |
| Glaciär (%) | 7 |

Inte bara sjöar utan även vattendrag måste klassificeras. För att klassificera nätverket av vattendrag användes det klassifikationsschema som ursprungligen utvecklades av Horton men som senare modifierades av Strahler (Strahler, 1964). Strahler's system för klassificering av vattendrag kan sammanfattas enligt följande:

1. De minsta identifierbara bäckarna ges ordning 1.
2. Om två bäckar av ordning i möts resulterar detta nedströms i en bäck av ordning $i+1$.
3. Om en bäck av lägre ordning möter en med högre behålls den högre ordningen nedströms.
4. Områdets ordning ges av ordningen på den bäck som dränerar utloppet.

Algoritmen (*streamorder*) finns redan i PCRaster. Allt som behövs för att generera ett vattendragsnätverk enligt Strahler är en, utifrån höjdmodellen genererad, karta med samtliga cellers dräneringsriktning (*LDD, Local Drain Direction*). Algoritmen följer ovanstående schema och ger celler som inte dränerar några andra celler ordning 1 (de olika vattendragens ordning kommer naturligtvis att påverkas av pixelstorleken). Eftersom de allra minsta vattendragen inte eftersöktes (se vidare avsnitt 2.8.5.4) valdes celler med en ordning större än tre för att representera vattendrag.

Sluttningsriktning är bland annat intressant ur snösmältningssynpunkt (se vidare avsnitt 3.1) därför delades området in i fem (N,Ö,S,V och Ingen) klasser för att se hur fördelningen var dem emellan, se tabell 3. Klassen "Ingen" är plana pixlar. I höjdmodellen kommer sjöarna vara plana. Anledningen att "Ingen" är mindre än andelen klassificerad som sjö (tabell 2) är att algoritmen (*slope*) som används för att beräkna lutning använder sig av höjdinformationen

från de åtta grannpixlarna. Detta medför att pixlar som ligger på gränsen mellan sjö och land och som egentligen är plana kan få en lutning större än noll.

Tabell 3. Sluttningsriktningar i Tjaktjajaure
Andelen av Tjaktjajaures avrinningsområde som utgörs av nordlig, östlig, sydlig, västlig respektive ingen sluttningsriktning

| Sluttningsriktning | Intervall | Andel |
|--------------------|----------------------------|--------|
| Ingen | | 3.2 % |
| Nordlig | $0/365^\circ \pm 45^\circ$ | 22.5 % |
| Östlig | $90^\circ \pm 45^\circ$ | 23.4 % |
| Sydlig | $180^\circ \pm 45^\circ$ | 30.0 % |
| Västlig | $270^\circ \pm 45^\circ$ | 20.9 % |

2.4 NRI – Normalized Radiation Index

För att ta hänsyn till att vissa områden utsätts för mer inkommande strålning än andra något som påverkar både snösmältning och avdunstning skapades ett normaliserat strålningsindex, NRI, enligt ekvation 1.

$$NRI = \frac{R_{true\ DEM}}{R_{plane\ DEM}}$$

$$NRI = 1 \quad : R_{plane\ DEM}, R_{true\ DEM} = 0$$

där:

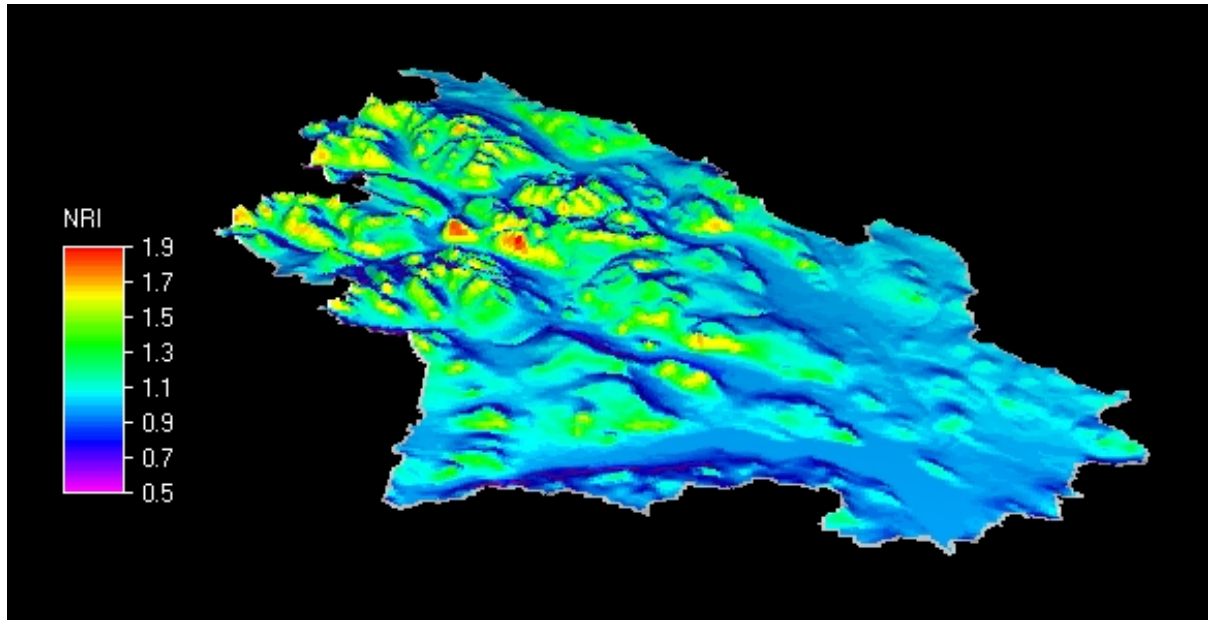
NRI = Normalized Radiation Index
 $R_{true\ DEM}$ = Inkommande strålning för pixel
 $R_{plane\ DEM}$ = Inkommande strålning för plan oskuggad pixel

Ekvation 1. Normalized Radiation Index

Helt molnfria förhållanden antogs på grund av att atmosfäriska reduktionsfaktorer, som är kopplade till väderförhållanden och speciellt till molntäcke, varierar högst avsevärt. Detta är näst intill omöjligt att ta hänsyn till i sin modell om inte strålningsmätningar och antal soltimmar mäts kontinuerligt vilket förstås är mycket ovanligt. Det är därför olämpligt att bygga en modell som kräver sådana indata om syftet med modellen är att den skall användas operationellt.

För att beräkna inkommande strålning användes POTRAD, en i PCRaster för ändamålet utvecklad modell, (van Dam, 2000). Indata till modellen är en höjdm modell och områdets latitud. Latituden behövs för att bestämma solgeometrin och höjdm modellen för att hänsyn skall kunna tas till skuggningseffekter. Ur modellen erhålls för varje pixel inkommande strålningsflöde per dag (i W/m^2). Modellen kördes två gånger. Först beräknades den inkommande strålningen för varje pixel då hänsyn tagit till skuggningseffekter, $R_{true\ DEM}$. Därefter beräknades inkommande strålning för en plan oskuggad pixel helt $R_{plane\ DEM}$. Genom att normalisera värdena från den första körningen med värdena från den andra körningen erhöles ett index som kan ses som ett mått på hur bestrålad en pixel är relativt en plan oskuggad pixel. I de fall då inkommande strålning var lika med noll sattes $NRI=1$ för att undvika division med 0.

Eftersom variationerna från dag till dag inte var stora bildades, av lagrings- och modelleringstekniska skäl, veckomedelvärden vilket reducerade antalet kartor från 365 till 52. Värdena på NRI varierar i rum och tid mellan cirka 0.3 och 2. Där ett högt/lågt värde betyder att pixeln relativt sett är mer/mindre bestrålad än en plan pixel varför avdunstning och snösmältning kan förväntas vara högre/lägre här. Ett exempel på NRI karta kan ses i figur 3, se vidare avsnitt 3.1.



Figur 3. Normalized Radiation Index
NRI över Tjaktjajaures avrinningsområde under vecka 11.

2.5 Meteorologiska data

2.5.1 Nederbörd och temperatur

Variationerna i topografin påverkar naturligtvis temperaturens och nederbördens fördelning varför data enbart från en station inte kan anses vara representativa för hela området. Tretton meteorologiska stationer ligger i eller i närheten av området. Sex av stationerna tillhör SMHI medan resterande är automatstationer som ägs och sköts av Vattenfall. Genom att interpolera och höjdkorrigera (se nedan) data från samtliga stationer tar man hänsyn till lokala såväl som mer storskaliga variationer i området och förhoppningen är att mer representativa värden skall erhållas. Alla utom en av Vattenfalls stationer (Tareluobbal) är automatstationer. Installationen av dessa stationer i Luleälven avrinningsområde påbörjades under hösten 1990 och den sista stationen togs i drift i augusti 1997. Periodvis har en del av stationerna varit ur drift varför dataserierna inte är fullständiga. Från automatstationerna erhålls värden med en timmes upplösning. Dessa har kvalitetskontrollerats och gjorts om till dygnsmedelvärden av Marina Uljanova (Uljanova, 2002). Meteorologiska data från SMHI's stationer har tagits från den HBV-modell som finns hos Vattenfall Produktion. Se Appendix 1 för information om de stationer som använts i detta arbete samt en sammanställning över tillgängliga data från respektive station mellan åren 1990 och 2003.

2.5.1.1 Interpolering

Vid valet av interpoleringsmetod var antalet mätpunkter (stationer) avgörande. Inom geostatistiken har man utarbetat metoder, till exempel så kallad kriging, för att statistiskt kunna modellera hur kontinuerliga variabler varierar i rummet (Eklundh, 2000). Metoden kan vara väldigt tidskrävande men om tillräckligt många mätpunkter (minst 30) och tid finns att tillgå är denna metod att föredra (Derek Karssenberg, personlig kommunikation). Beroende på syfte med interpolationen finns det olika alternativ till kriging, till exempel Thiessen-polygoner och avståndsviktad medelvärdesinterpolering,

Thiessen-polygoner är en interpolationsmetod där ett område delas in i oregelbundna ytor, eller polygoner, kring mätpunkterna. Varje polygon definierar den yta som ligger närmast den punkt kring vilken polygonen är bildad (Eklundh, 2000). Thiessen-polygoner används ofta i GIS och geografisk analys som en snabb metod för att relatera punktdata till rummet men metoden är inte lämplig vid interpolering av meteorologiska data.

Eftersom antalet mätpunkter inte var tillräckligt för kriging och Thiessen-polygoner inte är lämpliga för meteorologiska data användes avståndsviktad medelvärdesinterpolation (*eng.* inverse distance interpolation). Avståndsviktad medelvärdesinterpolation är kanske den mest använda lokala interpolationsmetoden och bygger som namnet avslöjar på viktade medelvärden. Cell för cell i ett rutnät interpoleras genom att medelvärdet för ett antal närliggande stationer beräknas. Dessa medelvärden viktas med avseende på avståndet till cellen. Mätpunkter som ligger nära cellen skall ha större inflytande än de som ligger längre bort varför det inverterade avståndet till mätpunkterna används som vikt. Ovanstående kan sammanfattas med följande ekvation:

$$z(x_p) = \frac{\sum_{i=1}^n z(x_i) \frac{1}{d^k}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{d^k}}$$

där:

| | |
|------------|--|
| $z(x_p)$ = | interpolerat värde i cell p |
| n = | antalet mätpunkter |
| $z(x_i)$ = | värdet för mätpunkt i |
| d = | avståndet mellan mätpunkt i och cell p |
| k = | distansviktning |

Ekvation 2. Avståndsviktad medelvärdesinterpolering

Om man sätter k till ett blir varje cell viktad i direkt proportion till sitt avstånd från aktuell mätpunkt. Om man ökar k till två blir mätpunkter som ligger nära cellen mer viktade än de som ligger längre bort, i proportion till kvadraten på det inverterade avståndet. På detta sätt kan man avgöra hur mycket man vill att närliggande mätpunkter skall påverka. Ett lågt värde ger dålig avspeglning av lokala variationer medan ett för högt värde ger individuella punkter överdrivet stort inflytande. Vanligtvis sätts värdet på k till mellan 1 och 3 (Eklundh, 2000).

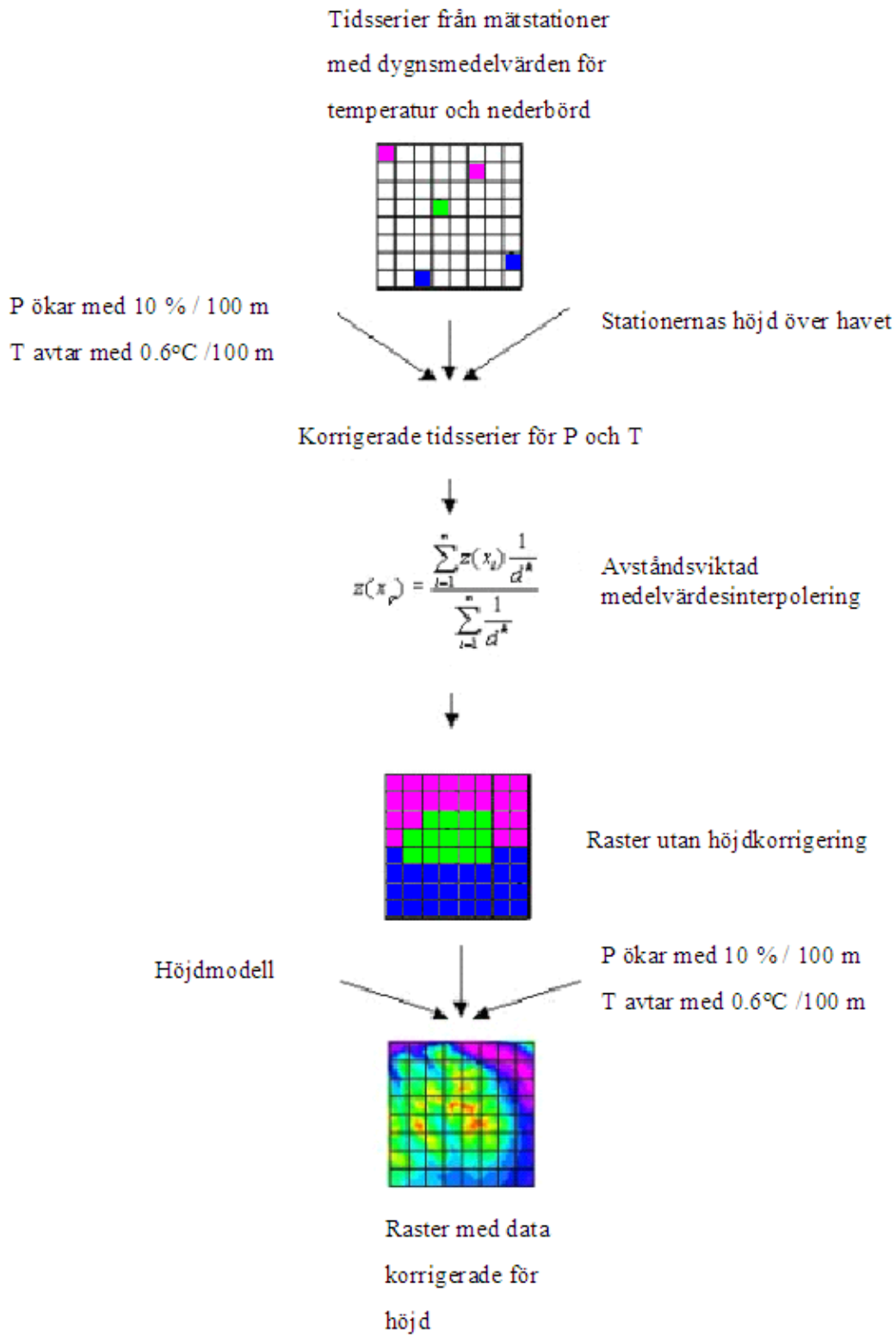
Mer utförliga beskrivningar av andra och ovan nämnda interpoleringsmetoder använda i GIS-sammanhang går att finna i kapitel 7 (Eklundh, 2000) och kapitel 5 (Burrough and McDonnell, 1998).

2.5.1.2 Korrigerig av nederbörd och temperatur

Variationerna i topografin påverkar, som redan nämnts, temperaturen och nederbördens fördelning. I ett försök att kompensera för variationerna som orsakas av olika höjd över havet användes antagandena att nederbörden ökar med 10 %/100 m och att temperaturen, i enlighet med det fuktadiabatiska temperaturavtagandet, avtar med 0.6°C/100 m (SNA, 1995). I Flödeskommitténs slutrapport (af Klintberg *et al*, 1990) rekommenderas korrektion av nederbörden med 10%/100 m utifrån en referensnivå på 500 m för Torneälv till och med Indalsälven. Även om det är uppenbart att det inte alltid är korrekt att använda sig av en temperaturminskning med 0.6°C/100 m så är detta enligt Johansson (2000) ett vanligt värde i svenska applikationer. I genomsnitt har man funnit att det stämmer men sett över kortare perioder kan dock topografins inflytande varieras kraftigt. Det beror bland annat på luftmassans stabilitet och strålningens inverkan på markens uppvärmning (dagtid) respektive avkylning (nattetid). Stora avvikelser från det fuktadiabatiska temperaturavtagandet sker främst under klara, kalla vinterdygn då marken och luftskiktet närmaste marken, på grund av utstrålning, kyls av. Denna luft blir tyngre än omgivningens och i fjällterräng strömmar kall luft längs sluttningarna ner i dalgångarna och inversion uppstår. Under senvår och sommar kan instrålningen vara stor och man får en motsatt effekt jämfört med vinterns temperaturinversioner, det vill säga en kraftig uppvärmning av luften närmast marken vilket kan leda till att temperaturavtagandet blir snabbare än det fuktadiabatiska (Chen & Johansson, 2003).

Knappt 7 % av avrinningsområdet ligger mellan 428 och 500 m, det vill säga under den ovan nämnda rekommenderade referensnivån. Som man kan se i appendix 1 ligger dessutom tre av de meteorologiska stationerna under denna nivå. Eftersom det bara rör sig om tre stationer och en relativt liten del av området antogs, för enkelhetens skull, samma höjdberoenden gälla för hela området och alla stationer. Utifrån de givna höjdberoendena korrigerades först alla stationsvärden till 420 m, en nivå som ligger något under avrinningsområdets lägsta nivå. När detta var gjort interpolerades värdena med avståndsviktade medelvärdesinterpolering för att skapa ett raster (rutnät) för temperatur respektive nederbörd. Vid interpoleringen användes ett k -värde (se ekvation 2) på 2. Med hjälp av höjdmodellen korrigerades slutligen, med samma antaganden, varje enskild cells värde tillbaka till dess verkliga höjd. Tanken är att interpoleringen tar hand om de storskaliga variationerna inom området medan den avslutande höjdkorrigeringen tar hand om de lokala variationerna. Arbetsgången sammanfattas i figur 4.

Från punktdata till rasterdata



Figur 4. Höjdkorrigering och interpolering av temperatur och nederbördsdata.

2.5.2 Evapotranspirationsdata

Månadsmedelvärden för evapotranspiration togs från Eriksson (1981) som i sin rapport "Den potentiella evapotranspirationen i Sverige" bland annat, med hjälp av Penman's formel, räknat ut månadsmedelvärden för ett mycket stort antal platser i Sverige. Inga av dessa platser låg dessvärre inom arbetsområdets gränser. På grund av detta bildades ett medelvärde mellan observationer gjorda något norr (Aloukta) respektive något söder (Kvikkjokk) om området (se tabell 4). Dessa värden korrigeras sedan genom att multipliceras med NRI (se avsnitt 2.4) för att ta hänsyn till skillnader i avdunstning som härrör från hur utsatt ett område är för inkommande strålning.

Tabell 4. Månadsmedelvärden för evapotranspiration

Värdena är angivna i mm och gäller för en vegetationsyta med albedo 12 % (50 % vid snötäckt yta) och är baserade på tidsperioden 1961-1978.

| Station\Månad | Jan | Feb | Mar | Apr | Maj | Jun | Jul | Aug | Sep | Okt | Nov | Dec |
|---------------|-----|-----|-----|------|------|-------|-------|-----|-----|-----|-----|-----|
| Aluokta | 1 | 1 | 5 | 15 | 60 | 116 | 109 | 72 | 27 | 7 | 1 | 1 |
| Kvikkjokk | 1 | 1 | 5 | 14 | 53 | 109 | 100 | 64 | 27 | 5 | 0 | 0 |
| Medel | 1 | 1 | 5 | 14,5 | 56,5 | 112,5 | 104,5 | 68 | 27 | 6 | 0,5 | 0,5 |

Den direkta avdunstningen från en snöyta i Sverige kan inte bli särskilt stor varför den i hydrologiska beräkningar vanligen ignoreras eller behandlas med en enkel korrektion av snönederbörden (Bergström, 1993). Avdunstningen från snö som hamnar i trädkronorna kan däremot vara betydande. I en tät barrskog kan så mycket som en tredjedel av den snö som faller aldrig nå marken. Man skulle kunna ta hänsyn till detta genom att i områden klassificerade som skog anta att avdunstningen, beroende på skogens täthet, är 15-30 % högre än för öppen terräng. Andra faktorer som kan tänkas påverka avdunstningen från snö är dess täthet (beroende på förhärskande vindriktning, omdistribuering av snö, lutning och sluttningsriktning) och uppvirvling av snö, vilka båda är svåra att uppskatta eller mäta (Angela Lundberg, personlig kommunikation).

2.6 Hydrologiska data

Tillrinningsdata för Seitevare kraftstation, som ligger vid utloppet till sjön Tjaktjajaure, togs av Mikael Sundby fram ur den modell (HBV-96) som används av Vattenfall Produktion. Dessa tillrinningsdata är, eftersom sjön är reglerad, beräknad som summan av det reglerade flödet samt tillrinningen till sjön vilken beräknats utifrån vattenståndsmätningar. Eftersom magasinet är så stort kan det under vissa förhållanden (stark vind till exempel) vara svårt att korrekt avläsa vattenståndet i sjön. Detta medför att det under vissa perioder (lågt flöde) uppstår negativa värden på tillrinningen. Detta skulle kunna hända om avdunstningen från sjön är större än tillrinningen men detta är föga troligt i den här miljön. Därför kan man sluta sig till att det rör sig om någon form av avläsningsfel. För att undvika negativa värden tillämpades saldering, det vill säga omfördelning av flöde.

Enligt BKP (1973) är den lägsta lågvattenföringen $2 \text{ m}^3/\text{s}$ varför samtliga värden lägre än detta gavs värdet 2. Det som lades på för att nå värdet 2 drogs sedan bort från efterföljande dagars flöde för att undvika att "nytt" vatten introducerades. På så sätt blev mängden vatten efter salderingen densamma som före.

2.7 Modellering av snö

Modellering av snösmältning har traditionellt sett huvudsakligen dominerats av två olika angreppssätt. Det första baseras på lösningen av snöns energibalans ekvation och det andra på att man antar att det finns ett empiriskt samband mellan snösmältning och lufttemperatur. Dessa så kallade temperaturindexmetoder, där smältningen bestäms med hjälp av grad-dag faktorer som omvandlar antalet grader över en tröskeltemperatur till antal mm smältvatten, har enligt Hock (2003a) av ett antal anledningar varit de mest använda i snösmältningssmodellering. Bland dessa kan nämnas: (1) tillgången på temperaturdata är ofta god, (2) interpolering och prognostisering är relativt enkel för temperatur och (3) att de trots sin enkelhet ofta fungerar bra. På grund av detta bygger de flesta avrinningsmodeller, som används operationellt, på denna metod.

Det mer fysikaliska angreppssättet när det rör snösmältningssmodellering är att studera snötäckets energibalans ekvation som kan uttryckas som:

$$Q_N + Q_H + Q_L + Q_G + Q_R + Q_M = 0$$

där:

| | |
|---------|---------------------------------|
| $Q_N =$ | nettostrålningen |
| $Q_H =$ | sensibelt värmefflöde |
| $Q_L =$ | latent värmefflöde |
| $Q_G =$ | värmefflöde från marken |
| $Q_R =$ | sensibelt värmefflöde från regn |
| $Q_M =$ | energi som åtgår vid smältning |

Ekvation 3. Snötäckets energibalans ekvation

Vid en nollgradig yta antas all överskottsenergi vid gränsytan mellan snö och luft åtgå direkt till smältning. Ur överskottsenergin kan man sedan med hjälp av vattens densitet och dess latent smältvärme räkna ut smältningen (Hock, 2003b). Det faktum att ovan nämnda variabler varierar mycket både i tid och rum gör det svårt att implementera en snösmältningssmodell som bygger på energibalans ekvationen. Även om moderna automatiska meteorologiska stationer kan mäta energibalansen i en punkt är det ovanligt att sådana stationer finns i området som skall studeras och även om de gör det kvarstår problemet att extrapolera mätningarna till att täcka hela området (Rott *et al*, 2000).

Anledningen till att användandet av temperaturindexmetoder trots allt fungerar bra i många sammanhang är den starka korrelationen mellan temperatur och många av energibalans ekvationens komponenter. Långvågig atmosfärisk strålning och sensibelt värmefflöde, som båda är starkt kopplade till temperaturen, utgör tre fjärdedelar av den energi som åtgår till smältning (Hock, 2003a). Dessutom är temperatur den meteorologiska variabel som säkrast kan extrapoleras till hela området (Rott *et al*, 2000).

Snösmältning är, speciellt i områden med kraftigt skiftande terräng, ett fenomen med stora rumsliga variationer. I de flesta modeller är detta något som man tidigare helt bortsett från. Som ett exempel kan nämnas HBV-modellen där man i och för sig använder sig av olika grad-dag faktorer för skog respektive ickeskog men där ingen hänsyn tas, på grund av att modellen inte är distribuerad, till lokala variationer som orsakas till exempel av skuggning. På senare år, i takt med ökad datorkraft och de möjligheter som GIS ger att hantera distribuerad information, har försök gjorts att använda sig av ett mer distribuerat angreppssätt vid

modellering av snösmältning. I dessa arbeten, till exempel Hock (2003a) och Cazorzi och Dalla Fontana (1996) har hybrider av de ovan beskrivna modelleringstrategierna uppstått och lovande resultat har erhållits. I princip har de traditionella grad-dag metoderna utvidgats genom att inkludera en strålningsterm. Eftersom problemet fortfarande kvarstår att den enda information som oftast är tillgänglig är temperatur måste man använda sig av strålningsinformation som inte kräver några ytterligare mätningar. Potentiell inkommande strålning kan, om man känner områdets latitud, beräknas utifrån kända uppgifter om atmosfäriska förhållanden och med hjälp av algoritmer för solens bana. Genom att använda sig av en höjdmodell över området kan sedan hänsyn tas till lutningar, sluttningsriktningar och skuggningseffekter. Informationen om potentiell inkommande strålning och om de topografiska förhållandena kan sedan användas för att distribuera sin grad-dag faktor så att den varierar både i tid och rum.

Elevation och sluttningsriktning påverkar snösmältningen på olika sätt. Det första påverkar temperaturen och det andra mängden tillgänglig energi. Cazorzi och Dalla Fontana (1996) visade att sluttningsriktning spelade en avgörande roll för snösmältning: smältningen börjar förstås på sydsluttningar, där barmark uppträder tidigare än på övriga sluttningar. Vidare visade försök att grad-dag metoden som i olika varianter är den mest operativt använda metoden i snösmältningmodellering, inte hade förmågan att modellera snötäckets rumsliga dynamik. De hävdar att den bara är lämpad för aggregerade eller semi-aggregerade modeller (till exempel HBV-modellen) när simuleringar görs inom en hydrologisk modell och där kalibreringen endast görs mot flödet vid områdets utlopp. Cazorzi och Dalla Fontana (1996) utvecklade ett kombinerat energi/temperatur-index i ett försök att ta hänsyn till att snösmältning inte enbart beror av temperatur utan även på tillgänglig energi som påverkas kraftigt av lutning, sluttningsriktning och skuggningseffekter. En modell utvecklades som utifrån en höjdmodell och algoritmer för solens bana, med 30 minuters intervall, räknade ut den potentiella strålningen för varje element i höjdmodellen då hänsyn tagits till topografiska effekter. Resultaten från denna modell kunde sedan användas för att skapa rasterkartor med ackumulerad potentiell energi. Fem sådana kartor med start från vintersolståndet (21 december) fram till mitten av varje månad från februari till juni räknades sedan fram. Varje karta delades sedan med antalet dagar i perioden för att få fram dygnsmedelvärdet för potentiell energi. Dessa kartor användes sedan som energiindex (EI) för att representera de lokala variationerna i energi som är tillgängliga för snösmältning. Genom att kombinera detta index med det klassiska temperaturindexet (grad-dag metoden, se ekvation 4) erhöles så ett kombinerat energi/temperatur-index. Algoritmen för smältning (se ekvation 5) blir mycket enkel och har endast en kalibreringsvariabel.

$$M = P_{CFMAX} * (T - P_{TT})$$

$$R = P_{CFR} * P_{CFMAX} * (P_{TT} - T)$$

där:

| | |
|---------------|--|
| $M =$ | snösmältning (mm dag ⁻¹) |
| $P_{CFMAX} =$ | Grad-dag faktor (mm °C ⁻¹ dag ⁻¹) |
| $T =$ | temperatur (°C) |
| $P_{TT} =$ | tröskeltemperatur (°C) |
| $R =$ | återfrysning (mm/dag) |

Ekvation 4. Grad-dag metoden

$$M = P_{CMF} * EI * T$$

där:

| | |
|-------------|--|
| $M =$ | snösmältning (mm h ⁻¹) |
| $P_{CMF} =$ | Kombinerad smältfaktor (mm °C ⁻¹ EI ⁻¹ h ⁻¹) |
| $EI =$ | Energiindex (MJ m ⁻² dag ⁻¹) |
| $T =$ | Temperatur (°C) |

Ekvation 5. Smältmetod enligt Cazorzi och Dalla Fontana (1996)

Nattetid (18.00-06.00) modifieras algoritmen något genom att EI-kartans minsta värde används för samtliga celler.

Hock (1999) föreslog, med anledning av att klassiska grad-dag metodens upplösning i tid är begränsad och att de inte modellerar den rumsliga variabiliteten hos snösmältning på ett korrekt sätt, en ny distribuerad temperaturindex-metod. Modellens syfte var att ta hänsyn till dygnsvariationerna i smältning och de rumsliga variationerna i smältning orsakade av effekterna från omkringliggande topografi genom att inkludera potentiell direkt solstrålning under molnfria förhållanden. Hocks smältalgoritm sammanfattas i ekvation 6.

$$M = \begin{cases} \left(\frac{1}{n} * P_{MF} + a_{snow/ice} * I \right) * T & : T > 0 \\ 0 & : T \leq 0 \end{cases}$$

där:

| | |
|------------------|--|
| $M =$ | snösmältning (mm h ⁻¹) |
| $P_{MF} =$ | smältfaktor (mm °C ⁻¹ d ⁻¹) |
| $a_{snow/ice} =$ | strålningskoefficient |
| $I =$ | potentiell solstrålning under molnfria förhållanden (W m ⁻²) |
| $T =$ | Temperatur (°C) |

Ekvation 6. Smältmetod enligt Hock (1999)

Den potentiella solinstrålningen under molnfria förhållanden beräknas som en funktion av kända atmosfäriska förhållanden för strålning och transmissivitet, topografiska förhållanden och solens geometri. I likhet med Cazorzi's och Dalla Fontana's metod behövs ingen ytterligare meteorologisk indata än temperaturen. I Hock's metod modelleras dygnsvariationerna på ett sätt som inte är möjligt i Cazorzi's och Dalla Fontana's eftersom de använder sig av månadskartor för potentiell strålning

Eftersom detta arbete syftar till att utveckla en distribuerad avrinningsmodell användes ett jämfört med de ovan diskuterade liknande angreppssätt för att ta hänsyn till snösmältningens rumsliga variationer. Principen att utöka den vanliga grad-dag metoden med en strålningsterm är den samma. För att göra detta användes NRI för att skapa en modifierad grad-dag metod enligt ekvation 7.

$$M = NRI * P_{CFMAX} * (T - P_{TT})$$

$$R = P_{CFR} * NRI * P_{CFMAX} * (P_{TT} - T)$$

där:

| | |
|---------------|-----------------------------|
| $M =$ | snösmältning (mm/dag) |
| $NRI =$ | Normalized Radiation Index |
| $P_{CFMAX} =$ | Grad-dag faktor (mm/°C dag) |
| $T =$ | temperatur (°C) |
| $P_{TT} =$ | tröskeltemperatur (°C) |
| $R =$ | återfrysning (mm/dag) |
| $P_{CFR} =$ | Återfrysningkoefficient |

Ekvation 7. Modifierad grad-dag metod

2.8 Modellbeskrivning

2.8.1 Inledning

De rutiner som används i modellen är med vissa undantag desamma som i HBV-modellen. Modellen har inga restriktioner på upplösning vare sig i tid eller rum utan är helt beroende på upplösningen hos tillgänglig indata. Modellen drivs av temperatur-, nederbörds-, evapotranspirations- och potentiell solinstrålningsdata (NRI). I detta arbete användes 250 m rumslig upplösning, dygnsvärden för temperatur och nederbörd, månadsmedelvärden för evapotranspiration och veckomedelvärden för NRI. Eftersom modellen är distribuerad krävs det att de meteorologiska data som används interpoleras från punkt till raster (se avsnitt 2.5.1).

2.8.2 Snörutin

Snörutinen styr ackumulering och smältning av snö i varje enskild pixel. Om temperaturen är under en tröskeltemperatur, P_{TT} , faller och ackumuleras nederbörden som snö. Smältning och återfrysning modelleras med en modifierad grad-dag metod (se ekvation 7). Snöns vattenhållande kapacitet styrs av variabeln P_{WHC} . Denna kan ändras men sätts ofta till 10 %. Snöns maximala vatteninnehåll måste överskridas för att någon avrinning skall genereras. Om temperaturen går under P_{TT} återfrysas vattnet i snön. Denna återfrysning styrs av variabeln P_{CFR} som kan ändras men som ofta sätts till 5 %. För att korrigera för snöevaporation och systematiska fel vid nederbördsmätningarna korrigeras nederbörd som faller som snö med en parameter P_{SFCF} . Pixlar klassificerade som sjö behandlas i snörutinen inte på annat sätt än övriga pixlar (se vidare avsnitt 2.8.5.2).

Rutinen innehåller tre parametrar som måste bestämmas genom kalibrering: P_{TT} , P_{SFCF} och P_{CFMAX} . Den stora skillnaden jämfört med HBV-modellen är att grad-dag faktorn P_{CFMAX} modifieras med NRI vilket leder till att varje cell får ett unikt värde på P_{CFMAX} och därmed är helt distribuerad i såväl rum som tid.

2.8.3 Markrutin

Förutom det vatten som lagras i snön går allt regn samt det vatten som bildas vid smältning vidare från snörutinen till markrutinen. Detta vatten fördelas sedan mellan den så kallade markboxen och den övre grundvattenboxen. För pixlar klassificerade som sjö går allt vatten direkt till nedre grundvattenboxen och nedanstående beräkningar utförs ej. Fördelningen beror

på förhållandet mellan den aktuella vattenhalten i markboxen, θ_{SM} , och dess maximala värde (fältkapaciteten), θ_{FC} . Avdunstningen från markboxen styrs också den av förhållandet mellan θ_{SM} och θ_{FC} . Om θ_{SM}/θ_{FC} är större än ett värde P_{LP} antas den verkliga avdunstningen vara lika med den potentiella. Om θ_{SM}/θ_{FC} är mindre än P_{LP} minskar avdunstningen linjärt. Markrutinen kan sammanfattas med följande ekvationer (Seibert, 1997):

$$\frac{W_{recharge}}{W_{insoil}} = \left(\frac{\theta_{SM}(t-1)}{\theta_{FC}} \right)^{P_{BETA}}$$

$$\theta_{SM}(t) = \theta_{SM}(t-1) + W_{insoil} - W_{recharge}$$

$$E_{act} = E_{pot} * \min\left(\frac{\theta_{SM}(t)}{\theta_{FC} * P_{LP}}, 1 \right)$$

$$\theta_{SM}(t+1) = \theta_{SM}(t) - E_{act}$$

där:

| | |
|------------------|--|
| $W_{recharge}$ = | vatten till övre grundvattenboxen (mm/dag) |
| θ_{SM} = | vattenhalt i markboxen (mm) |
| P_{BETA} = | empirisk konstant som bestämmer relativa avrinningsbidraget från en mm regn eller smältvatten vid en given markfuktighet |
| W_{insoil} = | vatten från snörutinen (mm/dag) |
| θ_{FC} = | fältkapacitet, maximal vattenhalt i markboxen (mm) |
| E_{act} = | verklig avdunstning (mm/dag) |
| E_{pot} = | potentiell avdunstning (mm/dag) |
| P_{LP} = | tröskelvärde för kvoten mellan θ_{SM} och θ_{FC} |

Ekvation 8. Styrande ekvationer i markrutinen

Om en pixel är klassificerad som sjö (ej vattendrag, se vidare avsnitt 2.8.5.4) antas den verkliga avdunstningen vara lika med den potentiella. Om en pixel täcks av snö eller is antas avdunstningen vara lika med noll. Medelvärde för isläggnings- respektive islossningsdatum är 6/11 respektive 31/5 och är hämtade från Rahm och Sjöberg (1971). Fältkapaciteten θ_{FC} är beroende av lutningen. Det är lätt att tänka sig att fältkapaciteten är mindre för branta sluttningar med tunt eller inget jordlager jämfört med i dalgångarna där man kan förvänta sig en tjockare och mer finkornig jordmån. Ekvation 9 beskriver det angreppssätt som använts i ett försök att ta hänsyn till fältkapacitetens variation på grund av skiftande lutning.

$$\theta_{FC} = \left(\frac{(90^\circ - slope)}{90^\circ} \right)^2 * P_{FCcal}$$

där:

| | |
|-----------------|------------------------------------|
| θ_{FC} = | fältkapacitet (mm) |
| P_{FCcal} = | fältkapacitet (mm) vid lutning = 0 |
| slope = | lutning för enskild pixel, (°) |

Ekvation 9. FC som funktion av lutning

Genom att kvadrera uttrycket blir det en större skillnad om man går från en lutning på till exempel 10 till 20 grader jämfört med om man går från 80 till 90 grader. Rent intuitivt känns

detta rimligt eftersom den relativa skillnaden i lutning, och därmed troligtvis effekten på fältkapaciteten, minskar ju brantare det blir. Om ovanstående ansats används får man intuitivt en mer fysikaliskt rimlig modell och θ_{FC} blir helt distribuerad jämfört med HBV-modellen där ett värde antas representera hela området.

Markrutinen innehåller alltså tre parametrar som måste bestämmas genom kalibrering: P_{FCcal} , P_{LP} och P_{BETA} . P_{LP} och P_{BETA} är som i HBV-modellen desamma för samtliga pixlar.

2.8.4 Avrinnings- och routingrutin

Vattnet från markrutinen ($W_{recharge}$) läggs till övre grundvattenboxen, B_{UZ} . Den maximala perkolationshastigheten mellan övre och nedre grundvattenboxen, B_{LZ} , styrs av parametern P_{PERC} (mm d^{-1}). Sjöar (ej vattendrag, se vidare avsnitt 2.8.5.4) antas, som redan antytts, sakna en övre grundvattenbox och endast tillhöra den nedre grundvattenboxen varför avdunstning och nederbörd subtraheras och adderas direkt från B_{LZ} . I HBV-modellen beräknas avrinningen från grundvattenboxarna som summan av en för B_{UZ} olinjär, och en för B_{LZ} linjär utflödesekvation. Den genererade avrinningen transformeras sedan med en triangulär viktningsfunktion som definieras av parametern P_{MAXBAS} . P_{MAXBAS} är således en så kallad routingparameter som fördröjer och jämnar ut flödet. Ekvation 10 (Seibert, 1997) sammanfattar avrinningsbildningen i HBV-modellen.

$$Q_{UZ} = K_1 * B_{UZ}^{(1+P_{alfa})}$$

$$Q_{LZ} = K_2 * B_{LZ}$$

$$Q_{tot}(t) = Q_{UZ} + Q_{LZ}$$

$$Q_{sim}(t) = \sum_{i=1}^{P_{MAXBAS}} c(i) Q_{tot}(t-i+1)$$

$$c(i) = \int_{i-1}^i \frac{2}{P_{MAXBAS}} - \left| u - \frac{P_{MAXBAS}}{2} \right| * \frac{4}{P_{MAXBAS}^2} du$$

där:

| | |
|----------------|---|
| Q_{UZ} = | avrinning från övre grundvattenboxen (mm dag ⁻¹) |
| Q_{LZ} = | avrinning från nedre grundvattenboxen (mm dag ⁻¹) |
| Q_{tot} = | total avrinning från grundvattenboxarna (mm dag ⁻¹) |
| K_1, K_2 = | recessionskoefficienter (dag ⁻¹) |
| B_{LZ} = | undre grundvattenbox (mm) |
| B_{UZ} = | övre grundvattenbox (mm) |
| P_{alfa} = | olinjäritetsterm |
| Q_{sim} = | simulerad avrinning (mm dag ⁻¹) |
| P_{MAXBAS} = | viktningsfunktionens längd |
| $c(i)$ = | vikter i viktningsfunktionen |

Ekvation 10. Avrinningsbildning i HBV-modellen

Med anledning av att modellen i det här arbetet är distribuerad har ett annat angreppssätt testats i ett försök att få en modell som är mer fysikaliskt rimlig. För den övre boxen är hanteringen identisk med den som används i HBV-modellen. För varje pixel beräknas Q_{UZ} enligt ovan vartefter samtliga pixelvärden adderas och sedan transformeras med P_{MAXBAS} . För nedre boxen är hanteringen emellertid annorlunda. För varje pixel beräknas Q_{LZ} enligt ovan. Vattnet transporteras därefter till den nedre boxen hos pixeln nedströms utefter ett dräneringsnätverk genererat utifrån höjdmodellen. Om nedströmpixelns nedre box inte kan ta

emot allt vatten (maximal nivå i nedre boxen är P_{PERC}/K_2) omdirigeras vattnet till dess övre box. Vattnet når så småningom en pixel klassificerad som sjö eller vattendrag. Summan av allt det vatten som befinner sig i nedre boxen hos pixlar klassificerade som sjö eller vattendrag antas nå utloppet och bidra till flödet i det tidssteget. Detta innebär att för sjö och vattendragspixlar töms den nedre boxen i varje tidssteg. Vidare innebär det att nederbörd som faller på sjöar (ej vattendrag, se vidare avsnitt 2.8.5.4) bidrar till flödet i samma tidssteg. Avslutningsvis omvandlas flödet från mm dag^{-1} till m^3s^{-1} .

Rutinen innehåller fyra parametrar som måste bestämmas genom kalibrering: K_1 , K_2 , P_{PERC} , P_{MAXBAS} .

2.8.5 Modelldiskussion

2.8.5.1 Allmänt

Vid modellutvecklingen och implementering i PCRaster har arbetet utgått från källkod som tillhandhållits av de som ligger bakom HBV-light (Visual Basic) (Seibert, 1996) och TAC-d (PCRaster Dynamic Modelling Language) (Uhlenbrook *et al*, 2003).

2.8.5.2 Snörutin

Eftersom avdunstningen från snö och snösmältning kan skilja sig avsevärt mellan skog och öppen terräng används olika värden för P_{SFCF} och P_{CFMAX} för skog och öppen terräng. För att inte få för många variabler att kalibrera uttrycks både P_{SFCF} och P_{CFMAX} för skog som funktioner av dess motsvarigheter i öppen terräng. Dessa förhållanden kan naturligtvis ändras för att passa det område som studeras. För Tjaktjajaure kan ett rimligt antagande vara att P_{SFCF} för skog är 15 % lägre än för öppen terräng (Angela Lundberg, personlig kommunikation). P_{CFMAX} antogs för öppen terräng vara 2.5 gånger större än den för skog. Detta antagande baserades på information från Jones (1999), Johnson (2003) och HBV-modellens parameteruppsättningar för samma område.

Antagandet att pixlar klassificerade som sjö inte behandlas på annat sätt än övriga pixlar innebär att då nederbörd faller som snö antar man att sjöarna är täckta av is. Vidare innebär det att man antar att smältvatten och regn som bildas när isen fortfarande ligger finner sin väg ned till vattenytan och den nedre grundvattenboxen. Medelvärden för isläggning respektive islossning finns och används för att bestämma avdunstning från sjöarna. Genom att använda dessa datum skulle man kunna komma runt problemet att det faktiskt faller snö innan isen lagt sig. Problemet med att använda sig av sådan information är att islossningsdatumet blir väldigt kritiskt. När isen lossar skall allt det vatten som ligger på isen i form av snö läggas till nedre markboxen och bidra till avrinningen. Det kan röra sig om stora mängder vatten och det finns således risk att man introducerar ett stort fel. Naturligtvis innebär den förenkling som används att ett litet fel introduceras.

2.8.5.3 Markrutin

När man i markrutinen skall beräkna det vatten ($W_{recharge}$) som går till övre grundvattenboxen måste man ta hänsyn till att sambandet som styr detta är olinjärt (se ekvation 8). Eftersom kvoten mellan θ_{SM} och θ_{FC} ändras när vatten läggs till (θ_{SM} ökar) kan man inte lägga till allt vatten på en gång eftersom man endast skulle använda sig av initialvärdet på θ_{SM} . Detta brukar man lösa genom att lägga till en mm vatten åt gången, räkna ut ett nytt värde på θ_{SM} och sedan upprepa detta lika många gånger som det finns mm vatten att lägga till. För att göra detta krävs det således någon form av loopfunktionalitet där man kan kontrollera antalet iterationer från gång till gång. I nuvarande version av PCRaster kan man bara använda sig av

ett fast antal iterationer vilket medför att man inte på något tillfredställande sätt kan implementera markrutinen direkt i sin kod. Ett alternativ skulle vara att man sätter antalet iterationer till värsta tänkbara, det vill säga så många mm som kan komma i värsta fall. Man inser att detta i de allra flesta fall skulle leda till att ett stort antal onödiga och tidskrävande uträkningar utförs i varje tidssteg. Loopfunktionaliteten i PCRaster är under utveckling och i nästa version, som är planerad till våren 2004, är det tänkt att det skall vara möjligt att kontrollera antalet iterationer så att problem som detta kan lösas (Cees Wesseling, personlig kommunikation). Ett sätt att komma runt detta är att i C skapa ett eget dynamisk bibliotek och externa funktioner. Dessa externa funktioner kan sedan kopplas till PCRaster och anropas av modellen. I TAC-d använder man sig av samma markrutin som i HBV-modellen och därför har funktioner av ovan nämnda slag utvecklats. Med deras tillåtelse har dessa funktioner använts även i denna modell.

2.8.5.4 Avrinnings- och routingrutin

Vattnet som rinner i de allra minsta vattendragen kan, till skillnad från i de större där även mer djupgående grundvatten (d.v.s. från nedre grundvattenboxen) bidrar, framför allt antas härröra från avrinning från den övre grundvattenboxen. Som redan beskrivits antas all avrinning från den övre grundvattenboxen bidra till flödet i samma tidssteg. Eftersom avrinningen från den nedre grundvattenboxen hanteras på ett distribuerat sätt och antas bidra till flödet först då det når en vattendragspixel är det endast de större vattendragen som är av intresse. Det är naturligtvis mycket svårt att veta vid vilken storlek på vattendrag man skall dra gränsen och det är ofrånkomligt att klassificeringen blir subjektiv. Det genererade vattendragsnätverket (se avsnitt 2.3) studerades och jämfördes med tillgängliga kartor för att få ett vattendragsnätverk som såg "rimligt" ut (vattendrag med en ordning mindre än fyra valdes bort). Vattendragsnätverket kan användas för att reglera hur stort bidraget från den nedre boxen skall vara. Genom att ta med fler och mindre vattendrag blir bidraget från nedre boxen större och vice versa. Valet av minsta storlek på vattendrag är därför något man under kalibreringsfasen måste prova sig fram till. Man skulle kunna tänka sig att man i framtida versioner lägger in en kalibreringsvariabel som styr detta. Vid fortsatt modellutveckling bör man också testa vilka resultat som erhålls om ett aggregerat angreppssätt används även för den nedre boxen. Även om det distribuerade sättet kan kännas mer fysikaliskt rimligt är det inte helt säkert att det ger ett bättre resultat.

Anledningen till att vattendrag och sjöar inte behandlas på samma sätt är att en upplösning på 250 m användes under modellutvecklingen. I ytterst få fall är vattendragen bredare än 125 m. De allra flesta vattendragspixlar är därför mer mark än vatten och behandlas därför som markpixlar.

2.9 Kalibrering och validering av modeller

2.9.1 Kalibrering

Syftet med att kalibrera en modell är att ställa in dess parametervärden så att de av modellen simulerade värdena överensstämmer så väl som möjligt med uppmätta värden. För att underlätta bedömningen av hur god överensstämmelsen är tar man ofta hjälp av statistiska kriterier. För hydrologisk modellering är ett av de mest kända och använda måtten på en modells prestanda det som föreslogs av Nash och Sutcliffe (1970). Måttet betecknades med R^2 vilket lätt kan leda till förväxlingar med determinationskoefficienten r^2 som används vid linjär regressionsanalys och som är ett mått på hur stor del av variationen hos den beroende variabeln som förklaras av den regressionsmodell som används (Olle Vejde Förlag, 2003). r^2

är inte lämpligt för att utvärdera en modells prestanda eftersom höga r^2 -värden inte försäkras god överensstämmelse mellan modellerade och uppmätta värden (Seibert, 1999). För att undvika att begreppen förväxlas används hädanefter beteckning R_{eff} istället för R^2 . Det är också vanligt att man tittar på volymfelet, V_E , det vill säga den ackumulerade skillnaden mellan simulerad och uppmätt vattenföring. Tabell 5 innehåller matematiska definitioner på ovan nämnda effektivitetsmått.

Tabell 5. Effektivitetsmått
Tabell efter Seibert (1999).

| Effektivitetsmått | Beteckning | Definition | Optimalt värde |
|---------------------------|------------------|---|----------------|
| Nash & Sutcliffe | R_{eff} | $1 - \frac{\sum (Q_{\text{obs}} - Q_{\text{sim}})^2}{\sum (Q_{\text{obs}} - \overline{Q_{\text{obs}}})^2}$ | 1 |
| Volymfel | V_E | $\frac{\sum (Q_{\text{obs}} - Q_{\text{sim}})}{\sum Q_{\text{obs}}}$ | 0 |
| Determinationskoefficient | r^2 | $\frac{(\sum (Q_{\text{obs}} - \overline{Q_{\text{obs}}})(Q_{\text{sim}} - \overline{Q_{\text{sim}}}))^2}{\sum (Q_{\text{obs}} - \overline{Q_{\text{obs}}})^2 \sum (Q_{\text{sim}} - \overline{Q_{\text{sim}}})^2}$ | 1 |

R_{eff} har värdet 1 om simulerad och uppmätt vattenföring överensstämmer exakt och 0 om modellen inte beter sig bättre än avrinningsseriens medelvärde. Negativa värden kan förekomma och tyder på dålig modellprestanda eller dåliga data. Det är svårt att avgöra hur långa tidsserier som behövs för att kalibrera sin modell. Det viktiga är att tidsserien innehåller hydrologisk variation så att modellen testas under olika förhållanden. I normala fall räcker det med 5 till 10 år för skandinaviska avrinningsområden (Bergström, 1992).

I många fall kalibreras avrinningsmodeller endast mot uppmätt vattenföring. Anledningen till detta är att vattenföring i de flesta fall är den enda tillgängliga data för vilken kontinuerliga mätningar gjorts under en längre tid. Om kalibrering och validering endast görs mot en variabel bör försiktighet iaktas vid uttalande om hur bra modellen beskriver verkligheten. Ett känt problem inom hydrologisk modellering är att lika bra resultat kan uppnås med vitt skilda parameteruppsättningar. Refsgaard (2000) ger ett antal exempel på där man använt sig av distribuerade modeller och gjort prediktioner av rumsliga mönster trots att modellen enbart kalibrerats mot uppmätt vattenföring. För att kunna göra uttalande om distribuerade modellers förmåga att på rätt sätt beskriva ett områdes inre egenskaper (t.ex. markfuktighet och verklig avdunstning) måste distribuerade data på dessa egenskaper tas med i kalibrerings- och framför allt i valideringsprocessen. Problemet är att denna sorts data i stort sett aldrig finns att tillgå. I storskaliga och mer operationella applikationer är den enda realistiska källan för den här sortens information fjärranalys. Även om fjärranalys länge beskrivits som en stor potentiell källa för distribuerade indata till hydrologiska modeller har, åtminstone i operationella applikationer, användningen i stort sett varit begränsad till att kartera markanvändning och snöutbredning och inga stora genombrott har hittills gjorts för att bedöma till exempel markfuktighet och vattendjup. Framsteg inom forskningen har gjorts de senaste åren och inom ett årtionde kan det vara möjligt att fjärranalys kan användas operationellt för att uppskatta till exempel markfuktighet och nederbörd (förbättrad RADAR-härledd uppskattning) (Refsgaard, 2000).

Modellen innehåller drygt tio kalibreringsparametrar. Eftersom ingen annan lämplig kalibreringsdata fanns tillgänglig kalibrerades modellen genom att för en sexårsperiod

jämföra simulerad och uppmätt vattenföring. Varje modellkörning tar (med 2.3 GHz processor och 512 MB RAM-minne) ungefär 20 minuter. Förutom att kalibreringen riskerar att bli subjektiv om den görs manuellt kan den dessutom bli väldigt tidskrävande och det kan vara svårt att finna den mest lämpliga parameteruppsättningen. Det vore därför önskvärt att åtminstone till viss del kunna automatisera kalibreringsprocessen. Om kalibreringen sker automatiskt kan den låtas pågå under en längre tid samtidigt som annat arbete kan utföras.

2.9.2 PEST

PEST (PEST, 2003) är ett parameteruppskattningsprogram som bland annat kan användas för att optimera en modells parametervärden. Fördelen är att modellen inte behöver modifieras för att PEST skall kunna optimera dess parametrar. PEST använder sig av modellens egna in- och utdata-filer för att ”ta kontrollen”, köra och ändra dess parametervärden ända tills skillnaden mellan simulerade och verkliga värden är minimerad i en viktad minsta kvadratmening. I och med att koden inte behöver ändras och att PEST använder sig av modellens egna filer kan PEST användas för i stort sett alla modeller oavsett i vilken miljö eller vilket språk de är utvecklade i. De enda kraven på modellen är att den kan köras från kommandoprompten och att den kan läsa och skriva ASCII-filer.

För olinjära problem är parameteruppskattningen en iterativ process. PEST använder sig av en robust variant av Gauss-Marquadt-Levenberg-metoden för att lösa parameteruppskattningen i en olinjär viktade minsta kvadratmening. I början av varje iteration lineariseras förhållandet mellan modellparametrar och simulerade värden genom att uttrycka det som en Taylor-utveckling kring den hittills bästa parameteruppsättningen. Detta innebär att de simulerade värdenas derivator med avseende på alla parametrar måste beräknas. Problemet som nu är lineariserat löses därefter för en bättre parameteruppsättning och de nya parametrarna testas genom att köra modellen igen. Genom att jämföra parametrarnas ändring och förbättring av värdet på den funktion som skall minimeras med vad som åstadkommits under tidigare iterationer kan PEST avgöra om det är värt att utföra ytterligare en iteration (van Asch & van Dam, 2001; PEST, 2002).

Eftersom ingen modell är den andra lik finns det ett antal variabler (*eng.* control variables) som användaren kan ställa in för att passa den modell vars parametrar man skall optimera. Exempel på sådana variabler är parametergränser, typ av parametertransformation, beräkningsmetod för derivator, när optimeringsprocessen skall avslutas etc. För utförligare information om hur PEST arbetar hänvisas till PEST (2002).

Innan optimeringen kan påbörjas måste tre olika typer av filer iordningställas för att PEST skall kunna kommunicera med modellen. Dessa filtyper är:

- **Instruction-files:** En för varje utdatafil innehållande simulerade värden vars skillnad mot observerade värden skall minimeras.
- **Template-files:** En för varje indatafil innehållande parametrar som skall optimeras.
- **Control-file:** Förser PEST med namnen på samtliga template- och instruction-filer, namnen på motsvarande in- och utdatafiler i modellen, problemstorlek, *control variables*, parametrarnas startvärden, observerade värden, information om hur modellen startas etc.

Ur optimeringssynpunkt är optimering av modellen av så kallad ”black box”-karaktär. Eftersom varje modellkörning tar cirka 20 minuter och det är så många parametrar att optimera inser man lätt att det är ett tungt och kostsamt (CPU-intensivt) problem. Det enda

sättet att klara sådana problem på bästa sätt (det vill säga att hitta det globala minimumet) är att använda speciellt framtagna ”black box”-optimeringsmetoder. Sådana metoder har utvecklats av TOMLAB (TOMLAB, 2003). PEST bygger på en lokallösare för minstakvadratproblem. För att med en sådan lokallösare vara säker på att finna den optimala parameteruppsättningen (d.v.s. den som ger det globala minimumet) måste problemet vara konvext (d.v.s. endast ha ett minimum), startgissningen vara tillräckligt bra och man måste låta optimeringsprocessen pågå länge. Med TOMLAB skulle man ringa in minimumet genom att köra speciella algoritmer för kostsam global ”black box”-optimering och sedan förfinas problemet med en lokallösare av liknande sort som den som PEST använder (Kenneth Holmström, personlig kommunikation). Man kan alltså inte med PEST vara säker på att man hittar den bästa möjliga parameteruppsättningen. Hur bra resultat som uppnås är väldigt beroende av startgissningen. Även om man inte hittar det globala minimumet eller ens ett lokalt minimum kommer man genom att köra PEST erhålla en bättre parameteruppsättning jämfört med startgissningen som erhållits genom manuell kalibrering.

2.9.3 Validering

Inom avrinningsmodellering avses med begreppet validering i allmänhet att testa sin modell på oberoende data (Seibert, 1999). Detta innebär att man kör sin modell, över en tidsperiod som inte till någon del sammanfaller med den som använts under kalibreringen, med den parameteruppsättning som erhållits under kalibreringsfasen. Resultaten utvärderas och blir ett mått på hur bra modellen fungerar. Av samma anledning som distribuerade modeller bör kalibreras mot distribuerade data bör de också, om tillgänglig data finns, valideras mot distribuerade data. Det finns, beroende på tillgänglig data och syfte med modellen, många olika sätt att validera en modell, se till exempel Seibert (1999). I den här studien har det kanske allra vanligaste förfarandet vid kalibrering/validering tillämpats, nämligen den så kallade ”split sample”-metoden där man helt enkelt delar upp sitt dataset i två delar och utför kalibreringen på den ena och validering på den andra. Validering skedde i huvudsak mot vattenföring men även till viss del mot snöutbredning.

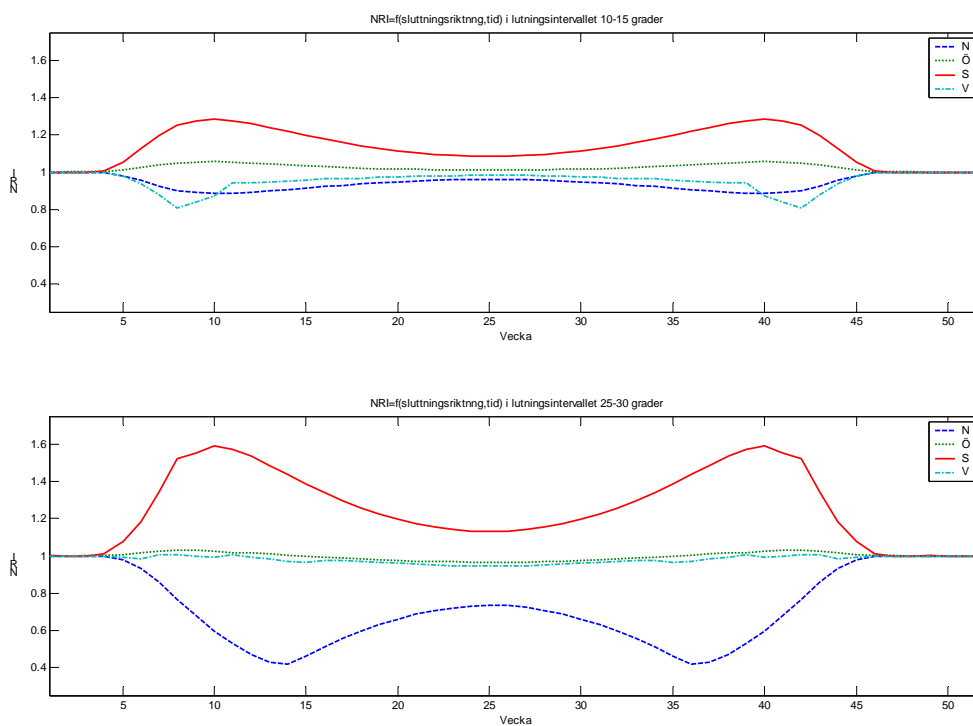
3 Resultat

3.1 NRI

En skillnad mot den vanliga HBV-modellen är modifieringen av snösmältningen med hjälp av NRI. Genom att inkludera NRI kommer man, som tidigare nämnts, att ta hänsyn till att snösmältningen till exempel är större på sydsluttningar än på nordsluttningar. Man kan tänka sig att det framför allt är sluttningsriktning (*eng.* aspect) och lutning som kommer att avgöra värdet på NRI. För att exemplifiera detta valdes inom två olika lutningsintervall (10-15° och 25-30°) fyra punkter, representerande nordlig, östlig, sydlig och västlig sluttningsriktning, ut för att se hur NRI varierar över året, se figur 5. Sluttningsriktningarna definierades enligt tabell 6. Genom att välja ett relativt snävt intervall tydliggör man eventuella skillnader mellan de olika klasserna och man undviker att punkter med nästan samma värde på sluttningsriktning hamnar i olika klasser. Det senare skulle göra jämförelsen klasserna emellan i stort sett meningslös. Alla punkter ligger inom samma höjdintervall (1300-1400 m).

Tabell 6. Sluttningsriktningar
Definitioner på sluttningsriktningar som användes för att studera hur NRI varierar.

| Sluttningsriktning | Intervall |
|--------------------|---------------------------|
| Nordlig | $0/365^\circ \pm 5^\circ$ |
| Östlig | $90^\circ \pm 5^\circ$ |
| Sydlig | $180^\circ \pm 5^\circ$ |
| Västlig | $270^\circ \pm 5^\circ$ |



Figur 5. NRI som funktion av tid och sluttningsriktning
Lutningsintervall 10-15 (övre) och 25-30 grader (nedre). Använda sluttningsriktningarna är enligt tabell 6

3.2 Avrinning

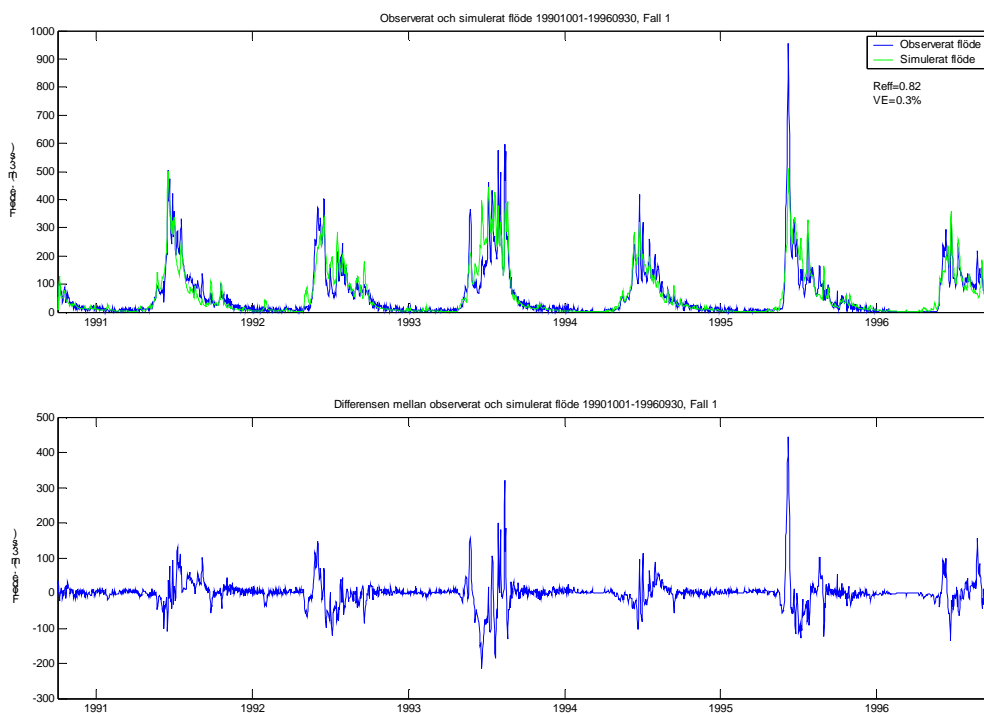
3.2.1 Kalibrering

För kalibrering användes perioden 901001-960930. Modellen kalibrerades för två olika fall. I det ena fallet (fall 1) användes enbart de två SMHI-stationerna Aloukta och Kvikkjokk. Dessa är de enda av de stationer som använts i denna studie som har täckning över hela kalibrerings- och valideringsperioden. Dessa stationer är också de som, tillsammans med stationerna Jokkmokk, Ritsem, Aktse och Tjåmotis, används i HBV-96 av Vattenfall Produktion. I det andra fallet (fall 2) användes de två ovan nämnda SMHI-stationerna tillsammans med Vattenfalls stationer. Vattenfallstationernas täckning varierar under kalibrerings- och valideringsperioden. Se appendix 1 för en sammanställning över de olika stationernas täckning.

Först gjordes en grov manuell kalibrering och sedan användes PEST (se avsnitt 2.9.2) som instruerades att minimera V_E och $1-R_{\text{eff}}$ (se tabell 5). De intervall inom vilka parametrarna läts variera under kalibreringen i PEST och erhållna parameteruppsättningarna återfinns i appendix 3. För fall 2 gjordes efter PEST vissa manuella justeringar, se appendix 3 och avsnitt 3.4.2.1. Kalibreringsresultaten för fall 1 redovisas i tabell 7 och figur 6. I appendix 4 redovisas resultaten för fall 1, fall 2 och för jämförelsens också resultaten från den modell (HBV-96) som för närvarande används av Vattenfall Produktion. Körningar med HBV-96 har gjorts av Mikael Sundby på Vattenfall Produktion.

Tabell 7. R_{eff} och V_E för kalibreringsperioden

| | <u>Modell utvecklad i detta arbete</u> | | <u>HBV-96</u> |
|------------------|--|--------|---------------|
| | Fall 1 | Fall 2 | - |
| R_{eff} | 0.82 | 0.75 | 0.88 |
| V_E | 0.3 % | -0.2 % | 6.1 % |



Figur 6. Observerat och simulerat flöde under kalibreringsperioden
Överst visas observerat och simulerat flöde under kalibreringsperioden och nederst differensen mellan de två hydrograferna.

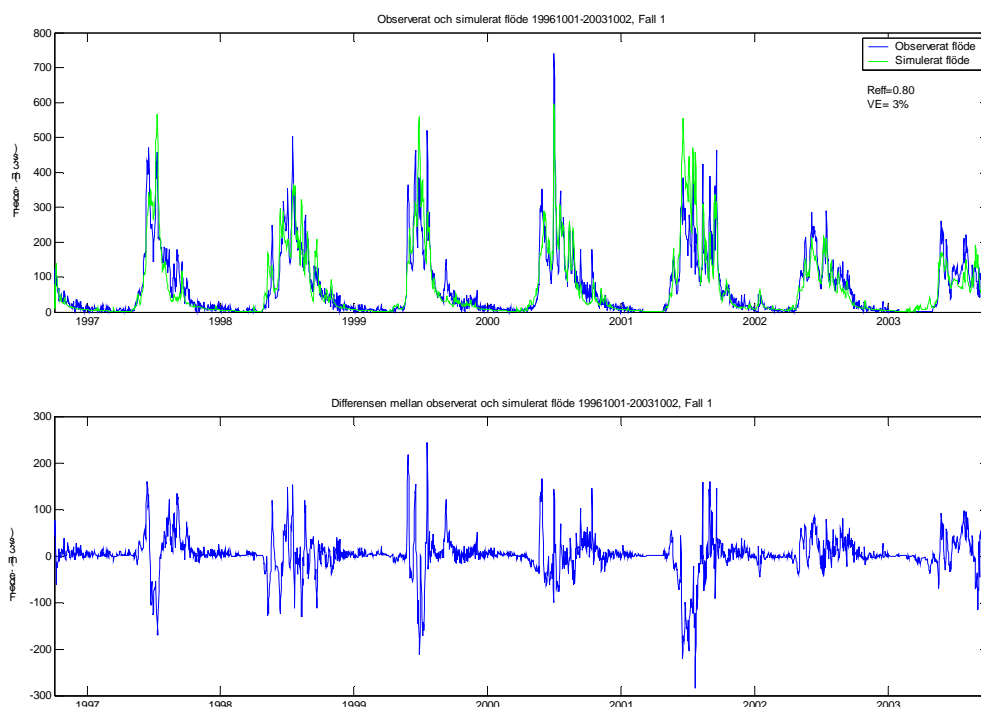
3.2.2 Validering

För att validera modellen kördes den för de två olika fallen, med de parameteruppsättningar som erhöles under kalibreringen, under tidsperioden 961001-031002. Det bör återigen poängteras att i fallet då både SMHI- och Vattenfallstationer användes (fall 2) är inte stationstäckningen den samma under kalibrerings- och valideringsperioden. Generellt sett kan man säga att det finns mer data från Vattenfallstationerna ju senare det är, se appendix 1. Valideringsresultaten för fall 1 redovisas i tabell 8 och figur 7. I appendix 4 redovisas resultaten för fall 1, fall 2 och för jämförelsens också resultaten från den modell (HBV-96)

som för närvarande används av Vattenfall Produktion. Körningar med HBV-96 har gjorts av Mikael Sundby på Vattenfall Produktion.

Tabell 8. R_{eff} och V_E för valideringsperioden

| | <u>Modell utvecklad i detta arbete</u> | | <u>HBV-96</u> |
|-----------|--|--------|---------------|
| | Fall 1 | Fall 2 | - |
| R_{eff} | 0.80 | 0.78 | 0.85 |
| V_E | 3.1 % | 8.1 % | 6.1 % |

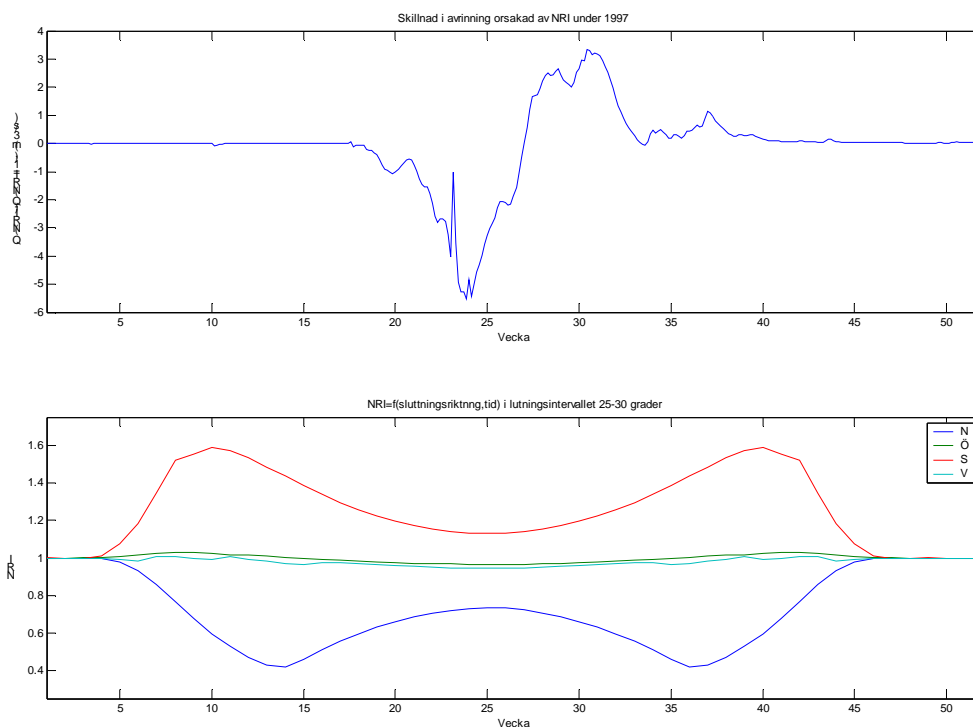


Figur 7. Observerat och simulerat flöde under valideringsperioden
Överst visas observerat och simulerat flöde under valideringsperioden och nederst differensen mellan de två hydrograferna.

Eftersom fall 1 gav bättre resultat än fall 2 (se appendix 4) både under kalibrering och validering kom fall 1 att användas för de fortsatta analyserna.

3.2.3 Hur mycket påverkar NRI avrinningen?

För att undersöka hur stor effekt NRI egentligen har på det simulerade flödet kördes modellen med och utan (d.v.s. NRI som en konstant lika med 1) NRI. Modellen kördes för hela valideringsperioden för att även kunna jämföra R_{eff} och V_E med tidigare körningar. Det visade sig att R_{eff} och V_E , åtminstone med den noggrannhet som tidigare använts för dessa värden, blev de samma som i tabell 8 oavsett om NRI användes eller inte. I figur 8 visas, för ett typiskt år (1997), skillnaden i simulerat flöde för de två fallen samt för jämförelsen skull ett exempel från avsnitt 3.1 på hur NRI kan variera över ett år.



Figur 8. Skillnad i avrinning orsakad av NRI

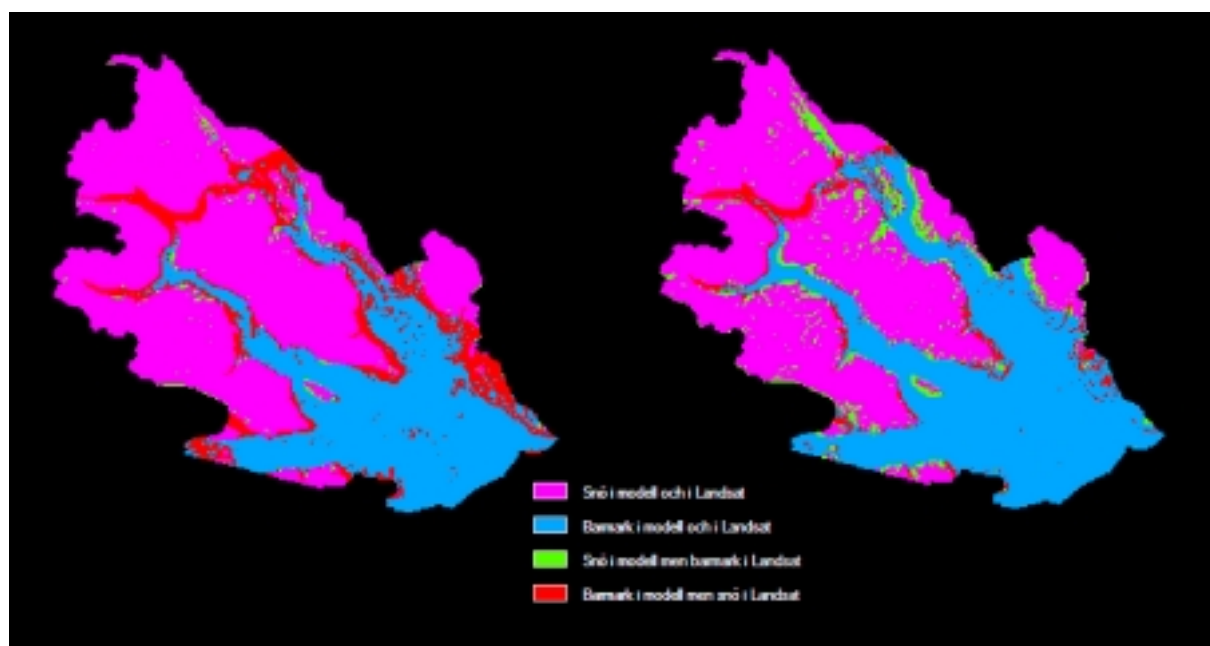
Övre grafen visar den skillnad i avrinning som användandet av NRI ger upphov till och nedre grafen visar NRI som funktion av tid och sluttningsriktning i lutningsintervallet 25-30 grader. Använda sluttningsriktningarna är enligt tabell 6. För jämförelsens skull kan det nämnas att maximala flödet under 1997 uppgick till 465 m³/s.

3.3 Snö

3.3.1 Utbredning

Med modellen kan man i varje tidssteg automatiskt generera en karta i vilken varje pixel visar aktuellt värde på den av modellens olika tillståndsvariabler (t.ex markfuktighet, vatteninnehåll i grundvattenboxar och snötäcke) man valt att rapportera. För att undersöka hur väl utbredning av simulerat snötäcke överensstämmer med verkligheten jämfördes modellresultaten med en snöklassificerad Landsat-scen över området från den 28 maj 2002. Modellen behandlar snö som motsvarande mängd vattenekvivalenter och för att förenkla jämförelsen med den klassificerade satellitbilden gjordes kartorna om till booleska kartor där alla pixlar med en vattenekvivalent större än 0 fick värdet 1 och övriga pixlar fick värdet 0. Landsat-scenen hade ursprungligen en upplösning på 25 m varför en omsampling var nödvändig. Det går alltså 100 Landsat-pixlar på en modellpixel (upplösning 250 m). Vid omsamlingen var kravet att endast en av de 100 pixlarna skulle vara klassificerad som snö för att den nya 250 m pixeln också skulle klassificeras som snö. Anledningen till detta är att det enda kravet en modellpixel skall uppfylla för att klassificeras som snötäckt är att den har en vattenekvivalent över noll. För jämförelsens skull gjordes också en omsampling där 25 av de 100 pixlarna skulle vara täckta av snö för att den nya pixeln skulle klassificeras som snö. Figur 9 visar en utvärdering av modellresultaten (då NRI används) mot snötäcket från Landsat-scenen i de två olika omsamlingsfallen. Tabell 9 och 10 är de så kallade felmatriserna eller förväxlingsmatriserna, se till exempel Wester (1998), som ofta används för att redovisa noggrannheten och från vilka en mängd olika statistiska mått kan erhållas.

Eftersom effekten av NRI är så liten på snöutbredningen (flyttar smältgränsen i storleksordningen en pixel) visas inte snöutbredningen för fallet då NRI inte används. I tabellerna däremot redovisas resultaten från båda fallen.



Figur 9. Modellerad och verklig snöutbredning 20020528.
Jämförelse då 1 (vänster) respektive 25 (höger) pixlar använts som kriterium vid omsampling.

Tabell 9. Felmatris för fallet med 1 pixel som gräns vid omsampling.
Värdena anger antalet 250*250 m² pixlar.

| | | MODELLERAD | | | |
|--------|---------|------------|-------|---------|--------|
| LADSAT | | NRI | SNÖ | BARMARK | TOTALT |
| | | ej NRI | | | |
| | SNÖ | 18721 | 18540 | 4226 | 22947 |
| | BARMARK | 410 | 393 | 10722 | 11132 |
| | TOTALT | 19131 | 18933 | 14948 | 34079 |
| | | | | 4407 | |
| | | | | 10739 | |
| | | | | 15146 | |

Tabell 10. Felmatris för fallet med 25 pixlar som gräns vid omsampling.
Värdena anger antalet 250*250 m² pixlar.

| | | MODELLERAD | | | |
|--------|---------|------------|-------|---------|--------|
| LADSAT | | NRI | SNÖ | BARMARK | TOTALT |
| | | ej NRI | | | |
| | SNÖ | 17083 | 16954 | 1601 | 18684 |
| | BARMARK | 2048 | 1979 | 13347 | 15395 |
| | TOTALT | 19131 | 18933 | 14948 | 34079 |
| | | | | 1730 | |
| | | | | 13416 | |
| | | | | 15146 | |

Ur felmatrisen kan man lätt ta fram ett antal statistiska mått som beskriver hur väl de modellerade resultaten överensstämmer med verkligheten. Det kanske vanligaste statistiska måttet som beskriver andelen pixlar som är rätt modellerad ges av den totala klassningsnoggrannheten (CA). Utöver CA kan det också vara intressant att redovisa

arealriktigheten (AA) som beskriver om en klass är över- eller underrepresenterad. Övriga mått, såsom *Error of comission* (EC) som för en viss klass talar hur stor procentuell andel som är felmodellerad och *Error of omission* (EO) som talar om hur stor procentuell andel av verkligheten som inte modellerats rätt, kan lätt beräknas med hjälp av felmatrisen. CA som är det vanligaste måttet beskrivs i ekvation 11. AA erhålls genom att ta kvoten mellan antalet rätt modellerade och det verkliga antalet pixlar med det värdet. För beräkning av övriga mått hänvisas till (Wester, 1998). CA och AA redovisas i tabell 11 för de olika fallen.

$$CA = \sum X_{ii} / N$$

där:

X_{ii} = diagonalelement i felmatrisen
 N = totalt antal 250*250 m² pixlar

Ekvation 11. Total klassningsnoggrannhet

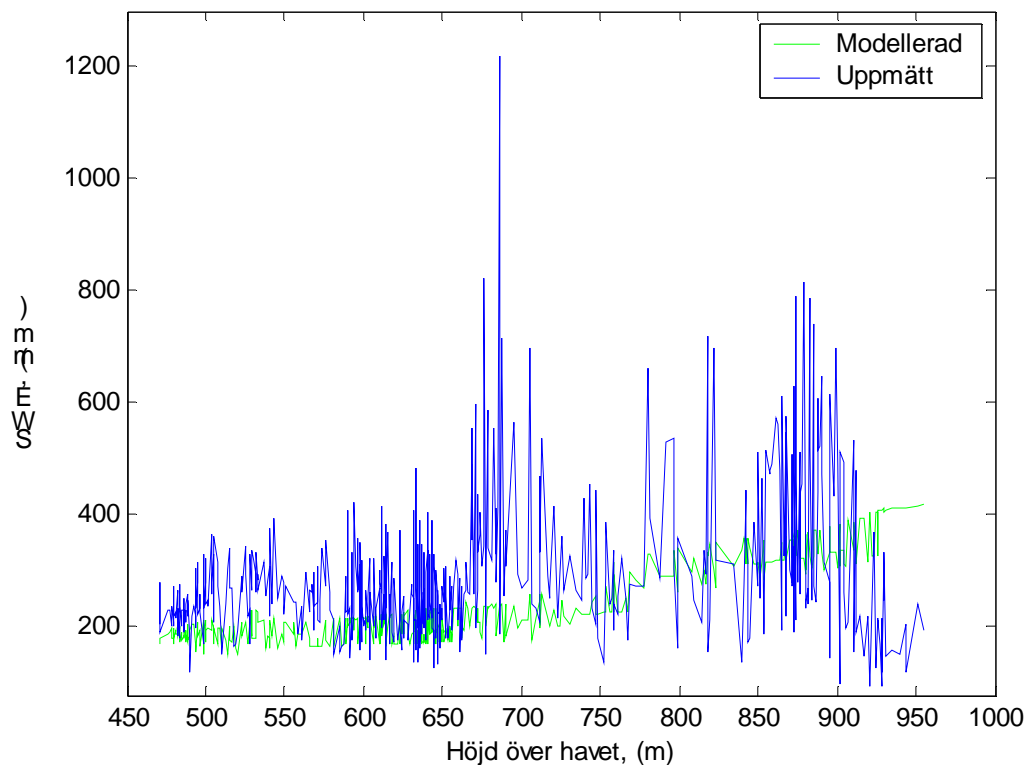
Tabell 11. Total klassningsnoggrannhet

”1” och ”25” betecknar antal pixlar som använts som gräns vid omsampling. Samtliga mått skall ligga så nära ett som möjligt. De resultat som ligger närmast ett i de olika fallen har skrivit i fet kursiverad stil.

| | ”1” NRI | ”1” ej NRI | ”25” NRI | ”25” ej NRI |
|------------|----------------|-------------------|-----------------|--------------------|
| CA | 0.863 | 0.859 | 0.893 | 0.891 |
| AA snö | 0.837 | 0.825 | 1.024 | 1.013 |
| AA barmark | 1.343 | 1.361 | 0.971 | 0.984 |

3.3.2 Vatteninnehåll

Ur tillgängliga georadarmätningar för påskveckan år 2000 beräknades snöns vattenekvivalent (SWE) ut för tre flyglinjer (se appendix 2) enligt Andersson och Lundberg (2002). Samma punkters simulerade värden togs fram för att möjliggöra en jämförelse. För att visa på eventuellt höjdberoende plottades varje värde mot dess respektive höjd över havet, se figur 10.



Figur 10. Modellerad och uppmätt SWE
 SWE har mätts med flygburen georadar. Punkterna är från tre olika flyglinjer i området, se appendix 2. Varje punkt har plottats mot sin höjd över havet.

3.4 Resultatdiskussion

3.4.1 NRI

I figur 5 ser man hur NRI för olika sluttningsriktningar varierar över året. Mellan vecka 46 och 4 ser man att värdet för NRI i stort sett är lika med 1 vilket naturligtvis beror på att solen under denna tid knappt eller inte alls kommer över horisonten. Vidare ser man det väntade att NRI antar de största respektive lägsta värdena för de sydliga respektive nordliga sluttningar. Detta är mest tydligt i fallet med större lutning. I fallet med mindre lutning ser man att de västliga faktiskt antar lägre värden än de nordliga sluttningsriktningarna under början och slutet av året. Generellt kan man säga att framför allt sydliga men även östliga sluttningsriktningar antar positiva medan framför allt nordliga men även västliga sluttningsriktningar antar negativa värden på NRI. Vidare kan man säga att variationerna över året ökar för sydliga/nordliga och minskar för östliga/västliga sluttningsriktningar med ökande lutning. NRI påverkar som tidigare nämnts både snösmältning och avdunstning. NRI antar, beroende på lutning, sina extremvärden runt februari/mars respektive september/oktober. Om man tittar i den nedre grafen i figur 5 ser man att det för dessa perioder kan skilja en faktor 3 mellan en nordlig och sydlig sluttning. NRI's förhållande till avdunstning och snösmältning är linjärt (se ekvation 7 och avsnitt 2.5.2) vilket gör att en faktor 3 innebär att avdunstningen är tre gånger större och att snön smälter tre gånger snabbare. Det är dock viktigt att poängtera att huvuddelen av snösmältningen inte sker under den period då NRI antar sina extremvärden samt att avdunstningen under dessa perioder är relativt låg, se tabell 4.

3.4.2 Avrinning

3.4.2.1 Kalibrering/validering

Utifrån de resultat som erhållits under kalibrering och validering kan man säga att den utvecklade modellen simulerar avrinningen i området på ett bra sätt. R_{eff} -värdena är höga samtidigt som V_E -värdena är låga. De bästa resultaten erhöles då de två SMHI-stationerna användes ensamma (fall 1), alltså med två nederbördsserier och en temperaturserie. Detta är anmärkningsvärt då man skulle kunna tro att bättre resultat skulle erhållas om fler meteorologiska stationer användes eftersom man då på ett bättre sätt borde kunna fånga upp variationer i nederbörd och temperatur. Eftersom de två olika fallen kalibrerades separat kan det vara intressant att studera dess parameteruppsättningar (se appendix 3) för att se om de i något avseende skiljer sig åt mycket. Om allt stod rätt till borde skillnaderna rimligtvis vara små eftersom det är samma område som studeras. Överlag är parametervärden ungefär desamma men det finns några skillnader. Den viktigaste och troligen den som kan förklara de sämre resultaten då alla stationer används är P_{SFCF} . P_{SFCF} är som tidigare nämnts en faktor som använts för att korrigera den nederbörd som faller som snö (se avsnitt 2.8.2). Detta är en viktig parameter bland annat för att få vattenbalansen rätt. Om nederbördsmätningarna är exakta bör P_{SFCF} ha ett värde på knappt 1 för att kompensera för avdunstning. I fallet då bara SMHI-stationerna används har P_{SFCF} ett värde på drygt 1.1 vilket kan tyda på att nederbördsmätarna underskattar nederbörden en aning och därför måste multipliceras med ett värde större än 1. I fallet då även Vattenfall-stationerna används (fall 2) fick P_{SFCF} efter kalibreringen i PEST värdet 1.5 som också var dess övre gräns (se ”Parameterintervall använda vid kalibrering med PEST” i appendix 3). Detta värde justerades sedan upp till 1.65 för att få ett acceptabelt värde på V_E (även P_{MAXBAS} justerades manuellt efter PEST, det är dessa ändringar som avses i avsnitt 3.2.1). Ett så högt värde på P_{SFCF} får en att misstänka att de data från Vattenfallstationerna som använts inte är korrekta utan är för låga och att de kräver någon form av korrektion innan de kan användas i en hydrologisk modell som denna.

Eftersom P_{SFCF} för SMHI-stationerna är ca 1.13 är det troligt att om enbart Vattenfallstationer skulle användas skulle det krävas ett ännu högre P_{SFCF} eftersom SMHI-stationerna kompenserar för Vattenfallstationerna. Ett resultat som stöder detta påstående är att från kalibrering till validering ökar V_E från -0.2% till 8% vilket kan jämföras med 0.3% till 3% då bara SMHI-stationerna används. Den kraftiga ökningen beror naturligtvis till viss del på att valideringen utförts på ett oberoende dataset men om man tittar på fallet med bara SMHI-stationerna är inte ökningen i det fallet lika kraftig. Därför är det troligt att den procentuellt sett högre andelen Vattenfall-stationer under validering (se appendix 1) gör att den kompenserande effekten av SMHI-stationerna blir mindre. Observera att ett negativt värde på V_E betyder att man överskattar flödet och att ett positivt betyder att man underskattar flödet, (se tabell 5) och att om man ökar P_{SFCF} minskar V_E . Vilka stationer som används och dess täckning är alltså viktigt för resultaten. Det bästa sättet att få en uppfattning om variationerna i täckning är att studera appendix 1. Generellt sett kan man säga att täckningen ökar med tiden. Noterbart är att R_{eff} ökar vid valideringen jämfört med vid kalibreringen i fallet då Vattenfall-stationerna används. Detta orsakas med största sannolikhet av att stationstäckningen är bättre under valideringen än under kalibreringen.

Om nu Vattenfallstationerna underskattar nederbörden är det inte troligt att de bara gör det för snö utan även för regn. Om så är fallet inser man att det skulle behövas en korrektionsfaktor inte bara för snö utan även för regn. Om man bara använder P_{SFCF} för att korrigera V_E kommer detta leda till att man korregerar snön ”för mycket” för att kompensera för att ingen korrektion sker för regnet. Med andra ord kan man säga att man överskattar mängden snö och underskattar mängden regn. Man inser lätt att det finns stor risk för att detta förfaringsätt

kraftigt kan påverka modellresultaten och att detta är ytterligare en orsak till att R_{eff} inte blir så bra i fallet då Vattenfallstationerna används.

En annan sak förutom P_{SFCF} , som är värd att notera när man studerar parameteruppsättningarna, är att P_{FCcal} i båda fallen antagit det lägsta värdet i kalibreringsintervallet. Det är svårt att uppskatta vad ett rimligt värde på P_{FCcal} kan vara men eftersom marktäckat åtminstone i de högre delarna av området är väldigt tunt (se avsnitt 2.2) kan man sluta sig till att det bör vara lågt. Eftersom P_{FCcal} vid kalibreringen antagit sitt lägsta värde kanske man om kalibreringen skulle göras om borde sänka det nedre gränsvärdet. Värt att nämna igen är att θ_{FC} är en funktion av P_{FCcal} och lutningen, se ekvation 9. Detta innebär att om P_{FCcal} är 50 kommer θ_{FC} att variera mellan 50 (lutning lika med 0) och ca 10 (lutning ungefär lika med 50) inom området.

Jämförelserna med HBV-96 (se appendix 4) visar att modellen i avseende på R_{eff} inte riktigt når upp till lika bra resultat men att däremot V_E är betydligt bättre. I detta sammanhang är det väldigt viktigt att nämna att HBV-96 kalibreras kontinuerligt och att den senaste kalibreringsperioden var 840901-031031. Eftersom båda perioderna som använts ligger inom denna period kommer resultaten att bli bättre än om körningarna gjorts på oberoende data (data som inte ligger inom kalibreringsperioden). Det finns ytterligare anledningar till att jämförelsen mellan de båda modellerna inte är helt rättvis. Bland annat har olika antal meteorologiska stationer använts. Problemen då Vattenfall-stationerna används har redan diskuterats och det fallet utesluts från de vidare diskussionerna. Eftersom fler meteorologiska stationer använts i HBV-96 kan man tänka sig att en bättre uppskattning av nederbörden i området har varit möjlig. Detta blev bland annat uppenbart när de meteorologiska dataserierna runt flödestoppen 1995 (se figur 6) studerades. Anledningen att just denna händelse studerades mer noggrant var att HBV-96 på ett bättre sätt lyckades bestämma magnituden av denna topp, se appendix 4. När nederbördsdata som använts i HBV-96 jämfördes med de som användes i den distribuerade modellen visade det sig att nederbördsvärdena i HBV-96 var högre. Eftersom de två modellernas struktur skiljer kan man inte direkt använda de nederbördsdata som använts i HBV-96 i den distribuerade modellen. Genom att korrigera HBV-96 värdena för hur höjdskillnaderna behandlas i den distribuerade modellen och genom att använda samma värde för båda stationerna (det vill säga det samma som att bara använda en station) kunde den distribuerade modellen köras med värden som motsvarade de i HBV-96. Även om denna modifiering av cirka två veckors indata inte gjorde att modellen lika bra som HBV-96 kunde bestämma magnituden på toppen förbättrades resultaten (se tabell 12) och exemplet belyser att det kan finnas skillnader i modellresultaten som härrör från att olika indata används.

Tabell 12. Uppmätt och simulerat flöde runt 950606
Distr. = distribuerade modellen, mod= ca två veckors modifierad indata. Angivna flöden är i m^3/s .

| Modell/Datum | 950605 | 950606 | 950607 |
|--------------|--------|--------|--------|
| HBV-96 | 876 | 784 | 642 |
| Distr. | 441 | 510 | 475 |
| Distr. mod | 461 | 532 | 495 |
| Uppmätt | 832 | 955 | 810 |

Värt att notera är att HBV-96 flödestopp inte sammanfaller med den verkliga vilket är fallet för den distribuerade modellen. Dessutom är det anmärkningsvärt att det rapporterade uppmätta flödet kraftigt överstiger det, som anges i tabell 1, av BKP (1973) föreskrivna värdet för högsta högvattenföring på $727 \text{ m}^3/\text{s}$.

Ytterligare en skillnad, som till viss del påverkar resultaten, mellan HBV-96 och den distribuerade modellen är att ingen uppvärmningsperiod har använts för den senare. Med uppvärmningsperiod menas att man låter modellen gå en viss tid (typiskt några år) innan dess resultat utvärderas. På detta ställer modellens tillståndsvariabler in sig på sina "rätta" värden. På detta sätt eliminerar man risken för att modellresultaten påverkas negativt av felaktiga initialvärden på tillståndsvariablerna. På grund av att tillgången på data har varit begränsad i de olika fallen har detta inte gjorts för den distribuerade modellen. Resultaten från de HBV-96 körningar som presenterats i detta arbete föregås däremot alla av långa (i modellen finns data från 710101) uppvärmningsperioder något som naturligtvis påverkar resultaten i positiv riktning jämfört med om ingen uppvärmningsperiod använts.

3.4.2.2 Hur mycket påverkar NRI avrinningen?

I figur 8 ser man att skillnaden i simulerat flöde för de två olika fallen som mest är drygt 5 m³/s. Även om skillnaderna inte är stora ser man en säsongsbetonad variation. Sydliga och östliga sluttningsriktningar dominerar området, se tabell 3. Utifrån detta skulle man kunna tänka sig att positiva NRI-värden dominerar i området. Detta innebär att snösmältning och avdunstningen borde bli större om NRI används än om det inte används. Hur kan man utifrån detta förklara utseendet i figur 8 där flödet om NRI används är mindre under vår och försommar för att sedan öka och bli större under sensommar och höst? Under vår och försommar är marken, på grund av allt smältvatten, i stort sett mättad. Detta innebär att effekten av en ökad potentiell avdunstning på grund av NRI kommer att bli stor eftersom den verkliga avdunstningen kommer att bli nästan lika med den potentiella. Vattenförlusterna på grund av ökad avdunstning är under våren större än det extra vatten som kommer från smältning av de permanenta snökällorna (d.v.s. glaciärerna) varför nettoresultatet blir att flödet blir mindre om NRI används. Den potentiella avdunstningen är som störst under juni (se tabell 4) och det är då vi ser de största skillnaderna i flöde. I och med att marken under sommaren torkar upp samtidigt som den potentiella avdunstningen minskar kommer effekten av NRI på avdunstningen att minska och till slut bli mindre än effekten av den ökade smältningen av glaciärerna vilket leder till att flödet under sensommaren blir större då NRI används än då det inte gör det. När temperaturen sjunker kommer smältningen att upphöra och eftersom den potentiella avdunstningen blir mindre och mindre kommer skillnaden att minska för att till slut bli i stort sett obetydlig mellan de två fallen.

Eftersom modellresultaten (R_{eff} och V_E) blir i stort sett desamma oavsett om NRI används eller inte kan det tyckas meningslöst att inkludera NRI i modellen, men det kan motiveras med att det gör modellen mer fysikaliskt rimlig framför allt när det gäller modellering av snötäcket. Detta är viktigt till exempel om högupplöst fjärranalytisk data på snöutbredning och snödjup i framtiden skall användas för att uppdatera modellen.

3.4.3 Snö

3.4.3.1 Utbredning

Gränserna för det område som snöklassificeringen av Landsat-scenen utfördes för skiljde sig något från de områdesgränser som använts i detta arbete. Jämförelsen kunde bara utföras där de två områdena sammanföll varför utseendet skiljer sig något från tidigare kartor. I den modell som användes för att generera snöutbredningskartorna användes samma P_{CFMAX} för skog som för öppen terräng. Till en början användes skilda värden (faktor 2.5 se avsnitt 2.8.5.2) men när de resulterande kartorna studerades visade det sig att avsmältning i skogsområden var alldeles för låg. När P_{CFMAX} för skog sattes lika med den för öppen terräng

blev resultaten mycket bättre. För att se hur denna ändring påverkade R_{eff} och V_E kördes modellen för både kalibrerings- och valideringsperioden. Resultaten sammanfattas i tabell 13.

Tabell 13. R_{eff} och V_E då ett P_{CFMAX} används

P_{CFMAX} antas för skog vara det samma som för öppen terräng. Inom parentes visas resultaten om olika P_{CFMAX} används, se även tabell 7 och 8

| | Kalibreringsperiod | Valideringsperiod |
|------------------|--------------------|-------------------|
| R_{eff} | 0.83 (0.82) | 0.81 (0.80) |
| V_E | 1.2 % (0.3 %) | 3.8 % (3.1 %) |

Trots att modellen kalibrerats med två olika P_{CFMAX} blir resultaten med avseende på R_{eff} bättre om endast ett P_{CFMAX} används. Om modellen kalibrerats med ett P_{CFMAX} är det möjligt att resultaten blivit ännu bättre. Utifrån detta kan man dra slutsatsen att om man inte har väldigt bra information om förhållandet mellan P_{CFMAX} i öppen terräng och i skog bör man använda sig av ett istället för två.

I figur 9 och i tabell 11 ser vi att det modellerade snötäcket stämmer väl överens med det verkliga. Man ser att bättre resultat erhålls om 25 pixlar används vid omsamlingen. Detta indikerar att modellen underskattar snön eftersom om 25 pixlar väljs kommer fler områden att klassificeras som barmark jämfört med om en pixel väljs. Den stora andelen rött då en pixel används (vänstra kartan i figur 9) är det enklaste sättet att se att snötäcket underskattas. Underskattning beror antingen på att modellerad nederbörd är fel eller på att smältningsfaktorn (P_{CFMAX}) är för hög. Vidare ser man att för CA erhålls något bättre resultat då NRI används. För AA blir resultaten bättre i ena och sämre i andra fallet om NRI används. NRI påverkar inte procentuellt sett snöutbredningen i så stor utsträckning eftersom effekterna i princip bara syns längs med smältgränsen där snötäcket inte fortfarande är tjockt. För att studera effekterna av NRI på utbredningen borde man egentligen studera fler tidpunkter i ett smältförlopp alternativt i ett senare skede av smältningen när snötäcket överlag är mycket tunnare.

Eftersom modellen kalibrerades med NRI kan man tycka att det inte är rättvist att jämföra snöutbredningen för de två fallen (med och utan NRI). Jämförelsen är rimlig eftersom R_{eff} och V_E (kalibreringskriterierna) blir desamma (se avsnitt 3.2.3) i de två fallen och då finns det inget som säger att den ena modellen är bättre än den andra.

Med tanke på att ingen separat kalibrering gjorts mot snöutbredningen och att inga funktioner för redistribuering av snö genom ras eller vind finns inlagda i modellen är överensstämmelsen förvånansvärt god. Man skall emellertid komma ihåg att mycket av variationerna i den ursprungliga Landsatklassificeringen försvinner vid omsamlingen, speciellt i fallet då enbart en pixel användes som gräns. Om 99 pixlar i 25 m upplösning inte är snötäckta beroende på till exempel för brant lutning blir de i 250 m upplösning klassificerade som snötäckta om den hundra pixeln innehåller snö.

Man skulle kunna tänka sig att utveckla modellen så att den skulle kunna hantera redistribuering av snö. Snö som faller på pixlar med för stor lutning skulle kunna flyttas till närmaste "nedströmsliggande" pixel med en vinkel under den kritiska gränsen. Detta skulle vara tämligen rätt fram medan att ta hänsyn till vind är mer svåröst. Även om det är ett mycket komplext problem har lovande resultat, där man utnyttjar sig av olika terrängparametrar, uppnåtts av bland andra Winstral *et al* (2002).

3.4.3.2 Vatteninnehåll

Som man ser i figur 10 stämmer inte de simulerade vattenekvivalentsvärden så väl överens med de uppmätta. Även om dessa skillnader till viss del beror på att man inte kan anta att modellen helt korrekt simulerar snötäcket då faktorer som omlagring av snö på grund av vind och ras inte är inkluderade i denna version av modellen bör man ifrågasätta kvaliteten och/eller efterprocesseringen på de gjorda georadarmätningarna. Om man studerar figur 10 ser man att det i uppmätta data är väldigt stora variationer punkterna emellan. Det är svårt att tro att variationer av denna storlek enbart härrör från naturliga processer. Många av mätpunkterna ligger i skog (se appendix 2) vilket kan vara en av orsakerna till dåliga data eftersom mätningar med georadar försvåras i skogsterräng.

Även om kvaliteten i data är låg kan man se den väntade positiva trenden mellan snödjup (vattenekvivalent) och höjd. Om data hade varit mer tillförlitlig skulle det kunna vara intressant att plotta vatteninnehållet mot sluttningsriktning och lutning men eftersom kvaliteten på tillgänglig data ansågs vara för låg utfördes inga vidare analyser. I detta arbete har inte rådata från georadarmätningarna varit tillgängliga och det är inte heller känt hur efterprocesseringen har gjorts och i vilket syfte processerad data bör användas. Eftersom många av mätpunkterna ligger i skogsområden förs det på Swedpower inom ramen för ”Snöprojektet” en diskussion om hur flyglinjerna i fortsättningen bör läggas och hur rådata bör processeras.

4 Diskussion och slutsatser

Den utvecklade modellen integrerar den traditionella HBV-modellen med ett rasterbaserat Geografiskt Information System fullt ut. Eftersom inga restriktioner på rumslig upplösning finns (beror på höjdmodellens upplösning) ökas möjligheterna att beskriva de olika variationerna inom ett område kraftigt. Den rasterbaserade modellen är dessutom ytterst väl lämpad för att använda fjärranalytiska data till uppdatering av modellen (d.v.s. som indata) eller utvärdering av modellresultat (d.v.s. kalibrering eller validering). (Förutsatt att man vet mätpunkternas koordinater kan naturligtvis även manuella mätningar av till exempel snödjup och grundvattennivåer användas i detta syfte.) Johansson *et al* (2003) beskriver en intressant approach, som har givit lovande resultat, på hur snöutbredningsdata från satelliter kan användas för att uppdatera snötäckets tjocklek i HBV-modellen. För att kunna göra detta har snörutinen i HBV-modellen distribuerats. Även om bara snörutinen distribuerats och upplösningen är väldigt grov ($4 \times 4 \text{ km}^2$) är modifieringen av modellen ett steg i riktning mot den sorts modell som utvecklats i detta arbete. Metodiken skulle kunna användas tillsammans med den modell som utvecklats i detta arbete. Med den högre upplösningen och den mer fysikaliskt rimliga modelleringen av snötäcket som NRI innebär är det inte otroligt att ännu bättre resultat skulle kunna uppnås.

I kalibrerings- och valideringssyfte skulle i framtiden inte bara snöutbredning utan även snöns mäktighet i form av georadarmätningar kunna användas. Kvaliteten på de georadarmätningar som fanns tillgängliga för detta arbete var som redan nämnts tvivelaktig men om tillförlitliga data fanns att tillgå skulle de på ett rättframt och självklart sätt kunna användas i kalibrering och validering eftersom ett uppmätt värde direkt kan jämföras med det i samma punkt modellerade. Att använda sig av georadarmätningar i HBV-modellen är inte lika självklart eftersom man inte, på grund av att modellen inte är distribuerad, på något enkelt sätt kan jämföra ett uppmätt värde med ett modellerat, se vidare Andréasson *et al* (2001).

Modellutveckling är en iterativ process, HBV-modellen har till exempel utvecklats kontinuerligt sedan 70-talet, och det finns naturligtvis saker som kan förbättras i den modell som utvecklats i detta arbete. Ett bra exempel på detta, som blev uppenbart när snöutbredningen studerades, är hur man skall hantera P_{CFMAX} . I framtida versioner kanske man skall nöja sig med en smältefaktor om inte sambandet mellan smältning i skog och öppen terräng är väl känt. En annan sak som säkert skulle kunna förbättras är interpoleringen av temperatur och nederbörd. Avståndsviktad medelvärdesinterpolering är en relativt enkel metod som är lätt att använda men den är troligtvis inte den mest optimala.

Trots att modellen är ung och att det finns saker som säkert skulle kunna förbättras har, som redan diskuterats, mycket lovande resultat erhållits. Modellen lyckas på ett bra sätt beskriva vattenföring och även snötäckets utbredning trots att kalibrering endast gjordes mot uppmätt vattenföring. Eftersom det är ett känt problem att vitt skilda parameteruppsättningar kan ge likvärdiga resultat måste validering ske även mot de interna variablerna (t.ex snö, markfuktighet och avdunstning) för att man skall kunna uttala sig om modellens förmåga att beskriva områdets karakteristik. Allt för stora slutsatser kan inte dras utifrån att det modellerade snötäcket stämmer väl överens med verkligheten men det är ett resultat som stärker modellen.

Även om jämförelsen med HBV-96 av olika anledningar som redan diskuterats (se avsnitt 3.4.2.1) inte är helt rättvis kan man säga att resultaten är likvärdiga speciellt med tanke på att båda HBV-96 körningarna ligger inom den period som använts för att kalibrera modellen. Generellt sett kan man säga att R_{eff} är något lägre och V_E något bättre för den modell som utvecklats i detta arbete jämfört med HBV-96. Det kanske inte är realistiskt att tro att avsevärt mycket bättre resultat skall erhållas med en modell som utvecklades under några månader jämfört med en modell som har varit under utveckling sedan 70-talet. Att likvärdiga resultat erhållits redan i detta skede bör ses som en framgång speciellt med tanke på att man nu har en modell som är distribuerad och som är väl lämpade att hantera distribuerade indata från fjärranalys, en datakälla som troligtvis kommer att utnyttjas allt mer i framtiden.

I de körningar som givit bäst resultat har endast en temperatur och två nederbördsstationer använts. Resultaten skulle säkerligen kunna förbättras om data från fler pålitliga stationer användes eftersom det inte är troligt att temperaturens och nederbördens variationer i området fångas upp av en (temperatur) respektive två (nederbörd) stationer även om korrigering för höjd görs. Vattenfallstationerna skulle kunna användas till detta efter lämpliga korrigeringar av data. Man skulle kunna tänka sig att man jämför data från Vattenfallstationerna med SMHI stationerna för att på så vis upptäcka systematiska fel. Någon form av riktlinjer för hur data från Vattenfallstationerna skall korrigeras bör upprättas.

PEST är ett bra verktyg för att automatisera kalibreringen men man kan som tidigare nämnts inte vara säker på att man erhåller den bästa parameteruppsättningen. Det finns effektivare algoritmer (se avsnitt 2.9.2) för att lösa den här sortens optimeringsproblem och det skulle vara intressant att se hur mycket användandet av sådana skulle kunna förbättra resultaten.

Avslutningsvis kan man säga att den helt distribuerade modellen som har utvecklats i detta arbete har gett lovande resultat men att det naturligtvis finns utrymme för förbättringar. Det rekommenderas att modellutvecklingen fortsätter och det som kanske ligger närmast till hands är titta på alternativa interpoleringsmetoder för temperatur och nederbörd. Förutom andra mer eller mindre traditionella interpoleringsmetoder skulle man kunna tänka sig att använda fjärranalys för att studera nederbördsmonster. Dessa monster skulle sedan kunna användas för

att göra interpoleringen mer intelligent. Fler stationer skulle som tidigare nämnts troligtvis förbättra resultaten därför är det för Tjaktjajaures del viktigt att se över de data som rapporteras från Vattenfallstationerna och att riktlinjer sätts upp för hur rådata skall korrigeras. Det vore också intressant att se hur resultaten påverkas av att arbeta med en annan upplösning samt att titta på alternativa angreppssätt i avrinnings- och routingrutinen. Man skulle kunna tänka sig att man gör den antingen helt aggregerad eller helt distribuerad och i så fall löser routingen på annat sätt än med hjälp av P_{MAXBAS} . Ett naturligt och viktigt steg är att koppla modellen till det arbete som pågår inom "Snöprojektet" och utarbeta en metodik för hur klassificerade snöutbredningskartor och snödjupsmätningar (t.ex georadar) kan användas för att kalibrera, validera och uppdatera modellen.

5 Rekommendationer för framtiden

En fortsatt modellutveckling rekommenderas. En sådan utveckling skulle bland annat innebära arbete med vad som nämns i föregående stycke. Det första steget i utvecklingen är dock att efter diskussion med berörda parter sätta upp och utvärdera modellen i dess nuvarande form för andra områden. Kalibrering och validering bör ske på samma sätt som i detta arbete för att resultaten skall kunna jämföras på ett bra sätt. Eftersom snöutbredningskartor är nödvändiga i valideringsfasen krävs en samordning med arbetet inom "Snöprojektet". Om det fortsatta arbetet faller väl ut bör stor vikt läggas vid att utarbeta en metodik för användandet av snöutbredningskartor och snödjupsmätningar för att kalibrera, validera och uppdatera modellen. Detta bör naturligtvis göras gemensamt med ansvariga inom "Snöprojektet".

Att kunna prediktera tidpunkten för vårflodens start och dess storlek är mycket viktigt ur kraftproduktionssynpunkt. Därför skulle det, när modellen är uppsatt och kalibrerad, vara intressant att jämföra storleken på den nya modellens snömagasin med HBV-modellens, hur väl de olika modellerna lyckas prediktera vårflodens start samt att titta på volymfelen för enskilda vårfloder.

6 Referenser

- Af Klintberg, L., Bergström, S., Ohlsson, P-E., Ehlin, U., Sjöborg, K-Å. (1990). *Riktlinjer för bestämning av dimensionerande flöden för dammanläggningar - Slutrapport från Flödeskommittén*, Statens Vattenfallsverk, Svenska Kraftverksföreningen, Sveriges Meteorologiska och Hydrologiska Institut, Stockholm och Norrköping, 103 sid.
- Andréasson, J., Gyllander, A., Johansson, B., Källgården, J., Lindell, S., Olofsson, J., Lundberg, A. (2001). Snötaxering med georadar – Bättre vårflödesprognoser med HBV-modellen?, *SMHI Hydrologi*, nr 87, 2001.
- Bergström, S. (1992). The HBV model – its structure and applications, *SMHI RH*, no 4 April 1992.
- Bergström, S. (1993). SVERIGES HYDROLOGI – grundläggande hydrologiska förhållanden, *SMHI / Svenska Hydrologiska Rådet*, Maj 1993, Norrköping.
- BKP. (1973) SEITEVARE KRAFTSTATION, TJAKTJAJAURE REGLERING
Vattenbyggnadsteknik beskrivning. 13 sid.
- Burrough, P. A., McDonnell, R. A. (1998). *Principles of Geographical Information Systems*, Oxford University Press Inc., New York, 333 pp.
- Cazorzi, F., Dalla Fontana G. (1996). Snowmelt modelling by combining air temperature and a distributed radiation index, *Journal of Hydrology*, 181, pp 169-187.
- Chen, D., Johansson, B. (2003). Temperaturen höjdberoende. En studie i Indalsälvens avrinningsområde, *SMHI Hydrologi*, Nr 88, 19 sid.
- Eklundh, L. (2000). Kap 7. Interpolation i *Geografisk informationsbehandling, metoder och tillämpningar*, Byggnadsforskningsrådet & ULI, Stockholm, 348 sid.
- Eriksson, B. (1981). Den potentiella evapotranspirationen i Sverige, *SMHI RMK*, no 28, Norrköping, Sweden.
- Evremar, Å. (1994). Avdunstningens höjdberoende i svenska fjällområden bestämd ur vattenbalans och med modellering, *SMHI Hydrology*, No. 52, Norrköping
- Hock, R. (1999). A distributed temperature-index and snowmelt model including potential direct solar radiation, *Journal of Glaciology*, Vol. 45, No. 149, 1999.
- Hock, R. (2003a). Temperature index melt modelling in mountain areas, *Journal of Hydrology*, 282, pp 104-115.
- Hock, R. (2003b). Glacier Melt: A review of processes and their modelling, Submitted to *Progress in Physical Geography*.

- Johansson, B., Andreasson, J., Jansson, J. (2003). Satellite data on snow cover in the HBV model. Method development and evaluation, *SMHI Hydrology*, no 90, 2003.
- Johansson, B. (2000). Areal Precipitation and Temperature in the Swedish Mountains – An Evaluation from a Hydrological Perspective, *Nordic Hydrology*, 31 (3) pp 207-228.
- Jones J. A. A. (1999), *Global Hydrology*, Addison Wesley Longman Limited 1997, Singapore 1999, 399 pp.
- Lindström, G., Johansson, B., Persson, M., Gardelin, M., Bergström, S. (1997). Development and test of the distributed HBV-96 hydrological model, *Journal of Hydrology*, 201, pp 272-288.
- Nash, J. E., Sutcliffe, J. V. (1970). River flow forecasting through conceptual models, part 1 – a discussion of principles. *Journal of Hydrology* 10: 282-290.
- Rahm, L., Sjöberg A. (1971). *BYGG Handbok för hus-, väg.- och vattenbyggnad*, Huvuddel 1A, AB BYGGMÄSTARENS FÖRLAG, Stockholm, 845 sid.
- Refsgaard, J. C. (2000). Towards a Formal Approach to calibration and Validation of Models Using Spatial Data, in R. Grayson and G. Blöschl, eds. *Spatial Patterns in Catchment Hydrology: Observations and Modelling* © 2000 Cambridge University Press. All rights reserved. Printed in the United Kingdom.
- Rott, H., Nagler, T., Glendinning, G., Wright, G., Miller, D., Gauld, J., Caves, R., Ferguson, R., Quegan, S., Turpin, O., Clark, C., Joahnsson, B., Gyllander, A., Baumgartner, M., Kleindienst, H., Voigt, S., Pirker, O. (2000). HYDALP Hydrology of Alpine and High Latitude Basins. Final Report. (Contract ENV4-CT96-0364 for the European Union, DG XII)., Institut für Meteorologie and Geophysik, Universität Innsbruck, Mitteilung No. 4.
- SNA (1995). Sweden's National Atlas: Climate, Lakes and Waters, Eds: Raab, B. and Vedin, H., Bokförlaget Bras Böcker ISBN 91-7024-898-2.
- Seibert, J. (1996). HBV-light, User's manual, Uppsala University, Institute of Earth Science, Department of Hydrology, Uppsala.
- Seibert, J. (1997). Estimation of Parameter Uncertainty in the HBV Model, *Nordic Hydrology*, 28 (4/5), pp 243-262.
- Seibert, J. (1999). Conceptual runoff models – fiction or representation of reality? Acta Univ. Ups., *Comprehensive Summaries of Uppsala Dissertations from the Faculty of Science and Technology* 436. pp 52. Uppsala. ISBN 91-554-4402-4.
- SMHI (1994). Svenskt Vattenarkiv, Vattenföring i Sverige – Del 1 Vattendrag i Bottenviken, *SMHI Hydrologi*, Nr 40, 1994.
- Strahler, A., N. (1964). *Quantitative geomorphology of drainage basins and channel networks, section 4-II. In: PCRaster Version 2 Manual.*

- Uhlenbrook, S., Roser, S., Tilch, N. (2003). Hydrological process representation at the meso-scale: The potential of a distributed, conceptual catchment modell, University of Freiburg, Institute of Hydrology, Freiburg.
- Uljanova, M. (2002). Förstudie automatstationer i Luleälven, *SWEDPOWER AB*
Rapportnummer 1529400-001 21 sid.
- van Dam, O. (2000). Modelling incoming Potential Radiation on a land surface with PCRaster. POTRAD5.MOD manual. *Utrecht Centre for Environment and Landscape dynamics, Utrecht University, the Netherlands.*
- van Dam, O., van Asch, T. (2001). Calibration with PEST, part 2 chapter 4 in: Forest Filled With Gaps, Effects of Gap Size on Water and Nutrient Cycling in Tropical Rain Forrest, A study in Guyana, *Tropenbos-Guyana Series 10, Tropenbos-Guyana Programme, Georgetown, Guyana.*
- Van Deursen, W. P. A. (1995). Geographical Information Systems and Dynamic Models. *Ph.D. thesis*, Utrecht University, NGS Publications 190, 198 pp. Electronically available through www.carthogo.nl
- Wester, K. (1998). Riktlinjer för bestämning av den tematiska noggrannheten I Landtäckedata, Rapport för Rymdstyrelsen, Naturvårdsverket och Miljödatacentrum i Kiruna, *Rymdbolaget, X-PUBL-37, 25 sid.*
- Winstral, A., Elder, K., Davis, R. E. (2002). Spatial Snow Modeling of Wind-Redistributed Snow Using Terrain-Based Parameters, *Journal of Hydrometeorology*, volume 3 pp. 524-538.

Muntliga

| | |
|-------------------|---|
| Angela Lundberg | Luleå Tekniska Universitet, Angela.Lundberg@sb.luth.se |
| Cees Wesseling | PCRaster team, cees@pcraster.nl |
| Derek Karssenber | PCRaster team, d.karssenber@geog.uu.nl |
| Kenneth Holmström | TOMLAB Optimization, tomlab@tomlab.biz |
| Mikael Sundby | Vattenfall Produktion, mikael.sundby@vattenfall.com |
| Thomas Hedvall | Swedpower Hydrologi och GIS, thomas.hedvall@Swedpower.com |

Internet

| | |
|--------------------------|---|
| HydAlp (1999) | http://dude.uibk.ac.at/Projects/HydAlp/ |
| PCRaster (2003) | http://www.geog.uu.nl/pcraster/ |
| PEST (2003) | http://www.sspa.com/pest/ |
| Vattenfall (2003) | http://www.vattenfall.se |
| TOMLAB (2003) | http://www.tomlab.se |
| Johnson (2003) | http://faculty.juniata.edu/johnson/projects |
| Olle Vejde Förlag (2003) | http://home.swipnet.se/ollevejde/statistikord |

Anm: Samtliga sidor har besökts i olika omgångar under hösten 2003

Övriga

PCRaster Version 2 Manual, 2003.

PEST Model-Independent Parameter Estimation, Watermark Numerical Computing, Fourth Edition Manual, 2002.

| | |
|----------|---|
| 7 | APPENDIX |
| 1 | Datasammanställning |
| 2 | Flyglinjer |
| 3 | A. Parameterintervall använda vid kalibrering med PEST B. Parameteruppsättningar |
| 4 | Uppmätt och simulerad avrinning |

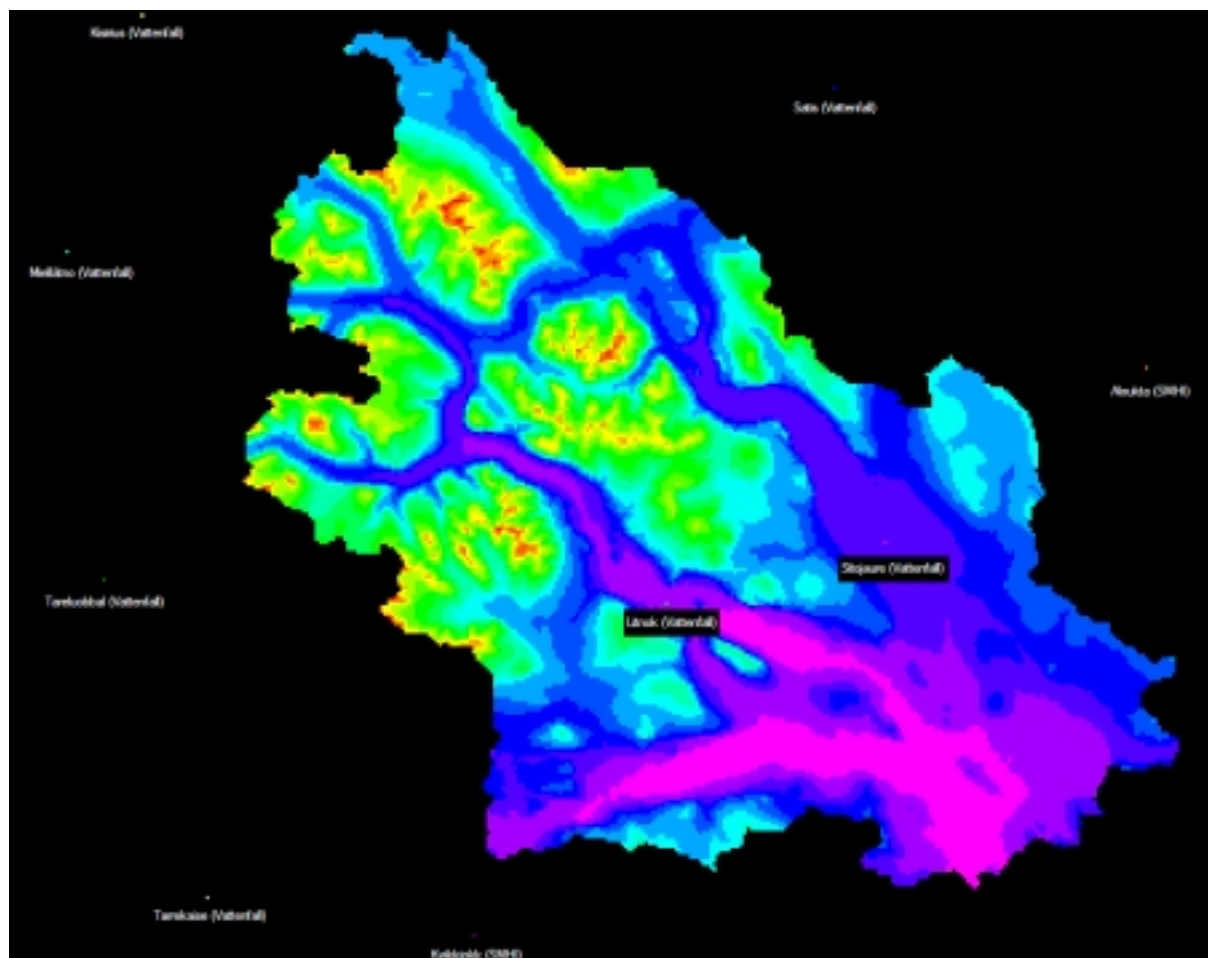
Appendix 1

Datasammanställning

Sammanställning av tillgänglig meteorologisk och hydrologisk data mellan 1982-10 – 2003-10

| Stationsnamn | X-koord. (RTM) | Y-koord. (RTM) | Z-koord (möh) | Förvaltare |
|--------------|----------------|----------------|---------------|------------|
| Kisirius | 1559865 | 7497014 | 586 | Vattenfall |
| Litnok | 1598150 | 7454050 | 635 | Vattenfall |
| Miellätno | 1554431 | 7479958 | 697 | Vattenfall |
| Satis | 1610350 | 7491751 | 450 | Vattenfall |
| Sitojaure | 1614090 | 7458576 | 650 | Vattenfall |
| Tarrekaise | 1564506 | 7432689 | 655 | Vattenfall |
| Tareluobbal | 1557044 | 7455879 | 740 | Vattenfall |
| Aloukta* | 1633130 | 7471390 | 385 | SMHI |
| Kvikkjokk* | 1584000 | 7429920 | 332 | SMHI |
| Jokkmokk* | 1677220 | 7395150 | 260 | SMHI |
| Ritsem* | 1570380 | 7515480 | 521 | SMHI |
| Akse* | 1608250 | 7452450 | 530 | SMHI |
| Tjåmotis* | 1619220 | 7426980 | 300 | SMHI |

* Vattenfall Produktion använder sig av SMHI's stationsvärden i HBV-modellen. Endast data från Aloukta och Kvikkjokk har använts i körningar med modellen som utvecklats i detta arbete.



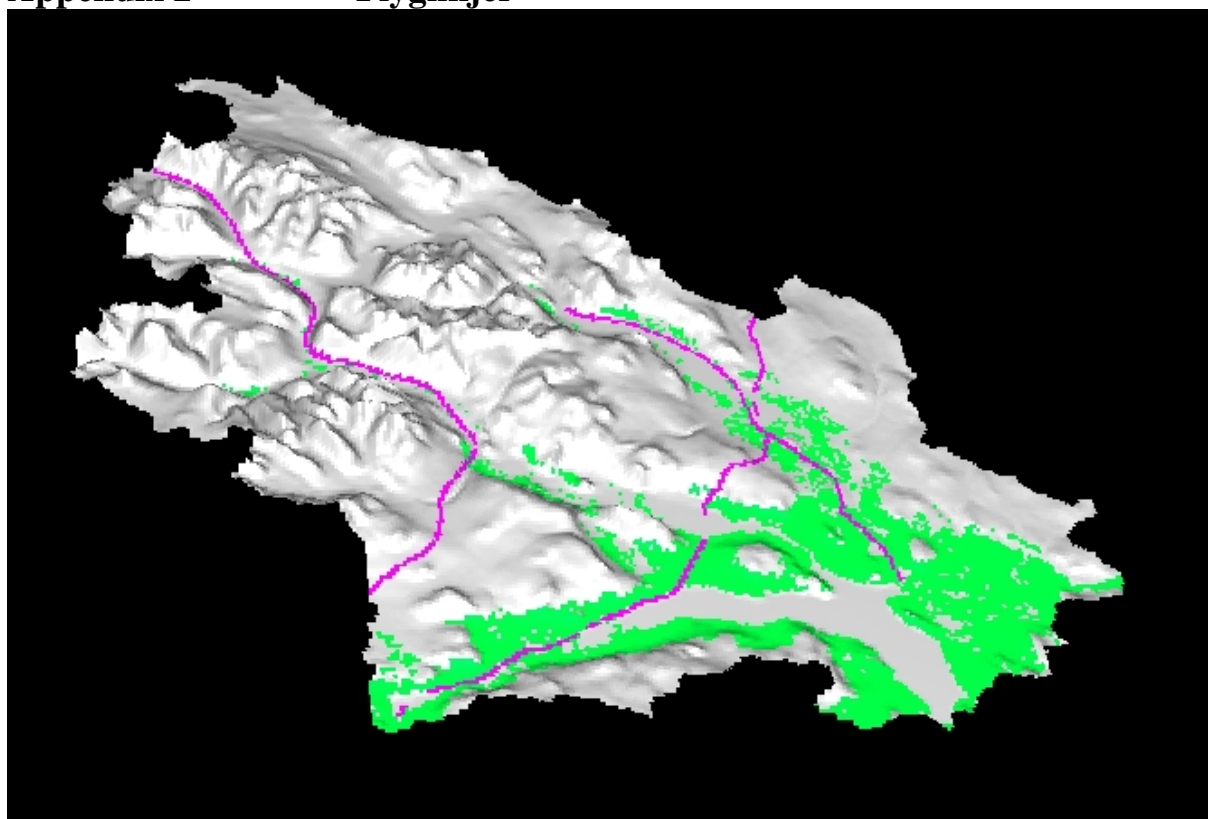
Månad/Station Ki Mi Ta Te Li Si Sa Al Kv Tj

| | | | | | | | | | | |
|------|--------|--------|-------|--------|-------|--------|--------|-------|-------|------|
| 9403 | Yellow | | | | Green | Green | | Blue | Green | Grey |
| 9404 | Yellow | | | Green | Green | | | Blue | Green | Grey |
| 9405 | Green | | | | Green | Green | | Blue | Green | Grey |
| 9406 | Green | | | | Green | Green | | Blue | Green | Grey |
| 9407 | Green | | | | Green | Green | | Blue | Green | Grey |
| 9408 | Green | | | | Green | Green | | Blue | Green | Grey |
| 9409 | Green | | | | Green | Green | | Blue | Green | Grey |
| 9410 | Green | | | | Green | Green | | Blue | Green | Grey |
| 9411 | Green | | | Green | Green | Green | | White | Green | Grey |
| 9412 | Green | | | Green | Green | Green | | Blue | Green | Grey |
| 9501 | Green | | | Green | Green | Green | | Blue | Green | Grey |
| 9502 | Green | | | Green | Green | Green | | Blue | Green | Grey |
| 9503 | Green | | | Green | Green | Green | | Blue | Green | Grey |
| 9504 | Green | | | Green | Green | Green | | Blue | Green | Grey |
| 9505 | Green | | | Green | Green | Green | | Blue | Green | Grey |
| 9506 | Green | | | Green | Green | Green | | Blue | Green | Grey |
| 9507 | Green | | | Green | Green | Green | | Blue | Green | Grey |
| 9508 | Green | | | Green | Green | Green | | Blue | Green | Grey |
| 9509 | Green | | Green | Yellow | Green | Green | | Blue | Green | Grey |
| 9510 | Green | | Green | Yellow | Green | Green | | Blue | Green | Grey |
| 9511 | Green | | Green | Green | Green | Green | | Blue | Green | Grey |
| 9512 | Green | | Green | Green | Green | Green | | Blue | Green | Grey |
| 9601 | Green | | Green | Green | Green | Green | | Blue | Green | Grey |
| 9602 | Green | | Green | Green | Green | Green | | Blue | Green | Grey |
| 9603 | Green | | Green | Green | Green | Green | | Blue | Green | Grey |
| 9604 | Green | | Green | Green | Green | Green | | Blue | Green | Grey |
| 9605 | Green | | Green | Green | Green | Green | | Blue | Green | Grey |
| 9606 | Green | | Green | Green | Green | Green | | Blue | Green | Grey |
| 9607 | Green | | Green | Green | Green | Green | | Blue | Green | Grey |
| 9608 | Green | | Green | Green | Green | Green | | Blue | Green | Grey |
| 9609 | Green | | Green | Green | Green | Green | | Blue | Green | Grey |
| 9610 | Green | | Green | Green | Green | Green | | Blue | Green | Grey |
| 9611 | Green | | Green | Green | Green | Green | | Blue | Green | Grey |
| 9612 | Green | | Green | Green | Green | Green | | Blue | Green | Grey |
| 9701 | Green | | Green | Green | Green | Green | | Blue | Green | Grey |
| 9702 | Green | | Green | Yellow | Green | Green | | Blue | Green | Grey |
| 9703 | Green | Yellow | White | Green | Green | Green | | Blue | Green | Grey |
| 9704 | Green | Yellow | White | Green | Green | Yellow | | Blue | Green | Grey |
| 9705 | Green | Yellow | White | Green | Green | Yellow | | Blue | Green | Grey |
| 9706 | Green | Yellow | White | Green | Green | Green | | Blue | Green | Grey |
| 9707 | Green | Yellow | White | Green | Green | Green | | Blue | Green | Grey |
| 9708 | Green | Yellow | White | Green | Green | Green | | Blue | Green | Grey |
| 9709 | Yellow | Green | Green | Green | Green | Green | | Blue | Green | Grey |
| 9710 | Yellow | Green | Green | Green | Green | Green | | Blue | Green | Grey |
| 9711 | Yellow | Green | Green | Green | Green | Green | | Blue | Green | Grey |
| 9712 | Yellow | Green | Green | Green | Green | Green | | Blue | Green | Grey |
| 9801 | Yellow | Green | Green | Green | Green | Green | | Blue | Green | Grey |
| 9802 | Yellow | Green | Green | Green | Green | Yellow | | Blue | Green | Grey |
| 9803 | Yellow | Yellow | White | Green | Green | Green | Yellow | Blue | Green | Grey |
| 9804 | Green | Yellow | White | Green | Green | Green | Green | Blue | Green | Grey |

| Månad/Station | Ki | Mi | Ta | Te | Li | Si | Sa | Al | Kv | Tj |
|---------------|-------|--------|--------|-------|-------|--------|-------|------|-------|------|
| 9805 | Green | Green | | Green | Green | Green | Green | Blue | Green | Grey |
| 9806 | Green | Green | | | | Green | Green | Blue | Green | Grey |
| 9807 | Green | Green | | | | Green | Green | Blue | Green | Grey |
| 9808 | Green | Green | | | | Green | Green | Blue | Green | Grey |
| 9809 | Green | Green | | | | Green | Green | Blue | Green | Grey |
| 9810 | Green | Green | | | | Green | Green | Blue | Green | Grey |
| 9811 | Green | Green | | | | Green | Green | Blue | Green | Grey |
| 9812 | Green | Green | | | | Green | Green | Blue | Green | Grey |
| 9901 | Green | Green | | | | Green | Green | Blue | Green | Grey |
| 9902 | Green | Green | | | | Green | Green | Blue | Green | Grey |
| 9903 | Blue | Blue | | | | Green | Green | Blue | Green | Grey |
| 9904 | Blue | Blue | | | | Green | Green | Blue | Green | Grey |
| 9905 | Blue | Blue | | | | Green | Green | Blue | Green | Grey |
| 9906 | Blue | Blue | | | | Green | Green | Blue | Green | Grey |
| 9907 | Blue | Blue | | | | Green | Green | Blue | Green | Grey |
| 9908 | Blue | Blue | | | | Green | Green | Blue | Green | Grey |
| 9909 | Blue | Blue | | | | Green | Green | Blue | Green | Grey |
| 9910 | Blue | Blue | | Green | Green | Green | Green | Blue | Green | Grey |
| 9911 | Blue | Blue | | Green | Green | Green | Green | Blue | Green | Grey |
| 9912 | Blue | Blue | | Green | Green | Green | Green | Blue | Green | Grey |
| 0001 | Green | Green | | Blue | Blue | Blue | Blue | Blue | Green | Grey |
| 0002 | Green | Green | | Blue | Blue | Blue | Blue | Blue | Green | Grey |
| 0003 | Green | Yellow | | Blue | Blue | Blue | Blue | Blue | Green | Grey |
| 0004 | Green | Green | | Blue | Blue | Blue | Blue | Blue | Green | Grey |
| 0005 | Green | Green | | Blue | Blue | Blue | Blue | Blue | Green | Grey |
| 0006 | Green | Green | | Blue | Blue | Blue | Blue | Blue | Green | Grey |
| 0007 | Green | Green | | Blue | Blue | Blue | Blue | Blue | Green | Grey |
| 0008 | Green | Green | | Blue | Blue | Blue | Blue | Blue | Green | Grey |
| 0009 | Green | Green | | Blue | Blue | Blue | Blue | Blue | Green | Grey |
| 0010 | Green | Green | | Blue | Blue | Blue | Blue | Blue | Green | Grey |
| 0011 | | | Yellow | Blue | Blue | Blue | Blue | Blue | Green | Grey |
| 0012 | | | Yellow | | | | Blue | Blue | Green | Grey |
| 0101 | | | Yellow | | | Blue | Blue | Blue | Green | Grey |
| 0102 | Green | Green | Yellow | | | Blue | Blue | Blue | Green | Grey |
| 0103 | Green | Green | Yellow | | Blue | Blue | Blue | Blue | Green | Grey |
| 0104 | Green | Green | Yellow | | Blue | Blue | Blue | Blue | Green | Grey |
| 0105 | Green | Green | Yellow | Blue | Blue | Blue | Blue | Blue | Green | Grey |
| 0106 | Green | Green | Yellow | Blue | Blue | Blue | Blue | Blue | Green | Grey |
| 0107 | Green | Green | Yellow | Blue | Blue | Blue | White | Blue | Green | Grey |
| 0108 | Green | Green | Yellow | Blue | Blue | Blue | White | Blue | Green | Grey |
| 0109 | Green | Green | Yellow | Blue | Blue | Blue | White | Blue | Green | Grey |
| 0110 | Green | Green | Yellow | Blue | Blue | Blue | White | Blue | Green | Grey |
| 0111 | Green | Green | Yellow | Blue | Blue | Blue | White | Blue | Green | Grey |
| 0112 | | | Yellow | Blue | Blue | Blue | Blue | Blue | Green | Grey |
| 0201 | | | Yellow | | Green | | White | Blue | Green | Grey |
| 0202 | | | | | Green | Yellow | | Blue | Green | Grey |
| 0203 | | | | | Green | Green | | Blue | Green | Grey |
| 0204 | | | | | Green | Green | | Blue | Green | Grey |
| 0205 | | | | | Green | Green | | Blue | Green | Grey |
| 0206 | | | | | Green | Green | | Blue | Green | Grey |

| Månad/Station | Ki | Mi | Ta | Te | Li | Si | Sa | Al | Kv | Tj |
|---------------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| 0207 | | | | | | | | | | |
| 0208 | | | | | | | | | | |
| 0209 | | | | | | | | | | |
| 0210 | | | | | | | | | | |
| 0211 | | | | | | | | | | |
| 0212 | | | | | | | | | | |
| 0301 | | | | | | | | | | |
| 0302 | | | | | | | | | | |
| 0303 | | | | | | | | | | |
| 0304 | | | | | | | | | | |
| 0305 | | | | | | | | | | |
| 0306 | | | | | | | | | | |
| 0307 | | | | | | | | | | |
| 0308 | | | | | | | | | | |
| 0309 | | | | | | | | | | |

Om observationer finns för mer än hälften av dagarna i en månad markeras månaden



Flyglinjer för georadarmätningar under vecka 16, 2000. Det gröna visar områden klassificerade som skog.

Appendix 3

A. Parameterintervall använda vid kalibrering med PEST

| Parameter | Anmärkning |
|-----------------------------|---|
| $P_{WHC}=0.1$ | låst, värdet ändras ej under kalibreringen |
| $P_{CFR}=0.05$ | låst, värdet ändras ej under kalibreringen |
| $75 < P_{FCcal} < 400$ | |
| $-2.5 < P_{TT} < 2.5$ | |
| $0.7 < P_{SFCF} < 1.5$ | |
| $1 < P_{BETA} < 4$ | låst till ett vid kalibreringen då SMHI- och Vattenfallstationer användes |
| $0.3 < P_{LP} < 1$ | låst till ett vid kalibreringen då SMHI- och Vattenfallstationer användes |
| $0.3 < P_{PERC} < 5$ | |
| $0.1 < P_{alfa} < 1$ | |
| $1 < P_{CFMAX_open} < 7$ | kvoten open/forest låst till 2.5 under hela kalibreringen |
| $1 < P_{CFMAX_forest} < 7$ | kvoten open/forest låst till 2.5 under hela kalibreringen |
| $0.01 < P_{K_one} < 0.5$ | |
| $0.001 < P_{K_two} < 0.1$ | |
| $1 < P_{MAXBAS} < 5$ | |

Kort förklaring av de olika variablerna

| | |
|---------------------|---|
| P_{WHC} | Snöns vattenhållande förmåga. |
| P_{CFR} | Återfrysning av vatten i snötäcket. |
| P_{FCcal} | Faltkapacitet, markfuktighetens maximala värde. |
| P_{TT} | Tröskeltemperatur som avgör om nederbörden faller som regn eller snö |
| P_{SFCF} | Korrektionsfaktor för nederbörd i form av snö. |
| P_{BETA} | Empirisk konstant som bestämmer det relativa avrinningsbidraget från regn eller smältvatten vid en given markfuktighet. |
| P_{LP} | Tröskelvärde för kvoten mellan markfuktighet och fältkapacitet som avgör vid vilken markfuktighet som den verkliga avdunstningen antas vara lika med den potentiella. |
| P_{PERC} | Maximal perkolationshastighet mellan övre och nedre grundvattenboxen. |
| P_{alfa} | Variabel som styr graden av olinjäritet i utflödet från den övre grundvattenboxen. |
| P_{CFMAX_open} | Grad-dag faktor som styr snösmältning i öppen terräng |
| P_{CFMAX_forest} | Grad-dag faktor som styr snösmältning i skogsterräng. |
| P_{K_one} | Recessionskoefficient som styr utflödet från den övre grundvattenboxen. |
| P_{K_two} | Recessionskoefficient som styr utflödet från den nedre grundvattenboxen. |
| P_{MAXBAS} | Routingparameter som styr längden av den viktningfunktion som används för att fördela och fördröja genererat flöde. |

B. Parameteruppsättningar

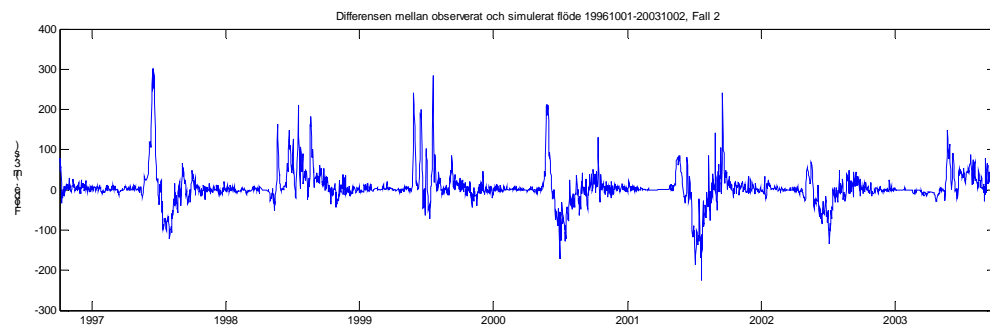
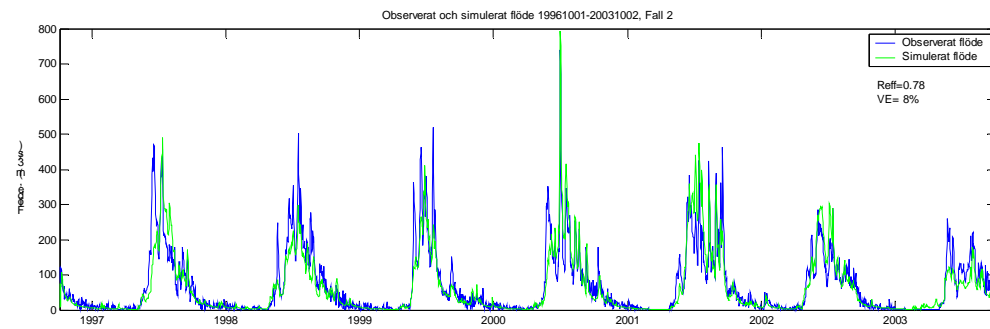
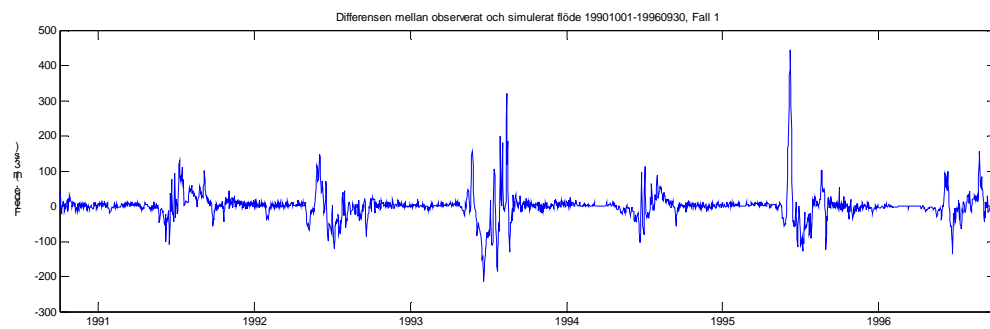
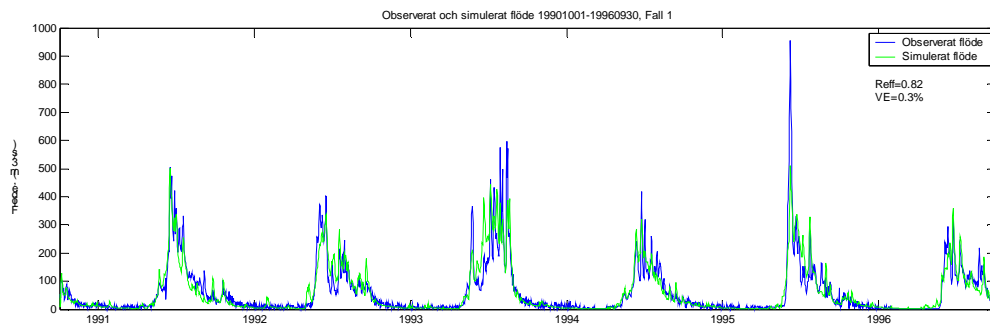
| Parameter | SMHI stationer | SMHI- och Vattenfallstationer |
|---------------------|----------------|-------------------------------|
| P_{WHC} | 0.10 | 0.10 |
| P_{CFR} | 0.05 | 0.05 |
| P_{FCcal} | 75.00 | 75.00 |
| P_{TT} | -2.03 | -1.87 |
| P_{SFCF} | 1.14 | 1.65* |
| P_{BETA} | 1.00 | 1.00 |
| P_{LP} | 1.00 | 1.00 |
| P_{PERC} | 3.26 | 2.99 |
| P_{alfa} | 0.16 | 0.41 |
| P_{CFMAX_open} | 1.20 | 1.02 |
| P_{CFMAX_forest} | 0.48 | 0.41 |
| P_{K_one} | 0.15 | 0.11 |
| P_{K_two} | 0.066 | 0.063 |
| P_{MAXBAS} | 2.76 | 2.56* |

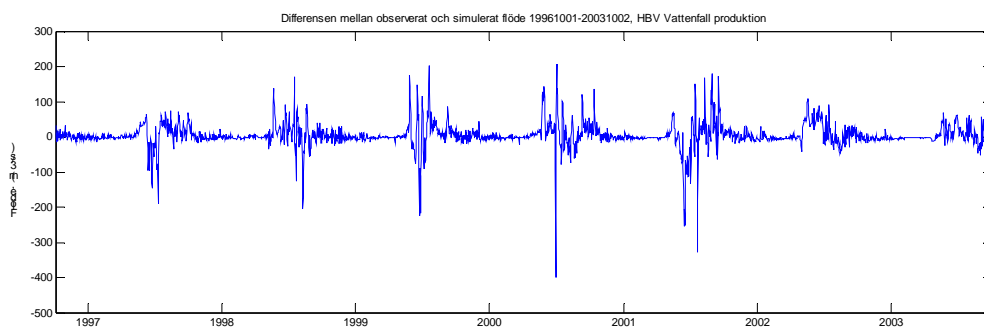
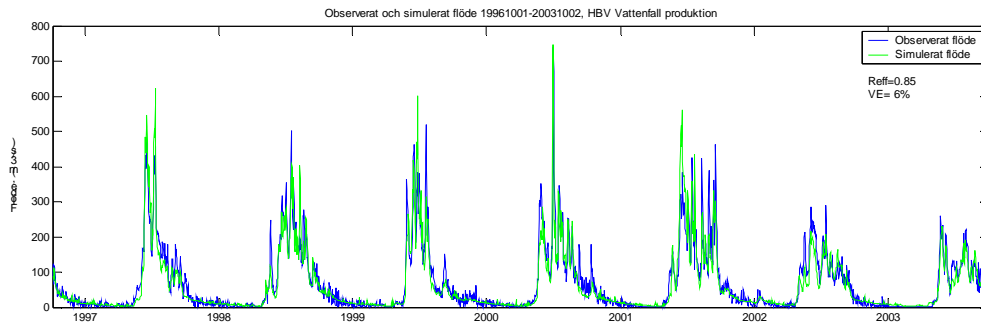
* Ändrades manuellt efter kalibrering med PEST

Appendix 4

Uppmätt och simulerad avrinning

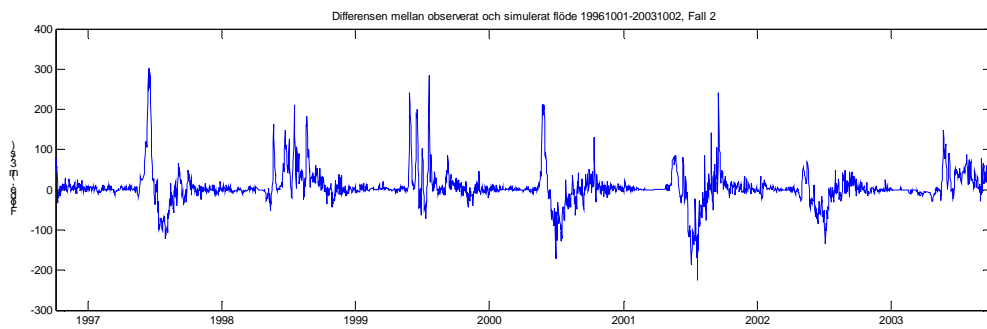
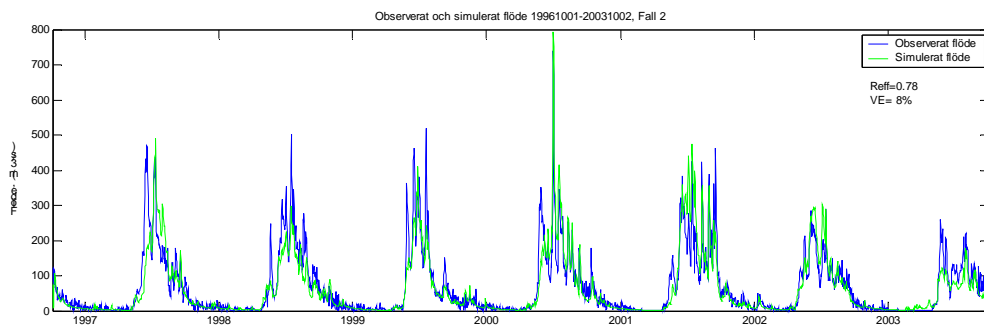
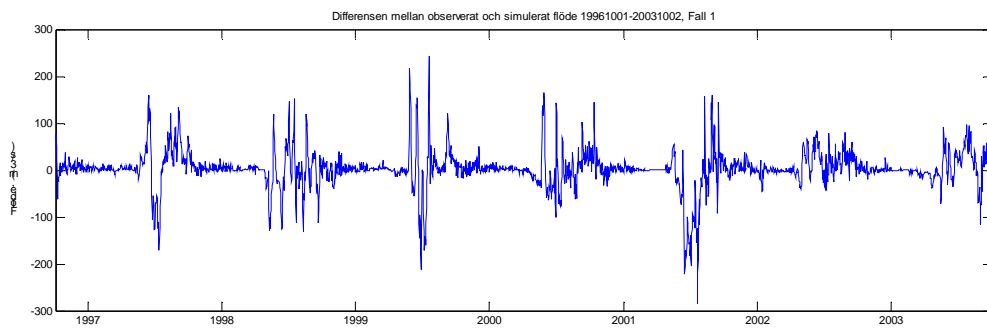
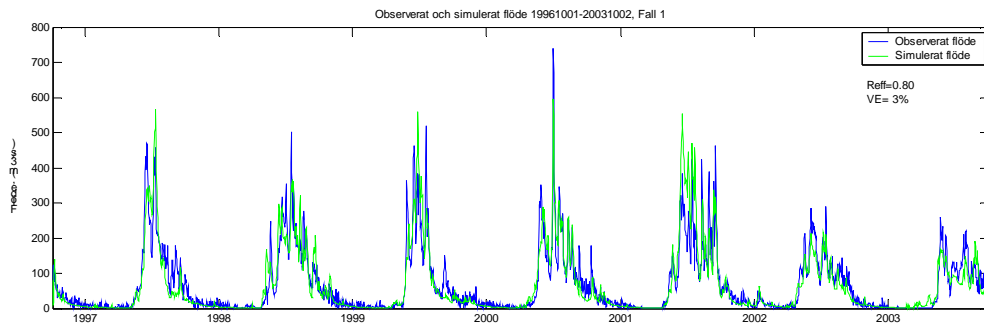
Kalibrering

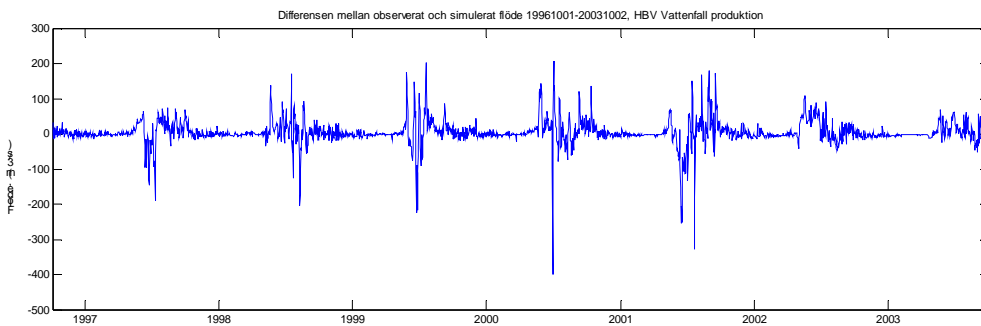
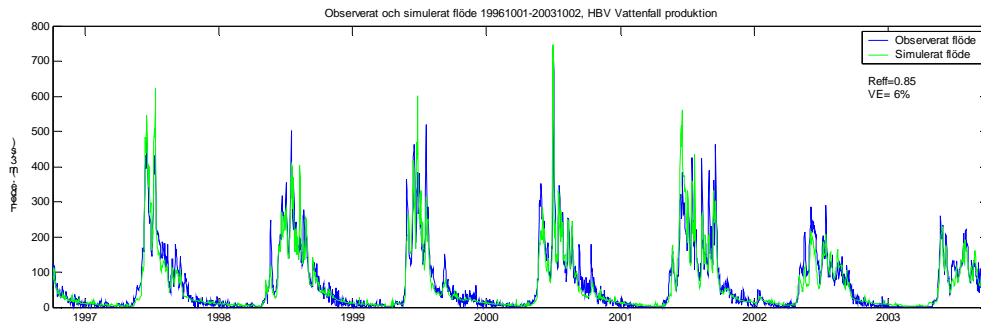




| | <u>Modell utvecklad i detta arbete</u> | | <u>HBV-96</u> |
|-----------------------------|--|---------------|---------------|
| | Fall 1 | Fall 2 | - |
| R_{eff} | 0.82 | 0.75 | 0.88 |
| V_E | 0.3 % | -0.2 % | 6.1 % |

Validering





| | <u>Modell utvecklad i detta arbete</u> | | <u>HBV-96</u> |
|------------------------|--|---------------|---------------|
| | Fall 1 | Fall 2 | - |
| R_{eff} | 0.80 | 0.78 | 0.85 |
| V_E | 3.1 % | 8.1 % | 6.1 % |