

ELFORSK



DAMMSÄKERHET

Metodbeskrivning och jämförande studie av dimensionerande flöden för dammanläggningar med två generationer klimatscenarier

Elforsk rapport 14:27

Metodbeskrivning och jämförande studie av dimensionerande flöden för dammanläggningar med två generationer klimatscenarier

Elforsk rapport 14:27

Kristoffer Hallberg, Johan Andréasson, Jenny Axén-Mårtensson,
Sten Bergström, Joel Dahné, Linda Nylén och
Elin Sjökvist

Juni 2014

Förord

Som stöd till arbetet med att klimatanpassa riktlinjerna för flödesdimensionering av dammanläggningar har Elforsk och Svenska Kraftnät låtit genomföra en fortsättning på tidigare metodutvecklingsprojekt som bland annat rapporterats i Dimensionerande flöden för dammanläggningar för ett klimat i förändring – metodutveckling och scenarier, Elforsk rapport 11:25 samt Analys av osäkerheter vid beräkning av dimensionerande flöden för dammar i flödesdimensioneringsklass I, Elforsk rapport 11:31.

I detta fortsättningsprojekt har internationell publicering samt jämförande studier med nyare och en ny typ av klimatscenarier ingått.

I rapporten redovisas beräkningar av den framtida förändringen av flöden i flödesdimensioneringsklass I i sju områden av relevans för vattenkraft- och gruvindustrin. Beräkningarna är baserade på 36 st regionala klimatscenarier för perioden fram till slutet av seklet.

Resultaten visar att den metodik som utvecklats är konsistent och ger goda resultat även för en ny generation klimatscenarier.

Projektet har finansierats av Vattenkraftföretag och Svenska Kraftnät genom Elforsks dammsäkerhetstekniska utvecklingsarbete. Klimatscenarier, som har använts inom projektet, kommer från Rossby Centre vid SMHI. Tillgången till dessa data har varit en grundförutsättning för projektets genomförande.

Ett stort tack riktas till alla inom SMHI som bidragit till metodutveckling av de system som använts inom detta projekt. Ett varmt tack riktas även till projektets styrgrupp som varit mycket engagerad i arbetet och tillfört stort värde till slutresultatet.



Cristian Andersson, ELFORSK



Kristoffer Hallberg, SMHI

Sammanfattning

Inom projektet *Dimensionerande flöden för dammanläggningar för ett klimat i förändring - Scenarier i ett 50-årsperspektiv* har en ny metod utvecklats för klimatanpassning av flödesdimensioneringsberäkningar enligt de svenska riktlinjerna för bestämning av dimensionerande flöden för dammanläggningar. En metodik för anpassning av regionala klimatscenarier till en hydrologisk modell har utvecklats, den så kallade DBS-metoden. Ett rationellt produktionssystem har tagits fram som möjliggör att kostnadseffektivt bearbeta ett stort antal klimatscenarier och omsätta dessa till flödesberäkningar.

Detta fortsättningsprojekt presenterar och jämför resultat baserat på äldre s.k. SRES- och nyare RCP-scenarier samt omfattar även internationell publicering. I rapporten redovisas beräkningar av den framtida förändringen av flöden i flödesdimensioneringsklass I i sju områden av relevans för vattenkraft- och gruvindustrin. Beräkningarna är baserade på 36 st regionala klimatscenarier för perioden fram till slutet av seklet.

Det klimatologiska förändringen av årsmedeltemperatur och årsmedelnederbörd är samstämmig mellan olika modeller och det syns distinkta skillnader i slutet av seklet mellan olika framtidsscenarier.

Analysen av framtida nederbördsextremer visar att extrem dygnsnederbörd kan förväntas öka i hela landet men spridningen är stor mellan olika projektioner. Sammantaget förväntas extrem dygnsnederbörd öka med ca 20-40 % mot slutet på seklet. Även extrem 14-dygnsnederbörd ökar, men förändringen är mindre, ca 10-30 % mot slutet på seklet.

En generell slutsats är att det dimensionerande snömagasinet minskar på grund av uppvärmningen, speciellt på våra nordliga breddgrader där vintertemperaturen beräknas stiga speciellt kraftigt. Av de 7 st undersökta områdena minskar dimensionerande snömagasinet i 6 st.

Det är utifrån genomförda beräkningar svårt att generalisera klimateffekten på det dimensionerande flödet eller den dimensionerande nivån för dammar i Sverige. Utöver klimatet är det många andra faktorer som spelar in, exempelvis avrinningsområdets storlek och dess förhållande till magasinsvolym och utskovskapacitet.

Effekterna av förändringar i temperatur, nederbördsmönster, avdunstning, extrem nederbörd och snömagasin är som nämnts ovan komplex. Inom stora delar av landet kan förändringar inom respektive faktor balansera eller spela ut betydelsen av förändringen i övriga nyckelfaktorer. Trots komplexiteten går det att urskilja tendenser. För anläggningar som är belägna längst i nordväst kan flöden i flödesdimensioneringsklass I förväntas öka på grund av ökningarna i de viktigaste faktorerna såsom dimensionerande nederbördssekvens (både toppvärde och totalvolym), medeltillrinning och snömagasin. Längst i söder kan man förvänta sig ökningarna i flöden i flödesdimensioneringsklass I på grund av motsvarande ökningarna i dimensionerande nederbördssekvens samtidigt som snömagasinet har ringa betydelse även i dagens klimat. I små avrinningsområden där extrema nederbördshändelser också idag är den dominerande orsaken till extrema flöden, förväntas högre flöden i flödesdimensioneringsklass I.

En generell slutsats rörande flöden i flödesdimensioneringsklass I är att den tidpunkt på året då de mest extrema beräknade flödet förväntas inträffa i de flesta av de valda testområdena blir mer utspridd i ett förändrat klimat. Speciellt för områden som karaktäriseras av vårflodstopp i tillrinningen kan detta tillfälle inträffa tidigare på våren i ett varmare klimat.

Klimatanpassning är ett speciellt område såtillvida att det handlar om att ta hänsyn till resultat från ett forskningsområde som befinner sig under ständig utveckling. Resultaten visar att den metodik som gemensamt utvecklats av kraftindustrin, Svenska Kraftnät och SMHI är konsistent och ger goda resultat även för en ny generation klimatscenarier.

Summary

Within the project *Design floods for dams in a changing climate – Scenarios in a 50 year perspective* a new method for the climate adaptation of the Swedish guidelines for design floods for dams has been developed. This includes a method for adjusting regional climate scenarios used as input to a hydrological model, the so called DBS method. A rational production system has also been developed, which facilitates cost-effective processing of a large number of climate scenarios for hydrological simulations.

This subsequent project presents calculations based on the new RCP scenarios and compares them with earlier calculations based on the SRES-scenarios. Simulations of future changes in floods in Category I (high hazard dams) according to Swedish guidelines are shown for a choice of 7 basins which are relevant for the hydropower and mining industries. The simulations are based on 36 regional climate scenarios for this century.

The change in yearly mean temperature and yearly mean precipitation are consistent among the climate models. Towards the end of the century there is a distinction between scenarios.

The analysis of future extreme precipitation shows a general increase, however there is a substantial spread between different projections. Altogether, the volume in extreme one-day precipitation is expected increase by 20-40% during this century. Extreme sequences of 14-day precipitation show a similar trend and the increase in volume is in the range of 10-30 %.

A general conclusion is that the snowpack decreases due to the overall warming, especially since winter temperatures are expected to increase more than the yearly mean value. Out of the seven basins investigated, the snowpack shows a decrease in six basins.

Based on the sample of seven basins the hydrological response and change in floods in Category I cannot easily be generalised for Sweden as a whole. In addition to climate forcing, the response is governed by local conditions e.g. basin drainage area, reservoir storage volume and spillway capacity.

Hydrological response due to changes in temperature, precipitation, evaporation, extreme precipitation events and snowpack are complex. For large areas changes in any of these key factors may be balanced or counteracted by changes in other key factors. Despite the complexity some trends can be identified in the results. In the north-west part of Sweden floods in Category I are expected to increase due to the increase in several key factors i.e. extreme precipitation, mean runoff and snow pack. In the southern part floods in Category I are expected to increase due to increase in extreme precipitation whereas the snow pack is of minor importance even under current conditions. In small drainage basins where extreme precipitation govern extreme runoff, floods in Category I are expected to increase.

In general the dates when floods in Category I may occur show a wider spread in the course of climate change. Basins characterised by a snow melt induced spring flood may have the peak flow shifted towards earlier dates in a warmer climate.

Climate adaptation is a special field of work, adaptation strategies are by necessity assessments based on of research findings, findings that may alter as research develops.

The methods developed by hydropower industries in cooperation with Svenska Kraftnät and SMHI have shown consistency and performed satisfactory for a new generation of climate projections.

Innehåll

1	Bakgrund	1
2	Metoder	3
2.1	Globala och regionala klimatmodeller.....	3
2.2	Framtida antropogen påverkan	4
2.3	Regionala klimatscenarier	7
2.4	Hydrologisk modell.....	11
2.5	Skalering av regionala klimatdata	12
2.6	Beräkning av flöden och vattenstånd i flödesdimensioneringsklass I	14
2.7	Regleringsstrategier	16
2.8	Extrem nederbörd och dimensionerande nederbördssekvens	17
2.9	Beräkningssystem	19
2.10	Meteorologisk databas	20
2.11	Beräkningsområden för flödesdimensioneringsklass I.....	20
3	Resultat	24
3.1	Internationell publicering och presentation	24
3.2	Anpassning av klimatmodellsdata.....	24
3.3	Utvärdering av data från klimatmodellerna	24
3.4	Nederbördsextremer.....	29
3.5	Beräkningar för flödesdimensioneringsklass I.....	31
4	Diskussion och slutsatser	49
5	Referenser	51
6	Bilaga	54

1 Bakgrund

Klimatet på jorden håller gradvis på att förändras vilket medför förändringar av den hydrologiska karaktäristiken som vi känner idag. För tekniska system med lång livslängd är det viktigt att beakta funktionen under hela livslängden speciellt om det finns säkerhetskritiska aspekter, vilket är fallet för dammanläggningar. En starkt bidragande orsak till förändringen av klimatet är mänsklig påverkan via utsläpp av växthusgaser. Även om utsläppen upphörde helt skulle klimatet fortsätta förändras under lång tid på grund av trögheten i systemet. Mot denna bakgrund finns det goda skäl att utvärdera olika klimatologiska framtidsscenarier och dess påverkan på dimensioneringsförhållanden för dammar.

Kunskapen och forskningen om jordens klimatsystem är under stark utveckling. FN:s klimatpanel är en tongivande aktör inom detta område och sammanställer med några års mellanrum rådande kunskapsläge. För att kommunicera och jämföra resultat från klimatanalyser både nationellt och internationellt, är det fördelaktigt att arbeta med aktuell och kvalitetssäkrad metodik och data. I och med att FN:s klimatpanel förordar användningen av en ny typ av framtidsscenarier för antropogen påverkan finns ett behov av att jämföra tidigare analyser av klimateffekter för flödesdimensionering med nya.

Frågan om hur hänsyn ska tas till ett förändrat klimat vid flödesdimensionering har varit aktuell under en längre tid. Under 1990-talet genomfördes ett nordiskt samarbetsprojekt med inriktning mot vattenkraftindustrin (Saelthun, 1998). Detta arbete har sedermera fortsatt inom ramen för CE (Climate and Energy; Fenger, 2007) och CES (Climate and Energy Systems)-projekten. I dessa projekt deltog även de baltiska staterna. Ett resultat av speciellt intresse från CE projektet är en finsk studie av Veijalainen och Vehviläinen (2008). Deras beräkningar uppvisar ganska stora likheter med det arbete som vi nu redovisar.

Ett tidigt försök att bland annat beräkna förändringen av 100 årsflöden i Sverige gjordes 2002 av Gardelin m.fl. (2002) och rapporterades i Elforsk rapport 02:27. Elforsk och Svenska Kraftnät initierade år 2005 projektet *Känslighetsanalys av Flödeskommitténs riktlinjer i ett framtida förändrat klimat*, vilket har avrapporterats i Elforsk rapport 06:80 (Andréasson m.fl. 2006). Kompletterande analyser för Pengfors i Umeälven ledde till en uppdaterad version av rapporten, Elforsk rapport 07:15 (Andréasson m.fl. 2007).

Under 2007 utkom en nyttgåva av riktlinjerna för bestämning av dimensionerande flöden för dammanläggningar (Svensk Energi m.fl., 2007). Där skärptes kravet på att klimatfrågan ska behandlas vid flödesdimensionering. Detta formulerades på följande sätt:

"Mot bakgrund av bland annat de osäkerheter som ett förändrat klimat tillför, bör beräkningsförutsättningarna ses över regelbundet. Jämförelser mellan inträffade flödessituationer och beräknade dimensionerande flöden bör utföras fortlöpande. Systemets känslighet för klimatförändringar bör analyseras

genom utnyttjande av klimatscenarier. Nya förutsättningar kan leda till att dimensioneringsberäkningarna behöver revideras. Osäkerheter kring det framtida klimatet får dock inte hindra att nödvändiga dammsäkerhetshöjande åtgärder vidtas. På grund av dessa osäkerheter bör dessutom flexibilitet och marginaler skapas där så är lämpligt.”

För att ge stöd åt arbetet med att klimatanpassa riktlinjerna för flödesdimensionering initierade Elforsk och Svenska Kraftnät 2007 ett projekt med titeln *Dimensionerande flöden för dammanläggningar för ett klimat i förändring - Scenarier i ett 50-årsperspektiv*. Uppdraget gavs åt SMHI med Johan Andréasson (t.o.m. 2012) och senare Kristoffer Hallberg (fr.o.m. 2012) som projektledare. Till projektet knöts också en styrgrupp bestående av följande medlemmar: Olle Mill (t.o.m. 2010), Maria Bartsch och Anna Engström Meyer (fr.o.m. 2010) från Svenska Kraftnät, Lars Hammar (t.o.m. 2008) och Cristian Andersson (fr.o.m. 2009) från Elforsk, Claes-Olof Brandesten från Vattenfall vattenkraft, Agne Lärke från Fortum, Björn Norell från Vattenregleringsföretagen och Sigrid Eliasson från Statkraft. Projektet omfattade både metodutveckling och analyser i pilotområden (Andréasson, 2011).

2008 tillsattes Kommittén för dimensionerande flöden för dammar i ett klimatförändringsperspektiv med representanter från myndigheter (Svenska Kraftnät och SMHI), från vattenkraftbranschen (Svensk Energi, Vattenfall, Fortum, Statkraft, Vattenregleringsföretagen och E.ON) och från gruvindustrin (SveMin). Kommittén förordade i sin slutrapport 2011 (Svenska Kraftnät 2011) följande för att beakta klimatfrågan vid flödesdimensionering av dammar.

- Vid flödesdimensioneringsberäkningar bör minst tre olika antaganden om utvecklingen av framtida koncentrationer av växthusgaser användas.
- Minst tre olika globala klimatmodeller bör utnyttjas, om möjligt för vart och ett av de olika antagandena om framtida koncentrationer av växthusgaser.
- En vetenskapligt förankrad och dokumenterad metod bör användas för nedskalning till den regionala skalan. För närvarande rekommenderas dynamisk nedskalning.

samt att fortlöpande bevaka kunskapsläget och följa utvecklingen inom området.

FNs klimatpanel, IPCC, presenterade den 27 september 2013 sin femte utvärderingsrapport, *Climate Change 2013: The Physical Science Basis (AR5)* (IPCC, 2013). En stor del av innehållet bygger på den senaste generationens klimatmodellberäkningar för utvecklingen av klimatet i framtiden. Föreliggande rapport belyser övergången till en ny generation klimatscenarier vilka ansluter till FN:s klimatpanels nyligen utgivna sammanställning om klimat (IPCC, 2013). Rapporten innehåller beräknade 100-årsflöden och flöden i dimensioneringsklass I för 7 st dammanläggningar.

2 Metoder

2.1 Globala och regionala klimatmodeller

Jordens klimatssystem drivs av solinstrålning och återreflektion av denna. Globalt sett har temperaturen varit relativt konstant i hundratals år vilket pekar på en nära nog balanserad in-/utstrålning. Förändringar i jordens atmosfär, såsom ökande halter växthusgaser, moln och molnegenskaper och partiklar, kan förändra denna balans. För att få en översiktlig bild av framtidens klimat används globala klimatmodeller som simulerar jordens klimat och de komplexa återkopplingar som sker under antaganden om hur den globala strålningsbalansen förändras i framtiden.

Termen *Global Circulation Model* (GCM) har allmänt använts för modeller som beskriver de storskaliga processer som påverkar hela jorden. De modeller som idag används inom klimatforskningen har utvecklats till att bli mer och mer moduluppbyggda och enskilda moduler används för att hantera specifika processer som beskriver centrala processer eller återkopplingar i klimatsystemet. Idag används även termen *Earth System Models* (ESM) som benämning för paketeringar av moduler som tillsammans ger en modell som kan simulera klimatutveckling på jorden under olika scenarier. Väl fungerande moduler får ofta stor spridning och används inom ESM:er hos olika forskningsorganisationer.

Globala modeller har relativt grov geografisk upplösning och för att ta hänsyn till mer regionala effekter används ofta även en regional modell för att återge detaljer i finare skala. En regional klimatmodell (RCM) med högre upplösning beskriver detaljer såsom exempelvis Östersjön och den Skandinaviska bergskedjan mer realistiskt. En regional klimatmodell drivs av resultat från en global modellen på randen av sitt modellområde. Det medför att valet av global modell får stor betydelse för slutresultatet även regionalt. Ett regionalt klimatscenario är resultatet av en beräkning av klimatet med en global och en regional beräkningsmodell för en antagen påverkan av klimatsystemet.

En stor del av de klimatsimuleringar som sker hos SMHI ingår i Coordinated Regional Climate Downscaling Experiment (CORDEX), ett initiativ från World Climate Research Programme som syftar till att tillgängliggöra och dela resultat från klimatsimuleringar med detaljrikedom på regional skala. En av de viktigaste samverkansformerna för att utvärdera och jämföra resultaten från olika klimatmodeller är Coupled Model Intercomparison Project Phase 5 (CMIP5) som samordnas av World Climate Research Programme. I likhet med SMHI delar många forskningsinstitutioner med sig av resultat, vilket ökat möjligheterna att hitta gemensamma trender och mönster i scenarier för framtida klimat. Sammantaget bidrar detta öppna arbetssätt till att öka förståelsen kring klimatmodellers kapabilitet och trovärdighet för olika utvecklingsvägar av jordens klimat.

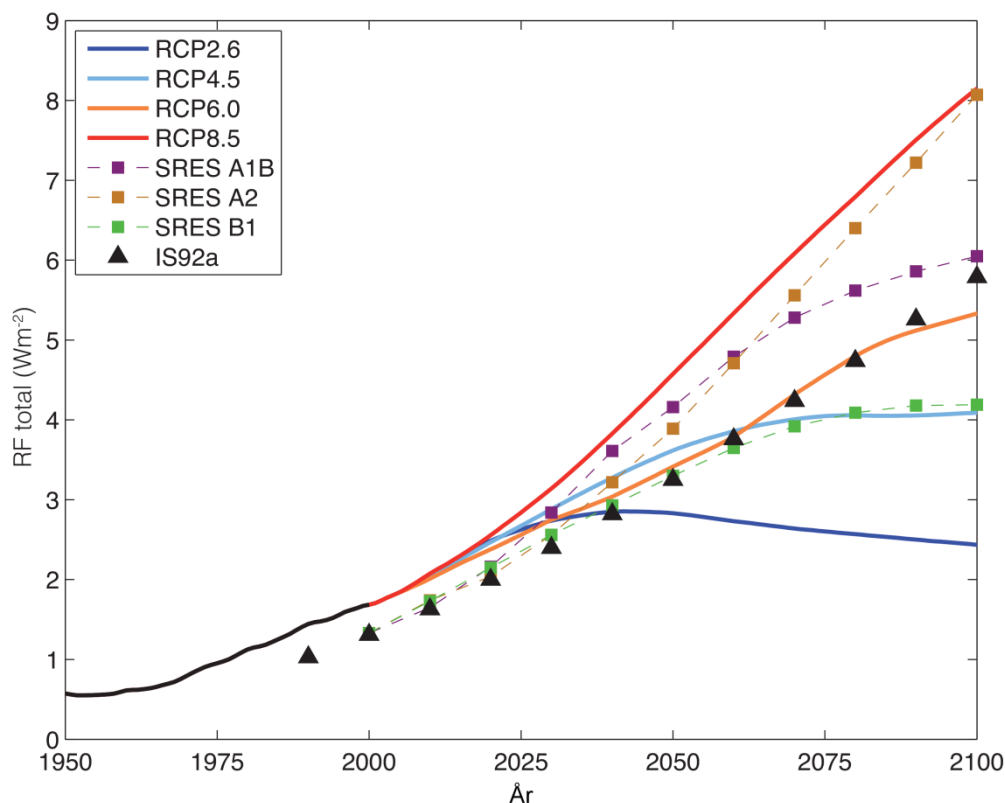
SMHI har deltagit och bidragit med simuleringsresultat från den globala modellen EC-EARTH och regionala nedskalningar med Rossby Centre Regional Atmospheric model (RCA4) (Dieterich, 2013) som utvecklats på SMHI:s

forskningsavdelning. I föreliggande projekt har data från 9 st olika globala modeller av senaste version använts i kombination med RCA4. Dessutom används data från modeller som förekommit i ENSEMBLES-projektet (van der Linden, 2009) d.v.s. en tidigare generation globala och regionala modeller. Totalt behandlas 36 st regionala klimatscenarier vilka redovisas i Tabell 2.1 och Tabell 2.2.

2.2 Framtida antropogen påverkan

Med antropogena effekter menas allmänt effekter av mänskliga aktiviteter. Jordens befolkning påverkar klimatsystemet på en mängd olika sätt varav de mest betydelsefulla är utsläppen av växthusgaser, utsläpp av partiklar och via förändrad markanvändning. För att kunna göra beräkningar av framtida klimat behövs antaganden om hur antropogen påverkan, främst växthusgaser, ser ut i framtiden. Hur stora klimatförändringarna blir på sikt beror i hög grad på hur halterna av växthusgaser i atmosfären utvecklas över tid; om och när i framtiden utsläppen kulminerar, på vilken nivå det sker och hur snabbt de därefter minskar. Effekten av förändrade halter växthusgaser i atmosfären är att jordens energibudget förändras vilket medför att jorden som helhet absorberar eller reflekterar mer eller mindre solenergi, s.k. strålningsbalans. Strålningsbalansen uttrycks i enheten W/m^2 och är alltså skillnaden mellan mängden solenergi som absorberas av jorden respektive reflekteras tillbaka ut i rymden.

Det finns två olika kategorier av metoder för att beskriva scenarier av framtida antropogen påverkan. Utsläppsscenarier där utsläpp av växthusgaser baseras på olika antaganden om jordens folkmängd, ekonomisk tillväxt, teknologisk utveckling m.m., så kallade *Special Report on Emission Scenarios* (SRES-scenarier) (Nakićenović m.fl., 2000) eller scenarier som direkt beskriver olika förändringar strålningsbalansen för jorden s.k. *Representative Concentration Pathways* (RCP-scenarier) (Moss et al., 2010). I praktiken sker idag all forskning med RCP-scenarier och i IPCC:s senaste rapportering Assessment report 5 (IPCC, 2013) används uteslutande RCP-scenarier. I figur 2.1 visas utvecklingen av global strålningsbalans för utsläpps- och strålningsbalansscenarier. Tillgängligheten från forskningsområdet är störst för scenarier av typen RCP4.5 och RCP8.5 samt somliga RCP2.6. Regionala klimatscenarier av typen RCP6.0 har inte varit tillgängligt under detta projekts genomförande.



Figur 2.1. Historisk och framtida antagande om antropogen orsakad förändring av strålningsbalans (RF) enligt olika scenarier relativt år 1750 (modifierad efter IPCC 2013).

Principiellt är inte RCP-scenarier bättre förutsägelser om framtiden eller mer sannolika framtidsprojektioner än SRES-scenarier. Skälet till att använda RCP-typen av scenarier är snarare att de illustrerar olika ambitionsnivåer inom åtgärdsområdet och inte är direkt kopplade till en tänkt socioekonomisk utveckling. Vidare tar RCP-scenarierna hänsyn till förändrad markanvändning och är väldefinierade för längre tidshorisonter samt spänner upp ett större utfallsrum än de mest frekvent använda SRES-scenarierna (IPCC, 2013). Det är värt att notera att det trots ovan nämnda skillnader finns stora likheter mellan dessa två typer av scenarier, vilket illustreras av figur 2.1.

SRES-scenarier byggde på principen om olika möjliga utvecklingslinjer med olika antaganden om jordens befolkning, ekonomisk tillväxt, teknologisk utveckling m.m. och vilka utsläpp av växthusgaser som kan förväntas under respektive utvecklingslinje. Konceptet bygger på fyra familjer utvecklingslinjer A1, A2, B1 och B2 vilka innehåller en eller flera undervarianter. Genom att översätta utsläppen av växthusgaser till koncentrationer i atmosfären kunde dessa scenarier översättas till vilken förskjutning av jordens strålningsbalans varje scenario motsvarar.

SRES A2

En värld där nationer agerar självständigt inom klimatpolitiken
Regionalt inriktad ekonomisk utveckling.

SRES A1B

A1B är ett scenario där utsläppen av koldioxid antas kulminera omkring år 2050. Koncentrationen av koldioxiden i atmosfären fortsätter dock enligt detta scenario att stiga även efter år 2050.

SRES B2

Utveckling mot en mer uppdelad men mer ekologiskt hänsynstagande värld.
Lokala framför globala lösningar för ekonomisk, social och miljömässig stabilitet.

RCP-scenarier bygger på principen om att representera olika förskjutningar i jordens strålningsbalans. Styrkan i denna ansats är det går att beskriva klimatologiska effekter utan att de är alltför direkt associerade med socioekonomiska antaganden. Detta är viktigt eftersom samma förskjutning i strålningsbalans kan uppnås genom flera olika socioekonomiska utvecklingsbanor. Varje RCP-scenario namnges med ett nummer som anger förskjutningen i strålningsbalans år 2100 i enheten W/m^2 . Referensnivån är vald till de förindustriella förhållandena år 1750. Det bör noteras att bidraget från antropogena aktiviteter för år 2011 har beräknats till $2,29 W/m^2$.

RCP2.6

RCP2,6 kan liknas vid ett "lågutsläppsscenario" som sammanfaller med klimatpolitiska målsättningar om en snar kulminering av utsläppen, följt av en bestämd och kontinuerlig minskning därefter. Socioekonomiskt motsvarar detta scenario en värld med låg energiintensitet och minskad användning av olja.

RCP4.5

Detta scenario är ett stabiliseringsscenario där, utsläppen av koldioxid kulminerar omkring år 2040 och stabiliseras mot slutet av seklet. Socioekonomiskt innebär detta förmodligen en stringent klimatpolitik med t.ex. plantering av skog och minskad areal för jordbruksmark.

RCP8.5

Detta scenario beskriver en utveckling som innebär en fortsatt stor mänsklig påverkan på klimatsystemet. Ingen tillkommande klimatpolitik. Koldioxidutsläppen är kraftigt ökande. Socioekonomiskt svarar detta mot ett stort beroende av fossila bränslen och hög energiintensitet.

2.3 Regionala klimatscenarier

Ett regionalt klimatscenario är resultatet av en beräkning med ett RCP-/SRES-scenario i en global klimatmodell och i en regional klimatmodell. Samma RCP-/SRES-scenario kan följaktligen leda till olika klimatscenarier beroende på vilka globala och regionala modeller som används. Eftersom ett regionalt klimatscenario påverkas av de tre ingående komponenterna är det värdefullt att arbeta med många olika kombinationer av modeller och RCP-/SRES-scenarier. Trender och mönster som är återkommande brukar tillskrivas högre robusthet. Idealt önskar man ensembler av simuleringar med alla möjliga korskombinationer, men i praktiken har detta inte varit möjligt med tanke på att såväl globala- som regionala simuleringar är mycket tids- och resurskrävande. Internationella ansträngningar att dela data har dock medfört att underlaget stadigt växer.

I början av 2000-talet användes huvudsakligen sex regionala klimatscenarier för de flesta studier av klimateffekter i Sverige, däribland den statliga Klimat- och sårbarhetsutredningen. Tongivande var resultat från Hadley Centre i England (HadCM3/AM3H) och från Max-Planck-institutet för meteorologi i Tyskland (ECHAM4/OPYC3) i kombination med två olika regionala modellversioner. Dessa benämns RCAO och RCA3 och kommer från Rossby Centre vid SMHIs forskningsenhet.

Det europeiska ENSEMBLES-projektet (van der Linden m.fl., 2009) syftade till att utveckla ett system för samordnade beräkningar av klimatförändringar vilket medförde att många klimatanalyser i Sverige nyttjade 12 st regionala klimatscenarier baserat på ett antal europeiska och några utomeuropeiska globala och regionala klimatmodeller. Det utsläppsscenario som huvudsakligen användes inom ENSEMBLES benämns A1B, men ett scenario med kraftigare utsläpp, A2, och ett med lägre utsläpp, B1, användes också.

I Tabell 2.1 och Tabell 2.2 sammanfattas de kombinationer av modeller och scenarier för framtida antropogen påverkan som har använts i denna studie. Tabell 2.1 sammanfaller till stora delar med underlag av SRES-scenarier som användes i det föregående projektet (Andréasson m.fl. 2011). Skillnader är tillskott av ytterligare scenarier samt att endast behandla scenarier som sträcker sig över hela perioden fram till slutet av seklet. Tabell 2.2 redovisar den nya familjen RCP-scenarier. I figur 2.2-figur 2.4 visas karaktäristiken för SRES-ensemblen respektive RCP-ensemblen.

En viktig skillnad mellan ensemblerna av RCP-scenarier och SRES-scenarier är balansen mellan ensemblemedlemmarna avseende global modell och utsläppsscenario. SRES-ensemblen har en stor övervikt i både regional modell, global modell och utsläppsscenario. RCP-ensemblen är betydligt mer balanserad, speciellt om RCP2.6 exkluderas.

Tabell 2.1. Sammanställning av använda klimatscenarier av SRES-typ. Nationsflaggorna avser nationalitet för de institut som genomfört den globala simuleringen.

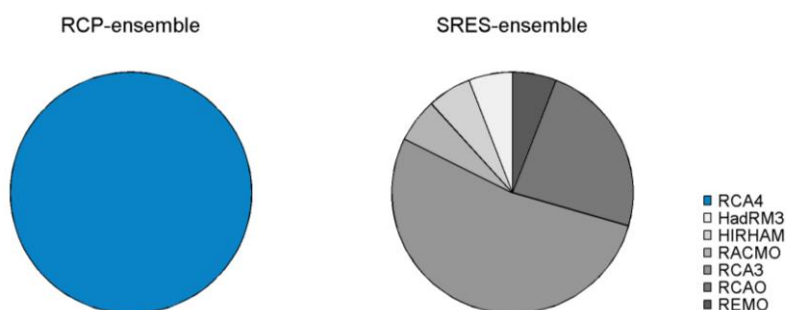
Nation	Scenario	Global modell	Regional modell	Upplösning
	A1B	ECHAM5	RCA3	50 km
	A1B	ECHAM5	RCA3	25 km
	B1	ECHAM5	RCA3	50 km
	A1B	CNRM	RCA3	50 km
	A1B	CCSM3	RCA3	50 km
	A1B	ECHAM5	RACMO	25 km
	A1B	ECHAM5	REMO	25 km
	A1B	HadCM3(Q0)	HadRM3	25 km
	A1B	HadCM3(Q16)	RCA3	25 km
	A1B	ECHAM5	HIRHAM	25 km
	A1B	ECHAM5	RCA3	50 km
	A1B	ECHAM5	RCA3	50 km
	A1B	IPSL	RCA3	50 km
	A1B	ECHAM5	RCAO	50 km
	A2	ECHAM5	RCAO	50 km
	A1B	HadCM3ref	RCAO	50 km
	A1B	ECHAM5/MPI-OM	RCAO	25 km

Tabell 2.2. Sammanställning av använda klimatscenarier av RCP-typ. Nationsflaggorna avser nationalitet för de institut som genomfört den globala simuleringen. EC-EARTH drivs som ett konsortium och illustreras med dess logotyp.

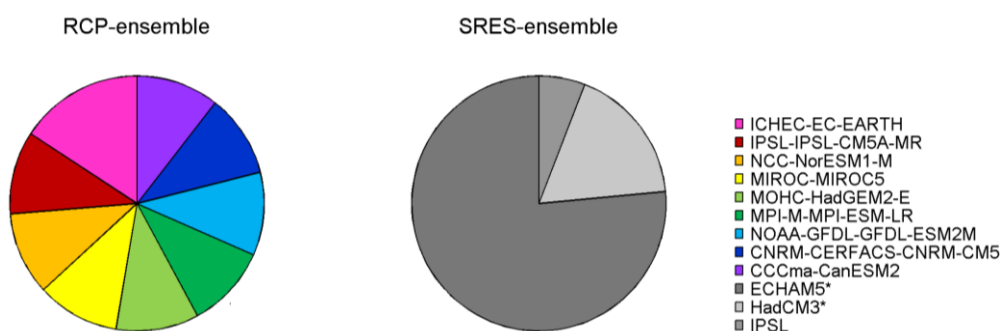
GCM-nation	Scenario	Global modell	Regional modell	Upplösning
	RCP4.5	CCCma-CanESM2	RCA4	50 km
	RCP8.5	CCCma-CanESM2	RCA4	50 km
	RCP4.5	CNRM-CERFACS-CNRM-CM5	RCA4	50 km
	RCP8.5	CNRM-CERFACS-CNRM-CM5	RCA4	50 km
	RCP2.6	ICHEC-EC-EARTH	RCA4	50 km
	RCP4.5	ICHEC-EC-EARTH	RCA4	50 km
	RCP8.5	ICHEC-EC-EARTH	RCA4	50 km
	RCP4.5	IPSL-IPSL-CM5A-MR	RCA4	50 km
	RCP8.5	IPSL-IPSL-CM5A-MR	RCA4	50 km
	RCP4.5	MIROC-MIROC5	RCA4	50 km
	RCP8.5	MIROC-MIROC5	RCA4	50 km
	RCP4.5	MPI-M-MPI-ESM-LR	RCA4	50 km
	RCP8.5	MPI-M-MPI-ESM-LR	RCA4	50 km
	RCP4.5	NCC-NorESM1-M	RCA4	50 km
	RCP8.5	NCC-NorESM1-M	RCA4	50 km
	RCP4.5	NOAA-GFDL-GFDL-ESM2M	RCA4	50 km
	RCP8.5	NOAA-GFDL-GFDL-ESM2M	RCA4	50 km
	RCP4.5	MOHC-HadGEM2-ES	RCA4	50 km
	RCP8.5	MOHC-HadGEM2-ES	RCA4	50 km

I SRES-ensemblen är tre forskningsinstitut representerade med globala modeller. ECHAM5 från Max-Planck-institutet för meteorologi i Tyskland, HadCM3 från Hadley Center i England och IPSL från Institut Pierre Simon Laplace i Frankrike. Globala modeller från dessa forskningsinstitut är även representerade i RCP-ensemblen med MPI-M-ESM-LR, MOHC-HadGEM2_ES, resp. IPSL-IPSL-CM5A-MR.

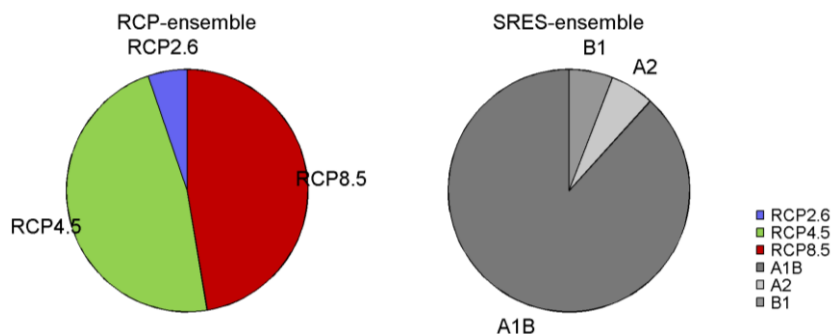
De klimatscenarier som använts är de som funnits tillgängliga vid genomförandet, det betyder att inget aktivt urval av scenarier har gjorts inom projektet. Balansen i ensemblen är god med avseende på Global modell och utsläppsscenario, men en svaghet är att bara en regional modell är representerad i RCP-ensemblen.



Figur 2.2. Regionala klimatscenarier fördelat på regionala klimatmodeller. Vänster diagram visar ensemble för klimatscenerier av RCP-typ och höger diagram motsvarande för klimatscenarier av SRES-typ.



Figur 2.3. Regionala klimatscenarier fördelat på globala klimatmodeller. Vänster diagram visar ensemble för klimatscenerier av RCP-typ och höger diagram motsvarande för klimatscenarier av SRES-typ.



Figur 2.4. Regionala klimatscenarier fördelat på olika framtida scenarier förändring i stålningssbalans eller växthusgaser. Vänster diagram visar ensemble för klimatscenerier av RCP-typ och höger diagram motsvarande för klimatscenarier av SRES-typ.

2.4 Hydrologisk modell

Enligt riktlinjerna för beräkningarna av flöden enligt flödesdimensioneringsklass I skall förloppet av det dimensionerande flödet simuleras med tillämpning av vedertagen hydrologisk modellteknik. I praktiken har den hydrologiska HBV-modellen kommit att bli standard.

HBV-modellen har utvecklats vid SMHI sedan början av 70-talet (Bergström, 1995, Lindström m.fl., 1997). Modellen är begreppsmässig, d.v.s. den bygger på en förenklad fysikalisk beskrivning och kalibreras till specifika vattendrag. Den har en enkel struktur och är i grunden uppbyggd av tre huvudmoduler; en för beräkning av snöns ackumulation och avsmältning, en för beräkning av markfuktighet och en tredje rutin för beräkning av vattnets vägar och hur vattenflöden påverkas av magasinering i grundvatten och sjöar. Modellen är semidistribuerad, vilket innebär att avrinningsområdet delas in i delområden inom vilka höjder och vegetationszoner (skog, öppet landskap, glaciär och sjöar) klassificeras. Den har dessutom speciella funktioner för att separat hantera större sjöar och sjöregleringar.

Indata till HBV-modellen är nederbörd, lufttemperatur och potentiell avdunstning. Dessa hämtas från den areellt interpolerade databasen PTHBV (Johansson, 2000, Johansson och Chen 2003 och 2005). Framtida nederbörd och temperatur som beräknats av de regionala klimatmodellerna har i denna studie bearbetats med DBS-metoden, vilken beskrivs i avsnitt 2.5. Förändringen av den potentiella avdunstningen antas vara proportionell mot temperaturändringen.

Även internationellt är HBV-modellen ofta använd för beräkningar av hur ett förändrat klimat kan komma att påverka vattenflöden. I Norden och de baltiska länderna var modellen standardmetoden inom de nordiskt-baltiska CE (Bergström m.fl., 2007) och CES projekten. Värt att nämna är också ett omfattande arbete i Rhen där HBV-modellen användes för klimatanpassningsstudier (Görgen m.fl., 2010).

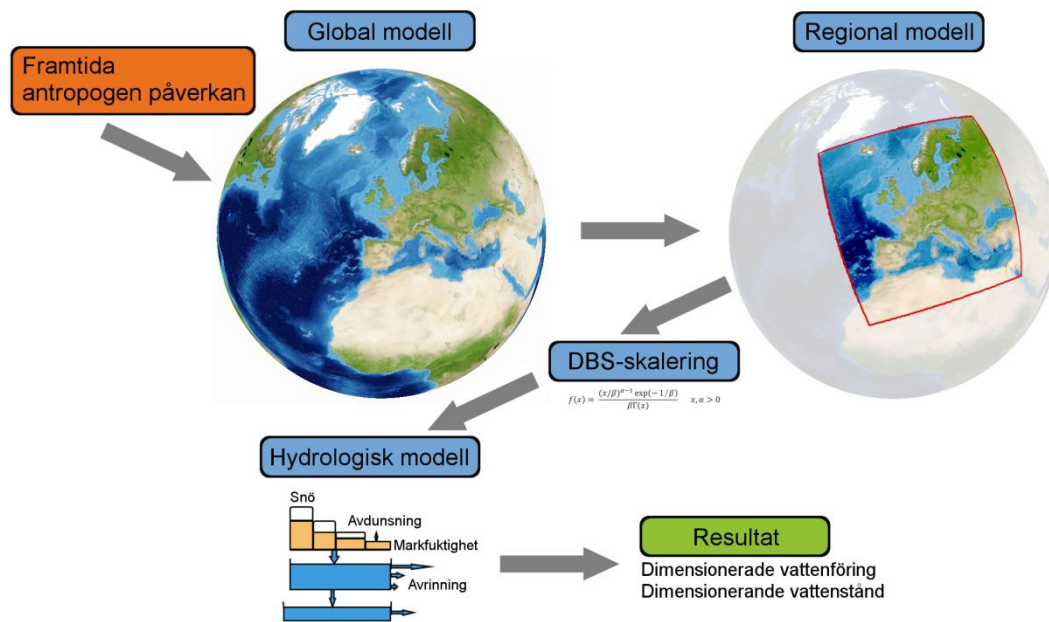
HBV-modellen har en lång historia. Den har modifierats efterhand och det finns flera olika versioner i bruk både i Sverige och utomlands. En omfattande uppgradering gjordes 1996, vilket medförde förbättringar av delar av modellen och av dess kalibrering (Lindström m.fl., 1996). Speciellt viktigt för beräkningen av dimensionerande flöden var att en ändring i modellens responsfunktion infördes. Den nya rutinen medför att extrema flöden beskrivs på ett bättre sätt. Denna modellversion är numera standard vid SMHI. Flera av de dimensioneringsberäkningar som genomförts med HBV-modellen har dock gjorts innan 1996 och då med den äldre modellversionen. Även efter 1996 har ett antal förbättringar skett av HBV-modellens struktur.

Beräkningar med en hydrologisk modell är alltid påverkad av viss osäkerhet. Andreasson mfl. (Andreasson, 2011b) utvärderade och kvantifierade sex kända typer osäkerhetskategorier; meteorologiska drivdata, dimensionerande snötäcke, tidsperioder för dimensioneringsberäkning, modellversioner av HBV-modell, modellkalibrering samt klimatscenarier. Det konstaterades att spridningen i beräkningsresultat generellt är större på grund av skillnaderna mellan klimatscenarier än för övriga studerade faktorer sammantaget (Andréasson, 2011b).

2.5 Skalering av regionala klimatdata

För att använda klimatmodellernas utdata till att studera exempelvis hydrologiska effekter, krävs ett gränssnitt mellan klimatmodellen och den hydrologiska modellen. Anledningen är att klimatmodellerna inte kan beskriva det nutida klimatet tillräckligt väl för att ge en trovärdig hydrologisk respons, när utdata från klimatmodellen används direkt som indata till en hydrologisk modell.

Via ett gränssnitt levererar den regionala klimatmodellen data till mer problemspecifika modeller med högre detaljeringsgrad och mer detaljerade processbeskrivningar. I figur 2.5 visas principen för hur detta går till vid beräkning av klimateffekter på vattenresurser. I det här fallet används den hydrologiska HBV-modellen för beräkningens sista steg.



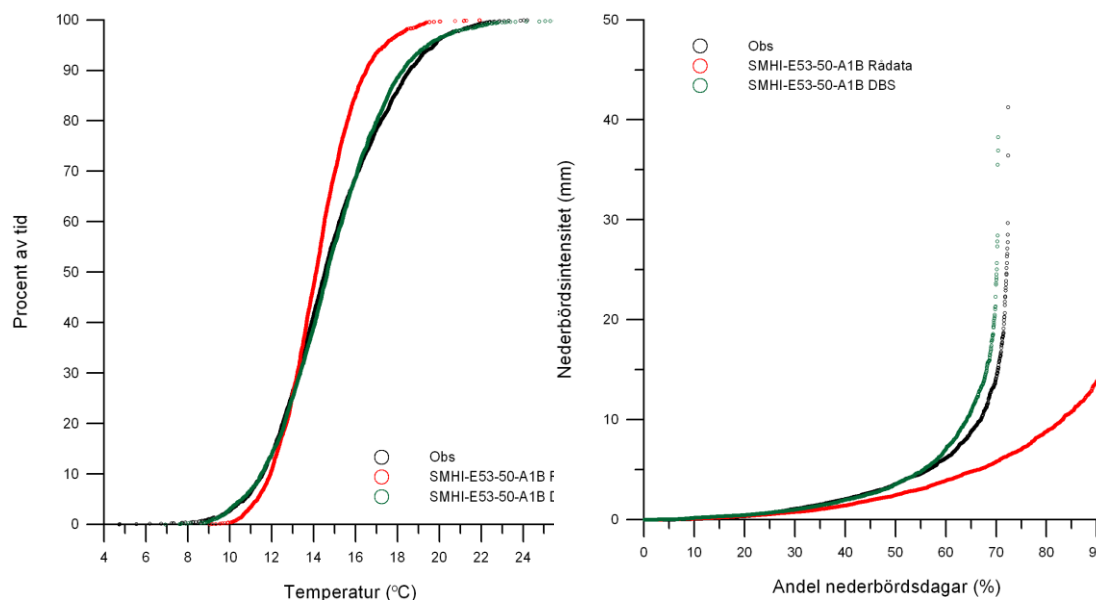
Figur 2.5. Illustration av kopplingen mellan global- och regional klimatmodell samt hydrologisk modell vid studier av klimateffekter på beräkningar för dammanläggningar i flödesdimensioneringsklass I.

Under senare år har en ny metod utvecklats som på ett tillfredställande sätt länkar samman regionala klimatmodellresultat med hydrologiska modeller. Metoden benämns *Distributions Baserad Skalering* (DBS) (Yang m.fl., 2010) och innebär att data från meteorologiska observationer används till att skalera klimatmodellens resultat för att minimera de systematiska felen. Korrektionsfaktorerna bibehålls vid beräkningen av framtidens klimat, varefter klimatberäkningens utdata blir statistiskt jämförbar med observationer och direkt kan användas som indata till en hydrologisk modell. Vid användning av DBS-metoden bibehåller man vid övergången till den hydrologiska modellen därmed, förutom förändringar i medelvärden, även de förändringar i klimatets variabilitet som ges av klimatmodellen. Metoden har tidigare använts för hydrologiska modellberäkningar av Andréasson m.fl., (2009).

Anpassning av klimatmodellsdata med hjälp av DBS-metoden har använts i denna studie för nederbörd och temperatur, vilket är drivdata för den hydrologiska modellen.

Figur 2.6 visar exempel på en anpassning med DBS-metoden. Figuren visar rådata i form av temperatur, andel nederbördsdagar och deras nederbördsintensitet från en klimatmodell, samt när dessa rådata anpassats med DBS-metoden. Figuren visar hur DBS-metoden väsentligt förbättrar överensstämmelsen med observerade data. Särskilt viktigt är att den överskattning av antal dagar med nederbörd som ges av klimatmodellen korrigeras.

DBS-metoden kräver att resultaten för framtida tidsperioder jämförs med historiskt klimat så som detta beskrivs av klimatmodellen och inte av meteorologiska observationer. Detta innebär att det inte är möjligt att direkt jämföra individuella dagar eller år med observationsdata.

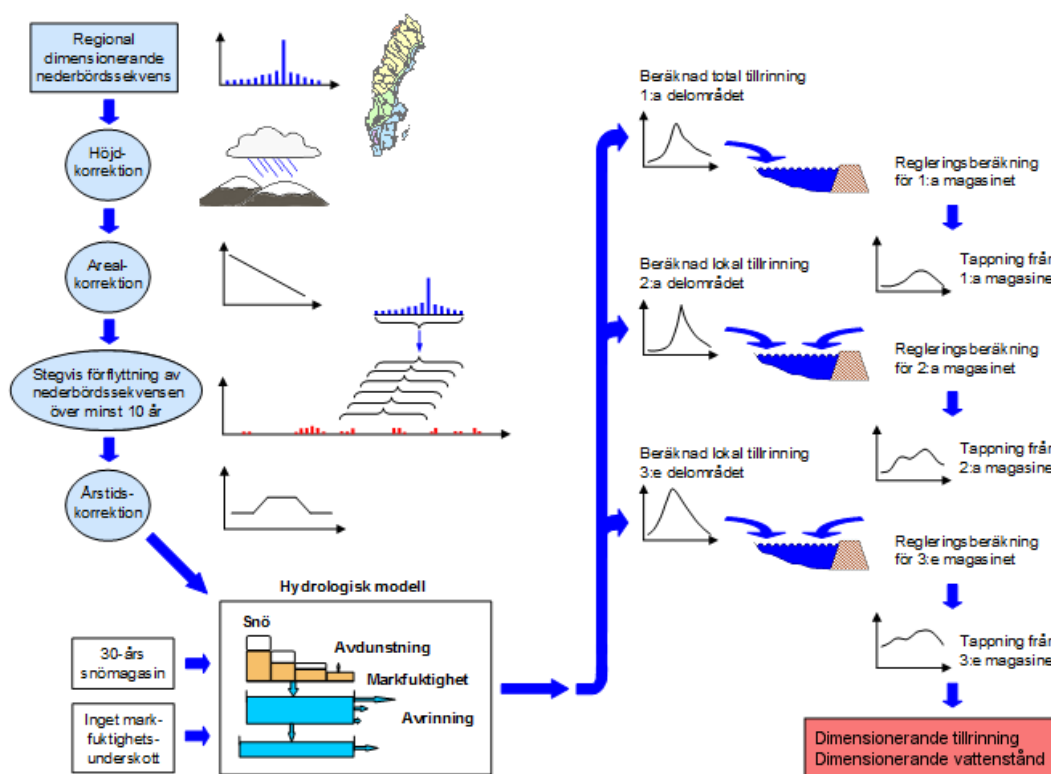


Figur 2.6. Jämförelse mellan rådata från klimatmodeller och data som anpassats med DBS-metoden. Till vänster dygnsmedeltemperatur (procent av tiden som viss dygnsmedeltemperatur underskrids) och till höger nederbörd (andel dagar med olika nederbördsintensitet).

2.6 Beräkning av flöden och vattenstånd i flödesdimensioneringsklass I

Beräkningarna av de dimensionerande flödena har utförts enligt riktlinjerna för bestämning av dimensionerande flöden för dammanläggningar för dammar i flödesdimensioneringsklass I (Svensk Energi m.fl., 2007). Metoden bygger på hydrologiska modellsimuleringar som beskriver följderna av att extremt stora nederbördsmängder faller under särskilt ogynnsamma förhållanden. I beräkningarna antas stora nederbördsmängder samverka med effekterna av en snörik vinter. Beräkningsgången illustreras schematiskt i figur 2.7.

För beräkningarna har HBV-modellen kalibrerats mot långa tidsserier av tillrinningsdata på ett sådant sätt att särskild vikt lagts vid att beskriva höga flödestoppar så bra som möjligt. Därefter har frekvensanalys gjorts av det modellberäknade snömagasinets årliga maximivärden, och snöns maximala vatteninnehåll med en återkomsttid av 30 år har bestämts. Detta värde på snötäcket läggs i dimensioneringsberäkningarna in på det senaste datum vid vilket snötäcket kulminerat under något av de analyserade åren. I beräkningen antas samma relativa fördelning av snön mellan områdets höjdzoner och delområden, som modellberäkningen uppvisat under det år då snötäcket varit maximalt.



Figur 2.7. Schematisk beskrivning av beräkningsgången vid beräkning av ett flöde av flödesdimensioneringsklass I enligt riktlinjerna för bestämning av dimensionerande flöden för dammanläggningar.

Vid dimensioneringsberäkningens början antas att hela området saknar markvattenunderskott. Enligt riktlinjerna ska regleringsmagasinen antas vara avsänkta till nivåer som bedöms vara rimliga när vårfloden förväntas bli kraftig. I den aktuella analysen har magasinerna i samtliga fall antagits avsänkta till sänkingsgränsen. Produktionstappning har antagits ske i den omfattning som bedömts vara rimlig när en kraftig vårflod förutses. Utöver produktionstappningen, antas ingen övrig tappning ske fram tills dess att dämningensgräns uppnås. Vid nivåer över dämningensgräns antas maximal avbördning ske genom utskoven. När dämningensgräns uppnåtts, vilket förutsätts ske senast 1 augusti, tillåts magasinerna inte avsänkas igen förrän den kritiska flödesperioden är över.

I dimensioneringsberäkningen beräknas de kritiska flöden och vattenstånd som uppstår då den verkliga observerade nederbörden under olika perioder byts ut mot en dimensionerande nederbördssekvens. Den 14 dagar långa nederbördssekvensen ersätter verklig nederbörd vid olika tidpunkter, genom att sekvensens start under beräkningen förskjuts i tiden i steg om ett dygn i taget. Nederbördssekvensen är definierad för 5 st regioner i landet och den dimensionerande nederbörden korrigeras även för höjd över havet och för avrinningsområdets storlek. Dessutom tillkommer en årstidskorrektion som definieras på olika sätt i de olika regionerna. När den mest intensiva

nederbörden antas falla (under dygn nio i sekvensen), förutsätts att produktionstappningen faller bort och att avbördning bara kan ske genom utskov.

Enligt riktlinjerna skall beräkningen av det dimensionerande flödet baseras på en period om minst 10 år. I detta projekt har genomgående en 20-årsperiod använts.

2.7 Regleringsstrategier

Regleringen har i beräkningarna av flöden enligt flödesdimensioneringsklass I beskrivits enligt riktlinjerna för bestämning av dimensionerande flöden för dammanläggningar (Svensk energi m.fl., 2007). I korthet innebär detta:

- Befintliga magasin är avsänkta till nivåer som bedöms rimliga när vårfloden förväntas bli kraftig.
- När magasinet börjar fyllas, förutsätts att minimitappning sker i föreskriven omfattning, samt att den produktionstappning pågår, som bedöms rimlig vid en prognos som förutser kraftig vårflod. Om förtappning kan antas bli föreskriven, får hänsyn tas till denna.
- När den mest intensiva nederbörden antas falla (från dygn 9 i nederbördssekvensen och därefter), förutsätts att produktionstappningen faller bort och att avbördning bara kan ske genom dammanläggningens utskov (maximal avbördningsförmåga enligt avbördningskurva).
- Efter det att de i systemet ingående magasinerna nått sina respektive dämningssgränser, vilket förutsätts ha skett senast den 1 augusti, antas magasinerna inte bli avsänkta under dämningssgränsen förrän den för regionen kritiska flödesperioden är över.

I detta projekt har dessutom vissa förenklingar av regleringsrutinerna tillämpats:

- Nivån som bedöms vara rimlig när vårfloden förväntas bli kraftig har alltid förutsatts vara sänkningsgräns
- Avsänkingsfasen beskrivs inte i regleringsstrategin
- Produktionstappning har alltid antagits vara 20 % av utbyggnadsvattenföringen
- Ingen förtappning har använts i beräkningarna

Sammantaget betyder detta att regleringsstrategierna i dessa beräkningar förutsätts vara opåverkade av ett förändrat klimat och ändrade marknadsförhållanden. Detta är en förenkling som diskuterats ingående i projektets styrgrupp och inom *Kommittén för dimensionerande flöden för dammar i ett klimatförändringsperspektiv*.

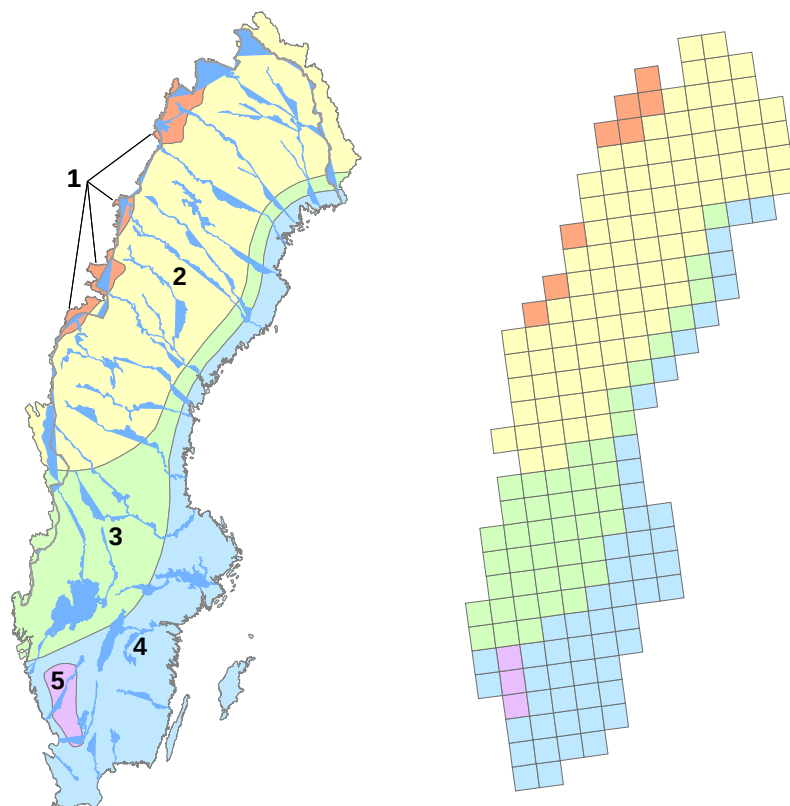
2.8 Extrem nederbörd och dimensionerande nederbördssekvens

När de dimensionerande nederbördssekvenserna togs fram av Flödeskommittén (1990) användes data över extrem nederbörd från perioden 1926-1988, det vill säga 63 år. Tillgängliga data från klimatmodellerna har i denna studie utgjorts av tre tidsperioder, 1961-1990, som representerar dagens klimat och 2021-2050 samt 2071-2100, som representerar ett framtida klimat. Dessa tidsperioder består således av 30 års data att jämföra med 63 år för Flödeskommitténs beräkningar.

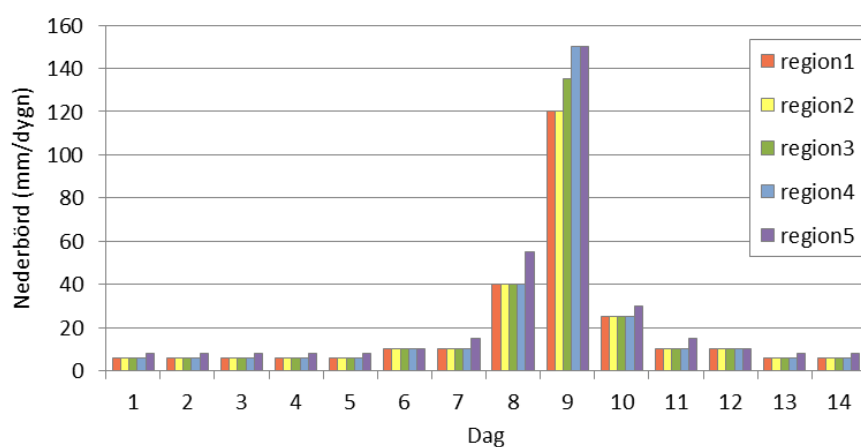
Flödeskommittén delade in landet i fem olika regioner baserat på regionala skillnader i nederbördens intensitet och årstidsfördelning, se figur 2.8. För att bedöma hur de gällande riktlinjerna står sig i ett förändrat klimat har dessa regionindelningar behållits. Detta trots att den regionala fördelningen av nederbörd kan tänkas förändras på grund av förändringar i atmosfärens cirkulationsmönster och en förflyttning av temperaturgränser norrut. En justering av regionindelningen skulle vara komplicerad att införa, eftersom den skulle vara olika i de olika scenarierna.

Klimatmodellerna beräknar Sveriges klimat i ett rutnät som består av cirka 200 rutor med upplösningen 50×50 km (cirka 700 rutor med upplösningen 25×25 km). I figur 2.8 visas detta rutnät för 50×50 km och hur det sammanfaller med Flödeskommitténs regionindelning.

Att återskapa de dimensionerande nederbördssekvenserna från analys av klimatmodellens simuleringar för dagens klimat är inte möjligt. Dels är klimatmodellens kontrollsimulering endast 30 år och dels ger inte klimatmodellen riktigt lika stor extremnederbörd som observationer. Istället används en metod för att modifiera de dimensionerande nederbördssekvenserna baserat på klimatscenarierna nederbördskaraktäristik.



Figur 2.8. De fem regioner som används för de dimensionerande nederbördssekvenserna enligt Riktlinjerna för bestämning av dimensionerande flöden för dammanläggningar (vänster) och motsvarande indelning gjord för klimatmodellens beräkningsrutor (höger).



Figur 2.9. Dimensionerande nederbördssekvens för de fem regionerna enligt Riktlinjerna för bestämning av dimensionerande flöden för dammanläggningar (efter Svensk Energi 2007).

Den största dygnsnederbörd som förekommit i någon beräkningsruta inom en region under varje dag på året, extraheras för att skapa ett maximalt år för dygnsnederbörd. Även 14-dygnsnederbörden extraherades för att på samma sätt skapa ett maximalt år för 14-dygnsnederbörden. Från dessa analyser har sedan förändring av både dygnsnederbörd och 14-dygnsnederbörd beräknats. Att bedöma förändringen utgående från enbart det högsta värdet visade sig dock vara alltför påverkat av tillfälligheter för att analysen ska vara stabil. Istället användes frekvensanalys av varje års högsta nederbörd i någon ruta i respektive region för att finna förändringen av maximal nederbörd i regionen. För detta användes Gumbels fördelning och 100 års återkomsttid.

Den återkomsttid som beräknats på detta sätt är 100 år om man antar att regnet kan falla på en godtycklig plats var som helst i regionen. Om man däremot antar att regnet faller i en given gridruta eller ett givet avrinningsområde inom regionen blir återkomsttiden betydligt längre för denna händelse (lägre sannolikhet), eftersom varje region består av flera rutor.

Den relativa förändringen i 100-årsvärdet för dygnsnederbörd användes för att modifiera den dimensionerande nederbördssekvensens toppvärde (dag 9). Då sekvensen ursprungligen är framtagen för att generera ett så högt flöde som möjligt gjordes inget försök att ändra på fördelningen av nederbörd inom sekvensen. Efter att toppvärdet justerats, användes förändringen i 14-dygnsnederbörd till att justera den övriga sekvensen så att rätt totalvolym erhöles.

2.9 Beräkningssystem

Inom projektets ram har ett omfattande arbete lagts ned på att utveckla hanterbara beräkningssystem. Dessa system och deras användningsområde sammanfattas nedan:

- DBS-skalering av regionala klimatscenarier på Nationellt Superdator Centrum (NSC) i Linköping.
- Lagring av skalerade klimatscenarier i databaser med 4×4 km upplösning för Sverige (PTHBV-format).
- Hämtning av data från PTHBV-databaser till drivdatafiler för HBV-modellen.
- Analys av data från simuleringar (t.ex. plottning av medelårshydrografer med max- och min-värden, beräkning av nederbörds- och temperaturförändring för varje testområde och klimatscenario, löpande frekvensanalys samt plottning av dessa).
- Extraktion av nederbördsextremer från klimatscenarier.
- Modifiering av dimensionerande nederbördssekvenser i de 5 regionerna enligt riktlinjerna för bestämning av dimensionerande flöden för dammanläggningar utgående från analys av klimatsceniernas nederbördsextremer.

- Automatisering av beräkningar med HBV-modellen enligt flödesdimensioneringsklass I för ett stort antal klimatscenarier och tidsperioder, samt rutiner för att spara resultat och loggfiler enligt SMHIs kvalitetsrutiner.

2.10 Meteorologisk databas

För simuleringarna som avser dagens klimatförhållanden har areellt högupplösta meteorologiska data använts som indata till HBV-modellen. Nederbörd och temperatur har hämtats från den databas, PTHBV, som SMHI byggt upp med särskild inriktning på hydrologisk modellering. Databasen innehåller interpolerade värden på nederbörd och temperatur, vilka anges i ett rikstäckande rutnät med upplösningen 4x4 km.

Data från SMHIs meteorologiska stationer har interpolerats till gridrutorna med hjälp av en geostatistisk interpolationsmetod som benämns optimal interpolation. Metoden innebär att hänsyn tas både till stationernas avstånd från beräkningsrutan och till deras inbördes korrelation. För att i interpolationen kunna beskriva den rumsliga variationen, utnyttjas höjddata samt (för nederbörd) även information om typisk vindriktning och vindstyrka under olika delar av året och i olika delar av landet. Detaljer om hur interpolationen utförs beskrivs av Johansson (2000) och Johansson och Chen (2003 och 2005).

I databasen har den observerade nederbörden även korrigerats för mätförluster, som framför allt orsakas av att en del av nederbörden blåser förbi mätaren. Mätförlusterna har beräknats enligt Alexandersson (2003). I dessa beräkningar tas hänsyn till hur vindutsatt mätstationen är och om nederbörden faller som snö eller regn, vilket avgörs utifrån temperaturen.

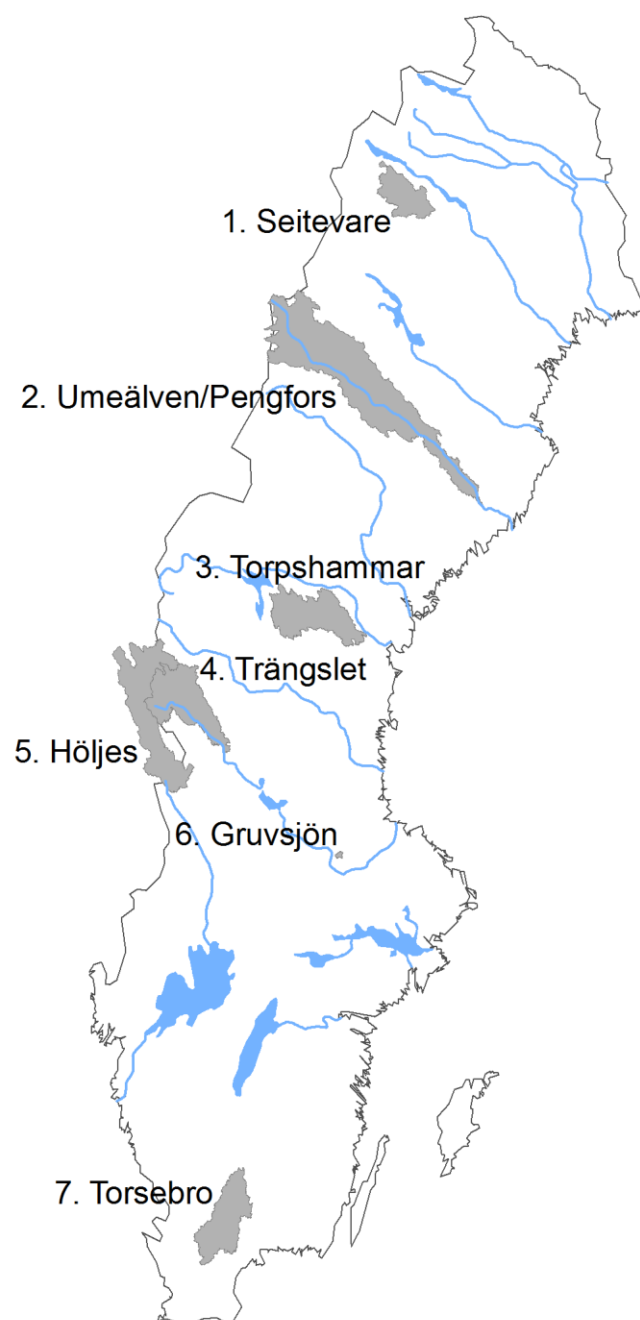
2.11 Beräkningsområden för flödesdimensioneringsklass I

För analysen av flöden i flödesdimensioneringsklass I valdes initialt följande sju testområden ut:

1. **Seitevare**, längst upp i Lilla Luleälv i nordvästra Lappland. Dimensioneringsberäkningar har utförts för tillrinningen till Seitevare kraftverk som ligger vid utloppet av Tjaktajaure-magasinet. Tillrinningsområdet, som är cirka 2300 km² stort, sträcker sig upp i fjälltrakterna och består till cirka 5 % av glaciärer. Områdets medelhöjd är högre än 900 m.ö.h. och endast cirka 25 % av tillrinningsområdet är skogsbevuxet. Magasinet innehåller 1650 miljoner m³ reglerbar vattenvolym.
2. **Umeälven/Pengfors** har valts ut som testområde för att illustrera effekten av framtida klimatförändringar på en hel älv som är kraftigt reglerad. Pengfors ligger i Umeälven strax uppströms sammanflödet med Vindelälven. Uppströms i älven finns ett stort antal större magasin med kraftverk. Totala tillrinningsområdet uppströms dimensioneringspunkten är cirka 13 500 km². Modellparametrar i beräkningsmodellen är hämtade från befintlig prognosmodell och regleringsrutinerna har förenklats för dimensioneringsberäkning enligt de principer som tillämpats i övriga testområden (se avsnitt 2.7).

3. **Torpshammar** representerar förhållandena i skogslandskapen i södra Norrlands inland. Det dimensionerande flödet har bestämts vid Torpshammars kraftverk som ligger vid Grönstadammen i Ljungans största biflöde, Gimån. Tillrinningsområdet är cirka 4 300 km² stort. Magasineringen sker huvudsakligen längre upp i vattendraget, uppströms Leringsforsdammen, i sjön Leringen med en reglerbar volym av 360 miljoner m³.
4. **Trängslets** tillrinningsområde är cirka 4 500 km² stort och ligger i Dalarnas län, där en del sträcker sig in i Norge. Området är en del av Dalälvens avrinningsområde och utgör den översta delen av Österdalälven. Trängsletdammen är Sveriges högsta damm och dämmer upp den 70 km långa Trängsletsjön med en reglerbar volym av 880 miljoner m³.
5. **Höljesdammen** i Klarälven. Dammen har ett tillrinningsområde på cirka 6 000 km². Området indikerar flödesrelaterade risker längs Klarälven och i Karlstad. Höljesdammen har en reglerbar volym av 270 miljoner m³.
6. **Gruvsjön** är det minsta testområdet (44 km²). Det ligger vid Garpenberg i södra Dalarna. Dimensioneringsberäkningar har utförts för tillrinningen till Gruvsjödammen som ligger längst nerströms i ett system av mindre gruvdammar.
7. **Torsebro kraftverk** ligger i Helge å, cirka en mil uppströms Hammarsjön och Kristianstad. Tillrinningsområdet är cirka 3 700 km² stort. Höga flöden i Helge å och därmed högt vattenstånd i Hammarsjön har stundtals hotat översvämma det lågt liggande Kristianstad. Påverkan av regleringar i Helge å bedöms vara liten vid höga flöden. Därför har inga regleringar inkluderats i beräkningarna.

Samtliga områden återfinns på kartan i figur 2.10. I figur 2.11 visas fotografier från Seitevare, Torpshammar, Trängslet och Gruvsjön.



Figur 2.10. Beräkningsområden för flöden i flödesdimensioneringsklass I.



Figur 2.11. Flygbild över Seitevare-dammen med Tjaktjajaure magasinet nästan uppe vid dämningssgräns (överst till vänster, copyright Vattenfall, fotograf Jennie Nilede), utskov i Torpshammar med pågående spill (överst till höger, copyright Vattenfall, fotograf Erik Nordström), flygbild över Trängslettdammen (nederst till vänster, copyright Fortum, fotograf Stefan Sjödin), samt Gruvsjön (nederst till höger, copyright Boliden, fotograf Jenny Gotthardsson).

3 Resultat

3.1 Internationell publicering och presentation

Resultaten från "Dimensionerande flöden för dammanläggningar för ett klimat i förändring -metodutveckling och scenarier" (Andréasson, 2011a) har bearbetats vidare och använts för publicering i tre artiklar i internationellt sammanhang. I anslutning till konferenser har artiklarna varit grunden i muntliga framställanden.

ICOLDs 24:e kongress hölls i Kyoto, Japan den 6-8 juni 2012. Sten Bergström (SMHI) genomförde en muntlig presentation för en internationell publik. Under resan deltog, och bidrog, Sten också till ett möte med ICOLDs arbetsgrupp för "Climate change and dam safety", vilken från SwedCOLDS sida representeras av Claes-Olof Brandesten, Vattenfall AB. Bidraget redovisas som "*Climate adaptation of the Swedish guidelines for design floods for dams*" (Bergström m.f.l, 2012)

Vid IAHS konferensen 22-26 juli 2013 i Göteborg presenterades två bidrag muntligt och trycktes även i IAHS Red Book i samband med konferensen. Sten Bergström presenterade "*Climate change in accounting for climate change and uncertainty: experience from strategic adaptation projects in Sweden*" (Bergström & Andréasson, 2013) och Jonas German presenterade "*Hydrological flood design in Sweden - Climate change and inherent uncertainties*" (Andréasson m.f.l, 2013)

3.2 Anpassning av klimatmodellsdata

Grundprincipen för DBS-metoden är att statistisk analys av långa tidsserier av observerade klimatdata används för att justera klimatmodellernas utdata. Med hjälp av denna justering är det möjligt att använda tidsserier av utdata från klimatmodellerna som indata till HBV-modellen. Genom DBS-metoden justeras klimatmodellernas utdata till nivåer som överensstämmer bättre med observationer samtidigt som klimatmodellernas variabilitet bibehålls.

3.3 Utvärdering av data från klimatmodellerna

De tidsserier som klimatmodellerna genererar kan inte jämföras med verkliga observationer under specifika år. De representerar i stället ett antal typiska år med ungefär samma statistiska egenskaper som dagens klimat. Genom att jämföra karakteristiska värden från modeller med observationer är det möjligt att mäta hur väl en klimatmodell återger historiskt klimat. Det brukar ses som ett starkt kvalitetskriterium att klimatmodeller kan återspegla dagens klimat men det finns flertalet utvärderingsmetoder och ståndpunkter om hur sådana jämförelser bäst genomförs. Förutom att återge klimat i termer av temperatur, nederbörd och tryck är det också viktigt att efterlikna viktiga cirkulationsmönster, exempelvis lågtrycksbanor över Skandinavien.

Inom CMIP5 har det gjorts stora ansträngningar att samordna, dela och jämföra utfall från klimatsimuleringar. I figur 3.1 visas resultat från en jämförelse mellan globala klimatmodeller och observationer. Det framgår av figuren att det finns skillnader mellan hur väl modeller överensstämmer med historiskt uppmätt data. Bilden är modifierad för att bara visa de modeller som ingår i föreliggande rapport. Förkortningarna av variablerna motsvarar följande;

LW CRE/SW CRE: Effekten av höga moln på lång-/kortvågig strålning

RSUT/ RLUT: Reflekterad lång-/kortvågig strålning

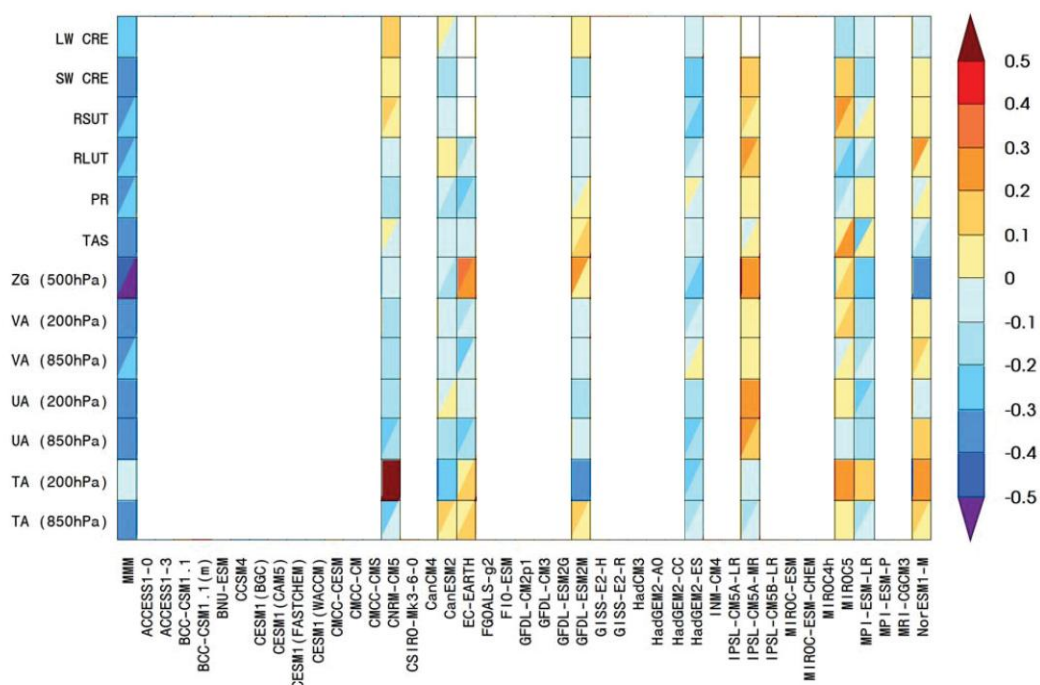
PR: Total nederbörd

TAS: Temperatur på nivån 2m

VA(200hPa)/VA(850hPa)/UA(200hPa)/UA(850hPa): Vind på olika nivåer

ZG, geopotential(500 hPa)

TA(200hPa)/TA(850hPa) : Temperatur på olika nivåer

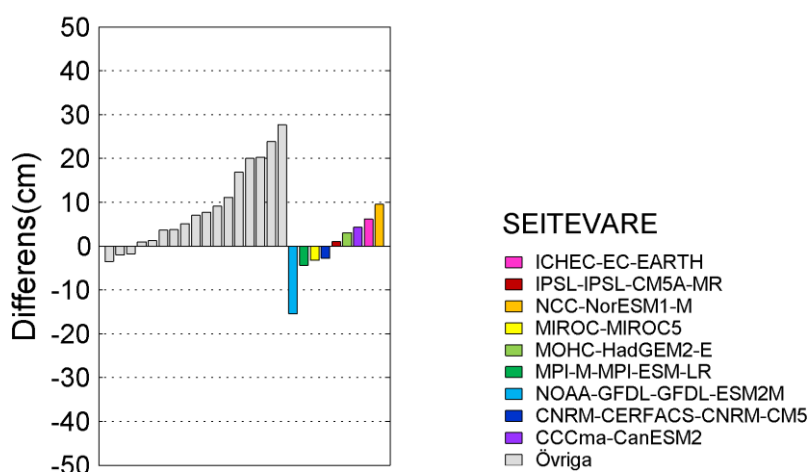


Figur 3.1. Utvärdering av modellprestanda (modifierad efter IPCC, 2013). Bilden visar relativ avvikelse inom CMIP5 vid jämförelse med historiska dataset. Kvalitetsmättet (RMSE) är normaliserat mot medianvärdet för för alla modeller i jämförelsen. Exempelvis motsvarar ett värde på 0.20 att den modellens avvikelse är 20% större än medianvärdet för den undersökta parametern. I fall där det finns en diagonal avdelning har jämförelse genomförts för två olika dataset med historisk data. Modeller som inte ingår i den ensemble som studerats i detta projekt har exkluderats från originalfiguren.

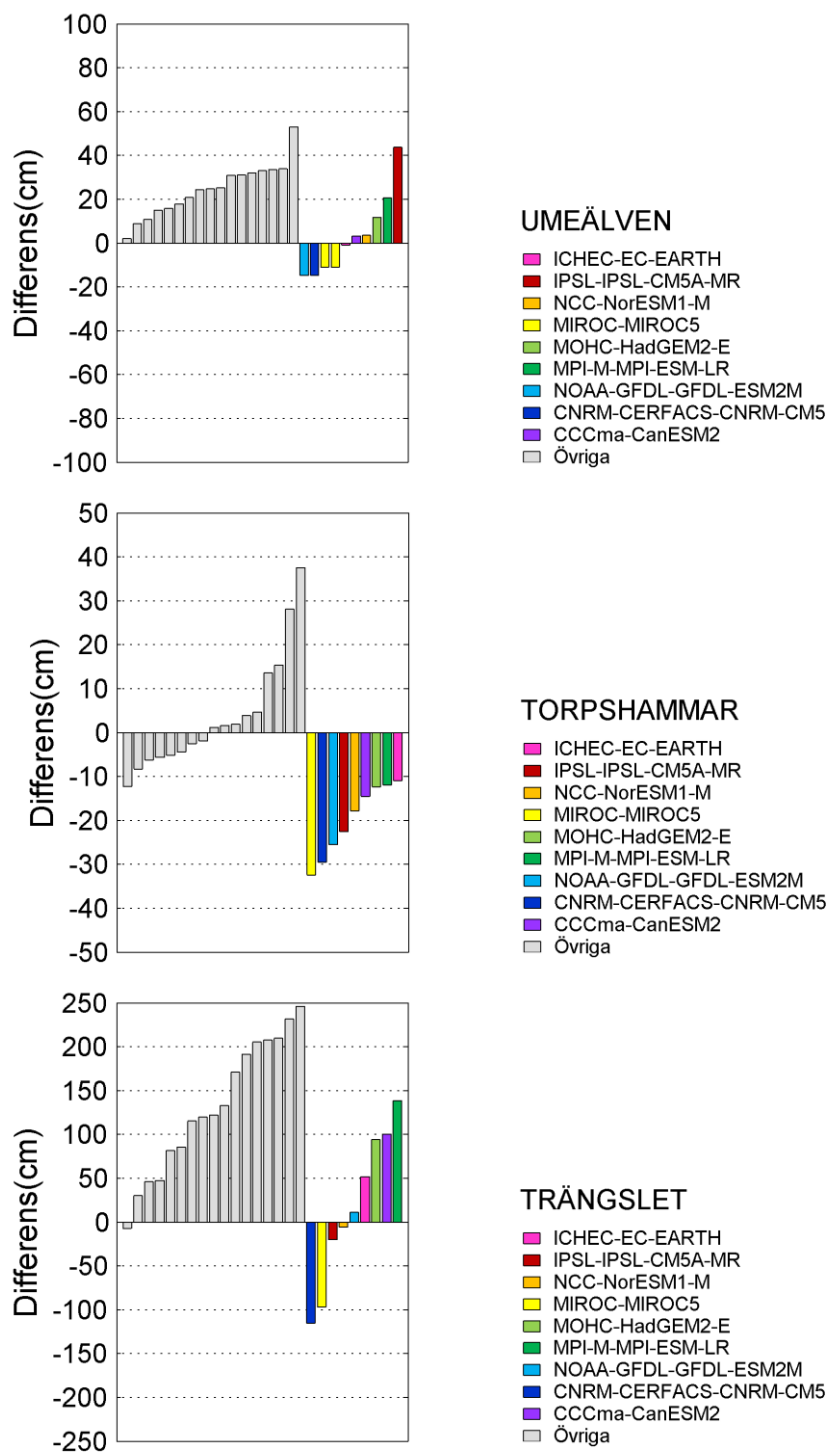
Trots användning av DBS-metoden, kvarstår en del systematiska fel i utdata från de regionala klimatmodellerna. Detta gör det osäkert att i absoluta tal jämföra en dimensioneringsberäkning under dagens klimat, baserad på observerade klimatdata, med en beräkning i framtidens klimat, baserad på

modelldata. Mot denna bakgrund används i detta projekt modelldata även för beräkning av flöden under dagens klimatförhållanden. Med denna ansats analyseras alltså förändring av klimatet inom respektive klimatmodell genom att jämföra referensperioden som beskriver dagens klimat jämfört med framtida perioder.

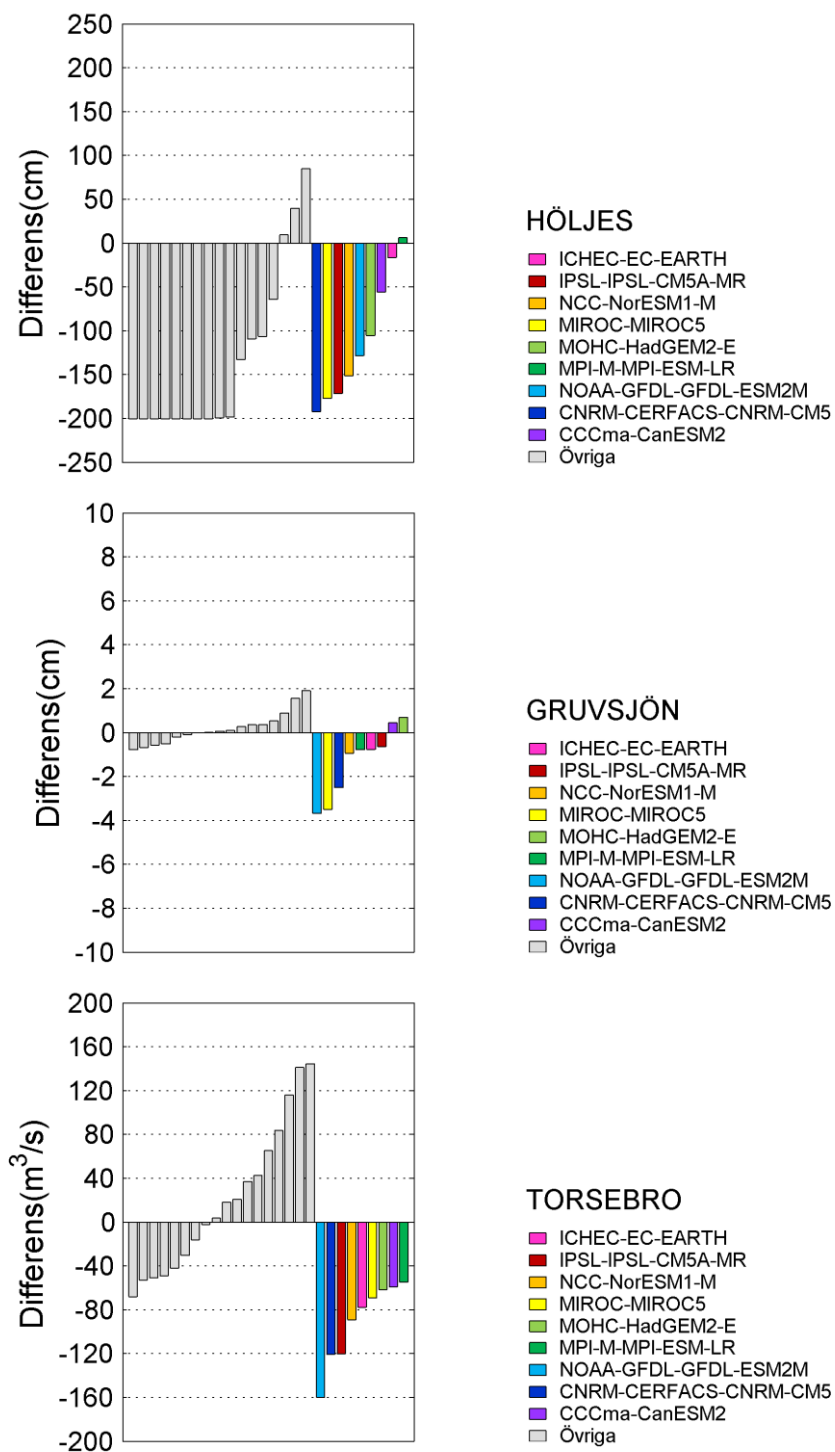
Även om effekten av klimatförändring utvärderas inom respektive klimatmodell enligt föregående resonemang är det intressant att jämföra data baserat på klimatmodeller med observationer för samma period. Figur 3.2-figur 3.4 visar hur mycket det beräknade dimensionerande vattenståndet/vattenföringen baserat på data från klimatmodellerna för dagens klimat avviker från motsvarande beräkningar som baserats på observerade data. Resultat från SRES-ensemblen visas i grå staplar och färgade staplar motsvarar RCP-ensemblen. Det finns stora skillnader i avvikelsernas storlek och spridning mellan olika anläggningar. Det kan också noteras att det förefaller vara samma modeller som över- resp underskattar dimensionerande nivå/flödet för flertalet anläggningar.



Figur 3.2. Avvikelse mellan beräknat dimensionerande vattenstånd för Seitevare. Skillnaden avser beräkningar för dagens klimat baserat på observationer och motsvarande värde baserat på data från regionala klimatmodeller.



Figur 3.3. Avvikelse mellan beräknat dimensionerande vattenstånd för Umeälven/Pengfors, Torpshammar och Trängslet. Skillnaden avser beräkningar för dagens klimat baserat på observationer och motsvarande värde baserat på data från regionala klimatmodeller.



Figur 3.4. Avvikelse mellan beräknat dimensionerande vattenstånd/tillrinning för Höljes, Gruvsjön och Torsebros. Skillnaden avser beräkningar för dagens klimat baserat på observationer och motsvarande värde baserat på data från regionala klimatmodeller.

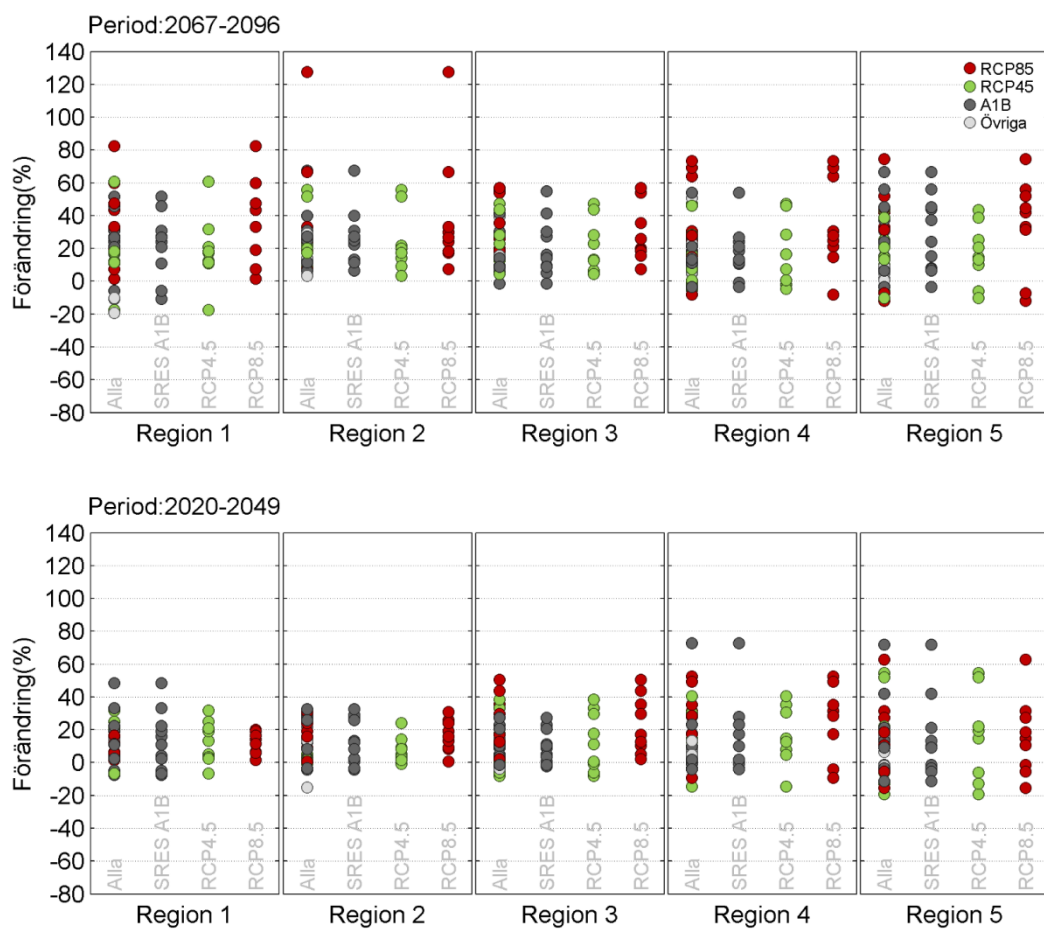
3.4 Nederbördsextremer

I avsnitt 2.8 beskrivs hur den dimensionerande sekvensens maxvärde (dag 9) och dess totala volym beräknas ur regionala klimatscenarier. Skillnaden i dimensionerande nederbördssekvens för respektive klimatscenario jämfört med riktlinjernas nuvarande nederbördssekvens framgår av figur 3.5 och figur 3.6.

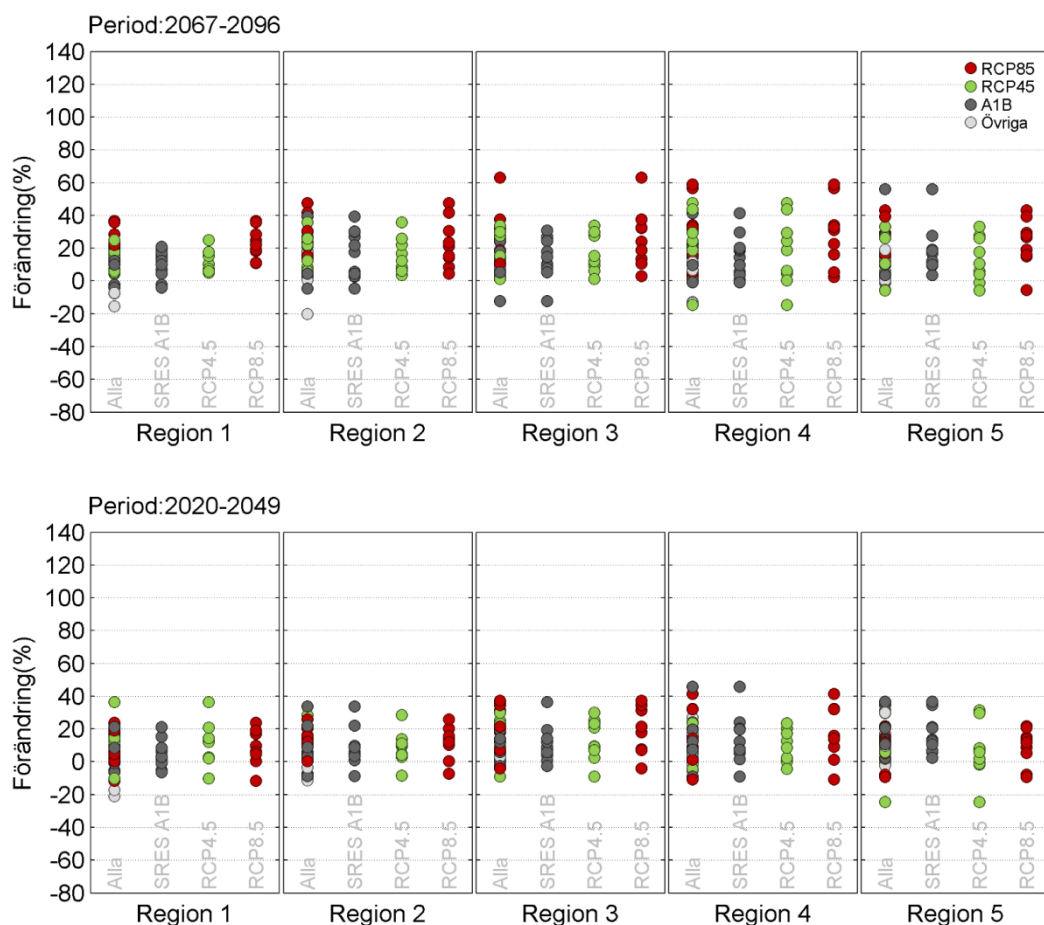
I figur 3.5 visas hur toppvärdet i den dimensionerande nederbördssekvensen förändras för perioden år 2021-2050 samt år 2070-2100 uppdelat per region jämfört med dagens situation. Genom att särskilja scenarier av typen SRES och RCP undersöks om det finns stora skillnader inom den ena eller andra gruppen. I figur 3.6 redovisas på motsvarande sätt förändring av totalvolym i den dimensionerande nederbördssekvensen.

Det framgår att med hänsyn till alla tillgängliga scenarier och för alla regioner varierar förändringen av toppvärdet mellan ca -20 % till + 80 %, med undantag för ett värde som är betydligt större. Motsvarande för volymförändringen är i storleksordningen -20 % till +60%.

Det är intressant att notera att den dimensionerande nederbördssekvensen ökar i samtliga regioner och att skillnaderna mellan regionernas ökningstakt överlag är ganska måttlig. Det finns en svag trend mot att dimensionerande nederbördssekvenser från scenarier av typen RCP8.5 generellt har något högre toppvärde och volyminnehåll än scenarier av typen RCP4.5. För de flesta regioner är den spännvidd som representeras av RCP4.5 och RCP8.5 likartad den spännvidd som SRES A1B ger upphov till. I Bilaga redovisas motsvarande resultat som i figur 3.5 och figur 3.6. med möjlighet till att identifiera enskilda globala modeller.



Figur 3.5. Förändring av den dimensionerande nederbördssekvensens maxvärde för perioderna 2067-2096 (övre) och 2020-2049 (undre) jämfört med referensperioden 1961.



Figur 3.6. Förändring avseende volym i dimensionerande nederbördssekvens för perioderna 2067-2096 (övre) och 2020-2049 (undre) jämfört med referensperioden 1961.

3.5 Beräkningar för flödesdimensioneringsklass I

Beräknade förändringar av det dimensionerande flödet i flödesdimensioneringsklass I enligt riktlinjerna för bestämning av dimensionerande flöden för dammanläggningar har genomförts de 7 st anläggningarna i avsnitt 2.11. I det följande redovisas resultaten separat för respektive område. Redovisningen inleds med en översiktlig bild av klimatets beräknade förändring för olika kategorier av utsläpsscenarier enligt Tabell 2.1 och Tabell 2.2. Därefter följer ett diagram som beskriver hur de olika komponenterna i en beräkning enligt flödesdimensioneringsklass I påverkas av olika klimatscenarier.

Diagrammen i figur 3.8, figur 3.10, figur 3.12, figur 3.14, figur 3.16, figur 3.18 samt figur 3.20, visar procentuell förändring av volymen av nederbördssekvens, sekvensens toppvärde, dimensionerande snömagasin, medeltillrinning, maximal tillrinning vid dimensioneringstillfället, samt förändring av dimensionerande vattenstånd i cm enligt 36 st olika

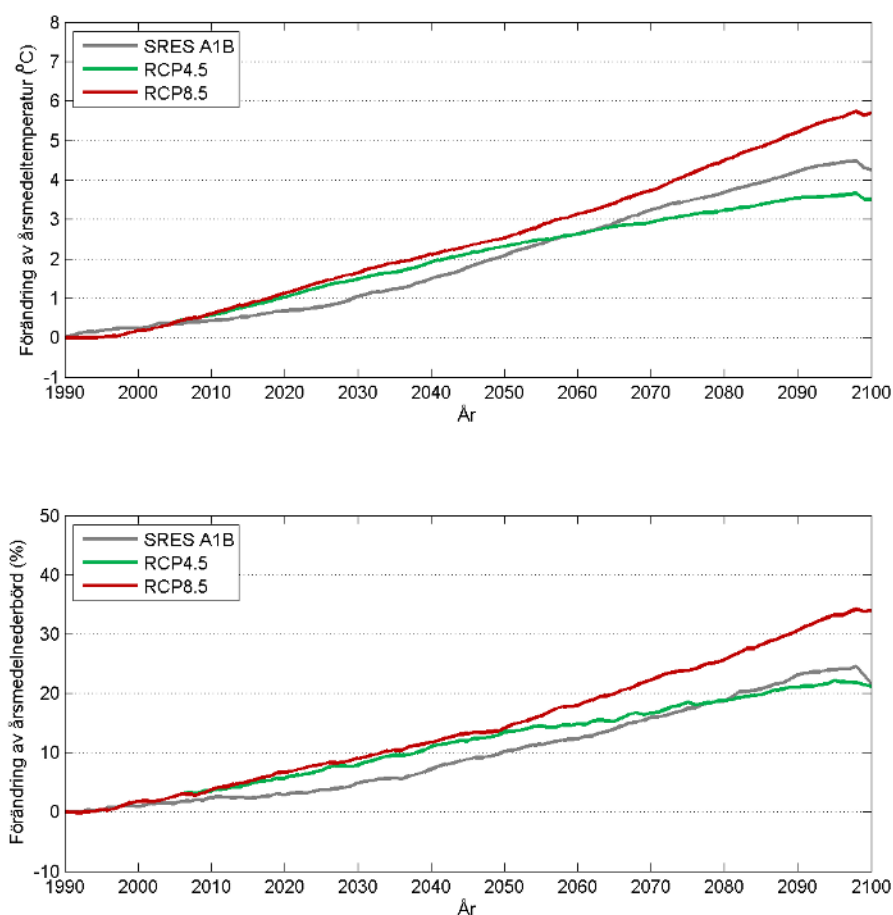
klimatesimuleringar gällande perioden 2067-2096 (överst) och 2020-2049 (mitten). Referensperioden som beräkningarna jämförs med är 1971-1990. Underst visas tid på året då det dimensionerande tillfället inträffar för de tre beräkningsperioderna.

I redovisningen av respektive område lämnas en kortfattad värdering av resultaten. Denna skall dock inte tolkas bokstavligt utan är mer tänkt som en hjälp att tolka diagrammen. Avsnittet avslutas med en sammanfattning där en överblick ges för samtliga anläggningar.

Seitevare

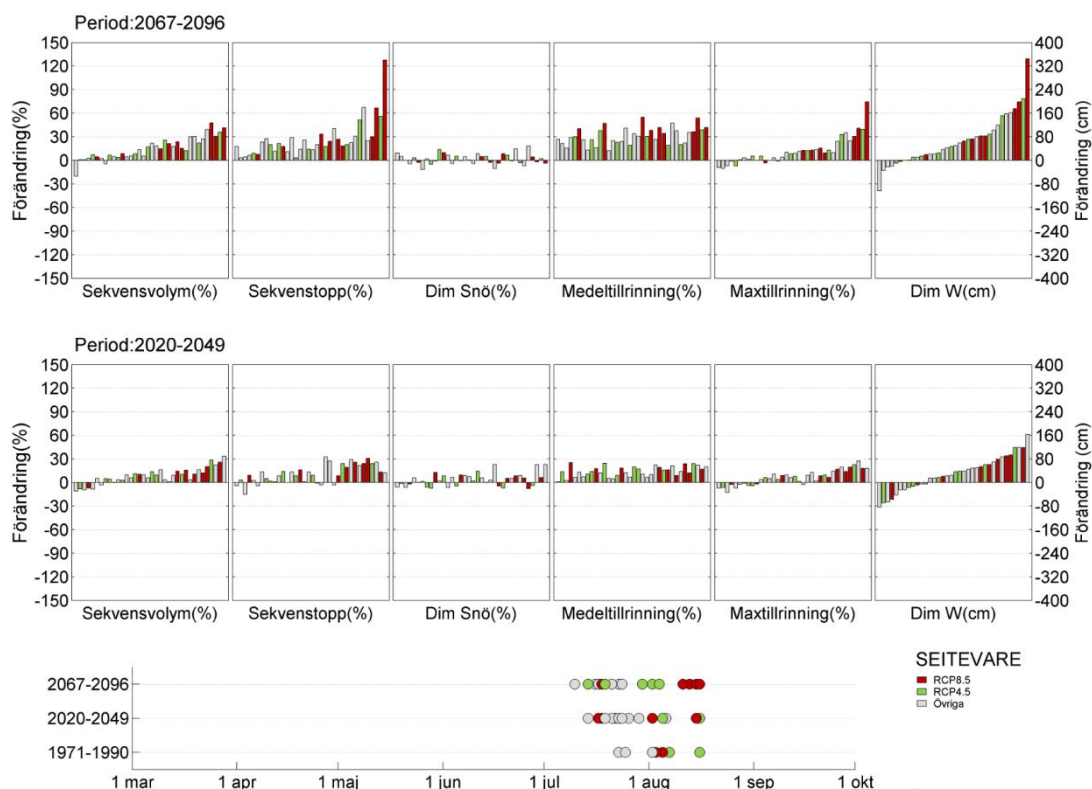
I figur 3.7 redovisas den modellberäknade utvecklingen av lufttemperaturen och nederbörden i Seitevares tillrinningsområde jämfört med dagens årsmedelvärden.

Den beräknade ökningen av årsmedeltemperaturen i Seitevares tillrinningsområde ligger på ca 3-6 grader under seklet, medan den beräknade årsnederbörden ökar med 20-35 %.



Figur 3.7. Beräknad förändring av årsnederbörd och årsmedeltemperatur i Seitevares tillrinningsområde för olika kategorier klimatscenarier. Referensperioden är 1961-1990.

Beräkningarna enligt flödesdimensioneringsklass I för Seitevare sammanfattas i figur 3.8.



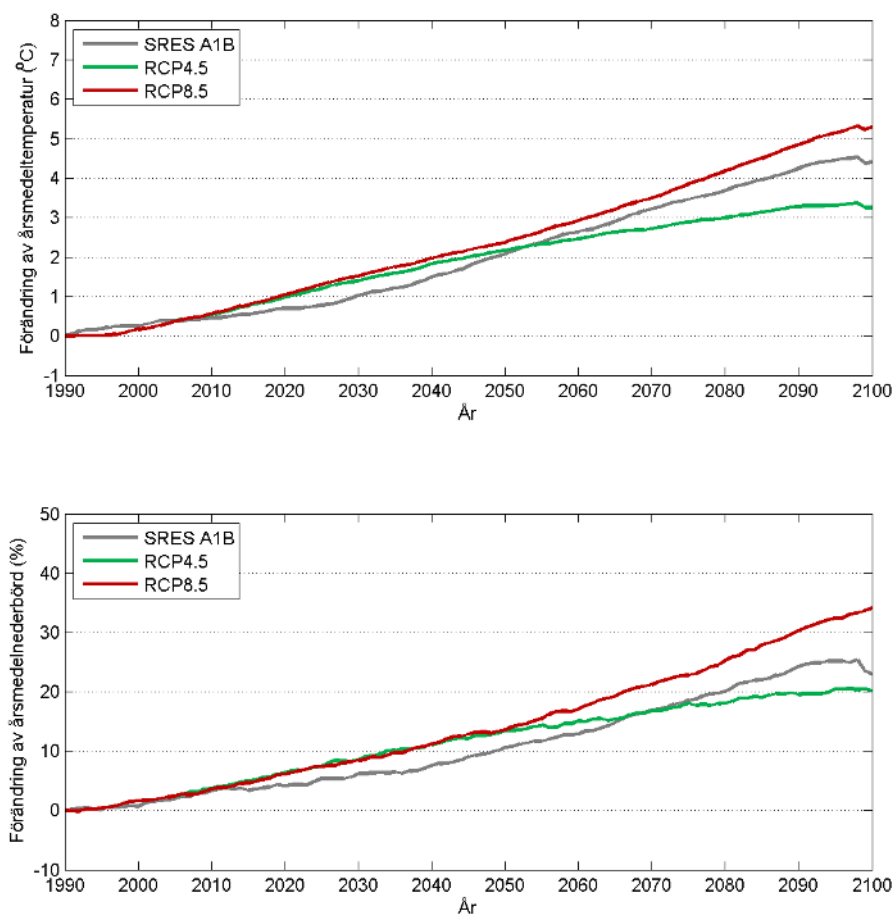
Figur 3.8. Procentuell förändring för Seitevare av sekvensvolym, sekvenstopp, dimensionerande snömagasin, medeltillrinning, maximal tillrinning vid dimensioneringstillfället, samt förändring av dimensionerande vattenstånd i cm enligt 36 st olika klimatsimuleringar gällande perioden 2067-2096 (över) och 2020-2049 (under). Referensperioden som beräkningarna jämförs mot är 1971-1990. Längst ner visas tidpunkt för dimensionerande vattenstånd för de tre beräkningsperioderna.

Sammantaget visar beräkningarna för Seitevare en ökning av den dimensionerande nivån i flödesdimensioneringsklass I efterhand som klimatet ändras. Signalen är likartad i både SRES- och RCP-ensemblen om än mer accentuerad i den senare. Det dimensionerande tillfället kan även i ett förändrat klimat förväntas infalla under hösten.

Umeälven/Pengfors

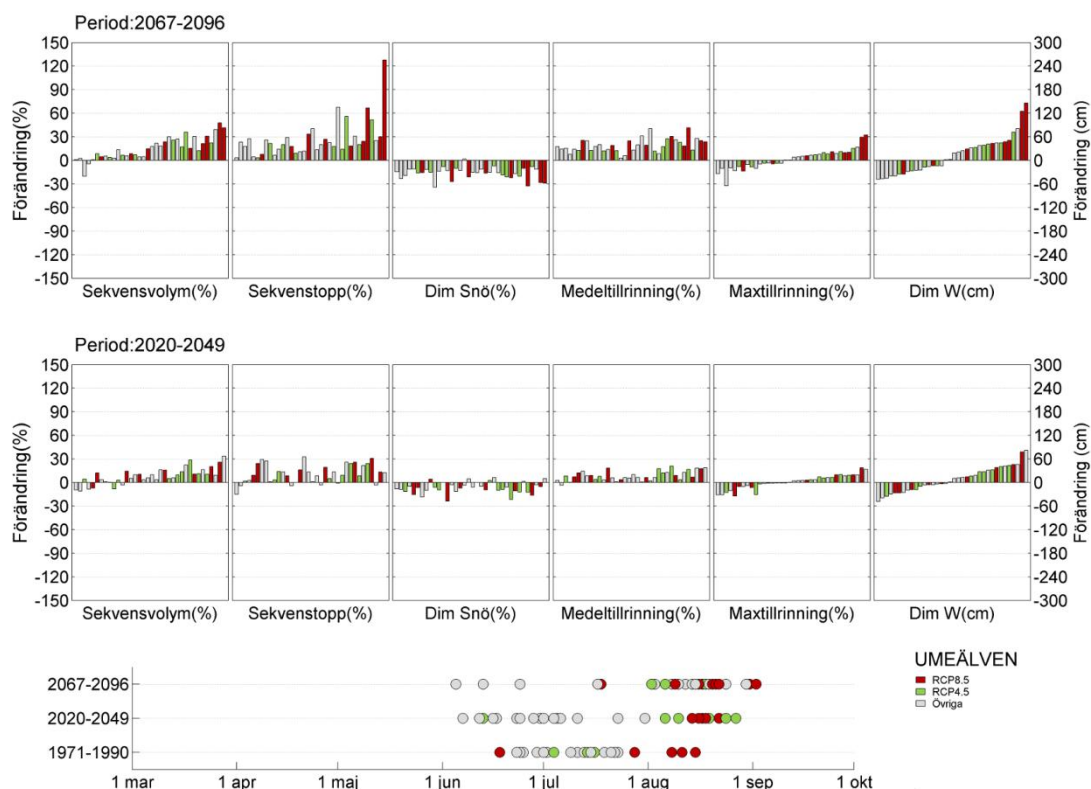
I figur 3.9 redovisas den modellberäknade utvecklingen av lufttemperaturen och nederbörden i tillrinningsområdet till Pengfors i Umeälven.

Den beräknade ökningen av årsmedeltemperaturen i Umeälvens/Pengfors tillrinningsområde ligger på ca 3-5,5 grader under seklet medan den beräknade årsnederbörden ökar med 20-35 %.



Figur 3.9. Beräknad utveckling av årsnederbörden i tillrinningsområdet till Pengfors i Umeälven för olika kategorier klimatscenarier. Referensperioden är 1961-1990.

Beräkningarna enligt flödesdimensioneringsklass I för Pengfors sammanfattas i figur 3.10.



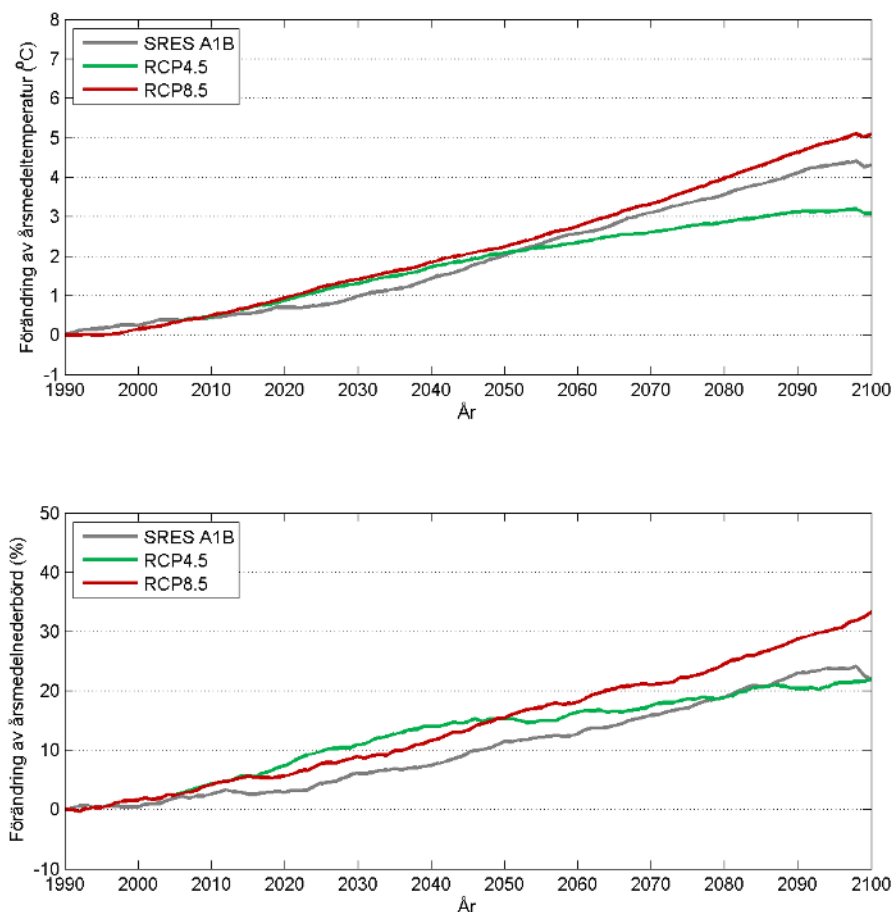
Figur 3.10. Procentuell förändring för Pengfors i Umeälven av sekvensvolym, sekvenstopp, dimensionerande snömagasin, medeltillrinning, maximal tillrinning vid dimensioneringstillfället, samt förändring av dimensionerande vattenstånd i cm enligt 36 st olika klimatsimuleringar gällande perioden 2067-2096 (över) och 2020-2049 (under). Referensperioden som beräkningarna jämförs mot är 1971-1990. Längst ner visas tidpunkt för dimensionerande vattenstånd för de tre beräkningsperioderna.

Eftersom Pengfors representerar nästan hela Umeälven och har ett förhållandevis litet magasin i förhållande till medelflödet är de staplar som representerar maximal tillrinning av störst intresse. Sammantaget visar beräkningarna en ökning av det dimensionerande flödet i flödesdimensioneringsklass I mot slutet av seklet. Datum för det dimensionerande tillfället sprids ut mer över året och inträffar i flera fall under hösten. Detta betyder att ett förändrat klimat medför en förändring av de förhållanden som skapar de mest extrema flödena i de nedre delarna av Umeälven.

Torpshammar

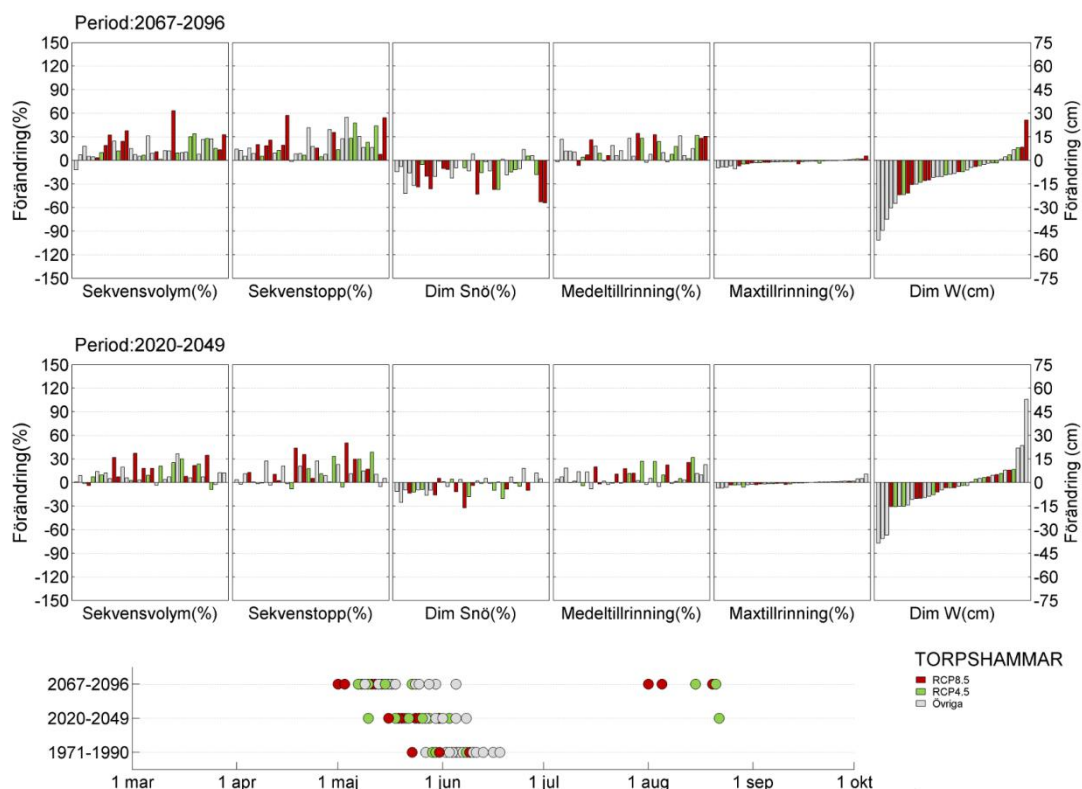
I figur 3.11 redovisas den modellberäknade utvecklingen av lufttemperaturen och nederbörden i Torpshammars tillrinningsområde.

Den beräknade ökningen av årsmedeltemperaturen i Torpshammars tillrinningsområde ligger på ca 3-5 grader under seklet medan den beräknade årsnederbörden ökar med 20-35 %.



Figur 3.11. Beräknad utveckling av årsnederbörden i Torpshammars tillrinningsområde för olika kategorier klimatscenarier. Referensperioden är 1961-1990.

Beräkningarna enligt flödesdimensioneringsklass I för Torpshammar sammanfattas i figur 3.12.



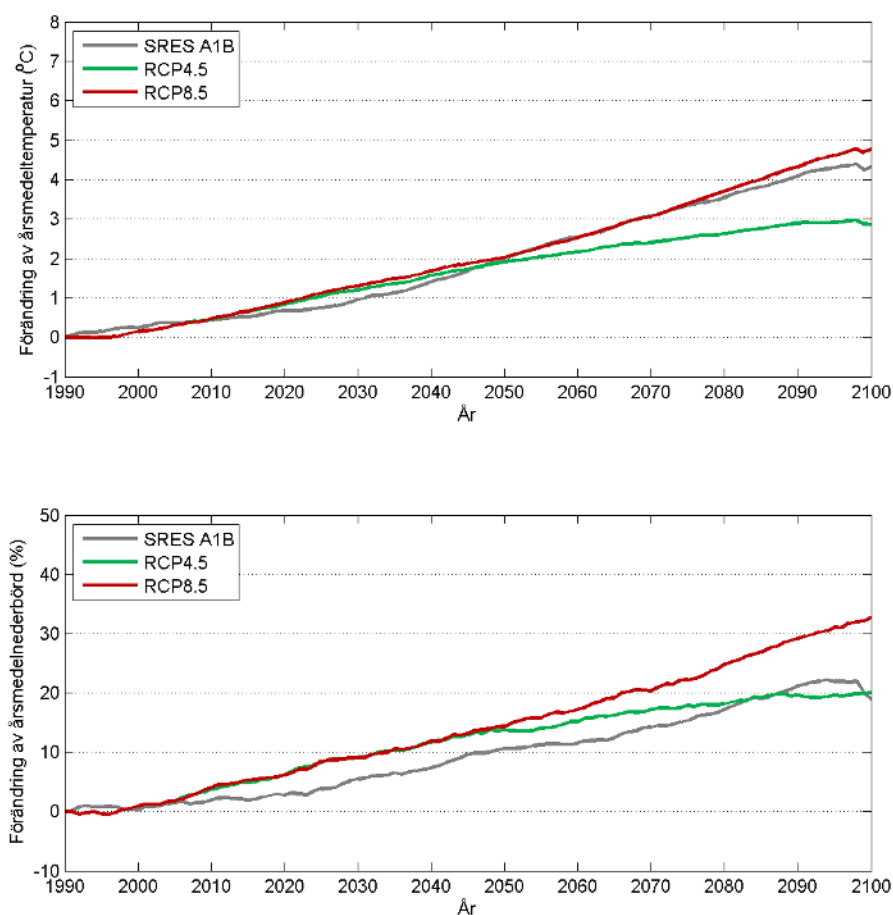
Figur 3.12. Procentuell förändring för Torpshammar av sekvensvolym, sekvenstopp, dimensionerande snömagasin, medeltillrinning, maximal tillrinning vid dimensioneringstillfället, samt förändring av dimensionerande vattenstånd i cm enligt 36 st olika klimatsimuleringar gällande perioden 2067-2096 (över) och 2020-2049 (under). Referensperioden som beräkningarna jämförs mot är 1971-1990. Längst ner visas tidpunkt för dimensionerande vattenstånd för de tre beräkningsperioderna.

Sammantaget visar beräkningarna för Torpshammar en övervägande minskning av den dimensionerande nivån i flödesdimensioneringsklass I efterhand som klimatet ändras. Resultaten pekar även på att tidpunkten för dimensionerande tillfällen kan förskjutas upp till en månad tidigare på våren samt även inträffa under hösten.

Trängslet

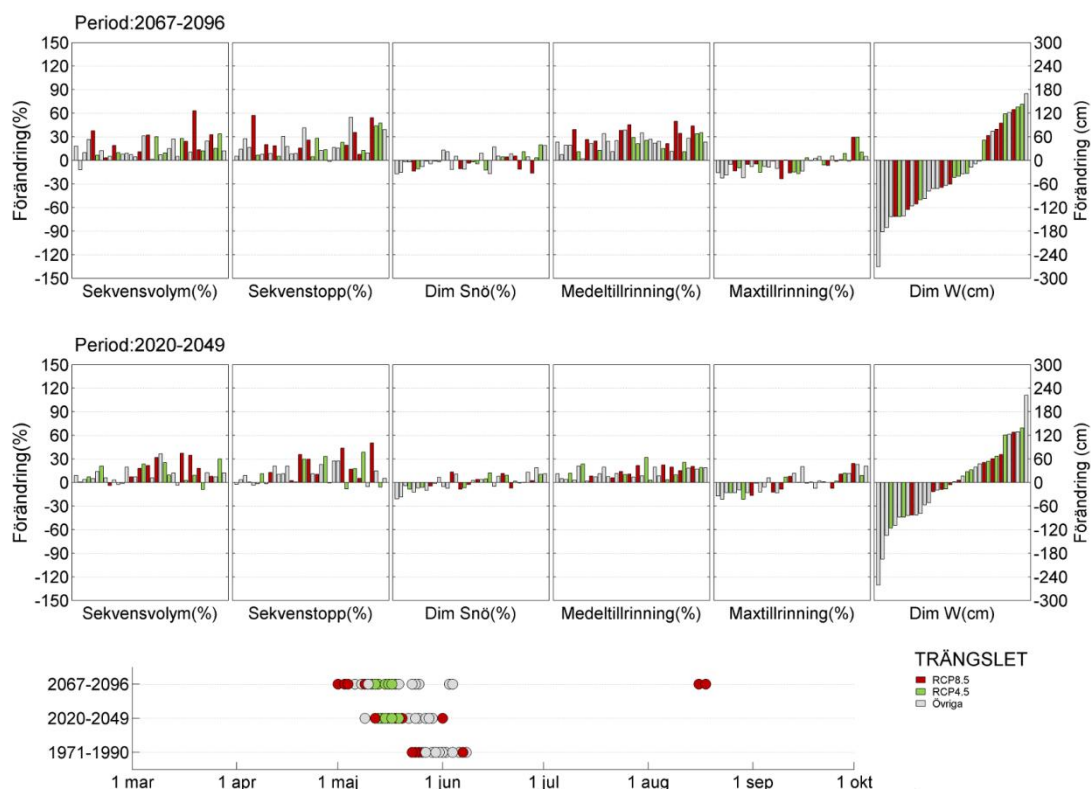
I figur 3.13 redovisas den modellberäknade utvecklingen av lufttemperaturen och nederbörden i tillrinningsområdet till Trängslet.

Den beräknade ökningen av årsmedeltemperaturen i Trängslets tillrinningsområde ligger på ca 3-5 grader under seklet medan den beräknade årsnederbörden ökar med 20-35 %.



Figur 3.13. Beräknad utveckling av årsnederbörden i tillrinningsområdet till Trängslet för olika kategorier klimatscenarier. Referensperioden är 1961-1990.

Beräkningarna enligt flödesdimensioneringsklass I för Trängslet sammanfattas i figur 3.14.



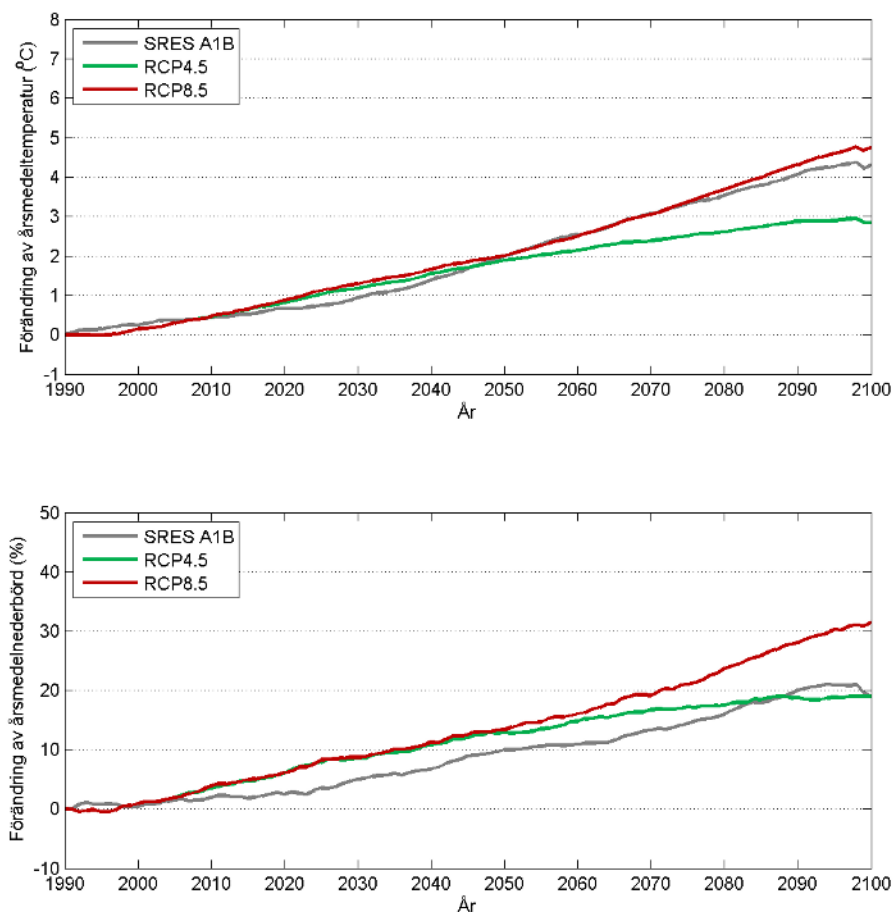
Figur 3.14. Procentuell förändring för Trängslet av sekvensvolym, sekvenstopp, dimensionerande snömagasin, medeltillrinning, maximal tillrinning vid dimensioneringstillfället, samt förändring av dimensionerande vattenstånd i cm enligt 36 st olika klimatsimuleringar gällande perioden 2067-2096 (över) och 2020-2049 (under). Referensperioden som beräkningarna jämförs mot är 1971-1990. Längst ner visas tidpunkt för dimensionerande vattenstånd för de tre beräkningsperioderna.

Sammantaget visar beräkningarna för Trängslet på övervägande minskningar av den dimensionerande nivån i flödesdimensioneringsklass I efterhand som klimatet ändras. Om enbart RCP-scenarier studeras är fördelningen av scenarier som pekar på ökning respektive minskning jämnare. Osäkerheterna för Trängslet är mycket stora. Det dimensionerande tillfället förskjuts mot ett tidigare datum på våren samtidigt som spridningen i detta datum ökar.

Höljes

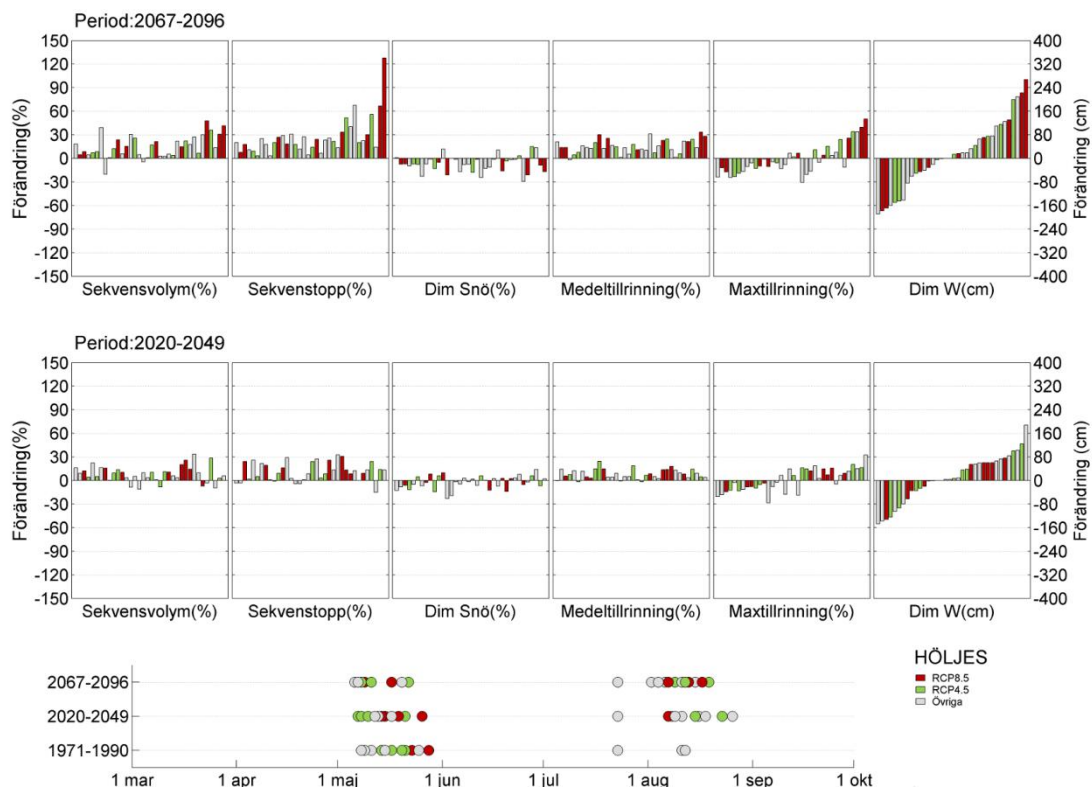
I figur 3.15 redovisas den modellberäknade utvecklingen av lufttemperaturen och nederbörden i tillrinningsområdet till Höljesdammen.

Den beräknade ökningen av årsmedeltemperaturen i Höljesdammens tillrinningsområde ligger på ca 3-5 grader under seklet medan den beräknade årsnederbörden ökar med 20 -30 %.



Figur 3.15. Beräknad utveckling av årsnederbörden i tillrinningsområdet till Höljesdammen Umeälven för olika kategorier klimatscenarier. Referensperioden är 1961-1990.

Beräkningarna enligt flödesdimensioneringsklass I för Höljes sammanfattas i figur 3.16.



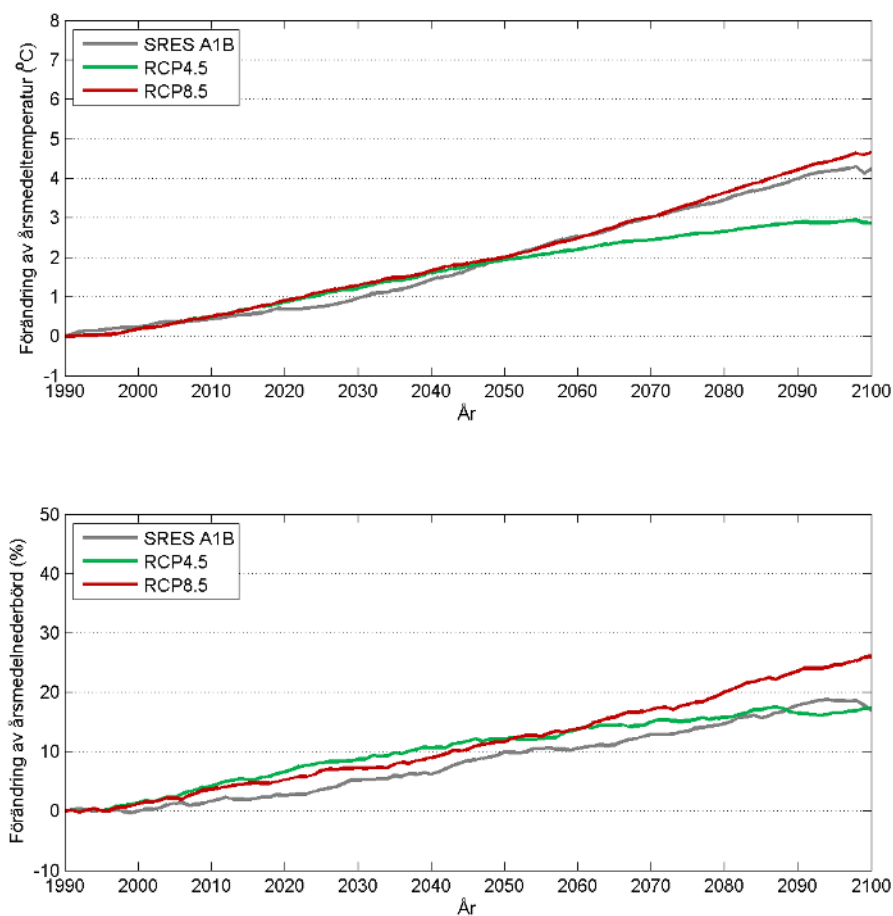
Figur 3.16. Procentuell förändring för Höljesdammen av sekvensvolym, sekvenstopp, dimensionerande snömagasin, medeltillrinning, maximal tillrinning vid dimensioneringstillfället, samt förändring av dimensionerande vattenstånd i cm enligt 36 st olika klimatsimuleringar gällande perioden 2067-2096 (över) och 2020-2049 (under). Referensperioden som beräkningarna jämförs mot är 1971-1990. Längst ner visas tidpunkt för dimensionerande vattenstånd för de tre beräkningsperioderna.

Sammantaget visar beräkningarna för Höljesdammen stor spridning, men inte övervägande åt vare sig minskad eller ökad dimensionerande nivå i flödesdimensioneringsklass I efterhand som klimatet ändras. Detta gäller såväl SRES- som RCP-ensemblen där en tendens till ökning kan urskiljas i den senare. Resultaten visar inte någon tydlig förändring av tidpunkten då dimensionerande tillfälle inträffat.

Gruvsjön

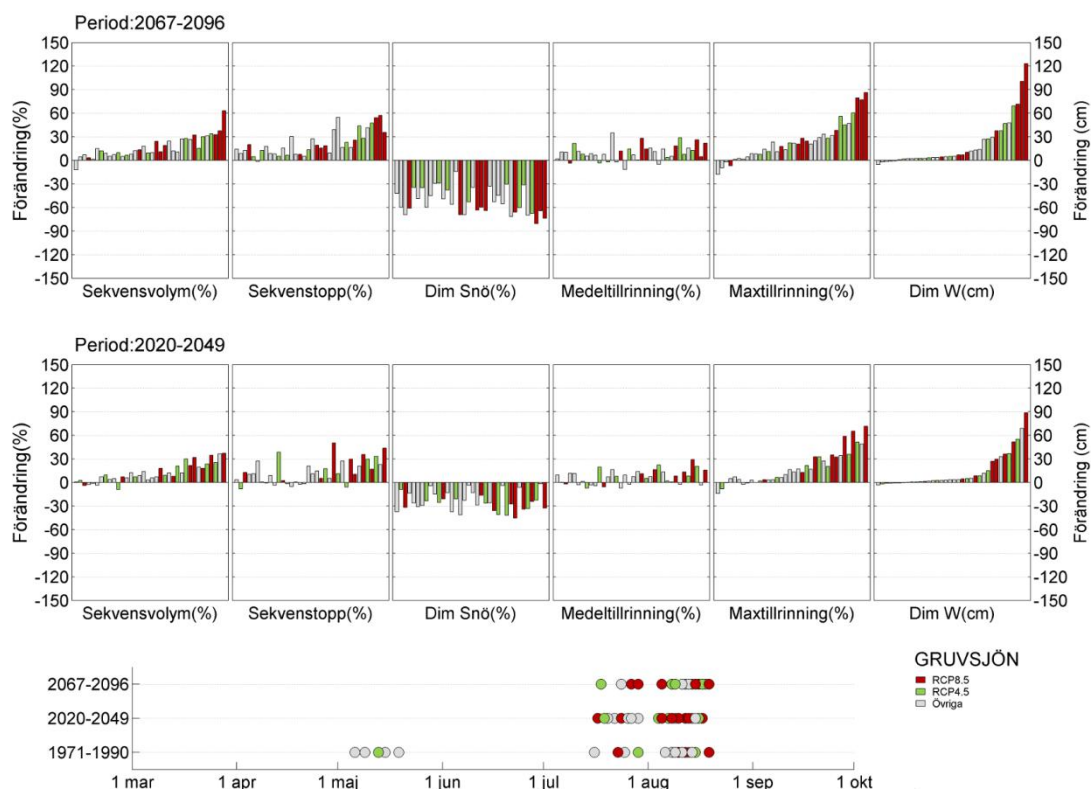
I figur 3.17 den modellberäknade utvecklingen av lufttemperaturen och nederbörden i tillrinningsområdet till Gruvsjön. Observerade data är hämtade från den så kallade PTHBV-databasen som beskrivs närmare i avsnitt 2.12. Referensperioden är 1961-1990.

Den beräknade ökningen av årsmedeltemperaturen i Gruvsjöns tillrinningsområde ligger på ca 3 -5 grader under seklet medan den beräknade årsnederbörden ökar med 15-25 %.



Figur 3.17. Beräknad utveckling av årsnederbörden i tillrinningsområdet till Gruvsjön för olika kategorier klimatscenarier. Referensperioden är 1961-1990.

Beräkningarna enligt flödesdimensioneringsklass I för Gruvsjön sammanfattas i figur 3.18.



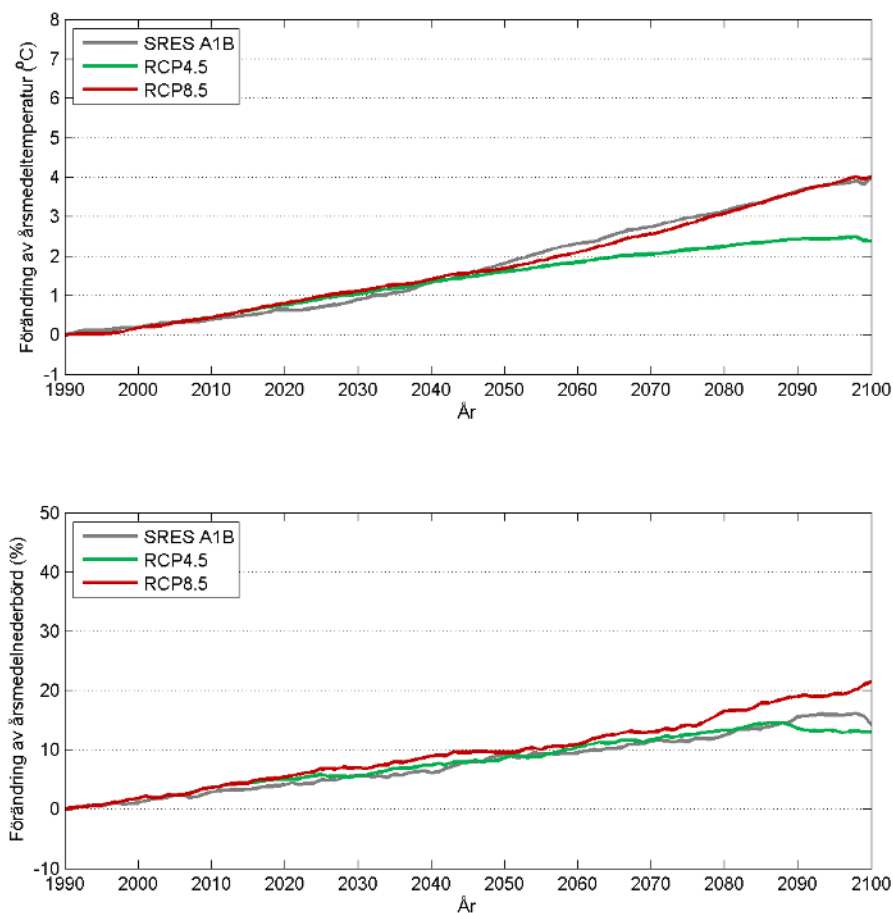
Figur 3.18. Procentuell förändring för Gruvsjön av sekvensvolym, sekvenstopp, dimensionerande snömagasin, medeltillrinning, maximal tillrinning vid dimensioneringstillfället, samt förändring av dimensionerande vattenstånd i cm enligt 36 st olika klimatsimuleringar gällande perioden 2067-2096 (över) och 2020-2049 (under). Referensperioden som beräkningarna jämförs mot är 1971-1990. Längst ner visas tidpunkt för dimensionerande vattenstånd för de tre beräkningsperioderna.

Sammantaget visar beräkningarna för Gruvsjön en ökning av den dimensionerande nivån i flödesdimensioneringsklass I efterhand som klimatet ändras. Det dimensionerande tillfällets datum påverkas obetydligt. Signalen är likartad i både SRES- och RCP-ensemblen om än mer accentuerad i den senare.

Torsebro

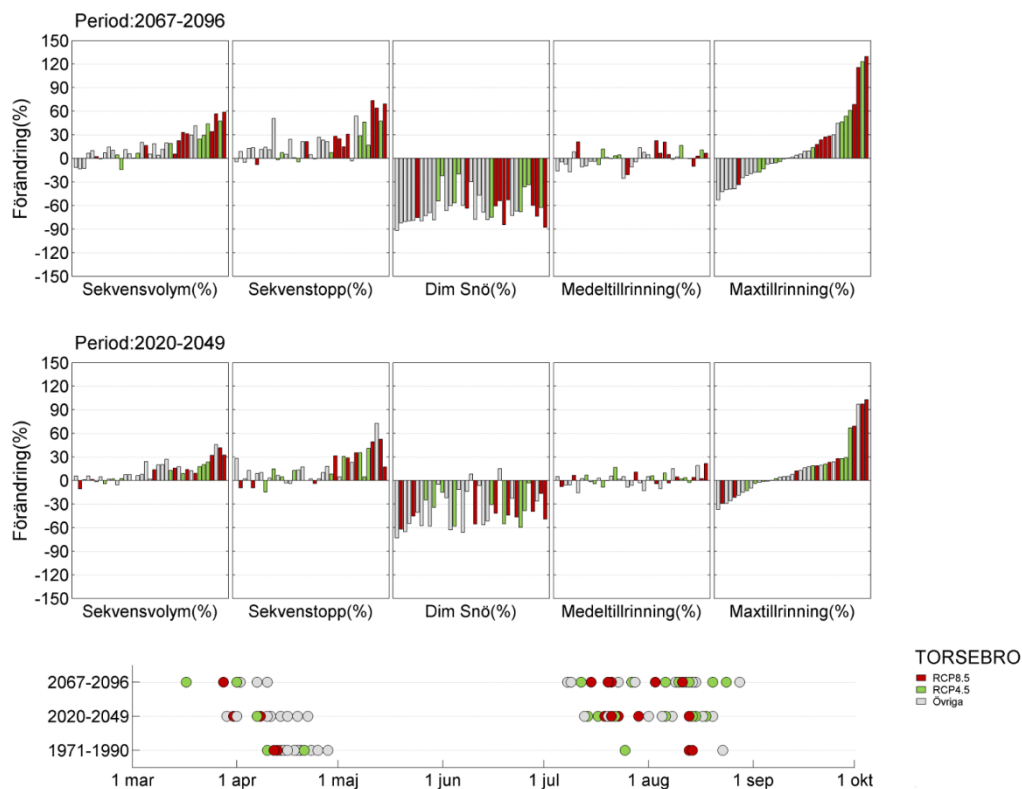
I figur 3.19 redovisas den modellberäknade utvecklingen av lufttemperaturen och nederbörden i tillrinningsområdet till Torsebro kraftverk.

Den beräknade ökningen av årsmedeltemperaturen i Torsebro tillrinningsområde ligger på ca 2-4 grader under seklet medan den beräknade årsnederbörden ökar med 10-20 %.



Figur 3.19. Beräknad utveckling av årsnederbörden i tillrinningsområdet till Torsebro för olika kategorier klimatscenarier. Referensperioden är 1961-1990.

Beräkningarna enligt flödesdimensioneringsklass I för Torsebro sammanfattas i figur 3.20. För Torsebro sker dimensioneringsberäkningarna med avseende på tillrinning vilket är anledningen till att förändring i vattenstånd ej redovisas.



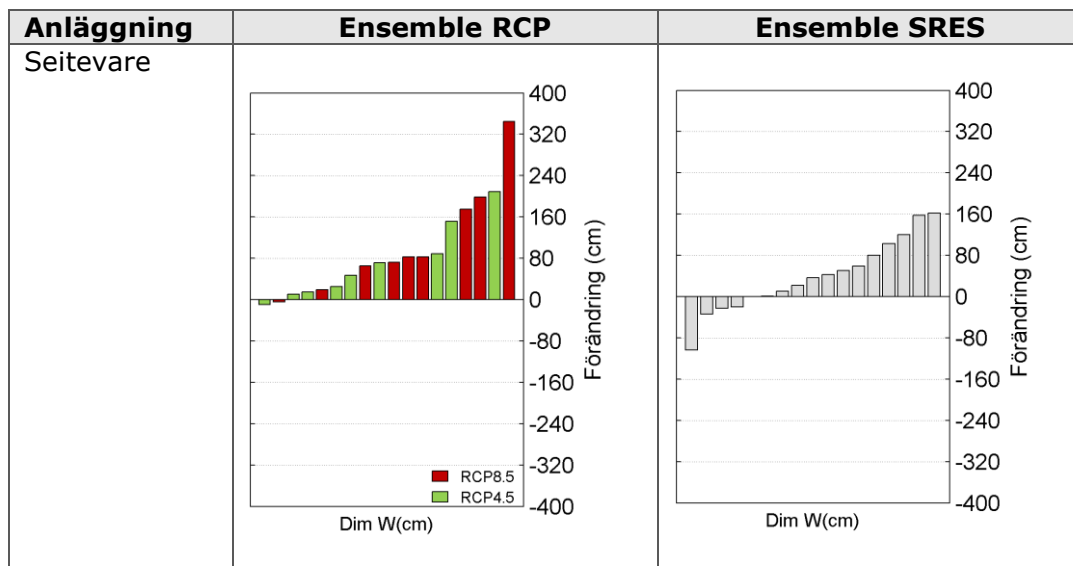
Figur 3.20. Procentuell förändring för Torsebro av sekvensvolym, sekvenstopp, dimensionerande snömagasin, medeltillrinning, maximal tillrinning vid dimensioneringstillfället enligt 36 st olika klimatsimuleringar gällande perioden 2067-2096 (över) och 2020-2049 (under). Referensperioden som beräkningarna jämförs mot är 1971-1990. Längst ner visas tidpunkt för maximal tillrinning för de tre beräkningsperioderna.

Sammantaget visar beräkningarna för Torsebro en ökning av den dimensionerande tillrinningen i flödesdimensioneringsklass I efterhand som klimatet ändras. Både under vår och höst finns förutsättningar för att dimensionerande tillfälle kan inträffa. I slutet av seklet visar resultaten att tyngdpunkten för dessa tillfällen ligger under hösten. Signalen är likartad i både SRES- och RCP-ensemblen om än mer accentuerad i den senare.

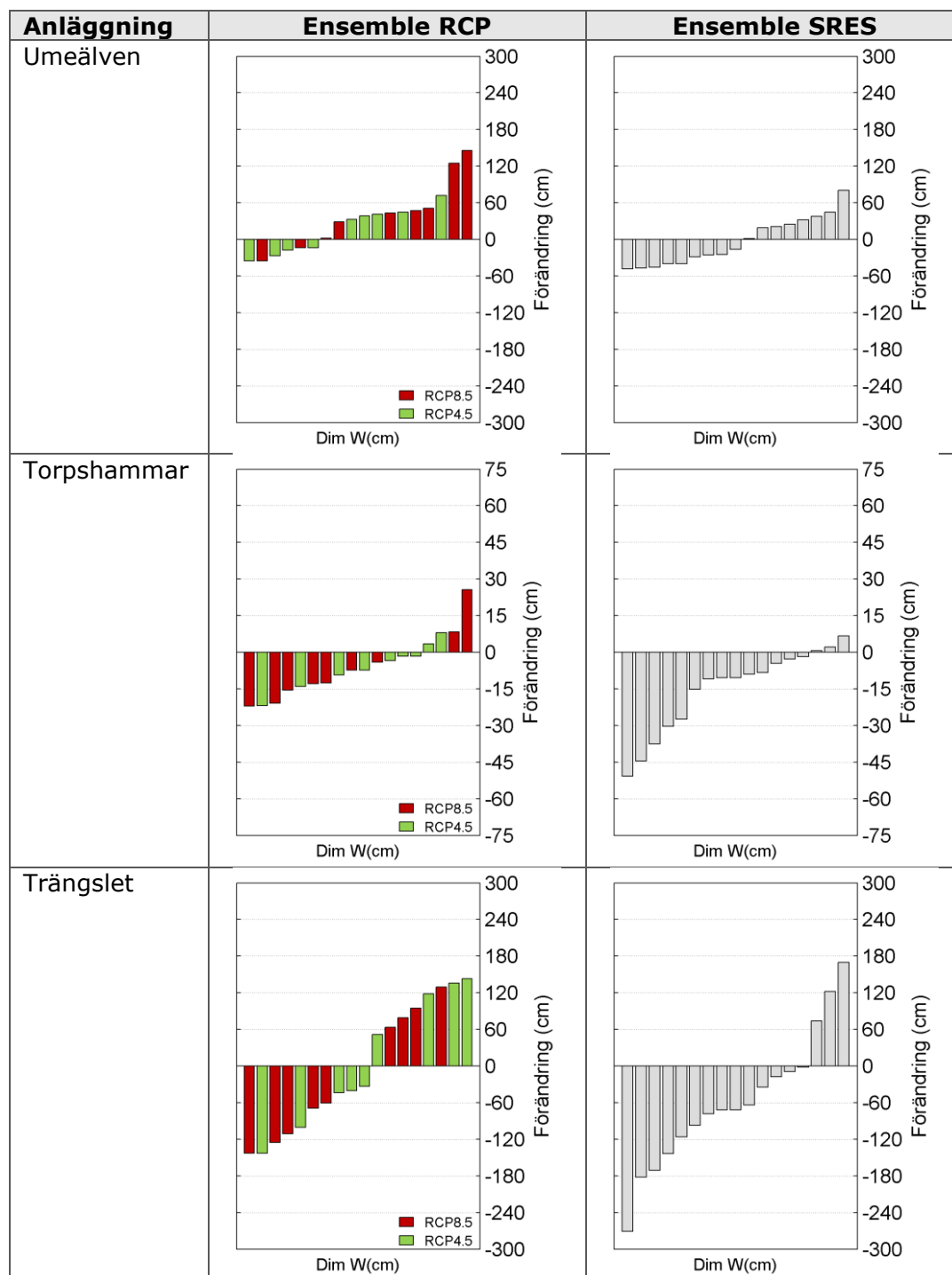
Sammanfattning av beräkningarna för flödesdimensioneringsklass I

Det är svårt att generalisera klimateffekten på det dimensionerande flödet eller den dimensionerande nivån i Sverige. Utöver klimatet är det många andra faktorer som spelar in, exempelvis avrinningsområdets storlek och dess förhållande till magasinvolym och utskovskapacitet.

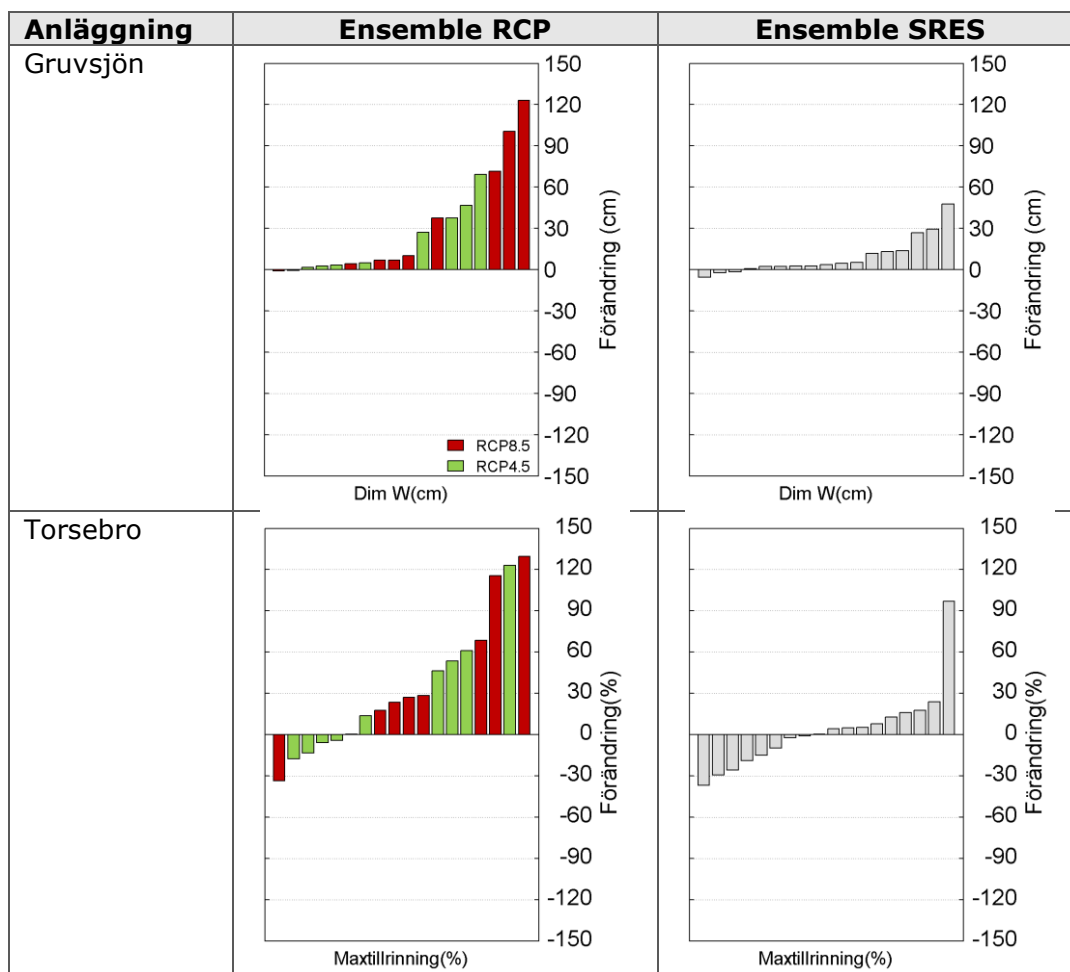
Det är värdefullt att jämföra resultaten baserade på RCP-ensemblen och SRES-ensemblen, se figur 3.21-figur 3.23 . Dessa två ensembler representerar såväl olika utvecklingsscenarier för jordens övergripande klimat, som olika generationer beräkningsverktyg inom klimatmodellering. Utöver detta skiljer sig ensemblerna dessutom i avseende av intern balansering. Mot denna bakgrund är det intressant att de i beräkningar för flödesdimensioneringsklass I för flertaleet anläggningar ger en liknande trend.



Figur 3.21. Förändring för Seitevare av dimensionerande vattenstånd för perioden 2067-2096 jämfört med referensperioden (1971-1990). Vänster bild visar resultaten för klimatscenarier av typen RCP4.5 och RCP8.5 medan höger bild visar motsvarande för SRES-scenarier.



Figur 3.22. Förändring för Umeälven/Pengfors, Torpshammar och Trängslet av dimensionerande vattenstånd för perioden 2067-2096 jämfört med referensperioden (1971-1990). Vänster bild visar resultaten för klimatscenarier av typen RCP4.5 och RCP8.5 medan höger bild visar motsvarande för SRES-scenarier.



Figur 3.23. Förändring för Gruvsjön och Torsebro av dimensionerande vattenstånd/tillrinning för perioden 2067-2096 jämfört med referensperioden (1971-1990). Vänster bild visar resultaten för klimatscenarier av typen RCP4.5 och RCP8.5 medan höger bild visar motsvarande för SRES-scenarier.

4 Diskussion och slutsatser

Inom projektet *Dimensionerande flöden för dammanläggningar för ett klimat i förändring - Scenarier i ett 50-årsperspektiv* har en ny metod utvecklats för klimatanpassning av flödesdimensionering enligt de svenska riktlinjerna för bestämning av dimensionerande flöden för dammanläggningar (Svensk Energi m.fl., 2007). Ett omfattande arbete har lagts ner på att ta fram ett rationellt och kostnadseffektivt produktionssystem så att ett flertal klimatscenarier kan bearbetas med rimliga insatser. Detta är nödvändigt för att man vid dimensioneringsberäkningar i framtiden skall kunna tillgodogöra sig de senaste resultaten från klimatforskningen. De omfattande tester av metoden som genomförts inom projektet visar att den ger rimliga resultat med en hanterbar arbetsinsats.

Det är rimligt att förvänta sig skillnader mellan beräkningar baserade på SRES-scenarier respektive RCP-scenarier av flera skäl. Drivningen i klimatmodellerna är till viss del annorlunda med avseende på strålningsbalans, men det finns också skillnader mellan modellstruktur, upplösning och processbeskrivning inom både globala och regionala modeller. RCP-scenarier representerar i allmänhet modernare klimatmodeller än SRES-scenarier. Att tillskriva drivningstypen hela skillnaden mellan den bild som ges av SRES-ensemblen respektive RCP-ensemblen är således en alltför snäv tolkning. Resultaten baserade på RCP-scenarier representerar det nuvarande kunskapsläget inom klimatmodellering med avseende på modellstruktur och drivning.

Inom projektet har stora resurser lagts ner på att ta fram en vetenskapligt förankrad metodik för anpassning av regionala klimatscenarier till en hydrologisk modell, den så kallade DBS-metoden. Tekniken har publicerats i internationellt vetenskapligt granskad litteratur (Yang, m.fl., 2010).

Beräkningarna fokuserar mycket på effekterna av ändrad temperatur och nederbörd i avrinningsområdet. Det klimatologiska förändringen av årsmedeltemperatur och årsmedelnederbörd är samstämmig mellan olika modeller och det syns distinkta skillnader i slutet av seklet mellan olika framtidsscenarier. Avdunstning är ganska översiktligt behandlad och förändring av avdunstningen har antagits vara proportionell mot ändringen av lufttemperaturen.

Analysen av framtida nederbördsextremer visar att extrem dygnsnederbörd kan förväntas öka i hela landet men spridningen är stor mellan olika projektioner. Som framgår av analysen (se figur 3.5) är spridningen stor i förändringen av extrem nederbörd beräknad med olika klimatscenarier, men förändringen i medelvärdena är dock förhållandevis stabila. Den totala spridningen bland SRES- och RCP-scenarier är av samma storleksordning och de största skillnaderna framträder mot slutet av seklet. Vidare syns en distinktion mellan RCP4.5 och RCP8.5 där den senare i medeltal har ca 10 % högre toppvärde.

Sammantaget förväntas extrem dygnsnederbörd öka med ca 20-40 % mot slutet på seklet. Även extrem 14-dygnsnederbörd ökar, men förändringen är mindre, ca 10-30 % mot slutet på seklet.

En generell slutsats är att det dimensionerande snömagasinet minskar på grund av uppvärmningen, speciellt på våra nordliga breddgrader där vintertemperaturen beräknas stiga speciellt kraftigt. Denna signal är dock inte helt entydig i början av seklet, men den blir mer tydlig mot dess slut. Av de 7 st undersökta områdena minskar dimensionerande snömagasinet i 6 st. I det nordligast området Seitevare syns en måttlig ökning av det dimensionerande snömagasinet.

Det är utifrån genomförda beräkningar svårt att generalisera klimateffekten på det dimensionerande flödet eller den dimensionerande nivån för dammar i Sverige. Utöver klimatet är det många andra faktorer som spelar in, exempelvis avrinningsområdets storlek och dess förhållande till magasinvolym och utskovskapacitet.

Resultaten är för somliga anläggningar tydliga, t.ex. om alla eller merparten av klimatscenarierna uppvisar liknande trend i dimensionerande nivå eller dimensionerande tillrinning. För andra anläggningar är bilden mer splittrad med klimatscenarier som pekar på såväl kraftiga ökningar som på minskningar av dimensionerande nivå. Resultaten för dessa anläggningar kommer att bero starkt av ensemblens sammansättning och det är inte förvånande att det finns områden där resultaten i denna rapport delvis skiljer sig från tidigare klimatanalyser.

Effekterna av förändringar i temperatur, nederbördsmönster, avdunstning, extrem nederbörd och snömagasin är som nämnts ovan komplex. Inom stora delar av landet kan förändringar inom respektive faktor balansera eller spela ut betydelsen av förändringen i övriga nyckelfaktorer. Trots komplexiteten går det att urskilja tendenser. För anläggningar som är belägna längst i nordväst kan flöden i flödesdimensioneringsklass I förväntas öka på grund av ökningar i de viktigaste faktorerna såsom dimensionerande nederbördssekvens (både toppvärde och totalvolym), medeltillrinning och snömagasin. Längst i söder kan man förvänta sig ökningar i flöden i flödesdimensioneringsklass I på grund av motsvarande ökningar i dimensionerande nederbördssekvens samtidigt som snömagasinet har ringa betydelse även i dagens klimat. I små avrinningsområden där extrema nederbördshändelser också idag är den dominerande orsaken till extrema flöden, förväntas högre flöden i flödesdimensioneringsklass I.

En generell slutsats rörande flöden i flödesdimensioneringsklass I är att den tidpunkt på året då de mest extrema beräknade flödet förväntas inträffa i de flesta av de valda testområdena blir mer utspridd i ett förändrat klimat. Speciellt för områden som karaktäriseras av vårflodstopp i tillrinningen kan detta tillfälle inträffa tidigare på våren i ett varmare klimat.

Klimatanpassning är ett speciellt område såtillvida att det handlar om att ta hänsyn till resultat från ett forskningsområde som befinner sig under ständig utveckling. Resultaten visar att den metodik som gemensamt utvecklats av kraftindustrin, Svenska Kraftnät och SMHI är konsistent och ger goda resultat även för en ny generation klimatscenarier.

5 Referenser

- Alexandersson, H. (2003). Korrektion av nederbörd med enkel klimatologisk metodik. SMHI Meteorologi, nr 111, Norrköping.
- Andréasson, J., Gardelin, M., Hellström, S.-S. och Bergström, S. (2006). Känslighetsanalys av Flödeskommitténs riktlinjer i ett framtida förändrat klimat. Elforsk rapport 06:80.
- Andréasson, J., Gardelin, M., Hellström, S.-S. och Bergström, S. (2007). Känslighetsanalys av Flödeskommitténs riktlinjer i ett framtida förändrat klimat – Andra upplagan kompletterad med analyser för Umeälven. Elforsk rapport 07:15.
- Andréasson, J., Bergström, S. och Gardelin, M. (2009). Dimensionerande flöden för dammanläggningar för ett klimat i förändring - Scenarier i ett 50-årsperspektiv. Delrapport från SMHI till Elforsk, november 2009.
- Andréasson, J., Bergström, S., Gardelin, M., German, J., Gustavsson, H., Hallberg, K., Rosberg, J. (2011a). Dimensionerande flöden för dammanläggningar för ett klimat i förändring- metodutveckling och scenarier. Elforsk rapport 11:25
- Andréasson, J., Bergström, S., Gardelin, M., German, J., Johansson, B. Lindström, G., Rosberg, J. (2011b). Analys av osäkerheter vid beräkning av dimensionerande flöden för dammar i flödes-dimensioneringsklass I. Elforsk rapport 11:31.
- Andréasson, J., Bergström, S., German, J., Hallberg, K. (2013) Hydrological flood design in Sweden – Climate change and inherent uncertainties. IAHS Publications 359, pp. 17-22
- Bergström, S. (1995) The HBV Model. In: Singh, V.P. (ed.). Computer Models of Watershed Hydrology. Water Resources publications, Highlands Ranch, Colorado, pp. 443-476.
- Bergström, S., Jóhannesson, T., Aðalgeirsdóttir, G., Andreassen, L.M., Beldring, S., Hock, R., Jónsdóttir, J.F., Rogozova, S. and Veijalainen, N. (2007). Hydropower. In: (Fenger, J. ed.) Impacts of Climate Change on Renewable Energy Sources - Their role in the Nordic Energy system. Report Nord 2007:003.
- Bergström, S., Andréasson, J. and Graham L.P. (2012) Climate adaptation of the Swedish guidelines for design floods for dams. ICOLD 24th Congress Kyoto 2012, Q94
- Bergström, S., Andréasson, J. – Climate change in Accounting for climate change and uncertainty: experience from strategic adaptation projects in Sweden. IAHS Publications 359, pp. 11-16
- Dieterich, C., Schimanke, S., Wang, S., Väli, G., Liu, Y., Hordoir, R., Axell, L., Höglund, A., Meier, H.E.M. (2013). Evaluation of the SMHI coupled atmosphere-ice-ocean model RCA4-NEMO. SMHI RO Nr47. 60p

- Fenger, J. (ed. 2007) Impacts of Climate Change on Renewable Energy Sources – their Role in the Nordic Energy System. Nord 2007:003. Nordic Council of Ministers, Copenhagen.
- Gardelin, M., Andréasson, J., Carlsson, B., Lindström, G. och Bergström, S. (2002). Modellering av effekter av klimatförändringar på tillrinningen till vattenkraftsystemet. Elforsk rapport 02:27.
- Görger, K., Beersma, J., Brahmer, G., Buitveld, H., Carambia, M., de Keizer, O., Krahe, P., Nilson, E., Lammersen, R., Perrin, C. and Volken, D. (2010) Assessment of Climate Change Impacts on Discharge in the Rhine River Basin. Results of the RheinBlick2050 Project. International Commission for the Hydrology of the Rhein Basin. Report No. I-23 of the CHR.
- IPCC, 2013: Climate Change 2013: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D.Qin, G.-K. Plattner, M.Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A.Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535pp.
- Johansson, B. (2000) Areal Precipitation and Temperature in the Swedish Mountains. An evaluation from a hydrological perspective. Nordic Hydrology, 31, 207-228.
- Johansson, B., 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., Chen, D. (2005). Estimation of areal precipitation for runoff modelling using wind data: a case study in Sweden. Climate Research 29, 53-61.
- Lindström, G., Gardelin, M., Johansson, B., Persson, M. och Bergström, S. (1996) HBV-96 – En areellt fördelad modell för vattenkrafthydrologi. SMHI, Rapporter Hydrologi, nr 12, Norrköping.
- Lindström, G., Johansson, B., Persson, M., Gardelin, M. and Bergström, S. (1997). Development and test of the distributed HBV-96 model. Journal of Hydrology 201, 272-288.
- Moss RH, Edmonds JA, Hibbard KA, Manning MR, Rose SK, van Vuuren DP, Carter TR, Emori S, Kainuma M, Kram T et al (2010) The next generation of scenarios for climate change research and assessment. Nature 463:747–756
- Nakićenović, N., Alcamo, J., Davis, G., de Vries, B., Fenhann, J., Gaffin, S., Gregory, K., Grübler, A., Jung, T.Y., Kram, T., La Rovere, E.L., Michaelis, L., Mori, S., Morita, T., Pepper, W., Pitcher, H., Price, L., Riahi, K., Roehrl, A., Rogner, H.-H., Sankovski, A., Schlesinger, M., Shukla, P., Smith, S., Swart, R., van Rooijen, S., Victor, N., Dadi, Z. (2000) IPCC Special Report on Emission Scenarios. Cambridge Univ. Press, 599 pp.
- Saelthun, N.R., Aittoniemi, P., Bergström, S., Einarsson, K., Jóhannesson, T., Lindström, G., Ohlsson, P.-E. Thomsen, T., Vehviläinen, B. and Aamodt, K. O. (1998) Climate change impacts on runoff and hydropower in the Nordic

countries. Final report from the project "Climate Change and Energy Production" Report TemaNord 1998:552, Oslo.

Svensk Energi, Svenska Kraftnät och SveMin (2007). Riktlinjer för bestämning av dimensionerande flöden för dammanläggningar – Nyutgåva 2007.

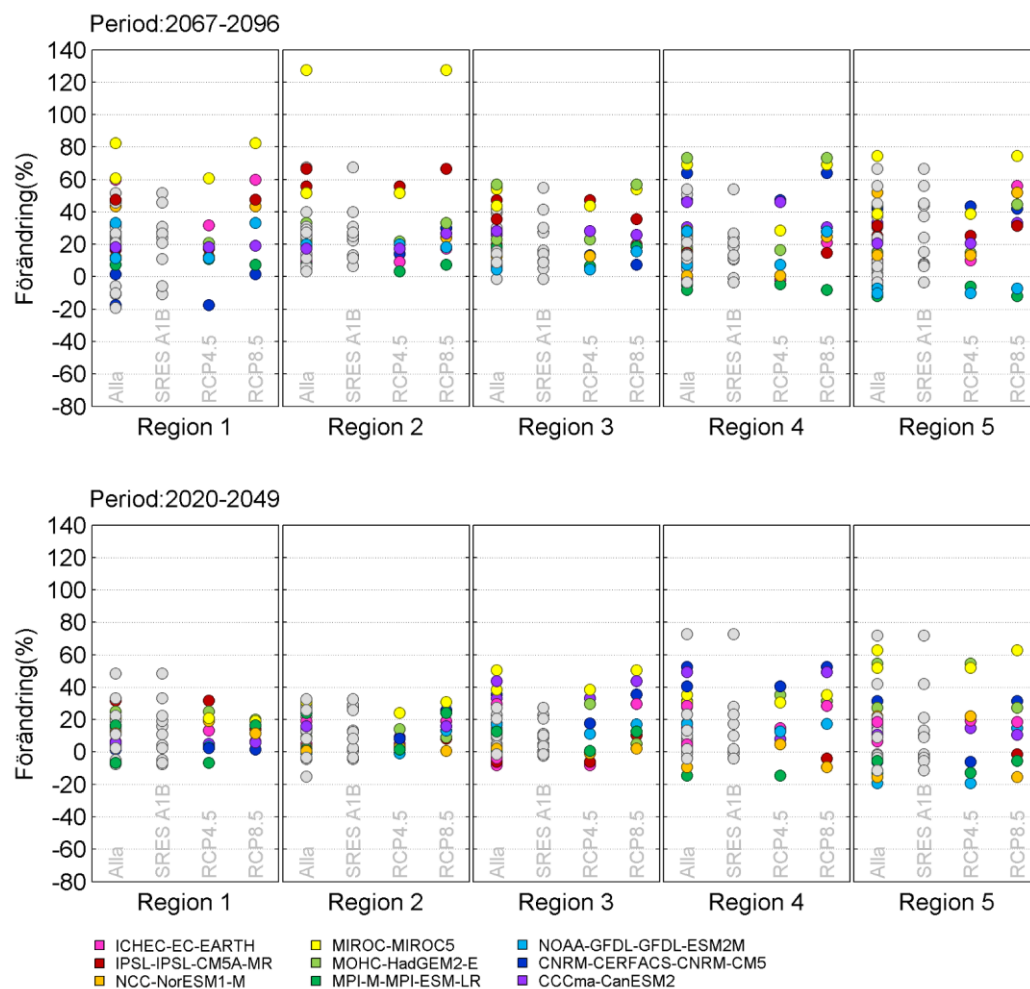
Svenska Kraftnät (2011). Dammsäkerhet och klimatförändringar -slutrapport från Kommittén för dimensionerande flöden för dammanläggningar i ett klimatförändringsperspektiv

van der Linden P., and J.F.B. Mitchell (eds.) (2009). ENSEMBLES: Climate Change and its Impacts: Summary of research and results from the ENSEMBLES project. 160pp.

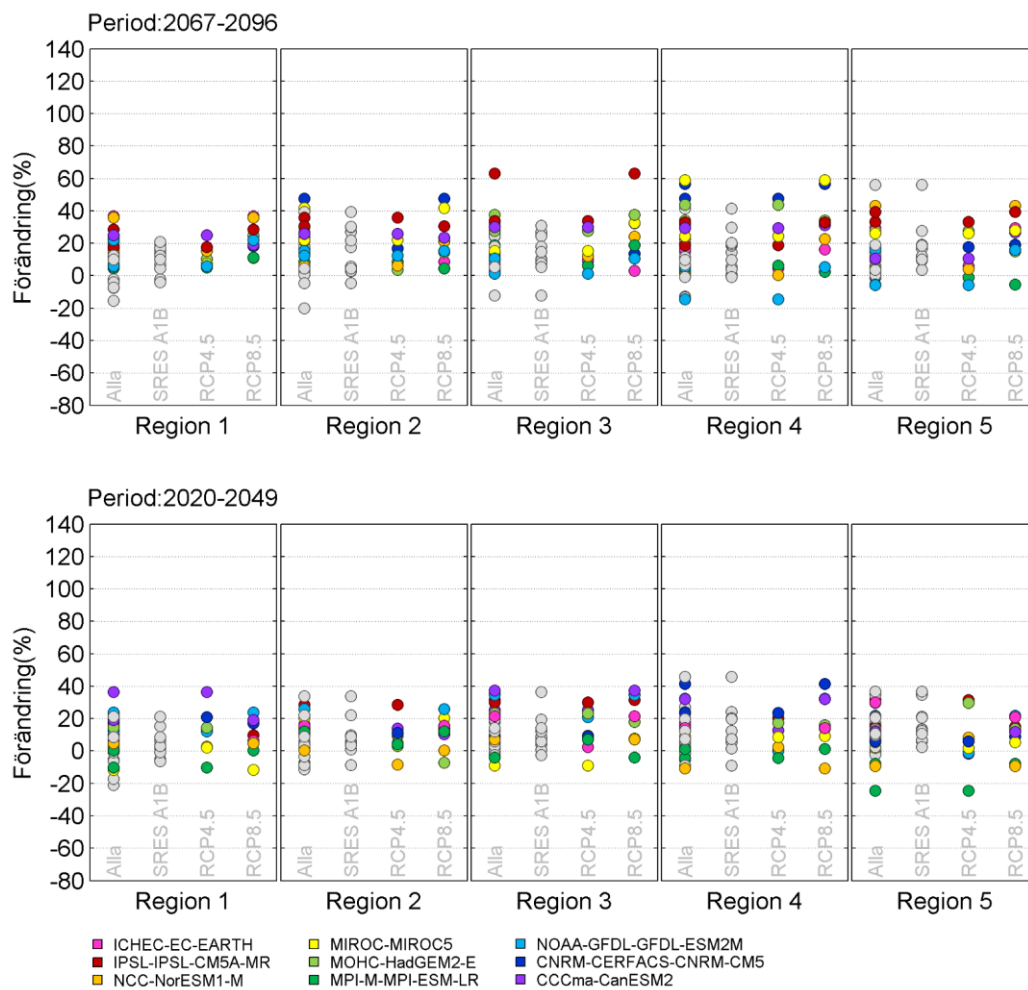
Veijalainen, N. and Vehviläinen, B. (2008). The effect of climate change on design floods of high hazard dams in Finland. Hydrology Research, 39 (5-6): 465-477.

Yang, W., Andréasson, J., Graham, L.P., Olsson, J., Rosberg, J and Wetterhall, F. (2010) Distribution-based scaling to improve usability of regional climate model projections for hydrological climate change impacts studies. Hydrology Research, 41 (3-4): 211-229.

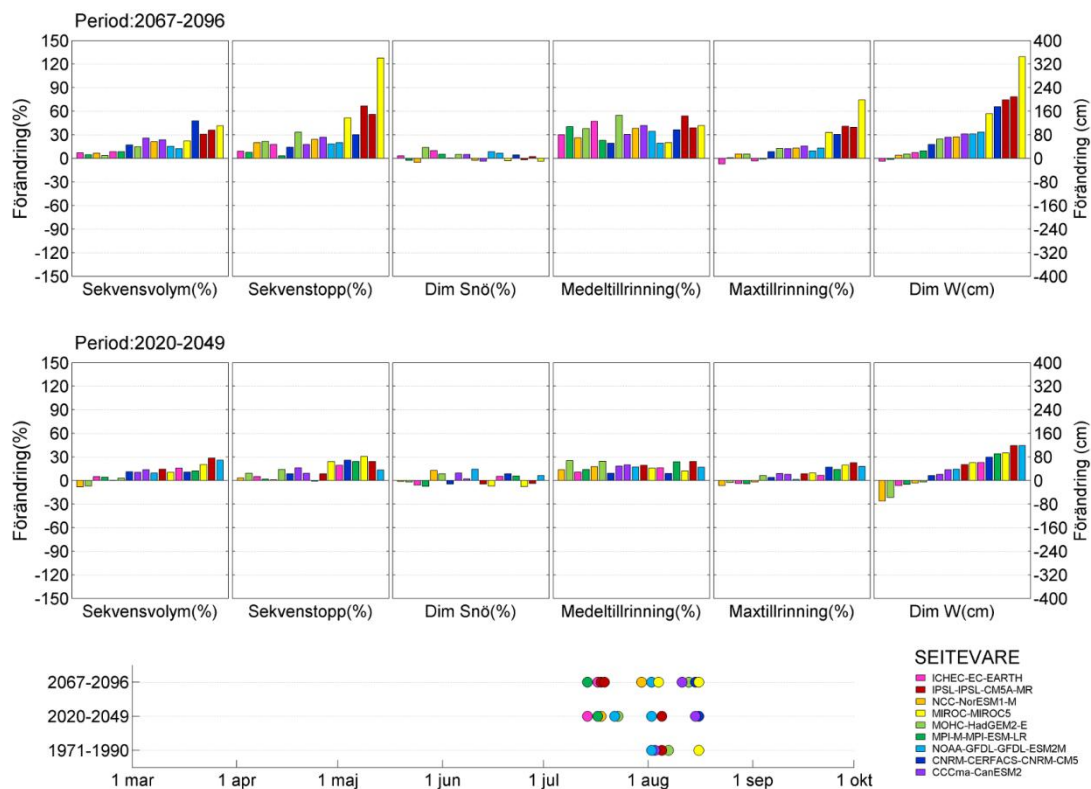
6 Bilaga



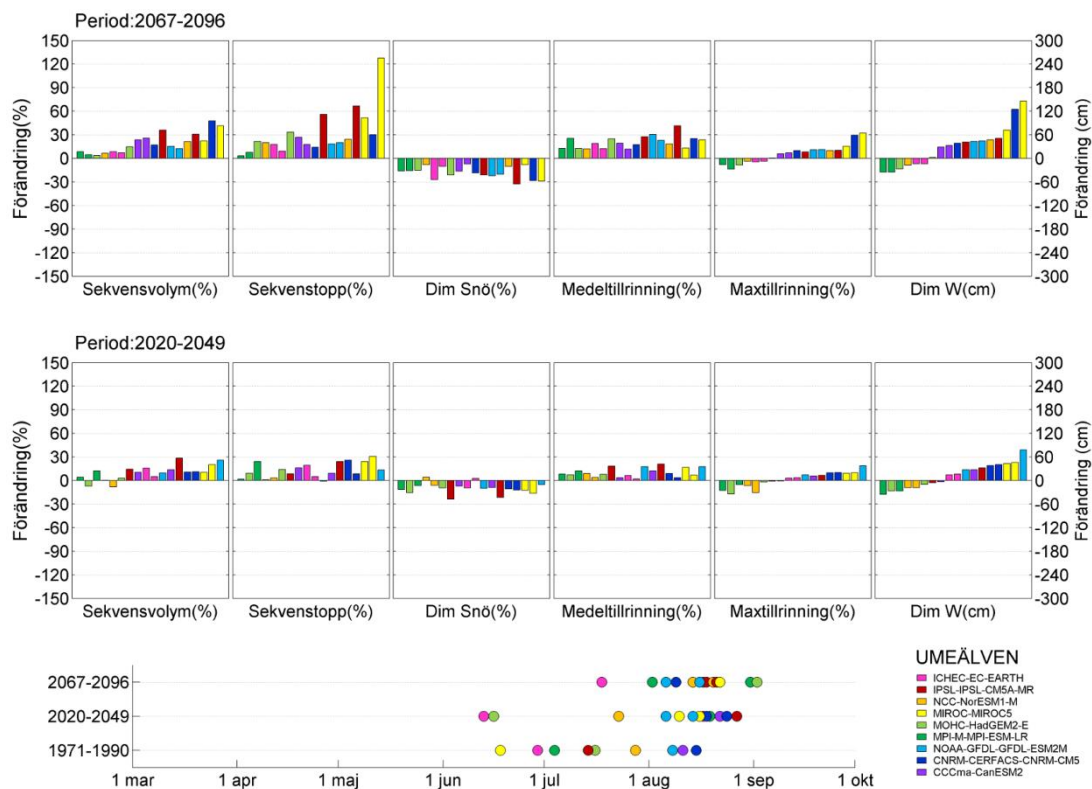
Figur 6.1. Förändring av den dimensionerande nederbördssekvensens maxvärde för perioderna 2067-2096 (övre) och 2020-2049 (undre) jämfört med referensperioden 1961-1990. Resultat baserade på RCP-scenarier redovisas i färg (efter global modell) medan resultat baserade på SRES-scenarier visas i grått.



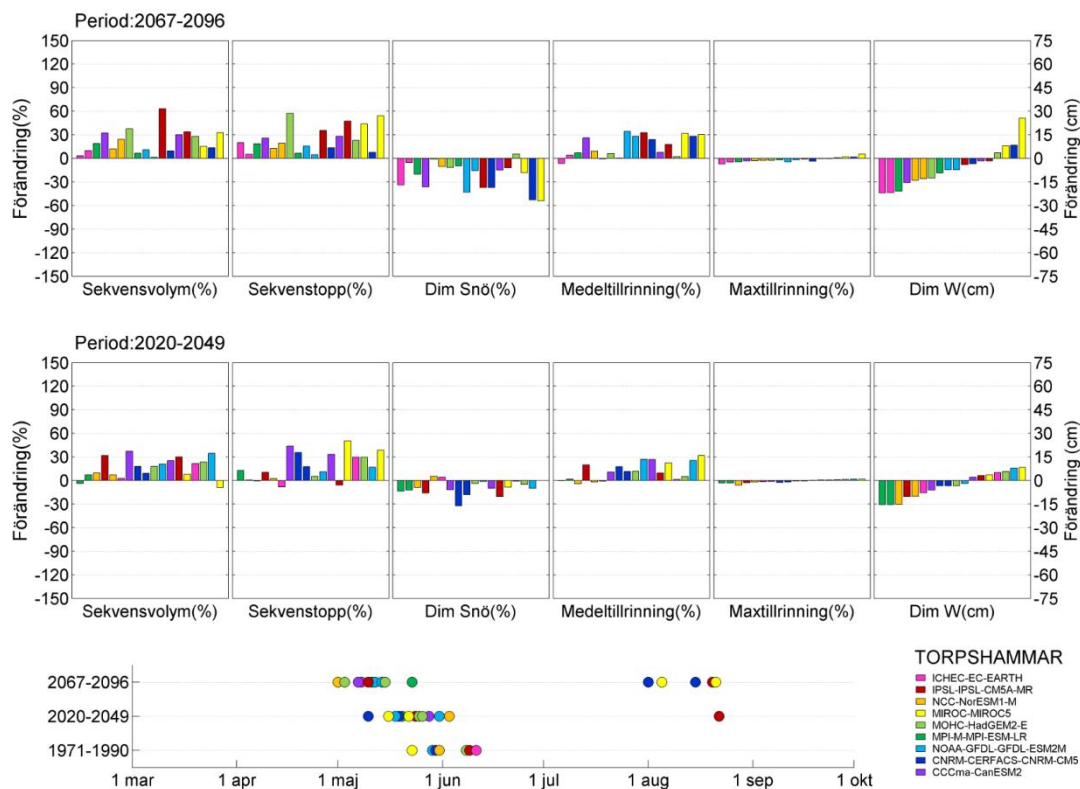
Figur 6.2. Förändring avseende volym i dimensionerande nederbördssekvens för perioderna 2067-2096 (övre) och 2020-2049 (undre) jämfört med referensperioden 1961-1990. Resultat baserade på RCP-scenarier redovisas i färg (efter global modell) medan resultat baserade på SRES-scenarier visas i grått.



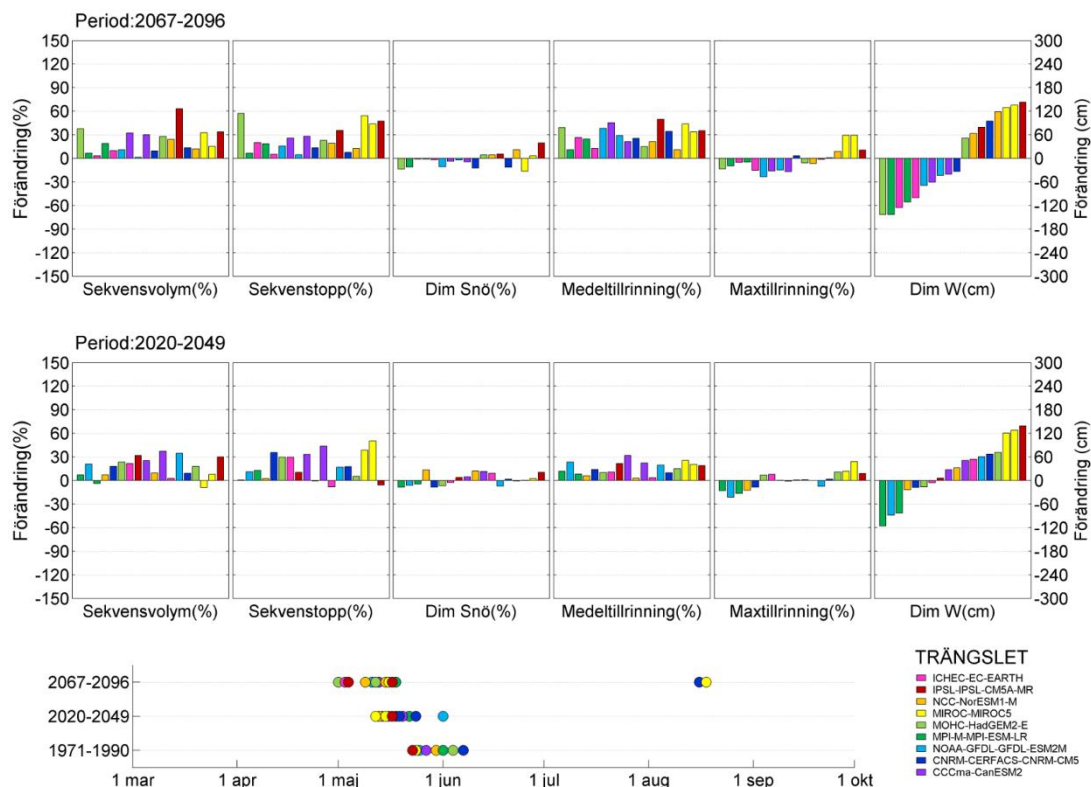
Figur 6.3. Procentuell förändring för Seitevare av sekvensvolym, sekvenstopp, dimensionerande snömagasin, medeltillrinning, maximal tillrinning vid dimensioneringstillfället, samt förändring av dimensionerande vattenstånd i cm gällande perioden 2067-2096 (över) och 2020-2049 (under). Referensperioden som beräkningarna jämförs mot är 1971-1990. Längst ner visas tidpunkt för dimensionerande vattenstånd för de tre beräkningsperioderna. Samtliga simuleringar är av typ RCP4.5 eller RCP8.5.



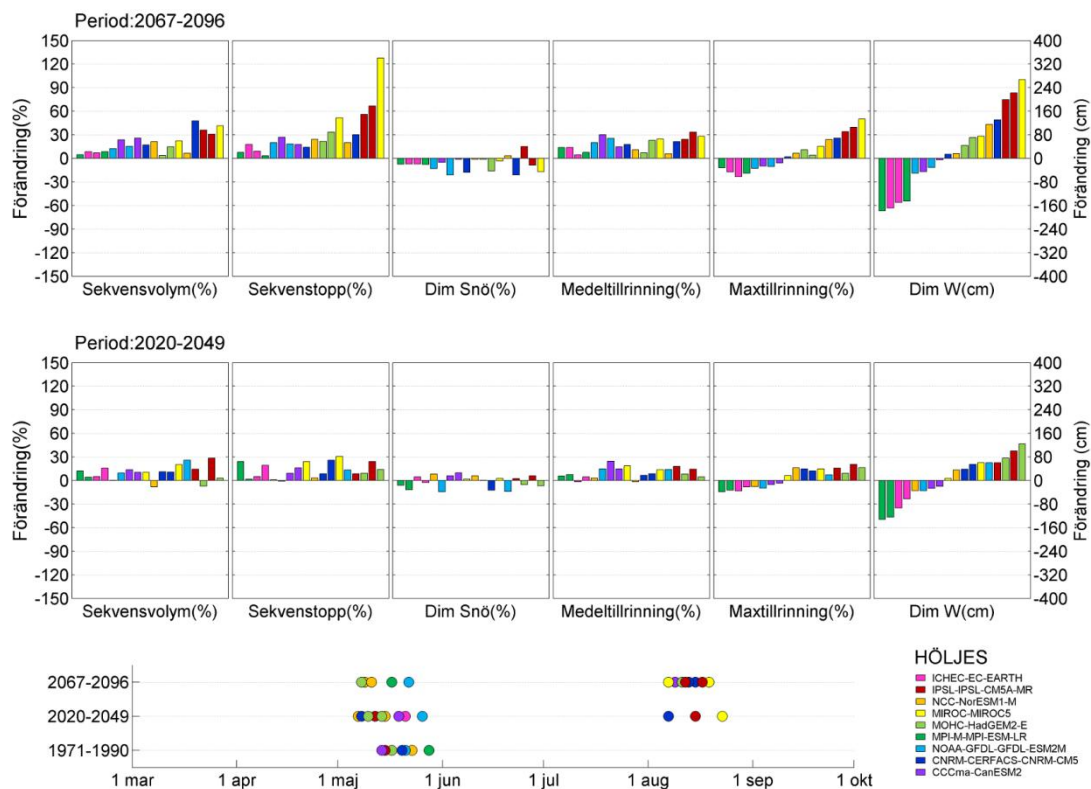
Figur 6.4. Procentuell förändring för Pengfors i Umeälven av sekvensvolym, sekvenstopp, dimensionerande snömagasin, medeltillrinning, maximal tillrinning vid dimensioneringstillfället, samt förändring av dimensionerande vattenstånd i cm gällande perioden 2067-2096 (över) och 2020-2049 (under). Referensperioden som beräkningarna jämförs mot är 1971-1990. Längst ner visas tidpunkt för dimensionerande vattenstånd för de tre beräkningsperioderna. Samtliga simuleringar är av typ RCP4.5 eller RCP8.5.



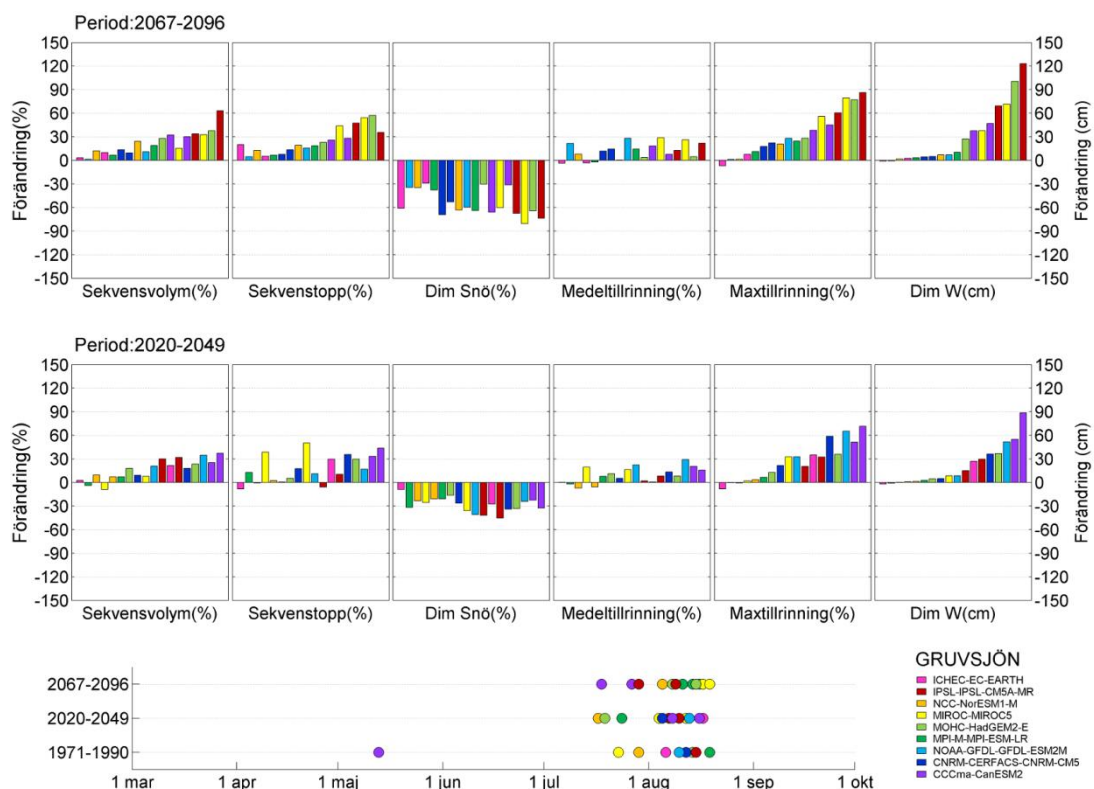
Figur 6.5. Procentuell förändring för Torpshammar av sekvensvolym, sekvenstopp, dimensionerande snömagasin, medeltillrinning, maximal tillrinning vid dimensioneringstillfället, samt förändring av dimensionerande vattenstånd i cm gällande perioden 2067-2096 (över) och 2020-2049 (under). Referensperioden som beräkningarna jämförs mot är 1971-1990. Längst ner visas tidpunkt för dimensionerande vattenstånd för de tre beräkningsperioderna. Samtliga simuleringar är av typ RCP4.5 eller RCP8.5.



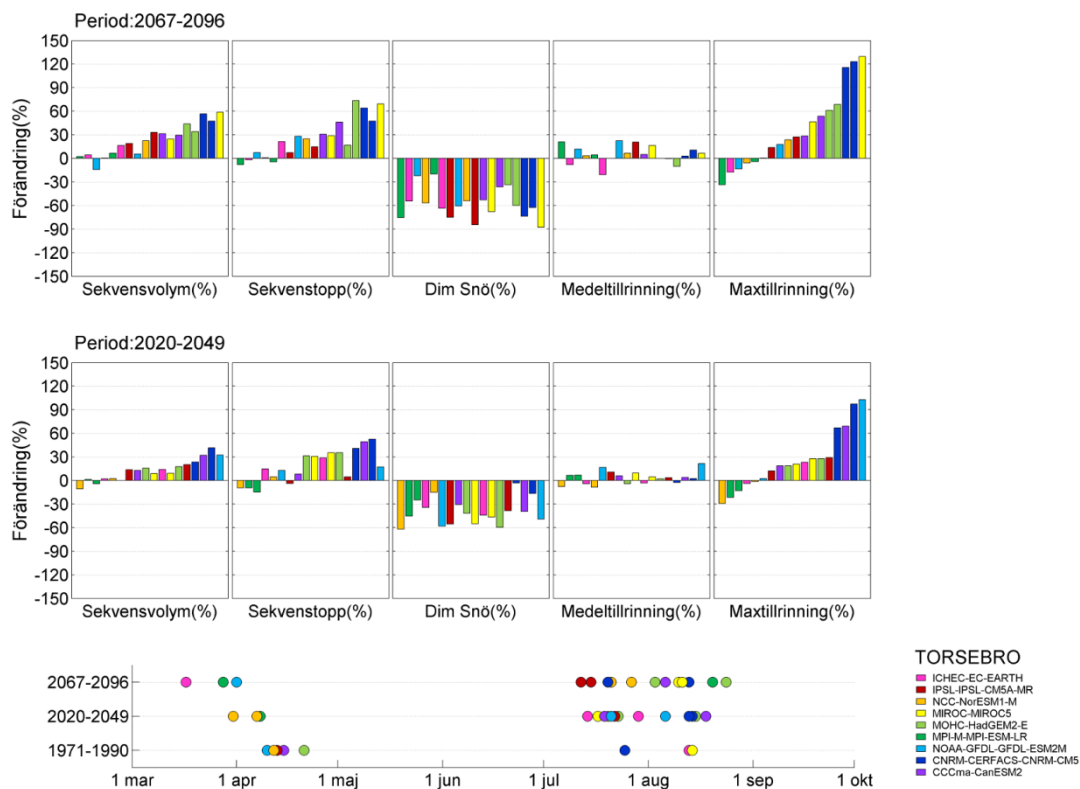
Figur 6.6. Procentuell förändring för Trängslet av sekvensvolym, sekvenstopp, dimensionerande snömagasin, medeltillrinning, maximal tillrinning vid dimensioneringstillfället, samt förändring av dimensionerande vattenstånd i cm gällande perioden 2067-2096 (över) och 2020-2049 (under). Referensperioden som beräkningarna jämförs mot är 1971-1990. Längst ner visas tidpunkt för dimensionerande vattenstånd för de tre beräkningsperioderna. Samtliga simuleringar är av typ RCP4.5 eller RCP8.5.



Figur 6.7. Procentuell förändring för Höljesdammen av sekvensvolym, sekvenstopp, dimensionerande snömagasin, medeltillrinning, maximal tillrinning vid dimensioneringstillfället, samt förändring av dimensionerande vattenstånd i cm gällande perioden 2067-2096 (över) och 2020-2049 (under). Referensperioden som beräkningarna jämförs mot är 1971-1990. Längst ner visas tidpunkt för dimensionerande vattenstånd för de tre beräkningsperioderna. Samtliga simuleringar är av typ RCP4.5 eller RCP8.5.



Figur 6.8. Procentuell förändring för Grusvjön av sekvensvolym, sekvenstopp, dimensionerande snömagasin, medeltillrinning, maximal tillrinning vid dimensioneringstillfället, samt förändring av dimensionerande vattenstånd i cm perioden 2067-2096 (över) och 2020-2049 (under). Referensperioden som beräkningarna jämförs mot är 1971-1990. Längst ner visas tidpunkt för dimensionerande vattenstånd för de tre beräkningsperioderna. Samtliga simuleringar är av typ RCP4.5 eller RCP8.5.



Figur 6.9. Procentuell förändring för Torsebro av sekvensvolym, sekvenstopp, dimensionerande snömagasin, medeltillrinning, maximal tillrinning vid dimensioneringstillfället gällande perioden 2067-2096 (över) och 2020-2049 (under). Referensperioden som beräkningarna jämförs mot är 1971-1990. Längst ner visas tidpunkt för maximal tillrinning för de tre beräkningsperioderna. Samtliga simuleringar är av typ RCP4.5 eller RCP8.5.



ELFORSK

SVENSKA ELFÖRETAGENS FORSKNINGS- OCH UTVECKLINGS – ELFORSK – AB
Elforsk AB, 101 53 Stockholm. Besöksadress: Olof Palmes Gata 31
Telefon: 08-677 2530. Telefax 08-677 2535
www.elforsk.se