

Utveckling och tillämpning av en GIS-baserad hydrologisk modell

Development and application of a GIS based
hydrological model

Ida Westerberg

Referat

Utveckling och tillämpning av en GIS-baserad hydrologisk modell

Ida Westerberg

En helt distribuerad GIS-baserad hydrologisk modell för modellering i avrinningsområden på lokal/regional skala har byggts upp i PCRaster. Arbetet utfördes på *IVL Svenska Miljöinstitutet AB* inom ramen för EU-projektet *TWINBAS*, som har som mål att identifiera kunskapsluckor inför implementeringen av EU:s ramdirektiv för vatten. Modellen är tänkt att användas i *WATSHMAN (Watershed Management System)*, IVLs verktyg för vattenplanering i avrinningsområden där bland annat källfördelningsberäkningar och åtgärdsanalyser ingår. Den uppbyggda modellen är en hybrid mellan en fysikalisk och en konceptuell hydrologisk modell och predikterar vattenföring på pixelnivå i avrinningsområden. Simuleringen drivs av dygnsmedelvärden för temperatur och nederbörd och modellen tar hänsyn till markanvändning, jordart, topografi och sjöar. De modellekvationer som används är grad-dagsmetoden för snö, Blainey-Criddle för evapotranspiration, Green-Ampt för infiltration, linjärt magasin för grundvatten och Mannings ekvation för flödesrouting.

Det geografiska informationssystemet och den hydrologiska modellen är helt integrerade, vilket gör att alla parametervärden beräknas för varje enskild pixel. Som utdata ger modellen en rasterkarta för varje tidssteg för en i förväg bestämd parameter, eller tidsserier över parametervärden i definierade punkter. Vattnet transporteras i ett utifrån höjdmodellen genererat flödesnätverk och vattnets flödesväg bestäms därmed på pixelnivå. Minsta möjliga pixelstorlek bestäms således utifrån höjdmodellens upplösning, och var vid denna tillämpning 50 m gånger 50 m. Modellens uppbyggnad med raster gör det enkelt att använda data från klimatmodeller eller fjärranalys.

Avrinningsområdet för Kölstaån, ett biflöde till Köpingsån i Mälardalen, har använts för att utvärdera modellen. Integreringen av GIS och hydrologisk modell fungerade mycket väl och gav stora fördelar t ex vad gäller att ta hänsyn till sjöar och markanvändning. Modellen kalibrerades med data från åren 1981 till 1986 och det erhållna volymfelet var då 0,1 % och R_{eff} -värdet (Nash & Sutcliffe) 0,55. Stora variationer erhöles dock mellan åren; för de tre bästa åren låg R_{eff} -värdet mellan 0,70 och 0,80. Ett mycket kraftigt nederbördstillfälle samt regleringar i huvudfåran av vattendraget ligger troligtvis bakom de mindre väl beskrivna åren. Även under valideringsperioden (1987 till 1991) fungerade modellen väl, så när som på att avdunstningen överskattades på våarna (antagligen beroende av det stora regnet under kalibreringen), och R_{eff} -värde och volymfel hamnade på 0,48 respektive -21 %, även här med stora variationer mellan åren. Resultaten är lovande och modellen har många fördelar jämfört med den nuvarande WATSHMAN-modellen. Den skulle kunna förbättras ytterligare genom att dela upp grundvattnet i två magasin samt förfina evapotranspirations- och infiltrationsrutinerna. Den höjdmodellsbaserade modellen bör utvärderas även i andra mer kuperade områden samt mot mer distribuerade data.

Nyckelord: GIS, distribuerad hydrologisk modellering, Mälarens avrinningsområde, PCRaster

Abstract

Development and application of a GIS-based hydrological model

Ida Westerberg

A distributed hydrological rainfall-runoff model has been developed using a GIS integrated with a dynamic programming module (PCRaster). The model has been developed within the framework of the EU-project *TWINBAS* at *IVL Swedish Environmental Research Institute*, and is intended for use in *WATSHMAN* – a tool for watershed management developed at IVL. The model simulates runoff from a catchment based on daily mean values of temperature and precipitation. The GIS input data consist of maps with soil type, land-use, lakes, rivers and a digital elevation model. The model is a hybrid between a conceptual and a physical model. The snow routine uses the degree-day method, the evapotranspiration routine uses the Blainey-Criddle equation, the infiltration routine is based on Green-Ampt, groundwater is modelled assuming a linear reservoir and the flow routing is done with the kinematic wave equation combined with Manning's equation.

The GIS and the hydrologic model are embedded in one another, allowing calculation of each parameter in each grid cell. The output from the model consists of raster maps for each time step for a pre-defined parameter, or a time series for a parameter at a specified grid cell. The flow network is generated from the digital elevation model and determines the water flow on the grid scale. The smallest possible grid size is thus obtained from the resolution of the digital elevation model. In this implementation the grid size was 50 m x 50 m. The raster structure of the model allows for easy use of data from climate models or remotely sensed data.

The model was evaluated using the River Kølstaån catchment, a part (110 km²) of the Lake Mälaren catchment, which has its outflow in central Stockholm, Sweden. The integration of the GIS and the hydrologic model worked well, giving significant advantages with respect to taking lakes and land-use into account. The evaluation data consisted of observed run-off for the period 1981 to 1991. The result from the calibration period shows a great variation in R_{eff} (Nash & Sutcliffe) between the years, the three best years having R_{eff} -values of 0.70 – 0.80. The R_{eff} -value for the entire calibration period was 0.55 and 0.48 for the validation period, where again there was great variation between different years. The volume error was 0.1 % for the calibration period and -21 % for the validation period. The evapotranspiration was overestimated during the validation period, which is probably a result of excess rain during the calibration period. The results are promising and the model has many advantages – especially the integrated GIS-system – compared to the present *WATSHMAN* model. It could be further developed by introducing a second groundwater storage and refining the evapotranspiration and infiltration routine. Given the promising results, the model should be evaluated in other larger and hillier areas and preferably against more distributed data.

Keywords: GIS, distributed hydrologic modelling, Lake Mälaren catchment, PCRaster

Förord

Detta examensarbete inom civilingenjörsprogrammet i Miljö- och vattenteknik vid Uppsala universitet, har utförts på *IVL Svenska Miljöinstitutet AB* inom ramen för EU-projektet *TWINBAS*. Projektet har som mål att fylla kunskapsluckor inför implementeringen av ramdirektivet för vatten.

Ett varmt tack riktas till min handledare vid IVL, Jessica Zakrisson, som alltid tagit sig tid att ge råd och stöd i modelleringsarbetet, samt givit en spännande inblick i det verkliga miljöarbetet. Jag vill även tacka alla andra på Vattenmiljö och GIS-avdelningen på IVL för trevlig samvaro och värdefull hjälp med GIS-program och andra frågor under arbetet. Ett speciellt tack till min ämnesgranskare Lars-Christer Lundin vid Uppsala universitet som givit värdefulla kommentarer både på modelleringsresultaten och rapporten. Sist men inte minst vill jag tacka alla andra som stött mig under arbetet samt läst och kommenterat rapporten.

Department of Earth Sciences, Uppsala University, Villavägen 16, SE - 752 36
Uppsala. ISSN 1401-5765

Copyright © Ida Westerberg och Institutionen för geovetenskaper Uppsala universitet.

UPTEC W 05 010, ISSN 1401-5765

Tryckt hos Institutionen för geovetenskaper, Geotryckeriet, Uppsala universitet, Uppsala, 2005.

INNEHÅLLSFÖRTECKNING

1 INLEDNING	1
1.1 BAKGRUND.....	1
1.2 SYFTE.....	2
1.3 HYDROLOGISK MODELLERING.....	2
1.4 GIS OCH HYDROLOGISK MODELLERING.....	3
1.5 DISTRIBUTUERADE HYDROLOGISKA MODELLER.....	4
2 METOD	5
2.1 MODELLUTVECKLINGSVERKTYG.....	5
2.2 BESKRIVNING AV OMRÅDET.....	6
2.3 DATA.....	9
3 MODELLENS UPPBYGGNAD	10
3.1 MODELLUPPBYGGNAD I PCRASTER.....	10
3.2 MODELLBESKRIVNING.....	12
3.2.1 <i>Snörutin</i>	13
3.2.2 <i>Evapotranspiration</i>	14
3.2.3 <i>Infiltrationsrutin</i>	15
3.2.4 <i>Den omättade zonen</i>	17
3.2.5 <i>Grundvattenrutinen</i>	18
4 RESULTAT	20
4.1 DISTRIBUTUERADE RASTERDATA.....	20
4.2 UTVÄRDERINGSDATA OCH UTVÄRDERINGSPARAMETRAR.....	22
4.3 KALIBRERING.....	23
4.4 VALIDERING.....	25
4.5 SIMULERAT SNÖDJUP, YTAVRINNING OCH GRUNDVATTENFLÖDE.....	27
5 DISKUSSION	28
5.1 DISTRIBUTUERADE RASTERDATA.....	28
5.2 KALIBRERINGSRESULTATEN.....	28
5.3 VALIDERINGSRESULTATEN.....	28
5.4 JÄMFÖRELSE MELLAN KALIBRERINGS- OCH VALIDERINGSRESULTATEN.....	29
5.5 MODELLDISKUSSION.....	30
5.5.1 <i>Modellens karaktär</i>	30
5.5.2 <i>Indata, rumslig upplösning och osäkerheter</i>	30
5.5.3 <i>Tidsupplösning</i>	31
5.5.4 <i>Snörutinen</i>	31
5.5.5 <i>Evapotranspirationsrutinen</i>	31
5.5.6 <i>Infiltrationsrutinen</i>	32
5.5.7 <i>Perkolationsrutinen</i>	33
5.5.8 <i>Grundvattenrutinen</i>	33
5.6 GIS OCH PCRASTER.....	34
6 SLUTSATSER	34
REFERENSER	36
APPENDIX 1 – MODELLPARAMETRAR	39
APPENDIX 2 – INDATA OCH UTDATA	40

Ekvationsförteckning

Ekvation 1.	Grad-dagsmetoden för snömodellering.....	13
Ekvation 2.	Blainey-Criddles ekvation för beräkning av potentiell evapotranspiration.....	14
Ekvation 3.	Beräkning av verklig evapotranspiration	15
Ekvation 4.	Infiltration enligt Green-Ampt.....	16
Ekvation 5.	Infiltration enligt Green-Ampt	16
Ekvation 6.	Beräkning av vattenhalten.	17
Ekvation 7.	Perkolation som funktion av fältkapacitet	17
Ekvation 8.	Modellering av grundvattenmagasinet.....	18
Ekvation 9.	Beräkning av avrinning från sjöar	18
Ekvation 10.	Kinematisk våg med Mannings ekvation.....	19
Ekvation 11.	Mått för modellutvärdering, volymfel samt Nash & Sutcliffes effektivitetsmått	22

Tabellförteckning

Tabell 1.	Indata till modellen.....	10
Tabell 2.	Sammanfattande tabell över rutiner och kalibreringsparametrar.....	20
Tabell 3.	Statistik över utvärderingsdata.	23
Tabell 4.	R_{eff} och V_E -värden under kalibreringsperioden.	23
Tabell 5.	R_{eff} och V_E -värden under valideringsperioden	25
Tabell 6.	Värden för jordartsp parametrar	39
Tabell 7.	Recessionskoefficienter.....	39

Figurförteckning

Figur 1.	Representation av landskap i 2.5D i PCRaster.....	5
Figur 2.	Kölstaåns avrinningsområde.	6
Figur 3.	Markanvändning i Kölstaåns avrinningsområde.....	7
Figur 4.	Jordarter i Kölstaåns avrinningsområde.....	8
Figur 5.	Meteorologiska och hydrologiska stationer.	9
Figur 6.	Höjdmodellen och flödesnätverket.	11
Figur 7.	Modellens uppbyggnad.....	12
Figur 8.	Linearisering av evapotranspirationen mot vattenhalten.....	14
Figur 9.	Simulerad vattenföring i avrinningsområdet.....	21
Figur 10.	Simulerat grundvattenflöde i avrinningsområdet under en flödestopp.	21
Figur 11.	Grundvattenflödet.	21
Figur 12.	Grundvattenmagasinet.	21
Figur 13.	Skillnad mellan observerad nederbörd och observerad avrinning	23
Figur 14.	Observerad och simulerad vattenföring samt differensen mellan dessa under kalibreringsperioden	24
Figur 15.	Simulerad och observerad vattenföring per månad under kalibreringsperioden.....	25
Figur 16.	Observerad och simulerad vattenföring samt differensen mellan dessa under valideringsperioden.....	26
Figur 17.	Simulerad och observerad vattenföring per månad under valideringsperioden	26
Figur 18.	Simulerat snödjup under kalibrerings- och valideringsperioden.....	27
Figur 19.	Simulerat grundvattenflöde och ytavrinning under kalibreringsperioden.....	27
Figur 20.	Stora sjöar i Kölstaåns avrinningsområde.....	39
Figur 21.	Observerade värden för vattenföring och temperatur under kalibrerings- och valideringsperioden, samt observerad nederbörd under kalibreringsperioden.....	40
Figur 22.	Simulerad mot observerad vattenföring för hela kalibreringsperioden.....	41
Figur 23.	Simulerad mot observerad vattenföring under kalibreringsperioden	41
Figur 24.	Simulerad mot observerad vattenföring under valideringsperioden.....	42

1 INLEDNING

1.1 Bakgrund

Några av de största hoten mot Europas vattentillgångar är övergödning, försurning, förorening, saltvatteninträngning i kustområden samt överutnyttjande av grundvattenmagasin (Hägerhall Aniansson och Vidarve, 2003). För att motverka dessa problem krävs ett helhetsperspektiv på vattenfrågorna där alla berörda parter är med och diskuterar lösningar på problemen (ibid.). Av denna anledning författades EU:s nya ramdirektiv för vatten, som trädde i kraft i december år 2000.

Ett led i genomförandet av ramdirektivet är att beräkna belastningen på vattenförekomster samt göra källfördelningsberäkningar för att utvärdera var föroreningarna har sitt ursprung. EU-projektet *TWINBAS (Twinning European and third countries river basins)*, som koordineras av *IVL Svenska Miljöinstitutet AB*, har som huvudmål att identifiera kunskapsluckor inför implementeringen av ramdirektivet. Inom projektet genomförs därför bland annat belastnings- och källfördelningsberäkningar för Norrströms (Mälarens) avrinningsområde. Här är de största problemen metallförorening, övergödning och försurning (Ekstrand och Malander, 2003). De höga metallhalterna i området beror på gruvdrift och metallframställning som går tillbaka ända till järnåldern (ibid.). Övergödning orsakas av för höga halter av närsalter i vattensystemen, och i Mälardalen kommer dessa närsalter främst från diffusa källor som jordbruksmark. De höga närsaltshalterna kan leda till igenväxta sjöar och algbloomning, vilket orsakar syrebrist och utslagning av känsliga arter. I stockholmområdet hotas även dricksvattenförsörjningen vid kraftiga algbloomningar, eftersom en stor del av råvattnet vid dricksvattenframställningen är ytvatten. Totalt försörjer Mälaren 1,5 miljoner människor med dricksvatten (ibid.). De försurande luftföroreningar (svaveldioxid, kväveoxider m.m.) som bildas när fossila ämnen förbränns, deponeras på mark och vatten och orsakar en betydande sänkning av pH-värdet över stora områden (Håkanson, 1988). En bieffekt av försurningen är utlakning av metaller (vid låga pH-värden) som kan leda till att toxiska halter uppnås, vilket påverkar fisk och andra organismer negativt.

EU har med avstamp i vattendirektivet lanserat det *Europeiska vatteninitiativet*, vilket innebär att ett partnerskap skapas inom vattenområdet mellan EU och utvecklingsländer samt länder i Östeuropa (Hägerhall Aniansson och Vidarve, 2003). Av den anledningen ingår i TWINBAS-projektet avrinningsområden i Chile, Kazakstan, England samt Okavango-området i Botswana-Angola-Namibia. Ett av syftena med projektet är att överföra kunskap om vattenförvaltning och hydrologisk modellering till mindre utvecklade länder (TWINBAS, 2003).

Hydrologiska modeller som simulerar vattnets flöde genom landskapet är av avgörande betydelse vid beräkning av belastning på sjöar och vattendrag. Genom sådana modeller kan effekten av förändringar i avrinningsområdet studeras, såväl som den påverkan som klimatförändringar orsakar (Xu, 2002). En annan fördel med modeller är att olika framtidsscenarier och åtgärdsstrategier kan undersökas varvid bättre beslutsunderlag för åtgärder kan åstadkommas.

1.2 Syfte

Syftet med examensarbetet var att utveckla en väl fungerande GIS-baserad modell för avrinningsberäkningar med hög rumslig upplösning och till största delen fysikaliskt baserade parametrar. Tanken med modellen var att den ska ta hänsyn till sjöar, vattendrag, jordarter och markanvändning, men i övrigt kräva lite indata. Den är tänkt att användas i *WATSHMAN* (Watershed Management System), ett verktyg för vattenplanering i avrinningsområden som tagits fram av IVL Svenska Miljöinstitutet AB. Verket används bland annat för källfördelningsberäkningar och åtgärdsanalyser till stöd för implementeringen av EU:s ramdirektiv för vatten (Zakrisson m.fl., 2003). Den nuvarande hydrologiska modellen i *WATSHMAN* använder delavrinningsområden som minsta rumsliga enhet och beskriver avrinningen med hjälp av avrinningskoefficienter. Examensarbetet utfördes inom ramen för det ovan nämnda TWINBAS-projektet.

1.3 Hydrologisk modellering

Modeller som simulerar naturliga processer är viktiga verktyg för att ge kunskap om och öka möjligheterna till att lösa miljöproblem. En simuleringsmodell gör det möjligt att studera förändringar som sker i naturen till följd av mänskligt skapade problem som klimatförändringar, erosion och försurning. Miljöproblemen är till sin natur utspridda i både tid och rum och därför bör den simuleringsmodell som används på bästa sätt skildra denna tids- och rumsfördelning.

Olika avrinningsmodeller beskriver hydrologin i avrinningsområdet med olika detaljeringsgrad, både vad gäller de fysikaliska processerna och den rumsliga utbredningen. Den *konceptuella* hydrologiska modellen beskriver de fysikaliska processerna i stora drag och den använder parametrar som inte alltid har någon direkt koppling till mätbara fysikaliska storheter. Den *fysikaliska* modellen beskriver mer ingående de processer som sker i avrinningsområdet och dess parametrar kan hänföras till mätbara storheter. Den rumsliga beskrivningen av verkligheten delas upp i *aggregerade* (eng. *lumped*) och *distribuerade* modeller. En aggregerad modell beskriver området som en enhet, medan en helt distribuerad modells parametrar kan variera över hela området. SHE-modellen (*Système Hydrologique Européen*) är ett exempel på en sådan distribuerad modell vars tillämpning i Wye-området krävde att hela 2 400 parametervärden specificerades (Beven, 1989). Eftersom det inte är möjligt att mäta alla dessa parametervärden blir det nödvändigt att uppskatta och kalibrera parametervärdena, vilket i sin tur gör modellen mindre fysikalisk (ibid.). Motovilov m.fl. (1999) summerar fördelarna med sådana helt distribuerade fysikaliska modeller enligt följande. Dels ger modellerna en bättre uppfattning om de hydrologiska processerna i avrinningsområdet, vidare kan de användas för att uppskatta mänsklig påverkan på hydrologiska processer och slutligen kan de användas när endast korta mätserier är tillgängliga. De främsta nackdelarna är det stora databehovet samt känsligheten för kvaliteten på indata (kalibrering av parametrar kan behövas vilket gör modellerna mer lika aggregerade konceptuella modeller). Beven (1989) påtalar problemet med att generalisera parametervärden för ekvationer giltiga i en liten skala till flera hundra meter stora pixlar – speciellt som fysikaliska modeller ofta använder ett stort antal parametervärden, varav många är kopplade till varandra.

Det finns även mellanting mellan aggregerade och distribuerade modeller. Ett sådant mellanting är *semidistribuerade* modeller som till exempel HBV-modellen som räknar på delavrinningsområden (avrinningsområdet delas upp i ett flertal aggregerade områden) och delvis tar hänsyn till höjdskillnader (Bergström, 1992). En annan slags hybrid är distribuerade modeller där en rumsligt utbredd variabel (som t ex en jordart) kopplas till ett värde för en viss parameter (som t ex fältkapacitet). Det gör visserligen att den rumsliga beskrivningen inte blir lika heltäckande som en helt distribuerad modell, men samtidigt blir det inte nödvändigt att specificera lika många parametrar.

I en aggregerad modell använder man en *top-down*-ansats vid modelleringen, vilket betyder att man utgår från hela området och delar sedan in det i mindre delavrinningsområden. Motsatsen är en *bottom-up*-ansats där man utgår från en hög skala och sammanför områden med liknande hydrologisk karaktär i till exempel hydrologiska responsenheter (Hydrological Response Units – HRUs) eller REA-områden (Representative Elementary Area).

1.4 GIS och hydrologisk modellering

Modellering med hjälp av Geografiska Informationssystem (GIS) sker i de flesta fall endast med spatiella (rumsligt utbredda) data. Vid miljömodellering i allmänhet – och hydrologisk modellering i synnerhet – är det dock av stort intresse att kunna genomföra dynamisk modellering när data även varierar över tid. Ett exempel på ett sådant fall är när belastning av närsalter och tungmetaller på sjöar och vattendrag ändras i takt med förändringar i nederbörd och temperatur. De flesta avrinningsmodeller är – i motsats till GIS-baserade modeller – bra på att beskriva temporala förändringar medan den rumsliga upplösningen ofta är mycket låg. I många modeller aggregeras områden med liknande karaktär så att beräkningarna sker för mindre delavrinningsområden. Till exempel används många gånger endast *en* parameter, en *avrinningskoefficient*, som ett sammantaget mått på de faktorer (markanvändning, jordart, lutning m.m.) som bestämmer avrinningen från området, eftersom modellen inte kan hantera distribuerade data för dessa parametrar. En metod att ta hänsyn till topografins inverkan på avrinningen är med hjälp av ett index bestående av kvoten mellan area och lutning, såsom i modellen TOPMODEL (Seibert, 1999).

För att på bästa sätt beskriva avrinningen krävs en modell som både tar hand om den rumsliga och tidsmässiga variationen – det vill säga en avrinningsmodell som är helt distribuerad. Med en sådan modell kan hänsyn tas till spatiella variationer i nederbörd, temperatur, strålning, jordart, markanvändning, lutning m.m. och därmed erhålls en mer realistisk modell. Xu (2002) efterlyser en ny generation distribuerade modeller med ett fåtal fysikaliskt relevanta parametrar, spatiell uppdelning på hydrologiska responsenheter (HRUs) eller rutnät samt routing av flödet vid varje ruta (pixel) och i vattendragen. Det är vidare viktigt att modellen inte är för komplex, att modellen utvärderas för fler parametrar än enbart vattenföringen samt att modellekvationer inte tillämpas på en skala de inte är giltiga för.

En knäckfråga för utvecklandet av en helt distribuerad avrinningsmodell är den stora mängd data som genereras när det i varje tidssteg sker beräkningar för ett stort antal

variabler i ett stort antal punkter. I princip genereras samma antal högupplösta kartor som det finns variabler i modellen i varje tidssteg. För att kunna använda en modell som är högupplöst i både tid och rum krävs att de stora mängder data som genereras kan lagras på ett tillfredsställande sätt. Ett sätt att lagra geografiska data på ett utrymmessnålt sätt är att använda sig av raster. Ett raster är ett rutnät av pixlar där varje pixel har ett värde för den parameter som rastret beskriver.

1.5 Distribuerade hydrologiska modeller

De senaste åren har ett antal modeller utvecklats som kan användas för att simulera avrinning både spatiellt och temporalt med hjälp av GIS. En av dessa modeller är den fysikaliska makroskalemodellen ECOMAG (för områden $> 10^5 \text{ km}^2$) som har utvecklats för boreala områden och tillämpats på NOPEX-området i östra delen av Mälarens avrinningsområde (Motovilov m.fl., 1999). Där validerades den mot omfattande distribuerade data för grundvattennivåer, markfuktighet, synoptiska vattenföringsmätningar m.m. med lovande resultat. Modellen använder GIS för behandling av in- och utdata och REA-områden som minsta beräkningsområde. Avrinningen från vart och ett av dessa REA-områden beräknas och adderas till vattendragsnätet. Modellen har även kopplats samman med grundvattenmodellen MODFLOW till modellen ECOFLOW så att den ger indata till denna och därmed förbättrar grundvattenmodelleringen (Sokrut och Thunvik, 2002).

Den konceptuella modellen PREVAH som bygger på principen om hydrologiska responsenheter har utvärderats mot distribuerade data från bergsområden i Schweiz (Zappa, 2002). Utvärderingen gjordes för olika upplösningar, och en kritisk upplösning på 500 m x 500 m identifierades. Om denna upplösning understegs erhöles en betydligt sämre simulering för de högländska områdena. Även SWIM-modellen har validerats mot data på olika skalor samt för både grundvattennivåer och vattenföring för den tyska delen av floden Elbes avrinningsområde (Hattermann m.fl., 2002). Området delades in i ett flertal delavrinningsområden med 250 m x 250 m upplösning, det bästa resultatet för avrinningen erhöles i de högländska områdena. Användningen av konturkartor för grundvattennivåer samt observerade grundvattennivåer gav goda resultat för simulerade grundvattennivåer i delavrinningsområdena.

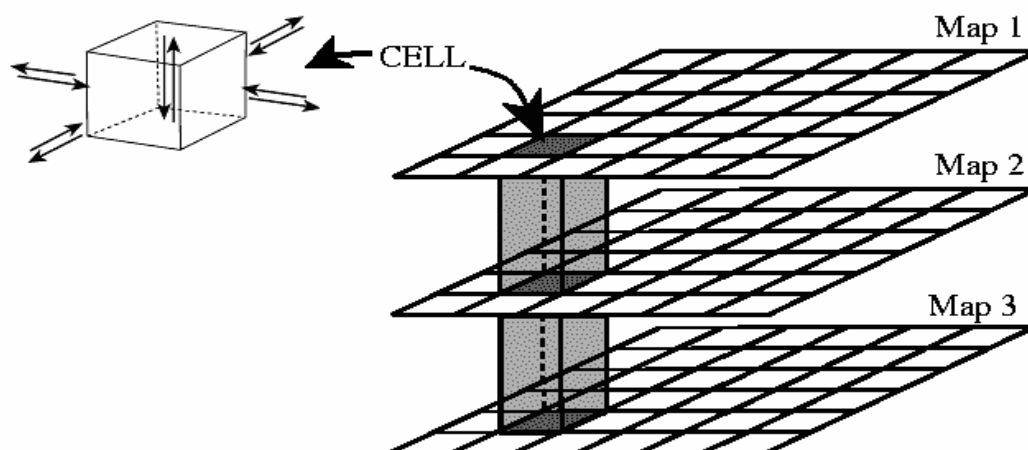
Datorverktyget PCRaster är ett program som integrerar GIS och dynamisk modellering (Van Deursen, 1995). Nedan följer tre exempel på modeller som utvecklats eller implementerats i PCRaster i vilka hydrologiska beräkningar ingår. Den första modellen är RHINEFLOW. Den är uppdelad i ett snölager, ett marklager samt ett grundvattenlager och tar hänsyn till nederbörd, temperatur och evapotranspiration. Den andra modellen är POLFLOW som i ett examensarbete vid KTH implementerades för hela Mälarens avrinningsområde (Grefte, 2003). Modellen är uppbyggd för beräkning av näringsämnesläckage och vid implementeringen användes 1 km x 1 km pixlar. Ytavrinning och grundvatten beaktas och beräkningen skedde på årsbasis med hjälp av månadsmedelvärden. Den tredje modellen bygger på den konceptuella HBV-modellen som har en mycket spridd användning i Sverige. Den distribuerades och utvecklades i ett examensarbete för prediktion av vattenföring till vattenkraftverksmagasin (Larsson, 2004). Modellen innehåller en distribuerad snörutin där hänsyn tas till solinstrålning, och den har tillämpats på Tjaktjajaures

avrinningsområde i norra Sverige med goda resultat. HBV-modellen är dock inte fysikaliskt baserad vilket kan vara begränsande om en modell ska användas för läckageberäkningar.

2 METOD

2.1 Modellutvecklingsverktyg

Modellering med GIS kan ske med olika mått av integration av GIS och modell. En låg nivå av integration erhålls när GIS används för att bearbeta in- och utdata till modellen, medan en mycket hög integrationsnivå innebär att modellen skrivs i ett programmeringsspråk som integrerar GIS och dynamisk modellering (Van Deursen, 1995). PCRaster är ett exempel på ett sådant programmeringsspråk och var den programvara som användes för att skapa modellen. Programmet möjliggör dynamisk modellering med spatiellt distribuerade data och har utvecklats vid universitetet i Utrecht i Nederländerna. PCRaster är som namnet antyder rasterbaserat och kan sägas representera landskapsinformation i 2,5D (PCRaster Version 2 Manual, 2004). Landskapets spatiella utbredning beskrivs med hjälp av raster, där varje cell har ett visst värde vilket kan ändras beroende på de omgivande cellernas värden. Ett flertal raster överlagras varandra för att beskriva karaktären hos de olika parametrarna i landskapet, och interaktioner kan ske i vertikalled mellan cellerna i dessa olika lager (se Figur 1).



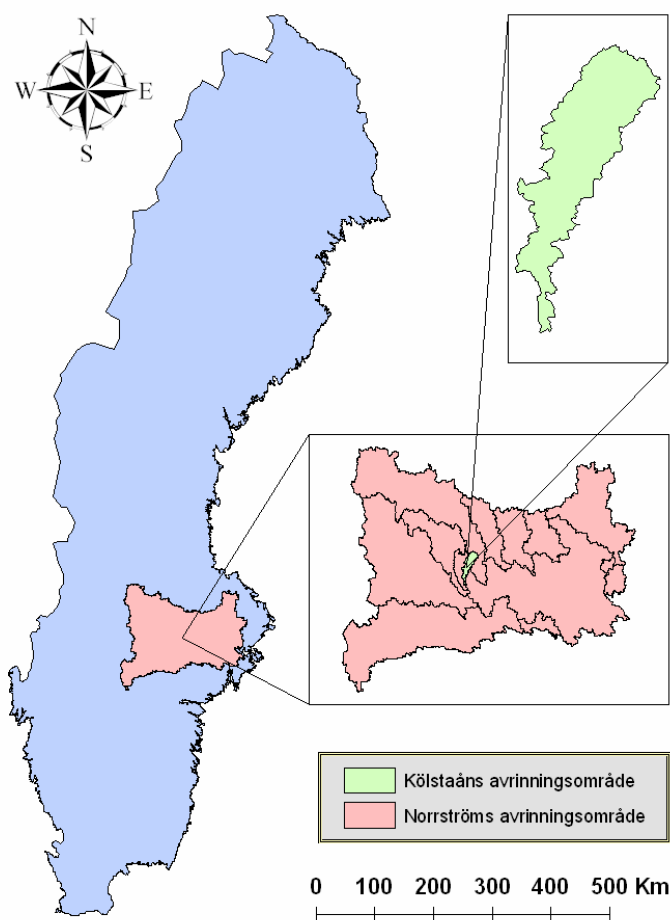
Figur 1. Representation av landskap i 2,5D i PCRaster. Figuren modifierad från original i PCRaster Version 2 Manual (2004).

I PCRaster kan data lagras som tidsseriedata, rasterdata, punktdata och tabelldata. Det finns även ett flertal datatyper för rasterdata; datatypen *nominal* kan till exempel användas för att koppla sjöar till omsättningstid och medeldjup på ett programmeringsmässigt mycket effektivt sätt. Tidsserier kan länkas till rasterkartor

och dessa kan till exempel användas för att lagra meteorologiska indata till modellen. Den dynamiska modulen och det geografiska informationssystemet i PCRaster använder samma databas, vilket gör att problem med dataomvandling mellan GIS och modell aldrig uppstår (PCRaster Version 2 Manual, 2004). Det är denna uppbyggnad av det geografiska informationssystemet som möjliggör inte bara traditionell spatiell modellering med de attribut som finns i cellen och de omgivande cellerna, utan även dynamisk modellering där attributens värden varierar med tiden.

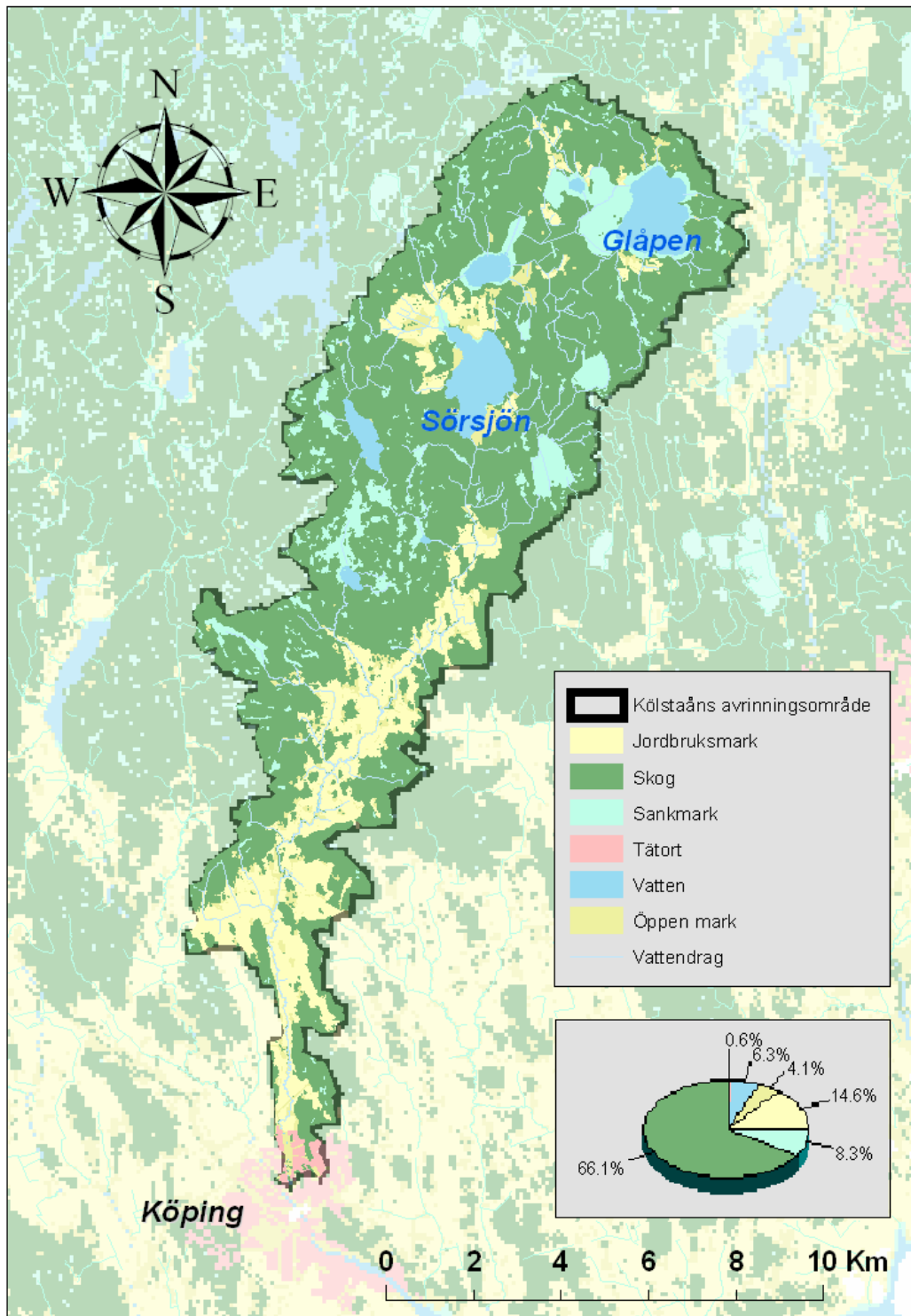
2.2 Beskrivning av området

I Mälarens avrinningsområde finns det enligt SMHI:s indelning tio huvudavrinningsområden. Köpingsåns avrinningsområde, i västra Mälardalen, är ett av de minsta av dessa områden och Köpingsån har ett medelflöde på $2 \text{ m}^3/\text{s}$ (Wallin, 2000). Den östra delen av Köpingsåns avrinningsområde, med utloppspunkt vid den hydrologiska stationen Odensvibron i Köping, användes för att utveckla och validera modellen. Området är ca 110 km^2 stort och dess huvudflöde är Kölstaån (se Figur 2 och Figur 5).



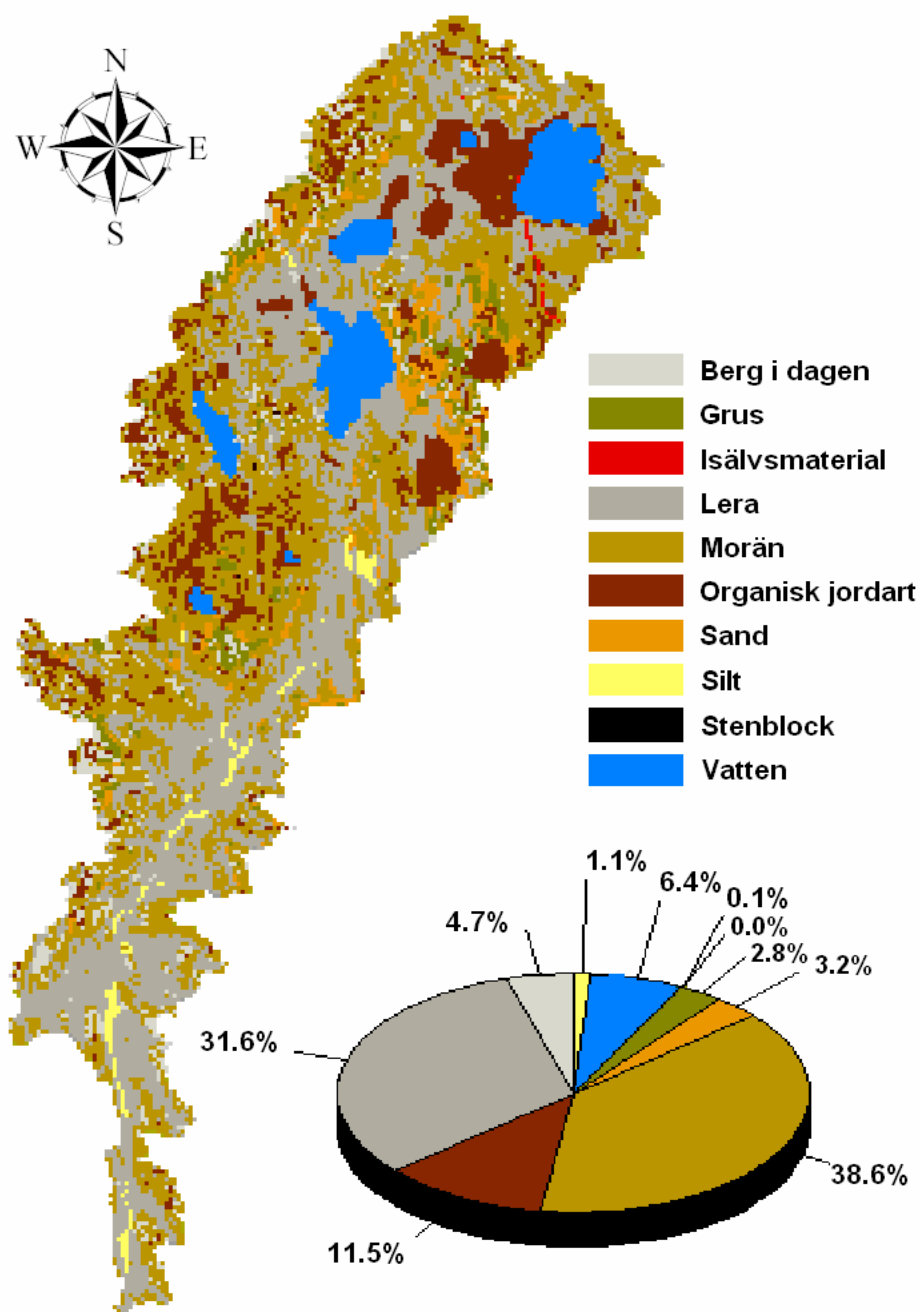
Figur 2. Kölstaåns avrinningsområde. Bilden visar även de tio huvudavrinningsområdena inom Norrströms (Mälarens) avrinningsområde.

Området är typiskt för Mälarens avrinningsområde och kännetecknas av skogsområden i de norra delarna och jordbruksmark i söder (se Figur 3).



Figur 3. Markanvändning i Kølstaåns avrinningsområde.

Markanvändningen fördelar sig på 66,1 % skog, 14,6 % åker, 8,3 % sankmark, 6,3 % vatten, 4,1 % öppen mark och 0,6 % bebyggelse. De åtta större sjöar som finns i området ligger alla i den norra delen. I de mer höglänta skogsområdena är jordarten till största delen morän, medan lera är den dominerande jordarten i jordbruksmarkerna i dalgångarna, slättlandet i den södra delen och området runt sjöarna (se Figur 4). En mindre rullstensås är belägen söder om sjön Glåpen, och i den norra delen av området finns större områden med grus och sand.

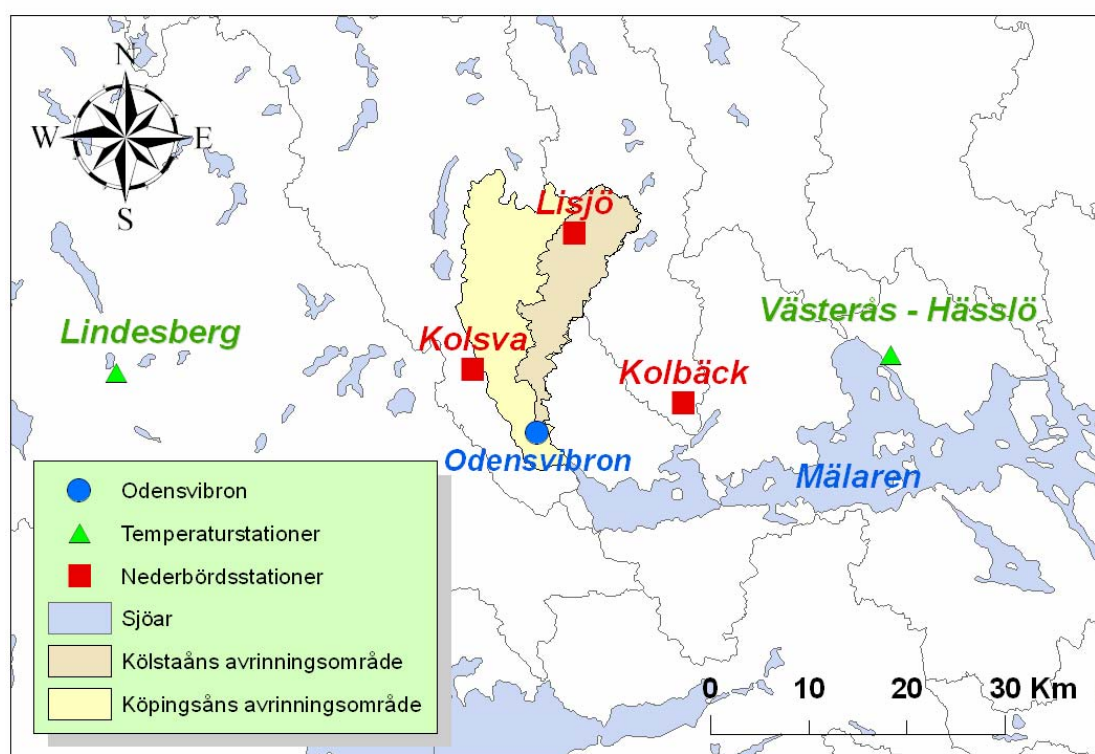


Figur 4. Jordarter i Kølstaåns avrinningsområde. Morän är den dominerande jordarten.

Kölstaåns avrinningsområde valdes på grund av den begränsade storleken och tillgängliga data, men området är inte det mest ideala för hydrologisk modellering eftersom det innehåller fysiska vattenhinder som dammar och dämnda sjöutlopp. Det finns två dammar i området varav en är en reglerad kraftverksdamm. Båda dammarna ligger i huvudfåran och dämmer vattendraget så att långsmala sjöar bildas uppströms dammarna.

2.3 Data

Vid modelleringen användes dygnsmedelvärden för nederbörd och temperatur. Tidsserierna sträckte sig från 1981 till 1991 varav de första fem åren användes till kalibrering och de resterande fem till validering. De nederbördsdata som fanns tillgängliga var redan medelvärdesbildade data (med Thiessenpolygoner) från stationerna i Kolbäck, Kolsva och Lisjö. Temperaturdata utgjordes av medelvärden av data från stationerna i Lindesberg och Västerås-Hässlö (se Figur 5).



Figur 5. Meteorologiska och hydrologiska stationer.

De hydrologiska data som fanns tillgängliga för kalibrering och validering av modellen var data från SMHI:s station vid Odensvibron i Köping. Upplösningen och ursprunget för modellens indata sammanfattas i Tabell 1.

Tabell 1. Indata till modellen

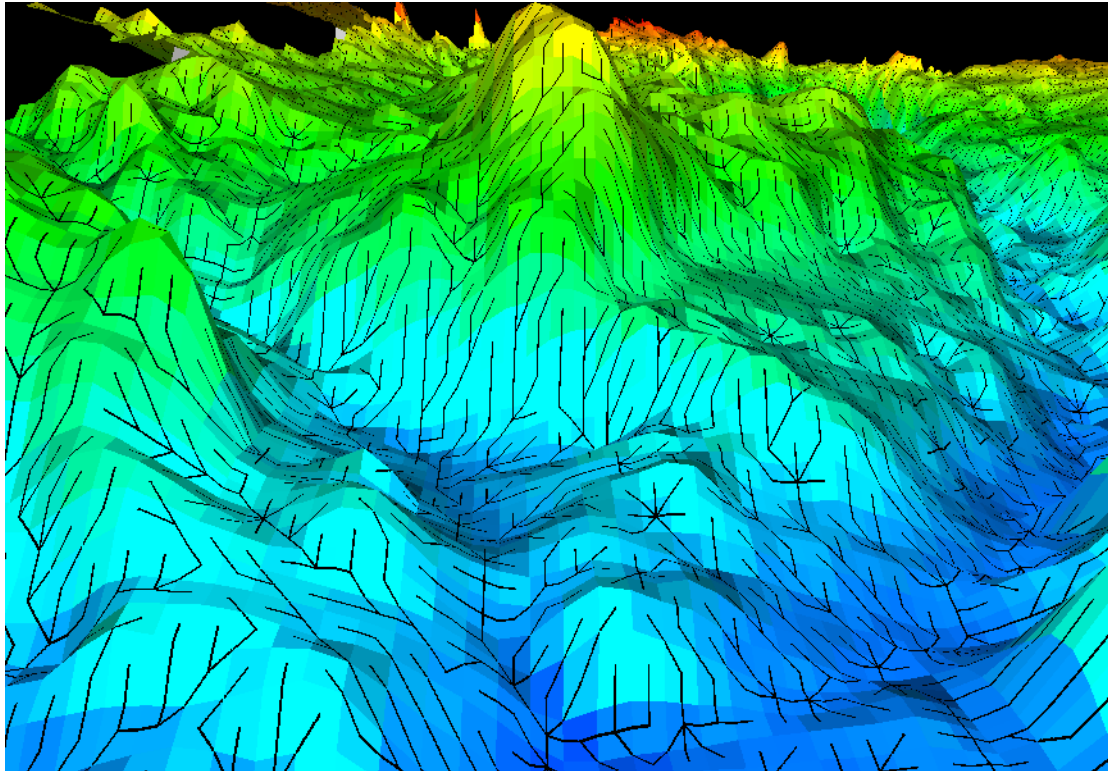
Data	Tidsupplösning	Rumsupplösning	Ursprung
Vattenföring	Dygnsmedelvärden	1 station enligt figur 5	SMHI
Nederbörd	Dygnsmedelvärden	3 stationer enligt figur 5	SMHI
Temperatur	Dygnsmedelvärden	2 stationer enligt figur 5	SMHI
Jordarter	-	1:50 000 – 1:100 000	Jordartskartan, SGU
Höjddata	-	50 m x 50 m	Lantmäteriet
Evapotranspiration	Månadsmedelvärden för antal soltimmar per dygn i förhållande till antal soltimmar per år		Hellgren (2002)
Markanvändning	-	1:10 000	Fastighetskartan
Sjödata	Medeldjup		Länsstyrelsen i Västmanland

Värden för de olika markparametrarna (fältkapacitet m.m.) har hämtats från litteraturen. Den mättade hydrauliska konduktiviteten, porositeten och vissningsgränsen för lera, silt, sand och organiska jordar räknades fram med hjälp av data från serien ”Studier av markprofiler i svenska åkerjordar” som givits ut av SLU (Andersson, 1977-). Medelvärden för parametrarna bildades av data för samtliga profilsnitt som hade en hög andel av den aktuella jordarten. I de fall data för den aktuella jordarten fanns tillgängliga från jordar i Örebro och Västmanlands län användes företrädesvis dessa, i annat fall användes data från samtliga jordar i serien. Eftersom modellen inte tar hänsyn till olika marklager i den omättade zonen är det värdefullt att ha ett medelvärde för samtliga profilsnitt.

3 MODELLENS UPPBYGGNAD

3.1 Modelluppbyggnad i PCRaster

Vid utvecklingen av modellen i PCRaster var tillvägagångssättet att utgå ifrån en så enkel modell som möjligt, bestående av enbart nederbörd och avrinning. Stegvis skapades sedan en mer komplex modell med t ex avdunstning och grundvattenmagasin. Modellen bygger på ett flödesnätverk som konstrueras ifrån höjddata (vilken även kallas för *DEM – Digital Elevation Model*) med hjälp av operatorn *lddcreate*. Det är detta flödesnätverk som bestämmer hur vattnet ska transporteras mellan pixlarna (se Figur 6).



Figur 6. Höjdmodellen och flödesnätverket. Bilden visar hur höjderna delar av flödet och bestämmer vattnets bana ned till vattendragen i dalgångarna (skalan på höjddatat är överdriven, i verkligheten är området mindre kuperat).

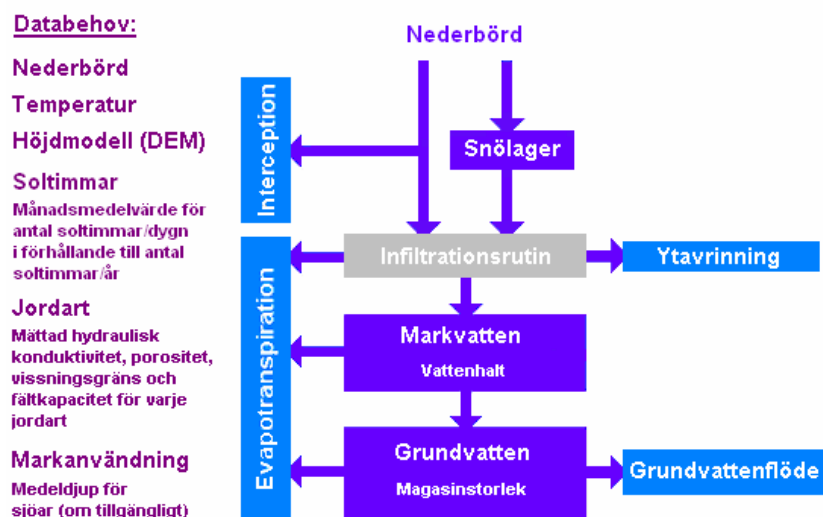
Principen för generering av flödesnätverket är att vattnet i en pixel strömmar till närmast liggande nedströmspixel dit lutningen är störst. Vid uppbyggnaden av modellen skapades ett sammanhängande flödesnätverk utan några sänkor. Det innebär en förenkling av flödesmönstret i området, men underlättar samtidigt modelluppbyggnaden i hög grad då ingen specialbehandling av sänkor krävs. Eftersom höjdmodellens upplösning var 50 m gånger 50 m användes denna pixelstorlek för samtliga raster i modellen, vilket ledde till att det 110 km² stora området delades in i drygt 44 000 pixlar.

En förenkling av sjösystemet i området gjordes så att endast de sju största sjöarna användes och resterande sjöar (som endast var några få pixlar stora) klassificerades om till omkringliggande jordart respektive markanvändning. De högupplösta GIS-data för vattendrag som fanns tillgängliga var inte sammanhängande, eftersom en del vattendrag delvis löper under jord eller genom sankmarker. Med anledning av detta försvårades användningen av dessa vattendragsdata i modellen. Från början användes de vattendrag som genereras av flödesnätverket – dessa vattendrag hamnar dock inte alltid på samma plats som de verkliga, dels beroende på felaktigheter i DEM:en och dels på grund av att det flacka landskapet försvårar genereringen av ett flödesnätverk med korrekta vattendrag. Lösningen blev först att korrigera vattendragen manuellt i ArcGIS och sedan tillsammans med sjöarna (från markanvändningsrastret) korrigera dessa pixlar i DEM:en. Detta skedde genom att pixlar klassificerade som vattendrag eller sjö sänktes med 20 meter, så att de säkert hamnade på rätt plats även i ett flackt område. En närmare inspektion visade dock att graden av noggrannhet inte var

speciellt hög i förhållande till det högupplösta GIS-datat för vattendragen. Vattendragen gjordes därför om genom att utnyttja det högupplösta vattendragsdatat efter att ha fogat ihop dessa vattendrag till ett sammanhängande nät. Det var främst över sankmark som vattendragen fogades samman. Vissa förenklingar såsom uteslutning av mindre vattendrag gjordes även för att erhålla ett entydigt vattendragsnät. Sedan sänktes pixlarna i detta mer korrekta vattendragsnät i DEM:en tillsammans med sjöarna. Förfarandet med att på detta sätt ”bränna in” vattendrag i en DEM har tidigare gjorts av bland annat Greffe (2003). De vattendrag som hade en vattendragsordning¹ högre än tre, togs sedan ut från flödesnätverket och användes som vattendragspixlar i modellen. Det visade sig att inte alla vattendrag som var med i det högupplösta GIS-skiktet hade en ordning högre än tre i modellen. Ett fåtal av dessa klassificerades därför inte som vattendragspixlar, men de påverkar ändå flödesmönstret eftersom de bränns in i DEM:en. Att gränsen drogs vid en vattendragsordning högre än tre beror på att vattendragsnätet då blev mest jämförbart med det högupplösta vattendragsdatat. Kärnan i vattenflödesberäkningarna är ackumuleringsoperatoren *accuflux* som ackumulerar vattnet nedströms i flödesnätverket. För flödesroutingen användes en operator *kinematic* i PCRaster som utför flödesrouting med den kinematiska vågekvationen (Rainfall-runoff modelling in PCRaster, 2004).

3.2 Modellbeskrivning

Modellen drivs av dygnsmedelvärden för nederbörd och temperatur och är uppbyggd av ett antal magasin mellan vilka vattnet flödar (se Figur 7).



Figur 7. Modellens uppbyggnad

¹ Vattendragsordningen följer Strahlers definition (Strahler, 1964). I de yttre delarna av flödesnätverket har alla vattendrag vattendragsordning 1, när två vattendrag med vattendragsordning 1 möts får vattendraget vattendragsordning 2. Det är endast när ett vattendrag möter ett annat vattendrag av samma vattendragsordning som vattendragsordningen ökar med 1, samma sak sker för vattendrag som rinner genom sjöar.

Beroende på den aktuella temperaturen faller nederbörden som snö eller regn. En viss mängd av regnet fastnar i interceptionsmagasinet varifrån det avdunstar. Snön hamnar i snölagret, varifrån det bildas snösmältning om temperaturen är tillräckligt hög. Det resterande regnet och smältvattnet fortsätter till infiltrationsrutinen, varifrån det antingen rinner av som ytavrinning eller infiltrerar. Om jordarten i pixeln består av en impermeabel yta (t ex berg) beräknas avdunstningen från ytan innan avrinningen beräknas. Det infiltrerande vattnet hamnar i den omättade zonen vars vattenhalt ändras beroende på infiltrationen, perkolationen och evapotranspirationen. Vattnet som perkolerar ner till grundvattenzonen ändrar grundvattenmagasinets storlek och bidrar till grundvattenflödet. Om storleken på grundvattenmagasinet förändras, ändras även djupet till grundvattenytan. Eftersom alla pixlar har samma storlek uttrycks modellens alla vattenvolymer i millimeter och omvandlas till kubikmeter per sekund först i samband med flödesroutingen.

3.2.1 Snörutin

Snörutinen som används i modellen baseras på den grad-dagsmetod som finns i den nuvarande WATSHMAN-modellen (Zakrisson m.fl., 2004). Grad-dagsmetoden är ett vanligt konceptuellt sätt att modellera snö. I metoden faller nederbörden som snö om tröskeltemperaturen, TT , underskrids och vid implementeringen av modellen i Kölstaån kalibrerades den till $0,9\text{ }^{\circ}\text{C}$. Om temperaturen överstiger tröskeltemperaturen smälter snön beroende på en graddagsfaktor, samt skillnaden mellan den aktuella temperaturen och tröskeltemperaturen (se Ekvation 1).

$$M = DGD \cdot (T - TT)$$

$$R = CFR \cdot DGD \cdot (TT - T)$$

där :

$$M = \text{snösmältning (mm/dygn)}$$

$$R = \text{återfrysning (mm/dygn)}$$

$$CFR = \text{återfrysningskoefficient}$$

$$DGD = \text{grad - dagsfaktor (mm/(dygn} \cdot ^{\circ}\text{C))}$$

$$T = \text{temperatur (}^{\circ}\text{C)}$$

$$TT = \text{tröskeltemperatur (}^{\circ}\text{C)}$$

Ekvation 1. Grad-dagsmetoden för snömodellering

Snötäcket kan som mest innehålla 10 viktsprocent vatten, vilket gör att resterande vatten går till avrinning eller infiltration. Om temperaturen understiger tröskeltemperaturen återfrysas en del av det vatten som finns i snötäcket beroende på en återfrysningskoefficient som kalibrerades till 10 %. Nederbörden som faller på snötäcket adderas till vattenlagret i snön om temperaturen överstiger tröskeltemperaturen, annars adderas den till snötäcket (som uttrycks i vattenekvivalenter).

3.2.2 Evapotranspiration

Den potentiella evapotranspirationen beräknas enligt Blainey-Criddle-metoden som är en temperaturbaserad metod (Xu, 2002). Den verkliga evapotranspirationen beräknas sedan genom att linearisera den potentiella evapotranspirationen med vattenhalten. Potentiell evapotranspiration beräknas med Blainey-Criddle utifrån dygnsmedeltemperatur och antal soltimmar per dygn i förhållande till antal soltimmar per år (se Ekvation 2).

$$ET = p(0,46T_a + 8,13)$$

där :

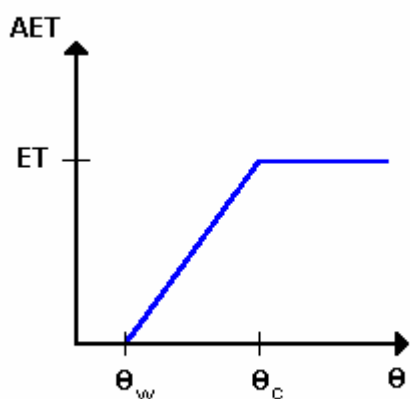
ET = potentiell evapotranspiration (mm/dygn)

p = antal soltimmar per dygn i förhållande till antal soltimmar per år

T_a = dygnsmedeltemperatur (°C)

Ekvation 2. Blainey-Criddles ekvation för beräkning av potentiell evapotranspiration

I modellen används månadsmedelvärden för antalet soltimmar för den aktuella breddgraden. Den verkliga evapotranspirationen beräknades utifrån den potentiella genom att göra den linjärt beroende av vattenhalten om vattenhalten understiger en kritisk vattenhalt, θ_c , som kalibrerades till 60 % (se Ekvation 3 och Figur 8).



Figur 8. Linearisering av evapotranspirationen mot vattenhalten

$$AET = \frac{ET}{\theta_c - \theta_w} (\theta - \theta_w)$$

där :

ET = potentiell evapotranspiration (mm/dygn)

AET = verklig evapotranspiration (mm/dygn)

θ_c = kritisk vattenhalt

θ_w = vattenhalt vid vissningsgränsen

Ekvation 3. Beräkning av verklig evapotranspiration

Vattendragen kan inte vara smalare än en pixel i modellen och därför justerades avdunstningen ned för dessa pixlar beroende på vattendragets vattendragsordning. Det innebär att ett vattendrag med lägre vattendragsordning antas vara smalare än ett vattendrag med en högre vattendragsordning och därför justeras avdunstningen ner mer för vattendraget med lägre vattendragsordning. Den resterande avdunstningen lades till pixlarna omedelbart uppströms vattendragen (för att vattenbalansen ska stämma).

3.2.3 Infiltrationsrutin

För att beskriva infiltrationen i modellen används Green-Ampts infiltrationsmodell. Modellen är fysikalisk och bygger på ett flertal antaganden (Dingman, 1994). Dels antas att marken är homogen med avseende på porositet och mättad hydraulisk konduktivitet, dels att ingen evapotranspiration eller pölbildning sker på den horisontella ytan – vilken regnet träffar med jämn intensitet. Den initiala vattenhalten i marken antas vara mycket lägre än fältkapaciteten. Dessutom antas våtfronten utgöra en skarp gräns mellan den mättade och omättade delen av marken. Eftersom djupet till grundvattenytan oftast inte är mer än någon meter i den svenska terrängen används en variant av Green-Ampts ekvation som också tar hänsyn till att marken kan vattenmättas underifrån.

Då det inte fanns några tillgängliga data för djupet till grundvattenytan har dessa data ansatts utifrån markanvändning och lutning. Om området är jordbruksmark ansätts grundvattenytans läge till knappt en meter under markytan (ett antaget dräneringsdjup), om det är skogsmark sätts den något grundare (till drygt en halvmeter). I annat fall korrigeras den om jordarten är sand, grus, sten eller isälvsmaterial. I isälvsmaterial antas den vara fyra meter under markytan och i grus, sten och sand cirka en och en halv meter. I övrigt har lutningen ackumulerats så att det är grundare till grundvattenytan i dalarna än på höjderna, samt nära vattendragen, sjöarna och sankmarksområdena jämfört med längre bort från dessa. I sjöar, vattendrag och sankmarksområden är djupet till grundvattenytan noll eftersom dessa områden behandlas som en del av grundvattenmagasinet.

I Green-Ampts infiltrationsmodell kan infiltration ske för två olika fall – ett när regnintensiteten är lägre än den mättade hydrauliska konduktiviteten och ett när den är större. Det sistnämnda fallet behöver aldrig användas vid beräkningar på dygnsnivå.

Det beror på att den mättade hydrauliska konduktiviteten som lägst blir 2400 mm/dygn (10 cm/h) med ett tidssteg på ett dygn, och det är helt osannolikt att regnintensiteten skulle överstiga detta värde. Eftersom enbart det första fallet användes kunde antagandet om låg initial vattenhalt förbises och vattenhalten i rutinen sattes till den simulerade i varje tidssteg. I det första fallet, när regnintensiteten är lägre än den mättade hydrauliska konduktiviteten, K_{sat} , blir den kumulativa infiltrationen lika med regnintensiteten multiplicerat med tiden, eftersom allt vatten som faller på marken kan infiltrera (se Ekvation 4).

$$F(t) = w \cdot t$$

där:

$F(t)$ = kumulativ infiltration (mm)

w = regnintensitet (mm/dygn)

t = tid (dygn)

Ekvation 4. Infiltration enligt Green-Ampt (Dingman, 1994)

När våtfronten nått grundvattenytan börjar marken att mättas underifrån, vid tiden t_b har våtfronten nått markytan och infiltrationshastigheten minskar till noll (se Ekvation 5).

$$t_b = \frac{z_u (\phi - \theta_0)}{w}$$

t_b = tid för mättnad (dygn)

z_u = djup till grundvattenytan (mm)

w = regnintensitet (mm/dygn)

ϕ = porositet

θ_0 = initial vattenhalt

Ekvation 5. Infiltration enligt Green-Ampt (Dingman, 1994)

I modellen antas att allt vatten som hamnar på ytan under ett tidssteg rinner av till närmaste vattendragspixel eller sjöpixel under det aktuella tidssteget (ett dygn) – om det inte infiltrerar på vägen. Efter att den kumulativa infiltrationen beräknats, beräknas den resterande potentiella infiltrationen definierad som djupet till grundvattenytan minus höjden av vattenhalten i marken minus den kumulativa infiltrationen. I modellen anges grundvattendjupet som höjden av porvolymen ovanför grundvattenytan (d.v.s. grundvattendjupet multiplicerat med porositeten). Vattnet som rinner av som ytavrinning flödar nedströms i flödesnätverket och infiltrerar om det kommer till en pixel där den potentiella infiltrationen är större än noll. Om den potentiella infiltrationen är lägre än volymen avrinnande vatten, kommer det vatten som inte kan infiltrera att rinna vidare till nästa pixel. Så länge det finns ytavrinning kvar fortsätter vattnet att rinna nedströms ända till närmaste sjö eller vattendrag.

En justering av ytavrinningen görs när det förekommer smältvatten från snön. En parameter K_i multipliceras då med regn och smältvatten och avgör hur mycket vatten som blir ytavrinning. Vid implementeringen i Kölstaån kalibrerades den till 15 %.

3.2.4 Den omättade zonen

Det infiltrerande vattnet hamnar i den omättade zonen som beskrivs av vattenhalten. I den omättade zonen kan vattnet avgå till atmosfären genom evapotranspiration eller perkolera ner till grundvattnet. Det angreppssätt som användes för att modellera perkolationen är konceptuellt och bygger på antagandet att perkolation enbart inträffar om vattenhalten överstiger fältkapaciteten. Förändringen av vattenhalt för varje tidssteg beräknas genom att subtrahera perkolationen och evapotranspirationen från infiltrationen och dividera med djupet till grundvattenytan. Den nya vattenhalten beräknas sedan som den gamla vattenhalten plus förändringen (se Ekvation 6).

$$\Delta\theta = \frac{I - P - AET}{D}$$

och

$$\theta_i = \theta_{i-1} + \Delta\theta$$

där :

I = infiltration (mm)

P = perkolation (mm)

AET = verklig evapotranspiration (mm)

θ_i = vattenhalt vid tiden i

$\Delta\theta$ = förändring i vattenhalt under ett tidssteg

Ekvation 6. Beräkning av vattenhalten (Dingman, 1994)

Modelleringen av perkolationen följer resonemanget i Wilson (2003). Det huvudsakliga antagandet är att ingen perkolation sker om vattenhalten understiger fältkapaciteten. I de fall där fältkapaciteten överskrids ökar perkolationen med ökande vattenhalt. I modellen är den högsta gränsen för perkolationen den mättade hydrauliska konduktiviteten (vilket med tidsupplösningen ett dygn i princip innebär att allt vatten som överskrider fältkapaciteten också perkolerar). Perkolationen beräknas med hjälp av sambandet i Ekvation 7.

$$P = K_{sat} \left(\frac{\theta - \theta_{fc}}{\theta_s - \theta_{fc}} \right) \quad \text{om } \theta > \theta_{fc}$$

$$P = 0 \quad \text{om } \theta \leq \theta_{fc}$$

där :

P = perkolation (mm/dygn)

K_{sat} = mättad hydraulisk konduktivitet (mm/dygn)

θ = vattenhalt

θ_s = vattenhalt vid mättnad

θ_{fc} = fältkapacitet

Ekvation 7. Perkolation som funktion av fältkapacitet (Wilson, 2003)

3.2.5 Grundvattenrutinen

Grundvattenmagasinet beskrivs som ett linjärt magasin och grundvattenrutinen är därmed konceptuellt baserad. För det linjära magasinet gäller att utflödet beror av magasinets storlek enligt Ekvation 8.

$$Q_i = \frac{S_{i-1}}{K_g}$$

$$S_i = S_{i-1} + P_i - Q_i$$

P = perkolation (mm/dygn)

Q = grundvattenflöde (mm/dygn)

K_g = recessionskoefficient för grundvatten (dygn)

S = grundvattenmagasinets storlek (mm)

Ekvation 8. Modellering av grundvattenmagasinet

Sjöar, sankmarksområden och vattendrag behandlas som en del av grundvattenmagasinet, men avrinningen från sjöarna och sankmarksområdena samt flödet i vattendragen beräknas på ett annat sätt än grundvattenflödet. För sådana pixlar adderas nederbörden direkt till grundvattenmagasinet. Sjöarnas recessionskoefficient kalibreras så att vattennivån i sjöarna blir stabil över kalibreringsperioden. Initialt sätts storleken på grundvattenmagasinet lika med medeldjupet om detta är tillgängligt. Vattnet från ytavrinning och grundvattenflöde från uppströms belägna pixlar som rinner direkt till sjön adderas till vattnet i sjön och fördelas jämnt över alla pixlar i sjön. Avrinning från sjöar beräknas enligt Ekvation 9.

$$Q_{lake,i} = (S_{i-1} + R_i - AET_i + W_{upstream,i}) / K_{lake}$$

där :

$Q_{lake,i}$ = avrinning från sjön under tidsteg i (mm/dygn)

S_{i-1} = grundvattenmagasinets storlek vid slutet av tidsteg $i - 1$ (mm)

R_i = regn som faller på sjön under tidsteg i (mm)

AET = vatten som avdunstar från sjön under tidsteg i (mm)

$W_{upstream,i}$ = grundvattenflöde och ytavrinning från uppströms belägna pixlar som rinner direkt till sjön under tidsteg i (mm)

K_{lake} = recessionskoefficient för sjöar (dygn)

Ekvation 9. Beräkning av avrinning från sjöar

För sankmarksområdena beräknas avrinningen på samma sätt som för sjöar och de har en recessionskoefficient K_{marsh} som är lägre än den för sjöarna (de retentionskoefficienter som används framgår av Tabell 7, Appendix 1). När det vatten som

rinner direkt till sjöarna och sankmarksområdena lagts till dessa, adderas all grundvattenavrinning, och all ytavrinning som inte infiltrerar på vägen, till närmaste vattendrag. Det antas att avrinningen hinner nå vattendragen under ett tidssteg eftersom avstånden är relativt små. Flödet i vattendragen utjämnas med en routingmetod som är den kinematiska vågen med Mannings ekvation (se Ekvation 10).

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} = q \quad (\text{kontinuitetsekvation})$$

$$S_0 = S_f \quad (\text{momentekvation}) \quad \text{kan också skrivas som :}$$

$$A = \alpha \cdot Q^\beta$$

$$Q = \frac{R_h^{2/3} S_f}{n} \quad (\text{Mannings ekvation}) \quad \text{där}$$

$$R_h = A/P$$

Mannings ekvation kombinerad med uttrycket för A ger:

$$A = \left(\frac{n \cdot P^{2/3}}{\sqrt{S_0}} \right)^{3/5} Q^{3/5} \quad \text{här blir då :}$$

$$\alpha = \left(n \cdot P^{2/3} / \sqrt{S_0} \right)^{3/5} \quad \text{och}$$

$$\beta = 3/5 = 0.6$$

Q = vattenföring (m^3/s)

A = flödets tvärsnittsarea (m^2)

q = lateralt inflöde ($(m^3/s)/m$)

t = tid (s)

x = sträcka i flödesriktningen (m)

S_0 = gravitationskraftsterm

S_f = friktionskraftsterm

R_h = hydraulisk radie (m)

n = Mannings råhetstal

P = våt perimeter (m)

Ekvation 10. Kinematisk våg med Mannings ekvation (Chow, 1988)

Den simulerade vattenföringen kan hämtas från vilken vattendragspixel som helst i vattendragsnätet och ger då värdet för denna pixels avrinningsområde. På grund av att vattendragen måste vara en hel pixel (50 m) breda justeras nederbörden beroende på vattendragsordning så att den motsvarar smalare vattendrag. För att inget vatten ska försvinna sprids resten av regnet ut på de pixlar som ligger precis uppströms vattendragen. De rutiner och kalibreringsparametrar som används i modellen sammanfattas i Tabell 2.

Tabell 2. Sammanfattande tabell över rutiner och kalibreringsparametrar

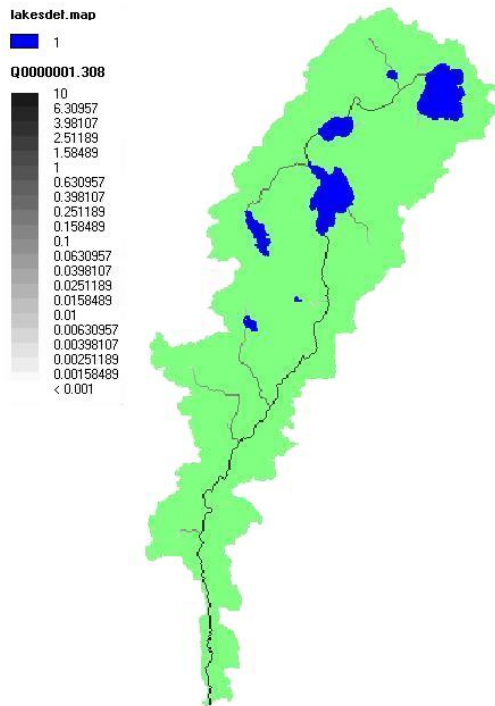
Modellering av	Namn	Kalibreringsparametrar
Snötäcke	Grad-dagsmetoden	Återfrysningskoefficient, CFR , grad-dagsfaktor DGD , tröskeltemperatur, TT
Infiltration	Green-Ampt	Justering vid snösmältning, K_i , ev. markfysikaliska parametrar: vissningsgräns, θ_w , mättad hydraulisk konduktivitet, K_{sat} , porositet, ϕ , fältkapacitet, θ_{fc}
Evapotranspiration	Blainey-Criddle	Kritisk vattenhalt, θ_c
Perkolation	Med fältkapacitet	Ev. markfysikaliska parametrar: mättad hydraulisk konduktivitet, K_{sat} , porositet, ϕ , vissningsgräns, θ_w , fältkapacitet, θ_{fc}
Grundvattenflöde	Linjärt magasin	Recessionskoefficienter för grundvatten, sjöar och sankmark K_g , K_{lake} , K_{marsh}
Flödesrouting	Kinematisk våg med Mannings ekvation	Mannings råhetstal, N
Generellt		Grundvattendjup

De värden för modellparametrarna som användes under modellutvärderingen återfinns i Tabell 6 och Tabell 7 samt Figur 20 i Appendix 1. Kalibreringen gjordes manuellt genom att studera anpassningen mellan kurvor för observerad och simulerad vattenföring.

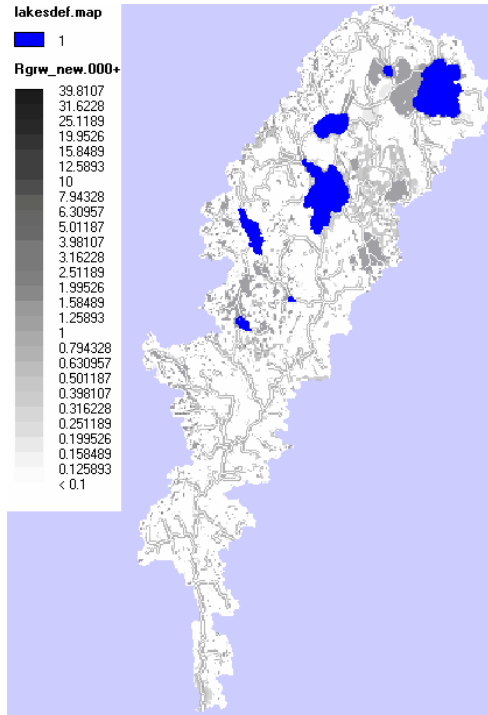
4 RESULTAT

4.1 Distribuerade rasterdata

Innan modellen körs väljs de parametrar ut som ska rapporteras som en rasterkarta för varje tidssteg. Dessa rasterkartor kan sedan visas som en film för att illustrera hur modellparametern ifråga varierar över tiden. I Figur 9 nedan visas hur avrinningen från området ser ut under en vårflödestopp under kalibreringsperioden.

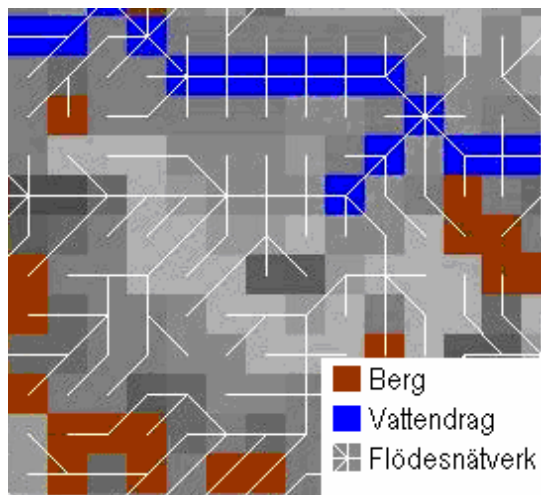


Figur 9. Simulerad vattenföring i avrinningsområdet vid en vårflödestopp under kalibreringsperioden. Skalan för vattenföringen (m^3/s) är logariterad och de blå områdena är sjöar.

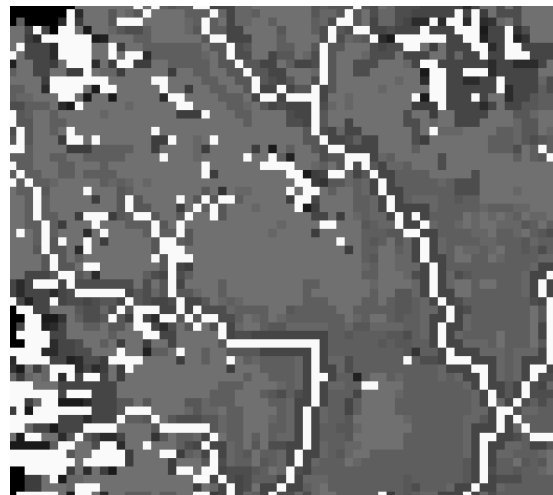


Figur 10. Simulerat grundvattenflöde i avrinningsområdet under en flödestopp. Skalan är logariterad (mm) och de blå områdena är sjöar. I områdena med sand och grus är flödet högre och kartan mörkare (jmf Figur 4).

Vad gäller grundvattenflödet syns det tydligt att flödet är som högst i pixlar med grövre jordarter (se Figur 10). Det är även högre nära vattendragen och vid de pixlar som ligger nedströms bergsområden, eftersom vattnet som rinner av från bergsområdena infiltrerar i den omgivande jorden (se Figur 10 och Figur 11).



Figur 11. Grundvattenflödet. I figuren syns hur grundvattenflödet är högre (mörkare färg) runt bergställarna, eftersom nederbörden som faller på berget rinner av och infiltrerar i den omgivande jorden. Grundvattenflödet är även högre runt vattendragen och i de mörka pixlarna i mitten av bilden som är sankmarksområden.



Figur 12. Grundvattenmagasinet. Närmare vattendragen (vita linjerna) samt runt bergställarna (vita områdena) är grundvattenmagasinet större (mörkare färg i bilden).

Grundvattenmagasinet är också större nedanför berghällarna och runt vattendragen än i övriga områden (se Figur 12 ovan).

4.2 Utvärderingsdata och utvärderingsparametrar

Som mått på modellens effektivitet användes volymfelet, V_E och Nash & Sutcliffes effektivitetsmått R_{eff} (se Ekvation 11). R_{eff} -värdet bygger på ett totalt *RMSE* (*Root Mean Square Error*) som transformerats och normaliserats mot variansen av den observerade vattenföringen (Xu, 2002). Vid beräkningen av dessa effektivitetsmått bortsågs från de två första månaderna som räknas som inkörningsperiod för modellen, och effektivitetsmåttarna beräknades med dygnsmedelvärden.

$$V_E = \frac{\sum(Q_{obs} - Q_{sim})}{\sum Q_{obs}}$$

$$R_{eff} = 1 - \frac{\sum(Q_{obs} - Q_{sim})^2}{\sum(Q_{obs} - \overline{Q_{obs}})^2}$$

där:

V_E = volymfel

R_{eff} = Nash & Sutcliffes effektivitetsmått

Q_{obs} = observerad vattenföring (m^3/s)

Q_{sim} = simulerad vattenföring (m^3/s)

Ekvation 11. Mått för modellutvärdering, volymfel samt Nash & Sutcliffes effektivitetsmått (Xu, 2002)

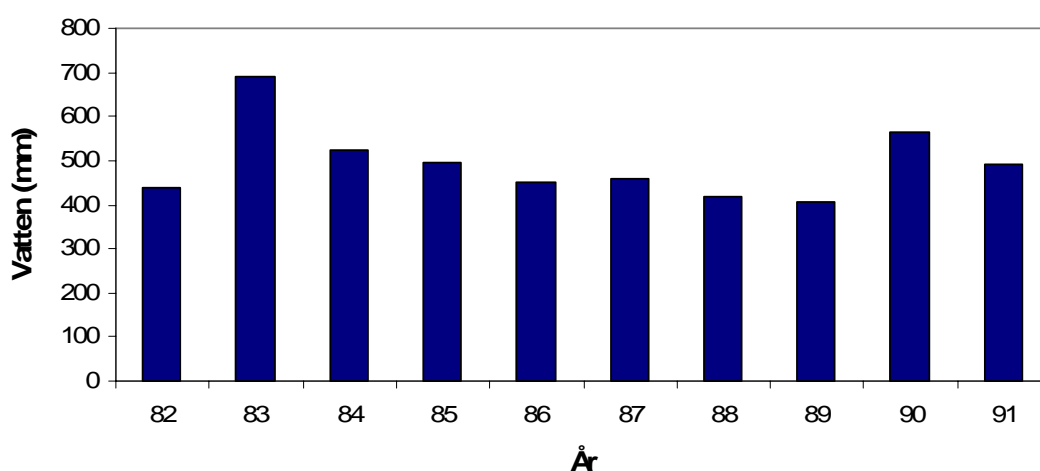
Modellutvärderingen skedde för hydrologiska år, vilket innebär att året börjar första oktober. Anledningen till att det hydrologiska året börjar på hösten är att magasinen ofta har lägst vatteninnehåll vid den tidpunkten på året och skillnaden mellan olika år blir därmed liten, det gör det lättare att gissa ett korrekt initialvärde för grundvattenmagasin och vattenhalt (Grip och Rodhe, 1994).

Modellen har kalibrerats och validerats mot vattenföringsdata från den hydrologiska stationen vid Odensvibron i Köping. Observerad temperatur och vattenföring under både kalibrerings- och valideringsperioden, samt nederbörd under kalibreringsperioden, visas i Figur 21 i Appendix 2. Statistik över utvärderingsdata visas i tabell 3.

Tabell 3. Statistik över utvärderingsdata.

Period	Medelvattenföring	Medeltemperatur	Medelnederbörd	Total avrinning	Total nederbörd
Kalibrering, 82-86	1,1 m ³ /s	5,5 °C	2,3 mm/dygn	1 560 mm	4 160 mm
Validering 87-91	0,9 m ³ /s	6,7 °C	2,0 mm/dygn	1 290 mm	3 630 mm

Ett mått på avdunstningen (om ingen lagring antas) erhålls genom att subtrahera avrinning från nederbörd för uppmätta data. Resultatet visar att avdunstningen är ovanligt hög under det andra året av kalibreringsperioden (se Figur 13).



Figur 13. Skillnad mellan observerad nederbörd och observerad avrinning för kalibrerings- och valideringsperioden. Under det andra året av kalibreringsperioden (1983) är skillnaden ovanligt stor.

4.3 Kalibrering

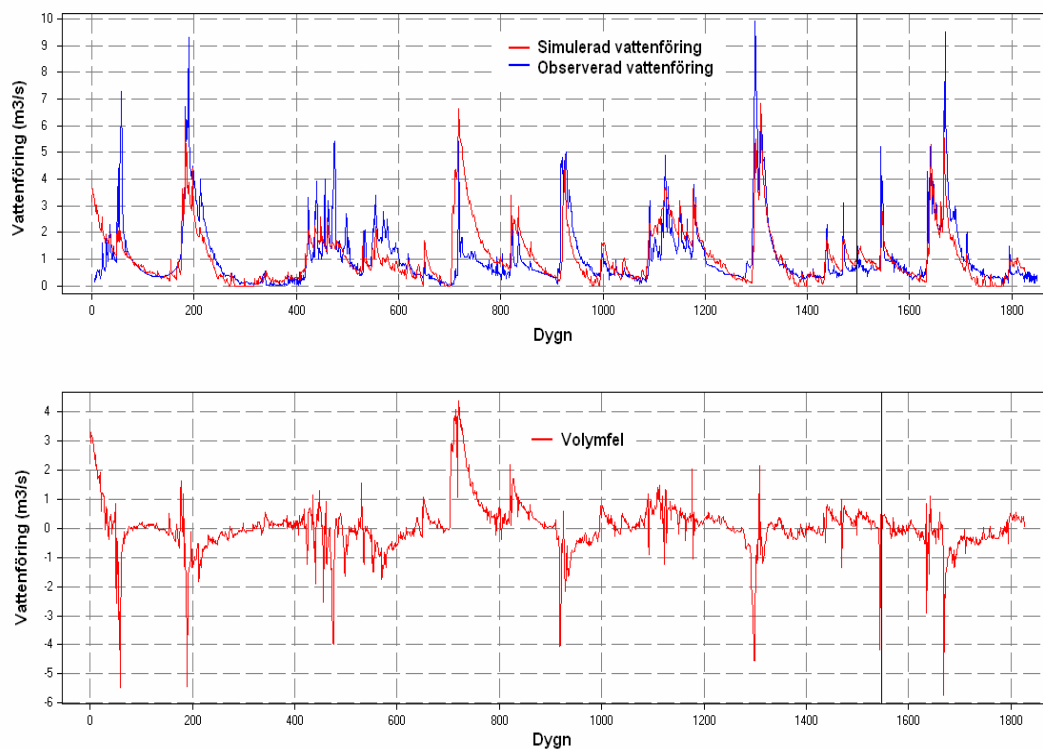
Under kalibreringsperioden (19811001-19860930) erhöles ett R_{eff} -värde på 0,55. Studeras varje år för sig under kalibreringsperioden visar det sig att R_{eff} -värdena skiljer sig mycket mellan åren (se Tabell 4).

Tabell 4. R_{eff} och V_E -värden under kalibreringsperioden.

År	82*	83	84	85	86	82-86
R_{eff}	0,80	-0,41	0,10	0,76	0,70	0,55
V_E (%)	-23	7	25	3	-12	0,1

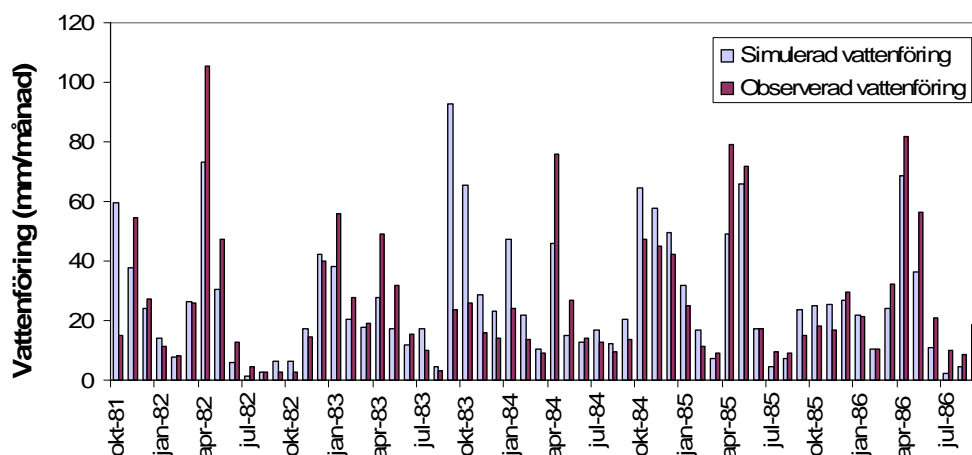
* Under det första året har inte de två första månaderna räknats med eftersom dessa räknas som modellens inkörningstid.

Volymfelet under kalibreringsperioden var 0,1 %, medan felet under de enskilda åren framgår av Tabell 4 ovan. Förutom ett större fel mellan 700 och 800 dygn följer den simulerade vattenföringskurvan den observerade, se Figur 14.



Figur 14. Observerad och simulerad vattenföring samt differensen mellan dessa under kalibreringsperioden

Den simulerade och observerade vattenföringen efter inkörningstiden summerades månadsvis och ritades upp mot varandra (se Figur 22 och Figur 23, Appendix 2). Den korrelationskoefficient, dvs det r^2 -värde som erhöles när en kurva anpassades till dessa värden var 0,49 om de två månaderna med det största felet räknades in och 0,72 om dessa inte räknades med. Värdet för kurvans lutning var 0,87 respektive 0,82. Den största skillnaden inträffade under september och oktober 1983, se Figur 15.



Figur 15. Simulerad och observerad vattenföring per månad under kalibreringsperioden (även inkluderat inkörningstiden).

4.4 Validering

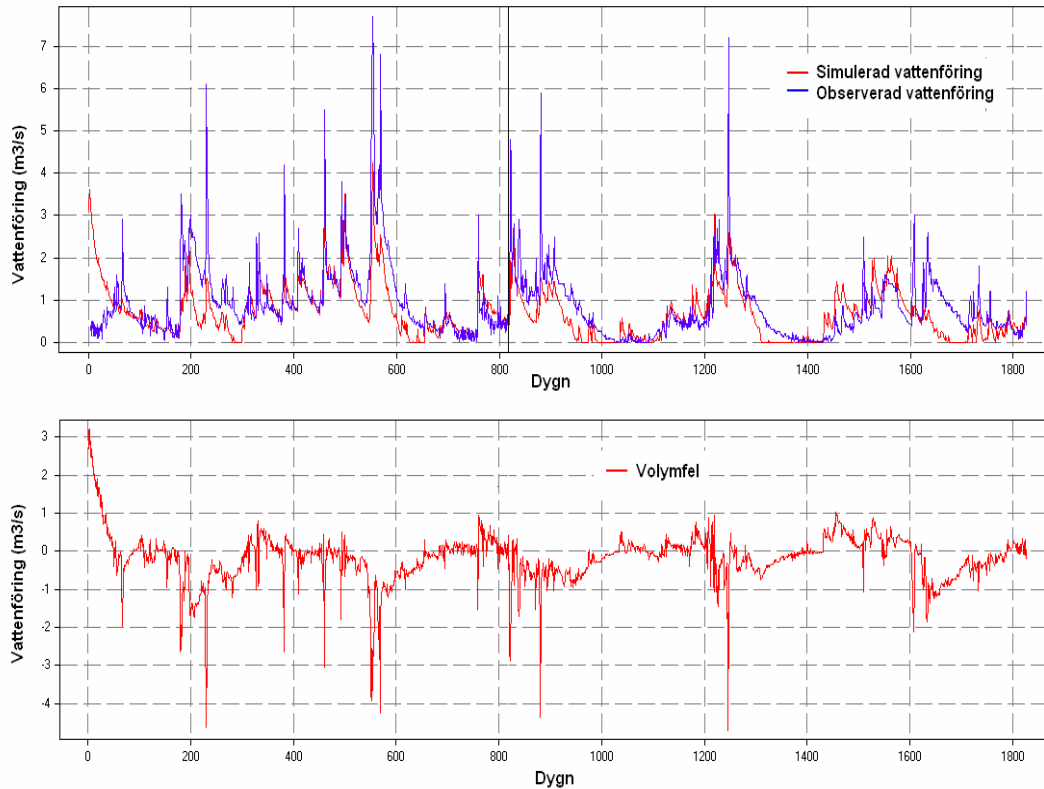
Valideringsperioden (19861001-19910930) skiljde sig från kalibreringsperioden genom att den observerade vattenföringskurvan inte innehöll lika många höga flödestoppar med efterföljande recession (se Figur 21 i Appendix 2). Vid valideringen erhöles ett R_{eff} -värde på 0,48 och ett volymfel på -21%. Resultaten för de enskilda åren framgår av Tabell 5.

Tabell 5. R_{eff} och V_E -värden under valideringsperioden

År	87*	88	89	90	91	87-91
R_{eff}	0,08	0,60	0,47	0,63	-0,46	0,48
V_E (%)	-35	-27	-31	-12	-19	-21

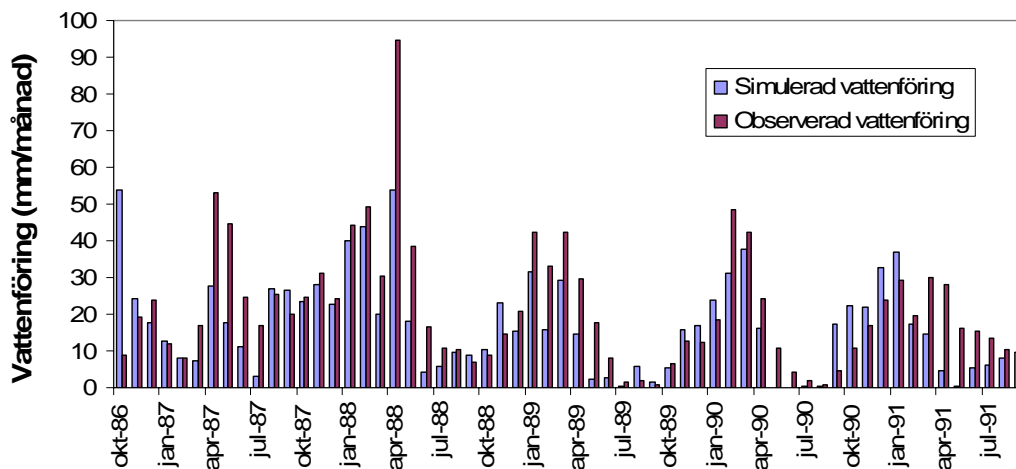
* Under det första året har inte de två första månaderna räknats med eftersom dessa räknas som modellens inkörningstid.

Den simulerade vattenföringen under valideringsperioden uppvisade störst skillnad mot den observerade i samband med höga flödestoppar samt under våarna, se Figur 16.



Figur 16. Observerad och simulerad vattenföring samt differensen mellan dessa under valideringsperioden

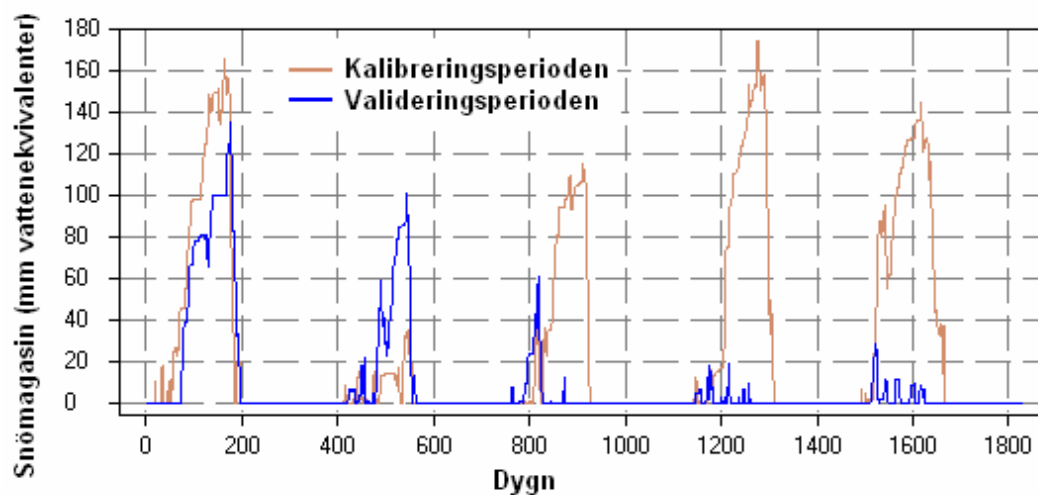
Månadsvis blev r^2 -värdet 0,60 och lutningen för regressionslinjen 1,24 när den simulerade vattenföringen ritades mot den observerade (se Figur 24, Appendix 2). Skillnaden mellan de månadsvisa värdena för simulerad och observerad vattenföring var som störst under våren varje år (se Figur 17).



Figur 17. Simulerad och observerad vattenföring per månad under valideringsperioden (även inkluderat uppvärmningstiden).

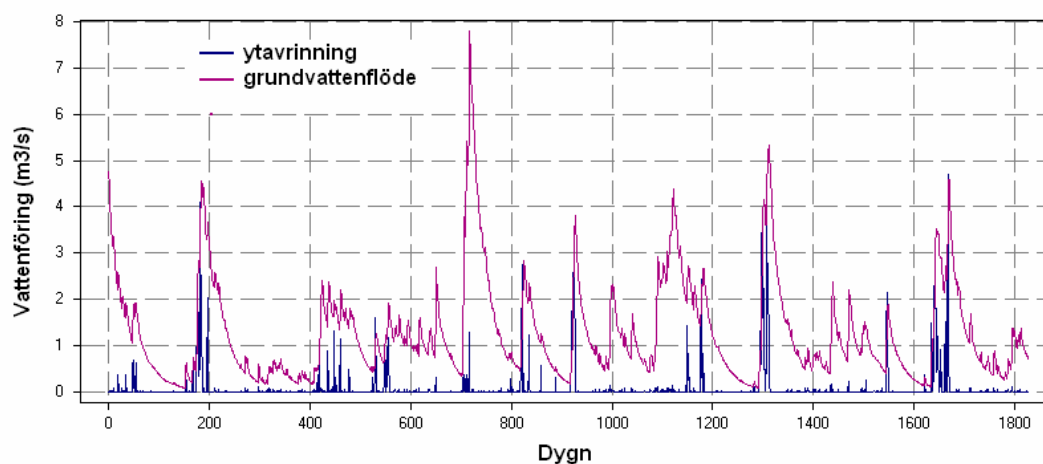
4.5 Simulerat snömagasin, ytavrinning och grundvattenflöde

Det genererade snömagasinet skiljer sig mycket åt mellan perioderna på grund av skillnader i nederbörd och temperatur (se Figur 18).



Figur 18. Simulerat snömagasin under kalibrerings- och valideringsperioden

Den största delen av den simulerade vattenföringen i utloppspunkten utgörs av grundvattenflöde, ytavrinning förekommer i samband med snösmältning och kraftiga regn, se Figur 19.



Figur 19. Simulerat grundvattenflöde och ytavrinning under kalibreringsperioden

5 DISKUSSION

5.1 Distribuerade rasterdata

De rasterkartor som modellen kan ge som utdata var till stor hjälp vid felsökning under modellutvecklingen. Dels på grund av den grafiska överblicken och dels på grund av möjligheten att överlagra olika kartor och kontrollräkna rutinerna på pixelnivå. De kartor över avrinning och grundvattenflöde som ges av modellen förefaller rimliga med avseende på skillnad mellan olika jordarter, respons på regntillfällen, m.m. (se Figur 9-12).

5.2 Kalibreringsresultaten

Under kalibreringsperioden beskriver modellen flödet väl under tre av åren (de med R_{eff} -värde från 0,7-0,8). Det andra året är skildringen av perioden på vintern med omväxlande snö och snösmältning inte lika god på dygnsnivå. På månadsbasis är dock överensstämmelsen bättre för denna period. I slutet av det andra (hydrologiska) året överskattas vattenföringen i samband med höstfloden, den simulerade vattenflödestoppen avviker från den skarpa topp som finns i den observerade kurvan. Den skarpa toppen har ingen efterföljande recession vilket vore fallet i ett naturligt vattendrag, och det är troligt att kurvans utseende beror på regleringarna i Kölstaån. Vidare var nederbörden mycket hög vid detta tillfälle (se Figur 21, Appendix 2), och det är troligt att denna nederbörd i verkligheten var ett mer lokalt regn och att samma regnmängd därför inte föll över hela avrinningsområdet. Den höga beräknade avdunstningen (cirka 600 mm/år) tyder på detta (se Figur 13). Det påföljande årets början är en del av den ovan skildrade perioden och anpassningen är således sämre även här. De sista två åren skildras flödet väl förutom att flödestopparna missas något. Troligtvis blir det för lite ytavrinning i modellen. Under hela tidsperioden är avdunstningen något hög under vår- och sommarmånaderna. Volymfelet är litet för hela perioden, men större under enskilda år.

5.3 Valideringsresultaten

Av mönstret i vattenföringskurvan (Figur 16) syns det att modellen svarar på alla regntillfällen under kalibreringsperioden, även om storleken på responsen inte alltid stämmer. Under valideringsperioden är anpassningen god under två av de fem åren. Med avseende på R_{eff} -värdet skildras inte det första och sista året väl och det tredje året är anpassningen mindre god (se Tabell 5). Vattenföringskurvan (Figur 16) visar att det är vid våren varje år som felet är störst. Avdunstningen vid denna tidpunkt är för hög och det beror antagligen på att modellen ställts in för att minimera felet under kalibreringsperioden. Nederbörden var troligtvis för hög under kalibreringsperioden vilket ledde till att evapotranspirationen i modellen justerades in så att även den blev för hög. Den kritiska vattenhalten (då avdunstningen blir potentiell, se avsnitt 3.2.2) ansattes till 60 % vilket troligtvis var en underskattning. Under valideringsperioden,

då nederbörden inte var lika hög, överskattades således avdunstningen varpå flödet på vårarna blev för litet. Alla avrinningstoppar blir inte lika höga som i observerade data, något som skulle kunna justeras med K_7 -parametern.

5.4 Jämförelse mellan kalibrerings- och valideringsresultaten

Den observerade vattenföringen för kalibrerings- och valideringsperioden skiljer sig åt i hög utsträckning. Medeltemperaturen under valideringsperioden är 1,2 grader varmare än under kalibreringsperioden vilket ger utslag på vinter- och vårflödena. Under kalibreringsperioden är i princip alla vintrar snörika, medan mängden snö avtar successivt för varje vinter under valideringsperioden (se Figur 18). Det är viktigt att pricka in rätt tidpunkt för snösmältning för att på rätt sätt skildra de mindre flödestopparna under en varmare vinter. Eftersom temperaturen är avgörande för snösmältningen påverkas troligtvis resultaten även av att båda temperaturstationerna ligger långt utanför området. Valideringsperioden visar att modellen ger en bättre skildring av kalla vintrar jämfört med varma – de snabba avrinningstoppar som finns i den observerade vattenföringen under valideringsperioden finns inte med i samma utsträckning i den simulerade. Om dessa avrinningstoppar till stor del består av ytavrinning (något som skulle kunna antas eftersom de inte har någon efterföljande recession) vore det möjligt att en bättre anpassning skulle erhållas om modellen genererade mer ytavrinning. Grundvattendjupet är avgörande för den mängd ytavrinning som bildas. Resultaten skulle troligtvis förbättras i hög grad om det fanns tillgång till data för grundvattennivåer att stämma av det antagna grundvattendjupet med. En annan orsak kan vara justeringen av infiltrationskapaciteten under snösmältningen som bör utvecklas ytterligare så att modellen genererar mer ytavrinning vid dessa tillfällen.

Eftersom månadsvärden för avrinning används i WATSHMAN är det viktigt att modellen ger rimliga värden på månadsbasis. Resultaten från kalibrerings- och valideringsperioden ser lovande ut för månadsvärdena i jämförelse med den nuvarande WATSHMAN-modellen.

Validering av distribuerade modeller bör helst ske mot distribuerade data för att därigenom på bästa sätt pröva modellens tillförlitlighet (Zappa, 2002). Vid en sådan validering är det viktigt att ta hänsyn till parametervärdenas variation med skalan (Motovilov m.fl., 1999). En direkt jämförelse mellan modellerade och uppmätta värden kan inte göras eftersom modellens variabler har lägre upplösning än distribuerade uppmätta data. Av den anledningen måste distribuerade mätdata medelvärdesbildas till modellens skala för att möjliggöra jämförelser. Den i arbetet utvecklade modellen underlättar sådana jämförelser eftersom den använder distribuerade data för både jordart och markanvändning samt har en hög rumslig upplösning. En bättre uppfattning om modellens förmåga att beskriva de processer som sker i avrinningsområdet hade givits om tillgång till distribuerade mätdata för t ex grundvattennivåer och markfuktighet hade varit tillgängliga.

5.5 Modelldiskussion

5.5.1 Modellens karaktär

Den färdiga modellen kan snarast betecknas som en hybrid mellan en konceptuell och en fysikalisk modell. De fysikaliska ansatserna innebär inte att ekvationer giltiga för en liten skala antas gälla för en större skala (jmf. avsnitt 1.3). Ett exempel på detta är den perkolationsrutin som användes i modellen. Allt vatten som överstiger fältkapaciteten antas infiltrera på dygnsnivå i rutinen, vilket inte är ett fysikaliskt orimligt antagande, men den fältkapacitet som används i modellen är inte en helt fysikalisk parameter utan en parameter som kan behöva kalibreras.

De modellparametrar som är av störst betydelse för utdata är recessionskoefficienten för grundvattnet, tröskeltemperaturen, grad-dagsfaktorn och den kritiska vattenhalten. Av modellens kalibreringsparametrar är åtta stycken att betrakta som rena kalibreringsparametrar (CFR , DGD , TT , K_g , K_{marsh} , K_{lake} , K_i och θ_c) medan de övriga har sin grund i fysikaliska variabler (N , θ_{fc} , θ_{wilb} , ϕ och K_{sat}).

5.5.2 Indata, rumslig upplösning och osäkerheter

De största osäkerheterna i indata finns i de meteorologiska indata. Ett sätt att förbättra den meteorologiska beskrivningen är att interpolera nederbörds- och temperaturdata istället för att använda medelvärden, vilket skulle ge störst förbättring för nederbörden. Höjdmodellens kvalitet påverkar flödesmönstret emedan jordarts- och markanvändningskartans kvalitet främst påverkar avrinningsbildningen. Av dessa GIS-indata har markanvändningskartan den högsta upplösningen och därmed i detta avseende den lägsta osäkerheten. Det vore önskvärt att utvärdera en höjdmodell-baserad modell som denna även i ett mer kuperat område – där topografin i högre grad är avgörande för vattenflödet. De markfysikaliska parametervärdena (för porositet, vissningsgräns, fältkapacitet och mättad hydraulisk konduktivitet) är också behäftade med stora osäkerheter, men det låga antalet parametrar gör att problem med överparametrisering undviks. Att koppla parametervärden och jordarter – såsom är möjligt i en GIS-baserad modell – minskar också parameterbehovet och introducerar inte nödvändigtvis någon extra osäkerhet. Att ingen extra osäkerhet introduceras beror på att osäkerheterna med att specificera ett visst parametervärde baserat på andra variabler (som läge i terrängen m.m.) ändå är stora.

Den rumsliga upplösningen är hög i förhållande till många avrinningsområdesmodeller – vilket är en fördel när flödesmönstret beräknas utifrån höjdmodellen. Det ger också större möjligheter att mer exakt ta hänsyn till markanvändning och vattendrag. Nackdelen är att minsta möjliga enhet blir en pixel, något som till exempel innebär att vattendragen blir minst 50 m breda. När vattendragen har en bredd som understiger en pixel (50 m) kommer för mycket vatten att falla på vattendraget om ingen korrigerings sker. Den lösning som användes vid denna tillämpning var att lägga det regn som inte ska falla på vattendraget på pixlar omedelbart uppströms vattendraget. Denna lösning kan bli problematisk med en lägre

upplösning och bör i så fall lösas genom att sprida ut vattnet på hela det övriga avrinningsområdet istället. Med en distribuerad modell finns möjligheter att utveckla modellen så att hänsyn kan tas till regleringar på specifika platser i vattendragen. I ett större område bör man överväga att förminska upplösningen något till exempelvis 100 m x 100 m pixlar för att öka beräkningshastigheten (i dagsläget 2½ timme för 5 år med en 1,6 GHz M processor och 512 MB RAM-minne).

5.5.3 Tidsupplösning

Vad gäller modellens tidsmässiga upplösning är den uppbyggd för dygnsmedelvärden och använder antaganden och ekvationer som är giltiga för denna tidsupplösning. Tillämpning av modellen med högre upplösning än dygnsnivå är därför inte att rekommendera. Det är viktigare att modellen ger en god överensstämmelse på månadsbasis än på dygnsnivå eftersom månader är den beräkningsnivå som används i WATSHMAN. Dygnsvariationerna är dock viktiga för att ge en god skildring av avrinningstoppar, något som är viktigt för de belastningsberäkningar som modellen ska ge indata till. En förfining av infiltrationsrutinen speciellt i samband med snösmältning skulle förbättra beskrivningen av dessa avrinningstoppar.

5.5.4 Snörutinen

Snörutinens parametrar har stor påverkan på den simulerade vattenföringen, eftersom de avgör utseendet för den stora vårflödestoppen eller för de mindre flödestoppar som bildas under en varmare vinter. Det går inte att utvärdera snörutinen för sig eftersom några data för snödjup inte fanns tillgängliga. På dygnsnivå är resultatet bättre för den stora snösmältningen på våren jämfört med de mindre vattenföringstoppar som bildas under vinterhalvåret ett varmare år. Detta kan bero på infiltrationen vid snösmältning såväl som tidpunkten och storleken på snösmältningen. En möjlig förbättring är att distribuera grad-dagskoefficienten, återfrysningsfaktorn och/eller tröskeltemperaturen beroende på markanvändning. Det kan tänkas att en lägre tröskeltemperatur kan användas i skogsklädda områden. En nackdel med detta är att mer komplexitet introduceras i modellen.

5.5.5 Evapotranspirationsrutinen

Blainey-Criddles ekvation är baserad på temperaturmätdata, vilket är en stor fördel när mängden indata bör hållas låg (se avsnitt 3.2.2). Med ytterligare en parameter, en faktor k_{evap} , är det möjligt att ta hänsyn till olika sorters markanvändning. Den användes dock inte vid denna tillämpning eftersom det är svårt att bestämma representativa värden för den parametern. Troligtvis borde den ha använts för att skilja avdunstningen från öppet vatten och andra ytor. En justering mot vattenhalten görs dock för de områden som inte är sjöar, sankmark eller vattendrag vilket innebär att avdunstningen inte alltid är potentiell i dessa områden (vilket den i modellen alltid

är i sjöar, sankmark och vattendrag). Denna justering, vars storlek är beroende av den kritiska vattenhalten, är viktig för att modellen ska fungera bra och det visade sig inte minst vid kalibreringen då evapotranspirationen överskattades.

5.5.6 Infiltrationsrutinen

Green-Ampts ekvationer (se avsnitt 3.2.3) förutsätter att markytan inte lutar och att den initiala vattenhalten är låg, vilket sällan stämmer med verkliga förhållanden. Eftersom det andra fallet i Green-Ampts ekvation aldrig behöver användas vid dygnsberäkningar kan antagandet om låg initial vattenhalt förbises och hänsyn skulle kunna tas till lutande markyta. Vid höga regnintensiteter kan man tänka sig att ytavrinningen skulle underskattas när tidssteget är ett dygn, om det i verkligheten regnar så kraftigt att den mättade hydrauliska konduktiviteten överskrids under en kortare tid – vilket skulle leda till att ytavrinning bildas. Denna ytavrinning kommer dock troligtvis att infiltrera på någon annan plats inom den aktuella pixelns $2\ 500\ \text{m}^2$ stora yta. Den ytavrinning som faktiskt skapas i modellen bildas på berghällar samt då marken mäts vid stora regnmängder. Mättnaden inträffar framförallt runt berghällar samt vid vattendragens sidor, vid vilka man i modellen kan iaktta mättade utströmningsområden vid kraftiga regn. Ett annat fall då ytavrinning kan inträffa i verkligheten är vid snösmältning då marken är frusen. Detta sker i modellen genom att infiltrationen justeras om vattenhalten är hög och smältvatten föreligger. Justeringen är troligtvis rimlig eftersom ytan i princip kan bli impermeabel om vattenhalten är hög och marken fryser. Om vattenhalten är lägre kan däremot mycket hög infiltrationskapacitet uppnås. Denna justering genomfördes enbart då vattenhalten i det tidigare tidssteget var lika med fältkapaciteten.

Det i modellen antagna grundvattendjupet är avgörande för ytavrinningsbildningen, och kalibrerades i viss mån för att efterhärma de snabba avrinningstoppar som kunde iaktas i den uppmätta vattenföringen. Antagandet om ett grundvattendjup på en meter för åkermark är troligtvis rimligt eftersom de flesta dräneringsrör ligger på detta djup. I skogsmarken är antagandet om drygt en halvmeters djup mer osäkert och beroende av parametrar som bland annat läge i terrängen. Eftersom detta grundvattendjup är mycket osäkert ansattes ett generellt värde för all skogsmark och ingen korrektion utfördes för olika jordarter (morän är den klart dominerande jordarten i skogsområdena). I övriga pixlar som varken var jordbruksmark eller skogsmark korrigerades grundvattendjupet genom att hänsyn togs dels till den ackumulerade lutningen, samt till om jordarten var sand, grus, sten eller isälvsmaterial. Dessa antaganden verkar med tanke på resultatet som rimliga, men det vore önskvärt med ett antal kalibreringspunkter för att stämma av grundvattenytans djup. Det är tänkbart att modellen skulle förbättras om ytterligare ett marklager ansattes, eftersom den hydrauliska konduktiviteten är högst i de övre jordlagren och lägre i den djupare, mer sammanpackade jorden – det innebär dock fler kalibreringsparametrar i modellen.

Justeringen av infiltrationen under snösmältning, se avsnitt 3.2.3, skulle kunna utvecklas vidare. Det vore troligen bättre att ansätta till exempel ett ytligare grundvattendjup i infiltrationsrutinen under snösmältning, så att rutinen i övrigt fungerar som tidigare.

5.5.7 Perkolationsrutinen

Perkolationsrutinen fungerade väl ihop de övriga markrutinerna i modellen och antagandet om att det vatten som överstiger fältkapaciteten perkolerar ned till grundvattnet kan troligtvis stämma på dygnsnivå. När grundvattendjupet inte är mer än en meter är dock inte fältkapaciteten ett väldefinierat begrepp (Grip och Rodhe, 1994). Då blir antagandet osäkert och fältkapaciteten mer av en kalibreringsparameter än en variabel. Dessutom är det svårt att ansätta ett bra värde för fältkapaciteten för torv, morän, grus och isälvsmaterial.

5.5.8 Grundvattenrutinen

Grundvattnet står för den absolut största delen av de simulerade flödestopparna (se Figur 19). Grundvattenytans läge och recessionskoefficienten för grundvattenflödet har stor påverkan på utflödet från modellen. Ett större djup till grundvattenytan ger lägre ytavrinning vid flödestoppar, vilket gör att avrinningen i högre grad sker som grundvattenflöde. Det ideala vore att ha tillgång till grundvattennivådata som kan ges som indata till modellen. Ett andra djupare (och långsammare) grundvattenmagasin kan troligtvis förbättra grundvattenbeskrivningen, men skulle kräva fler kalibreringsparametrar. Ett annat alternativ är att använda en fysikalisk grundvattenrutin baserad på Darcys lag, men den gäller inte i områden med sten och block vilket kräver en speciell behandling av dessa områden.

Ett alternativt sätt att beräkna grundvattenflödet testades även, där grundvattenflödet enbart berodde på infiltrationen i det nuvarande och förra tidssteget samt på perkolationen. Nackdelen med detta blev att grundvattenflödet var helt oberoende av grundvattenmagasinets storlek och detta fall användes därför inte, men resultaten var liknande.

Sankmarksområdena behandlas i modellen som utströmningsområden med snabb respons på nederbörd och snösmältning. Det innebär att vattennivån snabbt sjunker efter ett nederbördstillfälle, och under torrperioder erhålls i princip ingen avrinning alls från dessa områden. Ett tänkbart alternativ till att behandla sankmarksområden som en del av grundvattenmagasinet är att behandla dem som områden med litet djup till grundvattenytan. Sankmarksområdena ger trots sin snabba respons ett fördröjt bidrag till vattenflödet i området, eftersom i princip alla sankmarksområden är belägna uppströms sjöar.

5.6 GIS och PCRaster

Att koppla GIS till hydrologiska modeller har många fördelar. Dels förbättras beskrivningen av avrinningsområdet så att lokala variationer i jordart, topografi och markanvändning kan beaktas. Dessutom blir beskrivningen av flödesmönstret mycket mer detaljerad, vilket gör att lokala avrinningsområden kan identifieras och avrinningen kan erhållas från alla pixlar i vattendragen. En rasterbaserad modell förenklar även användningen av data från klimatmodeller och fjärranalys.

En stor fördel med modellens uppbyggnad är att det är lätt att förändra dess rutiner, det krävs ingen stor programmeringsmässig kunskap för att ändra i koden. Den mest avancerade programmeringen i modellen bestod i att skapa vattenflödet mellan olika vattenmagasin, samt till sjöar och vattendrag. När denna grundläggande struktur är uppbyggd kan rutinerna för de olika processerna i avrinningsområdet ändras utan alltför stora ansträngningar. I takt med att snabbare datorer utvecklas kommer användningen av högupplösta data i GIS-baserade modeller att underlättas, så att högupplösta modeller som denna kan tillämpas över större områden utan att simuleringstiderna blir långa.

6 SLUTSATSER

En sammanfattande slutsats är att arbetet har resulterat i en väl fungerande GIS-baserad modell med hög rumslig upplösning, som är delvis fysikalisk samt tar hänsyn till sjöar, vattendrag, jordarter och markanvändning – men i övrigt kräver lite indata. Modellen lever upp till flertalet av de i inledningen ställda kraven på distribuerade modeller. Flödesnätverket och DEM:en ger modellen en avancerad skildring av flödesmönstret på pixelnivå och flödesroutingen i vattendragen samt höjden och lutningen inom området. Vidare har modellen ett förhållandevis litet antal parametrar – av dessa behöver de markfysikaliska parametrarna som porositet och vissningsgräns troligtvis inte ändras vid tillämpning av modellen på andra liknande områden.

Den rumsliga beskrivningen har en hög upplösning vid denna tillämpning vilket dock medför nackdelar i form av längre simuleringstider. Vid tillämpning på ett större område lämpar det sig troligtvis bättre att gå ner något i skala för att spara beräkningstid. Eftersom modellen inte är speciellt komplex eller har alltför många kalibreringsparametrar, blir inte kalibreringsarbetet tidskrävande. Att modellen är rasterbaserad gör att den utan stora svårigheter kan kopplas till en klimatmodell eller använda fjärranalytiska indata. Modellen har många fördelar jämfört med den nuvarande WATSHMAN-modellen – speciellt grundvattenbeskrivningen, den höga upplösningen och den starka GIS-kopplingen.

De delar av modellen som framför allt kan förbättras är grundvattenrutinen, där en uppdelning på ett snabbare och ett långsammare grundvattenmagasin, eller en mer fysikalisk rutin, skulle kunna förbättra simuleringresultaten. En förfining av

evapotranspirationsrutinen och avrinningen vid snösmältning skulle också kunna förbättra resultaten. Dessutom är det mycket användbart att lägga in villkor och data för regleringar i vattendrag i de fall sådana data finns tillgängliga. En viktig erfarenhet från modelleringsarbetet har varit betydelsen av bra GIS-data för vattendrag.

Avslutningsvis bör modellen utvärderas i andra större områden med högre vattenföring och/eller större topografiskillnader. Denna utvärdering bör helst ske mot flera vattenföringspunkter och distribuerade data för andra variabler som till exempel grundvattennivåer.

REFERENSER

Litteratur

- Andersson, S. (1977-). *Studier av markprofiler i svenska åkerjordar*. (Hela serien). Institutionen för markvetenskap, avdelningen för lantbrukets hydroteknik, SLU.
- Bergström, S. (1992). The HBV-model – its structure and applications, *SMHI RH*, no 4 April 1992.
- Beven, K. (1989). Changing ideas in hydrology – The case of physically-based models. *Journal of Hydrology* 105: 157-172.
- Chow, V. T. (1988). *Applied hydrology*. McGraw-Hill, Inc. Singapore
- Clapp, R.B., Hornberger, G.M. (1978). Empirical equations for some soil hydraulic properties. *Water Resources Research* 14:601-604.
- Dingman, L. (1994). *Physical Hydrology*. Prentice-Hall, New Jersey.
- Ekstrand, S., Malander, C. (2003). *WPI History, current knowledge and stakeholders - Project report TWINBAS*. IVL.
- Grefte, F. (2003). *Material transport in the Norrström drainage basin: integrating GIS and hydrological process modelling*. Examensarbete, Institutionen för mark- och vattenteknik, KTH.
- Grip, H, Rodhe, A. (1994). *Vattnets väg från regn till bäck*. Hallgren & Fallgren, Uppsala.
- Hellgren, S. (2002). *En dagvattenmodell för beräkning av avrinning och transport av kväve och fosfor i Flatendiket i södra Stockholm*. Examensarbete, Institutionen för geovetenskaper, Uppsala Universitet.
- Håkanson, L. (1998). *Water pollution – methods and criteria to rank, model and remediate chemical threats to aquatic ecosystems*. Uppsala University, Sweden.
- Hägerhall Aniansson, B., Vidarve, M. (2003). *En basbok om Ramdirektivet för vatten*. Rapport 5307. Naturvårdsverket.
- Larsson, P. (2004). *Utveckling och tillämpning av en distribuerad GIS-baserad snösmältnings- och avrinningsmodell*. Examensarbete, Institutionen för geovetenskaper, Uppsala Universitet.
- Motovilov, Y., Gottschalk, L., Engeland, K., Rodhe, A. (1999). Validation of a

- distributed hydrological model against spatial observations. *Agricultural and Forest Meteorology* 98-99, 257-277.
- Seibert, J. (1999). Begreppsmässiga avrinningsmodeller – tillförlitliga verktyg i vattenplaneringen?, *Vatten* 55(3): 209-214.
- Sokrut, N., Thunvik, R., (2002). ”ECOFLOW – ett verktyg för integrerad modellering av yt- och grundvatten i avrinningsområden”. *Grundvatten* 1/02. 1-5.
- Strahler, A. N. (1964). *Quantitative geomorphology of drainage basins and channel networks, section 4-II. In: PCRaster Version 2 Manual.*
- TWINBAS. (2003). *TWINBAS, Annex I – ”Description of Work”*. Sixth Framework Programme Priority 1.1.6.3 Global Change and Ecosystems.
- Van Deursen W.P.A. (1995). *Geographical Information Systems and Dynamic Models*. Ph.D. thesis, Utrecht University, NGS Publication 190, 198 pp. Electronically available through www.carthago.nl.
- Wallin, M. (ed.) (2000). *Mälaren miljö tillstånd och utveckling 1965-98*. Mälarens vattenvårdsförbund, Tierp.
- Zakrisson, J., Ekstrand, S., Olshammar, M. (2003). *Fosfor- och kvävemodellering för avrinningsområden i relation till EU:s vattendirektiv (C21/02) Fallstudie – Sagån*. IVL B 1550, Stockholm.
- Zakrisson, J., Ekstrand, S., Olshammar, M. (2004). *Kväve- och fosformodellering i Svartån och Tyresån – Slutrapport*. IVL B 1551, Stockholm.
- Zappa, M. (2002). *Multiple-response verification of a distributed hydrological model at different spatial scales*. Ph.D. thesis, Swiss federal institute of technology, Zürich.

Internet

- Hattermann, F., Krysanova, V., Wechsung, M., Wattenbach, M. (2002). *Multiscale and multicriterial hydrological validation of the ecohydrological model SWIM*.
http://www.iemss.org/iemss2002/proceedings/pdf/volume%20uno/429_hattermann.pdf
- Rainfall-runoff modelling in PCRaster (2004)*
<http://pcraster.geog.uu.nl/run-off/index.html>
- PCRaster Version 2 Manual (2004)*
<http://www.pcraster.geog.uu.nl/documentation/pcrman/book1.htm>

Wilson (2003). *Lecture notes*

<http://www.tc.umn.edu/~wilson/bae8513/download/media.pdf>

Xu, C-Y. (2002). *Textbook of hydrologic models*.

<http://www.hyd.uu.se/chong-yu/papers/fulltext.pdf>

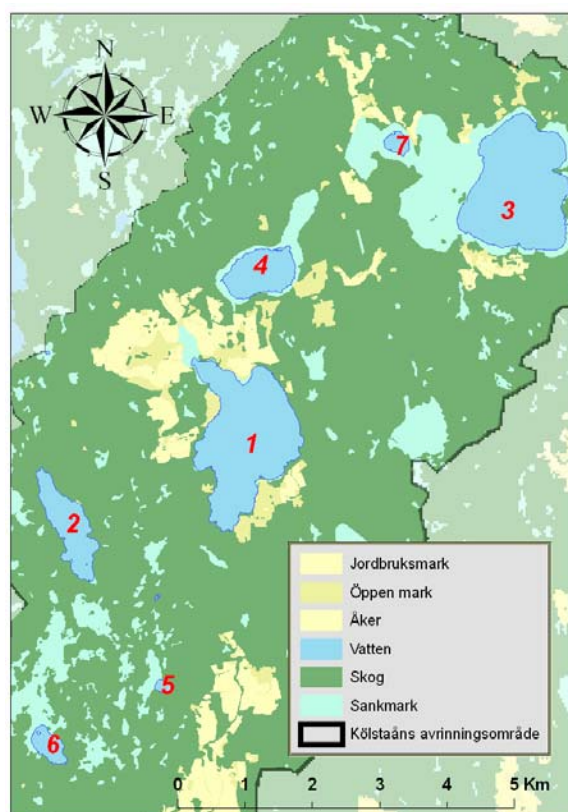
APPENDIX 1 – MODELLPARAMETRAR

Tabell 6. Värden för jordartsp parametrar

Parameter	Organisk jordart	Lera	Silt	Sand	Grus	Morän	Isälvs-material	Stenblock
K_{sat} (cm/h)	48	10	12	24	50	25	700	60
Porositet	0.77	0.5	0.5	0.43	0.43	0.40	0.43	0.5
Vissningsgräns	0.22	0.34	0.2	0.065	0.04	0.15	0.001	0.005
Fältkapacitet	0.5	0.4	0.3	0.12	0.05	0.3	0.03	0.01

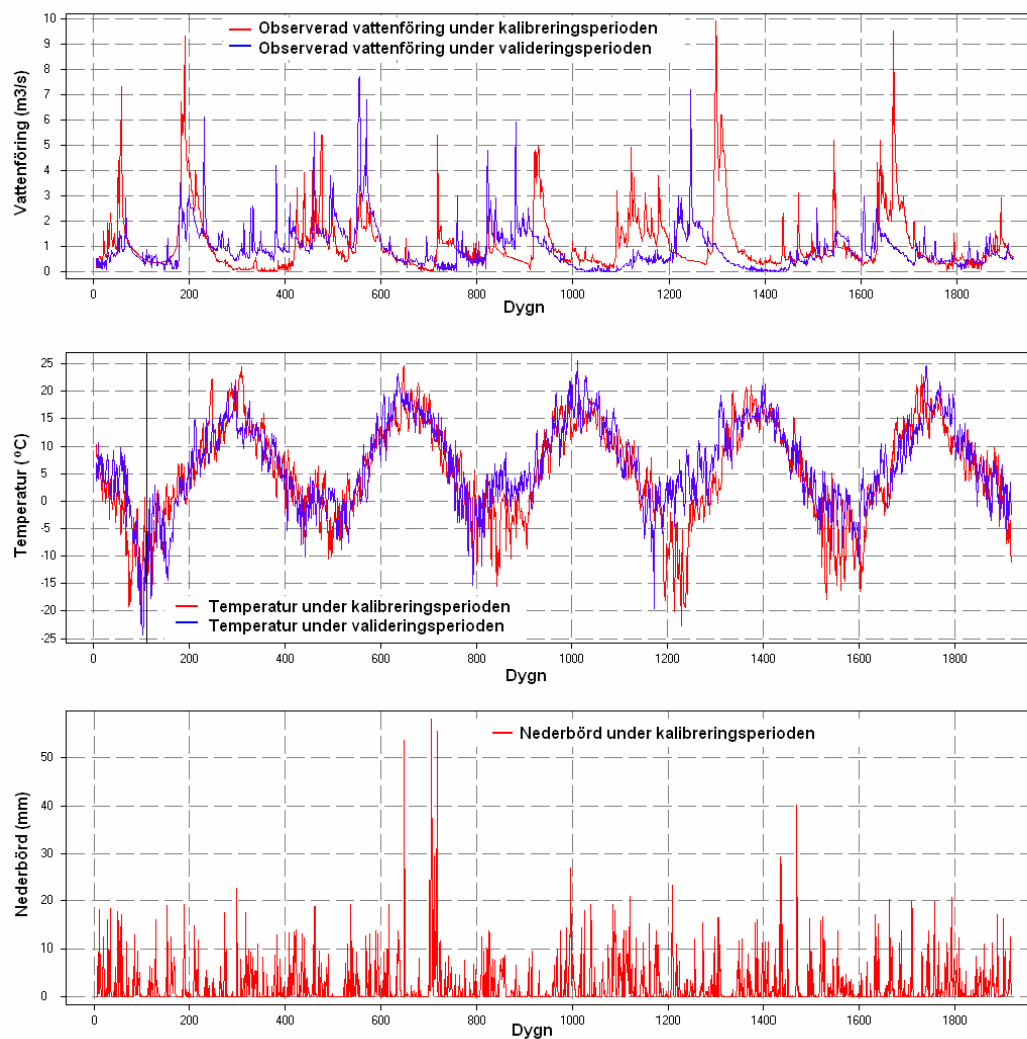
Tabell 7. Receptionskoefficienter

Parameter	Generellt värde	Sjö 1	Sjö 2	Sjö 3	Sjö 4	Sjö 5	Sjö 6	Sjö 7
K_{lake} (dygn)	-	1200	1500	600	500	400	310	250
K_g (dygn)	30	-	-	-	-	-	-	-
K_{marsh} (dygn)	5	-	-	-	-	-	-	-

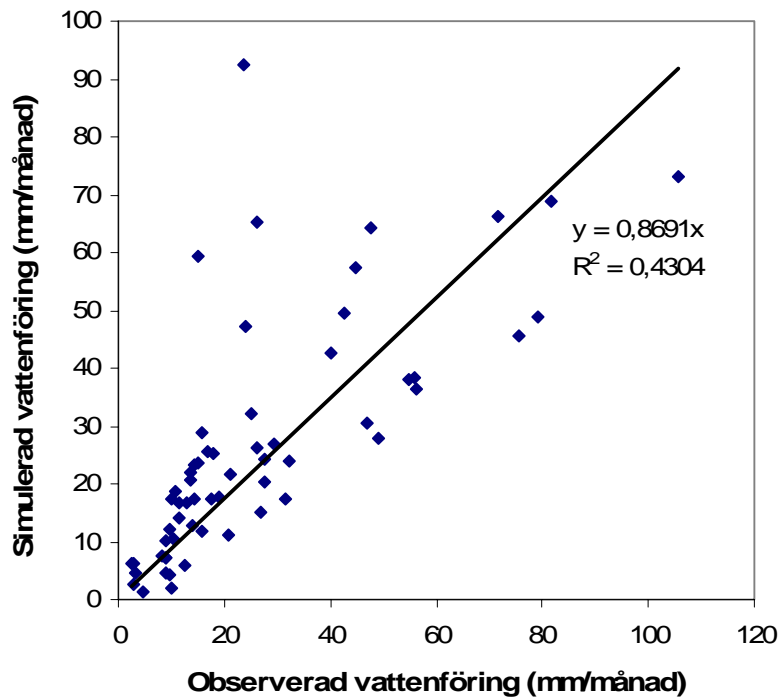


Figur 20. Stora sjöar i Kølstaåns avrinningsområde

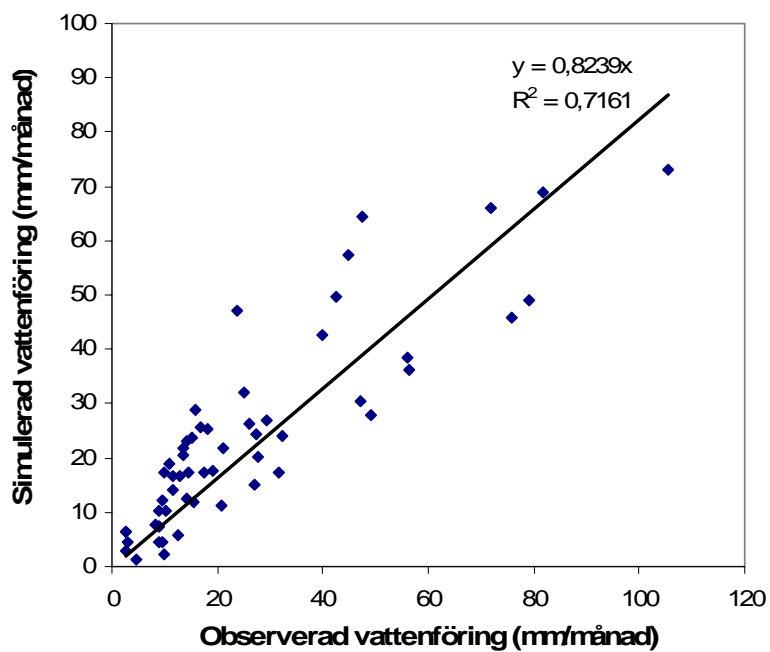
APPENDIX 2 – INDATA OCH UTDATA



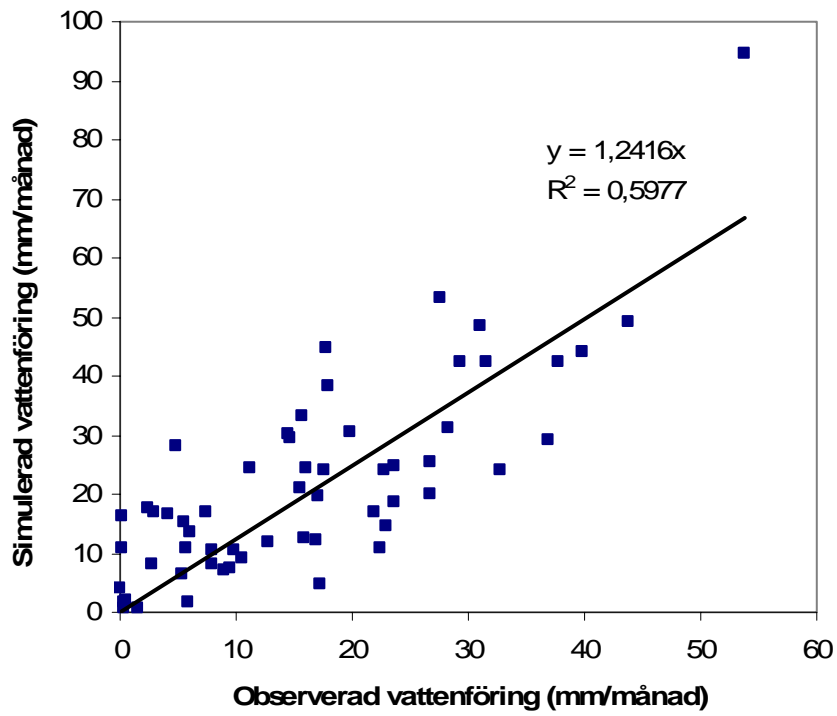
Figur 21. Observerade värden för vattenföring och temperatur under kalibrerings- och valideringsperioden, samt observerad nederbörd under kalibreringsperioden.



Figur 22. Simulerad mot observerad vattenföring för hela kalibreringsperioden



Figur 23. Simulerad mot observerad vattenföring (mm/månad) under kalibreringsperioden, de två månaderna med det största felet är borträknade.



Figur 24 Simulerad mot observerad vattenföring under valideringsperioden