

VÅRFLODSPROGNOSER MED SNÖUPPDATERING

RAPPORT 2015:208



VÅRFLODSPROGNOSER MED SNÖUPPDATERING

Uppdatering av regionala modeller genom assimilering
av satellit- och markbaserade snömätningar

DAVID GUSTAFSSON, GÖRAN LINDSTRÖM, ANNA KUENTZ

Förord

I projektet har metodik för uppdatering av hydrologiska vårflodsprognosmodeller med operationella snödjupsobservationer och satellitbaserade observationer av snötäckningsgrad och snövattenekvivalent utvecklats och utvärderats. Modelluppdatering med så kallad data-assimilering där alla modellens tillståndsvariabler uppdateras med hjälp av olika snöobservationer gav bättre vårflodsprognoser i vissa områden och vissa år. Men modelluppdatering med snöobservationer leder av olika orsaker inte alltid till förbättrade simuleringar av vattenföring eller tillrinning. 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 David Gustafsson, Göran Lindström, Anna Kuentz, Barbro Johansson och Joel Dahné på SMHI som genomfört projektet. Ett särskilt tack till Björn Norell från Vattenregleringsföretagen i Östersund, som har bidragit med snömätningar från Vattenregleringsföretagens regleringsdammar.

Stockholm, november 2015



Cristian Andersson

Energiforsk

Sammanfattning

Projektet som beskrivs i denna rapport syftar till att utveckla och utvärdera metodik för uppdatering av hydrologiska modeller med hjälp av 1) SMHI:s operationella snödjupsobservationer, 2) satellitbaserade observationer av snötäckningsgrad och snövattenekvivalent från EU FP7-projektet CryoLand, samt 3) pre-operationella mätningar av snödjup, snödensitet och snövattenekvivalent som utförts av Vattenregleringsföretagens personal under rutinbesök vid regleringsdammarna.

De viktigaste slutsatserna är:

- Modelluppdatering med så kallad data-assimilering där alla modellens tillståndsvariabler uppdateras med hjälp av olika snöobservationer gav bättre vårflodsprognoser i vissa områden och vissa år – det var framförallt mätningar av snövattenekvivalent och snötäckningsgrad som bidrog till bättre prognoser.
- Det finns mycket snöinformation från operationella mätprogram i Sverige. Förutom de ovan nämnda mätprogrammen som ingår i studien finns ett växande antal databaser med öppet tillgänglig satellitbaserad snöinformation.
- De dataset som analyserats i projektet visar att även punktmätningar kan innehålla relevant information för att beskriva det aktuella snöläget vid observationstidpunkten och även för områden mellan observationspunkterna.
- SMHI:s operationella snödjupsmätningar uppvisar en relativt hög rumslig korrelation, med en korrelationslängd på omkring 50 km. Det betyder att en ökning/minskning i uppmätt snödjup sannolikt innebär en liknande förändring av snödjup i ett område inom en radie på 50km från mätstationen.
- Modelluppdatering med snöobservationer leder inte alltid till förbättrade simuleringar av vattenföring eller tillrinning på grund av att:
 - o Osäkerheterna i väderprognoserna/klimatologin överskuggar osäkerheterna i mängden snö i många områden.
 - o Uppdateringsmetodiken förmår inte ta hänsyn till de systematiska representationsfelen i den assimilerade snöinformationen på ett korrekt sätt.
 - o Tillgängliga snöobservationer är som glesast eller uppvisar störst osäkerhet i de områden som är mest relevanta för vårflodsprognoserna (det vill säga regleringsmagasinen i fjällmiljö).
 - o Utvärderingen utförs med kvalitetsgranskade och uppdaterade meteorologiska drivdata som inte är relevanta för en realtidsprognos – i realtid körs modellerna fram till prognosstart med mer osäkra drivdata än vad som ibland används i utveckling/utvärdering.

Summary

The aim of the project described in this report was to develop and evaluate methods for updating hydrological models by use of 1) operational snow depth measurements from SMHI, 2) satellite based data on snow water equivalent and snow cover area from EU FP7 project CryoLand, and 3) pre-operational manual observations of snow depth, snow density and snow water equivalent located close to hydropower reservoirs in the Swedish mountain area, operated by hydropower management company Vattenregleringsföretagen AB.

The most important conclusions of the study are:

- There is a lot of snow information from operational observation networks in Sweden that is unused for operational hydrological forecasting. In addition to the databases mentioned above, there are a growing number of satellite based remote sensing products with snow information for Sweden.
- The observational datasets analysed in this study show that also point data can contain relevant information for description of the current snow conditions also for areas in-between the point observations.
- SMHI's operational snow depth measurements show high spatial correlation with a correlation length of about 50 km.
- Model updating with so-called data assimilation, where all model state variables are updated using snow observations improved spring melt forecasts in a majority of the study areas and study years. It was mainly manual observations of snow water equivalent and satellite based data on fractional snow cover area that were useful for improving the forecasts.
- Still, model updating with snow data does not always lead to improved simulations of river discharge and reservoir inflow. This may be for several reasons, for instance:
 - o The uncertainty in the weather forecast/climatological forecast is more important than the uncertainty in the snow conditions at the start of the forecast.
 - o The updating methods do not take into account systematic representation errors in the assimilated snow information in an adequate way.
 - o The manual snow observations are most sparse and the satellite based data is most uncertain in the mountain areas that are most interesting for spring melt runoff predictions from a hydropower management perspective.
 - o Analysis is made using quality controlled meteorological forcing data that is not relevant for real-time situations.

Innehåll

1	Syfte	7
2	Bakgrund	8
3	Metodik och data	9
3.1	Statistisk analys av SMHI:S snödjupsmätningar	9
3.2	Snödjupskarta baserad på SMHI:S snödjupsmätningar	9
3.3	Modellering av snödjup och snöns vatteninnehåll för uppdatering med SMHI:s snödjupsmätningar	11
3.4	Uppdatering med hjälp av SMHI:s snödjupsmätningar	13
3.5	Satellitbaserad snöinformation	14
3.6	Markbaserad snöinformation från Vattenregleringsföretagens mätprogram 2010-2015	15
3.7	Distribuerad snömodell för assimilering av markbaserade och satellitbaserade snödata	16
3.8	Dataassimilering med Ensemble Kalman filter (EnKF)	19
3.9	Data-assimileringsexperiment – utvärdering av vårflodsprognoser	22
4	Resultat och diskussion	25
4.1	Statistisk analys av snödjupsmätningar	25
4.2	Snödjupskarta	28
4.3	Modellering av snödjup och snöns vatteninnehåll	30
4.4	Uppdatering med hjälp av snödjupsmätningar	32
4.5	Resultat från assimilering av satellitdata	33
5	Slutsatser och rekommendationer för framtida utveckling	41
6	Referenser	43
7	Appendix	45
7.1	Tabeller med resultat från assimileringsexperimenten	45

1 Syfte

Det här projektet innehåller två delstudier som med utgångspunkt i olika angreppssätt syftar till att utveckla och utvärdera metoder för uppdatering av hydrologiska modeller med hjälp av operationella snömätningar.

Den första delstudien har haft syftet att utveckla och utvärdera en enkel metod för regional uppdatering av en hydrologisk modell med hjälp av operationella snödjupsobservationer från SMHIs mätstationer.

Den andra delstudien studerar modelluppdatering genom assimilering av satellitbaserad snöinformation i kombination med markbaserade snömätningar. Syftet är att undersöka i vilken grad informationen från satellitmätningar kan bidra till förbättrade vårfloidsprognoser om markbaserade snöinformation används för att korrigera för de systematiska felen i satellitdata, speciellt i fjällmiljö.

2 Bakgrund

Det kan verka självklart att man ska uppdatera en hydrologisk modell med hjälp av uppmätta snödjup inför snösmältningen. Och det är enkelt att uppdatera modellerna. Det svåra är att göra det på ett sätt som förbättrar resultaten, särskilt till en rimlig kostnad. Sedan HBV-modellen utvecklades på 1970-talet (Bergström, 1976) har man vid SMHI genomfört en rad studier för att just uppdatera modellens snötäcke med mätdata. Arheimer m.fl. (2011) sammanfattade erfarenheterna från många av studierna och kom bland annat fram till att mätdata för snöns vatteninnehåll kunde förbättra vårflödesprognoser. Sedan lång tid tillbaka mäts snödjupet vid SMHIs manuella nederbördsstationer. Lindström och Dahné (2011) testade att uppdatera en enkel HBV-modell med hjälp av snödjupsmätningar, och fick fram en del positiva resultat. I de gjorda testerna användes endast en snödjupsstation per avrinningsområde, och antalet testområden var bara 10. En naturlig fortsättning skulle vara att vikta ihop information från flera snödjupsstationer.

Den ena målsättningen för det här projektet är därför att utveckla det tidigare arbetet med SMHIs snödjupsmätningar till regional skala, och utvärdera en metod för regional uppdatering av en hydrologisk modell med hjälp av operationella snödjupsmätningar.

Den andra målsättningen är att utveckla och utvärdera metodik för modelluppdatering med hjälp av en kombination av satellitbaserad och markbaserad snöinformation och dataassimilerings teknik genom Ensemble Kalman filtermetoden.

Dataassimilering är en teknik för anpassning av modeller mot observationer som är mycket vanlig till exempel för att initialisera meteorologiska prognosmodeller. Metoder för dataassimilering är ofta anpassade till situationer med förhållandevis litet antal observationer i ett begränsat antal geografiska positioner och variabler i förhållande till ett betydligt större antal modelltillstånd och beräkningspunkter i modellen. Metoderna bygger därför ofta på statistisk optimering i syfte att identifiera det mest troliga modelltillståndet givet de tillgängliga observationerna. Modelltillståndet anpassas med hänsyn till osäkerheten i observationerna och i modellen, och den uppdaterade modellen hamnar oftast någonstans mellan den ursprungliga modellen och observationerna.

Dataassimilering kan användas både för att initialisera en modell inför en prognoskörning, eller som ett sätt att med modellen och observationerna återskapa en tidserie med mest troliga hydrologiska tillstånd, så kallad återanalys, vilket också är vanligt inom klimat- och meteorologisk forskning. En generell fördel med dataassimilering jämfört med de mer direkta uppdateringsmetoderna är att den ger möjlighet att även uppdatera modelltillstånd som inte har en direkt motsvarighet i observationerna, samt att flera olika observationsvariabler kan assimileras samtidigt (till exempel både snödjupsmätningar och avrinningsmätningar).

I denna studie används en dataassimileringsmetod som kallas Ensemble Kalman filter (Evensen, 1994). Metoden har tidigare implementerats i det hydrologiska modellsystemet HYPE för assimilering av snömätningar med markradar (Gustafsson m.fl., 2012) och även använts för att assimilera manuella snödjupsmätningar i Schweiz (Magnusson m.fl., 2014). I denna studie har metoden vidareutvecklats och anpassats för assimilering av satellitbaserade snödata, främst data med snövattenekvivalent och snötäckningsgrad från det parallellt löpande EU FP7 projektet CryoLand (2011-2014).

3 Metodik och data

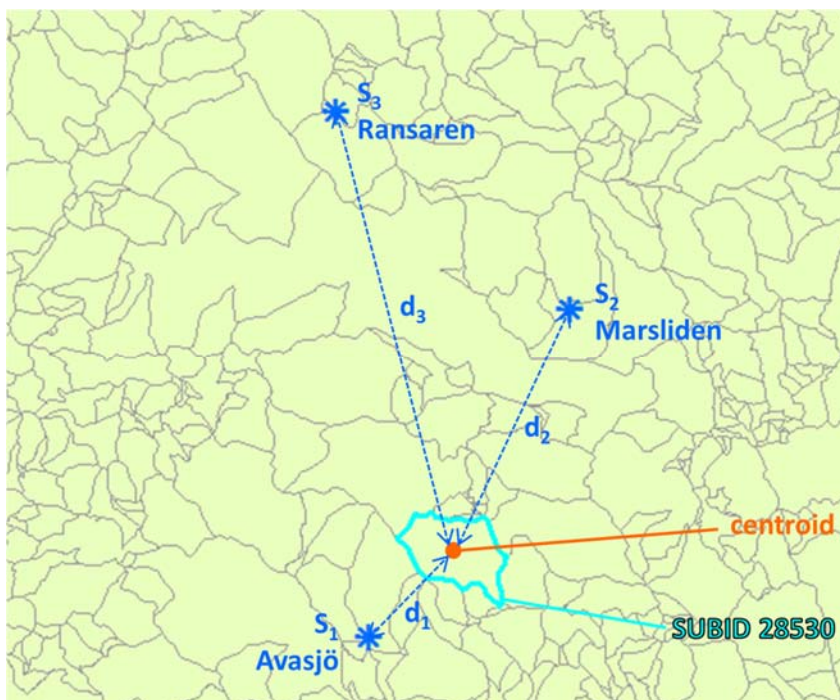
3.1 STATISTISK ANALYS AV SMHI:S SNÖDJUPSMÄTNINGAR

En statistisk analys av snödjupsmätningarna från SMHIs mätstationer gjordes. Främst beräknades snödjupets höjdberoende och hur korrelationen mellan uppmätta snödjup berodde på avståndet mellan stationerna. Korrelationens styrka i nord-sydlig riktning och öst-västlig riktning beräknades. Två datamängder användes, dels en ursprunglig sammanställning med 601 stationer, och dels 32 utvalda stationer av bra kvalitet och representativitet. Kriterierna för urval av de 32 stationerna beskrivs närmare av Lindström och Dahné (2011).

3.2 SNÖDJUPSKARTA BASERAD PÅ SMHI:S SNÖDJUPSMÄTNINGAR

En snödjupskarta togs fram för hela Sverige med beräknade dagliga snödjup för åren 1961-2007. Snödjupsdata från tidigare arbeten återanvändes varför data inte sträcker sig fram till nutid. Kartan har samma rumsliga upplösning som den nuvarande S-HYPE-modellen (36692 delområden med en medianarea $\approx 7 \text{ km}^2$). Den första versionen av S-HYPE togs fram av Strömqvist m.fl. (2012) och den har sedan förfinats successivt. För varje delområde i modellen beräknades snödjupet som ett viktat medelvärde av djupet vid de tre närmsta snödjupsstationerna. SMHI har mätt snödjup vid enstaka platser i landet sedan slutet av 1800-talet. En omfattande genomgång och analys av SMHIs snödjupsmätningar publicerades nyligen av Wern (2015). Eftersom snödjupet mäts av SMHI:s observatörer är få mätstationer belägna på hög höjd, vilket försvårar användningen i fjällen. Trots detta är drygt 20 stationer belägna på över 500 m höjd, och den högsta, Idre fjäll, på 869 m. Inom vissa delområden i S-HYPE finns det i verkligheten flera snödjupsstationer, men på grund av begränsningar i modellen togs endast en snödjupsstation per delområde med i analyserna. Endast stationer med minst 60 mätvärden under åren 1991-2000 togs med. Cirka femtio felaktigheter i observationsmaterialet kunde identifieras i och med modellarbetet. Oftast handlar det om enhetsfel, en sammanblandning mellan cm och mm i rapporteringen (se vidare Wern, 2015). Dessa data kommer att återkopplas till observationsenheten vid SMHI och kan därmed rättas i dataarkiven till nytta för framtida tillämpningar. Totalt valdes 413 stationer ut för att användas i modelleringen.

För varje område väljs de tre närmsta snöstationerna S1, S2 och S3 för att uppskatta snödjupet i snödjupskartan. Avståndet beräknas relativt centroiden för området (Figur 1).



Figur 1. Schematisk beskrivning av metoden för interpolation av snödjupet till ett delområde (SUBID) i S-HYPE baserat på de tre närmsta snödjupsstationerna.

I basmodellen beräknas dagligen för varje delområde ett viktat medel av snödjupsvärden från 3 utvalda stationer:

$$Mod_{0-123}: sd_{om} = v_1 sd_1 + v_2 sd_2 + v_3 sd_3 \quad (1)$$

där sd_{om} är modellerat medelsnödjup för området, sd_1 (resp sd_2 , sd_3) är uppmätta snödjup för stationen S_1 (resp. S_2 , S_3) och v_1 (resp v_2 , v_3) är vikten för stationen S_1 (resp. S_2 , S_3) som beräknas enligt:

$$v_1 = \frac{\frac{1}{d_1}}{\frac{1}{d_1} + \frac{1}{d_2} + \frac{1}{d_3}} \quad (2)$$

När det saknas uppmätta snödjup för en av de tre stationerna används en enklare modell med bara två stationer. Den fungerar på samma sätt som den kompletta modellen. Till exempel om värdet för stationen S_2 saknas har vi:

$$Mod_{0-13}: sd_{om} = v_1 sd_1 + v_3 sd_3 \quad (3)$$

$$\text{Med } v_1 = \frac{\frac{1}{d_1}}{\frac{1}{d_1} + \frac{1}{d_3}} \text{ och } v_3 = \frac{\frac{1}{d_3}}{\frac{1}{d_1} + \frac{1}{d_3}}$$

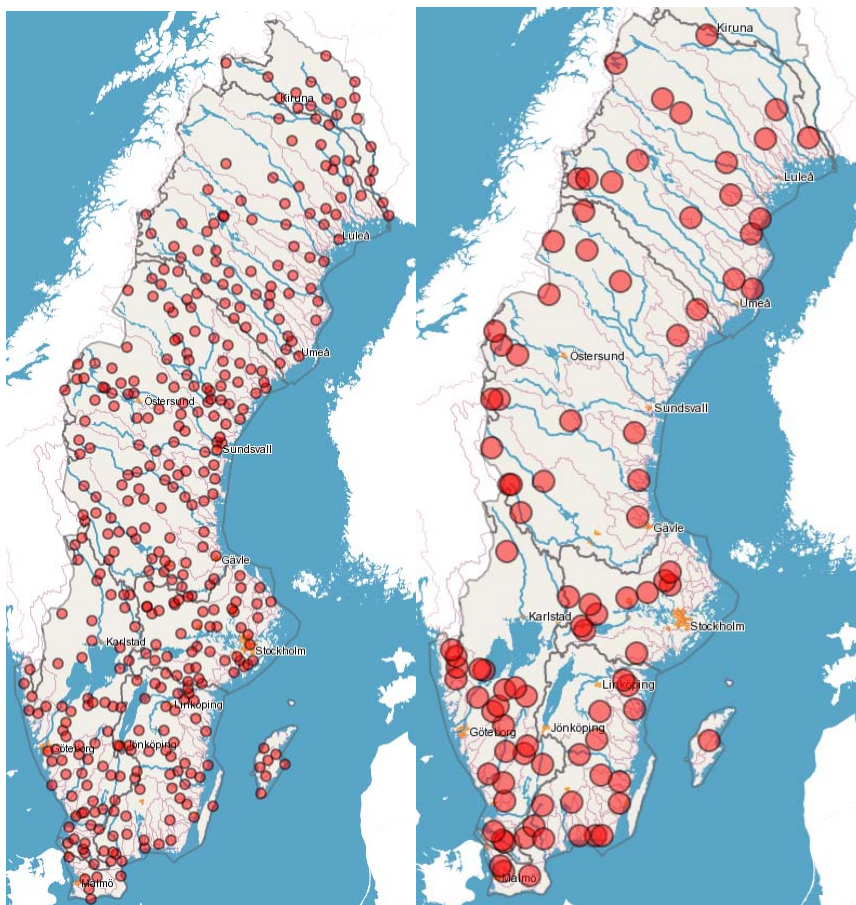
Om värdet saknas vid två stationer används den tredje utan viktning. För att räkna med snödjupskillnaden relativt med höjd används en korrektionsterm som beror på stationernas höjder h_1 , h_2 , h_3 och områdets medelhöjd H . En höjdreferens beräknas som $h_{ref} = h_1 v_1 + h_2 v_2 + h_3 v_3$. Korrektionstermen är $K_h = \alpha \cdot (H - h_{ref})$ där

α är en faktor som står för snödjupskillnaden relativt höjden över havet. Den slutliga beräkningen blir:

$$Mod_{123}: sd_{om} = v_1 sd_1 + v_2 sd_2 + v_3 sd_3 + K_h \quad (4)$$

3.3 MODELLERING AV SNÖDJUP OCH SNÖNS VATTENINNEHÅLL FÖR UPPDATERING MED SMHI:S SNÖDJUPSMÄTNINGAR

En förenklad HBV-modell utvecklades och sattes upp för 97 områden med en area mellan 200 och 2000 km². Med SMHIs terminologi är dessa områden medelstora. Det är ett storleksintervall som ganska väl stämmer överens med tillrinningsområdena till randmagasin i fjällen för vilka vårflödesprognoser är intressanta för vattenkraftproducenter. Av de 97 områdena är 23 svagt reglerade, med en genomsnittlig regleringsgrad för dessa 23 på 6%. Medelarean för de 97 områdena är 678 km². Nederbörd och temperatur för dessa områden baserades på PTHBV (Johansson, 2002). För de flesta av modellens parametrar användes samma parametervärde över hela landet. För fyra parametrar ställdes dock lokala parametervärden in grovt för vart och ett av de 97 områdena: 1) en nederbördskorrektion, 2) en temperaturkorrektion, 3) recessionen från markboxarna och 4) tidsfördröjningen i området (motsvarande MAXBAS i den klassiska HBV-modellen). Modellen kalibrerades för åren 1991-2000. I huvudsak maximerades NSE, men med villkoret att medelnivåerna skulle stämma överens mellan modell och observationer, både för vattenföringen och för snödjupet vid stationerna. I figur 2 visas var de 97 vattenföringsstationerna och de 413 snödjupsstationerna som användes är belägna.



Figur 2. De 413 stationerna ur SMHI:s stationsnät för mätning av snödjup (t.v.), och de 97 vattenföringsstationerna (t.h.), som användes i denna studie.

Snödjupet modellerades separat för var och en av de 431 snödjupsstationerna. Nederbörds-korrektionen och en temperaturkorrektion ställdes in för varje station. Detta gjordes eftersom snötillgången vid stationerna inte är representativ för snötillgången i avrinningsområden med en medelhöjd som i allmänhet är högre än stationernas höjd, speciellt i fjällen. De modellerade snöförhållandena vid stationerna utgör grunden för uppdateringsmetod 2 (se nedan). I både HBV-modellen och HYPE-modellen finns en rutin för beräkning av snöns densitet, där densiteten ökar linjärt med snöns ålder, från en antagen densitet för nysnö (Lindström m.fl., 2002). Denna modifierades något till innevarande studie till:

$$\Delta dens = k(dm - dens) \Delta t \quad (5)$$

Densiteten (*dens*) ökar med tiden, där parametern *dm* är den maximala densiteten som kan uppnås och *k* kompaktionshastigheten, det vill säga den hastighet med vilken densiteten ökar. Resultaten blev något bättre då en högre kompaktionshastighet *k* sattes för milda dagar (temperaturen > TT) än för kalla dagar (övriga dagar). Som i den föregående modellen antas nysnön ha en lägre densitet (ca 0.1). Försök gjordes med att låta nysnöns densitet variera med temperaturen, men resultaten förbättrades inte av denna förändring, varför den inte togs med i den slutliga modellen.

För utvärdering av resultaten användes de vanligt förekommande anpassningsmått:

- NSE: Nash-Sutcliffe Efficiency (Nash och Sutcliffe, 1970), tidigare ofta kallat för R^2 .
- |Volfell|: Absolutvärdet av volymfelet (i %) över vårfloden (här 1/4 – 30/6).

3.4 UPPDATERING MED HJÄLP AV SMHIS SNÖDJUPSMÄTNINGAR

Vid uppdatering av snötäcket måste man ta hänsyn till att en modell beräknar snötäcket för ytor, t.ex. delområden eller höjdzoner, medan de tillgängliga snödjupsmätningarna är punktmätningar. Punkterna är i allmänhet inte representativa ens för det delområde i vilket de ligger, beroende på skillnader i höjd, vegetation och exponering. Snödjupsmätningarna sker i allmänhet nära bebyggelse. Fyra metoder för uppdatering av snöns vatteninnehåll och snödjupet testades. I alla metoderna kan en följsamhetsfaktor α ($0 \leq \alpha \leq 1$) ansättas. Ett värde på $\alpha = 1$ innebär en fullständig uppdatering, medan ett värde mellan 0 och 1 innebär att uppdateringen sker med en eftersläpning. Densiteten förändras inte vid uppdateringarna. De fyra metoderna beskrivs här:

Metod 1. Uppskattning av snödjupet i varje delområde: Direkt ersättning av modellerat snödjup gjordes med uppmätt (interpolerat) snödjup enligt snödjupskartan. Systematiska skillnader mellan de uppmätta snödjupen och modellen rättades först i varje avrinningsområde. Man kan säga att snödjupskartan anpassades lokalt för varje delområde med hjälp av avrinningen.

Metod 2. Överföring av felen vid mätpunkter: I varje avrinningsområde uppskattades ett förväntat fel i snödjup med hjälp av felen i snödjup vid de tre närmaste snödjupsstationerna. Dessa fel viktades med hänsyn till avståndet.

Metod 3. Överföring av avvikelser från normalvärden: Avvikelsen i snödjup från ett normalvärde för den aktuella dagen enligt snödjupskartan överfördes till modellen så att samma avvikelse från modellens normalvärden erhöles. Om till exempel snödjupet vid stationerna är hälften så stort som normalt en viss dag på året, ansätts det modellerade snödjupet också som hälften av det normala modellerade snödjupet för den aktuella dagen. I de här redovisade testerna gjordes detta för snödjupen baserade på snödjupskartan.

Metod 4. Som 1., men med snöns höjdkorrektion i %/100 m i stället för cm/100 m.

3.4.1 Experiment med klimatologiska drivdata och realtidsdata

I uppdateringsexemplen används Arkiv-PTHBV som drivdata. I verkligheten har man inte tillgång till dessa data i realtid, utan de finns tillgängliga med viss eftersläpning. I praktiken används Realtids-PTHBV under cirka 2 månader före en prognos. Arkiv-PTHBV bygger på fler stationer, och kvalitetskontrollerade data. För att undersöka värdet av uppdatering i en situation då man inte har tillgång till Arkiv-PTHBV gjordes ett experiment där modellen drevs med klimatologi beräknad för åren 1971-1990. Eventuellt vore det bättre att använda samma period som för kalibreringen. 1971-1990 är kallare och torrare än kalibreringsperioden. Dessutom gjordes en jämförelse mellan simuleringsresultat gjorda med Arkiv-PTHBV som drivdata jämfört med motsvarande för Realtids-PTHBV, som blev tillgängliga i slutfasen av projektet. Denna jämförelse

gjordes med hjälp av S-HYPE för åren 2009-2014. Jämförelsen gjordes för 368 stationer, varav cirka hälften är reglerade.

3.5 SATELLITBASERAD SNÖINFORMATION

3.5.1 Tillgänglig sensorteknik och dess begränsningar för snömätningar

Snötäckningsgrad bestämd från optiska satelliter är de för närvarande mest tillgängliga satellitbaserade snöprodukterna med avseende på rum, tid och öppenhet.

Operationella öppet tillgängliga produkter finns att tillgå från EU FP7 CryoLand, GlobSnow och NASA. Många av dessa produkter är baserade på den amerikanska satellitmissionen MODIS, som nu närmar sig pensionsdatum. Den rumsliga upplösningen på tillgängliga produkter varierar mellan 250m till 1 km.

Det europeiska satellitprogrammet Sentinel förväntas kunna minska beroendet på MODIS i framtiden (Sentinel 2 skickas upp under hösten 2015 med motsvarande optiska sensor). Det stora problemet för de optiska teknikerna är moln och låg solvinkel vilket är ett problem i Skandinavien under stora delar av vintern. SAR-tekniken (radar) möjliggör detektion av snö även vid dessa situationer, men tidigare har dessa data varit begränsade av licenser och dålig täckningsgrad i rum och tid. Sentinel-1 har nu varit i rymden sedan hösten 2014, och ger goda möjligheter för detektion av framförallt blöt snö (den SAR-sensor som finns på Sentinel-1 ger alltför dålig kontrast mellan torr snö och barmark för att användas för snötäckningsgrad så låge snön är kall och torr).

För närvarande finns bara en teknik tillgänglig för satellitbaserad observation av snövattenekvivalent – passiv mikrovågsstrålning. Satellitsensorn mäter helt enkelt den mikrovågstrålning som strålar ut från Jordytan, vilken beror på olika fysikaliska tillstånd som till exempel snödjup, snödensitet, kornstorlek, markfuktighet, yttemperatur med mera. Snövattenekvivalenten uppskattas genom att anpassa ett antal okända parametrar – varav snödjup och kornstorlek är två – i en modell för Jordytans utstrålning så att den stämmer överrens med den uppmätta strålningen. Metodiken är utvecklad av FMI inom projekten GlobSnow och CryoLand (Pulliainen m.fl., 1999) och inbegriper även assimilering av snödjupsmätningar från väderstationer för att kunna uppskatta den viktiga kornstorleksparametern. Nackdelen med denna teknik är att slutprodukten i hög grad är beroende på förhållandena vid dessa snödjupstationer, vilka kan skilja sig avsevärt från de mellanliggande områdena som kanske domineras av skog snarare än de öppna fält där snödjupsmätningarna ofta genomförs.

För närvarande är detta dock den enda och bästa tekniken. Forskning pågår på SMHI inom ett projekt finansierat av svenska Rymdstyrelsen, med syfte att utveckla en teknik för att assimilera mätningarna av passiv mikrovågstrålning direkt i de hydrologiska och meteorologiska modellerna. Om information från modellerna om den rumsliga variationen i snö- (djup, densitet, fuktighet, temperatur) och markförhållanden (fuktighet, tjäldjup, temperatur) är bättre än att anta konstanta förhållanden inom upptagsområdet för satellitsensorn finns möjlighet att med en kombinerad satellit- och modellprodukt få en bättre snövattenekvivalentuppskattning både med avseende på rumslig upplösning och absolut nivå jämfört med de befintliga produkterna. I det aktuella projektet analyseras i första hand data från den japanska AMSR2-satelliten.

3.5.2 Befintliga och framtida datakällor

I denna studie används satellitbaserade snödata från det parallellt löpande EU FP7 projektet CryoLand (2011-2014). CryoLand-projektet utvecklade dels en lättillgänglig och användaranpassad dataportal för distribuering av satellitdataprodukter, samt en rad olika satellitbaserade dataprodukter för snö och is (is på sjöar och vattendrag samt glaciärer). Två produkter laddades ned och testades i analysen: de Pan-Europeiska produkterna för snötäckningsgrad och snövattenekvivalent, baserade på optiska satelliter (främst den nordamerikanska MODIS) respektive passiv mikrovågstrålning.

Dessa produkter finns tillgängliga från och med år 2000 och uppdateras kontinuerligt med dagliga data. Snötäckningsgradsprodukten kommer med en rumslig upplösning på ca 1x1 km² (0.005°x0.005°) medan snövattenekvivalentprodukten har en rumslig upplösning på ca 5x10km² (0.1°x0.1°).

I skrivande stund har dataproducenterna och tjänsteleverantörerna inom det tidigare CryoLand-projektet sagt att de fortsätter dataproduktionen och servern för de Pan-Europeiska produkterna under de närmast åren, åtminstone fram till 2017. I takt med att nya data från de europeiska Sentinel-satelliterna blir tillgängliga är det rimligt att förvänta sig att tillgängligheten på satellitdata och datatjänster för snö och is inte kommer minska under överskådlig framtid, utan snarare öka.

3.5.3 Metodik för nedladdning och bearbetning av satellitdata inför assimilering i hydrologiska modeller

Automatiserbara kommandoradsbaserade datorprogram, så kallade script, för nedladdning och bearbetning av satellitdata från CryoLand utvecklades inom projektet. Programmen kan utföra följande operationer automatiskt:

- Kontrollerar om det finns data på CryoLand-servern för ett givet område och tidsintervall och jämför med vad som redan har laddats ner.
- Om det finns data på servern som ännu ej har laddats ner, begär och ta emot dessa från CryoLand-servern.
- För de satellitdata som har laddats ner (rasterbaserade data i formatet GeoTIFF) beräkna medelvärden för alla delområden inom en hydrologisk modell.
- Uppdatera tidserier med delområdesdata i modellens indata-format.

Skripten är skrivna i programmeringsspråken bash, R och Python. Programmen kan köras manuellt, men har också anpassats och implementerats i SMHI:s operationella hydrologiska produktionsmiljö för att dagligen ladda ner snötäckningsgrad och snövattenekvivalentprodukterna från CryoLand och beräkning av medelvärden för samtliga delområden i S-HYPE modellen.

Skripten finns delvis tillgängliga via CryoLands dataportal (www.cryoland.eu) men kan även fås vid begäran av författarna till denna rapport.

3.6 MARKBASERAD SNÖINFORMATION FRÅN VATTENREGLERINGSFÖRETAGENS MÄTPROGRAM 2010-2015

Vattenregleringsföretagens manuella mätningar av snödjup, snödensitet och snövattenekvivalent vid ett 50-tal regleringsmagasin under perioden 2010-2015 har

ingått i denna studie. Mätningarna utförs med en till två veckors mellanrum under hela vintern i samband med den rutinmässiga tillsynen av anläggningarna.

Vid varje regleringsdamm har en snöpinne installerats på en plats som valts ut med tanke dels på att vara lättillgänglig för operatören, och dels vara representativ för områdets snömängd utan att vara alltför vindutsatt. Mätningar av snödjup sker dels via avläsning från den fast monterade snödjupspinnen och dels med snörör i samband med densitetsprovtagningen. Snödensiteten bestäms genom provtagning av hela snöns djup med ett snörör av egen modell bestående av ett plexiglasrör med en spetsig konformad ände i svarvat stål. (Björn Norell, personlig kommunikation). Vikten av snöprovet vägs med en mekanisk fjädervåg efter att snöröret tömts i en plastpåse.

3.7 DISTRIBUTUERAD SNÖMODELL FÖR ASSIMILERING AV MARKBASERADE OCH SATELLITBASERADE SNÖDATA

En delvis ny distribuerad snömodell har utvecklats inom projektet i samarbete med det parallellt löpande projektet redovisat av Johansson m.fl. (2015). Modellen är en vidareutveckling från den distribuerade modell som utvecklades av Lindström och Dahné (2011). Modellen har i grunden en HBV-liknande struktur, med nyutvecklade rutiner för att bättre simulera den rumsliga fördelningen av snön som funktion av topografi, vind och vegetation. Modellen presenteras i mer detalj i Johansson m.fl. (2015).

I denna studie används en förenklad version av modellen som endast tar hänsyn till variation i höjd och i vegetation. Varje beräkningsområde i modellen täcker en gridruta i det interpolerade nederbörds- och temperaturdatasetet som kallas PTHBV. Varje delområde är således 4x4 km². Ett delområde delas sedan upp i upp till 10 höjdzoner (100 m intervall) och 4 vegetationszoner (öppen mark, skog, glaciär och vatten). Indelningen i olika vädersträck och vindomfördelning samt energibalansberäkningen som analyseras i Johansson m.fl. (2015) försummas tillsvidare i denna studie. Här används en enkel graddagsmodell för snösmältning, samt en förenklad version av HBV-modellens markschema för avrinning från markvattenzon, övre och undre grundvattenmagasin.

Modellen innehåller inte någon modell för att beräkna vattenföring. Istället kan avrinningen från modellens olika delområden (det vill säga, från varje PTHBV-gridruta) summeras enligt förutbestämda vikter för att beräkna den lokala tillrinningen till ett givet område motsvarande till exempel ett regleringsmagasin (Figur 3 och 4).

3.7.1 Modelluppsättning för assimileringsexperimenten

En modelluppsättning som täcker samtliga prognosområden inom Luleälven, Skellefteälven, Umeälven, Ångermanälven och Indalsälven användes i denna studie (Figur 3). Inom denna modelldomän finns 8171 delområden (PTHBV-gridrutor), 74 prognosområden med tillrinningsdata för modellutvärdering, ca 74 platser med manuella snömätningar från Vattenregleringsföretagen (VRF) (2010-2015), Skellefteälvens vattenregleringsföretag (SVF) och Vattenfall (VF) (1980-2015), samt 109 stationer med operationella snödjupsmätningar från SMHI.

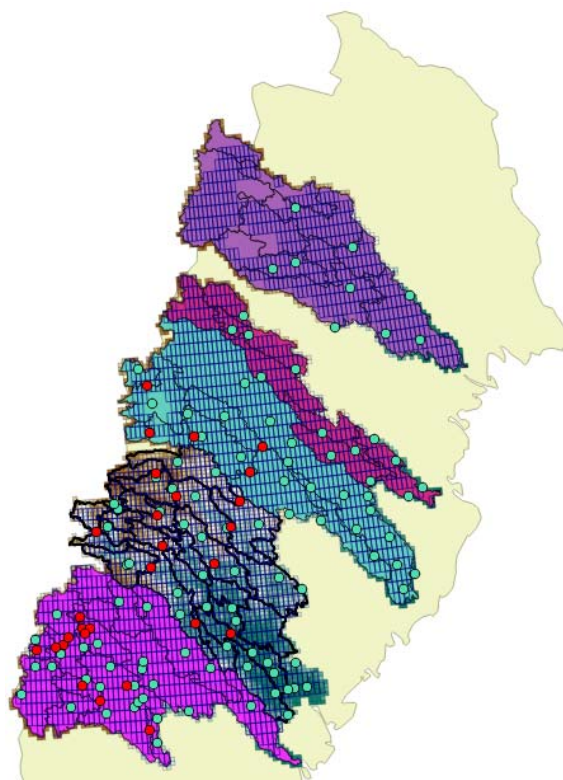
För varje markbaserad snömätning inkluderas ett specialdelområde i modellen med egenskaper motsvarande dem på mätplatsen. För Vattenfalls mätlinjer beräknades en fördelning av terräng och vegetationsegenskaper längs en rät linje från de kända start

och slutpunkterna. För punktstationerna (VRF, SVF och SMHI) antogs en och samma vegetationsklass (icke-skog) medan topografiska parametrar (höjd över havet, lutning, exposition) beräknades som medelvärde från höjdmodellen inom en radie på 50m (de 9 närmaste 25x25m2 gridpunkterna i höjdmodellen EU-DEM, se nedan)

Genom att modellera ett eget delområde för respektive mätning undviks till viss del problematiken med representationsfelet mellan mätplatsen och det avrinningsområde den ligger inom. Tack vara dataassimilerings-tekniken spelar det ingen roll att vi jämför den simulerade och uppmätta snödata på dessa mätdelområden, eftersom ko-variansen mellan de simulerade snötäckningen i de stora delområdena och mätdelområdena används för att korrigera de stora delområdena med hjälp av korrektionen i de små mätdelområdena.

Höjddata från det nyligen publicerade EU-DEM användes, vilket är ett homogeniserat höjddataset för hela EU-regionen med 25x25 m² upplösning.

Vegetationsklassificeringen baserades på CORINE vilket också finns tillgängligt för hela EU.



Figur 3: Översiktsskarta som visar avrinningsområden motsvarande prognosområden i Vattenregleringsföretagens prognosmodell som använts i denna studie; Luleälven, Skellefteälven, Umeälven, Ångermanälven och Indalsälven, positionen för 103 snödjupstationer (SMHI) och ett 30-tal av vattenregleringsföretagens snövattenequivalentmätningar, samt ett gridnät motsvarande den satellitbaserade SWE-produkten från CryoLand.

3.7.2 Modellering av satellitdata för assimilering i den distribuerade snömodellen

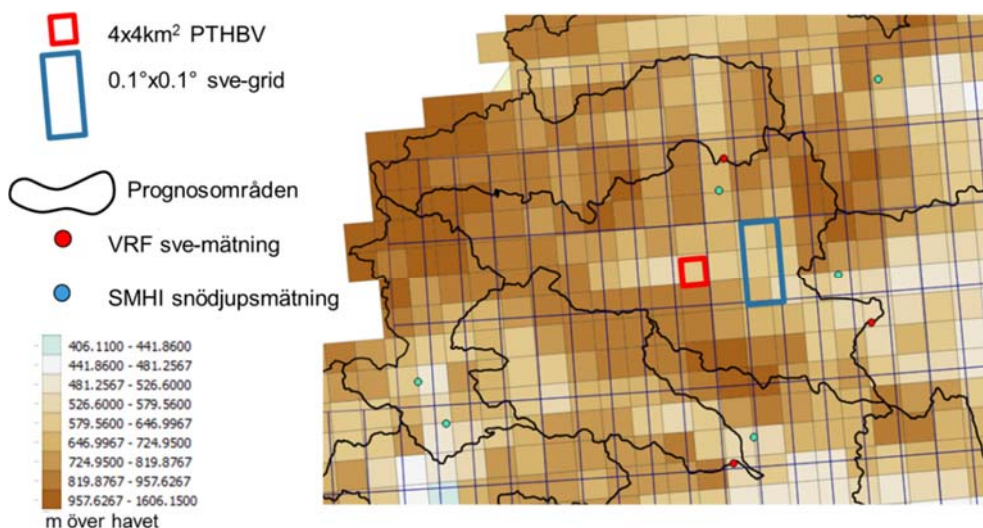
De två typerna av satellitbaserad snödata som används i denna studie hanteras delvis olika:

- Den högupplösta snötäckningsdata (1x1km²) aggregerades till medelvärden per PTHBV-delområden på traditionellt sätt – eftersom satellitdata från början hade en högre upplösning och informationen baserad på optiska sensorer i verkligheten har denna rumsliga representation.

- För den mer lågupplösta snövattenequivivalentprodukten gör vi istället tvärtom: snövattenequivivalentvärdena från modellens PTHBV-rutnät aggregeras till det rutnät som representeras av satellitprodukten.

Erfarenheterna från CryoLand-projektet visar att det stora influensområdet för den passiva mikrovågsensorn (upp till 25x25 km² beroende på frekvensband) gör det meningslöst att försöka skala ned denna information genom interpolering till respektive delområde i den hydrologiska modellen.

Istället väljer vi en strategi där modelldata skalas upp till den rumsliga skala som är relevant för satellitprodukten. I detta fall levereras satellitdata på ett rutnät med 0.1°x0.1°, vilket motsvarar ca 5x10 km² på våra breddrader (se Figur 4). Skillnaden på delområden för PTHBV och CryoLands snövattenequivivalentprodukt illustreras i Figur 4 för ett utsnitt av modellen centrerad kring Kultsjön i Ångermanälven. I kartan ser man också positionen för 6 snödjupsmätningar (SMHI) och de 3 VRF-snödmätningarna i Kultsjön, Ransaren och Borgafjäll.



Figur 4: Utdrag av den distribuerade snömodellen HOPE för området kring Kultsjön och Ransaren i Ångermanälvens övre del i norra Sverige; PTHBV är ett dataset med dagliga värden av nederbörd och lufttemperatur, interpolerade från SMHI's observationsnät till ett 4x4 km² grid som täcker hela Sverige och delar av Norge och Finland som dräneras in i Sverige; i HOPE-modellen simuleras snötäcke och vattenbalansen i marken för varje PTHBV-gridruta (varja ruta kan dessutom delas upp i flera höjd och vegetationsklasser, se mer detaljer i Johansson m.fl. (2015)). Den satellitbaserade snövattenequivivalentprodukten från CryoLand har en rumslig representation i ett 0.1°x0.1° gridnät (ca 5x10km² här på latitud 64°N), vilket är överlagrat modellgriddens; satellitprodukten jämförs med det simulerade snötäcket genom att beräkna ett viktat medelvärde av simulerat snömängd för varje gridcell i satellitprodukten; I figuren är också markerat positionen för SMHI's snödjupsmätningar och Vattenregleringsföretagnes snövattenequivivalentmätningar, samt med svart linje markerat avrinningsområden för olika prognosområden i VRF's HBV-modell; avrinningen från varje PTHBV-modellruta summeras till ett viktat medelvärde av lokal tillrinning inom varje prognosområde, vilket jämförs med den uppmätta tillrinningen under vårfloidsperioden, 15/4-31/7.

3.8 DATAASSIMILERING MED ENSEMBLE KALMAN FILTER (ENKF)

I denna studie används en dataassimileringsmetod som kallas Ensemble Kalman filter (EnKF, Evensen, 1994). EnKF har tidigare implementerats i det hydrologiska modellsystemet HYPE för assimilering av snömätningar med markradar (Gustafsson m.fl., 2012). I denna studie har metoden vidareutvecklats och anpassats för assimilering av satellitbaserade snödata, främst data med snövattekvivalent och snötäckningsgrad från det parallellt löpande EU FP7 projektet CryoLand (2011-2014).

Snömodellen HOPE körs genom samma modellhanteringsystem (HYSS, Hydrologisk Simulation System) som används av HYPE, och på så sätt kan samma dataassimileringsrutin utvecklas och användas för flera olika hydrologiska modeller.

Utvecklingen av HYSS EnKF-rutin inom detta projekt har inkluderat följande:

- Generalisering av interface mellan dataassimileringsrutin och modell för att förenkla återanvändning av koden för olika modeller.
- Effektivare hantering av ensembledata för att möjliggöra tillämpningar med större modellsystem och det större antalet observationer som följer med satellitdata.
- Utveckling och implementering av en rutin för generering av rumsligt korrelerade slumpstal för genereringen av drivdataensembler med mer realistisk rumslig fördelning.
- Metoder för effektiv och systematisk utvärdering av effekt av dataassimilering på säsongsprognosernas träffsäkerhet (osäkerhet).

3.8.1 Ensemble Kalman filtermetoden

Det så kallade Ensemble Kalman filter-metoden (EnKF; Evensen, 1994) används för att uppdatera samtliga modelltillstånd (vattenförråd och nivåer) och flöden genom assimilering av olika observationsdata. Flera olika observationstyper kan i princip assimileras samtidigt. I denna studie assimileras tillrinning, snödjup, snövattekvivalent och snötäckningsgrad. Med assimilering menas att modelltillstånden korrigeras för att minimera skillnaderna mellan observationerna och modellprediktionerna av de observerade variablerna - men det sker inte en direkt uppdatering av modelltillstånd mot observationer eftersom observationerna inte nödvändigtvis måste motsvara en tillståndsvariabel i modellen. Tillrinningsdata kan till exempel användas för att korrigera snödjupet så att den simulerade tillrinningen blir mer lik den observerade - detta utförs ju för övrigt ofta manuellt i befintliga prognosystem.

Uppdateringsekvationen kan skrivas på generell form enligt:

$$X^a = X^p + K(Y - HX^p) \quad (6)$$

Där X^p är en vektor med modelltillstånd vid det aktuella tidsteget, X^a är den uppdaterade "analyserade" tillståndsvektorn, K är en matris med så kallade Kalmanfaktorer (eller förstärkningsfaktorer), Y är en vektor med observationer och HX^p är en vektor med motsvarande simulerade observationer från modellen. H är en operator som transformerar modelltillstånd X till observerade variabler. Denna

operator kan vara så enkel som en multiplikation med 1 i de fall när observationen har en direkt motsvarighet i ett modelltillstånd.

Matrisen med Kalmanfaktorerna beräknas från matriser som beskriver ko-variansen mellan modelltillstånd och modellfelet C_{xy} , ko-varians inom modellfelet C_{yy} samt ko-variansen inom observationernas osäkerhet R :

$$K = \frac{C_{xy}}{C_{yy} + R} \quad (7)$$

Ekv. (7) innebär att ju större osäkerhet i observationerna (R och C_{yy}) och ju mindre kovarians mellan observationer och modelltillstånd (C_{xy}), desto mindre blir Kalmanfaktorerna och desto mindre blir uppdateringen av modelltillstånden enligt Ekv. (6).

Kovarianserna för modell och observationsfel uppskattas genom att generera en ensemble av modeller med en lagom varians och beräkna kovarianserna baserat på denna ensemble. Val av storleken på ensemblen och proceduren för att generera en ensemble med lämpliga statistiska egenskaper är en viktig del för att få Ensemble Kalman filter-metoden att fungera. I teorin antas samtliga fel vara normalfördelade, även om så sällan är fallet i verkligheten. Många gånger används normalfördelade slumpstal för att generera ensemblen i alla fall, eftersom resultaten trots allt kan vara användbara.

3.8.2 EnKF ensemble generation

I denna studie genereras modellensemblen genom att addera normalfördelade rumsligt korrelerade störningar till de meteorologiska drivdata (nederbörd och temperatur) samt normalfördelade och rumsligt oberoende störningar till observationerna. Variansen på störningarna uppskattas enligt Turner m.fl. (2008); med olika metod beroende på variabeltyp:

- Variabler utan övre och under tillåtna värden, som till exempel lufttemperatur får en konstant standardavvikelse (1°C for lufttemperatur).
- Variabler med ett minsta tillåtna värde men utan övre gräns (till exempel nederbörd och snödjup) får en standardavvikelse som beror på det aktuella medelvärdet:

$$\begin{aligned} \sigma_P &= f_P \times P + \varepsilon_{SWE} \\ \sigma_{SWE} &= f_{SWE} \times SWE + \varepsilon_{SWE} \end{aligned} \quad (8)$$

I denna studie används $f = 0.15$ $\varepsilon = 0$ for samtliga variabler.

- Variabler med både en övre och en under gräns får en standardavvikelse som är maximal i mitten av det tillåtna intervallet och avtar mot gränserna:

$$\sigma_{FSC} = \begin{cases} \frac{f_{FSC} \times (fscmax - FSC)}{fscmax - fscmid} & FSC > fscmid \\ \frac{f_{FSC} \times (FSC - fscmin)}{fscmid - fscmin} & FSC \leq fscmid \end{cases} \quad (9)$$

$$fscmid = 0.5 \times (fscmax + fscmin)$$

I denna studie används $f_{scmin} = 0.0$, $f_{scmax} = 1.0$ and $f_{fsc} = 0.15$ för snötäckningsgrad.

De slumpmässiga störningarna på de meteorologiska drivdata görs rumsligt korrelerade med hjälp av en speciell procedur baserad på Fouriertransformer. Den rumsliga korrelationen är väsentlig för att kunna extrapolera informationen från observationspunkterna till mellanliggande delområden. För både lufttemperatur och nederbörd antogs en rumslig korrelationslängd på 100 km baserat på analyserna av snödjupsmätningarna ovan.

3.8.3 EnKF-implementering

En numerisk implementering av den grundläggande EnKF-metoden har utvecklats för att enkelt kunna anpassas till olika hydrologiska modeller. För närvarande finns en version för den distribuerade snö- och tillrinningsmodellen HOPE som används i denna studie, samt för HYPE-modellen som används på större skala i Sverige, Europa och olika delar av världen (till exempel Arktis). Data-assimileringsrutinen är programmerad i Fortran90 och är en vidareutveckling av de rutiner som utvecklades av Gustafsson m.fl. (2012). Rutinerna kommer under 2016 bli tillgängliga via HYPE open source community (hypeweb.smhi.se), men kan också fås direkt av författarna till denna rapport. Programkoden är uppdelad i en modul för data-strukturer (assim_data.f90), en modul för generella EnKF-rutiner (assim_routines.f90), en modul för generering av slumpstal (random_routines.f90), samt en modul för koppling mellan modell och assimileringrutiner (assim_interface.f90). Utöver anpassning av interface-rutinerna krävs en anpassning av tidsstegsloopen i modellen enligt följande pseudo-kod (Figur 5):

```
CALL model_initialization      ! initialize the model in its usual way.

CALL enfk_initialization      ! initialize enfk data and interfaces between mode
                             ! and enfk module

! timestep_loop
DO: t = 1,nstep
  CALL model_read_input_data(tstep)      ! read model input data
  CALL enfk_generate_input_ensembles()    ! generate ensemble of forcing data
  CALL enfk_generate_observation_ensemble ! generate ensemble of observation data

  ! ensemble_loop:
  DO i = 1,nens
    CALL enfk_ensemble2model(i)           ! write ensemble data to model data
    CALL model_run_one_time_step(t)       ! model integration of ensemble member iens
    CALL enfk_model2ensemble()            ! write model prediction to ensemble matrix
  ENDDO ensemble_loop

  CALL enfk_analysis()                ! EnKF analysis, updating the model states
  CALL enfk_mean2modeloutput()         ! Write ensemble mean to model output data
  CALL model_output()                  ! Write standard model output/evaluation

ENDDO timestep_loop
```

Figur 5. Pseudo-kod för EnKF data-assimileringsmetodiken så som den är implementerad i HYSS/HYPE/HOPE.

3.9 DATA-ASSIMILERINGSEXPERIMENT – UTVÄRDERING AV VÅRFLODSPROGNOSER

3.9.1 Delmodeller och prognosområden inkluderade i prognosutvärderingen

Assimileringsexperiment för att undersöka om uppdatering med de olika snöobservationstyperna leder till förbättrade vårflodprognoser utfördes för 5 prognosområden, ett i vardera älv i den distribuerade modellen som beskrivs ovan (Tabell 1; Figur 3):

Tabell 1: Prognosområden som ingått i assimileringsexperimenten med den distribuerade snö-modellen och de satellit- och markbaserade snömätningarna.

Område	Älv	Area km ²	Höj d möh .	Sko g %	Latitu d °N	Simulerat snömagasin (mm) 2010-2015			
						15/2	15/4	15/6	15/6 % av 15/4
Tjaktjajaure	Luleälven	2256	934	23	67°13'	376	520	258	50 %
Riebnesjaure	Skellefteälven	976	830	21	66°37'	290	440	147	33 %
Överuman	Umeälven	653	793	7	66°03'	402	663	236	36 %
Kultsjön	Ångermanälven	1095	800	30	65°05'	357	498	118	24 %
Landösjön	Indalsälven	1453	512	54	63°42'	148	182	11	6 %

De fem prognosområdena har valts ut dels med tanke på tillgängliga snöobservationer och dels med tanke på att få en spridning mellan olika karaktärer och känslighet för prognosfel. Samtliga utvalda prognosområden har minst två typer av markbaserade snöobservationer inom området eller inom ett närområde definierat av en rektangel som täcker hela området plus en buffertzon på ytterligare 4 km i vardera riktningen (Tabell 2).

Tabell 2: Antal stationer med enbart snödjup (SMHI) eller både snödjup och snövattenekvivalent (VRF+SVF+VF) inkluderade i delmodellerna som använts för utvärdering av vårflodsprognoiser där modellerna initialiserats med uppdatering genom data-assimilering.

Område	Snödjup	Snödjup och vattenekvivalent		
		VRF	SVF	VF
Tjaktjajaure	1	0	0	2
Riebnesjaure	2	0	8	0
Överuman	1	1	0	0
Kultsjön	4	2	0	0
Landösjön	3	3	0	0

3.9.2 Kalibrering/validering och assimileringsexperiment

Syftet med de följande modelleringsexperimenten var att utvärdera möjligheterna att förbättra vårflodsprognoserna genom att uppdatera modellen genom assimilering av de olika snöobservationerna (snödjup och snövattenekvivalent från de markbaserade mätningarna utförda av SMHI och vattenregleringsföretagen samt satellitbaserade snötäckningsgrad från CryoLand). De snödata som analyserats fanns tillgängliga för tidsperioden 2010-2015, och därför utfördes analysen av vårflodsprognoserna för just denna period. Tillsvidare har de satellitbaserade observationerna av snövattenekvivalent från CryoLand utelämnats från denna analys.

Som ett första steg kalibrerades parametrar för snökompaktering och snöfördelning med hjälp av samtliga snöobservationer från SMHI, VRF, SVF, VF och snötäckningsgrad från CryoLand. Kalibreringsperioden för denna initiala kalibrering var också 2010-2015, eftersom detta var den enda tillgängliga period med observationer i samtliga punkter och med både snödjup och snövattenekvivalent vilket behövs för att ställa in snökompakteringsparametrarna. Nackdelen med detta är förstas att kalibreringsperioden är densamma som perioden för utvärdering av vårflodsprognoserna. Å andra sidan kalibrerades endast snörelaterade parametrar som inte har direkt med vattenbalansen eller avrinningsdynamiken att göra. Övriga parametrar, som är mer kritiska för volymfelet kalibrerades med tillrinningsdata från en oberoende tidsperiod (2000-2009) separat för var och ett av delområdena.

För var och en av delmodellerna för de 5 utvalda prognosområdena utfördes följande procedur:

1) **Kalibrering** av parametrar för snösmältning, avdunstning, höjdkorrektion av nederbörd, snöfördelningens känslighet för områdets variation i höjd, recessionskoefficienterna för avrinning från övre och undre grundvattenmagasin, samt perkulationshastigheten – kalibreringen utfördes för perioden 2000-2009 och inkluderade data för den lokala tillrinningen för respektive delområde samt den satellitbaserade snötäckningsgraden från CryoLand. Övriga snöobservationer utelämnades från denna delområdesspecifika kalibrering. Parametrarna kalibrerades automatiskt med metoden DE-MC (Differential Evolution Markov Chain; Ter Braak, 2006) genom minimering av relativt volymfel för hela simuleringsperioden 2000-2009 samt maximering av utvärderingsmättet KGE (Kling-Gupta Model Efficiency, Gupta m.fl., 2009) vilket har ungefär samma egenskaper som NSE.

2) **Initialisering** av modellen med och utan snöuppdatering inför prognoser av kvarvarande tillrinning till och med 31/7 med start 15/2, 15/4 och 15/6, för åren 2010-2015. Initialiseringen gjordes genom simuleringar för ett helt år från första oktober till sistans september (t ex 2009-10-01 t.o.m 2010-09-30) där de aktuella modelltillstånden skrevs ut 15/2, 15/4 och 15/6 för att kunna användas som starttillstånd vid efterföljande vårflodsprognoser. Initialiseringen upprepades på 7 olika sätt:

- a. enkel deterministisk simulering utan uppdatering (DET)
- b. ensemble-simulering utan assimilering av några data (E_0)
- c. uppdatering genom assimilering av tillrinningsdata (E_Q)
- d. uppdatering genom assimilering av (markbaserad) snövattenekvivalent (E_SWE)

e. uppdatering genom assimilering av snödjup (E_SD)

f. uppdatering genom assimilering av snötäckningsgrad (E_FSC)

g. uppdatering genom assimilering av snövattenekv, snödjup och snötäckningsgrad (E_AS)

I realtid går det inte att genomföra initialisering under prognosperioden på det vis som gjorts här, men för denna studie var det intressant att även kunna analysera effekten av assimileringen på den simulerade tillrinningen under hela året. Noterbart är också att initialiseringen genomfördes med Arkiv-PTHBV som drivdata, vilket i realtid inte finns tillgängligt under de sista två månaderna före den aktuella tidpunkten. I realtid används en annan nederbörds- och temperaturdatabas som kallas realtids-PTHBV, och som är baserad på ett mindre antal stationer (ungefär hälften). Realtids-PTHBV fanns inte tillgängligt för projektet när denna del av uppdateringsexperimenten utfördes. Det är dock möjligt att betydelsen av assimileringen av snödata hade påverkats om modellen initialiserats med Realtids-PTHBV istället för Arkiv-PTHBV. Skillnaden mellan Realtids-PTHBV och Arkiv-PTHBV undersöktes dock i den första delen av denna studie, se avsnitt 3.4.1 och 4.4.

Vårflodsprognoser, det vill säga prognoser för den lokala tillrinningen inom respektive prognosområde för perioderna 15/2-31/7, 15/4-31/7 och 15/6-31/7 för åren 2010-2015. Prognoser beräknades baserade på de 7 olika initialiseringsmetoderna ovan samt med två olika meteorologiska drivdata:

a. det verkliga utfallet i form av Arkiv-PTHBV

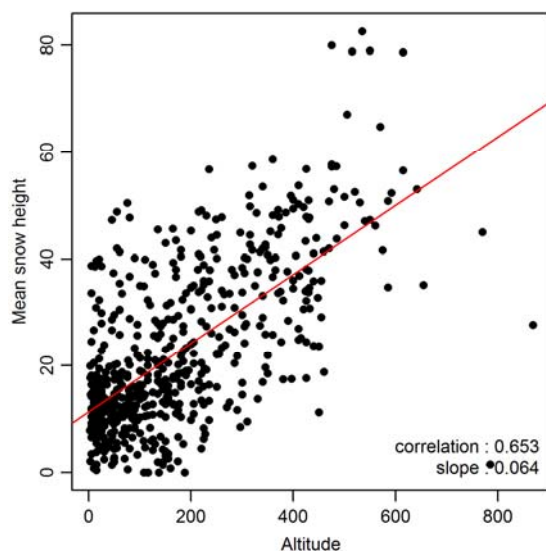
b. en ensemble av historiska år, det vill säga simuleringen utförs en gång för varje år i databasen förutom det aktuella prognosåret. Som prognos beräknades medelvärde av tillrinningen från respektive historiskt år. I denna analys användes samtliga år för perioden 2000-2015 (förutom det aktuella prognosåret).

Förutom relativt volymfel under simuleringsperiod och prognosperiod beräknades även Nash-Sutcliffe modelleffektivitetsmått.

4 Resultat och diskussion

4.1 STATISTISK ANALYS AV SNÖDJUPSMÄTNINGAR

Figur 6 visar att medelsnödjupet tydligt ökar med höjden över havet. Korrelationen mellan uppmätta snödjup visas i figur 7. Det finns som synes en betydande samvariation, också över ganska långa avstånd, vilket även visades av Lindström och Dahné (2011). I analysen har bara stationspar med minst 30 samtidiga mätningar tagits med. I datasetet med 601 stationer ingår därmed 133 377 stationspar (utav $601 \cdot 600 / 2 = 180\,300$ möjliga kombinationer), medan motsvarande siffra för de 32 stationerna är 397 par (utav $31 \cdot 30 / 2 = 465$ möjliga).



Figur 6. Medelsnödjupets höjdberoende.

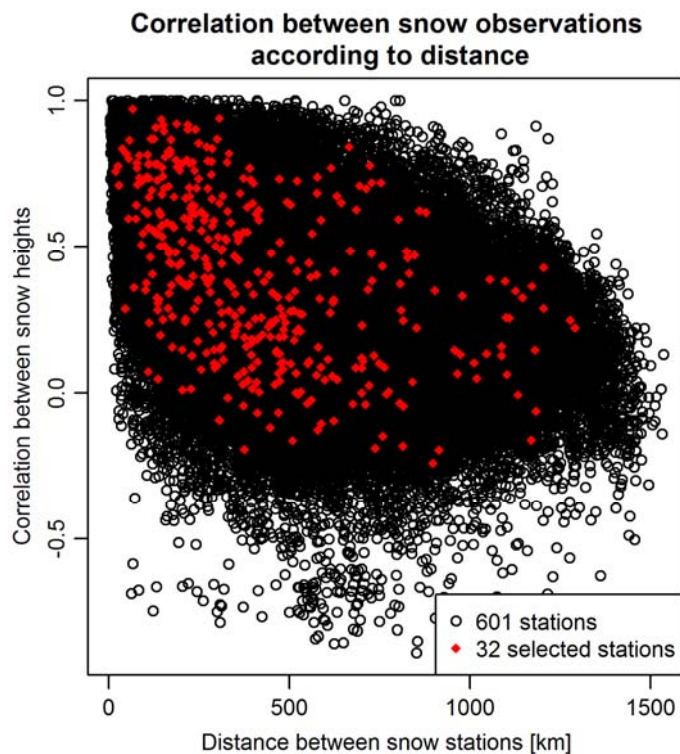
För båda dataseten beräknades korrelationen, r , som funktion av avståndet.

- För de 601 stationerna erhöles $r = -0.57$ ($r^2 = 0.33$).
- För de 32 stationerna erhöles $r = -0.47$ ($r^2 = 0.22$).

En linjär anpassning mellan korrelation och avståndet gjordes.

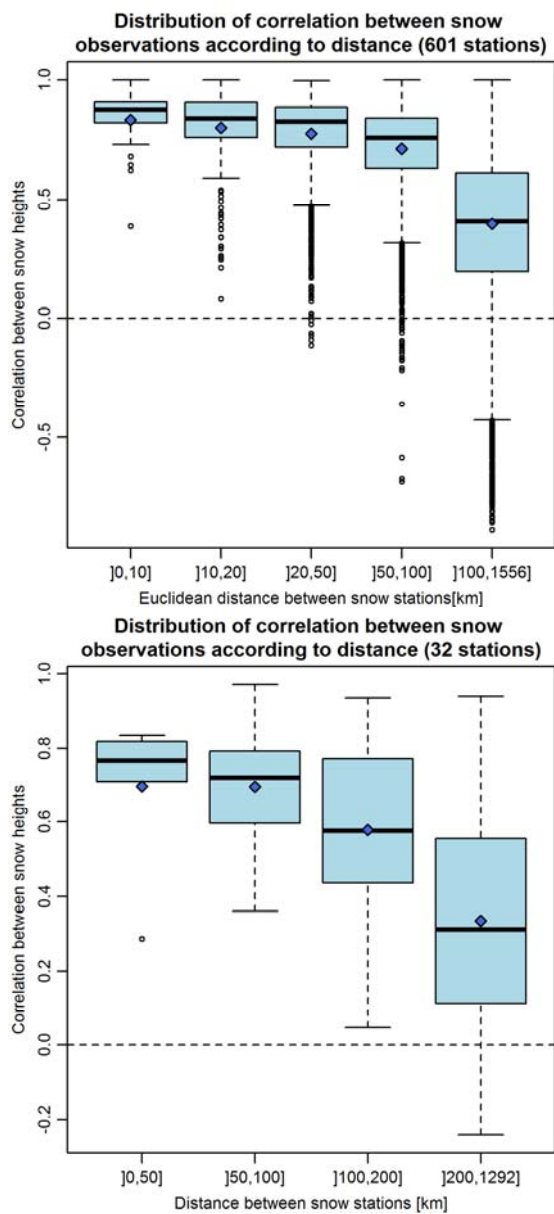
- För de 601 stationerna erhöles skärningspunkten med y-axeln = 0.66 och lutningen = -0.054%
- För de 32 stationerna erhöles skärningspunkten med y-axeln = 0.60 och lutningen = -0.048%

Materialet visas även i form av box-plottar (figur 8). Att korrelationen avtar med stora avstånd framgår tydligt i figuren.

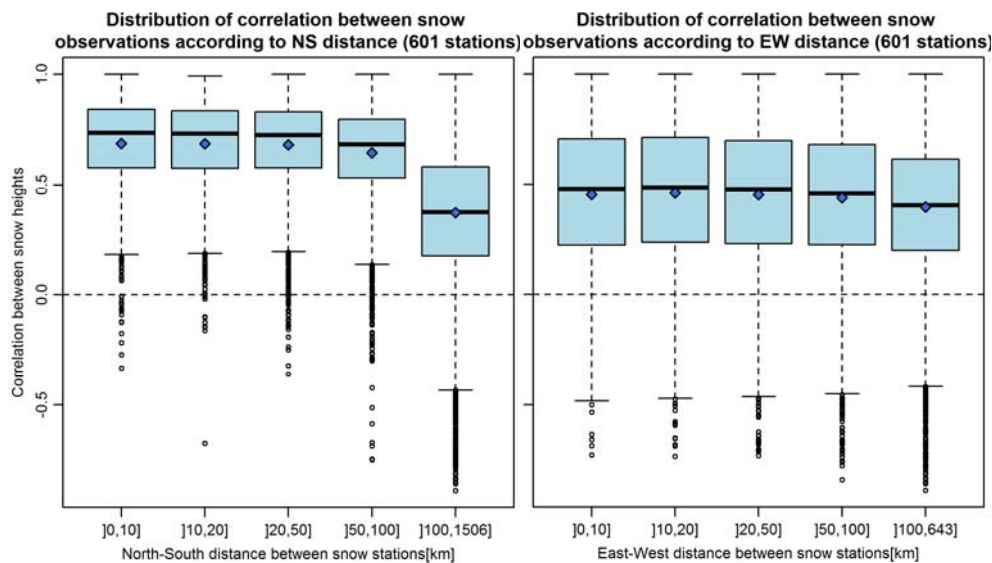


Figur 7. Snödjupets korrelation med avståndet, dels för alla 601 stationer och dels för 32 utvalda stationer av bra kvalitet.

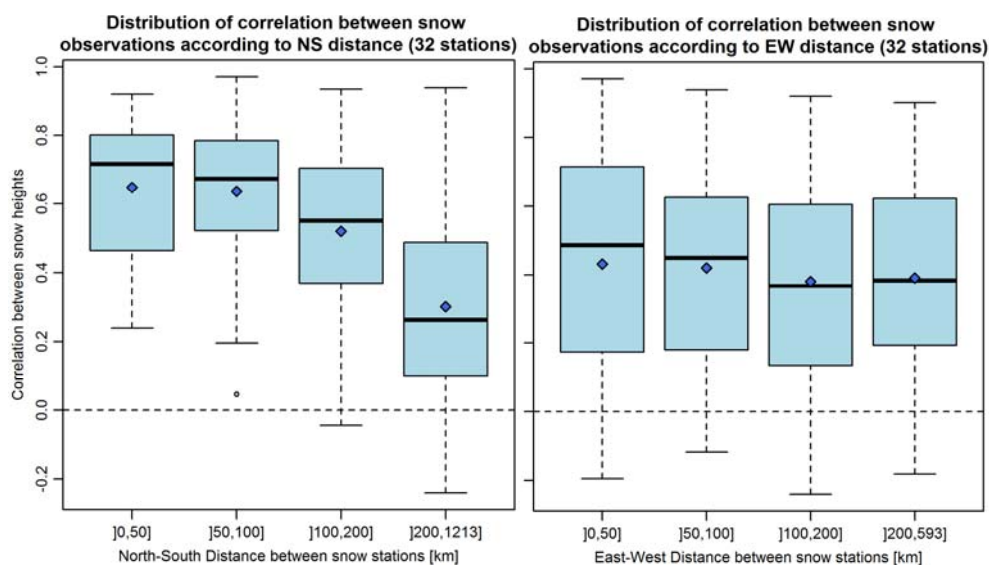
Motsvarande box-plottar visas i figurerna 9 och 10, men uppdelat i avstånden i nord-sydlig riktning respektive öst-västlig riktning. Korrelationens avståndsberoende är inte lika tydligt i dessa riktningar som beroendet av det verkliga (euklidiska) avståndet. Minskningen är mer signifikant i nord-sydlig riktning än i öst-västlig riktning. På korta avstånd är korrelationen i nord-sydlig riktning högre än i öst-västlig. Det är rimligt att korrelationen utmed fjällkedjan bör vara högre än mellan fjällen och kusten. Korrelationerna bland de 32 stationerna är mer variabel, förmodligen på grund av att det är en liten datamängd som är från platser spridda över hela landet.



Figur 8. Snödjupets korrelation med avståndet, dels för alla 601 stationer och dels för 32 utvalda stationer av bra kvalitet.



Figur 9. Snödjupets korrelation med avståndet för alla 601 stationerna, uppdelat på avståndet i nord-sydlig riktning och öst-västlig riktning.

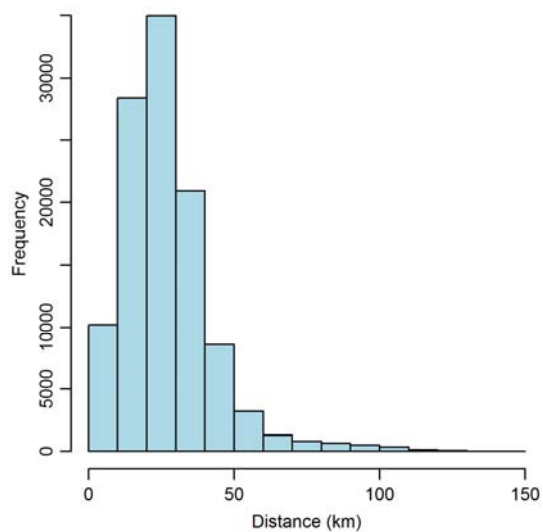


Figur 10. Snödjupets korrelation med avståndet för de 32 stationerna, uppdelat på avståndet i nord-sydlig riktning och öst-västlig riktning.

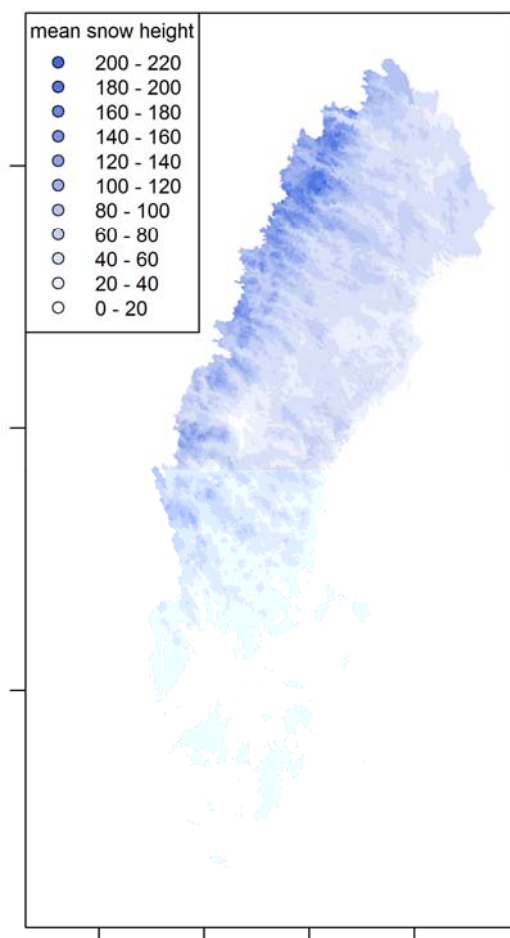
4.2 SNÖDJUPSKARTA

Figur 11 visar fördelningen av avstånden mellan områdets centroider och de 3 närmaste snödjupsstationerna. Figuren visar att de flesta avstånden är mellan 20 och 30 km och nästan alla är mindre än 50 km, vilket ger höga korrelationer (jämför figur 8). I figur 12 visar ett exempel på en snödjupskarta beräknad med den framtagen med den framtagna interpolationstekniken.

histogram of distances snow station / catchment centroid
for the snow heigh interpolation



Figur 11. Histogram över avstånden mellan områdenas centroider och snödjupsstationer använda för interpolation av snödjup.

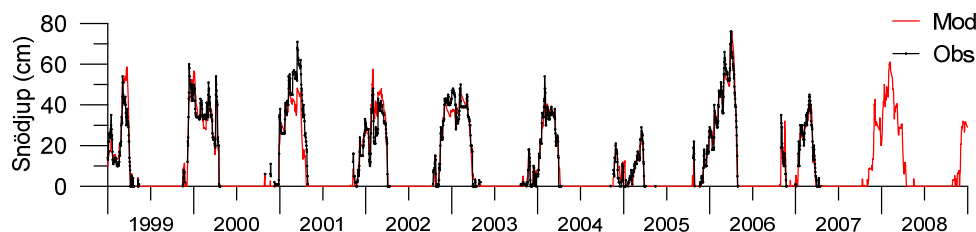


Figur 12. Beräknat medeldjup (cm) för snön, baserat på 413 snödjupsstationer med minst 60 observationer under åren 1996-2008 och en höjökning med 15cm per 100m.

4.3 MODELLERING AV SNÖDJUP OCH SNÖNS VATTENINNEHÅLL

I figur 13 visas ett exempel på snödjup beräknat med den modifierade densitetsmodellen jämfört med uppmätt snödjup från Malung. I detta exempel har snösmältningsparametrar och densitetsparametrarna kalibrerats lokalt för denna mätserie. Överensstämmelsen mellan snödjupen är som synes god.

Resultat från kalibreringen av den förenklade HBV-modellen som användes i denna studie sammanfattas i tabell 3 och figur 14. Motsvarande mätetal från den senaste S-HYPE-versionen finns med för jämförelse i tabell 3. Som synes är anpassningen nästan lika hög ($NSE \approx 0.85$) som i S-HYPE ($NSE \approx 0.87$), trots att den här framtagna modellen är betydligt enklare. För de åtta områdena som går att jämföra med resultaten i rapporten av Lindström och Dahné är NSE något högre i denna rapport (om än inte för exakt samma tidsperiod). Precisionen i vattenföring (mätt som NSE) var ungefär lika hög i olika delar av landet, medan NSE för snödjupen var mycket högre i norra Sverige än i söder. Att träffa rätt i tiden är betydligt svårare i södra Sverige än i norr med stabilare vintrar. Särskilt utmed kusterna var det svårt att få höga NSE-värden (se figur 14). Figur 15 visar ett exempel på beräkningar av snödjup och vattenföring för avrinningsområdet Medstugusjön, jämfört med motsvarande mätvärden. Medstugusjön ligger nära norska gränsen i Jämtland, och är ett av de områden som specialstuderades av Lindström och Dahné (2011).

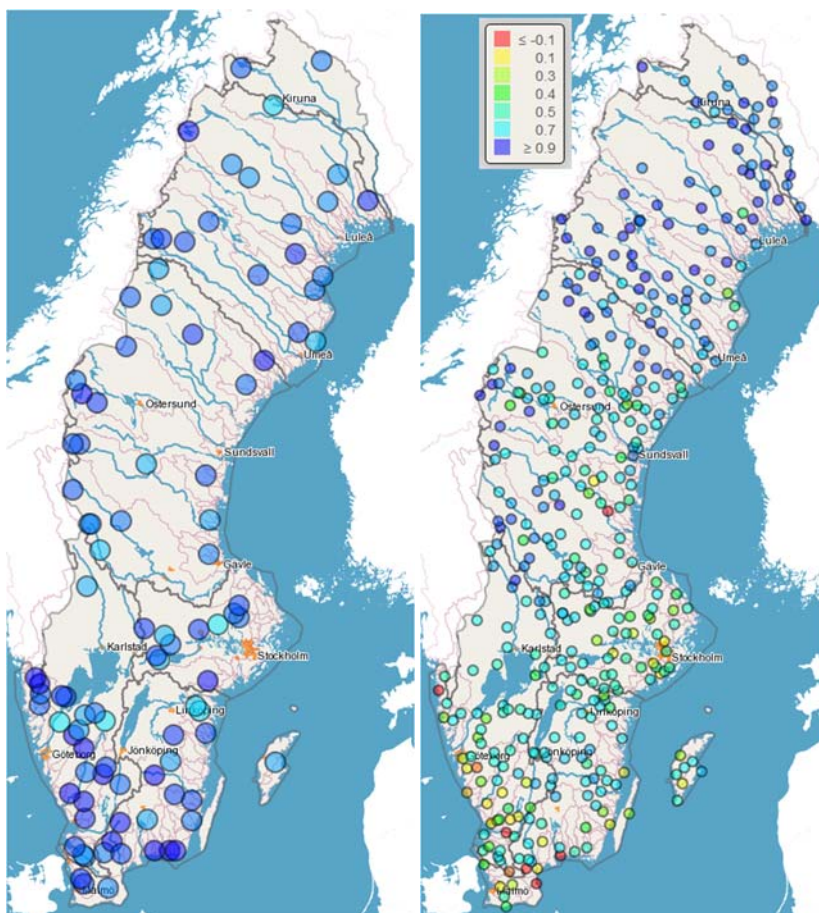


Figur 13. Exempel på beräknat och uppmätt snödjup, Malung.

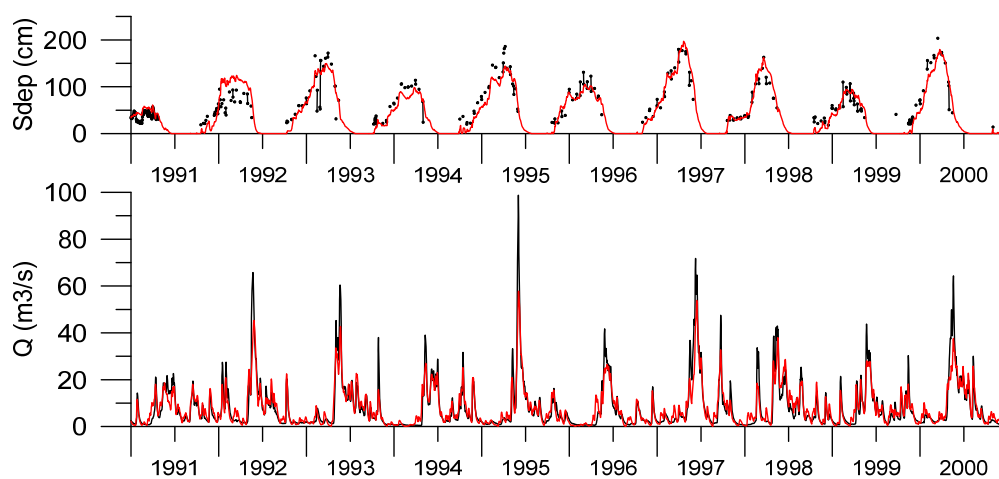
Tabell 3. NSE och absoluta volymfel över vårfloden, i medeltal för kalibreringen.

1) 1999-2008

Mått	Alla 97 stationer	95 stationer	95 stationer S-HYPE ¹⁾	413 snödjups-stationer
NSE	0.846	0.845	0.866	0.632
Volfel	18.3%	-	-	-



Figur 14. NSE för kalibreringsperioden 1991-2000 för de 97 vattenföringsstationerna (t.v.) och för de 413 snödjupsstationerna (t.h.). Samma skala används i båda kartorna (se legend t.h.).



Figur 15. Exempel på snödjup (punkterna från snödjupskartan) och vattenföring för avrinningsområdet Medstugusjön, utan uppdatering.

4.4 UPPDATERING MED HJÄLP AV SNÖDJUPSMÄTNINGAR

Resultat från uppdateringsförsöken sammanfattas i tabell 4. I både metoderna 1 och 3 testades flera olika värden på snöns höjdberoende. Resultaten i tabellen avser beräkningar med 15 cm ökning per 100 m, som är den ökning som gav bäst resultat.

Tabell 4. Resultat från uppdateringsförsöken, uppdatering hela året. Medel över alla områdena.

Mått	Utan uppdat.	Uppdat. Metod 1	Uppdat. Metod 2	Uppdat. Metod 3	Uppdat. Metod 4
NSE	0.846	0.725	0.780	0.778	0.686
Volfel	18.3%	30.6%	25.2%	21.9%	31.8%

Uppdateringarna försämrade tyvärr i allmänhet resultaten. Resultaten blev sämre än i den föregående studien (Lindström och Dahné, 2011). En bidragande orsak kan vara att den avrinningsmodell som användes här är något bättre än den i den föregående rapporten. En annan kan vara att den föregående studien endast innehöll 10 avrinningsområden där det fanns lämpliga snödjupsstationer i närheten, medan denna studie innehåller ett större material. I det här använda större materialet ingår många stationer med glesa avläsningar. Osäkerheterna i observationsmaterial är som nämnts ovan stora. Uppdateringen med hjälp av mätningar från låg höjd tycks ofta leda till försämrade resultat eftersom snösmältningen på låg höjd och höjd inte stämmer sker samtidigt. Snön tar slut tidigare på låg höjd. Detta kan leda till en underskattning av snömängden på hög höjd om man låter snömängden där följa med utvecklingen på lägre höjd. I försöket med metod 4 användes troligen en för hög procentuell ökning av snön med höjden. Det är troligt att bättre resultat skulle erhållas om metoden finjusterades.

I tabell 5 visas resultat från testerna där uppdateringen endast gjordes innan snösmältningen (här 1 januari – 1 mars). En jämförelse mellan tabellerna 5 och 6 visar att resultaten blir bättre när man inte uppdaterar under snösmältningen, men fortfarande sämre än utan någon uppdatering alls.

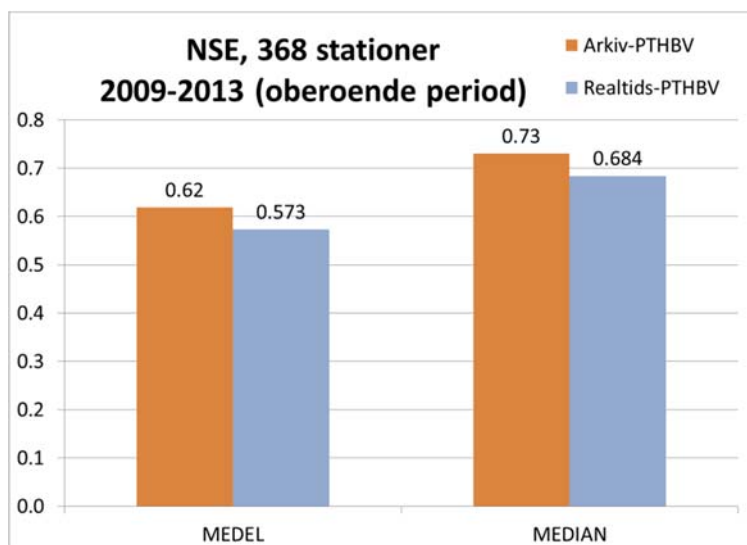
Tabell 5. Resultat från uppdateringsförsöken, uppdatering endast 1 januari – 1 mars. Medel över alla områdena.

Mått	Utan uppdat.	Uppdat. Metod 2	Uppdat. Metod 4
NSE	0.846	0.825	0.803
Volfel	18.3%	20.7%	20.6%

Resultat från experimentet med klimatologiska drivdata sammanfattas i tabell 6. I detta experiment förbättrades vattenföringssimuleringen tack vare uppdateringen. Jämfört med dåliga drivdata, i det här fallet skapade som klimatologisk nederbörd och temperatur, kan uppdateringen med hjälp av snödjupsmätningar vara värdefullt. I verkligheten är dock försämringen som man får med Realtids-PTHBV jämfört med Arkiv-PTHBV betydligt mindre än försämringen i testet i tabell 6, se figur 16. Figuren visar en ganska måttlig skillnad mellan de två beräkningarna. Beräkningarna är gjorda med S-HYPE och avser en oberoende period. Cirka hälften av stationerna är reglerade.

Tabell 6. Resultat från uppdateringsförsöken där modellen helt drevs med klimatologiska data. Medel över alla områdena.

Mått	Utan uppdat.	Uppdat. Metod 1	Uppdat. Metod 2	Uppdat. Metod 3
NSE	-0.559	-0.041	-0.037	0.003
Volffell	124%	43.1%	43.6%	37.9%

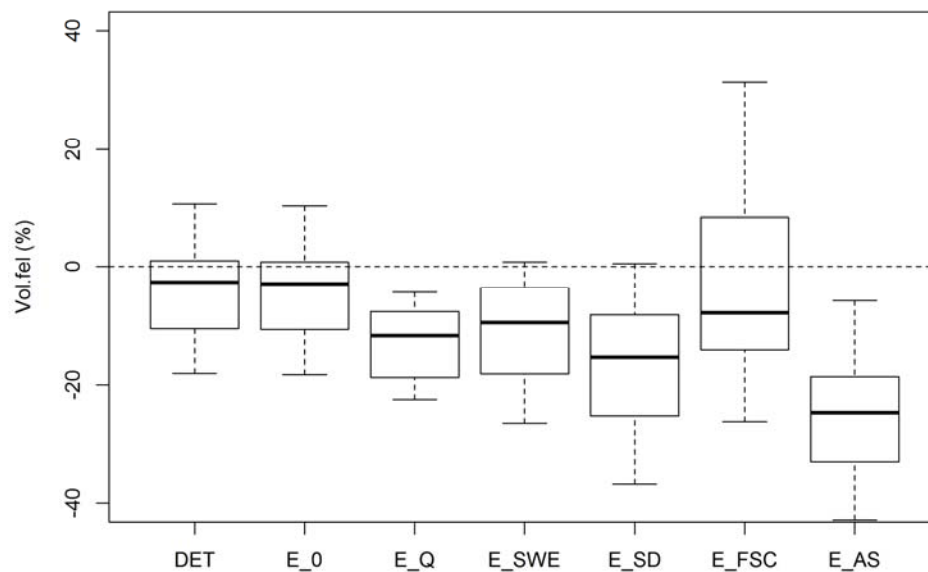


Figur 16. Resultat från simuleringar där S-HYPE-modellen drevs med Arkiv-PTHBV jämfört med Realtids-PTHBV.

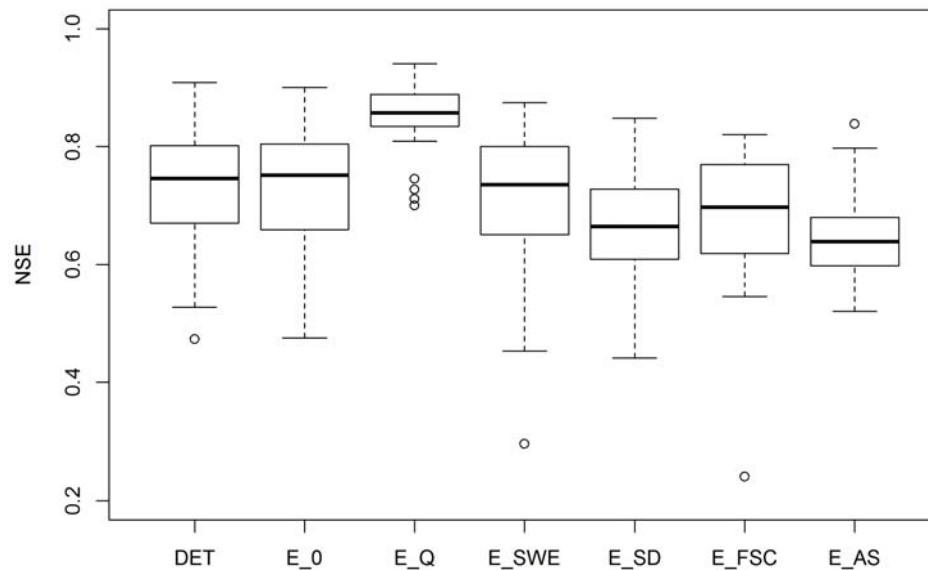
4.5 RESULTAT FRÅN ASSIMILERING AV SATELLITDATA

4.5.1 Resultat av kalibrering och assimilering

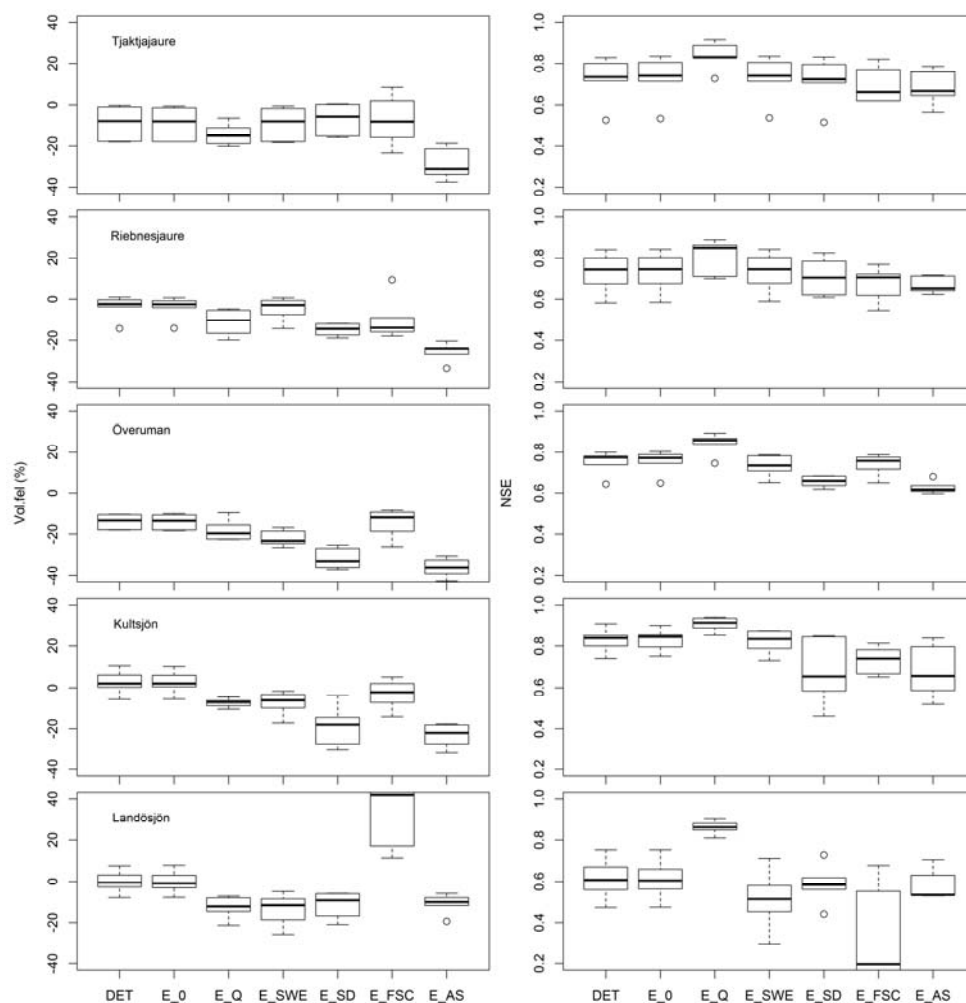
Resultaten från initialiseringssimuleringarna med dataassimilering visar att simuleringen av tillrinningen i de flesta fall blir något sämre efter uppdatering med snömätningarna under initialiseringsperioden. För enskilda år och i vissa områden kan assimilering av till exempel Vattenregleringsföretagens snövattenekvivalentmätningar och CryoLands snötäckningsgradsprodukt leda till förbättrade simuleringar både vad gäller volymfel (Figur 17, Tabell A.1) och NSE (Figur 18, Tabell A.2). Summerat över alla år och alla områden ger dock referenssimuleringen med Arkiv-PTHBV lägre volymfel och åtminstone inte mycket sämre NSE-värden än med uppdatering genom dataassimilering. Det är intressant att notera att assimileringen av tillrinningsdata (E_Q) ger de överlägset bästa NSE-värdena, men det relativa volymfelet blir däremot större och inte mindre jämfört med referenssimuleringen (DET) (Figur 17-18, Tabell A1-A2). Det går även att se ett mönster att assimileringen av snödata (både SWE, snödjup och snötäckningsgrad) oftare förbättrar simuleringarna i de mer nordliga och snörika områdena och betydligt oftare försämrar simulerad tillrinning i de mer sydliga områdena (Figur 19). Detta indikerar att initialvärdena för prognosen (snö och markvattenförråd efter uppdatering) spelar mindre roll ju längre söderut och ju mindre snö och mera regn som dominerar tillrinningen.



Figur 17. Volymfel (%) i simulerad tillrinning under initialisering och vårfloidsperiod (10/1-31/7) med assimilering observerad tillrinning (E_Q), snövattnenекivalent (E_SWE), snödjup (E_SD), snötäckningsgrad (E_FSC) och samtliga snödata (E_AS) jämfört med en deterministisk (DET) och en ensemble-simulering (E_O) utan assimilering, baserat på samtliga 5 testområden och samtliga år (2010-2015).



Figur 18. Samma som Figur 17 men för Nash-Sutcliffe modelleffektivitetsmått, NSE.



Figur 19. Volymfel (%) i simulerad tillrinning under initialisering och vårfloidsperioden (10/1-31/7) uppdelat på respektive studieområde sorterat från norr och söderut (Tjaktjajaure, Riebnjesjaure, Överuman, Kultsjön, och Landösjön) med assimilering observerad tillrinning (E_Q), snövattekvivalent (E_SWE), snödjup (E_SD), snötäckningsgrad (E_FSC) och samtliga snödata (E_AS) jämfört med en deterministisk (DET) och en ensemble-simulering (E_O) utan assimilering, baserat på samtliga år (2010-2015).

4.5.2 Vårfloidsprognoser efter snöuppdatering med Ensemble Kalman filtermetoden

Tittar vi på vårfloidsprognoser så tycks snöuppdateringen med EnKF ge lite tydligare förbättringar (Tabell 7, Figur 20-24 och Tabell A3-A4). För dessa prognoser har modellen initialiserats med eller utan assimilering av de olika observationerna under initialiseringsperioden från 10/1 föregående år till och med prognosstart 15/2, 15/4 eller 15/6. Prognoserna har sedan gjorts genom simulering med drivdata antingen från det aktuella året (vänsterspalt i Figur 20-24 och Tabell A3) eller från en ensemble av historiska år (högerspalt i Figur 20-24 och Tabell A4).

För en översiktlig analys har medelvärdet av det relativa volymfelet samt en relativ förbättringsgrad i prognoser initialiserade med assimilering sammanställts i Tabell 7. Dessa övergripande resultat är baserade på samtliga områden (Tjaktjajaure, Riebnjesjaure, Överuman, Kultsjön och Landösjön) och samtliga år (2010-2015) i

analysen. Det relativa volymfelet i referensprognoserna var omkring 20-30 % för prognoser med start 15/4 beroende på om det sydligaste och mest låglänta området Landösjön tas med eller inte. Tas Landösjön med så ökar medelfelet för prognoserna med start 15/6 till över 60%. Generellt sett var volymfelen i vårflodsprognoserna betydligt högre för Landösjön än för övriga områden, speciellt för prognoser med start 15/6 men även för prognoser från 15/4 (se Figur 24 och Tabell A4). Volymfelen i prognoserna med aktuella drivdata var däremot ungefär lika bra i Landösjön som i övriga områden (Tabell A3). Det indikerar möjligen att detta område är mer känsligt för osäkerheter i den meteorologiska prognosen än osäkerheter i det initiala snömagasinets storlek. I Tabell 7 finns därför den övergripande analysen med och utan Landösjön inräknad i resultaten.

Assimilering av manuella observationerna av snövattenekvivalent och snödjup gav i medeltal en relativ förbättringsgrad i vårflodsprognoserna 15/4 och 15/6 på ungefär 20-30 % jämfört med prognoser initialiserade utan assimilering (Tabell 7), oavsett om vi utesluter Landösjön eller inte. Om Landösjön utesluts så ger även assimilering av satellitbaserad snötäckningsgrad en relativ förbättring av volymfelen på omkring 20-30%. Som jämförelse kan nämnas att vårflodsprognoserna med observationer från de aktuella åren som drivdata (så kallade "perfekta" prognoser) gav relativa volymfel på omkring 10-15% för prognosperioder som starta 15/4 och 15/6, vilket motsvarar relativa förbättringsgrader på mer än 50 % jämfört med de klimatologiska prognoserna. Det vill säga, osäkerheterna i de meteorologiska prognoserna dominerar över osäkerheter i snömagasinets storlek vid prognosstart.

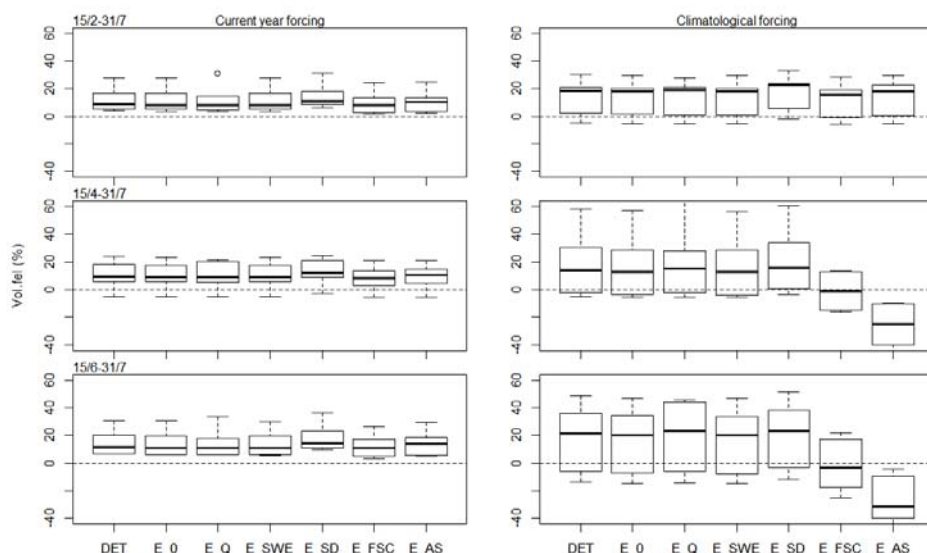
Tabell 7. Relativt volymfel i de klimatologiska vårflodsprognoserna, med och utan assimilering av observationer under initialiseringsperioden, som medelvärde över samtliga testområden och år, samt relativ förbättringsgrad i volymfelet för prognoser efter assimilering jämfört med referensprognoserna.

		Typ av initialisering*						
Prognosstart		DET	E_0	E_Q	E_SWE	E_SD	E_FS C	E_AS
	<u>Utan Landösjön</u>							
15/2	Vol.fel %	13	13	15	14	16	13	16
15/4		23	21	30	19	22	15	29
15/6		29	27	35	23	23	23	28
15/2	Rel.förb %		-1	19	6	24	-2	24
15/4			-7	29	-19	-4	-33	27
15/6			-6	21	-20	-19	-20	-3
	<u>Landösjön inräknad</u>							
15/2	Vol.fel %	14	14	17	17	17	14	17
15/4		33	31	38	23	26	73	33
15/6		63	61	67	50	51	111	56
15/2	Rel.förb %		0	24	21	25	-2	24
15/4			-6	13	-31	-22	117	-2
15/6			-3	7	-21	-19	77	-11

* Typ av initialisering anger vilka resultat som är baserade på assimilering av observerad tillrinning (E_Q), snövattenekvivalent (E_SWE), snödjup (E_SD), snötäckningsgrad (E_FSC), samtliga snövariabler

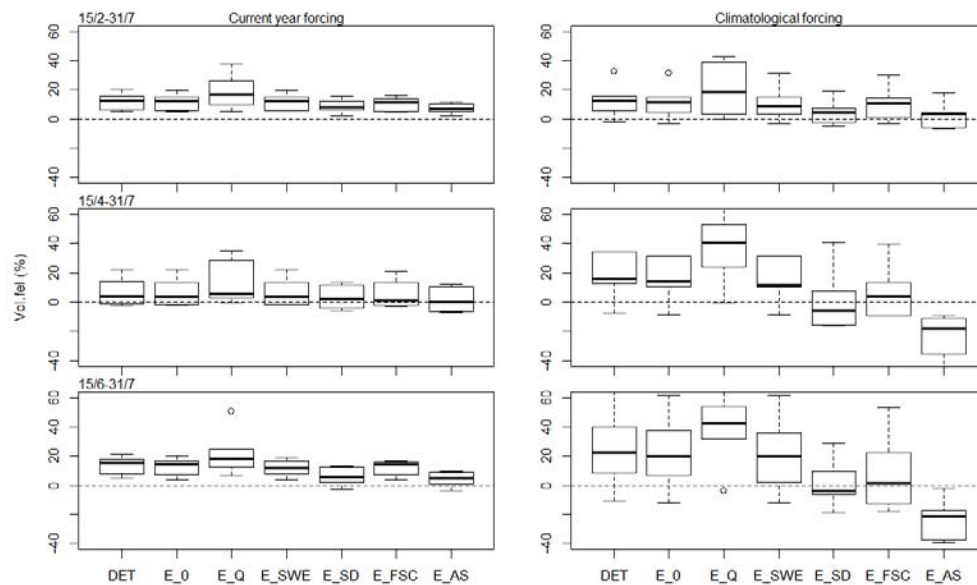
(E_AS), ensembler utan assimilering (E_0) eller en deterministisk simulering (DET) som används som referens för den relativa förbättringsgraden.

Tittar vi i mer detalj på resultaten från de individuella områdena kan vi se att i de nordligare områdena utan VRF's manuella snöobservationer (Tjaktjajaure, Ribnesjaure) är det framförallt snötäckningsgrad och SMHI's snödjupsmätningar som har störst påverkan på vårflodsprognosernas volymfel. I båda dessa områden finns manuella mätningar av snövattenekvivalent vid ett tillfälle per år, men dessa tycks inte ha gett avtryck i dessa resultat (för Tjaktjajaure saknades dessutom data för de 2 senaste åren, vilket kan förklara en del av okänsligheten för dessa data i denna undersökning). Det är också tydligt att såväl vårflodsprognoserna med klimatologiska drivdata som simuleringarna med aktuella observationer som drivdata systematiskt överskattar vårflodsvolymen i dessa simuleringar, vilket kan tyda på att modellkalibreringen inte har varit representativ för denna period.

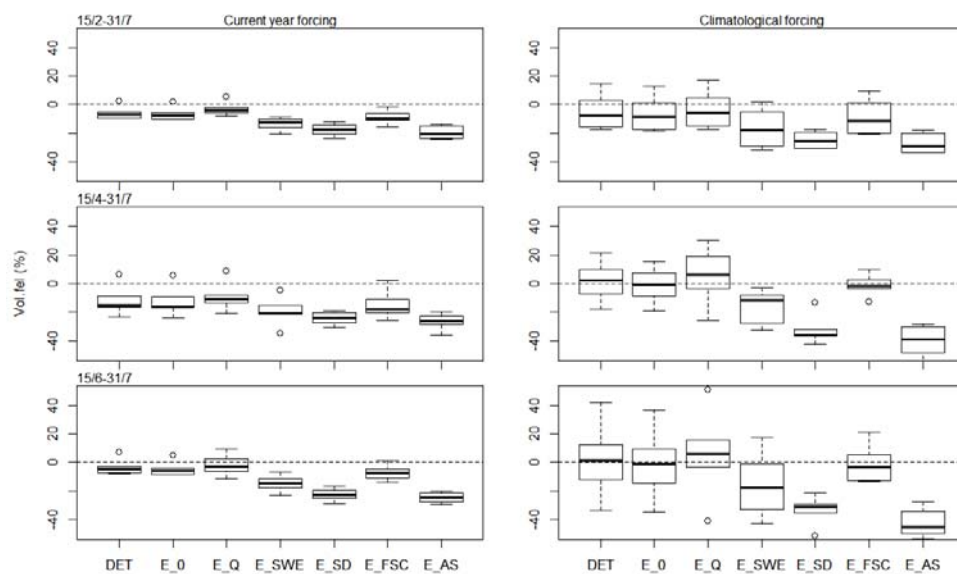


Figur 20. Volymfel i vårflodsprognoser för Tjaktjajaure, för perioderna 15/2-31/7 (överst), 15/4-31/7 (mitten) och 15/6-31/7 (nederst) 2010-2015. Till vänster resultat med drivdata från aktuella året, och till höger resultat med en ensemble av historiska år som drivdata. Kategorierna representerar simuleringar med initialisering (från 1/10 föregående år till prognostart) med assimilering av observerad tillrinning (E_Q), snövattenekvivalent (E_SWE), snödjup (E_SD), snötäckningsgrad (E_FSC), och samtliga snödata (E_AS), samt en deterministisk- (DET) och en (E_0) utan assimilering.

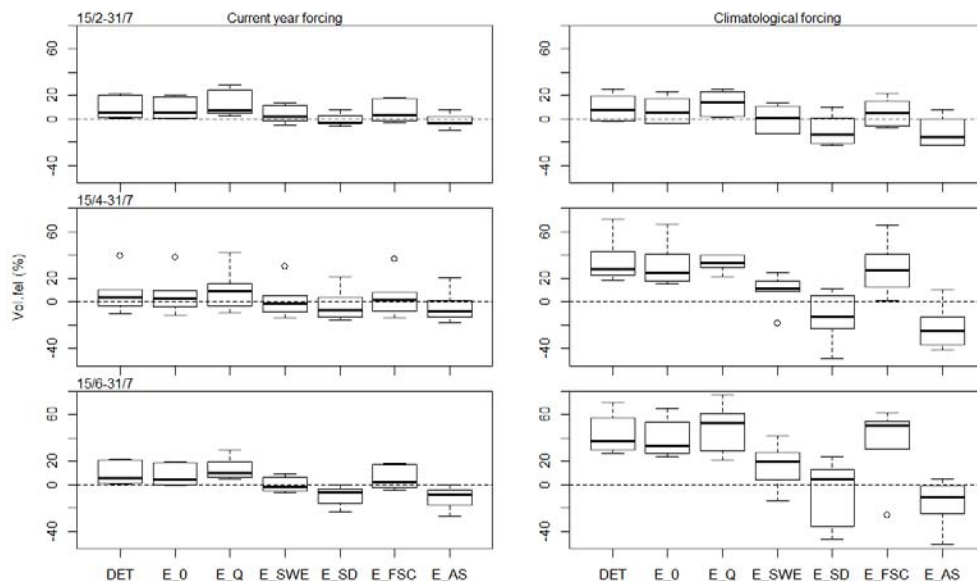
De tre områdena med VRF's snövattenekvivalentobservationer i närheten av regleringsdammarna (Överuman, Kultsjön och Landösjön) uppvisade delvis olika resultat (Figur 22-24, och Tabell A3-A4). I Överuman gav både assimileringen av VRF's snövattenekvivalentdata och SMHI's snödjupsdata klart sämre resultat, både för de klimatologiska vårflodsprognoserna (högerspalt i Figur 22, och Tabell A4) och simulerad vårflod med aktuella observationer som drivdata (vänsterspalt i Figur 22, och Tabell A3). Detta gällde oavsett prognosstart och assimilerad snövariabel. Däremot erhöles en förbättring av vårflodsprognoserna efter assimilering av satellitbaserad snötäckningsgrad, speciellt för vårflodsprognos med start 15/4 men även för prognos efter 15/6.



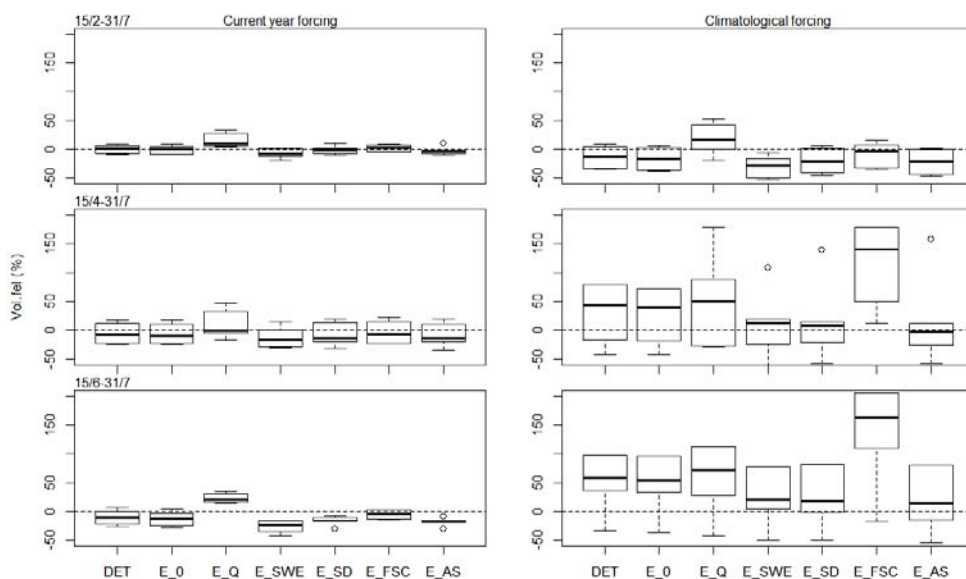
Figur 21. Samma som Figur 20, men för området Riebnesjaure.



Figur 22. Samma som Figur 20, men för området Överuman



Figur 23. Samma som Figur 20, men för området Kultsjön.



Figur 24. Samma som Figur 20, men för området Landösjön.

I Kultsjön gav assimilering av VRF's snövattenekvivalentobservationer förbättring av vårflodsprognoserna både för de klimatologiska (högerspalt i Figur 23) och de "perfekta" prognoserna med aktuella observationer som drivdata (vänsterspalt i Figur 23). Däremot gav inte assimilering av snötäckningsgrad samma förbättring. Det tycks finnas ett mönster att assimilering av de satellitbaserade snötäckningsgradsdata gav förbättringar i de mer snörika områdena längre norrut, och försämringar längre söderut, medan assimilering av manuella snövattenekvivalentobservationer var mer framgångsrikt i Kultsjön och Landösjön än längre norrut. Resultaten för Landösjön visar tydligt på problemen med de stora och varierade volymfelen i de klimatologiska prognoserna jämfört med de perfekta prognoserna för detta område (notera skillnad i skalan på y-axeln i Figur 24 jämfört med Figur 20-23), vilket har diskuterats tidigare.

Assimileringen av manuella snödjup och snövattenekvivalent gav dock tydliga förbättringar av de klimatologiska vårflodsprognoserna även här för prognosstart 15/4.

5 Slutsatser och rekommendationer för framtida utveckling

- Fyra relativt enkla metoder för uppdatering av snödjupet formulerades och testades i en förenklad HBV-modell. Ingen av metoderna gav någon genomsnittlig förbättring av vårflödesprognoserna. Av de testade metoderna tycks en generalisering av avvikelserna från normalvärden fungera bättre än generalisering av det faktiska snödjupet.
- Uppdatering baserad på dataassimilering med metoden Ensemble Kalmanfilter (EnKF) testades med en distribuerad snö- och tillrinningsmodell (HOPE) med en liknande struktur som HBV-modellen. Initialisering av modellen med uppdatering genom assimilering av manuella och satellitbaserade snömätningar gav små men genomsnittliga förbättringar av vårflödesprognoserna i 4 av 5 testområden. Manuella snövatten-ekvivalentmätningar gav mer stabila förbättringar i områden med tidig avsmältning, medan satellitbaserade snötäckningsgradsdata gav störst förbättringar i mer snörika områden med senare vårflod.
- Att det är svårt att förbättra vårflödesprognoserna beror troligen delvis på att den nederbördsuppskattning som används (Arkiv-PTHBV) är så bra. I praktiken är Realtids-PTHBV inte lika bra som Arkiv-PTHBV, som användes som jämförelse här. Om man har mycket dåliga drivdata, i det här fallet skapade som klimatologisk nederbörd och temperatur, kan uppdateringen med hjälp av snödjupsmätningar förbättra resultaten. De använda snödjupen kommer från platser där man också mäter nederbörden. Nederbörden är ju just snöfallets vatteninnehåll. Det är möjligt att snödjup från mätpunkter där nederbörden inte mäts skulle kunna förbättra resultaten. Ytterligare problem är att snödjupsmätningarna vid många stationer är av tveksam kvalitet, att de är sporadiska i tiden, och att de görs på platser som inte är så representativa för snötillgången i avrinningsområden.
- Snödjupen är korrelerade i rummet, vilket användes till att ta fram en snödjupskarta baserad på mätvärdena. Om man vill arbeta vidare med uppdatering med hjälp av snödjupsmätningar är den metod som bygger på snödjupskartan troligen den bästa. Snökartan i sig ger ett mervärde och kan enkelt jämföras med annan information i kartform. Snökartan kan förmodligen vidareutvecklas. Ett förslag är att ändra vikterna för olika snöstationer beroende på riktning (N/S, Ö/V) eftersom vi såg att korrelationen i nord-sydlig riktning är högre än i öst-västlig. Höjdkorrektionen kunde också göras med olika värden beroende på medelhöjd för området.
- Snöns densitet är också en grundläggande fråga, men det finns ganska få densitetsmätningar. En förbättrad densitetsmodell togs fram i projektet. Hur snökartan skulle kunna förbättras med hjälp av densitetsmätningar har inte studerats i detta arbete, men skulle kunna vara en naturlig fortsättning.
- Assimileringsstudien visar att det finns potential att uppdatera de hydrologiska modellerna genom dataassimilering – både med manuella observationer och med satellitbaserade data. Den stora skillnaden jämfört med

att enbart uppdatera snödjupet – som också testats i denna studie – är att data-assimileringen uppdaterar hela modellen, det vill säga alla tillståndsvariabler, och att osäkerheter i de olika komponenterna av prognoskedjan kan beaktas på ett konsistent sett.

- Assimileringsresultaten visar också att det inte kan uteslutas att det finns ett värde i de manuella snömätningar som utförs av vattenkraft- och vattenregleringsföretagen. Vårflodsprognoserna blev i medeltal omkring 20 % bättre sett till volymfel ett flertal av testområdena vid uppdatering med dessa data.
- Denna studie fokuserade på uppdatering med snödjupsdata, men resultaten visar också att det finns möjlighet att på ett systematiskt och automatiserat sätt uppdatera snötäcket i modellerna genom assimilering av observerad tillrinning.
- Även om vi har kunnat visa på potentialen att använda dataassimilering för snöuppdatering återstår mycket arbete för att bättre förstå och utreda betydelsen av en rad olika antaganden och delmoment i assimileringsmetodiken – till exempel:
 - o I denna studie har assimileringssmetoden Ensemble Kalmanfilter använts, men det finns även andra metoder, till exempel så kallade partikelfilter. Partikelfilter kräver som regel ett större antal ensemblemedlemmar - det vill säga större beräkningskrav – men ger större frihet i vilka statistiska fördelningar som kan antas för ensemblegenereringen, och bevarar vattenbalansen bättre för respektive ensemblemedlem genom att inte linjärtransformera modelltillstånden vid uppdateringen utan endast förändra den relativa vikten för medlemmarna inom ensemblen.
 - o Hur påverkas resultatet av genereringen av drivdataensemblerna? I denna studie gjordes förenklade antaganden om statistisk fördelning (normal) och rumslig korrelation för temperatur och nederbörd, men ingen systematisk känslighetsanalys eller utvärdering av realismen i dessa antaganden gjordes. För varje tidssteg genererades nya slumpmässiga störningar på drivdata – kanske vore det bättre ur uppdateringsynpunkt om samma ensemblemedlem alltid har lite högre/lägre temperatur, istället för att byta egenskap mellan varje tidssteg? Överhuvudtaget borde osäkerheten i framförallt nederbördsdata både i tid och rum beaktas mer systematiskt. Kan till exempel förskjutning i tiden av nederbördstillfällen tillföra ytterligare frihetsgrader till ensemblen och förbättra möjligheten att assimilera informationen från observationerna?
 - o Assimilering av satellitbaserade snövattenekvivalentdata utlämnades från denna studie. Tidigare analyser har visat att nuvarande satellitprodukter inte är tillförlitliga i fjällmiljö, men att det finns användbar information åtminstone i områden med mindre topografisk variation och under den kalla delen av vintern. För framtiden rekommenderas även att vidareutveckla metodik för att assimilera data från passiv mikrovågsstrålning direkt i de hydrologiska modellerna tillsammans med manuella snödjupsdata.

6 Referenser

- Arheimer, B., Lindström, G. & Olsson, J. (2011) A systematic review of sensitivities in the Swedish flood-forecasting system. *Atmospheric Research* 100 (2011) 275–284.
- Bergström, S. (1976) Development and application of a conceptual runoff model for Scandinavian catchments. SMHI Reports RHO, No. 7, Norrköping.
- Evensen, G. (1994) Sequential data assimilation with non-linear quasi-geostrophic model using Monte-Carlo methods to forecast statistics. *J Geophys Res-Ocean*, 99, 19143-10162.
- Gustafsson, D., Ahlberg, J., Feicabrino, J., Lindström, G., Lundberg, A., Sundström, N., Wetterhall, F. (2012) Distribuerade system för förbättrade snö- och avrinningsprognoser. Integration i hydrologiska modeller. Slutrapport. Elforsk rapport 12:53.
- Gupta, HV., Kling H., Yilmaz, KK., Martinez, GF. (2009) Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria: Implications for improving hydrological modelling. *Journal of Hydrology*, 377 (1-2), 80-91. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2009.08.003. ISSN 0022-1694.
- Johansson, B. (2002) Estimation of areal precipitation for hydrological modelling in Sweden. Earth Sciences Centre, Department of Physical Geography, Göteborg University. Doctoral Thesis A76.
- Johansson, B, Dahné, J., Gustafsson, D. (2015) Vindrelaterad snöfördelning i hydrologiska modeller. Energiforsk rapport 2015:207.
- Lindström, G., Bishop, K. & Ottosson-Löfvenius, M. (2002) Soil frost and runoff at Svartberget, northern Sweden - measurements and model analysis. *Hydrological Processes*, Vol. 16, No. 17, 3379-3392.
- Lindström, G. & Dahné, J. (2011) Snödjupsmätningar för uppdatering av prognosmodeller. Elforsk rapport 11:71.
- Magnusson J, Gustafsson D, Hüsler F, Jonas T (2014): Assimilation of point SWE data into a distributed snow cover model comparing two contrasting methods. *WRR*, 50.
- Nash, J.E. & Sutcliffe, J.V. (1970) River flow forecasting through conceptual models. Part I - A discussion of principles. *Journal of Hydrology*, Vol. 10(3), pp. 282-290.
- Pullianen, J.T., Grandell, J., Hallikainen, M.T. (1999) HUT snow emission model and its application to snow water equivalent retrieval. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 37 (3), 1378-1390. DOI: 10.1109/36.76330.
- Strömqvist, J., Arheimer, B., Dahné, J., Donnelly, C. & Lindström, G. (2012) Water and nutrient predictions in ungauged basins: set-up and evaluation of a model at the national scale, *Hydrological Sciences Journal*, 57:2, 229-247.
- Ter Braak, CJF. (2006) A Markov Chain Monte Carlo version of the genetic algorithm Differential Evolution: easy Bayesian computing for real parameter spaces *Stat Comput* (2006) 16:239–249. DOI 10.1007/s11222-006-8769-1.

Turner, M.R.J, Walker, J.P., and Oke, P.R., 2008: Ensemble member generation for sequential data assimilation. *Remote Sensing of Environment*, 112, 1421–1433.

Wern, L. (2015) Snödjup i Sverige 1904/05 – 2013/2014. SMHI Rapport Meteorologi Nr 158.

7 Appendix

7.1 TABELLER MED RESULTAT FRÅN ASSIMILERINGSEXPERIMENTEN

Tabell A.1: Medel av absolut relativt volymfel i lokal tillrinning (%) under initialiseringssimuleringarna (1 oktober-sista september, 2009-2015) i de 5 prognosområdena, med/utan assimilering av lokal tillrinning (E_Q), snövattekvivalent uppmätt av VRF, SVF, och VF (SWE), snödjup uppmätt av VRF och SMHI (E_SD), snötäckningsgrad från CryoLand (E_FSC) samt med samtliga snöobservationer E_AS). ENS_0 är ensemble-simuleringar utan assimilering och DET är referensen, en enkel deterministisk simulering.

Område	DET	E_0	E_Q	E_SWE	E_SD	E_FSC	E_AS
Tjaktjajaure	8.8	8.9	14.3	9.0	7.1	10.9	28.9
Riebnesjaur e	4.0	4.1	11.3	4.8	14.9	13.4	25.4
Överuman	14.0	14.0	18.2	22.1	31.8	14.4	36.1
Kultsjön	4.4	4.3	7.3	7.4	18.7	5.8	23.2
Landösjön	4.1	4.2	12.6	13.5	11.3	47.2	10.8
Antal lägst*	3	1	(0)	0	1	0	0
Antal lägst (enskilda år)*	11	5	(0)	3	3	10	0

*Antalen gånger denna typ av simulering/assimilering fick lägst absolut relativt volymfel, summerat över alla områden baserat på medlet över alla år, eller baserat på enskilda år. Resultaten med assimilering av tillrinning är utelämnade från denna ranking.

Tabell A.2: Samma som Tabell A.1 fast med median NSE-värden.

Område	DET	E_0	E_Q	E_SWE	E_SD	E_FSC	E_AS
Tjaktjajaure	0.73	0.74	0.83	0.74	0.72	0.66	0.67
Riebnesjaur e	0.74	0.75	0.85	0.75	0.71	0.71	0.65
Överuman	0.77	0.77	0.86	0.73	0.66	0.76	0.62
Kultsjön	0.84	0.84	0.91	0.83	0.65	0.74	0.66
Landösjön	0.61	0.61	0.86	0.52	0.58	0.20	0.54
Antal högst	2	2	(5)	2	0	0	0
Antal högst (enskilda år)	8	12	(30)	10	2	2	3

Tabell A.3: Medel av absolut relativt volymfel (%), för vårflodsprognoser 2010-2015 med start 15/2, 15/4 och 15/6 och slut 31/7, och initialiserade på 7 olika sätt och med uppdatering genom assimilering av lokal tillrinning (E_Q), snövattekivalent uppmätt av VRF, SVF, och VF (E_SWE), snödjup uppmätt av VRF och SMHI (E_SD), snötäckningsgrad från CryoLand (E_FSC) samt med samtliga snöobservationer (E_AS). E_0 är ensemble-simuleringar utan assimilering och DET är referensen, en enkel deterministisk simulering. Prognoserna är beräknade med perfekta drivdata under prognosperioden (Arkiv-PTHBV).

Område	DET	E_0	E_Q	E_SWE	E_SD	E_FSC	E_AS
Prognos 15/2-31/7							
Tjaktjajaure	11.8	11.5	11.4	11.5	14.2	9.6	10.5
Riebnes	11.9	11.5	18.4	11.7	8.7	10.5	7
Överuman	6.7	7.1	4.8	13.4	17.5	8.8	19.6
Kultsjön	9	8.3	12.4	6.1	4.4	7.9	5.4
Landösjön	5.9	5.8	15.3	7.8	5.8	5.3	5.8
Antal lägst vol.fel			1		1	2	1
Antal bättre än DET		4	2	3	3	4	4
Prognos 15/4-31/7							
Tjaktjajaure	12	11.7	11.7	11.7	13.7	10	11.2
Riebnes	7.9	7.8	13.3	7.6	7.5	7.8	7.7
Överuman	14.2	14.6	12.2	19.9	24.3	16	26.6
Kultsjön	12.3	12.3	14.6	11.5	11.4	12.7	11.4
Landösjön	15.7	16.1	17.9	17.9	18.5	16.1	18.6
Antal lägst vol.fel	1		1		2	1	
Antal bättre än DET		2	2	3	2	2	3
Prognos 15/6-31/7							
Tjaktjajaure	14.5	14	14.1	13.8	18.1	12.4	14.2
Riebnes	14	13	21.9	11.9	6.9	12.1	5.4
Överuman	5.5	6.1	5.9	14.5	22.5	7.4	24.4
Kultsjön	9	8	13.3	5.3	9.6	8.5	10.9
Landösjön	12.7	13.9	22.3	26.2	16.5	6.9	18.1
Antal lägst vol.fel	1			1		2	1

Antal bättre än DET		3	1	3	1	4	2
---------------------	--	---	---	---	---	---	---

Tabell A.4: Samma som Tabell A.3 fast för vårfloidsprognoser baserade på simuleringar med drivdata från historiska år.

Område	DET	E_0	E_Q	E_SWE	E_SD	E_FSC	E_AS
Prognos 15/2-31/7							
Tjaktjajaure	15.7	15.3	15.5	15.2	18.3	14.3	15.7
Riebnes	13.3	12.6	20.6	11.6	7.1	11.6	6.8
Överuman	10.9	11.2	11.4	17.1	24.9	12.5	27
Kultsjön	11.3	11.4	13.2	10.3	13.4	11.8	14
Landösjön	18	18.8	25.1	29.8	22.6	17.3	22.1
Antal lägst vol.fel	1			1		2	1
Antal bättre än DET		2	1	3	1	3	1
Prognos 15/4-31/7							
Tjaktjajaure	20.8	20.1	22.3	20.1	21.6	12.8	26.9
Riebnes	26.4	24.8	40.9	23.7	15.2	14.6	23.2
Överuman	10.2	9.3	15.4	16	32.9	5.4	42.2
Kultsjön	35.2	31.6	41.2	15.3	18.8	28.9	25.5
Landösjön	74.8	71.2	70	39.8	41.6	301	46.7
Antal lägst vol.fel				2		3	
Antal bättre än DET		5	1	4	3	4	3
Prognos 15/6-31/7							
Tjaktjajaure	24.5	23.8	26	23.8	25.2	17.4	27.6
Riebnes	28.1	26.4	42.7	25.4	11.7	18.1	23
Överuman	18.7	17.8	20.9	21.8	33.4	9.9	42.6
Kultsjön	43	39.3	48.8	20.9	22.3	45.8	17.2
Landösjön	200	196	198	158	162	466	168
Antal lägst vol.fel				1	1	2	1
Antal bättre än DET		5	1	4	3	3	3

VÅRFLODSPROGNOSER MED SNÖUPPDATERING

I projektet har metodik för uppdatering av hydrologiska vårflodsprognosmodeller med operationella snödjupsobservationer och satellitbaserade observationer av snötäckningsgrad och snövattenekvivalent utvecklats och utvärderats. Modelluppdatering med så kallad data-assimilering där alla modellens tillståndsvariabler uppdateras med hjälp av olika snöobservationer gav bättre vårflodsprognoser i vissa områden och vissa år. Men modelluppdatering med snöobservationer leder av olika orsaker inte alltid till förbättrade simuleringar av vattenföring eller tillrinning. En orsak till det är att osäkerheterna i klimatologin överskuggar osäkerheterna i mängden snö i många områden. En annan är att tillgängliga snöobservationer är som glesast eller uppvisar störst osäkerhet i de områden som är mest relevanta för vårflodsprognoserna (det vill säga regleringsmagasinen i fjällmiljö).

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