

Tillrinningssimulering med HBV-96 och Vattenfall AB:s distribuerade hydrologiska modell (DHM) för Suorvamagasinet

Runoff simulation with HBV-96 and Vattenfall
AB:s distributed hydrological model (DHM)

Kristoffer Hallberg

Referat

Tillrinningssimulering med HBV-96 och Vattenfall AB:s distribuerade hydrologiska modell (DHM) för Suorvamagasinet

Kristoffer Hallberg

En distribuerad GIS-baserad hydrologisk modell (DHM) har vidareutvecklats och jämförts med HBV-96 som är den modell som används operationellt inom Vattenfall AB. Modellerna är mycket lika i sina strukturer och skillnaden ligger främst i den rumsliga återgivningen. Det huvudsakliga användningsområdet är tillrinningsmodellering för reglermagasin i syfte att optimera elproduktionen i vattenkraftverk. Indata till modellerna är dygnsvärden för temperatur och nederbörd samt månadsvärden för potentiell avdunstning. Information om tillrinningsområdet behövs i form av höjddata och markanvändning. Vattenfall AB:s intresse för en distribuerad modell ligger i att öka precisionen i tillrinningsprognoser genom uppdatering med fjärranalytisk data, något DHM är väl lämpad för. En ny rutin till DHM skapades för vattenflöde genom landskapet sk routing. Routingrutinen leder avrinningen enligt topografien i en digital terrängmodell och fördröjer flödet genom sjöar och sel. Modellen har i och med detta blivit mer fysikaliskt korrekt och möjliggör simulering av vattendrag inom tillrinningsområdet. Kalibrering har skett för tillrinning till ett reglermagasin och modellprestanda bedömdes genom Nash-Sutcliffe-effektivitet (R_{eff}) och volymfel (V_E). Tre modeller jämfördes; DHM, DHM med routing och HBV-96.

Studien har genomförts för Suorvamagasinet tillrinningsområde som ligger i Norrbottens län och karakteriseras av högalpin terräng med ett antal större sjöar. Vintertid ackumuleras stora mängder snö som i samband med snösmältningen under maj-juli ger upphov till mycket höga flöden i vattendragen. Prognoser för tillrinningen behövs både för god produktionsplanering och dammsäkerhetsarbete.

Resultaten visar att de tre modellerna under kalibreringsperioden är likvärdiga medan HBV-96 är något bättre för valideringsperioden. Skillnaden mellan DHM med respektive utan routing är liten. Med den distribuerade routingmetoden har DHM validerats mot flöde inom tillrinningsområdet med gott resultat. Fördelen med routing som möjliggör verifiering mot oberoende flödesdata bör vägas mot ökad exekveringstid och ökad modellkomplexitet. Parameterkänsligheten för DHM undersöktes och fanns störst för parametrar associerade med snabb avrinning.

Nyckelord: hydrologi, tillrinning, DHM, HBV, HBV-96, routing, linjära magasin

Abstract

Runoff simulation with HBV-96 and Vattenfall AB: s distributed hydrological model (DHM)

Kristoffer Hallberg

A distributed GIS-driven hydrological model (DHM) has been evaluated and compared to Vattenfall AB:s standard tool for hydrological simulation, the HBV-96 model. The models have similar structures though DHM uses a finer spatial resolution hence regarded as distributed. Runoff simulations in hydropower context are essentially reservoir management and optimising of power production. Input data are time series of daily precipitation and temperature, along with monthly mean values for potential evaporation. Catchment characteristics to be incorporated are elevation data and land use. The main reason for Vattenfall AB to develop a distributed model is to improve runoff forecasts by updating model storage with remote sense data. This is facilitated for the DHM and as it runs in a comprehensive GIS-environment. A new subroutine has been developed for runoff routing. The routing routine guides water along the topography and incorporates both translation and attenuation for major streams and lakes. This has improved the physical correctness and made validation against stream flow within the catchment possible. Calibration was based on runoff to a reservoir and evaluated by Nash-Sutcliffe efficiency (R_{eff}) and volume error (V_E). Three models were compared; DHM, DHM with routing, and HBV-96.

The study area was the catchment of the Suorva reservoir situated in the far northwest of Sweden. The catchment is mountainous and hosts a number of large lakes. Significant amounts of snow accumulate during winter, which give rise to intense spring floods when melting occurs in May-July. Forecast for runoff to the reservoir is need for management to encompass both production and dam safety aspects.

The models are equally good for the calibration period, while HBV-96 is slightly more accurate for the validation period. The difference between DHM with/without routing is small. A satisfactory validation was carried out against one stream flow record within the catchment by usage of the routine for distributed routing. Routing enables verification against independent and distributed stream flow data, but may not be justified because of increased runtime and model complexity. Parameter sensitivity for DHM concluded highest sensitivity for parameters associated with fast runoff.

Keywords: hydrology, runoff, DHM, HBV, HBV-96, routing, linear reservoir

Förord

Detta examensarbete slutför mina studier på civilingenjörsprogrammet miljö- och vattenteknik vid Uppsala Universitet.

Examensarbetet har utförts på Vattenfall Research & Development i Älvkarleby med Per Larsson som handledare. Ämnesgranskare var professor Sven Halldin vid institutionen för geovetenskaper, Uppsala Universitet.

Målet med arbetet har varit att undersöka de verktyg som Vattenfall AB kan använda för modellering av tillrinning till reglermagasin. Området kring Ritsem som studerats ligger mig varmt om hjärtat efter flera fältsäsonger med inventering av den svenska fjällrävsstammen. Det storslagna landskapet och vädret som kan vara mycket dramatiskt, bjuder många utmaningar för skidåkare, klättrare och hydrologer.

Ett stort tack går till Per Larsson och Mats Billstein för deras uppmuntran och hjälpsamhet. Uno Kuoljok har bidragit med information om HBV-96 modellen, men framförallt är ihågkommen för hans sätt att förgylla besöket i Suorva.

Vid Uppsala Universitet vill jag tacka Sven Halldin för hans tydlighet samt Lebing Gong och Ida Westerberg för deras goda råd.

Ett speciellt tack tillägnas Malin för hennes stora omtanke.

Kristoffer Hallberg

Uppsala, april 2008

Populärvetenskaplig sammanfattning

Kristoffer Hallberg

Vatten är en av Nordens viktigaste naturresurser och kunskap om vattensystems beteende är användbart inom såväl energiproduktion som samhällsplanering. Hydrologiska processer som styr avrinningsbildning är i regel komplexa till sin natur vilket motiverar utveckling av matematiska verktyg s.k. modeller. Inom vattenkraftsindustrin används modeller bland annat för produktionsplanering, prissättning samt dimensionering av dammar. Med god planering är det möjligt att förlägga kraftproduktion till perioder med stort ekonomiskt utbyte genom att magasinera vatten under perioder med stor tillrinning. Modeller som kan prognostisera tillrinningen till reglermagasin är ett viktigt beslutsstöd för driftsplaneringen av vattenkraftsstationer. I norra Sverige, där merparten av Vattenfall AB:s magasin ligger, ackumuleras vatten i form av snö under vinterhalvåret. Snösmältning sker under maj-juli och mycket höga flöden i vattendrag är vanligt. Det är önskvärt att kunna bedöma denna flödestopp väl, både med avseende på tidpunkt och storlek. Detaljerade prognoser om vårfloden och ökad förståelse för hydrologiska system kan användas för att förbättra dammsäkerheten och ge effektivare drift av produktionsanläggningarna. Vattenfall AB, som är en av huvudaktörerna på den Svenska energimarknaden, äger och driver idag drygt 100 kraftstationer i Sverige.

Sveriges meteorologiska och hydrologiska institut (SMHI) har sedan 1970-talet utvecklat en hydrologisk modell, HBV-96, som idag är standardverktyget för tillrinningsprognoser inom Vattenfall AB. Den senaste versionen av HBV-modellen lanserades 1996 som HBV-96 med mer detaljerade rumslig återgivning och förenklad avrinningsbildning. Vanligtvis modelleras området kring ett reglermagasin som avvattnas till magasinet i fråga, ett s.k. tillrinningsområde. Tillrinning skattas på dygnsbasis utifrån dagliga värden för nederbörd och temperatur samt månadsmedelvärden för potentiell avdunstning. Sedan 2004 finns inom Vattenfall AB en modell kallad Distribuerad Hydrologisk Modell (DHM) som visat på goda resultat. Strukturen är i de flesta avseenden mycket lik SMHI:s HBV-96 men har modifierats för att utnyttja fördelarna med en mycket detaljerad rumslig beskrivning. I DHM är den rumsliga upplösningen vanligtvis 250x250m vilket kan jämföras med ca 40 km² som är standard för HBV-96. Båda modellerna använder höjddata för att återge topografiska effekter som i bergsregioner starkt påverkar temperatur, nederbörd och snösmältning.

Mätdata som modellerna använder fås genom mätningar i meteorologiska stationer placerade inom eller i närhet till det område som ska modelleras. De geografiska egenskaper för varje mätpunkt har stor inverkan på hur mätdata tolkas och ett geografiskt informationssystem (GIS) är ett mycket användbart verktyg för att underlätta geostatistiska analyser. Filosofin bakom DHM är att i största möjliga utsträckning arbeta med koordinatsatt data och har lett till att hela modellen körs i ett GIS, vilket möjliggör mycket detaljerade prognoser. Andra fördelar med att köra modellen i ett GIS är möjligheten till att uppdatera, kalibrera och validera modellen mot fjärranalytisk data som satellitbilder och radarmätningar.

I denna studie har en ny metod i DHM utvecklats. Metoden beskriver hur ett ökat flöde, en flödesimpuls fortplantar sig nedströms i vattendrag och sjösystem. Flödesimpulser uppkommer vanligen i samband med häftig snösmältning eller kraftig nederbörd. Metoder för att beskriva transporten av flödesimpulser kallas routing och den nya metoden i DHM kallas distribuerad routing i och med att funktionen skiljer mellan olika typer av vattenvägar inom tillrinningsområdet. Fördelarna med den nya metoden är att modellens fysikaliska beskrivning av verkligheten förbättrats samt att den ger möjlighet att modellera vattenflödet i valfritt vattendrag inom tillrinningsområdet.

HBV-96 och DHM har jämförts genom att använda modellerna på samma område och analysera resultaten. Det tillrinningsområde som modellerats är Suorvamagasinet tillrinningsområde som är beläget 150 km väster om Gällivare i Norrbottens län. Området karakteriseras bäst som högalpint och vegetationen är mycket sparsam. Kombinationen av närhet till norska Atlantkusten och topografi gör att regionen är mycket nederbördsrik samtidigt som avdunstningen är liten. Nederbörd som faller lämnar avrinningsområdet främst via vattendragen snarare än genom avdunstning vilket ger goda förutsättningar för magasinering av vatten i magasin. Suorvamagasinet är ett av Sveriges viktigaste magasin och kan lagra 5900 miljoner m³ vatten vilket motsvarar ca 10 % av årsproduktionen el från Svenska vattenkraftverk.

För att få en väl fungerande modell behöver man ofta göra en kalibrering, vilket innebär att modellen justeras för att förutsäga något känt, exempelvis en serie mätningar. Justeringar av modellen sker upprepade gånger tills modellresultaten efterliknar mätningarna väl. Hur väl modellerade och uppmätta värden stämmer överens anges med statistiskt mått ofta Nash-Sutcliffe effektivitet s.k. R_{eff} -värde. En utvärdering av modellens noggrannhet, s.k. validering, sker genom att testa modellen för en period som inte använts för kalibrering. Genom att undersöka om modellerade och uppmätta värden stämmer överens även för denna period kan man dra slutsatser om modellens tillförlitlighet.

Resultaten från denna studie visar att DHM och HBV-96 modellerar tillrinningen under kalibreringsperioden lika väl samt att HBV-96 är något bättre under valideringsperioden. Den nya metoden för routing i DHM, dvs flöden i vattendrag, ökade noggrannheten för tillrinningssimuleringen något. Den stora vinsten med distribuerad routing är i första hand inte ökad noggrannhet utan att det är möjligt att göra prognoser för enskilda vattendrag inom tillrinningsområdet. Vid jämförelse av modellerade och uppmätt flöde värden för Virihaures utlopp, en sjö inom området, blev samstämmigheten god. Hydrologiska processer har i allmänhet en stark geografisk koppling och integrerade GIS-verktyg för dynamisk modellering kan vara mycket användbara. Antalet intressanta tillämpningar växer snabb och det blir spännande att följa utvecklingen i framtiden.

Innehållsförteckning

	Sida	
1	INLEDNING	1
2	BAKGRUND	2
2.1	Hydrologiska modeller	3
2.2	Distribuerade konceptuella hydrologiska modeller	4
2.3	Avrinningsbildning och routing	5
2.4	Distribuerade indata	5
	2.4.1 Lufttemperatur	6
	2.4.2 Nederbörd	6
2.5	Områdesbeskrivning	7
3	MATERIAL OCH METOD	8
3.1	Indata	8
3.2	Analys av indata	9
	3.2.1 Statistiska mått	9
	3.2.2 Dubbelmassgrafer	10
	3.2.3 Rumslig autokorrelation	10
3.3	Valideringsdata	11
3.4	Modeller	11
	3.4.1 DHM	12
	3.4.2 DHM med routing	12
	3.4.3 HBV-96	12
3.5	Modellutveckling	13
3.6	Kalibrering	16
3.7	Utvärdering av tillrinningssimulering	16
3.8	Känslighetsanalys av modellparametrar	16
3.9	Mjukvara	17
	3.9.1 PCRaster	17
	3.9.2 PEST	17
4	RESULTAT	19
4.1	Analys av indata	19
4.2	Simuleringsresultat för Suorvamagasinet	21
4.3	Simuleringsresultat för Virihaure	24
4.4	Jämförelse av modellerna	25
4.5	Känslighetsanalys av parametrar i DHM	26
5	DISKUSSION	27
5.1	Jämförelse av modeller	27
5.2	DHM	27
5.3	Utökning av DHM med routingrutin	27

5.4	Analys av indata	28
5.5	Parameterkänslighet för DHM	28
6	REKOMMENDATIONER	30
7	REFERENSER	31
7.1	Tryckta	31
7.2	Internet	33
7.3	Muntliga	33

Bilageförteckning

APPENDIX 1 - DISTRIBUTERAD HYDROLOGISK MODELL

APPENDIX 2 - LÄNKADE LINJÄRA MAGASIN

APPENDIX 3 - ORDLISTA

1 INLEDNING

Vatten är en av Nordens viktigaste naturresurser och kunskap om vattensystems beteende är centralt för aktörer inom såväl offentlig som privat sektor. Hydrologiska processer som styr avrinningsbildning är i regel komplexa till sin natur vilket motiverar utveckling av matematiska verktyg s.k. modeller, för analyser. Inom vattenkraftsindustrin används modeller bland annat för produktionsplanering, prissättning samt dimensionering av dammar och vattenvägar. Med god planering är det möjligt att förlägga kraftproduktion till perioder med stort ekonomiskt utbyte genom att magasinera vatten under perioder med stor tillrinning. I norra Sverige, där merparten av Vattenfall AB:s magasin ligger, är den största årliga hydrologiska händelsen vårfloden som inträffar under maj-juli. Samtidigt som det är önskvärt med stor lagrad volym är det ur dammsäkerhetsperspektiv viktigt att magasinen har kapacitet för inkommande smältvatten. Prognoser för vårflodens storlek och tidpunkt möjliggör således reglerstrategier med ekonomiska såväl som säkerhetsmässiga vinster.

Inom Vattenfall AB används idag främst HBV-modellen (Bergström, 1992) som operationellt verktyg för tillrinningsprognoser. Det är en konceptuell modell framtagen av Sveriges meteorologiska och hydrologiska institut (SMHI) och började utvecklas under 1970-talet. Modellen har en väl dokumenterad historia efter användning i över 30 länder. Den senaste versionen av HBV-modellen lanserades 1996 som HBV-96 med förändrade rutiner för rumslig återgivning, avrinningsbildning och routing av flöden (Lindström, 1997). Tillrinning skattas på dygnsbasis utifrån dagliga värden för nederbörd och temperatur samt månadsmedelvärde för potentiell avdunstning. Minsta hydrologiska enhet är delavrinningsområde, vars karaktär beskrivs genom en indelning i höjdklasser och markklassificering. Sedan 2004 finns inom Vattenfall AB en distribuerad version av HBV-modellen kallad Distribuerad Hydrologisk Modell (DHM) som visat på goda resultat (Larsson, 2004a/2004b). Strukturen är i de flesta avseenden mycket lik SMHI:s ursprungliga modell med modifikationer för att utnyttja fördelarna med ett distribuerat angreppssätt. Skillnaderna består främst i ökad noggrannhet i den rumsliga återgivningen samt användandet av areell indata. En digital höjdmödel används för att återge topografiska effekter som i bergsregioner starkt påverkar temperatur, nederbörd och snösmältning. DHM är integrerat i ett Geografiskt Informationssystem (GIS) vanligen med en kvadratisk diskretisering, 250x250 meter. Modellen är väl lämpad för hantering av data med geografiska egenskaper såsom radarmätningar, flyg- och satellitbilder (Larsson, 2004a). Speciellt intresse har ägnats möjligheten att uppdatera modellen med data för snötäckets utbredning och mäktighet för att öka noggrannheten i vårflodsprognosen.

DHM har tidigare kalibrerats och validerats på två avrinningsområden i norra Sverige, Tjaktjajaure och Kultsjön (Larsson, 2004a/2004b), med goda resultat. Effektivitetsmått såsom R_{eff} (Nash & Sutcliffe, 1970) och volymfel är i samma storleksordning som för HBV-96. För att bedöma kvalitén i utdata från distribuerade modeller bör en modell verifieras mot distribuerade data (Refsgaard, 1997). DHM har tidigare verifierats mot satellitbilder över snöutbredning (Larsson 2004a/2004b). Möjlighet till verifiering mot vattenföring i vattendrag inom tillrinningsområdet är önskvärt för ytterligare utvärdering av modellens rumsliga precision.

Examensarbetet har två mål:

- Att undersöka om DHM för Suorvamagasinet tillrinningsområde kan ge bättre simuleringsresultat än HBV-96.
- Att vidareutveckla DHM med en rutinerutin för att möjliggöra validering av modellen mot mätningar av vattenföring i vattendrag inom tillrinningsområdet.

2 BAKGRUND

Vattenkraft är i Sverige en lättillgänglig energiform som länge utnyttjats i mekaniska konstruktioner såsom sågverk och kvarnar vid vattenfall och forsar. När turbinen uppfanns i Frankrike 1827 blev det möjligt att producera elektricitet storskaligt och billigt vilket i tiden sammanföll med industrialiseringen i många av Europas länder. I Sverige tog utvecklingen av vattenkraften fart när överföringsteknikerna i elnät gjorde det möjligt att utnyttja de större älvarna Syd- och Mellansverige. Dagens vattenkraftssystem ger möjlighet till behovsanpassad produktion och används i Sverige som frekvensregulator på elnätet. Lagring av vatten i reglermagasin är även de enda sättet att lagra större mängder energi (Lundin, 2006). Utbyggnaden av Lule älv, i vilken Suorvamagasinet ligger, påbörjades under 1940-talet. I dagsläget finns 15 kraftstationer, samtliga ägda av Vattenfall AB. Totalt är den installerade kapaciteten i Lule älv 4350 MW (Energimyndigheten, 2006).

Vattenfall AB är ett av Europas ledande energibolag med produktionsanläggningar för el och värme i Norden, Tyskland och Polen. Vattenkraft utgör en stor del elproduktionen för den Nordiska marknaden och karakteriseras av hög verkningsgrad och låga utsläpp. Vattenfall AB äger och driver 112 vattenkraftsanläggningar i Norden som årligen producerar omkring 33 TWh (Vattenfall AB, 2006). Intresset för förnyelsebara energikällor har ökat under det senaste decenniet och flertalet kunder väger in miljöpåverkan i sitt val av elleverantör. Vattenkraft är ett konkurrenskraftigt "grönt alternativ" och kommer således även i framtiden utgöra viktig del av Vattenfall AB:s energiportfölj. För att behålla och öka produktionskapaciteten satsas stora resurser på forskning och utveckling.

För utarbetning av driftsstrategier använder Vattenfall AB huvudsakligen två prognostyper, långtids- respektive korttidsprognoser. Långtidsprognoser sträcker sig två-tre månader framåt i tiden och ligger till grund för den storskaliga produktionsplaneringen och regleringen av flerårsmagasin. Prissättning av producerad el styrs i hög grad av dessa prognosers uppskattning av totalmängd snö och vattenmagasinens fyllnadsgrad. Prognoserna uppdateras två gånger i månaden. För drift av enskilda kraftstationer används huvudsakligen korttidsprognoser som ställs ut tio dagar framåt kontinuerligt under hela avsmältningssäsongen. Syftet med de korta prognoserna är att ha beredskap för att möta perioder med höga flöden med ökad produktion. Speciellt viktiga är prognoserna för magasin med måttlig reglerhöjd och stora inflöden av oreglerat vatten (Kuoljok muntligen). För dessa är tidpunkten för vårflodens start av stort intresse. Större magasin såsom Suorvamagasinet har i regel kapacitet att ta emot en vårflod under ordinära förhållanden utan större planering. Prognoserna användningsområde blir således mer av planeringsmässig än säkerhetsmässig karaktär för de större magasinerna.

2.1 HYDROLOGISKA MODELLER

Hydrologiska modeller används idag som verktyg inom en rad olika verksamheter, exempelvis anläggningsarbeten, marksanering och vattenresursplanering. Huvudskälet för att modellera hydrologiska variabler är att kunskapen om ett givet system i de flesta fall är begränsad till ett fåtal mätpunkter i de fall mätningar överhuvudtaget är tillgängliga. Vidare är även många frågeställningar och system alltför komplexa för att överblicka med andra mer direkta metoder. En modell kan också utnyttjas för att beskriva ett systems egenskaper där mätningar inte är tillgängliga eller göra prognoser för framtiden, där mätningar inte är möjliga (Beven, 2001). Förutsägelseerna kan vara av allmän karaktär utan att precisera tiden, eller prognoser med en detaljerad information om både tidsmässig och rumslig utbredning.

I takt med beräkningskapacitet blivit allmänt tillgänglig har antalet hydrologiska modeller sedan 1960-talet ökat dramatiskt. Ofta bygger modellerna i grunden på liknande antaganden, men valet av modell bör kunna motiveras av tillämpningen. Tre huvudtyper av modeller kan särskiljas, statistiska, konceptuella och fysikaliska modeller (Beven, 1999, Silveria, 1999).

Statistiska (eng. *blackbox*) modeller beskriver sambandet mellan in- och utdata med hjälp av statistiska samband och matematiska överföringsfunktioner utan att ta hänsyn till mellanliggande fysikaliska processer (Silveira, 1998).

Konceptuella modeller avser beskriva huvudkomponenter i ett hydrologiskt system som en förenklad logisk struktur. Vanligen representeras en modell över ett tillrinningsområde som ett system av länkade processer och magasin (Shaw, 1994). Processbeskrivningarna innehåller ofta ett antal parametrar för att återge karaktären av tillrinningsområdet som exempelvis smälthastigheten hos snö och markens vattenhållande förmåga (Lindström, 2006). Parametrarna är i regel inte möjliga att uppskatta via mätningar utan fastställs via kalibrering. Kraven på indata är i regel måttliga varför denna modelltyp är vanligt förekommande.

I fysikaliska modeller efterliknas ingående processer med utgångspunkt i fysikaliska processer, vilket inom hydrologi ofta innebär differentialekvationer för mättade och omättade flöden samt energi- och massbalansberäkningar (Silveira, 1998). Parametervärden är i teorin mätbara storheter. Indatas kvalitet och tillgänglighet begränsar ofta möjligheterna till fysikalisk modellering till speciella försöksområden och modelltypen är inte lika allmänt förekommande som inom hydraulik.

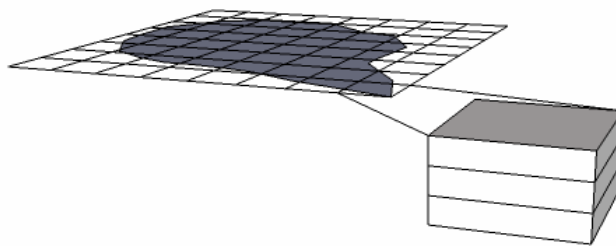
En modell behöver även hantera den rumsliga aspekten av data. Detta kan göras med antingen ett aggregerat (eng. *lumped*) eller distribuerat angreppssätt. Aggregerade modeller behandlar ett tillrinningsområde som en enhet och hanterar in- och utdata som medelvärden eller integrerade effekter över detta. Distribuerade modeller beskriver ett tillrinningsområde som en samling kommunicerande delområden. Ett givet område delas upp i mindre enheter, av praktiska skäl ofta som ett rutnät av celler (eng. *raster*). Beroende på användningsområde kan flera olika modeller vara möjliga och ge lika goda resultat. En grundregel är att använda enklast möjliga modellstruktur som uppfyller tillämpningens krav på utdata men inte är alltför komplex för att kunna drivas av tillgänglig indata. I en enkel modell med få parametrar är risken för överparametrisering begränsad medan ett stort antal parametrar introducerar stor kumulativ osäkerhet samt ökar ekvifinalitetsproblematiken. Ekvifinalitet innebär att det för en

given modell finns flera olika sätt att uppnå likvärdiga resultat (Beven, 2001), ofta med olika parameteruppsättningar. För praktisk användbarhet är det viktigt att en modell har tillräckligt många parametrar för att kunna beskriva hydrologisk respons utanför kalibreringsperioden om målet är ett prognosverktyg (Crooks & Naden, 2007).

Konceptuella aggregerade modeller är lämpliga för att prediktera flödet i vattendrag utifrån relativt begränsad mängd indata. Distribuerade modeller ställer höga krav på kvalitet i indata såväl som på modellstruktur för att ge goda resultat. Dock har de fördelen att de kan prediktera hydrologiska variabler i både rums- och tidsdomänen. Seibert (1999) menar att det trots stora framsteg de senaste tjugo åren inom modellering av hydrologiska system behövs mer kunskap för att lösa fundamentala problem som behovet av kalibrering och ekvifinalitet.

2.2 DISTRIBUTUERADE KONCEPTUELLA HYDROLOGISKA MODELLER

En vanlig uppgift för en hydrologisk modell är beskriva vattnets kretslopp i områden där det finns starka kopplingar mellan vatten, land och biosfär (van Deursen, 1995). Eftersom hydrologiska variabler varierar i både tid och rum finns det goda skäl att använda en modellstruktur som är både dynamisk och distribuerad. Becker och Braun (1998) konstaterar att många landområden har en tydlig heterogen karaktär och diskuterar tekniker för att ta hänsyn till de olikheter som påverkar hydrologiska processer. Som tidigare nämnts används ofta en rektangulär indelning av ytor där celler utgör rutnätets minsta enhet (Figur 1). Konceptuella processer modelleras individuellt inom varje cell med cellspecifik indata och parameteruppsättning. Antalet parametrar är i princip två till tre storleksordningar högre för en distribuerad modell jämfört med en aggregerad över samma område (Refsgaard, 1996). För att undvika problemet med kalibrering av stora mängder parametrar används ofta regionala värden eller en länkning till topografi. Länkningen kan ske genom att modifiera ett basvärde utifrån egenskaper som sluttning och markanvändning.



Figur 1. Schematisk bild över ett avrinningsområde som uppdelats rektangulärt i en distribuerad konceptuell modell med tre markmagasin.

I många tillämpningar är det tillräckligt att prognostisera flödet i avrinningsområdets utlopp, medan andra kräver prognoser för punkter inom avrinningsområdet. Studier har visat att detaljerade, mer fysikaliskt rimliga distribuerade modeller ofta inte ger bättre prognoser än enklare modeller (Buttsa & Paynea, 2003), speciellt för områden med gles placering av nederbördsräknare. Många distribuerade modeller kan anses indatabegränsade (Bell & Moore, 1998 och Beven 2001) och potentialen för mer detaljerade prognoser uppnås bara för indata

som speglar verkligheten, i praktiken nederbörd väl (Beven, 2001). Om nederbördsmönstret i huvudsak är lokalt och med stor variation kan det finnas fördelar med distribuerade modeller framför aggregerade (Bell and Moore, 1998).

2.3 AVRINNINGSBILDNING OCH ROUTING

Avrinning är det vatten som under eller i nära anslutning till nederbörd eller snösmältning når vattendrag (Beven, 2001). För uppskattning av tidpunkten när avrinningen når avrinningsområdets utlopp är det ofta nödvändigt att ta hänsyn till transport från avrinningens källa till utloppet, s.k. routing. Routing är i vid mening analys och beräkning av flöden i ett hydrologiskt system med kända insignaler (Van Deursen, 2003). I kanaler med täta sidor fungerar hydrauliska principer väl, men för naturliga system är det ytterst komplicerat att skatta det kontinuerliga inflödet till flodbädden längs strömningsriktningen (Beven, 2001). Van Deursen (2003) uttrycker skillnaden mellan hydrologiska respektive hydrauliska routingmetoder.

“...logical subdivision refers to methods used to describe the process. Hydraulic routing now refers to those methods that describe the routing process in terms of hydraulic laws, while hydrological routing is based on empirical relation between inflow and outflow.”

(van Deursen, 2003, sid 74)

I kommande avsnitt diskuteras hydrologisk routing. Utformningen bör ske så att såväl transporten i mark till vattendrag som i vattendrag återspeglas. Under transporten nedströms modifieras hydrografens utseende på två olika sätt. Tidpunkten för flödestoppen sker senare nedströms eftersom vattnet har en minsta transporttid till alla nedströms punkter. Tidsfördröjningen kallas translation. Det maximala flödet per ytenhet minskar och vattenvolymen kommer att ta längre tid att flöda förbi en mätpunkt nedströms. Retentionen sker i alla typer av vattenvägar men är störst för våtmarker, sjöar och sel (Naturvårdsverket, 2003). Melin (1970) menar att en älvs sel utgör en betydande del av magasineringen under ökande vattenföring, vilket är fallet under vårfloden. I aggregerade modeller beräknas den totala avrinningen från ett område varefter en schablonmässig tidsfördröjning appliceras för att efterlikna transporten i vattendrag. Fördelen med en distribuerad routingrutin är att relationen mellan punkten för avrinningsbildningen och tillrinningsområdets utlopp påverkar transporttiden. Avrinning från områden långt från utloppet kommer således att fördröjas mer än avrinning från områden nära utloppet. Fortplantningshastigheten för en flödesimpuls i vattendrag är flera storleksordningar högre än de i mark vilket ställer andra krav på modellens tidsupplösning för routing. En vanlig lösning är att använda ett kortare tidssteg än modellen i övrigt (Halldin muntligen).

2.4 DISTRIBUTUERADE INDATA

Användning av meteorologiska data i distribuerade hydrologiska modeller kräver allmänt tillgång till distribuerad indata. Vanligen är indata tillgängligt från punktmätningar vid

särskilda mätstationer varför interpolation eller areell medelvärdesbildning är nödvändigt. Mätningar av kontinuerliga variabler med rumslig utbredning visar att stickprov med liten geografisk separation är mer lika än stickprov med stort inbördes avstånd, s.k. autokorrelation. Alla kontinuerliga variabler är autokorrelerade (Eklundh, 1999) men avståndet inom vilket detta gäller kan variera högst avsevärt. Stickprov antas vara representativt för ett större område vilket följer av autokorrelationen om provtagningen skett på lämpligt sätt. För värden i valfri punkt mellan eller omkring nätverket av mätstationerna utnyttjas interpolationstekniker för att återskapa den kontinuerliga variationen utifrån diskreta mätpunkter. Interpolation förutsätter autokorrelationen och kan göras med exempelvis medelvärdet, Avståndsviktad medelvärdesbildning (IDWM) eller kriging. Avståndsviktad medelvärdesbildning är en av de mest frekvent använda metoderna för återskapning av nederbörd (Teegavarapu, 2005), men har begränsningen att autokorrelationen inte bara beror av avståndet. Positiv autokorrelation kan även kopplas till sluttningsriktning eller höjd.

Mätningar av temperatur och nederbörd sker i regel på ett standardiserat sätt under långa perioder, för att ge förutsättningar för statistisk analys och databehandling. Databehandlingen sker idag främst med automatiska meteorologiska stationer som står i kontakt med en central databas via telekommunikation. Kraven på mätutrustningens mätnoggrannhet och driftssäkerhet är stor, vilket gör utrustningen dyr och databehandlingen resurskrävande, speciellt om manuell kvalitetskontroll tillämpas. Antalet mätstationer i ett område begränsas således främst av ekonomiska medel och enskilda stationers placering väljs för att vara representativt för större områden (Shaw, 1994).

Inom avrinningsmodellering är det oftast svårt att särskilja osäkerhet i meteorologiska indata från osäkerhet i modellstruktur och valideringsdata (Johansson, 2002). Vid analys och kvalitetskontroll av distribuerad data med rumsliga egenskaper bör analysmetoderna i möjligaste mån ta hänsyn till den rumsliga karaktären av data, vilket är möjligt med existerande GIS-verktyg.

2.4.1 Lufttemperatur

Lufttemperatur är förhållandevis lätt att mäta och har en långsam och förutsägbar rumslig variation. Interpolation av temperatur från stickprov återspeglar väl den verkliga temperaturfördelningen över ett område.

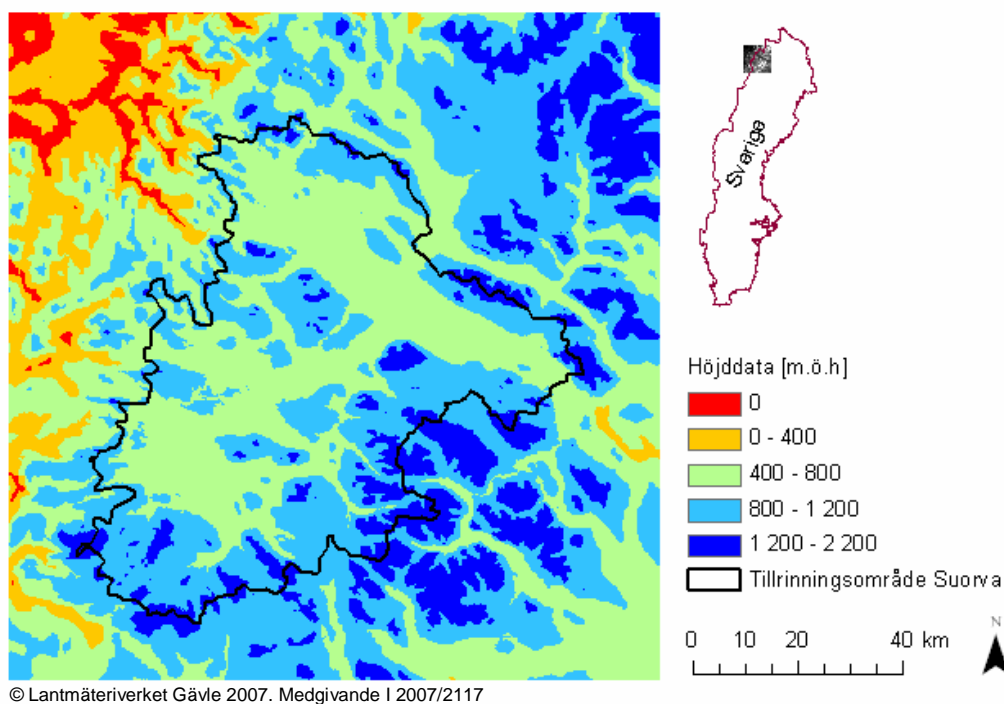
2.4.2 Nederbörd

Till skillnad från temperatur är nederbörd en variabel med stor rumslig variation. God skattning av nederbörd är inte trivialt och i bergstrakter utgör komplexa nederbördsgradienter och glest nätverk av meteorologiska stationer (Johansson, 2002) ytterligare utmaningar. Karaktär och intensitet varierar inte bara med geografiskt avstånd utan även högst avsevärt på grund av topografi med stor lokala och regionala variationer. För tillrinningsområdet är konvektiv nederbörd vanligt under sommarmånaderna (Johansson, 2002), då luft som värmts av solstrålning hävs och bildar moln (Ackerman, 2003). Resultatet blir ofta intensiva regnskurar med stor lokal variation. Vintertid bildas nederbörden främst av frontsystem (Johansson, 2002, Ackerman, 2003). Under månader då snö förekommer sker påtaglig

omfördelning av snö pga. vind (Dunne, 1978). För god uppskattning av nederbördens rumsliga utbredning krävs således ett relativt tätt nätverk av meteorologiska stationer samt väl utvecklade rutiner för datainsamling.

2.5 OMRÅDESBESKRIVNING

Suorvamagasinet tillrinningsområde ligger 150 km väster om Gällivare i Norrbottens län och utgör en betydande källa för Stora Luleälven. Området (Figur 2) som domineras av alpin- och subalpin terräng är till ytan är 4700 km² med medelhöjden 830 m ö.h. Glaciärer och snölegor förekommer som en minde del av arean (1 %) medan skog (7 %), vatten (20 %) och öppen mark (72 %) dominerar. Vegetationen är sparsam med större vide och fjällbjörksbestånd främst i dalgångar medan ris täcker högre belägna fjällhedar och mer exponerade sluttningar. Suorvamagasinet ligger i områdets nordöstra del (Figur 3) och är till ytan 217 km² med volymen 5900·10⁶ m³ (Melin, 1970). Regleringsgraden är 111 % (Kuoljok muntligen) och reglerhöjden 30 m (Melin, 1970). Nederbördsmönstret i regionen är komplicerat med minskande årsnederbörd och variabilitet österut. Sett över hela området är årsnederbörden ca 1200 mm (Johansson, 2002). Medeltillrinning till Suorvamagasinet är 5030·10⁶ m³ per år vilket motsvarar specifik avrinning 1057 mm·år⁻¹. Tre större sjöar i området har stor dämpande effekt på extremflöden.

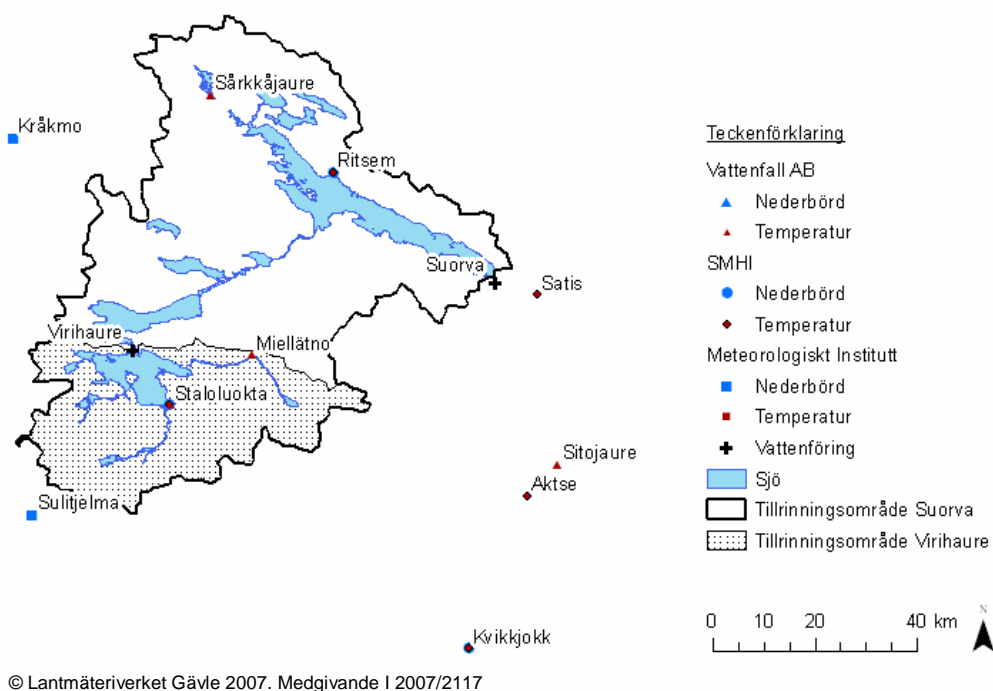


Figur 2. Digital höjdmödel över Suorvamagasinet tillrinningsområde.

3 MATERIAL OCH METOD

3.1 INDATA

Dygnsmedelvärden för temperatur och nederbörd levererades från SMHI, från Meteorologiskt Instituttt (MI) för perioden 1971-2007, samt från Vattenfall AB 1991-2007. Mätseriernas längd för varje station framgår av Figur 4 och Figur 5. Månadsmedelvärden för potentiell avdunstning samt daglig vattenföringsdata erhöles från SMHI respektive Vattenfall AB. Läget för mätningarna av nederbörd, lufttemperatur och vattenföring framgår av Figur 3.

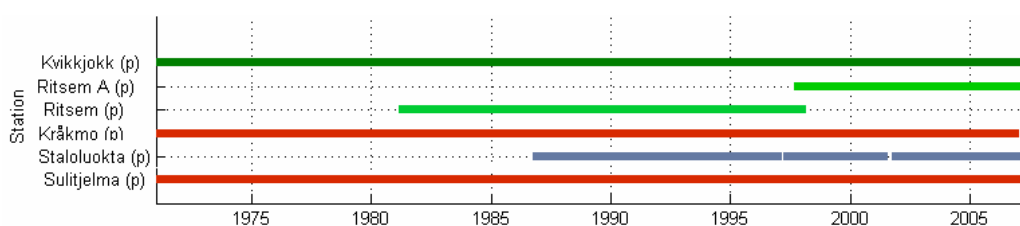


Figur 3. Mätstationernas lokalisering.

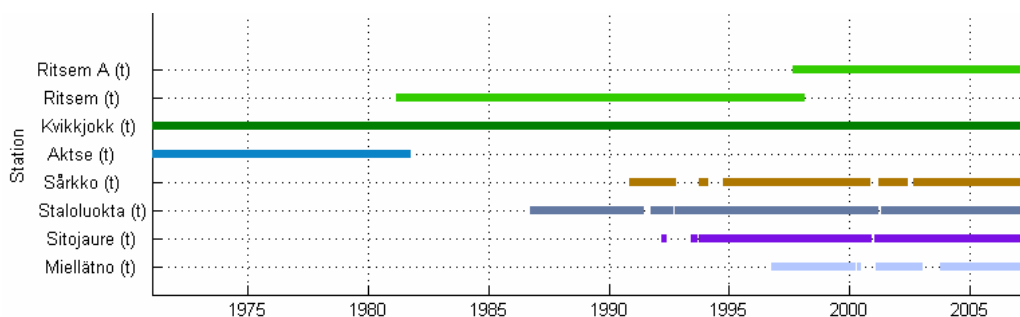
Tabell 1 visar en sammanställning av indata som använts i DHM. Nederbörds- och temperaturdata från SMHI är kvalitetskontrollerad medan MI och Vattenfall AB levererar rådata. Höjddata från Lantmäteriet är uppskalad från 50x50m till 250x250m.

Tabell 1. Indata till DHM

Data	Rumslig upplösning	Tidsupplösning	Leverantör
Nederbörd	5 stationer	Dygnssumma	SMHI, MI, Vattenfall AB
Temperatur Potentiell	8 stationer	Dygnsnmedelvärde	SMHI, MI, Vattenfall AB
Avdunstning	2 stationer	Månadsmedelvärde	SMHI
Strålningsindex	250x250m	Veckomedelvärde	-
Höjddata	250x250m	-	Lantmäteriet
Markanvändning	250x250m	-	Lantmäteriet



Figur 4. Nederbördsdata från meteorologiska stationer kring Suorvamagasinet.



Figur 5. Temperaturdata från meteorologiska stationer kring Suorvamagasinet.

3.2 ANALYS AV INDATA

Mätningar av en variabel över tiden utgör en tidsserie. Förklaringar till mätvärdens variation i tiden är ibland intuitiva, men andra gånger krävs mer grundläggande tidsserieanalys. För användning inom dynamisk distribuerad modellering är det av stor vikt att undersöka både tids- och rumsvariation.

3.2.1 Statistiska mått

Tidsserier kan uppdelas i deterministiska och stokastiska komponenter. Systematiska fel, trender och periodicitet såsom säsongsvariation är deterministiska medan mätbrus utgör

stokastiska element. För jämförelse och utvärdering av tidsserier med dagliga, månads- eller årsvärden används statistiska mått: enligt Tabell 2.

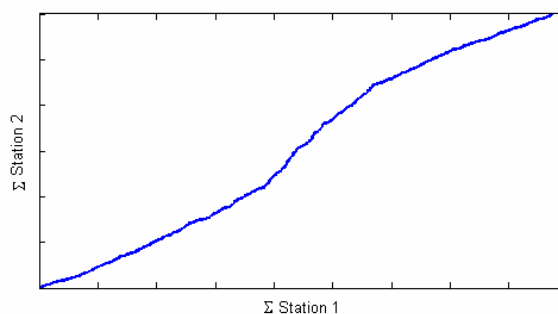
Tabell 2. Statistiska mått för tidsserieanalys (efter Xu, 2006)

Statistiskt mått	Symbol	Skattning
Medelvärde	$E(X_t)$	$\frac{1}{n} \sum_{t=1}^n X_t$
Varians	S_X^2	$\frac{1}{n-1} \sum_{t=1}^n (X_t - \bar{X})^2$
Kovarians	$S_{X,Y}^2$	$\frac{1}{n-1} \sum_{t=1}^n (X_t - \bar{X})^2 \cdot (Y_t - \bar{Y})^2$
Korrelationskoefficient	$r_{X,Y}$	$\frac{S_{X,Y}}{S_{X,X} \cdot S_{Y,Y}}$

För att undersöka samvariation används korrelationskoefficienten som varierar mellan -1 och 1, där 1 svarar mot linjär samvariation och -1 mot negativ linjär samvariation.

3.2.2 Dubbelmassgrafer

Dubbelmassgrafer är en erkänd metod för analys av mätstationers funktion (Dunne 1978, Silviera, 1999). Två mätstationer jämförs genom att deras ackumulerade mätvärden bildar koordinatpar i ett diagram. För stationer som mäter konsekvent kommer det inbördes förhållandet avbildas som en rak linje. Förändringar som verkar lika på båda stationerna påverkar inte detta inbördes förhållandet vilket gör metoden användbar även om trender i båda tidsserierna förväntas till exempel som följd av klimatförändringar. Sker förändringarna för endast en av stationerna, såsom ändrad instrumentering eller omplacering, kan linjens lutning i dubbelmassgrafan skifta. Samtliga nederbördsstationer undersöktes med dubbelmassgrafer (Figur 6) för att upptäcka oegentligheter i dataserierna.



Figur 6. Dubbelmassgraf som visar systemskifte för en av stationerna.

3.2.3 Rumslig autokorrelation

Mätserier med dagliga mätningar av temperatur och nederbörd analyserades för mätstationer i regionen kring Suoravamagasinet. Analysen skedde genom parvisa jämförelser av korrelation

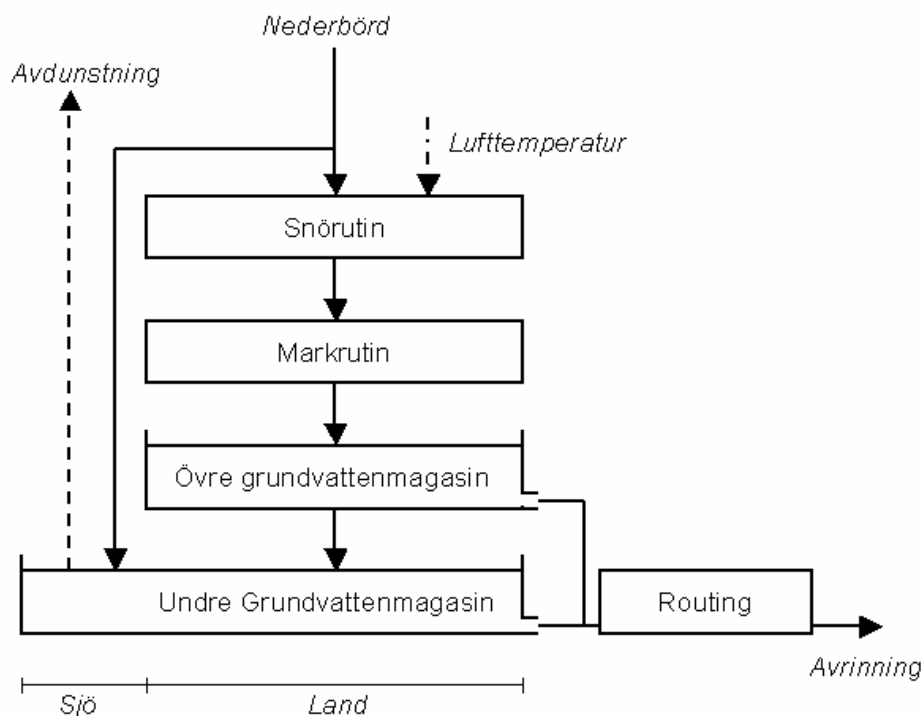
mellan stationer i relation till det inbördes avståndet. En grafisk tolkning av resultaten för många stationer ger möjligt att uppskatta inom vilket avstånd interpolationstekniker kan fungera väl.

3.3 VALIDERINGSDATA

Vattenföringsdata för Suorvamagasinet utskov samt för sjön Virihaures utlopp är tillgängligt. Data från Suorvamagasinet är beräknad utifrån effekt i tillhörande kraftstation, Vietas, samt vattenståndsmätningar. För Virihaures utlopp beräknades flödet från vattenståndsmätningar och avbördningskurva. Serien med vattenståndsmätningar i Virihaure är ej kontinuerlig och är att betrakta som rådata.

3.4 MODELLER

Tre olika modeller användes, DHM med respektive utan routing samt HBV-96. Modellerna är till sina strukturer mycket lika och skillnaderna ligger främst i den rumsliga representationen. Tidsupplösningen är dygn. Ett antal konceptuella moduler (Figur 7) beskriver dominerande processer för transformation av nederbörd till avrinning. Drivdata är dygnsmedelvärden för temperatur och nederbörd samt månads- respektive veckomedelvärde för potentiell avdunstning.



Figur 7. Moduluppbyggnad i DHM och HBV-modellen (efter Lundin, 2006).

3.4.1 DHM

I DHM modelleras processer distribuerat i ett rutnät med cellstorlek 250x250 m. Utöver temperatur-, nederbörds och potentiell avdunstningsdata används även potentiellt solinstrålningsindex för att återge effekter av sluttningsriktning. Indata i form av punktmätningar distribueras genom avståndsviktad medelvärdesbildning. En digital terrängmodell används aktivt för att höjdkorrigera nederbörds- och temperaturdata samt bygga upp ett lokalt dräneringsnätverk (PCRaster, 2005). Vattendrag identifieras från dräneringsnätverket och klassificerats enligt Strahlers metod för klassificering av vattendrag (Strahler, 1964). Som huvudvattendrag betraktas här vattendragsordning större än tre. Information om markanvändning används för att klassificera celler exklusivt som öppen mark, skog, sjö eller glaciär. Genom att utnyttja terrängmodellen och landklassificeringen kan basvärden på parametrar justeras till att bli helt distribuerade. Avrinning från varje cell når magasinet efter en allmän tidsfördröjning styrt av parametern MAXBAS. En ingående beskrivning av modellen finns i Appendix samt i Larsson (2004a). Totalt innehåller modellen 16 parametrar och konstanter.

3.4.2 DHM med routing

Denna modell är identisk med DHM frånsett att routingrutinen distribueras, vilket innebär att geografisk position för avrinningsbildning från det övre grundvattenmagasinet påverkar transporttiden till reglermagasinet. DHM med distribuerad routingrutin innehåller totalt 18 parametrar och konstanter.

3.4.3 HBV-96

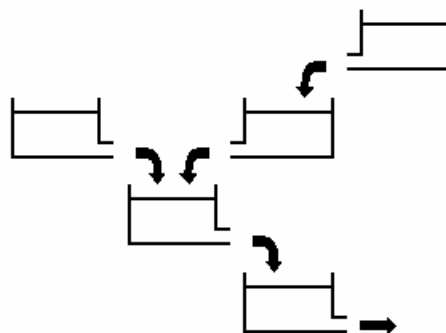
Den version av HBV-96 som används operationellt inom Vattenfall AB är levererad av SMHI och senaste kalibrerad 2002. Tillrinningsområdet till Suorvamagasinet delas upp i fyra mindre delområden som vart och ett modelleras med individuella parameteruppsättningar. Delområdena delas in i zoner beroende på höjd över havet med hjälp av en area-höjd kurva (Lindström, 1997, Lundin, 2006). Areell nederbörd och temperatur skattas från punktmätningar med viktad medelvärdesbildning och höjdkorrigeras för varje zon, men processmodelleringen sker för delområdena som minsta enhet. För att modellera dämpningseffekter och sjösystem används MAXBAS och Level pool routing (Shaw, 1994) inom delområden. Mellan delområden används Muskingum routing (Chow, 1964, Lindström, 1997). Totalt förekommer 35 parametrar och konstanter i modellen. Sammanfattning av modellernas skillnader finns i Tabell 3. En detaljerad beskrivning av HBV-96 finns i Lindström (1997).

Tabell 3. Huvudsakliga skillnader mellan modellerna

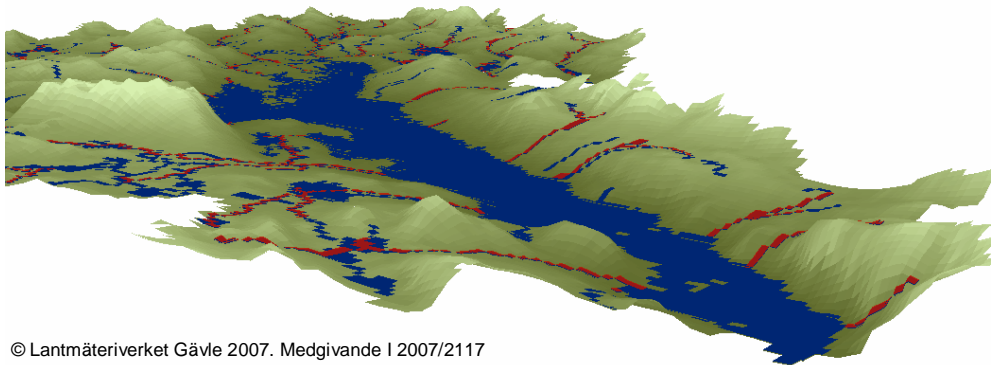
Modell	Rumslig upplösning	Routingrutin
DHM	250x250 m	Maxbas
DHM med routing	250x250 m	Länkade linjära magasin
HBV-96	Delavrinningsområde, ca 40 km ² 10 höjdzoner	Maxbas, Level pool och Muskingum metoden

3.5 MODELLUTVECKLING

För att göra modellen mer fysikaliskt korrekt utvecklades en routingrutin som låter avrinningen från varje cell följa topografin i terrängmodellen tills reglermagasinet i tillrinningsområdet nås. Metoden beskriver hur ett ökat flöde, en flödesimpuls fortplantar sig nedströms i vattendrag och sjösystem. Detta sker dagligen i två steg. Först följer avrinningen från det övre grundvattenmagasinet dräneringsnätverket till närmsta huvudvattendrag. Sedan leds vattnet från cell till cell (Figur 8) nedströms i huvudvattendraget genom att varje vattendragscell antas vara ett linjärt magasin. Ett linjärt magasin kan i korthet beskrivas som ett magasin där utflödet är proportionellt mot lagrad volym. En detaljerad matematisk beskrivning finns i Appendix. Alla huvudvattendrag mynnar i Suorvamagasinet (Figur 9). Avrinning för celler som ligger nära Suorvamagasinet utan mellanliggande huvudvattendrag leds direkt till magasinet utan tidsfördröjning.



Figur 8. Schematisk bild över länkade linjära magasin.



© Lantmäteriverket Gävle 2007. Medgivande I 2007/2117

Figur 9. Suorvamagasinet sett mot nordväst i terrängmodellen. Huvudvattendrag är markerade i rött medan vattenytor och vattendrag markerats i blått.

För att följa de snabba förloppen associerade med lateral transport använder routingrutinen ett mindre tidssteg än modellen i övrigt. Detta tidssteg bestäms av en divisionsfaktor (eng. *split factor*) som delar dygn i s delar. Den dagliga avrinningen nedskalas i tiden för att motsvara avrinningen under en s :dels dygn innan routing. I s iterationer transporteras vatten nedströms dräneringsnätverket varpå lagrad volym i alla celler uppdateras. Utflödet från varje enskild cell i vattendragen är proportionellt mot magasinerad volym som uppdateras med inflödet från uppströms celler. Efter routing summeras de s stycken routade volymerna för transparent övergång mellan de olika tidsskalorna. Ekvation 1 uttrycker routing i matematiska termer. För att efterlikna den större retentionen i sjöar och sel används två olika magasincoefficients a där a_1 gäller för vattendrag och a_2 för sjöar.

$$Q_{t,outflow,i} = a_x \cdot (S_i + \sum_{j=1}^n Q_{t,outflow,j}) \quad (1)$$

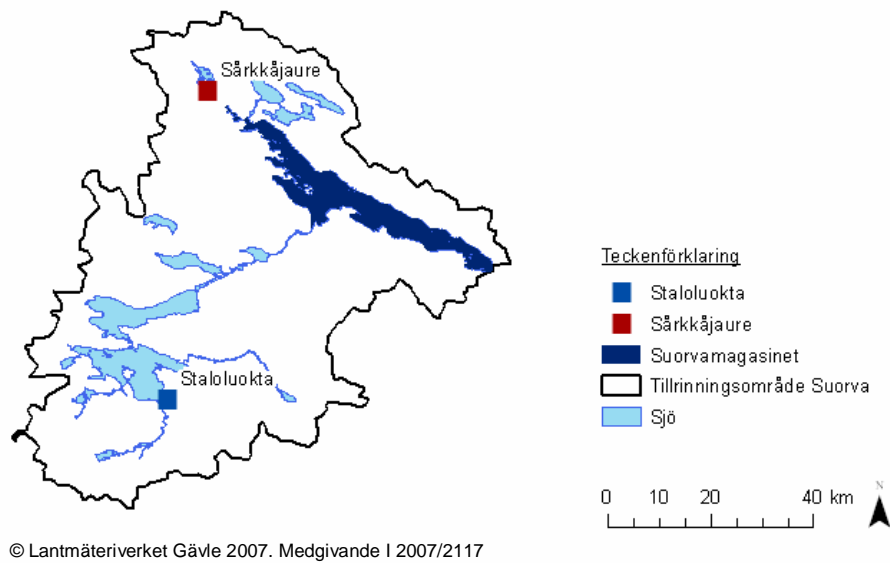
$$Q_{tot} = \sum_{k=1}^p \sum_{k=1}^s Q_{t,outflow,pitcell}$$

där

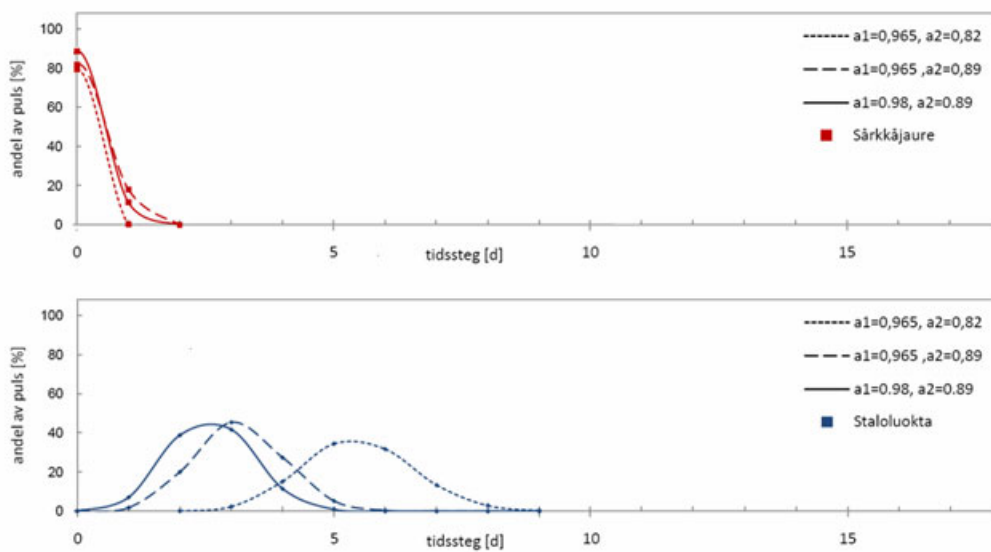
$Q_{t,outflow,i}$	=	Flödet ur aktuell cell i [m^3 /routingtidssteg]
$Q_{t,outflow,j}$	=	Flödet ur uppströms celler till cell i [m^3 /routingtidssteg]
n	=	Antal uppströms celler []
a_x	=	Reccensionskoefficient [1/routingtidssteg]
S_i	=	Lagrad volym [m^3]
Q_{tot}	=	Total tillrinning till reglermagasinet [m^3 /dygn]
s	=	Divisionsfaktor []
p	=	Antal tillflöden till recipienten []
$Q_{t,outflow,pitcell}$	=	Flöde till celler som mynnar i magasinet [m^3 /routingtidssteg]

Effekten av parametrarna a_1 och a_2 kan studeras då enhetspulser ges vid olika tidpunkter i Sårkkåjåure och Staloluokta enligt Figur 10. Parametrarna a_1 och a_2 :s påverkan på pulssvarets

utseende för Suorvamagasinet ses i Figur 11. Retentionen för samma parameterförändring ökar med transportvägen samt förekomsten av sjöar och sel.



Figur 10. Karta över avrinningsområdet med Särkkåjaure och Staloluokta markerade.



Figur 11. Pulssvar för Suorvamagasinet för olika värden på routingparametrarna a_1 och a_2 . Pulsen ges för $t=0$. Röda linjer avser responsen för pulsen given i Särkkåjaure medan blå linjer avser pulsen i Staloluokta

3.6 KALIBRERING

Under kalibreringen justerades modellernas parametrar för att ge bästa möjliga samstämmighet mellan observerad och simulerad tillrinningen till Suorvamagasinet, vilket mättes med R_{eff} (Nash & Sutcliffe, 1970) och V_E (Seibert, 1999). Eftersom modellens användningsområde är simulering av ett flerårsmagasin är årlig totalvolym av stort intresse. Under kalibreringens maximerades därför R_{eff} under bivillkoret $|V_e| < 1 \%$. Med anledning av den långa exekveringstiden, ca 2 sekunder per tidssteg, kalibrerades DHM manuellt. Kalibreringsperiod är 1990.09.01-1997.08.31. HBV-96 är kalibrerad av SMHI.

3.7 UTVÄRDERING AV TILLRINNINGSSIMULERING

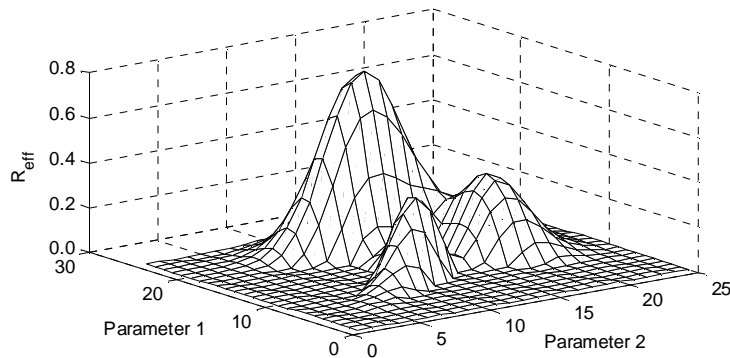
Modellernas prestanda utvärderas genom test mot oberoende dataset, dvs. data som inte använts för kalibrering i ett s.k. *split-sample test*. Effektivitetsmåten i Tabell 4 användes, vilka huvudsakligen normerar och jämför observerad med simulerad tillrinning. En väl fungerade modell förväntas prestera väl i ett *split-sample test* om förhållandena för valideringsperioden och kalibreringsperioden är stationära (Refsgaard, 2007). Valideringsperiod är 1997.09.01-2006.08.31. För den variant av DHM som använder distribuerad routing har även simulerad och observerad vattenföring för sjön Virihaures utlopp jämförts

Tabell 4. Effektivitetsmått (Nash & Sutcliffe, 1970; Seibert, 1999)

Effektivitetsmått	Symbol	Formel	Värde för perfekt anpassning
Nash & Sutcliffe	R_{eff}	$1 - \frac{\sum (Q_{\text{obs}} - Q_{\text{sim}})^2}{\sum (Q_{\text{obs}} - \bar{Q}_{\text{obs}})^2}$	1
Volymfel	V_E	$\frac{\sum (Q_{\text{obs}} - Q_{\text{sim}})}{\sum Q_{\text{obs}}}$	0

3.8 KÄNSLIGHETSANALYS AV MODELLPARAMETRAR

För att hitta den uppsättning parametrar som ger godtagbart resultat kan det under kalibreringen behöva göras flera simuleringar och justeringar av parametervärden. Effektivitetsmått kan ses som en funktionsyta av alla parametrar som illustreras i Figur 12.



Figur 12. Schematisk bild över R_{eff} som funktion av två parametrar

Genom att analysera funktionsytan är det ofta möjligt att se vilka parametrar som har störst inverkan och hur parametrarna bör justeras så att bättre värde på utvärderingsfunktionen erhålls. Som ett mått på modellens känslighet för förändringar i de olika parametrarna kan lokala derivator (ekv 2) av funktionsytan med avseende på varje parameter användas (Beven, 2001).

$$S_i = \frac{dZ/dx_i}{x_i} \quad (2)$$

där S_i = känslighetsindex för parameter i
 x_i = värdet på parameter nr i
 Z = värdet på utvärderingsfunktionen

3.9 MJUKVARA

3.9.1 PCRaster

För rationell hantering av data associerad med distribuerad modellering har modellen implementerats i ett Geografiskt Informationssystem (GIS), PCRaster (PCRaster, 2005). PCRaster är speciellt framtaget för miljörelaterad modellering (van Deursen, 1995) och utmärker sig genom att erbjuda full integration mellan modell och GIS (Pullar & Springer, 2000). Programpaketet är rasterbaserat vilket innebär att ytor delas upp i diskreta enheter s.k. celler. Cellerna utgör en rutnätsstruktur, ett raster vilket ger goda möjligheter till kartografiska analyser och överlagringsoperationer.

3.9.2 PEST

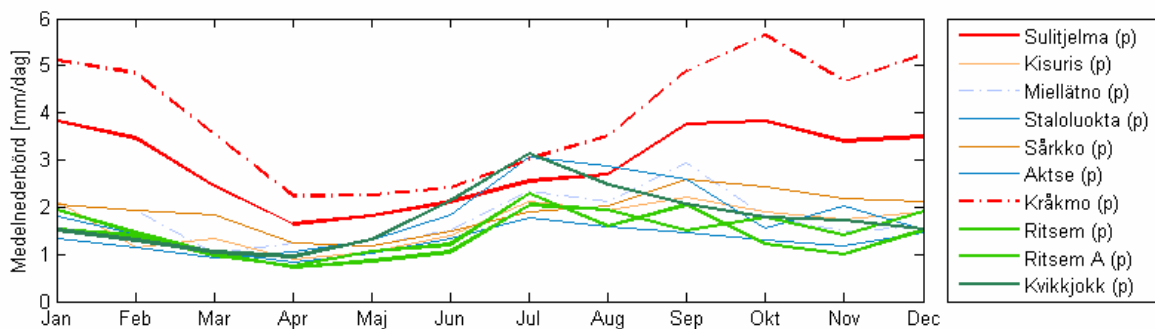
PEST (PEST, 2007) är ett modelloberoende program för optimering av parametervärden och känslighetsanalys. PEST kommunicerar med modellens in- och utdatafiler utan ändringar i själva modellkoden och är därför lätt att använda tillsammans med de flesta modeller. De enda kraven är att modellen kan startas via en ett systemkommando och att

kommunikationsfilerna är av ASCII-typ. Modellen körs automatiskt upprepade gånger med successiva ändringar av parametervärden, idealt tills maximum av en vald utvärderingsfunktion (avsnitt 3.7) är uppnått. Genom att behandla utdata som en funktion av alla parametrar kan lokala partiella derivator beräknas för varje parameteruppsättning för att uppdatera parametrarna så att bättre anpassning erhålls för varje iteration. I det allmänna fallet är sambandet mellan förändringar i parametervärden och utdata olinjärt vilket ställer höga krav linjäriseringstekniken. I PEST används en flexibel form av Gauss-Marquardt-Levenberg metoden (PEST, 2007).

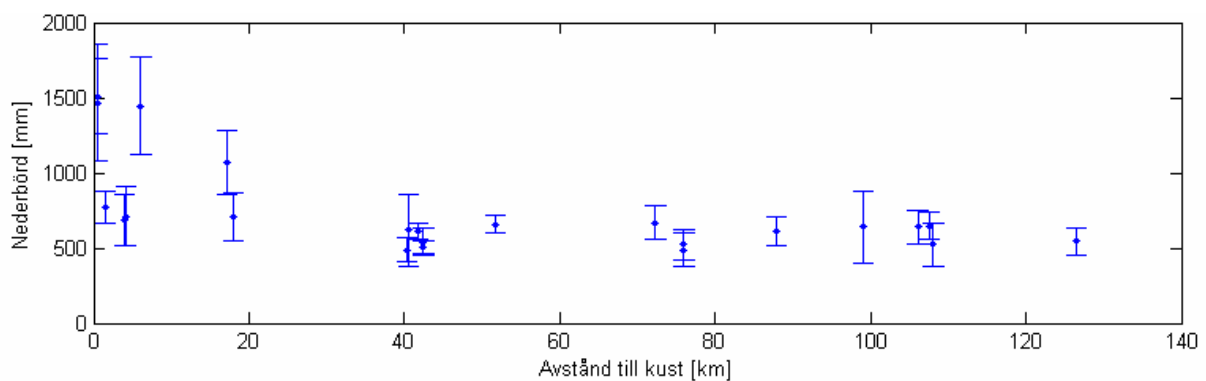
4 RESULTAT

4.1 ANALYS AV INDATA

I Figur 13 syns att de två meteorologiska stationerna belägna vid norska kusten har ett annorlunda nederbördsmonster än de stationer som ligger inom eller öster om tillrinningsområdet. Nära kusten är nederbörden högre under vintermånaderna än längre österut. Även den årliga variationen är större för kustnära stationer vilket framgår av Figur 14.

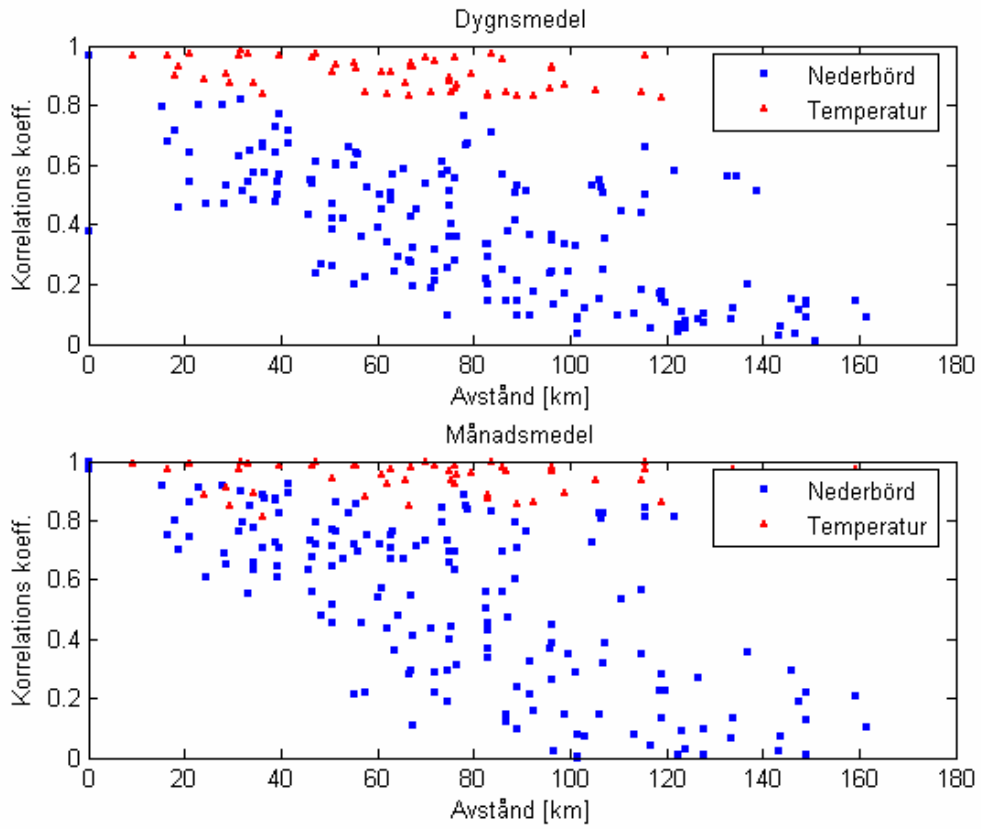


Figur 13. Månadsvis medelnederbörd vid meteorologiska stationer i Suorvamagasinetets närområde.



Figur 14. Årlig nederbörd för meteorologiska stationer i Suorvamagasinetets region. Magasinetets tillrinningsområde ligger 5-80 km från nordatlantiska kusten. Fler stationer än som används som indata till modellerna redovisas.

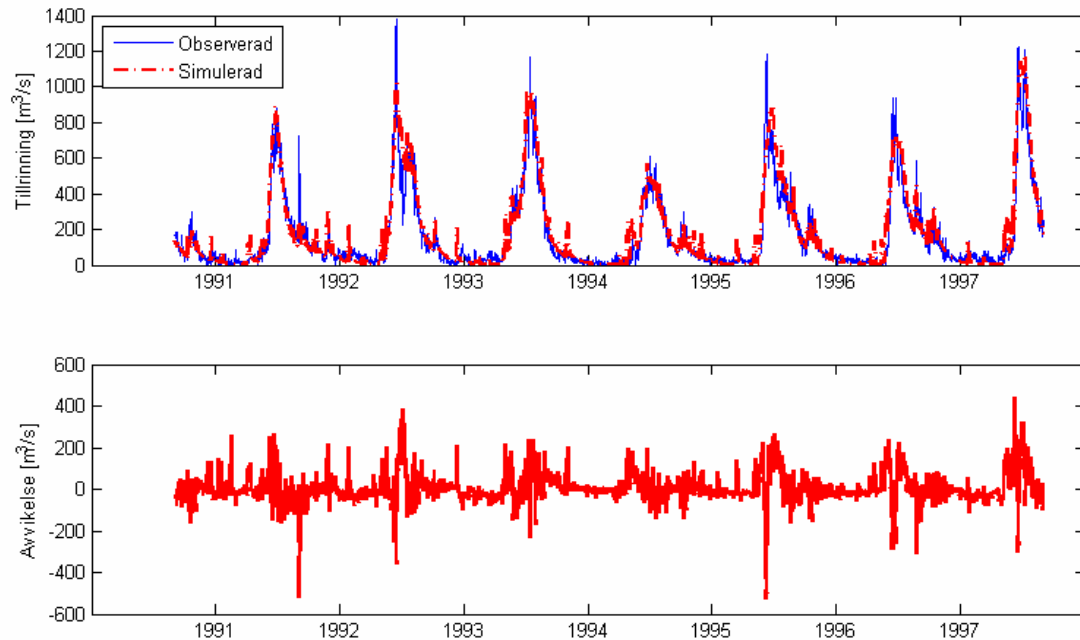
Den rumsliga aspekten av korrelationsanalysen sammanfattas i Figur 15. Resultatet visar att temperaturfördelningen varierar på en regional skala medan nederbörden uppvisar stora lokala variationer. Generellt erhöles högre korrelation för månadsmedelvärden än för dygnsmedel.



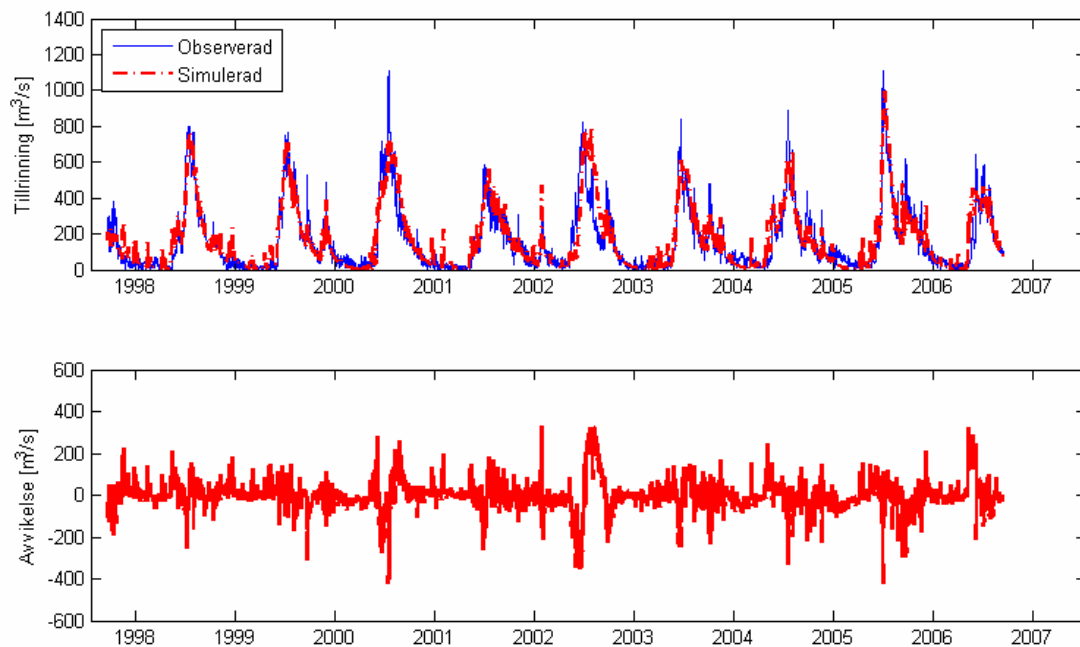
Figur 15. Parvis korrelation för tidsserier från olika meteorologiska stationer som funktion av inbördes avstånd.

4.2 SIMULERINGSRESULTAT FÖR SUORVAMAGASINET

Simulering med DHM gav hydrografer i Figur 16 och Figur 17 för kalibreringsperioden (1990.09.01-1997.08.31) respektive valideringsperioden (1997.09.01-2006.08.31).

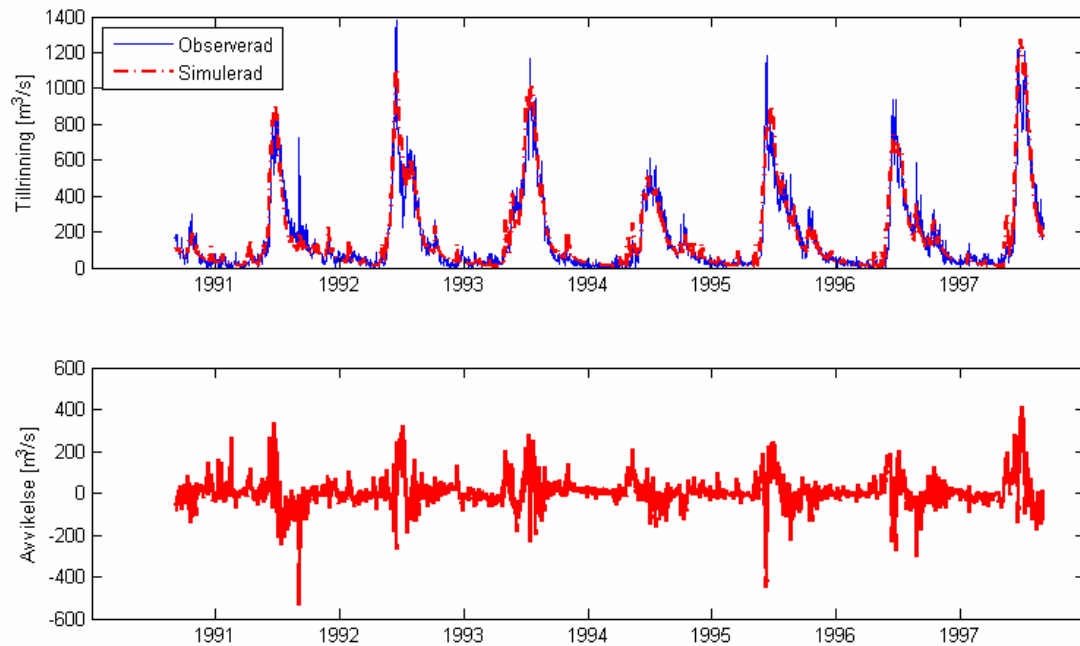


Figur 16. Hydrograf (övre) för kalibreringsperioden simulerat med DHM. Avvikelsen mot observerad tillrinning, $Q_{sim}-Q_{obs}$, visas i den nedre grafen.

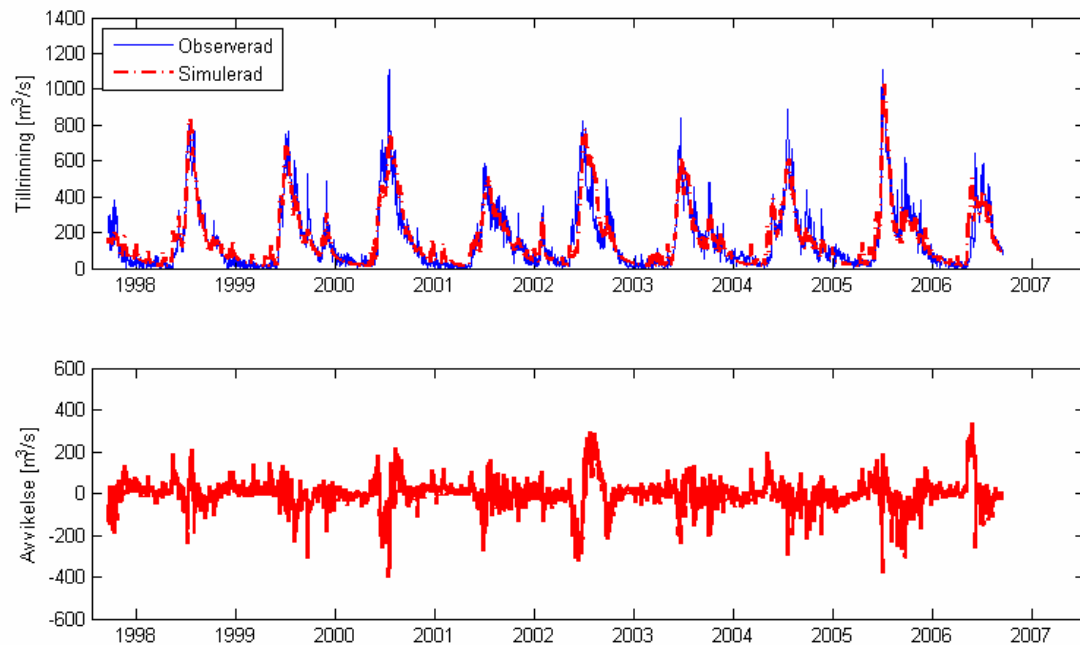


Figur 17. Hydrograf (övre) för valideringsperioden simulerat med DHM och avvikelsen mot observerad tillrinning (nedre).

Simuleringsresultat för DHM med distribuerad routing presenteras i Figur 18 och Figur 19.

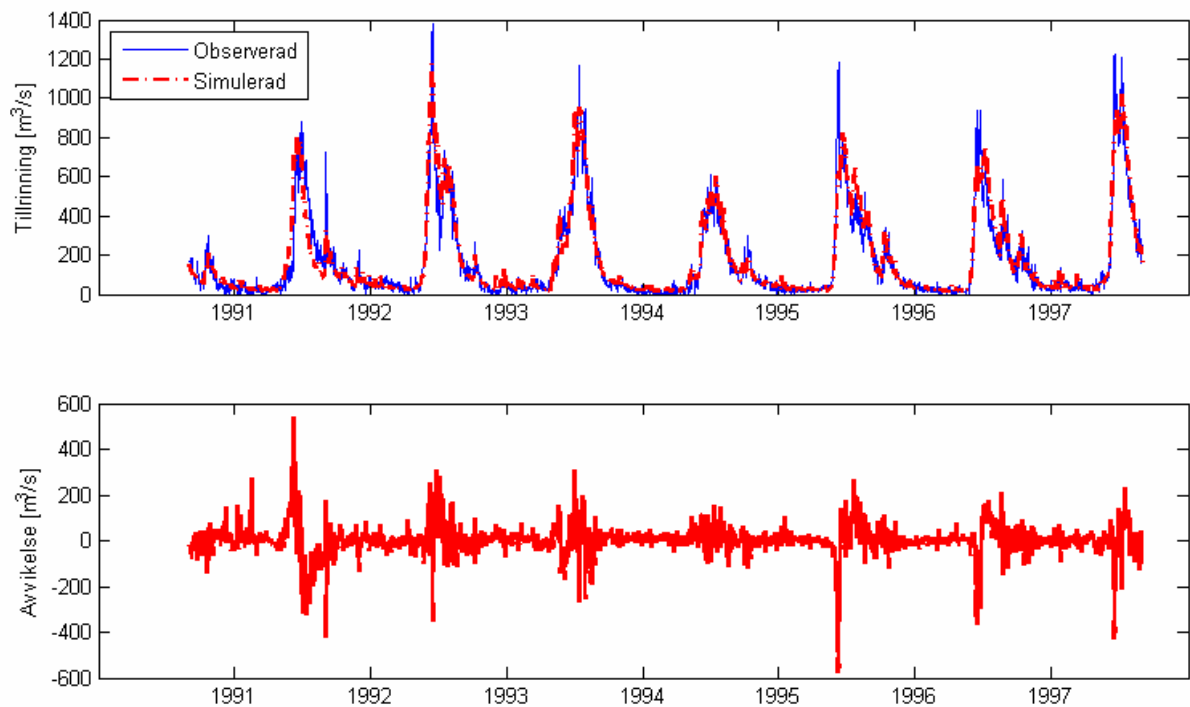


Figur 18. Hydrograf (övre) för kalibreringsperioden simulerat med DHM som använder distribuerad routing. Avvikelsen mellan simulerad och observerad tillrinning syns i den nedre grafen.

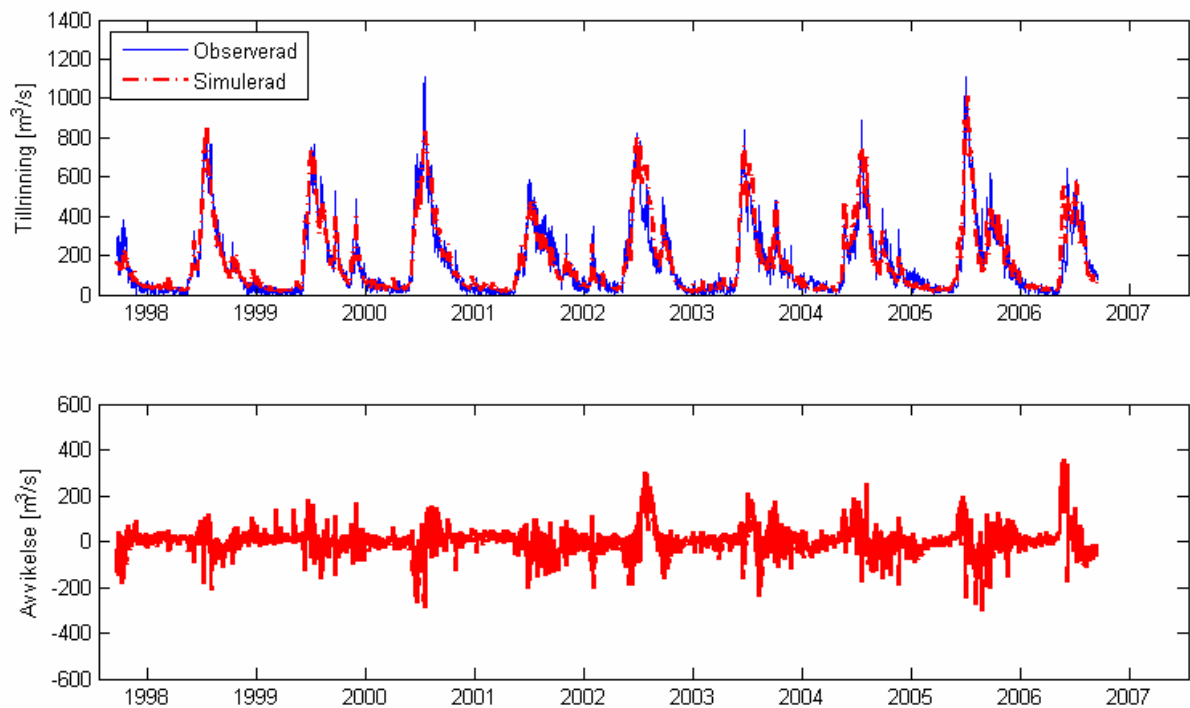


Figur 19. Hydrograf (övre) för valideringsperioden simulerat med DHM som använder distribuerad routing. Avvikelsen mellan simulerad och observerad tillrinning syns i den nedre grafen.

Resultat från simulering med HBV-96 har hämtats från den modell som används operationellt inom Vattenfall AB. I Figur 20 och Figur 21 redovisas hydrografen för samma perioder som använts för kalibrering och validering av DHM.



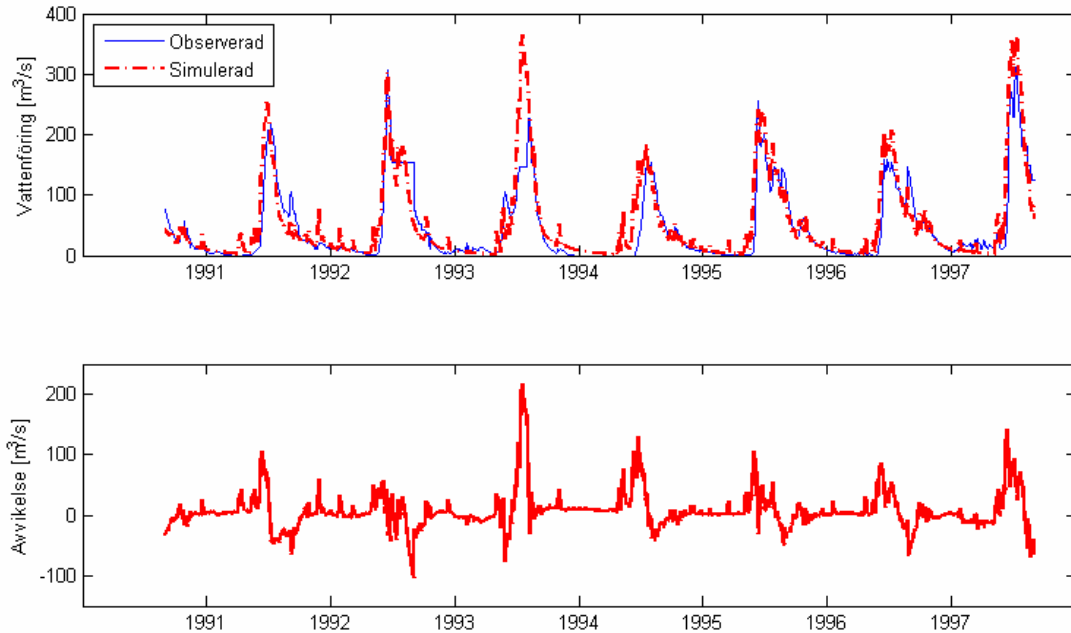
Figur 20. Hydrograf (övre) för perioden 1990.09.01-1997.08.31 simulerat med HBV-96 och avvikelserna mot observerad tillrinning (nedre).



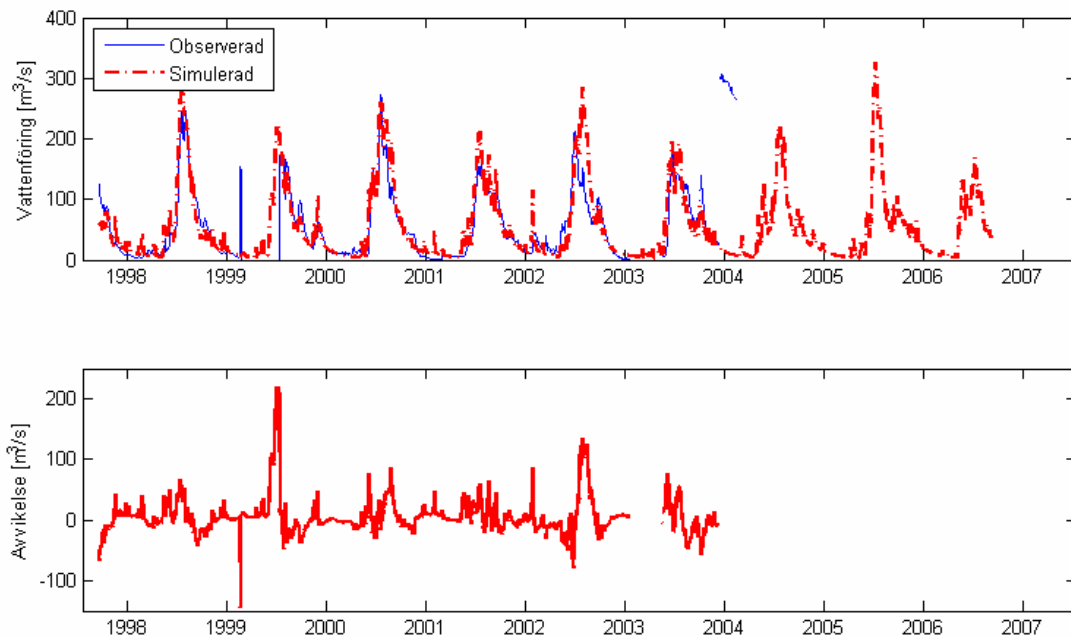
Figur 21. Hydrograf (övre) för perioden 1997.09.01-2006.08.31 simulerat med HBV-96 och avvikelserna mot observerad tillrinning (nedre)

4.3 SIMULERINGSRESULTAT FÖR VIRIHAURE

Vattenföringen i sjön Virihaures utlopp simulerades med den version av DHM som använder distribuerad routing. Resultatet presenteras i Figur 22, Figur 23 samt i form av effektivitetsmått i Tabell 4.



Figur 22. Hydrograf (övre) för utloppet på sjön Virihaure i tillrinningsområdet under kalibreringsperioden. Avvikelse mot uppmätt vattenföring visas i den nedre grafen.



Figur 23. Hydrograf (övre) för utloppet på sjön Virihaure i tillrinningsområdet under valideringsperioden. Avvikelse mot uppmätt vattenföring visas i den nedre grafen.

Tabell 5. Effektivitetsmått för kalibrerings- och valideringsperiod för simulering av flödet ut ur Virihaure.

Tidsperiod	Modell	R_{eff}	V_E
Kalibreringsperiod	DHM med routing	0,80	-0,14
Valideringsperiod	DHM med.routing	0,79	-0,042

4.4 JÄMFÖRELSE AV MODELLERNA

Simuleringarna för Sourvamagasinet visar på likartade resultat för alla tre modellerna under kalibreringsperioden. För valideringsperioden visar sig HBV-96 något bättre, vilket framgår i Tabell 6. Efter utökningen av DHM med routing är resultatet något bättre för både kalibrerings- och valideringsperiod men skillnaden är liten.

Tabell 6. Effektivitetsmått för kalibrerings- och valideringsperiod för simulering av tillrinning till Suorvamagasinet.

Tidsperiod	Modell	R_{eff}	V_E
Kalibreringsperiod	DHM	0,89	-0,009
Valideringsperiod	DHM	0,83	+0,020
Kalibreringsperiod	DHM med.routing	0,90	+0,005
Valideringsperiod	DHM med routing	0,85	-0,018
Kalibreringsperiod	HBV-96	0,90	+0,010
Valideringsperiod	HBV-96	0,89	+0,007

Larsson (2004a) simulerade tillrinningen till Tjaktjajaure för valideringsperioden (1996.10.03-2003.09.31) med $R_{\text{eff}}=0,88$ (Nash & Sutcliffe, 1970) och $V_E=-0,006$. Simulering för Kultsjön (Larsson 2004b) under samma valideringsperiod gav $R_{\text{eff}}=0,82$ och $V_E=0,042$. Resultaten från Suorvamagasinet avrinningsområde är fullt jämförbara med dessa två tidigare studier.

4.5 KÄNSLIGHETSANALYS AV PARAMETRAR I DHM

Resultatet från PEST:s känslighetsanalys för DHM framgår i Tabell 7. Känsligheten avser effektivitetsmättet R_{eff} .

Tabell 7. Parameterkänslighet, enligt ekvation 2, för DHM med routing

Parameter	Känslighet	Funktion
K_1	$4,30 \cdot 10^{-3}$ [dygn ²]	Avrinningsbildning (snabb)
SFCF	$2,82 \cdot 10^{-3}$ []	Nederbördskorrektion för snö
a_1	$1,97 \cdot 10^{-3}$ []	Routing
ALFA	$1,71 \cdot 10^{-3}$ []	Avrinningsbildning (snabb)
a_2	$9,30 \cdot 10^{-4}$ []	Routing
K_2	$5,84 \cdot 10^{-4}$ [dygn ²]	Avrinningsbildning (långsam)
CFMAX	$3,74 \cdot 10^{-4}$ [mm ⁻² ·°C ² · dygn]	Smälthastighet
BETA	$1,89 \cdot 10^{-4}$ []	Perkolationshastighet
TT	$1,17 \cdot 10^{-4}$ [°C ⁻²]	Smälttemperatur
LP	$1,13 \cdot 10^{-4}$ []	Avdunstning
PERC	$8,54 \cdot 10^{-5}$ [mm ⁻² · dygn ²]	Perkolationshastighet
FC_CAL	$1,21 \cdot 10^{-6}$ [mm ⁻²]	Fältkapacitet

Parametrar som påverkar mängden snö och snabb avrinningsbildning är de som påverkar simuleringsresultatet mest medan känsligheten för parametrar som styr omfördelningen i markmagasin är flera storleksordningar mindre.

5 DISKUSSION

5.1 JÄMFÖRELSE AV MODELLER

I jämförelsen mellan de tre modellerna står sig DHM väl både med och utan rutinen för routing. Den förbättring som syns med routing kan bero på att hydrografens variation blivit mer utjämnad. Jämfört med HBV-96 följer båda varianterna av DHM flödestoppar snabbare men skattar inte tillrinningen efter snösmältningssäsongen lika väl.

5.2 DHM

Modellens snabba svar på förändringar i indata tillsammans med den detaljerade rumsliga upplösningen ger potential för en god beskrivning av hydrologiska processer med det distribuerade angreppssättet. DHM: s respons tyder på att modellen snabbt kan svara på händelser såsom nederbörd eller avsmältning i hela eller delar av tillrinningsområdet. Modellens känslighet för förändringar i indata är naturlig och det är ett korrekt beteende för en modell, dvs modelleringsresultaten påverkas av indata. För bra resultat bör modellen förses med så konsekvent indata som möjligt, vilket i praktiken innebär att använda sig av samma nederbördsstationer under så lång tid som möjligt. Inkluderas mätstationer med korta eller diskontinuerliga mätserier kommer nackdelarna med en icke konsekvent beskrivning nederbördsdata bli större än den ökade noggrannheten fler och tätare nederbördsobservationer ger. Anledningen är troligtvis att nederbörden ackumuleras som snö under vinterhalvåret. Beroende på vilka nederbördsstationer som används fås olika nederbördsmönster som i slutet av ackumulationssäsongen ger mycket olika mäktighet och fördelning av snö. I linje med Xu´s resultat (Xu & Vandewiele, 1994) är det möjligt att kompensera för mindre systematiska fel med ändrade parametervärden om indata är homogen. Om karaktären av den interpolerade nederbörden skiljer sig avsevärt för olika perioder, såsom sker om olika nederbördsstationer används för olika tidsperioder, är det svårare att få goda resultat.

5.3 UTÖKNING AV DHM MED ROUTINGRUTIN

Implementeringen av routing med länkade linjära magasin i serie visar att det är möjligt att prognostisera vattenföringen inom tillrinningsområdet. För att motivera användandet av en distribuerad modell är det viktigt att validering mot mätningar för olika punkter i rummet är möjlig. Det är känt att serien med vattenståndsmätningar i Virihaure innehåller perioder med mätstörningar och saknade värden, vilket bör vägas in i tolkningen av effektivitetsmått. Simulerad och observerad vattenföring är av samma storleksordning vilket tyder på att det modellerade vatteninnehållet i snömagasin stämmer relativt väl med det faktiska. Simuleringen för Virihaure gav goda resultat, speciellt med tanke på att modellen kalibrerades för Suorva och data Virihaure endast har använts för validering. För att motivera användandet av en distribuerad modell är det viktigt med distribuerad validering. Resultatet från Virihaure samt en tidigare studie av Larsson (2004a) visar på god överensstämmelse med mätdata för två distribuerade variabler, vattenföring respektive snöutbredning.

Fördelarna med distribuerad routing är att nederbörd och snösmältning nära eller direkt på magasinet bidrar till tillrinningen samma dag medan avrinning som sker långt från dammen fördröjs och ger en långsammare respons än för ursprungliga DHM. Resultaten för modellering med DHM med respektive utan routing inte är speciellt stora. Routing kan vara intressant om hydrografer från flera olika vattendrag inom avrinningsområdet möjliggör multivariabel kalibrering eller validering mot flera oberoende dataset. Det är möjligt att det med multivariabel kalibrering går att få bättre simuleringsresultat för DHM med routingrutin än för DHM i standardversionen. Kvalité i indata bedöms dock fortfarande vara den mest begränsande faktorn för simuleringsresultaten för DHM med respektive utan routing. I dagsläget uppnås ej noggrannare simuleringar i den utsträckning som motiverar införandet av en extra parameter och ökad modellkomplexitet.

5.4 ANALYS AV INDATA

Analysen av nederbörden visar på två olika nederbördsmönster för de undersökta stationerna. Stationer nära atlantkusten visar på ett marint klimat med mycket nederbörd under höst och vinter. Stationer på östra sidan av bergskedjan, där merparten av avrinningsområdet ligger, visar på lägre årsnederbörd med nederbördsmaximum under sommaren, vilket är typiskt för inlandsklimat (Ackerman, 2003). Resultatet är i linje med Johanssons beskrivning av regionen (Johansson, 2002) och Bergströms reflektion över nederbördsmönstret i svenska fjällkedjan (Bergström, 1992). För skattning av areell nederbörd i avrinningsområdet användes meteorologiska observationer från både kust- och inlandsstationer. Mätning av nederbörd är som nämnts stickprov från en diskret variabel. När nederbörden mellan mätstationerna interpoleras fram i DHM (se Appendix 1) överrensstämmer de interpolerade värdena inte med de uppmätta. Avvikelsen är väntad och storleken beror allmänt av interpolationsmetoden, stationsnätverkets täthet och den verkliga variationens karaktär. I huvudsak erhöles lägre areell nederbörd när Vattenfall AB:s automatiska stationer inkluderades i interpolationen. Det är troligt att Vattenfall AB:s automatstationer korrekt speglar sann lägre nederbörd i det inre av tillrinningsområdet, men på grund av sina positioner i mitten av tillrinningsområdet får de under interpolationen en alltför dominerade roll. För att återge vattenbalansen i området som helhet krävs då stora skalfaktorer för nederbördsobservationerna i Vattenfall AB:s automatstationer. Problematiken med den orimligt låga areella nederbörden kan eventuellt lösas genom översyn av interpolations- och höjdkorrektionsmetoden. I nuläget skalas all observerad nederbörd om till referenshöjden 430 m ö.h före interpolationen. Observerad nederbörd skalas 10 % per 100 höjdmeter. Efter interpolationen skalas nederbörden upp med 10 % per 100 höjdmeter enligt den digitala höjdmodellen. Effekten av höjdkorrektionen är således att uppmätt nederbörd i det inre och torrare och högt belägna delarna av tillrinningsområdet skalas ner och nederbörds mätningar i de nederbördsrika kustnära regionerna skalas upp då de stationer ligger vid havsnivå. Låg korrelation mellan nederbörds mätningar kan också vara en bidragande orsak till att areella nederbörden minskar då flera närbelägna stationer används i interpolationen.

5.5 PARAMETERKÄNSLIGHET FÖR DHM

De parametrar i DHM som påverkar simulerad vattenföring mest är de som styr snabb avrinning. Det ligger nära till hands att tro att en parameter med liten känslighet är mindre

betydelsefull för modellens funktion. Resultatet bör dock tolkas som att simuleringsresultatet för analyserat parameterset inte förändras nämnvärt genom att ändra parametern i fråga. För andra parameterset kan parametern i fråga starkt påverka resultatet och ha hög känslighet. På grund av att parametrarna i regel ej är oberoende bör enskild parameterkänslighet ses till relation till övriga parametervärden. Parametrar som styr snabb avrinningsbildning har visat på hög känslighet för flera undersökta parameterset och kan anses gälla åtminstone för en delmängd parameterset. Automatiska optimeringsalgoritmer ifrågasätts ofta för att de arbetar lokalt och inte garanterar en global lösning på optimeringsproblemet. I denna tillämpning har PEST dock inte använts för att optimera parametervärden utan för att utvärdera modellens känslighet för ett givet parameterset, en analys som är möjlig för alla punkter på funktionsytan.

6 REKOMMENDATIONER

Undersökning av en robustare metod för skattning av areell nederbörd rekommenderas. Målet bör i första hand vara att undersöka möjligheten att utnyttja befintliga automatstationers tidsserier vilka är diskontinuerliga och av begränsad längd.

Exekveringstiden har visat sig vara en begränsande faktor under kalibrering och bör optimeras. Minskad rumslig upplösning liksom större steg i uppdateringen av variabeln för markfuktigheten är två alternativ som ger snabbare exekvering och bör undersökas. Kvalitetskontroll för att säkerställa modellprestanda med dessa förändringar är nödvändigt. Kort exekveringstid möjliggör statistisk analys av modellresultat från simuleringar med tusentals parameterset vilka kan genereras med s.k. Monte Carlo-metoder.

DHM använder idag två konceptuella grundvattenmagasin och det kan vara av intresse att undersöka huruvida det undre grundvattenmagasinet är nödvändigt eller om modellen kan förenklas till att använda ett grundvattenmagasin. Om likvärdiga resultat kan uppnås med en enklare modellstruktur finns det goda skäl att välja denna.

7 REFERENSER

7.1 TRYCKTA

- Ackerman, S.A. & Knox, J.A. (2003). *Meteorology – understanding the atmosphere*. Brooks/Cole.
- Becker, A. & Braun, P. (1998). *Disaggregation, aggregation and spatial scaling in hydrological modelling*. *Journal of Hydrology*, 217, pp239-252.
- Bergström, S. Harlin, J. & Lindström, G. (1992). *Spillway design floods in Sweden: I – New guidelines*. *Hydrological Sciences -Journal –des Sciences Hydrologiques*, 37, 5.
- Beven, K.J. (2001). *Rainfall-runoff modelling - the primer*, Wiley, Chichester.
- Buttsa, M. B. & Payne, J. T. (2003). *An evaluation of the impact of model structure on hydrological modelling uncertainty for stream flow simulation*. *Journal of Hydrology*, 298, pp242–266.
- Chow, V.T. (1964). *Handbook of applied hydrology – a compendium of waterresources technology*. McGraw-Hill, New York, USA.
- Crooks, S.M. & Naden, P.S. (2007). *A semi-distributed rainfall-runoff modelling system*. *Hydrology & Earth system Sciences*, 11, pp516-531.
- Dunne, T. & Leopold, L.B (1978). *Water in environmental planning*. W.H. Freeman and Company. ISBN 0-7167-0079-4.
- Eklundh, L. (1999). *Geografisk informationsbehandling - metoder och tillämpningar*. Byggnadsforskningsrådet.
- Energimyndigheten. (2006). *Ägarstrukturen på elmarknaden - vem äger vad på den svenska elmarknaden? Energimarknadsinspektionen*.
- Johansson, B. (2002). *Estimation of areal precipitation for hydrological modelling in Sweden*. Dept of physical Geography, Gothenburg University.
- Lindström, G. (1997). *Development and test of the distributed HBV-96 hydrological model*. *Journal of Hydrology*, 201, pp272-288.
- Lindström, G. (2006). *Regional kalibrering av HBV-modellen*. *Hydrologi*, Nr 101.

- Larsson, P. (2004a). *Utveckling och tillämpning av en distribuerad GIS-baserad snösmältnings- och avrinningsmodell*. Examensarbete, Institutionen för geovetenskaper, Uppsala Universitet.
- Larsson, P. (2004b). *Vidareutveckling och utvärdering av distribuerad hydrologisk modell Tjaktjajaure och Kultsjön*. ELFORSK. Elforsk rapport 04:52.
- Lundin, U. (2006). *Hydropower booklet –technology and system*. Division for electricity and lightning research, Department of engineering sciences, Uppsala University.
- Melin, R. (1970). *Hydrologi i Norden*. Svenska utbildningsförlaget Liber AB.
- Nash J.E. & Sutcliffe J.V. (1970). *River flow forecasting through conceptual models Part I –a discussion of principles*. Journal of Hydrology, 10, pp282-290.
- Oudin, L. & Perrin C. (2006). *Impact of biased and randomly corrupted inputs on the efficiency and the parameters of watershed models*. Journal of Hydrology, 320, pp62–83.
- Pullar, D. & Springer, D. (2000). *Towards integrating GIS and catchment models*. Environmental Modelling & Software, 15, pp451–459.
- Refsgaard, J.C. (1996). *Parameterisation, calibration and validation of distributed hydrological models*. Journal of Hydrology, 198, pp69-97.
- Refsgaard, J.C. (2007). *Hydrological modelling and river basin management*. Geological Survey of Denmark and Greenland.
- Seibert, J. (1997). *Estimation of parameter uncertainty in the HBV model*. Nordic Hydrology, 28 (4/5), pp247-262.
- 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. Uppsala. ISBN 91-554-4402-4.
- Shaw, E.M. (1994). *Hydrology in practice*. Stanley Thornes Ltd, United Kingdom. ISBN 0-7487-4448-7.
- Silveira, L. (1998). *Hydrological modelling of natural grasslands with small slopes in Temperate Zones*, Kungliga Tekniska Högskolan, Sverige.
- Strahler, A.N. (1964). *Quantitative geomorphology of drainage basins and channel networks, section 4-II*. In: *Handbook of Applied Hydrology* (V.T. Chow, et al. (1964)). , McGraw-Hill, New York USA, 4-II.

- Teegavarapu, R.S.V. (2005). *Improved weighting methods, deterministic and stochastic data-driven models for estimation of missing precipitation records*. Journal of Hydrology, 312, pp191-206.
- Uljanova, M. (2002). *Förstudie automatstationer i Luleälven*, SWEDPOWER AB, Rapportnummer 1529400-001.
- V.A. Bell & R.J.Moore. (1998). *A grid based distributed flood forecasting model for use with weather radar data: part 1. Formulation*. Hydrology & Earth system Sciences, 2, pp265-281.
- van Deursen, W.P.A. (1995). *Geographical information systems and dynamic models; development and application of a prototype spatial modelling language*. Ruimtelijke Wetenschappen Universiteit Utrecht. ISBN 90-6809-206-5.
- Xu, C.-Y. & Vandewiele, G. L. (1994). *Sensitivity of monthly rainfall-runoff models to input errors and data length*. Journal des Sciences Hydrologiques, 39 (2).
- Xu, C. (2006). *Hydrological models, edition 2006*, Institutionen för geovetenskaper. Uppsala Universitet.

7.2 INTERNET

- PCRaster. (2005). *PCRaster Website: Documentation*. Faculty of Geographical Sciences, Utrecht University, Nederländerna.
<http://pcraster.geo.uu.nl/download/doc/PCRasterManual18Feb2005.pdf>
- PEST. (2007). *Model-independent parameter estimation user manual: 5th Edition*.
<http://www.sspa.com/pest/download/pestman.pdf>
- Vattenfall AB. (2007). *Årsredovisning 2006*.
http://www.vattenfall.se/annual-reports/vf_se/2006/

7.3 MUNTliga

- Halldin, Sven. Professor, Institutionen för geovetenskaper vid Uppsala Universitet.
- Larsson, Per. Forskningsingenjör, Vattenfall AB (VRD).
- Kuoljok, Uno. Hydrolog, Vattenfall AB (PVPS).

APPENDIX 1 - DISTRIBUTUERAD HYDROLOGISK MODELL

DISTRIBUTUERING AV INDATA

Nederbörds- och temperaturdata är tillgängligt som punktobservationer och interpoleras till en yta för att distribuera nederbörden vilket modellstrukturen kräver. Innan interpolationen normeras nederbörd och temperatur till en referensnivå, avrinningsområdets lägsta punkt, 430 m ö.h. Interpolationen sker för referensnivån och den interpolerade ytan korrigeras sedan tillbaka med hjälp av den digitala höjdmodellen. Mätvärden från nederbörden korrigeras 10 % per 100 höjdmeter, medan temperaturen korrigeras med fuktadiabatiskt temperaturavtagande med $-0.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ per 100 höjdmeter. Larsson (2004a) diskuterar bakgrunden till denna korrektion och valet av avståndsviktad medelvärdesbildning (*Eng: Inverse Distance Weighting*) som interpolationsmetod. Data för potentiell avdunstning terrängkorrigeras ej utan antas vara densamma över hela området.

SNÖROUTIN

Snörutinen syftar till att återge dynamik i nederbörd och snötäcke. Nederbörd och ackumulation av snö behandlas i form av vattenekvivalenter eftersom vatteninnehållet är av primärt intresse inom avrinningsmodellering. Lufttemperatur används för att beskriva nederbördstyp, avsmältning och återfrysning enligt ekvation 1 (Larsson, 2004a). Nederbörd som faller då temperaturen är under tröskeltemperaturen P_{TT} hanteras som snö, i övrigt som regn. För snö används korrigeringsfaktorn P_{SFCF} för att kompensera för systematisk underskattning som är vanligt vintertid (Seibert, 1997, Larsson muntligen). Avsmältning av snötäcket modelleras med en s.k. grad-dag metod och sker då temperaturen är över tröskeltemperaturen. Smältvatten lämnar snötäcket om vattenhalten överskrider snötäckets vattenhållande förmåga P_{WHC} , som vanligen fixeras till 5 %. Analogt med smältning sker återfrysning av vatten i snötäcket med proportionalitetsfaktorn P_{CFR} men för temperatur under P_{TT} . Avsmältningen och återfrysningen justeras mot potentiellt solinstrålningsindex, NRI (Larsson 2004a). NRI återspeglar topografiska effekter av sluttningsriktning med effekten att sydsluttningars avsmältning är högre än nordsluttningars för i övrigt lika förhållanden.

$$\begin{aligned} P_{snow} &= P_{SFCF} \cdot P_{tot} & P_{rain} &= 0 & \text{för } T > P_{TT} \\ P_{snow} &= 0 & P_{rain} &= P_{tot} & \text{för } T \leq P_{TT} \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} M &= NRI \cdot P_{CFMAX} \cdot (T - T_{TT}) & M &\in [0, \infty[\\ R &= NRI \cdot P_{CFR} \cdot P_{CFMAX} \cdot (P_{TT} - T) & R &\in [0, \infty[\end{aligned}$$

där

P_{tot}	=	Total nederbörd [mm/dygn]
P_{rain}	=	Nederbörd som regn [mm/dygn]
P_{snow}	=	Nederbörd i form av snö [mm/dygn]
P_{SFCF}	=	Snökorrigeringsfaktor []
M	=	Snösmältning [mm/dygn]

NRI =	Solinstrålningsindex []
P _{CFMAX} =	Grad-dag koefficient [mm/°C dygn]
T =	Temperatur [°C]
P _{TT} =	Tröskeltemperatur [°C]
R =	Återfrysning [mm/dygn]
P _{CFR} =	Återfrysningskoefficient []

Snörutinens parametrar är P_{TT}, P_{SFCF}, P_{CFMAX} och P_{WHC} varav de tre första vanligen bestäms via kalibrering.

MARKRUTIN

Markrutinen conceptualiserar vertikala flöden och lagring av vatten i marken. Strukturen är ett markmagasin och två grundvattenmagasin. Insignal till markrutinen är primärt nederbörd och smältvatten från snörutinen, samt sekundärt från kringliggande grundvattenmagasin som kommunicerar lateralt (Figur 1).



Figur 1. Markrutinen.

Landklassificeringen utnyttjas för att behandla land och vattenytor på olika sätt. Celler klassificerade som vatten har bara ett undre grundvattenmagasin medan celler klassade som land har tre magasin enligt Figur 1. Processer i markmagasinet, såsom avdunstning och transport till grundvattenmagasinen, beror av förhållandet mellan aktuell vattenhalt, θ_{SM} och maximalt vattenhalt θ_{FC} samt P_{Beta} . Celler som representerar vatten beräknar endast flöden till det undre grundvattenmagasinet. Verklig avdunstning kan variera från 0 till potentiell avdunstning. Genom parametern P_{LP} uppnås potentiell avdunstning för vattenkvot P_{LP} . Larsson (2004a) sammanfattar markrutinen i följande ekvationer.

$$\frac{W_{UZ}}{W_{snowroutine}} = \left(\frac{\theta_{SM}(t-1)}{\theta_{FC}} \right)^{P_{Beta}}$$

$$\theta_{SM}(t) = \theta_{SM}(t-1) + W_{Snowroutine} + W_{UZ} \quad (2)$$

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

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

där

W_{UZ}	=	Vatten till övre grundvattenmagasinet [mm/dygn]
θ_{SM}	=	Vattenhalt i markmagasinet [mm]
θ_{FC}	=	Fältkapacitet, maximal vattenhalt i markmagasinet [mm]
P_{BETA}	=	Empirisk konstant []
$W_{snow\ routine}$	=	Vatten från snörutinen [mm/dygn]
E_{actual}	=	Verklig avdunstning från markmagasinet [mm/dygn]
E_{pot}	=	Potentiell avdunstning från markmagasinet [mm/dygn]
P_{LP}	=	Tröskelvärde för kvoten θ_{SM}/θ_{FC} []

Vidare antas $E_{actual} = E_{pot}$ för celler klassade som vatten, utom för snö- eller istäckta celler då avdunstningen antas vara noll (Larsson, 2004). En digital terrängmodell används för att låta fältkapaciteten variera med lutningen och är således helt distribuerad (Larsson, 2004a) enligt;

$$\theta_{FC} = \left(\frac{(90^\circ - slope)}{90^\circ} \right)^2 \cdot P_{FC} \quad (3)$$

där

θ_{FC}	=	Fältkapacitet, maximal vattenhalt i markmagasinet [mm]
P_{FC}	=	Fältkapacitet för horisontell yta [mm]
slope	=	Medellutning från terrängmodell [grader]

Numeriska värden på parametrarna P_{FC} , P_{LP} och P_{BETA} bestäms via kalibrering.

AVRINNINGSBILDNING

Routingrutinen styr avrinningsbildningen i modellen både med avseende på volym och på tidpunkt. Vatten från markmagasinet ($W_{upperzone}$) förs till det övre grundvattenmagasinet, vilket in sin tur kommunicerar med det undre grundvattenmagasinet via ett enkelriktat flöde som styrs av parametern P_{PERC} [mm/dygn]. Avrinningen från en cell beräknas som summan av flödena ut från de båda grundvattenmagasinen. Utflödet beskrivs med en olinjär ekvation för det övre magasinet och med en linjär ekvation för det nedre enligt (Larsson, 2004a)

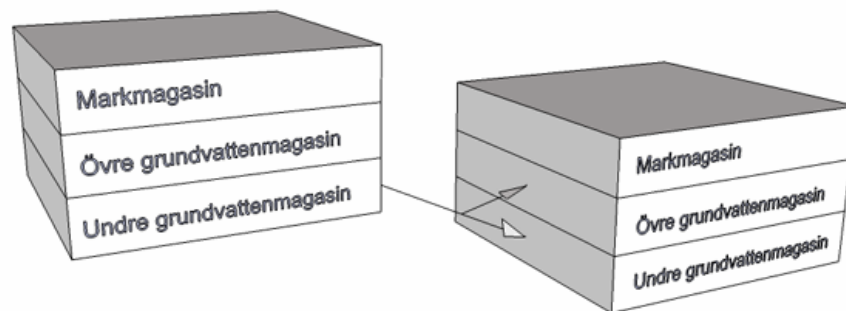
$$\begin{aligned} Q_{UZ} &= K_1 \cdot B_{UZ}^{(1+P_{ALFA})} \\ Q_{LZ, Land.} &= K_2 \cdot B_{LZ} \\ B_{LZ, downstream} &= B_{LZ, \Sigma upstream} \\ Q_{tot\ cell}(t) &= Q_{UZ} + Q_{LZ, Lake} \end{aligned} \quad (4)$$

där

Q_{UZ}	=	Avrinning från övre grundvattenmagasin [mm/dygn]
Q_{LZ}	=	Avrinning från undre grundvattenmagasin [mm/dygn]
$Q_{totcell}$	=	Total avrinning [mm/dygn]
K_1, K_2	=	Reccensionskoefficient [1/dygn]
P_{ALFA}	=	Empirisk konstant []

$B_{UZ} =$	Lagring i övre grundvattenmagasinet [mm]
$B_{LZ} =$	Lagring i undre grundvattenmagasinet [mm]
$B_{LZ,Lake} =$	Lagring i undre grundvattenmagasinet för sjöceller [mm]
$B_{LZ,Land} =$	Lagring i undre grundvattenmagasinet för landceller [mm]

För celler klassificerade som vatten vilka bara har ett undre magasin (se Markrutinen) sker all avrinningsbildning från det undre grundvattenmagasinet. De undre magasinerna kommunicerar lateralt och i varje tidssteg transporteras vatteninnehållet en cell nedströms enligt terrängmodellens dräneringsnätverk (Larsson, 2004a) där det primärt rinner till undre magasinet och sekundärt till det övre. I Figur 2 illustreras flödet mellan två angränsande celler.



Figur 2. Vattentransport mellan grundvattenmagasin.

Den sammanlagda avrinnningen Q_{tot} summeras över samtliga celler i varje tidssteg och faltas genom ett triangulärt viktningsfilter, MAXBAS (Lindström, 1997). Metoden används i HBV modellen och jämnar ut flödestoppar genom att fördela avrinning under dag nr m till att nå recipienten dag nr $m, m+1, m+2, \dots, m+6$.

APPENDIX 2 - LÄNKADE LINJÄRA MAGASIN

Följande härledning med modifieringar går att finna i Chow (1964)

För ett linjärt magasin är utflödet direkt proportionellt mot lagrad volym enligt;

$$Q = a \cdot S \quad (1)$$

Där $Q =$ Utflöde [m^3/s]
 $S =$ Lagrad volym [m^3]
 $a =$ Reccensionskoefficient [s^{-1}]

Tidsförändringen av den lagrade volymen beräknas som skillnaden mellan inflöde och utflöde per tidsenhet. Av kontinuitetsprincipen följer;

$$I - Q = \frac{dS}{dt} \quad (2)$$

Där $S =$ Lagrad volym [m^3]
 $I =$ Inflöde [m^3/s]
 $Q =$ Utflöde [m^3/s]

Ekvation (1) och (2) ger

$$I - Q = \frac{d}{dt} \left(\frac{Q}{a} \right) \quad \Leftrightarrow \quad \frac{dQ}{dt} + a \cdot Q = a \cdot I \quad (3)$$

Ekvation (3) är en första ordningens ordinära differentialekvation och har en analytisk lösning

$$Q = I(1 - e^{-ta}) \quad (4)$$

För ett inflöde som avtar helt vid tiden $t=t_0$ då utflödet är $Q=Q_0$ och $\tau=t-t_0$ följer

$$Q = Q_0 e^{-a\tau} \quad (5)$$

För ett inflöde som momentant helt fyller reservoaren $S=S_0$ för $t_0=0$

$$Q_0 = a \cdot S_0 \quad (6)$$

från kombination av ekvation (5) och (6) följer

$$Q = a \cdot S_0 \cdot e^{-ta} \quad (7)$$

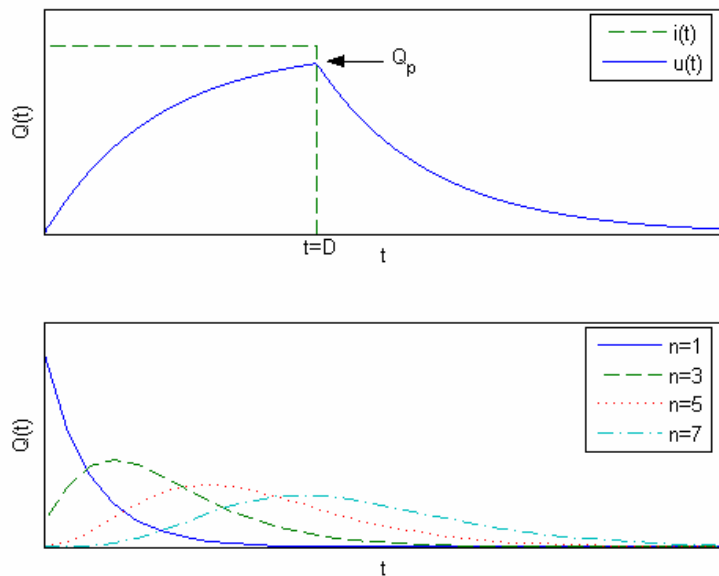
Om inflödet är enhets puls med tidsutsträckningen D , ges magasinets svar av

$$Q(t) = e^{-ta} \begin{cases} I(1 - e^{-ta}) & t \leq D \\ Q_p \cdot e^{-(t-D)a} & t > D \end{cases} \quad (8)$$

Där Q_p är maximalt utflöde som inträffar för $t=D$ då inflödet slutar, se Figur 2

$$Q_p = I(1 - e^{-D \cdot a}) \quad (9)$$

Om flera linjära magasin länkas så att utflödet ur magasin n är inflöde till magasin n+1 uppnås effekt av både fördröjning och utjämning av flödestoppen enligt Figur 1.



Figur 1. Ett linjärt magasin's respons på en konstant insignal (överst) och responsen på en enhetspuls i $t=0$ för n magasin i serie (nederst).

Denna sammanlänkning utvecklades av Nash 1957 och har visat sig användbar inom hydrologi (Xu, 2006). Lösningen för n magasin ges av faltning i tidsdomänen av vilket har en analytisk lösning enligt.

$$Q_2(t) = \int_0^t I(\tau)u(t - \tau)d\tau \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow \int (a \cdot e^{-a\tau}) \cdot (a \cdot e^{-(t-\tau)a})d\tau = t \cdot a^2 e^{-t \cdot a} \quad (10)$$

$$Q_n(t) = \frac{a}{(n-1)!} \cdot a \cdot t^{n-1} e^{-t \cdot a}$$

Där Q = Utflöde [m^3/s]
 S = Lagrad volym [m^3]
 a = Magasinskoefficient [s^{-1}]
 τ = Integrationsvariabel [s]
 n = antal magasin i serie []

APPENDIX 3 - ORDLISTA

- Avrinningsområde** Det område uppströms en punkt som bidrar till flödet i punkten.
- Cell** Minsta enhet i ett raster.
- Distribution** Fördelning över ett geografiskt område.
- Distribuerad modell** Modell vars variabler och parametrar varierar rumsligt.
- Ekvifinalitet** Likvärdiga modellresultat som uppnås med olika parameteruppsättningar.
- Hydrograf** Diagram där vattenföringen visas som funktion av tiden.
- Hydrologiskt system** En uppsättning fysiska, kemiska eller biologiska processer som verkar på invariabler under transformation till utvariabler.
- Hydrologisk variabel** En mätbar storhet som karakteriserar ett hydrologiskt system. Exempelvis temperatur, nederbörd, avdunstning och avrinning.
- Interpolation** Matematisk beräkning av nya datapunkter mellan kända datapunkter.
- Kalibrering** Sökande efter parametrar som ger god överensstämmelse mellan observerade och modellerade värden.
- Kovarians** Graden av två variablers linjära samvariation.
- Korrelationskoefficient** Normerad kovarians, -1 till 1.
- Modell** Förenklad beskrivning av ett verkligt system här uttryckt i matematiska termer.
- Parameter** Ett konstant för användning i en modell som kan justeras för att få simuleringsresultat att efterlikna observerade värden.
- Raster** Rutnät för diskret uppdelningen av ett större område.
- Regleringsgrad** Förhållandet mellan magasinsvolym och årsavrinning (årsvattenföringen).
- Rutin** Delenhet av modell.
- Routing** Transport av flödesimpuls genom ett område eller kanalsystem.
- Sel** En bredare sträcka i en älv där vattnet flyter lugnt.
- Tidsserie** Ett antal mätningar separerade i tiden.
- Tillrinningsområde** Område förutom vattenytan som bidrar med vatten till ett reglermagasin.
- Vattendelare** Begränsningslinjen för ett avrinningsområde.
- Vattenföring** Vattenflöde, anges vanligen i m^3/s .
- Vattenekvivalent** Vatteninnehåll i snö eller is omräknad till flytande form.
- Överlagringsoperationer** Beräkningar genom jämförelse eller matematiska operationer på tematiska kartor över samma område.