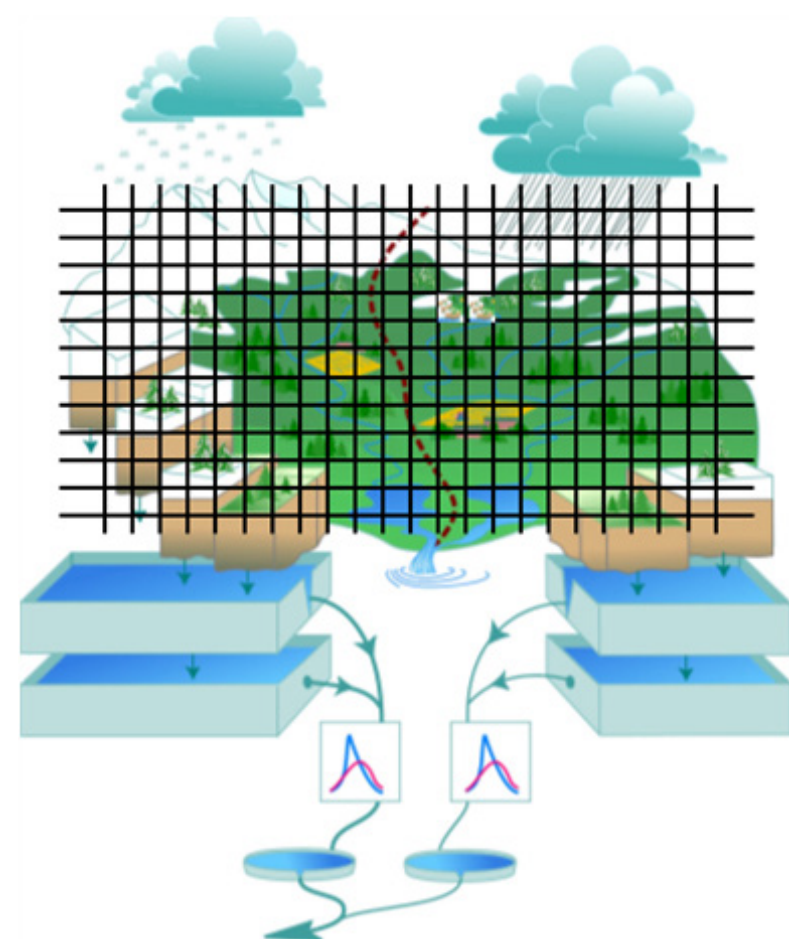


VINDRELATERAD SNÖFÖRDELNING I HYDROLOGISKA MODELLER

RAPPORT 2015:207



Vindrelaterad snöfördelning i hydrologiska modeller

BARBRO JOHANSSON

JOEL DAHNÉ

DAVID GUSTAFSSON

ISBN 978-91-7673-207-6 | © 2015 ENERGIFORSK

Energiforsk AB | Telefon: 08-677 25 30 | E-post: kontakt@energiforsk.se | www.energiforsk.se

Förord

Kravet på hydrologiska modeller som används operationellt har länge varit att indata ska vara lättillgängliga. I praktiken har det inneburit semidistribuerade modeller med nederbörd och temperatur som indata. De senaste 10 åren har tillgängligheten till högupplösta geografiska och meteorologiska data ökat väsentligt. I rapporten undersöks om användningen av dessa data i en högupplöst snömodell kan förbättra modelleringen av snömagasinet inför och under vårfloden. Resultaten visar att det är realistiskt att köra en sådan modell operationellt, men att det inte ger en tydlig förbättring av simulerad vårflod. Energibalansmetoden för beräkning av snösmältning bedöms dock vara intressant för ytterligare utvärdering.

Projektet har ingått i HUVA - Energiforsks arbetsgrupp för Hydrologiskt UtvecklingsArbete vars huvudinriktning är att förbättra vattenkraftindustrins prognosmodeller. HUVA innehåller utvecklingsprojekt, omvärldsbevakning, utbildning inom vattenkraftshydrologi (HUVA-kursen), HUVA-dagen och standardisering. I HUVA-gruppen ingår:

Peter Calla, Vattenregleringsföretagen (ordf.)
 Björn Norell, Vattenregleringsföretagen
 Stefan Busse, E.ON Vattenkraft
 Johan E. Andersson, Fortum
 Emma Wikner, Statkraft
 Knut Sand, Statkraft
 Susanne Nyström, Vattenfall
 Mikael Sundby, Vattenfall
 Lars Pettersson, Skellefteälvens vattenregleringsföretag
 Cristian Andersson, Energiforsk

E.ON Vattenkraft Sverige AB, Fortum Generation AB, Holmen Energi AB, Jämtkraft AB, Karlstads Energi AB, Skellefteå Kraft AB, Sollefteåforsens AB, Statkraft Sverige AB, Umeå Energi AB and Vattenfall Vattenkraft AB deltar i HUVA.

Ett stort tack riktas till Barbro Johansson, Joel Dahné samt David Gustafsson på SMHI som genomfört projektet.

Stockholm, november 2015



Cristian Andersson

Energiforsk

Sammanfattning

I rapporten redovisas ett projekt med syfte att förbättra modelleringen av snömagasinet inför och under vårfloden.

Kravet på hydrologiska modeller som används operationellt har länge varit att indata skall vara lättillgängliga. I praktiken har det inneburit semidistribuerade modeller med nederbörd och temperatur som indata.

Runt år 2000 prövades nya metoder för att skatta avrinningsområdets nederbörd och temperatur. Det resulterade i den s.k. PTHBV-databasen med dygnsvärden på nederbörd och temperatur i ett rutnät med upplösningen 4x4 km² för Sverige. All den forskning som låg bakom databasen utnyttjades dock inte i den operationella versionen. Även där var motiveringen att de indata som krävdes var svårtillgängliga och den påvisade förbättringen liten.

De senaste 10 åren har tillgängligheten till data ökat väsentligt. Det gäller både geografiska data som kan användas för att beskriva avrinningsområdesegenskaper och meteorologiska data. Det har utnyttjats i modelluppsättningar som exempelvis S-HYPE och E-HYPE som körs över stora områden med hög rumslig upplösning. Kravet att mer modellindata skall resultera i avsevärda förbättringar i modellresultatet är inte längre lika motiverat. Det räcker kanske att snösmältningen beskrivs bättre vid några få tillfällen då t.ex. hög luftfuktighet leder till hög smälthastighet – något som inte hanteras i den nu använda graddagmetoden.

I det här projektet har PTHBV-databasen räknats om utgående från de tidigare forskningsresultaten. Målet har varit att bättre beskriva vinternederbörden under år med ovanlig nederbördsfördelning. Den fulla upplösningen i PTHBV har utnyttjats i snömodellen. Varje gridruta har delats in ytterligare i zoner/klasser som definieras av höjd över havet, markanvändning och lutning. För varje klass definieras också en vindutsatthet. Den geografiska informationen har utnyttjats för att fördela om nederbörd utifrån vindriktning. Vid västlig vind antas t.ex. mer snö ackumuleras i lä på ostsluttningar. Den geografiska informationen har även använts i energibalansmetoden för snösmältning då solstrålning på sydsluttningar ger högre avsmältning än på norrs sluttningar. I energibalansmetoden används även temperatur, vindhastighet, luftfuktighet och molnighet för att beräkna snösmältningen.

Snömodellen har tillämpats på fyra avrinningsområden i den svenska fjällkedjan för åren 2004-2014. Testerna visar att det är fullt möjligt att köra den här typen av modell operationellt. Data finns tillgängliga i realtid och beräkningstiden är rimlig. Modellresultaten är likvärdiga med den operationella HBV-modellen, men tilläggsinformationen har inte lett till någon påvisbar förbättring. Vid en visuell och subjektiv bedömning ger energibalansmetoden ett mer korrekt snösmältningsförlopp i två av de fyra utvärderade områdena. Den rumsliga fördelning av snötäcket som erhålls i den högupplösta modellen har ännu inte verifierats mot observationer.

Summary

The aim of the project has been to improve the simulated snow pack in operational hydrological models.

The use of hydrological models for operational spring flood forecasts started in the 1970s. At the time it was important that the requirements on data and computer resources were reasonable. Most models were thus lumped or semi-distributed with daily precipitation and temperature as input.

Around 2000, alternate methods were evaluated for estimation of catchment precipitation and temperature in Sweden. The PTHBV database with daily values on a 4x4km² grid was created. However, all the methods that were tested during the development phase were not used in the operational database. The motive was the same as for the hydrological models, the necessary data were not easily accessible in real-time applications.

Over the last 10 years, access to data has increased considerably. Geographical databases contain information to describe catchment characteristics, and gridded meteorological databases are available for a large number of variables. This has been used in, e.g., the E-HYPE and S-HYPE hydrological models. They are run for the whole of Europe/Sweden with a high spatial resolution. It is no longer necessary to prove that added model input results in a considerable and general improvement of the model output. It may be enough that single, unusual events are described more accurately.

Within the project, the PTHBV database has been recalculated based on earlier research. The purpose has been to better describe winter precipitation in years with an unusual precipitation distribution. The full PTHBV resolution has been used in a snow model. Each grid has been further divided into zone/classes defined by elevation, land use and aspect. For each zone the wind exposure in eight different directions has been computed. The geographical information has been used to redistribute snow depending on wind direction, and for energy balance calculations of snow melt. In addition to precipitation and temperature, data on wind, humidity, cloudiness and radiation has been included.

The snow model has been applied to four catchments in the Swedish mountains for 2004-2014. The evaluation shows that this type of model can be used operationally. Data are available in real-time and the simulation time is acceptable. The model results are equivalent to those of the HBV model used for operational spring flood forecasts in Sweden. However, the added spatial resolution and meteorological data has not led to a clear improvement in model performance. A subjective, visual inspection indicates that the energy balance method more accurately simulates the snow melt in two of the four evaluated catchments. The spatial snow distribution of the high resolution model has yet to be validated against observations.

Innehåll

1	Inledning	7
2	Hydrologisk modelluppsättning	8
3	Modellindata	10
3.1	Nederbörd	10
3.2	Övriga meteorologiska indata	10
3.3	Geografiska data	11
4	Modellbeskrivning	12
4.1	Snöomfördelning	12
4.2	Energibalans för snösmältning	13
4.2.1	Energibalanssekvationer	13
4.2.2	Ekvationer och datakällor för enskilda termer i energibalansen	14
4.2.3	Ansatta parametervärden	15
5	Resultat	16
5.1	Förutsättningar	16
5.2	Vinternederbörd	17
5.3	Modellresultat HBV-HOPE	19
5.4	Kriterier	22
6	Diskussion och slutsatser	26
7	Referenser	27

1 Inledning

En bra skattning av snömagasinet är en viktig grund i prognosen för vårfloden. I den här rapporten redovisas försök att förbättra modellering av snömagasin och snösmältning utifrån tre olika aspekter.

1. Mängden nederbörd under vintern.
2. Snöns fördelning i rummet.
3. Snösmältningens fördelning i tiden.

Rätt snönederbördsmängd är det viktigaste för modellering av snömagasinets totala volym och därmed vårflodens storlek. Snöns fördelning i rummet påverkar när snösmältningen sker. På hög höjd och på nordsluttningar smälter snön senare. Att snön hamnar på rätt plats i rummet har också betydelse vid jämförelse mot lokala snöobservationer.

Nederbörd för avrinningsområden skattas genom interpolation av observationer vid meteorologiska stationer. I fjällområdena är nederbördsgradienterna stora och stationsnätet glest vilket ökar osäkerheten i interpolationen. För att förbättra skattningen används aktuell information om storskaliga vindförhållanden. Kraftiga västvindar ger exempelvis andra nederbördsgradients än svaga sydostvindar.

Omfördelning av snön antas ske i anslutning till nederbördstillfällen. I modellförsöken flyttas snön från vindutsatta lägen till läsidor beroende på aktuella vindriktningar vid marken.

Snösmältningen modelleras med en energibalansberäkning, där ingående variabler är temperatur, strålning, luftfuktighet och molnighet. Markens lutning och lutningsriktning påverkar tillgången på strålningsenergi.

Den modellering som gjorts i projektet bygger på tidigare studier, se t.ex. Johansson och Chen (2003, 2005), Gustafsson m.fl. (2001, 2009). Jämförelser mellan olika modellalternativ presenteras för fyra avrinningsområden i den svenska fjällkedjan.

2 Hydrologisk modelluppsättning

Den hydrologiska modell som använts för simuleringar i Ransaren och Kultsjön är en kombination av HBV-modellen (Lindström m.fl., 1997) och HOPE-modellen (Rodhe m.fl., 2008).

HBV-modellen är en begreppsmässig avrinningsmodell där ett avrinningsområde traditionellt delats in i zoner utifrån höjd och markanvändning (skog, öppen mark, glaciär, sjö inne i avrinningsområdet och utloppssjö) och snöklass (en statistisk fördelning från stor till liten snöackumulation).

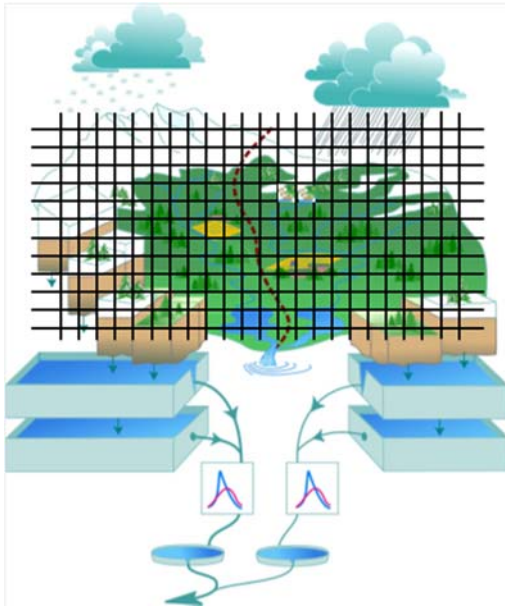
Även HOPE är en begreppsmässig modell, men den geografiska indelningen är inte i avrinningsområden utan i gridrutor om 4x4km². Tidigare har modellen främst använts för enklare snömodellering samt för modellering av grundvattenbildning. I projektet har snömodellen utvecklats inom HOPE-strukturen. Varje gridruta har delats in i klasser/zoner där indelningen bestäms av:

- Höjd. Höjdintervallen är 50 eller 100 m beroende på höjdskillnaderna inom gridrutan. De är valda så att det blir max 10 höjdintervall inom gridrutan. För varje höjdintervall anges medelhöjden i den aktuella klassen/zonen på samma sätt som i HBV-modellen.
- Markanvändning. Alternativen är desamma som i HBV, dvs. skog, öppen mark, glaciär och vatten.
- Lutningsriktning som kan vara åt norr, ost, syd eller väst. Den aktuella lutningsriktningen bestäms för de individuella klasserna.

För varje klass/zon bestäms vindutsatthet i 8 olika vindriktningar (s.k. Winstrahl-faktorer, Winstrahl m.fl. 2002) och lutning (dvs hur brant klassen är).

Indata till den kompletta modellen är nederbörd, temperatur, luftfuktighet, molnighet, vind, globalstrålning och direktinstrålning. Alla variabler har interpolerats till HOPE-gridrutorna.

För att kunna utnyttja HBV-modellens gränssnitt och dess funktioner för beräkning av tillrinning har HOPE bakats in i HBV-strukturen (HBV-HOPE). En zon i HBV karaktäriseras därmed, i tillägg till höjd och markanvändning, av vilken gridruta den ligger i samt lutningsriktning. Vindutsatthet och lutning definieras för varje zon. Möjligheten till snöklasser med en statistisk snöfördelning har tagits bort. Med denna indelning blir det givetvis en ökning av antalet beräkningszoner. I tidigare modelluppsättningar för t.ex. Ransaren har det varit totalt drygt 70 zoner. Med den nya modellen blir det drygt 1800. Zonindelningen gäller HBV-modellens snö- och markrutiner. För responsfunktionerna är indelningen baserad på delavrinningsområden.



Figur 1. Schematisk beskrivning av HBV-HOPE. Indelningen i zoner för snö- och markvattenberäkningar utgår i HBV från delavrinningsområden. I HBV-HOPE delas delavrinningsområden in i gridrutor med sina egna indata, och varje gridruta delas upp i zoner med specifika egenskaper.

3 Modellindata

3.1 NEDERBÖRD

Nederbörden är interpolerad till HOPEs grid från stationsobservationer. Interpolationsmetoden är optimal interpolation (Dailey, 1991) som bl.a. innebär att interpolationen sker på avvikelsen från ett bakgrundsält. Bakgrundsältet beskriver nederbördsgradienterna i ett område och kan sägas ersätta ett traditionellt höjdberoende där nederbörden antas öka med t.ex. 10% per 100 meter. För att beräkna bakgrundsältet tog Johansson och Chen (2003) fram ett statistiskt samband. Viktiga parametrar i det sambandet är vindhastighet i kombination med lutning i vindriktningen, avstånd till bergsformationer som ger lä i vindriktningen samt avstånd till kusten.

Utgående från Johansson och Chen (2003) togs PTHBV-databasen fram vid SMHI i början av 2000-talet. PTHBV står för nederbörd (P) och temperatur (T) till HBV-modellen, och databasen innehåller interpolerad nederbörd och temperatur för Sveriges avrinningsområden på ett rutnät om 4x4 km² (dvs. samma grid som HOPE är byggd på). Sedan ca 10 år tillbaka används PTHBV som indata till hydrologiska modeller vid SMHI. I bakgrundsälten för den operationella PTHBV-databasen används dock inte aktuell vindinformation utan bakgrundsälten är enbart säsongsberoende. I det här projektet har dagliga bakgrundsält beräknats för varje nederbördstillfälle. Syftet är att bättre beskriva nederbördsfördelningen när vindförhållandena avviker från de normala för årstiden.

Vinddata hämtas från 850hPa-nivån i ERA-Interim databasen. På den höjden är vinden endast i liten utsträckning påverkad av friktion mot markytan och den speglar därför i vilken riktning nederbördsområden rör sig. Eftersom vinden kan variera kraftigt under ett dygn med lågtryckspassage används data med en tidsupplösning på 6 timmar för att få representativa vindförhållanden. Nederbördsuppgifter från ERA-interim används för att koppla nederbörden till rätt 6-timmarsintervall.

ERA-interim är en s.k. återanalys med ECMWFs (European Centre for Medium Range Weather Forecast) numeriska vädermodell kompletterad med meteorologiska observationer. Den uppdateras i nära realtid, men i en operationell situation kan den runt ett prognostillfälle ersättas av en kort väderprognos.

När de statistiska sambanden för bakgrundsälten ursprungligen togs fram så användes geostrofisk vind från en äldre databas som inte längre uppdateras. En jämförelse gjordes mot ERA-interimdata för år 2000, och vinddata bedömdes som likvärdiga, men det finns en risk för små systematiska skillnader mellan den operationella PTHBV-databasen och de data som interpoleras fram i det här projektet.

3.2 ÖVRIGA METEOROLOGISKA INDATA

Tidssteget i den hydrologiska modellen är dygn, men energibalansberäkningarna för snösmältningsrutinen görs med timsteg.

Mesan (MESoskalig ANalys) är ett system för analys/interpolation av meteorologiska variabler som funnits på SMHI sedan 1999 (Omstedt m. fl., 1997).

Interpolationsmetoden är densamma som för PTHBV, som kan sägas vara en anpassning av Mesan för hydrologiska tillämpningar. I Mesan hanteras inte bara

nederbörd och temperatur utan ett stort antal meteorologiska variabler. Observationer hämtas från stationer, väderradar och vädersatelliter. Interpolationen görs för olika tidssteg och bakgrundsältet kommer från en väderprognosmodell. Ju kortare tidssteg interpolationen görs för, desto färre observationer finns tillgängliga och desto större inflytande kommer från bakgrundsältet. Den rumsliga upplösningen är ca 11x11 km². I samband med att SMHI gått över till en ny meteorologisk modell med hög rumslig upplösning har Mesan anpassats och finns nu i en version med 2.5x2.5 km² gridrutor. Det gäller än så länge dock inte historiska data. Mesan uppdateras i realtid.

För strålning har SMHI i samarbete med Strålsäkerhetsmyndigheten och Naturvårdsverket tagit fram en separat databas, STRÅNG (Landelius m.fl., 2001). Den har samma rumsliga upplösning som Mesan och bygger på samma metodik. Databasen innehåller timvärden.

Alla meteorologiska variabler utöver dygnsvärden på nederbörd och temperatur hämtas från Mesan och STRÅNG. Värdena för varje HOPE/PTHBV-gridruta har bestämts som ett viktat medelvärde av näraliggande Mesan-gridrutor.

Variabler från Mesan:

- Från öst/väst och nord/syd-komponenterna av 10-metersvinden bestäms en vindriktning för att beräkna omfördelning av snönederbörd. Görs på dygnsbasis.
- Timvärden på temperatur används för energibalansberäkning av snösmältning. Värdena nivåjusteras så att dygnsmedelvärdet blir detsamma som för PTHBV.
- Timvärden på 10-metersvind, luftfuktighet och molnighet används för energibalansberäkning av snösmältning.

Variabler från STRÅNG:

1. Timvärden på globalstrålning och direktinstrålning används för energibalansberäkning av snösmältning.

3.3 GEOGRAFISKA DATA

Klassningen av alla gridrutor med avseende på markanvändning (skog, öppen mark, glaciär, vatten) baseras på data från CORINE-databasen som sammanställs av EEA (European Environmental Agency, <http://land.copernicus.eu/pan-european/corine-land-cover>) och har en rumslig upplösning om ca 500x500 m. För tillämpningen i det här projektet har sjöar/magasin i utloppet av delavrinningsområden hanterats manuellt för att få rätt area och hamna i rätt gridruta.

Klassningen som kräver höjdinformation (höjd över havet, lutning och lutningsrutning) använder sig av EU-DEM, en europeisk databas som även den kan laddas ner från EEA (<http://www.eea.europa.eu/data-and-maps/data/eu-dem>). Den rumsliga upplösningen är ca 30x30 m.

4 Modellbeskrivning

4.1 SNÖOMFÖRDELNING

Omfördelningen av snön utgår från en beskrivning av varje zons vindutsatthet i 8 olika vindriktningar baserad på Winstrahl m.fl. (2002). Vindutsattheten beskrivs som lutningen i vindriktningen på en viss längdskala. Är lutningen positiv är zonen i lä så att snö ackumuleras, medan snön blåser bort om lutningen är negativ.

Omfördelningsfaktorn beräknas enligt:

$$sfred = 1 + wfscale * wfs$$

$$snowacc = sfred * snowfall$$

$sfred$ = omfördelningsfaktor

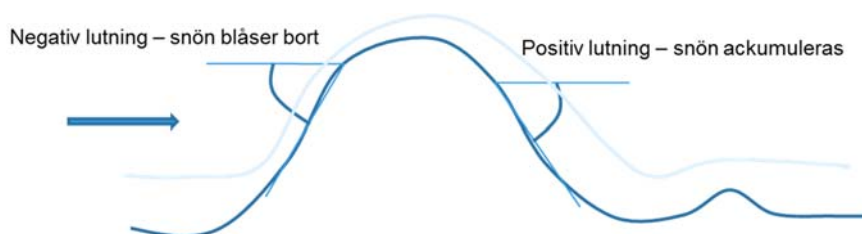
wfs = lutning i vindriktning (värdena ligger normalt i intervallet -15 till +15)

$wfscale$ = modellparameter, kalibreras

$snowacc$ = snöackumulation (dvs snö på marken i den aktuella zonen)

$snowfall$ = snönederbörd

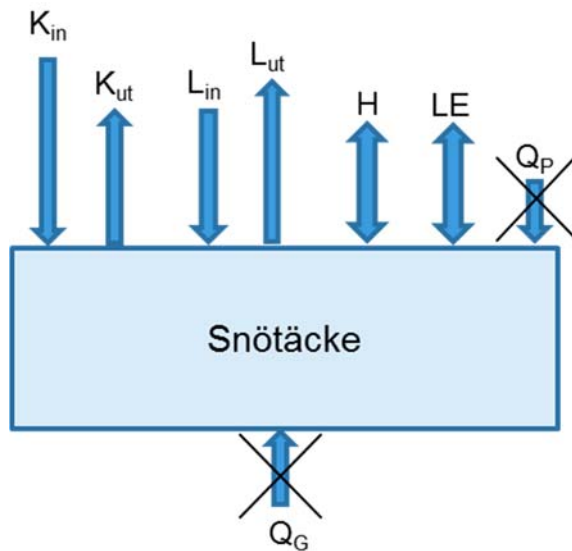
Omfördelning beräknas enbart för öppen mark. Ingen omfördelning antas ske i skog. En modellparameter gör det också möjligt att begränsa omfördelningen så att inte enskilda zoner helt saknar snö (modellparameter $wfdistmax$). Efter att omfördelningsfaktorn beräknats för varje zon görs dessutom en normalisering så att inte den totala nederbördsmängden för avrinningsområdet påverkas.



Figur 2. Illustration av vindberoende snöomfördelning.

4.2 ENERGIBALANS FÖR SNÖSMÄLTNING

4.2.1 Energibalanssekvationer



Figur 3. Schematisk beskrivning av energibalansen för ett snötäcke.

Ekvationen för energibalansen för ett snötäcke är i enlighet med figur xx:

$$\Delta U = K_{in} - K_{ut} + L_{in} - L_{ut} + H + LE + Q_p + Q_G$$

ΔU = förändring i snöns energi-innehåll (W/m^2)

K_{in} / K_{ut} = inkommande/utgående kortvågsstrålning (W/m^2)

$$K_{in} - K_{ut} = K_{in} * (1 - \alpha)$$

α = snöns albedo

L_{in} / L_{ut} = inkommande/utgående långvågsstrålning (W/m^2)

H = sensibelt energiflöde (temperaturskillnad snö/luft) (W/m^2)

LE = latent energiflöde (avdunstning/kondensation) (W/m^2)

Q_p = energi i regn (W/m^2)

Q_G = energiflöde från marken (W/m^2)

Ekvationen för snötäckets energi-innehåll beräknas enligt

$$U = SWE * (C_{p,ice} * T_{snow} - L_f)$$

U = snöns energi-innehåll (J/m^2)

SWE = snöns vattenekvivalent, inkluderar inte fritt vatten i snön ($\text{mm} = \text{kg/m}^2$)

$C_{p,ice}$ = den specifika värmekapaciteten för is ($2100 \text{ J/kg/}^\circ\text{C}$)

T_{snow} = snöns temperatur ($^\circ\text{C}$)

L_f = smältvärmets som krävs för att smälta 1 kg is/snö ($334 * 10^3 \text{ J/kg}$)

Nollnivån definieras som tillståndet hos ofruset vatten vid 0°C , vilket innebär att snöns energiinnehåll alltid är negativt.

Positiv energitillförsel (ΔU) används i första hand för att värma upp snön till 0°C och därefter till att smälta snön. Negativ energitillförsel används först för återfrysning av eventuellt fritt vatten i snön, i andra hand för att kyla ner snömagasinet.

Snöns temperatur används för att beräkna olika termer i energibalansen och snöns energiinnehåll. Det innebär att ekvationerna ovan är icke-linjära eftersom temperaturen förändras under ett beräkningssteg. Eftersom snösmältningsberäkningen görs på timesteps har det antagits att det är en acceptabel förenkling att sätta temperaturen konstant under ett beräkningssteg (=temperaturen i början på tidssteget).

En ytterligare förenkling är att försumma energiinnehållet i regn på snön. Om regn har en temperatur som är större än 0°C så frigörs energi när det kyls ner, men det energitillskottet är litet i förhållande till övriga termer. Energitillskottet från marken under snön försummas också.

4.2.2 Ekvationer och datakällor för enskilda termer i energibalansen

Kortvågsstrålning

Kortvågsstrålningen är den strålning som kommer från solen (är noll nattetid). Den delas upp i en direkt och en diffus del. Den direkta delen är riktning beroende, och är den som gör att snön smälter fortare på en sydsluttning än en nordsluttning. Från STRÅNG-databasen hämtas direktinstrålning som mäts vinkelrätt mot solen och globalstrålning som är summan av direkt och diffus strålning omräknat till en horisontell yta. I modellen görs sedan omräkningar av direkt och diffus strålning utifrån en zons lutning och lutningsriktning.

Snöns albedo styr hur stor andel av kortvågsstrålningen som reflekteras tillbaka till atmosfären. Det beräknas utifrån snöns ålder:

$$\alpha = \alpha_{min} + (\alpha_{max} - \alpha_{min}) * \exp(-k * sp_{age})$$

α_{max} = albedo för nysnö (modellparameter)

α_{min} = albedo för gammal snö (modellparameter)

k = modellparameter

sp_{age} = snöns ålder (modellberäknad)

I skog antas kortvågsstrålningen minska som en funktion av hur tät skogen är:

$$K_{in,skog} = K_{in} * \exp(-k_{lai} * LAI)$$

LAI = leaf area index (bladyteindex, modellparameter)

k_{lai} = modellparameter

Långvågsstrålning

Inkommande långvågsstrålning beräknas ur lufttemperatur, molnighet och ångtryck (Konzelmann, 1991):

$$L_{in} = [(0.23 + 0.483 * (e_{air} / T_{air,K})^{1/8}) * (1 - n^3) + 0.963 * n^3] * \sigma * T_{air,K}^4$$

e_{aie} = luftens ångtryck, beräknas ur relativ luftfuktighet och lufttemperatur (Pa)

$T_{air,K}$ = lufttemperatur (K)

n = molnighet

σ = Stefan-Boltzmanns konstant ($= 5.67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2/\text{K}^4$)

Utgående långvågsstrålning beräknas utifrån snöns temperatur:

$$L_{ut} = \sigma \cdot \varepsilon \cdot T_{air,K}^4$$

ε = snötäckets emissivitet (antas = 1)

Skillnaden mellan in- och utgående långvågsstrålning är oftast liten och ofta negativ. Långvågsstrålningen för skog antas vara densamma som för öppen mark.

Sensibelt energiflöde

Det sensibla värmeflödet bestäms av skillnaden mellan snöytans och luftens temperatur och den turbulenta utbyteskoefficienten:

$$H = CHt \cdot (T_{air} - T_{snow})$$

CHt = turbulenta utbyteskoefficienten för sensibelt värmeflöde ($\text{W/m}^2/^\circ\text{C}$)

Den turbulenta utbyteskoefficienten beskriver effektiviteten i energiutbytet mellan snö och atmosfär och beräknas utifrån vindhastighet samt snöytans och luftens temperatur. Den ökar med ökande vindhastighet. En parameter i ekvationen är $z0_{snow}$, snöns råhet. Den används som en modellparameter som kan kalibreras. För vidare detaljer i beräkningen av CHt , se t.ex. Gustafsson et al. (2001).

Latent energiflöde

Det latent energiflödet beräknas på liknande sätt som det sensibla

$$LE = CEt \cdot (e_{air} - e_{s,snow})$$

CEt = turbulenta utbyteskoefficienten för latent värmeflöde ($\text{W/m}^2/\text{Pa}$)

$e_{s,snow}$ = mättnadsångtrycket vid snöytan, beräknas ur snöns temperatur (Pa)

Den turbulenta utbyteskoefficienten för latent värmeflöde beräknas på liknande sätt som den för sensibelt värmeflöde. För att kunna justera skillnader i effektivitet mellan sensibelt och latent värmeflöde infördes en extra faktor i modellen ($z0_{latent}$).

I skog antas både det sensibla och latent värmeutbytet vara mindre effektivt än för öppen mark och i modellen finns därför en skogsfaktor som minskar dessa (CHt_{fo})

4.2.3 Ansatta parametervärden

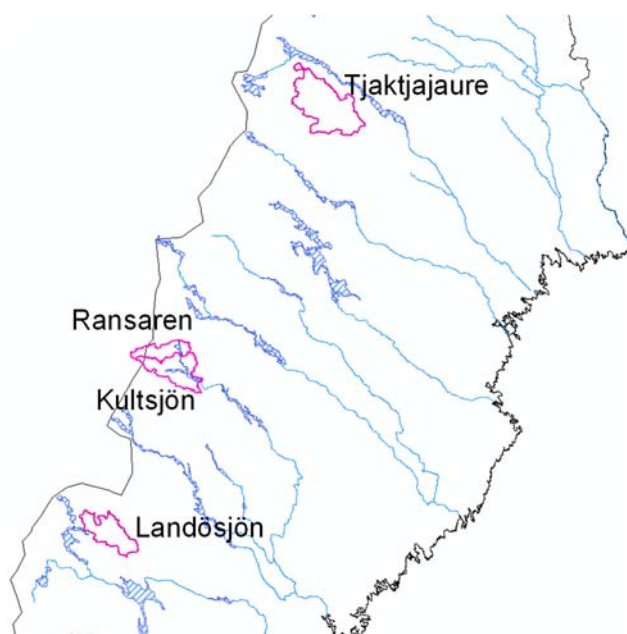
I ekvationerna ovan finns ett antal koefficienter som är fasta och inte kan ändras vid kalibreringen. De parametrar som gjorts kalibrerbara är: α_{max} , α_{min} (för skog och öppen mark separat), k (albedoavtagande med ökande snöålder), LAI , k_{LAI} (för att begränsa kortvågsstrålning i skog), $z0_{snow}$ (snöns råhet, påverkar det turbulenta utbytet), $z0_{latent}$ (faktor för att öka/minska det latent energiflödet) och CHt_{fo} (faktor för att begränsa turbulent utbyte i skog).

Vid de modelltester som hittills gjorts har albedot antagits vara detsamma för skog och öppen mark. α_{max} , LAI , och CHt_{fo} har satts erfarenhetsmässigt och inte kalibrerats. De parametrar som aktivt justerats vid kalibreringen är alltså α_{min} för öppen mark, k , k_{LAI} , $z0_{snow}$ och $z0_{latent}$.

5 Resultat

5.1 FÖRUTSÄTTNINGAR

Jämförelser har gjorts för fyra områden som representerar olika delar av fjällkedjan: Tjaktjajaure i Lilla Luleälven, Ransaren och Kultsjön i övre delen av Ångermanälven samt Landösjön i Indalsälven (Figur 4). I Ransaren är andelen skog liten (35%), medan större delen av Landösjöns avrinningsområde är täckt av skog (knappt 70%).



Figur 4. Avrinningsområden för modelljämförelser

Data för energibalansberäkningarna är omfattande och i det här projektet har de tagits fram för perioden 20090901-20140831. Det begränsade utvärderingsperioden. Modellerna har automatkalibrerats för fyra år (20090901-20130831). För energibalansmetoden blev 20130901-20140831 den enda kvarvarande oberoende perioden, medan övriga modellvarianter även körts fram för 20040901-20090831.

De snösmältningsparametrar som kalibrerats för energibalansmetoden beskrivs i avsnitt 4.2.3. För övriga modeller kalibrerades graddagfaktorn och tröskeltemperaturen för snösmältning. Skalfaktorn för snöomfördelning sattes i den slutliga jämförelsen konstant till 0.05. Anledningen var att automatkalibreringen tenderade att dra upp skalfaktorn så högt att det inte blev någon skillnad mellan branta och flacka sluttningar.

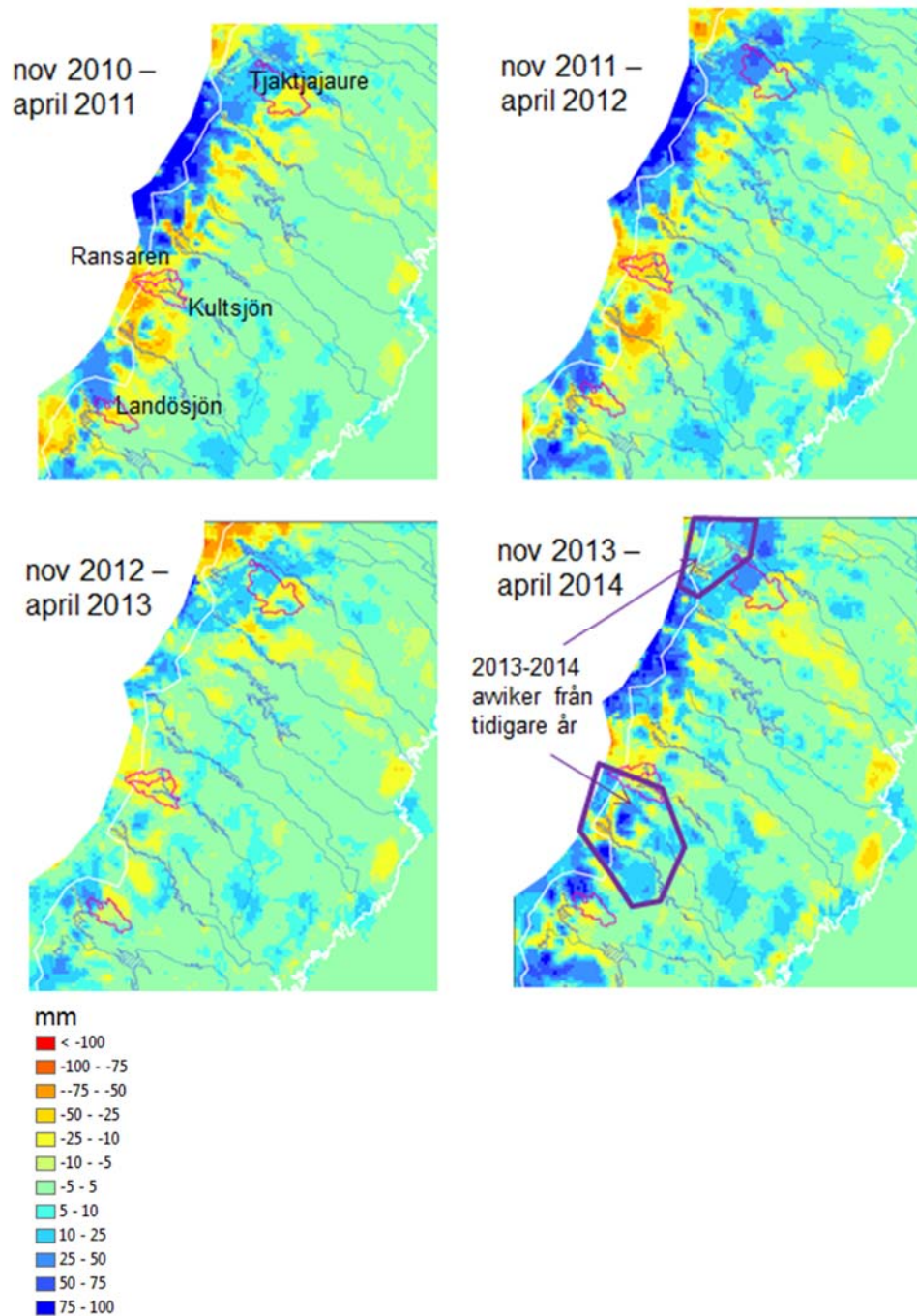
Erfarenheterna har visat att det är svårt att utifrån objektiva kriterier påvisa en förbättring av modellprestanda jämfört med den ursprungliga HBV-modellen, som t.ex. ger värden på Nash&Sutcliffe's R^2 -kriterium på strax under 0.9 för Ransaren och Kultsjön. Så även om dessa kriterier beräknats (avsnitt 5.4) så fokuserar redovisningen på mer kvalitativa skillnader i tillrinning, snömagasin och snöfördelning.

De olika modellvarianter som jämförts är:

1. Den ursprungliga HBV-modellen med indata från den operationella PTHBV-databasen
2. HBV-HOPE med dess rumsliga struktur men med snöekvationerna från HBV. Indata från den operationella PTHBV-databasen.
3. HBV-HOPE med snöekvationerna från HBV. Indata från omräknade PTHBV med vinddata från ERA Interim (PTHBV Interim).
4. HBV-HOPE med vindberoende snöomfördelning och snösmältningsrutiner från HBV. Indata från PTHBV Interim och Mesan (vind).
5. HBV-HOPE med vindberoende snöomfördelning och energibalans för snösmältning. Indata från PTHBV Interim, Mesan och STRÅNG.

5.2 VINTERNEDERBÖRD

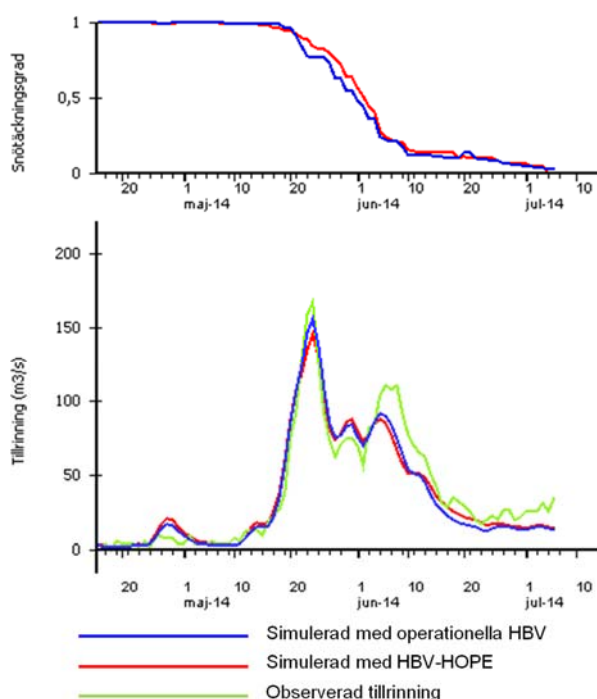
För samtliga vintrar 2010/2011-2013/2014 så skiljer sig nederbörden interpolerad med PTHBV Interim från den operationella databasen, även om skillnaderna oftast är små i förhållande till totalnederbörden (Figur 5). För 2010/2011-2012/2013 är det ungefär samma områden som får mindre respektive högre nederbörd. Skillnaderna i millimeter är olika stora, men det kan kopplas till att exempelvis vintern 2011/2012 var mer nederbördsrik än 2012/2013. 2013/2014, däremot, är det några områden som avviker från mönstret. T.ex. ger PTHBV Interim då högre nederbörd i ett område från Ransaren/Kultsjön och söderut, där den tidigare år ger lägre nederbörd. Detsamma gäller de västligaste delarna av Luleälven.



Figur 5. Skillnad mellan nederbörd interpolerad med PTHBV Interim och den operationella PTHBV-databasen vintrarna 2010/2011-2013/2014.

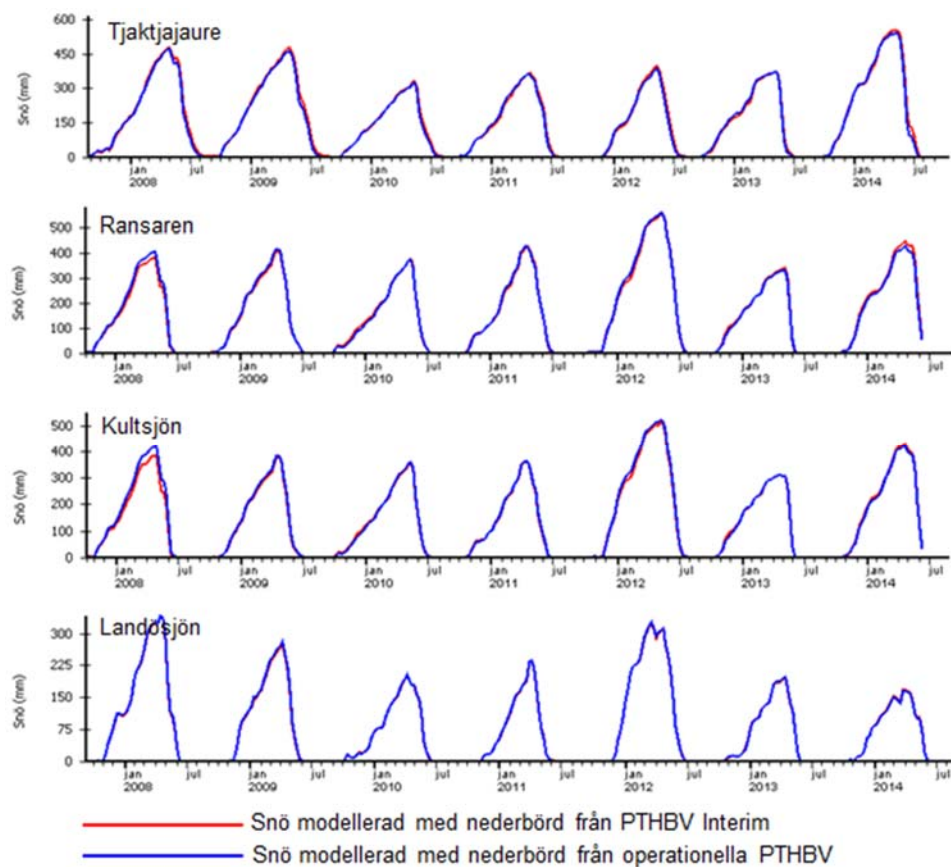
5.3 MODELLRESULTAT HBV-HOPE

- Den högre upplösningen i HBV-HOPE ledde inte till några nämnvärda skillnader i tillrinning för de områden där modellen kalibrerats. Med samma indata och samma snöekvationer som i den ursprungliga HBV-modellen blev resultaten mycket lika (Tabell 1, Figur 6). En viss skillnad syns i snötäckningsgrad (Figur 6), vilket skulle kunna ha betydelse vid jämförelser mellan modellerad snö och satellitdata. Att en högupplöst modell i sig inte påverkar simulerad tillrinning var också en slutsats som drogs av Lindström m.fl., 1996.



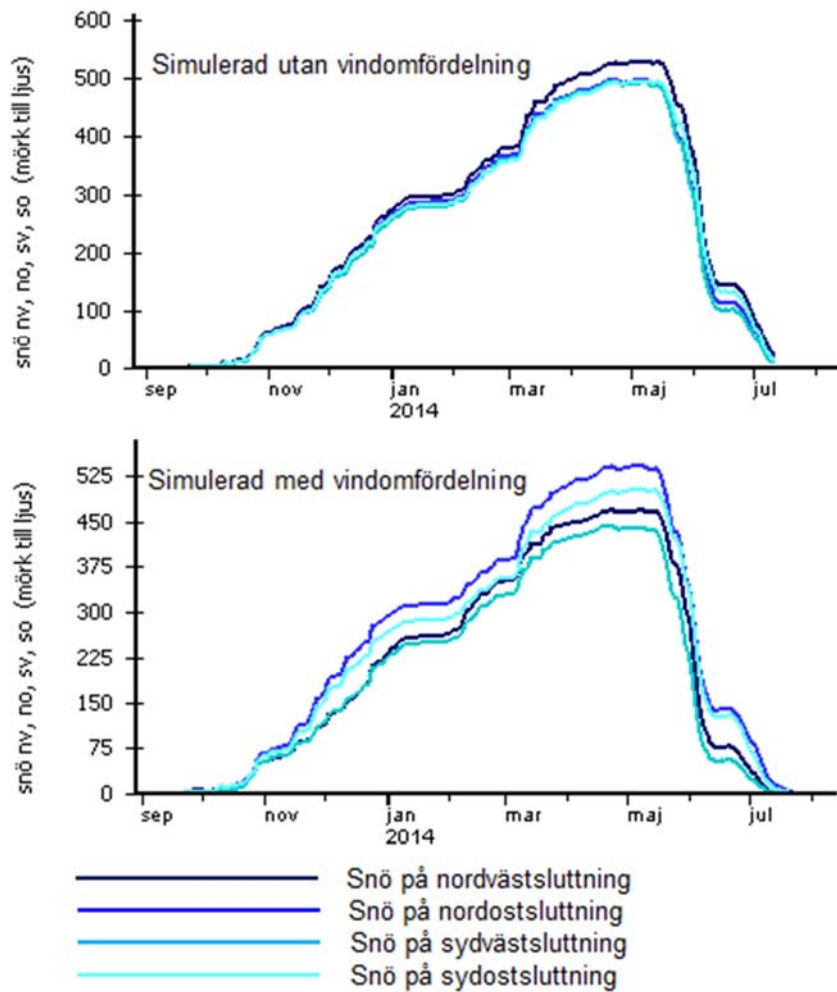
Figur 6. Jämförelse av modellsimulering med operationella HBV-modellen och HBV-HOPE. Exempel från vårfloden 2014 i Ransaren. HBV-HOPE med ekvationer för snöackumulation och snösmältning från operationella HBV (graddagmetoden). Indata från operationella PTHBV-databasen

- En förhoppning på PTHBV Interim var att den skulle ge en bättre skattning av den totala nederbörden och därmed minskade fel i simulerad vårfloidsvolym. Som framgår av Figur 5 är de relativa skillnaderna i interpolerad nederbörd små, och ännu mindre utjämnade över ett större avrinningsområde. För de jämförda områdena blev skillnaderna i simulerat maximalt snömagasin nästan försumbara, och det är endast för enstaka år som det går att skilja de plottade kurvorna (Figur 7). Detta är i linje med tidigare studier (Johansson och Chen, 2005). Det blev en liten förbättring i volymfelet för Ransaren 2014 (Tabell 1).

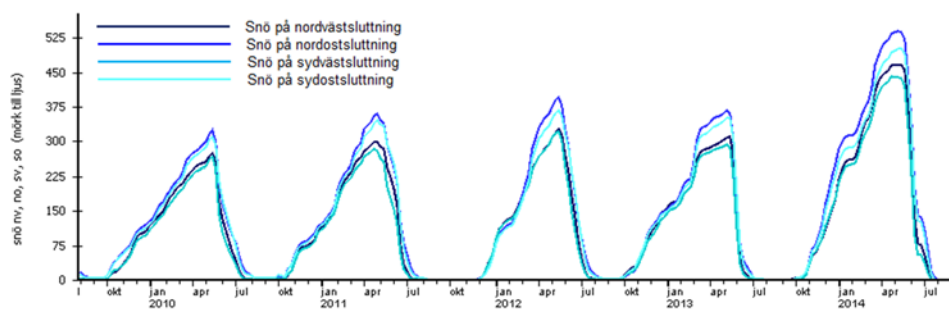


Figur 7. Jämförelse av modellerat snömagasin för avrinningsområden, 2008-2014. Indata från PTHBV Interim respektive den operationella PHBV-databasen. HBV-HOPE med snöekvationer från operationella HBV-modellen (graddagmetoden).

- Modellering med snöomfördelning resulterade i att det simulerade snömagasinet flyttades från sydväst- och nordvästsluttningar till nordost- och sydostsluttningar (Figur 8). Detta stämmer väl med resultat från Källgården (2001). Han analyserade högupplösta satellitdata från våren 1992 i Tjaktjajaure och fann att snötäckningsgraden var högre på sydostsluttningar än på nordvästsluttningar. Simuleringar över en längre period tyder på att olika år ger olika snöomfördelning beroende på vindförhållanden (Figur 9). Effekten på simulerad tillrinning blev dock liten.



Figur 8. Jämförelse av modellsimulering med och utan snöomfördelning för vårfloden 2014 i Tjakjajaure. Omfördelning från väst till ostsluttningar. HBV-HOPE med ekvationer för snösmältning från operationella HBV (graddagmetoden). Indata från PTHBV Interim och Mesan (vind).



Figur 9. Simulerat snömagasin med snöomfördelning 2010-2014 i Tjakjajaure. HBV-HOPE med ekvationer för snösmältning från operationella HBV (graddagmetoden). Indata från PTHBV Interim och Mesan (vind).

- Det som gav störst förändring gentemot den operationella HBV-modellen var införande av energibalansmetoden för snösmältning. Resultaten blev inte tydligt bättre eller sämre, men annorlunda. Det var främst snösmältningsförloppet som påverkades och inte vårflodsvolymer. För Ransaren och Kultsjön gav en visuell jämförelse intryck av att vårflodens start och tidpunkten för flödestoppar sammanföll bättre med observerad tillrinning för energibalansmetoden (Figur 10). Vårfloden 2010 simulerades betydligt bättre.

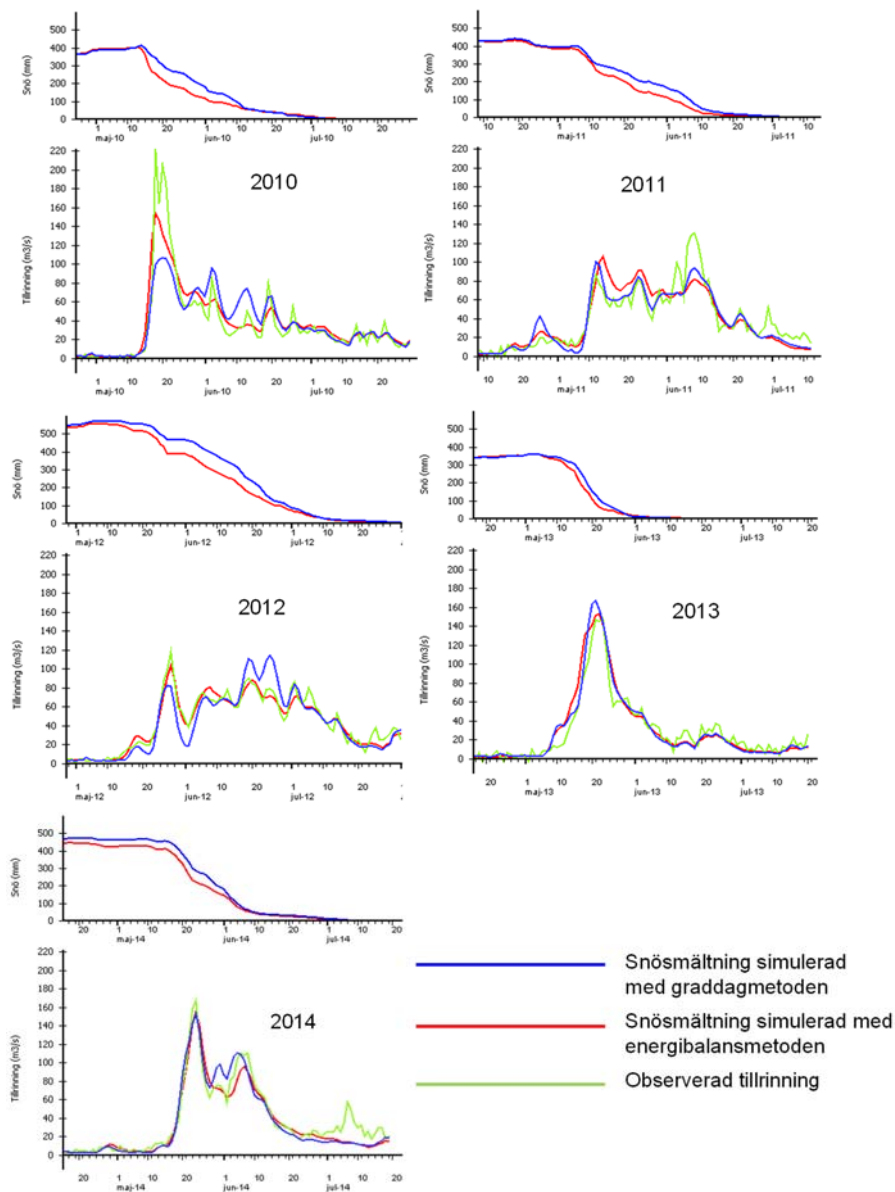
I Tjaktjajaure gav energibalansmetoden ingen förbättring av vårfloden 2010, men i övrigt fanns en tendens till bättre beskrivning av tidsförloppet. R^2 -värdet för 2014 blev betydligt sämre (Tabell 1), men vid en jämförelse av graferna är det inte självklart att energibalansen beskriver vårfloden sämre (Figur 11). I båda fallen är modellfelet betydande.

I Landösjön beskrevs ett par snösmältningstillfällen under vårvintern bättre med energibalansmetoden, och det resulterade bl.a. i ett mindre volymfel över vårfloden 2014 (Tabell 1).

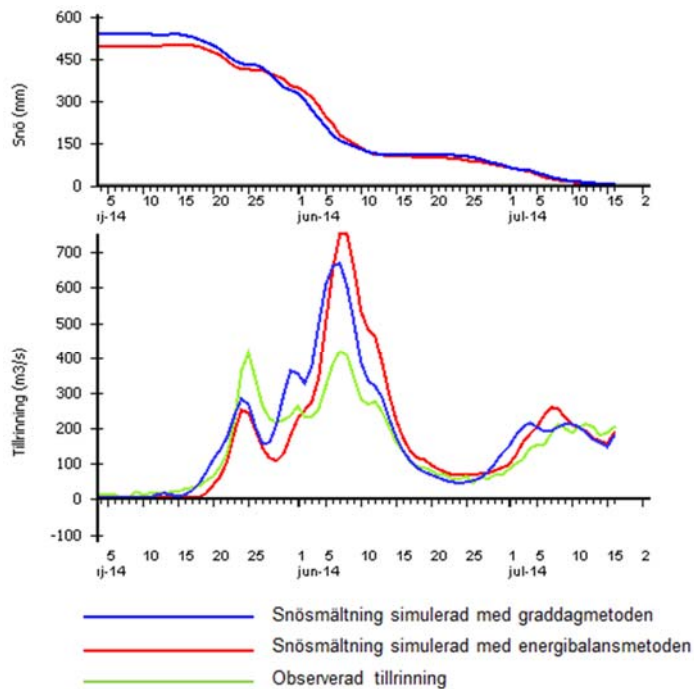
Med energibalansmetoden smälte snön långsammare i skog och snabbare på öppen mark jämfört med graddagmetoden (Figur 12). Rimligheten i det har inte verifierats.

5.4 KRITERIER

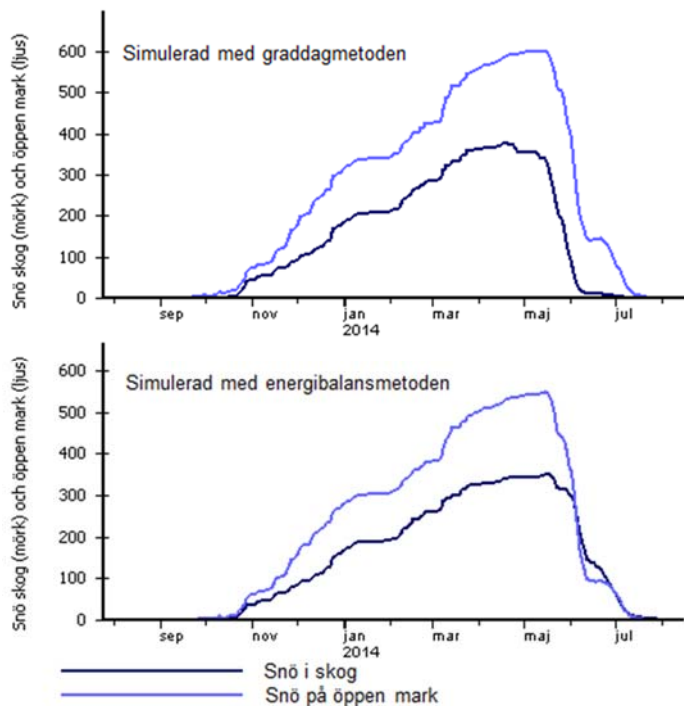
De kriterier som traditionellt använts för att utvärdera HBV-modellen redovisas i Tabell 1. Skillnaderna i kriterievärden är generellt små och kan delvis kopplas till den korta perioden för kalibrering och utvärdering. Ingen modellvariant är tydligt bättre eller sämre än de övriga. I tabellen har några värden markerats med fetstil eller kursivt. Det är värden där R^2 eller volymfelet över vårfloden avviker tydligt från medelvärdet för området. Gränsen för R^2 är 0.03 och för volymfelet 4 procentenheter. Det är bara för den korta utvärderingsperioden 2013-2014 som så stora skillnader förekommer. Energibalansmetoden avviker mest från övriga modellervarianter, med både de sämsta och bästa kriterievärdena. Den operationella HBV-modellen har det största volymfelet över vårfloden i Tjaktjajaure och Landösjön.



Figur 10. Jämförelse av simulerat snömagasin och tillrinning med graddagmetoden och energibalansmetoden i Ransaren 2010-2014. Indata från PTHBV Interim, Mesan (vind, luftfuktighet, molnighet) och STRÄNG (strålning).



Figur 11. Jämförelse av simulerat snömagasin och tillrinning med graddagmetoden och energibalansmetoden i Tjaktjajaure 2014.



Figur 12. Simulering av snömagasinet uppdelat på skog och öppen mark för Tjaktjajaures avrinningsområde 2014.

Tabell 1. Kriterier för simulerad tillrinning. Kalibreringsperiod är 2009-2013.

R² = Effektivitetskriterium enligt Nash&Sutcliffe (1970).

Volymfel totalt = relativa volymfelet för den simulerad perioden

Volymfel över vårflod = medel av det absoluta felet för de fyra simulerad vårflöden (1/4-31/7)

HBV: Operationella HBV-modellen, operationella PTHBV

HBV-HOPE 1: Graddagmetoden för snösmältning, operationella PTHBV

HBV-HOPE 2: Graddagmetoden för snösmältning, PTHBV Interim

HBV-HOPE 3: Graddagmetoden för snösmältning, vindomfördelning, PTHBV-Interim

HBV-HOPE 4: Energibalans för snösmältning, vindomfördelning, PTHBV-Interim

Område	Modell	2004-2009			2009-2013			2013-2014		
		R ²	Volymfel totalt (%)	Volymfel över vårflod (%)	R ²	Volymfel totalt (%)	Volymfel över vårflod (%)	R ²	Volymfel totalt (%)	Volymfel över vårflod (%)
Tjaktjajaure	HBV	0.79	14	16	0.85	3.6	4.7	0.74	9	18
	HBV-HOPE 1	0.79	9.6	13	0.85	0.9	5.3	0.72	3.1	13
	HBV-HOPE 2	0.81	12	16	0.85	0.4	5.1	0.74	5.6	16
	HBV-HOPE 3	0.81	8.8	13	0.86	-2.7	5.6	0.75	1.1	13
	HBV-HOPE 4				0.86	-3.2	5.7	0.65	0	11
	Medel	0.80		14	0.85		5.3	0.72		14
Ransaren	HBV	0.74	-3.4	2.2	0.87	-3.9	3.1	0.89	-17	15
	HBV-HOPE 1	0.74	0.9	3.1	0.86	0.2	1.4	0.87	-13	14
	HBV-HOPE 2	0.70	-0.5	3.2	0.86	-1.2	2.1	0.89	-13	12
	HBV-HOPE 3	0.70	-0.4	3.5	0.86	-0.9	1.8	0.89	-13	12
	HBV-HOPE 4				0.88	0	2.5	0.89	-13	12
	Medel	0.72		3.0	0.87		2.2	0.89		13
Kultsjön	HBV	0.79	-2.2	1.9	0.87	-0.5	3.1	0.88	-11	12
	HBV-HOPE 1	0.76	-0.4	1.8	0.87	-0.2	3	0.88	-10	14
	HBV-HOPE 2	0.76	-1.7	3.4	0.86	0.6	2.9	0.88	-9.3	13
	HBV-HOPE 3	0.76	-2.1	3.7	0.87	0	3.2	0.89	-10	14
	HBV-HOPE 4				0.88	0	3.9	0.85	-9.3	17
	Medel	0.77		2.7	0.87		3.2	0.88		14
Landösjön	HBV	0.77	6.2	5.8	0.83	-1.6	8.7	0.70	0.4	17
	HBV-HOPE 1	0.75	5.2	5.1	0.83	-3.4	8.6	0.73	-0.3	14
	HBV-HOPE 2	0.75	4.7	4	0.83	-2.1	8.5	0.73	-0.5	14
	HBV-HOPE 3	0.75	6.2	3.8	0.83	0.5	8.1	0.73	0.3	12
	HBV-HOPE 4				0.81	2.2	7.3	0.76	5.5	6
	Medel	0.76		4.7	0.83		8.2	0.73		13

6 Diskussion och slutsatser

Tidigare har ett viktigt argument för HBV-modellens struktur varit att indata skall vara lättillgängliga, vilket i praktiken begränsat valet till temperatur och nederbörd. Försöken i det här projektet har visat att det för Sverige i dag finns databaser som gör det fullt möjligt att exempelvis använda energibalansmetoder i operationella avrinningsmodeller.

Modelltesterna har gjorts för några få avrinningsområden över en 10-årsperiod. Skillnaderna mellan de olika modellvarianterna är alltför små för att kunna säga att någon variant är bättre än de övriga. Det är svårt att prestera bättre avseende tillrinning än den operationella HBV-modellen. Långvarig användning av en viss modell i en region brukar leda till att den presterar bättre, eftersom användaren får erfarenhet av lämpliga parametervärden och kalibreringsrutiner. Så i någon mån är det positivt att exempelvis energibalansmodellen ger likvärdiga resultat.

- Användningen av daglig vindinformation i PTHBV-interpolationen gav inte den önskade förbättringen i skattningen av vårflodsvolymer. Möjligen borde valet av avrinningsområden för utvärdering gjorts utifrån analysen som presenteras i Figur 5, så att områden med stora skillnader inkluderats.
- Modellering av en vindberoende snöomfördelning gav en rimlig snöfördelning jämfört med satellitobservationer i Tjaktjajaure. Under utvecklingsfasen har även jämförelser gjorts mot direkta snöobservationer, men där har det inte gått att påvisa en större överensstämmelse efter snöomfördelning. Troligen spelar andra felkällor en större roll när punktoobservationer jämförs med modellerat snömagasin som representerar en yta. T.ex. är det svårt att få tillräcklig precision i nederbördsbestämningen för en viss punkt.
- Energibalansmetoden gav ingen tydlig förbättring i simulerad tillrinning, men resultaten för främst Ransaren och Kultsjön tyder på att det vore värt att göra ytterligare analyser. De indata som använts kommer från operationella databaser som bygger på en kombination av modeller och observationer. Det är sannolikt att kvalitén, precis som för PTHBV, varierar med observationstillgången. Det har inte inom projektet undersökts hur det kan påverka resultaten. Flera parametrar i energibalansmodellen har satts schablonmässigt, utan att någon systematisk känslighetsanalys hunnits med.
- Det återstår att utvärdera om de olika HBV-HOPE-varianternas snöomfördelning underlättar modelluppdatering och jämförelser med olika typer av snöobservationer.

7 Referenser

Dailey, R. (1991) *Atmospheric Data Analysis*. Cambridge University Press, ISBN 0-521-38215-7.

Gustafsson D., Stähli, M., Jansson P-E. (2001): The surface energy balance of a snow cover: Comparing measurements to two different models. *Theoretical and Applied Climatology*, Vol 70 (1-4), 81-96.

Gustafsson, D., Ahlberg, J., Granlund, N., Lindström, G., Wetterhall, F., Lundberg, A. (2009) *Distribuerade system för förbättrade snö- och avrinningsprognoser Integration i hydrologiska modeller. Delrapport 1. Elforsk rapport 09:84*

Johansson, B. och Chen, D. (2003) The influence of wind and topography on precipitation distribution in Sweden: Statistical analysis and modelling. *International Journal of Climatology*, 23, 1523-1535.

Johansson, B. och Chen, D. (2005) Estimation of areal precipitation for runoff modelling using wind data: a case study in Sweden. *Climate Research*, 29, 53-61.

Konzelmann T, van de Wal RSW, Greuell W, Bintanja R, Henneken EAC, Abe-Ouchi A. (1994). Parameterization of global and longwave incoming radiation for the Greenland Ice Sheet. *Global and Planetary Change* 9: 143±164

Källgården, J (2001) Snow distribution in a mountainous region. A remote sensing study. SMHI Hydrologi nr 86.

Landelius T., Josefsson W. and Persson T, 2001, A system for modelling solar radiation parameters with mesoscale spatial resolution, SMHI Reports Meteorology and Climatology, RMK No.96, May 2001, ISSN 0347-2116.

Lindström G (1997) A simple automatic calibration routine for the HBV model. *Nordic Hydrol* 28:153–168

Lindström, G., Gardelin, M., Johansson, B., Persson, M., Bergström, S. (1996) HBV-96 – En areellt fördelad modell för vattenkrafthydrologi. SMHI RH nr 12.

Lindström, G., Johansson, B., Persson, M., Gardelin, M., Bergström, S. (1997) Development and test of the distributed HBV-96 hydrological model. *J Hydrol* 201:272–288

Nash, J. E., Sutcliffe (1970) River flow forecasting through conceptual models. Part I: A discussion of principles. *J Hydrol* 10:282-290.

Omstedt A, Meuller L, Nyberg L (1997) Interannual, seasonal and regional variations of precipitation and evaporation over the Baltic Sea. *Ambio* 26:484–492

Rodhe A., Lindström G., Dahné J. (2008) *Grundvattenbildning i svenska typjordarmetodutveckling av en vattenbalansmodell*, Uppsala Univ., Dep. Earth Sciences, Hydrology Report series A No. 71.

Winstral, A., Elder, K., Davis, R.E. (2002) Spatial Snow Modeling of Wind-Redistributed Snow Using Terrain-Based Parameters. *Journal of Hydrometeorology* Vol 3, 524-538.

VINDRELATERAD SNÖFÖRDELNING I HYDROLOGISKA MODELLER

Kravet på hydrologiska modeller som används operationellt har länge varit att indata skall vara lättillgängliga. I praktiken har det inneburit semidistribuerade modeller med nederbörd och temperatur som indata. De senaste 10 åren har tillgängligheten till högupplösta geografiska och meteorologiska data ökat väsentligt. I rapporten undersöks om användningen av dessa data i en högupplöst snömodell kan förbättra modelleringen av snömagasinet inför och under vårfloden.

Snömodellen har tillämpats på fyra avrinningsområden i den svenska fjällkedjan för åren 2004-2014. Resultaten visar att det är realistiskt att köra en sådan modell operationellt, men att det inte ger en tydlig förbättring av simulerad vårflod. Energibalansmetoden för beräkning av snösmältning bedöms dock vara intressant för ytterligare utvärdering. Det återstår också att verifiera den rumsliga fördelningen av snötäcket mot observationer.

Ett nytt steg i energiforskningen

Energiforsk är en forsknings- och kunskapsorganisation som samlar stora delar av svensk forskning och utveckling om energi. Målet är att öka effektivitet och nyttiggörande av resultat inför framtida utmaningar inom energiområdet. Vi verkar inom ett antal forskningsområden, och tar fram kunskap om resurseffektiv energi i ett helhetsperspektiv – från källan, via omvandling och överföring till användning av energin. www.energiforsk.se



Energiforsk