



Framtidens översvämningssrisker

**Bengt Carlsson, Sten Bergström,
Johan Andréasson och Sara-Sofia Hellström**

Denna rapport refereras som:

Bengt Carlsson, Sten Bergström, Johan Andréasson och Sara-Sofia Hellström.
Framtidens översvämningsrisker. SMHI Reports Hydrology No 19, 2006.
SMHI, SE-601 76 Norrköping, Sweden.

Omslagsbild: Finjasjön, Hässleholm 2002.

Foto: Gunn Persson

Framtidens översvämningsrisker

**Bengt Carlsson, Sten Bergström,
Johan Andréasson och Sara-Sofia Hellström**

Report Summary / Rapportsammanfattning

Issuing Agency/Utgivare Sveriges Meteorologiska och Hydrologiska Institut S-601 76 NORRKÖPING Sverige	Report number/Publikation RH No. 19 Report date/Utgivningsdatum Juni 2006
Author (s)/Författare Bengt Carlsson, Sten Bergström, Johan Andréasson och Sara-Sofia Hellström.	
Title (and Subtitle)/Titel Future inundation risks / Framtidens översvämningsrisker	
Abstract A study of the impacts of global warming on future risks for floods and inundations in Sweden has been carried out on contract from Länsförsäkringsbolagens Forskningsfond. The work focussed on River Dalälven and the big lakes Vänern, Mälaren and Hjälmaren but some nationwide analyses were carried out as well. The methodology was based on two global climate models, two assumptions about the future emissions of greenhouse gases and a regional climate model for dynamical downscaling to Swedish conditions. The regional climate scenarios are further processed by the HBV hydrological model and the resulting river runoff or water levels are treated statistically by frequency analysis. The results show that future risk exposure is changing in a different way depending on location in the country. The situation seems to be aggravated in particular in the Vänern area in southwest Sweden and along its outlet, River Göta älv. There will also be increased risks in the western parts of the Scandinavian mountains. The risks for heavy rainfalls, which may cause severe local flooding are likely to increase even though it is difficult to discern a consistent regional pattern between the models, in this respect. The study has also addressed the uncertainty in the assessments of flood risks. It is obvious that uncertainties in the global climate scenarios are responsible for a lot of the uncertainty in the end results, but there are also uncertainties inflicted by the strategy used when transferring the climate change signal from climate models to the hydrological model.	
Sammanfattning På uppdrag av Länsförsäkringsbolagens Forskningsfond har en studie av framtidens översvämningsrisker i Sverige genomförts. Arbetet har koncentrerats till Dalälven, och de stora sjöarna Vänern, Mälaren och Hjälmaren, men en del landsomfattande analyser har också genomförts. Metodiken baserades på två globala klimatmodeller, två antaganden om framtida utsläpp av växthusgaser och en regional klimatmodell för dynamisk nedskalning till svenska förhållanden. De regionala klimatscenerierna har vidarebearbetats med hjälp av den hydrologiska HBV-modellen och de beräknade vattenflödena och vattenstånden behandlades statistiskt med frekvensanalys. Resultaten visar att den framtida riskexponeringen ändras olika i olika delar av landet. Situationen tycks förvärras speciellt i Vänerområdet och längs Göta älv. Det blir också högre risker för översvämnningar i de västliga delarna av fjällkedjan. Riskerna för skyfall, som kan skapa allvarliga lokala översvämnningar, ökar sannolikt, även om det är svårt att urskilja ett gemensamt mönster i klimatscenerierna. Studien har också behandlat osäkerheterna i bedömningen av översvämningsriskerna. Det är tydligt att osäkerheten i de globala klimatscenerierna svara för en stor del av osäkerheterna i slutresultaten, men det finns också osäkerheter orsakade av valet av strategi för att överföra klimatförändringssignalen från klimatmodeller till den hydrologiska modellen.	

Key words/sök-, nyckelord Hydrology, climate, scenarios, water resources, floods, peaks, frequency.		
Supplementary notes/Tillägg	Number of pages/Antal sidor	Language/Språk
	69	Swedish/Svenska
ISSN and title/ISSN och title ISSN-0283-1104 SMHI Reports Hydrology		
Report available from/Rapporten kan köpas från: SMHI SE-601 76 NORRKÖPING Sweden		

INNEHÅLLSFÖRTECKNING

1. PROJEKTET FRAMTIDENS ÖVERSVÄMNINGSRISKER.....	1
2. BAKGRUND.....	3
3. METODIK.....	5
3.1. KLIMATSCENARIER.....	5
3.2. HYDROLOGISKA SCENARIER	10
3.2.1. HBV-modellen	10
3.2.2. Deltametoden	11
3.2.3. Scalingmetoden	12
3.3. BEGREPPEN ÅTERKOMSTTID, RISK OCH SANNOLIKHET	13
4. RESULTAT	13
4.1. METEOROLOGI	14
4.2. HYDROLOGI.....	19
4.2.1. Vänern	20
Fyra scenarier för Vänern för perioden 2071-2100	22
Kontinuerligt scenario för Vänern för perioden 1961-2100.....	27
4.2.2. Mälaren och Hjälmaren	32
Fyra scenarier för Mälaren och Hjälmaren för perioden 2071- 2100	34
Kontinuerligt scenario för Mälaren och Hjälmaren för perioden 1961-2100.....	39
4.2.3. Dalälven	44
Fyra scenarier för Falun/Långhag för perioden 2071-2100	45
Kontinuerligt scenario för Falun/Långhag för perioden 1961-2100.....	50
Fyra scenarier för Vansbro/Skifsforsen för perioden 2071-2100.....	51
Kontinuerligt scenario för Vansbro/Skifsforsen för perioden 1961-2100	54
4.2.4. Högupplöst svensk hydrologisk modell	56
5. DISKUSSION	60
5.1. REGLERINGAR, VATTENDOMAR OCH FYSISK PLANERING	60
Säkerhet mot det allra mest extrema	61
5.2. RESULTAT FÖR HELA SVERIGE.....	61
Stora sjöar, stora problem	62
Dalälven	63
5.3. NÅGOT OM OSÄKERHETER.....	63
6. SLUTSATSER	65
7. REFERENSER.....	66

1. Projektet Framtidens översvämningsrisker

Detta projekt, *Framtidens översvämningsrisker*, som bedrivits under perioden 2004-2006, har finansierats av Länsförsäkringsbolagens Forskningsfond. Det övergripande syftet har varit att genomföra beräkningar av framtida översvämningsrisker i Sverige baserade på de nya klimatscenarier som tagits fram av Rossby Centre. Inriktningen har varit mot försäkringsbranschens behov av kunskap för förebyggande åtgärder och minskad riskexponering. Nedan ges en sammanfattande beskrivning av arbetsmoment och mål i projektets forskningsplan.

1. Framtagning av en sverigekarta över beräknade förändringar av översvämningsrisker baserade på existerande klimatscenarier.
2. Analys av förändringar i extrem nederbörd enligt klimatscenarier från Rossby Centre.
3. Utveckling av metodiken för att utarbeta scenarier över översvämningsrisker i framtiden.
4. Kalibrering av hydrologisk modell för testområden (Vänern vid Vargön, Mälaren vid Stockholm, Dalälven vid Falun/Långhag och Vansbro).
6. Beräkning av framtidens översvämningsrisker i testområdena.
7. Analyser av översvämningsriskerna baserade på en simulering av en kontinuerlig klimatförändring.
8. Framtagning av slutliga versioner av sverigekartor som visar beräknad förändring i översvämningsrisker och nederbördsintensitet.

En referensgrupp bestående av representanter från länsförsäkringsgruppen har fortlöpande följt och i viss mån också styrt arbetet. Föreliggande rapport utgör slutrapport för projektet *Framtidens översvämningsrisker*. Den bygger i huvudsak på arbete inom projektet men efter överenskommelse med Klimat- och sårbarhetsutredningen har också vissa kompletterande resultat från denna statliga utredning kunnat tillgodogöras projektet. På motsvarande sätt har vissa resultat från detta projekt kommit till direkt nytta i Klimat- och sårbarhetsutredningens analyser. Det är vår förhoppning att resultaten skall vara till hjälp för länsförsäkringsgruppen vid bedömningar av klimatfrågans betydelse för framtidens riskexponering.

De vetenskapliga resultat från detta arbete som vi framför allt vill framhålla är att vi utvecklat tekniken för att beräkna översvämningsrisker och kunnat ge en mer nyanserad helhetsbild av framtidens översvämningsrisker i Sverige än vad som tidigare varit möjligt. Speciellt intressant är att den ändrade balansen mellan minskad snösmältning och ökad nederbörd ger minskade risker på många håll och att det gått att relativt entydigt peka ut västra Götaland, västra Svealand och fjälltrakterna som mest utsatta för ökande risker. Något att vara uppmärksam på är att valet av strategi för att tolka klimatscenarier till översvämningsrisker har så stor betydelse för resultatet. Detta är erfarenheter som vi kommer att presentera vid European Conference on Impacts of Climate Change on Renewable Energy Sources i Reykjavik i juni, 2006. Resultaten kommer också att användas i vetenskapliga publiceringar.

Tack

Vi vill i första hand rikta ett tack till Länsförsäkringsbolagens Forskningsfond för finansiellt stöd. Vi vill också tacka projektets referensgrupp och där speciellt Torbjörn Olsson och Camilla Grunditz för stöd och värdefulla synpunkter under hela projektet. Ett tack riktas också till personalen på Rossby Centre för hjälp med tolkning av de regionala klimatscenarierna. Till slut vill vi uppmärksamma att detta projekt har haft fördelen av att kunna utnyttja synergieffekter med det av Elforsk finansierade projektet *Känslighetsanalys av Flödeskommitténs riktlinjer i ett framtida förändrat klimat*, det nordiska projektet *Climate and Energy*, med stöd från Nordisk Energiforskning samt SMHIs utredningsuppdrag åt Klimat- och sårbarhetsutredningen.



Figur 1.1. Högvattenståndsmarkeringarna i centrala Falun med markeringar ända från 1700-talet. Observera den senaste högsta noteringen från 1985 i mitten på bilden. Foto: Bengt Carlsson.



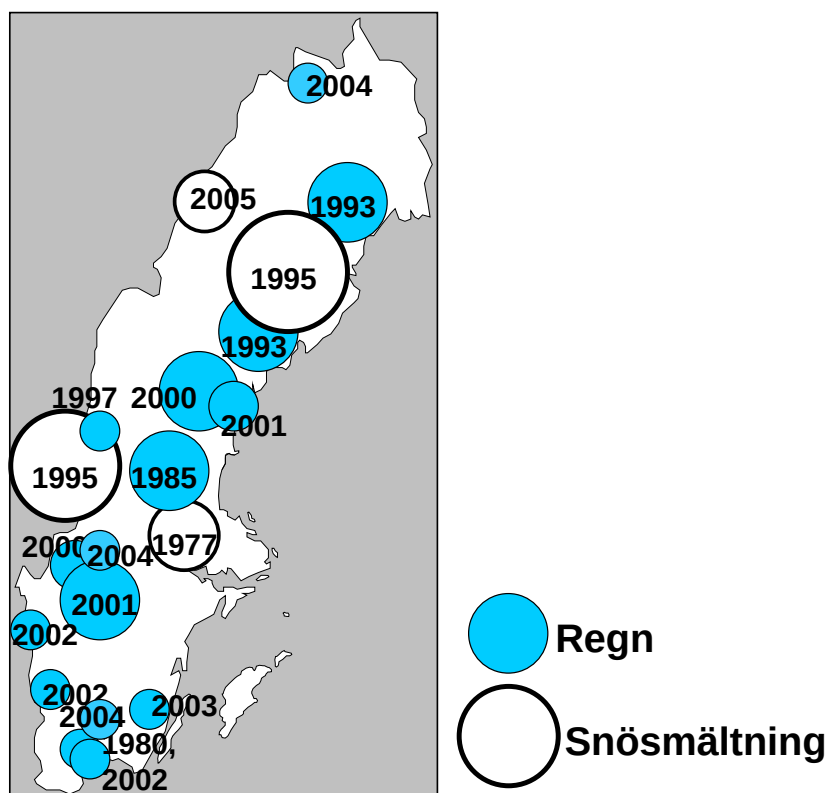
Figur 1.2. Ett nybyggt område på Lillåudden vid Mälarens strand i centrala Västerås är ett exempel på ett översvämningskänsligt område. Bottenvåningarna innehåller här endast garage och tvättstugor. Foto: Torbjörn Olsson.

2. Bakgrund

Under senare år har världen drabbats av ett stort antal uppmärksammade översvämningar, som väckt frågor om klimatet, fysisk planering och samhällets sårbarhet. Så sent som våren 2006 drabbades länderna längs Donau och under sommaren 2002 drabbades Tyskland och Tjeckien av något som har karaktäriserats som den värsta naturkatastrofen i dessa länder sedan det andra världskriget. För Sveriges del blev år 2000 ett av de mest uppmärksammade åren med översvämningar i södra Norrland, Arvika och runt Väneren. Även år 2002 blev dramatiskt med ett mycket kritiskt läge i Kristianstad i februari och ett dramatiskt sommarregn på Orust. Figur 2.1 sammanfattar de mest uppmärksammade översvämningarna i Sverige sedan 1970.

Översvämningar berör många funktioner i samhället. För att studera och möta riskerna för höga flöden har ett antal undersökningar initierats av berörda institutioner och organisationer. Särskilt bör nämnas arbetet med en översyn av dammanläggningars förmåga att klara extrema situationer som inleddes redan 1990 på initiativ av den s.k. Flödeskommittén.

Flödeskommitténs föreslagna beräkningsmetod har också utgjort en viktig komponent i den översiktliga kartering av riskerna för översvämningar som Räddningsverket finansierat och som delvis utförts vid SMHI. Översiktliga översvämningskartor för ett stort antal vattendragssträckor finns tillgängliga på Räddningsverkets hemsida (www.srv.se).



Figur 2.1. Svåra översvämningar i Sverige 1970-2005. Fyllda blå cirklar markerar regnflöden och ofyllda cirklar markerar snösmältningsflöden.

Det till synes ökande antalet översvämningar i Sverige har väckt frågor om klimatets variationer och om de ökande riskerna vid en global uppvärmning. Statistik över höga flöden i Sverige har analyserats av Lindström (2002), som kom till slutsatsen att flödena ökat i ett kortare tidsperspektiv, d.v.s. sedan 1970. Sett i ett längre perspektiv är trenden inte tydlig, bl.a. beroende på höga flöden under 1920-talet och under den senare hälften av 1800-talet. Då var emellertid samhället och infrastrukturens sårbarhet annorlunda. Frågan om ifall de senaste årens översvämningar kan kopplas till den globala uppvärmningen diskuteras för närvarande livligt, liksom vad som händer i framtiden om klimatet ändras. Som skall visas i denna rapport är utvecklingen inte så entydigt bestämd som ofta framförs i den allmänna debatten.

Studier av framtidens svenska klimat fick ett uppsving i och med att det svenska forskningsprogrammet för regional klimatmodellering SWECLIM, med finansiering från MISTRA och SMHI, startades 1997. Inom SWECLIMs beräkningscentrum, Rossby Centre, som är beläget vid SMHI, har ett stort antal regionala klimatscenarier för norra Europa tagits fram. Tekniken kallas dynamisk nedskalning, vilket innebär att de ganska grova globala klimatberäkningar, som tas fram vid internationella forskningscentra omsätts till mer detaljerad information med mer högupplösta modeller för begränsade områden. De internationella instituten är i detta fallet Hadley Centre i England och Max-Planck-institutet för meteorologi i Tyskland.

SWECLIM avslutades 2003, men Rossby Centre finns kvar som en enhet vid SMHIs forskningsavdelning. Från och med 2006 har verksamheten vid Rossby Centre säkrats långsiktigt genom förstärkta anslag till SMHI. Klimatscenarier från Rossby Centre har fått

stor uppmärksamhet och spridning i Sverige och internationellt. De har också använts för olika typer av konsekvensstudier, bl.a. åt vattenkraftindustrin och andra som är intresserade av utvecklingen av vattentillgången och riskerna för höga flöden och översvämningar (Bergström et al., 2001, Andréasson et al. 2002, Gardelin et al., 2002).

SMHI deltar i ett antal andra projekt som anknyter till projektet *Framtidens översvämningsrisker*, som redovisas i denna rapport. På uppdrag av Elforsk genomförs en känslighetsanalys av hur Flödeskommitténs riktlinjer för bestämning av dimensionerande flöden för dammanläggningar kan komma att stå sig i ett framtida förändrat klimat. Inom det Nordiska CE projektet (Climate and Energy, <http://www.os.is/ce>) studeras påverkan av klimatförändringar på den nordiska vattenkraften. Här deltar även Lettland. Inom ramen för den statliga Klimat- och sårbarhetsutredningen görs fördjupade studier av problemen med översvämningar och avtappning främst från sjöarna Vänern, Mälaren och Hjälmaren. Samtliga dessa projekt avslutas under år 2006. Att de bedrivits samtidigt har betytt en avsevärd synergieffekt för respektive uppdragsgivare.

En övergripande beskrivning av hela problematiken inom klimatforskningen ges t. ex i 'En varmare värld' utgiven av Statens Naturvårdsverk och SMHI/SWECLIM (Bernes, 2003) samt fortlöpande i Rossby Centres årsrapporter och Newsletter.

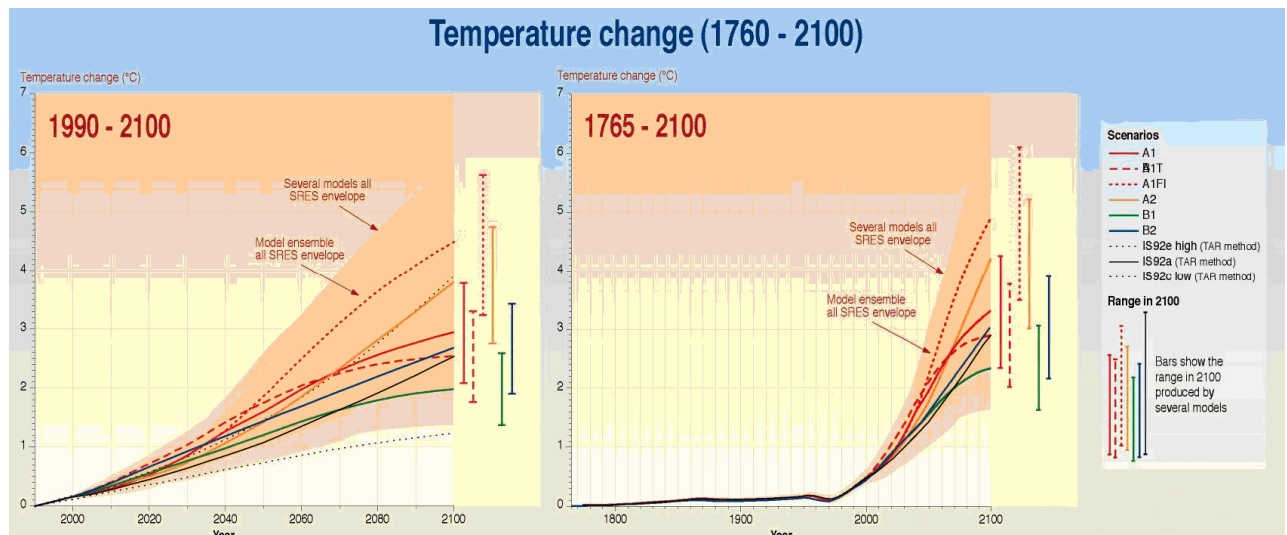
3. Metodik

3.1 Klimatscenarier

Alla klimat- och hydrologiska scenarier som har använts i detta projekt har sin grund i de globala klimatscenarier som görs på Hadley Centre i Storbritannien och det tyska Max-Planck-institutet för meteorologi i Tyskland med modellerna HadAM3H (Pope et al., 2000; Gordon et al., 2000) och ECHAM4/OPYC3 (Roeckner et al., 1999) respektive. Den beräknade klimatpåverkan styrs av antagna utsläpp av växthusgaser i framtiden. Genomgående har utsläppsscenarierna A2 och B2 enligt SRES använts, figur 3.1.1. A2 innebär en kraftigare ökning av utsläppen än B2. SRES står för Special Reports on Emissions Scenarios (Nakićenović et al. 2000).

Genom att arbeta med kombinationer av två globala klimatmodeller och två utsläppsscenarier får vi en viss uppfattning om osäkerheten i scenarierna. Sammanlagt studeras sex simuleringar. Två kontroll- eller referenssimuleringar, en för vardera modellen, omfattande tiden 1961-1990, samt två framtidssimuleringar, för tiden 2071-2100, med vardera två utsläppsscenarier, A2 och B2. För ytterligare information om de meteorologiska modellerna hänvisas till t ex. Räsinen et al., (2003, 2004), Döscher och Meier (2004), Graham (2004), Kjellström (2004) och Meier et al., (2004a, 2004b).

Beroende på tillgången på indata kan referensperioden för de hydrologiska tillämpningarna skilja sig något från den meteorologiska referensperioden 1961-1990. Detta saknar dock betydelse för slutsatserna.



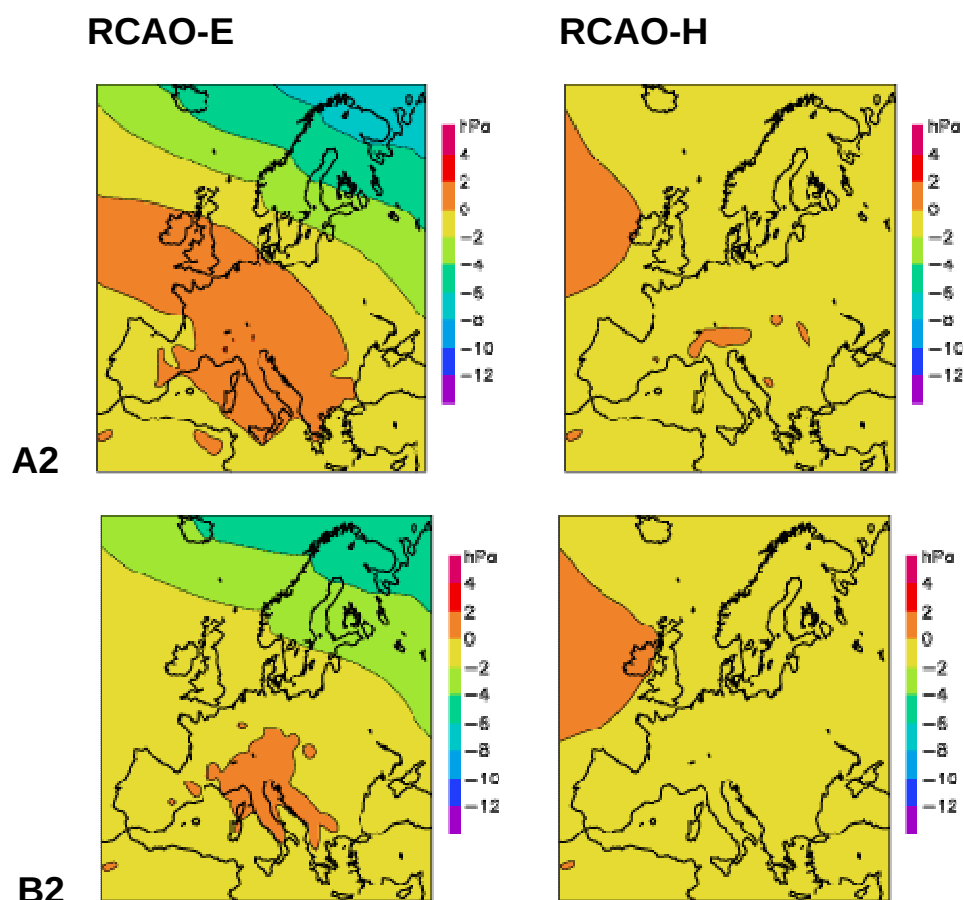
Källa: IPCC.

Figur 3.1.1. En sammanfattning av ett stort antal globala klimatscenarier som sammanställts av IPCC, baserade på olika utsläppsscenarier. Figuren visar bl. a. att A2-scenariet ger en kraftigare temperaturhöjning än B2. Källa: IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change)

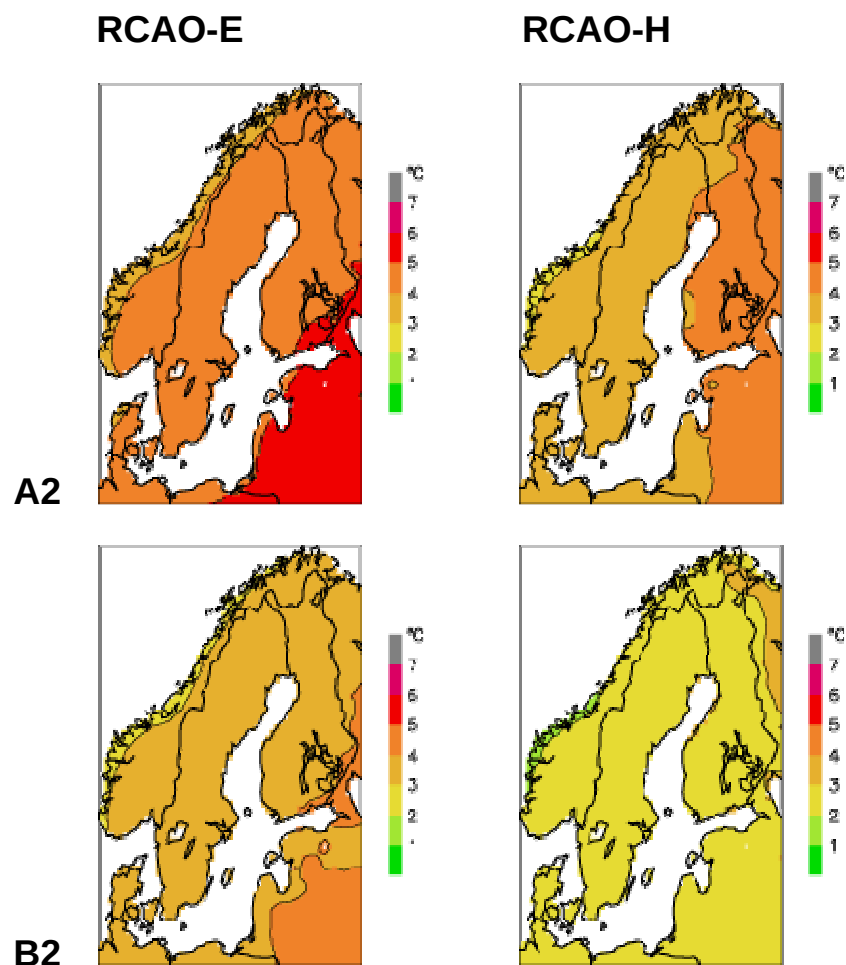
De klimatdata som de globala modellerna producerar är mycket grova. De måste därför vidarebearbetas om man vill få fram mer detaljerade data för ett område. I detta projekt har beräkningar från de globala modellerna omsatts till regionala scenarier för Skandinavien med hjälp av Rossby Centres regionala klimatmodell RCAO (Döscher et al., 2002) och RCA3 (Kjellström et al., 2006). Denna teknik kallas dynamisk nedskalning och är ofta använd när man vill detaljstudera klimatets utveckling i ett begränsat område. På så sätt kan man exempelvis ta hänsyn till fjällkedjans och Östersjöns betydelse för den regionala klimatutvecklingen.

I det följande används ofta beteckningarna RCAO-H/A2, RCAO-H/B2, RCAO-E/A2 och RCAO-E/B2 för de olika kombinationerna av regional modell, global modell och CO₂-emission. I en del figurlegender har RCAO i dessa beteckningar utelämnats. I de kontinuerliga simuleringarna har den regionala modellen RCA3 (Kjellström et al., 2006), som är en nyutvecklad version av den regionala klimatmodellen RCAO, använts.

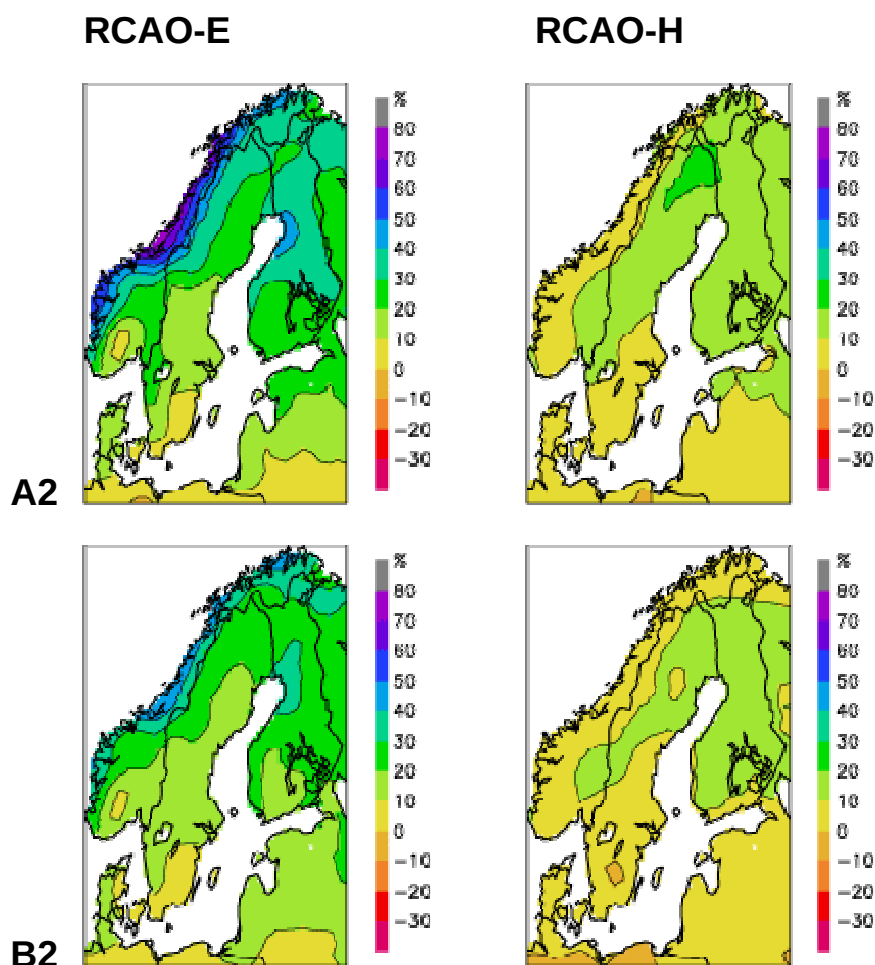
Med olika globala klimatmodeller skapas olika globala cirkulationsmönster som i sin tur genererar olika temperatur och nederbördsmonster. Detta illustreras i figur 3.1.2, som visar medelvärdet av förändringen av lufttryckets fördelning över Europa enligt de fyra globala scenarierna tolkade till regionala scenarier med RCAO-modellen. Figur 3.1.3 visar motsvarande förändring av temperaturen och i figur 3.1.4 visas nederbördsförändringen. Den förändrade lufttrycksgradient som ECHAM-modellen visar, betyder en ändring mot mer västvindar i framtiden. Detta torde vara huvudförklaringen till att speciellt nederbördsförändringen skiljer sig så markant mellan scenarier baserade på de två modellerna i figur 3.1.4.



Figur 3.1.2. Tryckförändringen [hPa] över Europa mellan kontrollperioden 1961-1990 och perioden 2071-2100 för två globala modeller och två utsläppsscenarioer. Till vänster visas RCAO-E simuleringar och till höger RCAO-H simuleringar. Överst visas utsläppsscenarioet A2 och nederst utsläppsscenarioet B2. Generellt visar RCAO-E störst variabilitet för lufttrycket över i Europa. RCAO-H ger en mer homogen tryckskillnad över hela Europa. Det är en större skillnad mellan de två globala modellerna än mellan utsläppsscenarioerna.

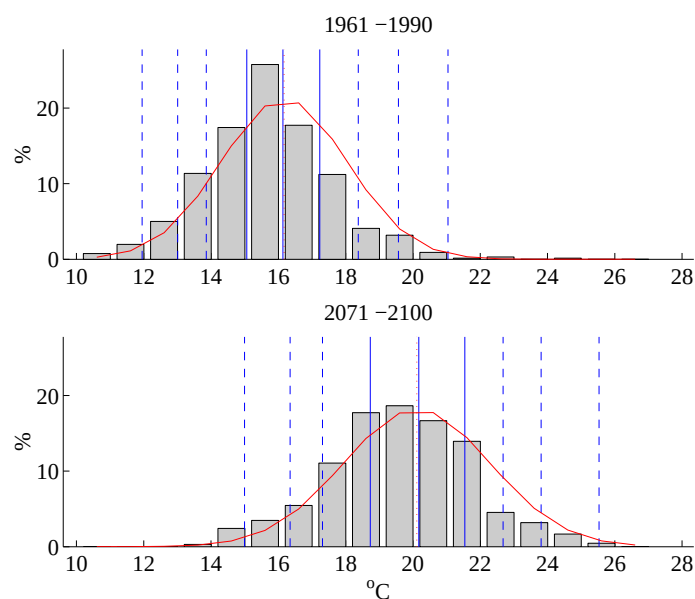


Figur 3.1.3. Temperaturförändringen [$^{\circ}\text{C}$] över Skandinavien mellan 1961-1990 och 2071-2100 för två globala modeller och två utsläppsscenarioer. Till vänster visas RCAO-E simuleringar och till höger RCAO-H simuleringar. Överst visas utsläppsscenarioet A2 och nederst utsläppsscenarioet B2. Största temperaturökningen över Sverige ger RCAO-E /A2 med 4-5 $^{\circ}\text{C}$. Både RCAO-H /A2 och RCAO-E /B2 ger en generell temperaturökning på 3-4 $^{\circ}\text{C}$ medan med RCAO-H /B2 ger en temperaturökning på 2-3 $^{\circ}\text{C}$.



Figur 3.1.4. Den procentuella förändringen i nederbörd över Skandinavium mellan kontrollperiod 1961-1990 och 2071-2100 för två globala modeller och två utsläppsscenarier. Till vänster visas RCAO-E simuleringar och till höger RCAO-H simuleringar. Liksom beträffande temperaturen ger kombinationen RCAO-E /A2 den största förändringen och RCAO-H /B2 den minsta.

Figur 3.1.2 - 3.1.4 visar bara förändringar i medelförhållanden. Det finns betydligt mer detaljer i de scenarier som använts vid de hydrologiska beräkningarna. En viktig slutsats där är att de största temperaturökningarna sker under dygn med de lägsta temperaturerna, vilket gör att vintertemperaturer påverkas mest och att riktigt kalla dagar blir ovanligare i framtiden. Figur 3.1.5 illustrerar vad ändringen av temperaturen betyder statistiskt för sommartemperaturen i Stockholm enligt ett av klimatscenarierna. För nederbörden skiljer sig ändringarna också avsevärt mellan årstider och regioner i landet.



Figur 3.1.5. Figuren visar den framtida förändringen av sommartemperaturen i Stockholm enligt scenariot RCAO-E/A2. De vertikala blå linjerna markerar percentilerna för 1, 5, 10, 25, 50 (medianen), 75, 90, 95 och 99 %. Perioden 2071-2100 visar stora likheter med dagens sommartemperaturer i Köpenhamn.

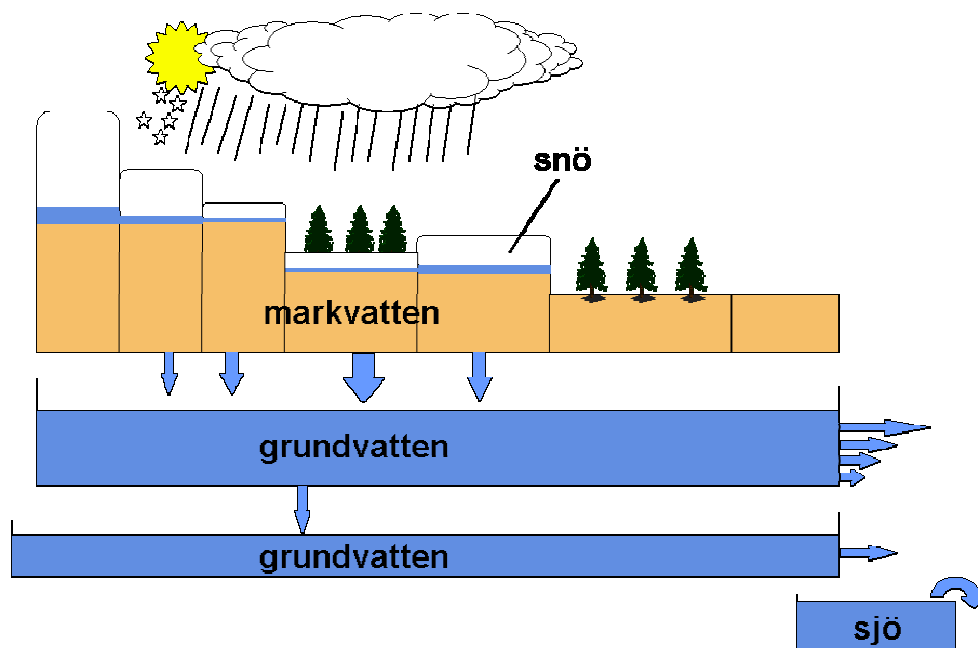
Tekniken att beräkna och jämföra klimatet mellan tidsutsnitt, över en period idag (t. ex 1961-1990) med en period i framtiden (t.ex. 2071-2100), brukar ibland kallas time slice-jämförelse. Detta ger en bild av framtiden som kan jämföras med dagens förhållanden, men det säger ingenting om utvecklingen däremellan. För att i någon mån studera denna har även en kontinuerlig klimatberäkning från Rossby Centre över hela perioden 1961-2100 utnyttjats. Detta har hittills bara kunnat göras med ett globalt klimatscenario, nämligen det baserat på ECHAM4/OPYC3-modellen och utsläppsscenario B2. Denna typ av kontinuerlig beräkning brukar ibland benämnas transient. När den genomfördes vid Rossby Centre användes en nyutvecklad version av den regionala klimatmodellen, med benämningen RCA3 (Kjellström et al., 2006) i stället för RCAO. Denna skillnad måste beaktas vid jämförelsen av resultat mellan time slice-metoden och den kontinuerliga beräkningen i denna rapport.

3.2. Hydrologiska scenarier

3.2.1. HBV-modellen

Den hydrologiska avrinningsmodell som använts är den så kallade HBV-modellen, som utvecklats vid SMHI sedan början av 70-talet (Bergström, 1976 och 1992. Lindström et. al 1996). Efter 1996 har fortlöpande ett antal förbättringar skett. Namnet kommer från den avdelning på SMHI där utvecklingen skedde: Hydrologiska Byråns Vattenbalansavdelning. Modellen är begreppsmässig, d.v.s. den bygger på 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 nederbörden inklusive snöns ackumulation och avsmältning, en för beräkning av markfuktighet och en tredje rutinen för beräkning av vattnets vägar och hur vattenflöden svarar på yttre förändringar. Modellen är semidistribuerad vilket innebär att avrinningsområdet delas in i delområden inom vilka höjder och vegetationszoner (skog, öppet landskap och sjöar) klassificeras. Den har dessutom speciella

funktioner för att hantera sjöar och regleringsrutiner. En schematisk skiss av HBV-modellen visas i figur 3.2.1.



Figur 3.2.1. Schematisk skiss över HBV-modellen.

Data från regional klimatscenarier kan överföras till den hydrologiska modellen på olika sätt. Det hittills vanligaste sättet har varit att använda sig av den s.k. *deltametoden*. Denna har använts för alla körningar i denna rapport utom för de kontinuerliga scenarierna för vilka den så kallade *scalingmetoden* har använts.

3.2.2. Deltametoden

För att omsätta klimatmodellers resultat till hydrologiska effekter krävs ett gränssnitt mellan klimatmodellen och den hydrologiska modellen. Anledningen är att klimatmodellerna ännu inte klarar att beskriva det nutida klimatet tillräckligt väl för att ge en trovärdig hydrologisk respons om inga justeringar av modellerade drivdata görs. Ett sätt att hantera detta är att utgå från skillnaden mellan klimatmodellens kontrollsimulering, vilken motsvarar dagens klimat (1961-1990), och scenariosimuleringen som svarar mot ett framtida klimat (2071-2100). I deltametoden kombineras skillnaden från klimatmodellen i de hydrologiskt mest relevanta variablerna, nederbörd, temperatur och potentiell avdunstning, med en observerad databas för att skapa drivdata till den hydrologiska modellen, som gäller för ett framtida klimat.

Förändringen i nederbörd hanterades rättframt. Den procentuella förändringen, som erhöles från analysen av klimatmodellens resultat, används för att månadsvis justera den observerade nederbörden. Denna ansats innebär att ingen hänsyn tas till förändringar i antalet nederbördsdagar och ej heller till om olika nederbördsintensiteter ändras på olika sätt.

Vad det gäller förändringar i temperatur så har dessa gjorts på ett mer sofistikerat sätt eftersom analyser av klimatmodellens resultat visat att låga temperaturer förändras mer än

höga temperaturer. Överföringen av temperaturförändringen görs därför via månadsvisa linjära samband som förändrar temperaturen olika beroende på den aktuella dagens temperatur, det vill säga låga temperaturer ökar mer.

Ett viktigt indata till HBV-modellen är den potentiella avdunstningen. Tillsammans med beräknad markfuktighet styr den hur stor avdunstning som skall ske varje dag. Detta är också en variabel som ändras i ett förändrat klimat. Överföringen av förändring i potentiell avdunstning har gjorts i två steg. Först extraheras den absoluta skillnaden i potentiell avdunstning för varje månad och den relativa skillnaden på årsbasis från klimatmodellen. Månadsskillnaden adderas till en tidsserie över potentiell avdunstning som har beräknats via temperaturobservationer. Till sist justeras den förändrade tidsserien så att den relativa skillnaden mellan originalserien och scenarioserien blir lika stor som skillnaden mellan kontroll- och scenariosimulering med klimatmodellen. På så sätt får vi en förändring i den potentiella avdunstningen i HBV-modellen som i stora drag stämmer med förändringen i den regionala klimatmodellen.

3.2.3. Scalingmetoden

En annan metod för att omsätta klimatmodellens resultat till hydrologiska effekter är den så kallade scalingmetoden. Denna metod bygger på att modellresultat från klimatmodellen används mer direkt i den hydrologiska modelleringen än i deltametoden. Istället för att justera observationer så att de beskriver ett framtida klimat enligt klimatmodellen så användes observationerna till att justera klimatmodellens resultat till jämförbara nivåer med observationer. Scalingmetoden bibehåller den variabilitet, och även förändringar i variabilitet, som ges av klimatmodellen.

För att erhålla en realistisk hydrologisk respons måste nederbörden från den regionala klimatmodellen ha liknande egenskaper som observerad nederbörd. När modellerad nederbörd från klimatmodellen jämfördes med areell nederbörd för respektive delområde i den hydrologiska modellen visade det sig att klimatmodellen överskattar antalet dagar med nederbörd. Till viss del berodde detta på att klimatmodellen arbetar med en annan upplösning än den observerade areella nederbördsdatabasen, 2500 km^2 v.s. $\sim 400 \text{ km}^2$, men även på att modellen faller ut regn när det kanske inte borde ha regnat. För att få samma antal dagar med nederbörd i klimatmodellens kontrollklimat, som i observationer, infördes en tröskel under vilken all nederbörd sattes till noll (ca $0,5 \text{ mm/dygn}$). Nästa steg i justeringen var en intensitetsberoende skalering av den modellerade nederbörden så att samma antal dagar med en viss intensitet uppnåddes. Detta gjordes för 20 klasser av nederbörd.

För temperatur och potentiell avdunstning var justeringarna mer rakt på sak. Jämförelser med observationer användes för att justera klimatmodellens resultat under kontrollperioden så att de gav rätt månadsmedelvärden på dessa variabler.

För alla variabler (nederbörd, temperatur och potentiell avdunstning) antogs samma korrektioner, som beräknats för den överlappande tidsperioden mellan observationer och klimatmodell (kontroll), gälla även för den fortsatta klimatsimuleringen (framtid).

För att kunna studera klimatförändringens gradvisa utveckling har, som tidigare nämnts, en kontinuerlig, s.k. transient, körning för perioden tiden från 1961 och till 2100 gjorts. Den kontinuerliga körning som behandlas i denna rapport gjordes på Rossby Centre i januari 2006

och grundar sig på ECHAM4/OPYC3, regionala modellen RCA3 och utsläppsscenario B2. De hydrologiska beräkningarna bygger sedan på ovan beskrivna scalingmetod.

3.3. Begreppen återkomsttid, risk och sannolikhet

Begreppen återkomsttid, risk och sannolikhet skapar ibland missförstånd. Med en händelses återkomsttid menas att den inträffar eller överträffas i genomsnitt en gång under denna tid. Det innebär att sannolikheten för exempelvis ett 100-års flöde är 1 på 100 för varje enskilt år. Eftersom man exponerar sig för risken under flera år blir den ackumulerade sannolikheten avsevärd. För ett hus som står i 100 år i ett område som endast är skyddat mot 100-års flödet är sannolikheten för översvämning under denna tid hela 63 %. Detta är skälet till att man t.ex. för större dammar ofta sätter gränsen vid, eller t.o.m. bortom, 10 000-årsflödet. Då blir ändå sannolikheten under 100 års exponering ca 1 %. Tabell 1.1 visar sambandet mellan återkomsttid, exponerad tid och sannolikhet.

Tabell 1.1. Sambandet mellan återkomsttid, exponerad tid och sannolikhet i procent.

Återkomsttid (år)	Sannolikhet under 50 år (%)	Sannolikhet under 100 år (%)
100	39	63
1000	5	9,5
10 000	0,5	1

Beräkning av återkomsttider sker med en teknik som kallas frekvensanalys och tillämpas på årets högsta värde. Ofta används den s.k. gumbelfördelningen (Lindström 1993). Frekvensanalys är en metod som måste tolkas med försiktighet. Resultatet är i högsta grad beroende på mätseriens längd vilka gör att exempelvis ett 100-årsflöde ofta ändras i takt med att nya data flyter in. Beräkningarna försvåras speciellt om dataserierna är korta eller om de är påverkade av regleringar i vattendraget.

4. Resultat

Det är lätt att övertolka scenarier. Antalet källor till osäkerhet på vägen från indata till färdiga resultat är många. Det är just därför som man valt att använda begreppet *scenarier* och inte *prognoser*. En första illustration av detta gavs av figur 3.1.3 som visar hur man kommer till helt olika globala temperaturökningar beroende på val av utsläpp av växthusgaser och global modell. Nästa steg i kedjan är den regionala meteorologiska modellen. Där pågår en ständig utveckling mot riktigare simuleringar. Under detta projekts genomförande har t.ex. en ny regional modell RCA3 utvecklats på Rossby Centre och använts.

Vid beräkningen av översvämningsrisker så blir det olika resultat om vi använder deltametoden och scalingmetoden. Det är t.ex. inte realistiskt att vänta sig samma 100-årsvärden för vattenföring eller vattenstånd med de båda metoderna. Inga scenarier producerar med andra ord några slutgiltiga resultat utan alla resultat måste betraktas som resultatet av just den kombination av indata och modeller som använts vid just denna tidpunkt.

Hur skall då resultaten tolkas? Det bästa sättet är nog att titta mer på tendenser än på absoluta tal. Förändringen av ett hundraårsflöde visar en riktning och storleksordning på en förändring

i extremvärden. Kartor anger tendenser inom ett område, eventuellt med utpekande av ett riskområde, om många närliggande resultat visar samma tendens. Av ett enskilt värde kan man inte dra alltför långtgående slutsatser.

4.1. Meteorologi

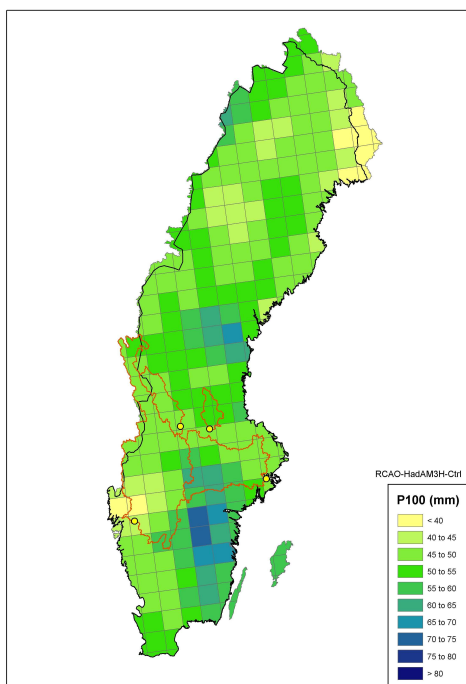
I detta kapitel redovisas analyser av den nederbörd som kommer från den regionala klimatmodellen RCAO. I detta fall har modellen levererat data i ett ca 49*49 km rutnät över Sverige. Figur 4.1.1 visar beräkningar och observationer som motsvarar dagens klimat. De data som visas här är nederbörd med återkomsttiden 100 år, i fortsättningen benämnt P_{100} . Observera att ett högt P_{100} i ett område inte självklart innebär att den totala årsnederbörden är högre än i ett område med lägre P_{100} , utan endast att frekvensen av höga nederbördstillfällen är högre. Det är därför som fjällkedjan ned mot Väneren har så förhållandevis låga värden jämfört med övriga Sverige, figur 4.1.1.

Som framgår av figuren beskriver modellerna den rumsliga fördelning av kraftiga regn på ett sätt som skiljer sig en hel del från observationerna. Ett undantag utgörs av Gävlerregionen i RCAO-E-modellen, medan de höga värdena i fjällkedjan missas helt. Vad beträffar nivån så vet vi att observationerna såsom de beräknats ligger något för lågt. Att från enbart P_{100} definiera regioner med förändrad påverkan, eller riskzoner för kraftiga regn, går således inte utan man måste studera skillnaden mellan referens- och scenariokörningar. När det gäller hydrologiska tillämpningar måste sedan hela vattenbalansen tas med i beräkningarna t. ex med en hydrologisk modell.

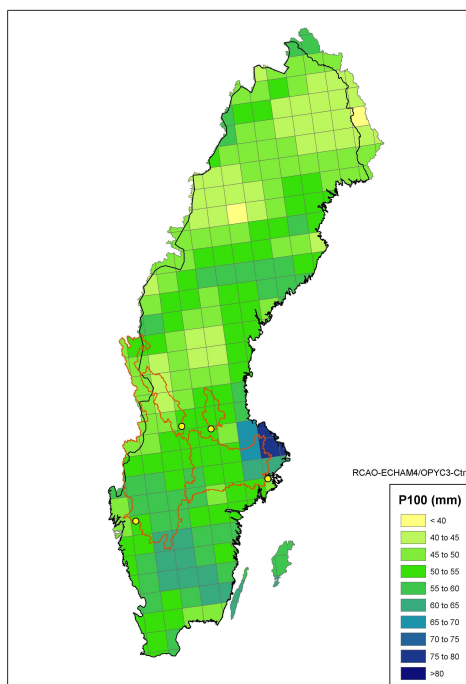
I figur 4.1.2 visas skillnaden i procent av P_{100} mellan kontrollperiod (1961-1990) och scenarier (2071-2100) över hela året för de fyra alternativen RCAO-E/A2 och B2 samt RCAO-H/A2 och B2. Generellt sett kan man konstatera att större likhet i resultatet föreligger mellan B2-körningarna än mellan A2-körningarna och att B2-körningarna ger stora arealer med minskande hundraårsnederbörd. RCAO-E/B2 är den kombination som har använts i de kontinuerliga (transienta) scenarierna. A2-scenarierna, den högsta emissionen, ger en ökning över nästan hela Sverige med på en del platser mer än 60 % större hundraårsregn.

Hur skillnaderna i P_{100} blir säsongvis, utgående från de två globala modellerna och utsläppsscenario A2, framgår av figur 4.1.3. Man kan konstatera en kraftig ökning av hundraårsnederbörden under vintermånaderna. Det framgår vidare att den på årsbasis konstaterade förhöjningen i figur 4.1.4 för RCAO-H/A2-modellen i Vänerområdet förmodligen genereras under sommarmånaderna juni till augusti. RCAO-E/A2 visar för samma månader lägre värden. De låga värden som RCAO-H/A2-modellen visar för fjällkedjan vintertid torde bero på att modellen denna tid på året genererar mer ostliga vindar med resultat att nederbörden hamnar över norra Sveriges ostkust och inland.

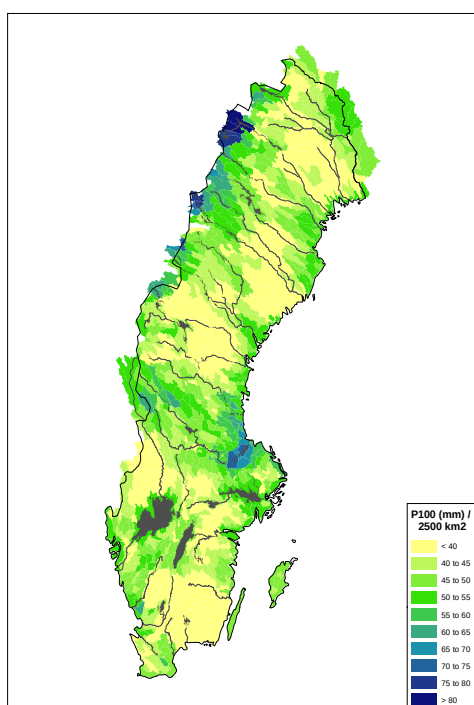
Det är uppenbart att modellresultaten visar stor spridning vad avser förändringen av intensiva regn i framtiden. Man kan inte säga att något av dessa scenarier är troligare än de andra. Att beräkna extremt stora nederbördsmängder med meteorologiska modeller är dessutom, generellt sett, ett svårt vetenskapligt problem. Denna osäkerhet är en viktig bakgrund vid en sammanfattande bedömningen av risken för kraftig nederbörd i framtiden. Lyckligtvis minskar en del av osäkerheten vid hydrologiska modellberäkningar på grund av att fler faktorer då tas med.



RCAO-H

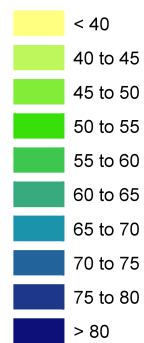


RCAO-E

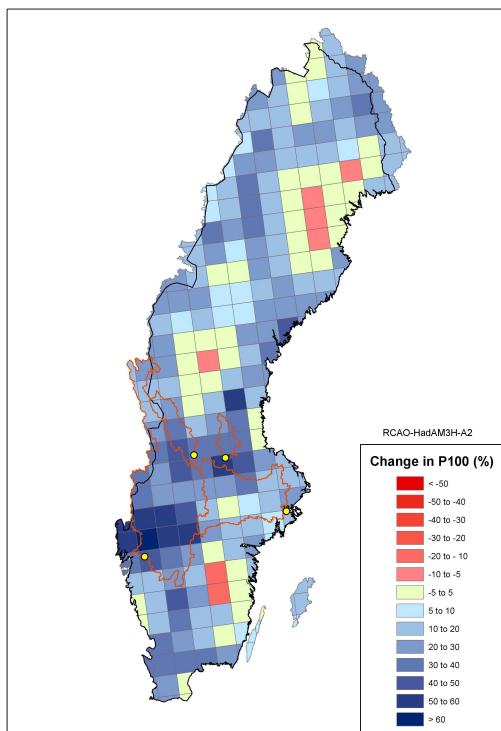


Observationer

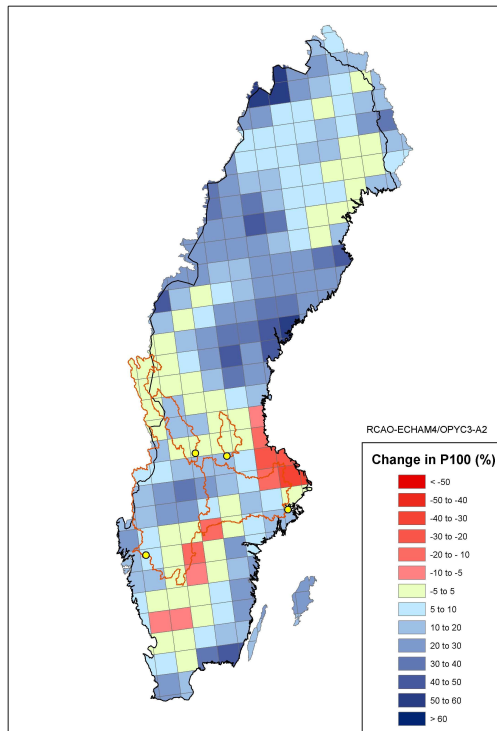
P100 (mm)



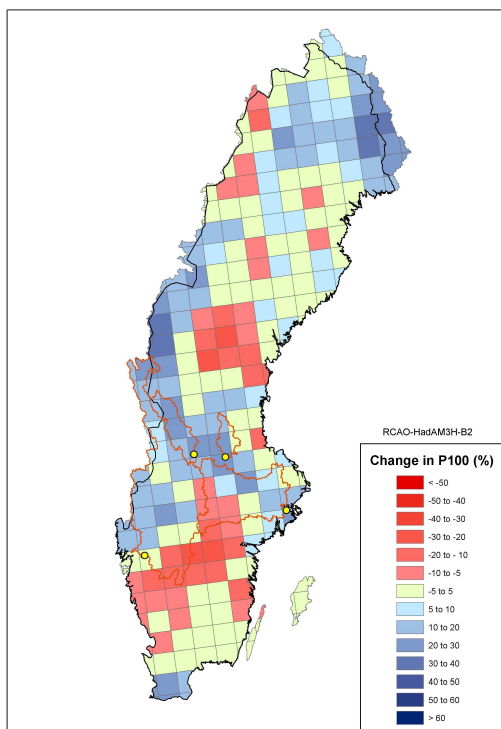
Figur 4.1.1. Storleken på 100-årsnederbörd för observationer, beräknade med högupplösta sverigemodellen, jämförs med kontrollperioden 1961-1990, för RCAO-H och RCAO-E modellerna varifrån sedan A2 och B2 scenarierena körs.



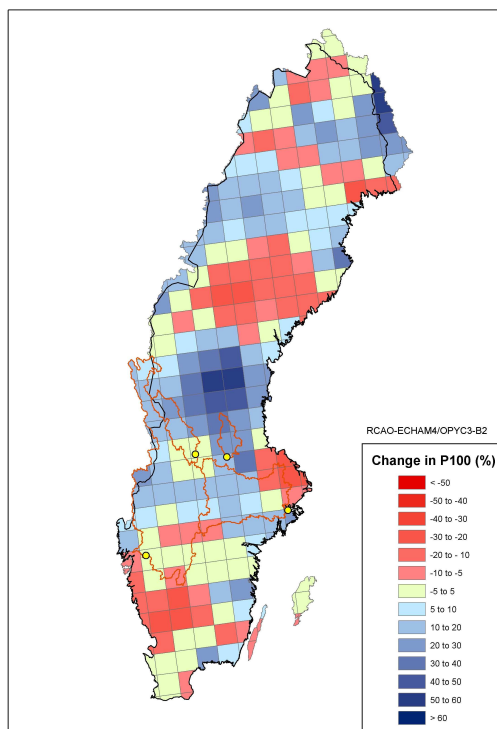
RCAO-H/A2 (2071-2100)



RCAO-E/A2 (2071-2100)

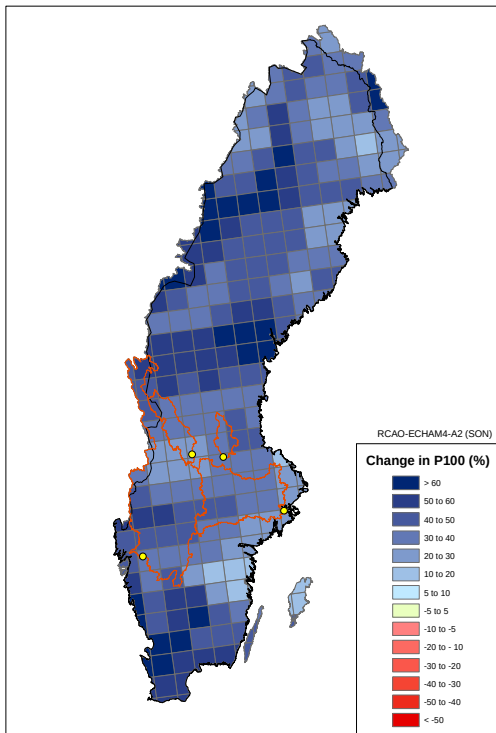


RCAO-H/B2 (2071-2100)

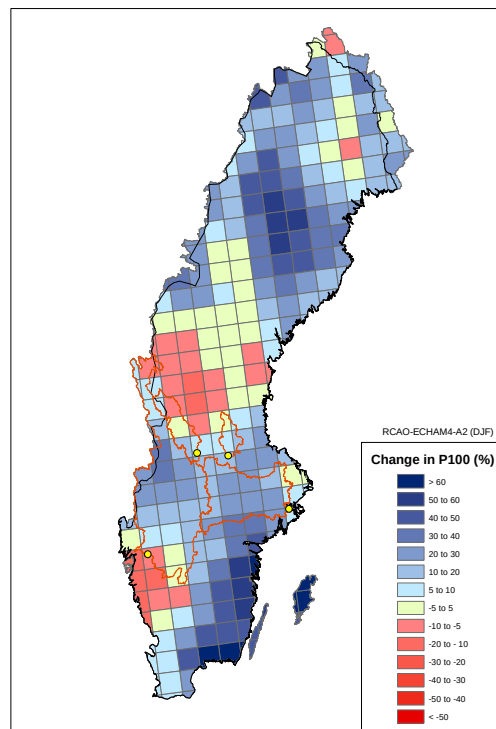


RCAO-E/B2 (2071-2100)

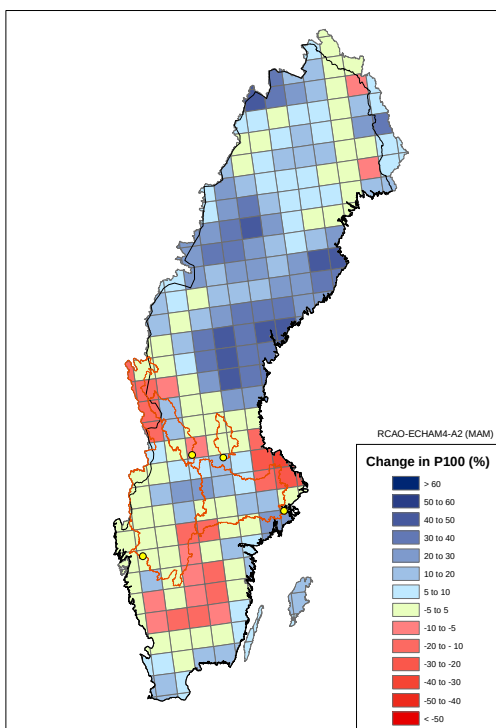
Figur 4.1.2. 100-årsnederbörd. Skillnaden i % mellan kontrollperiod och scenarier.



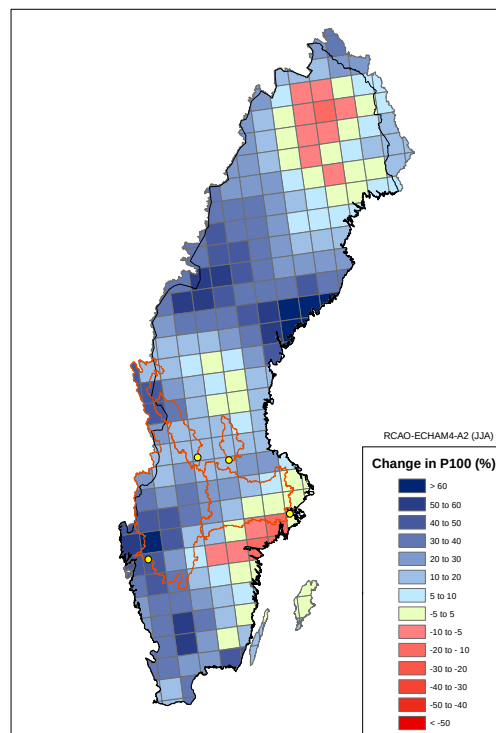
dec.-feb.



mars-maj

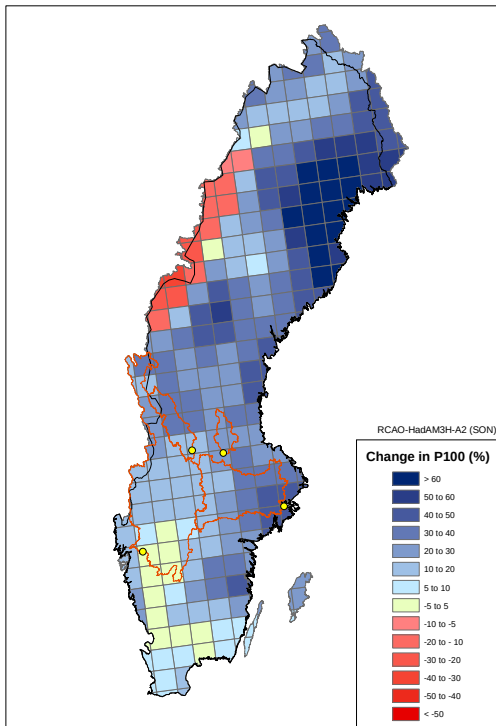


juni.-aug.

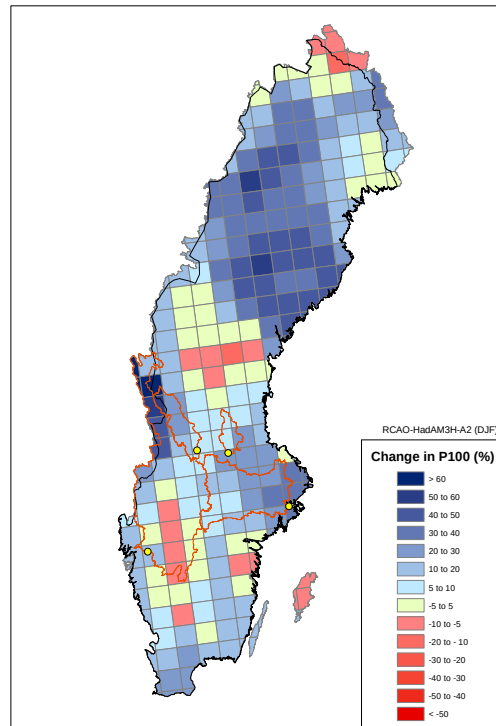


sept.-nov.

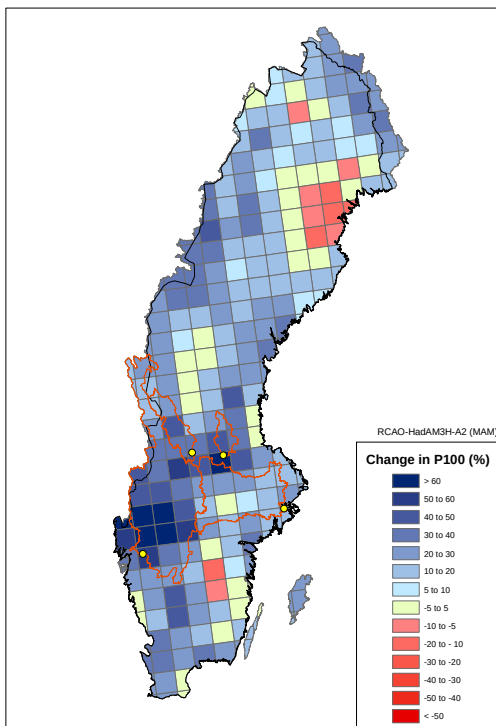
Figur 4.1.3. 100-årsnederbörd. Skillnaden i % mellan kontrollperiod och RCAO-E/A2 scenario uppdelat på säsonger.



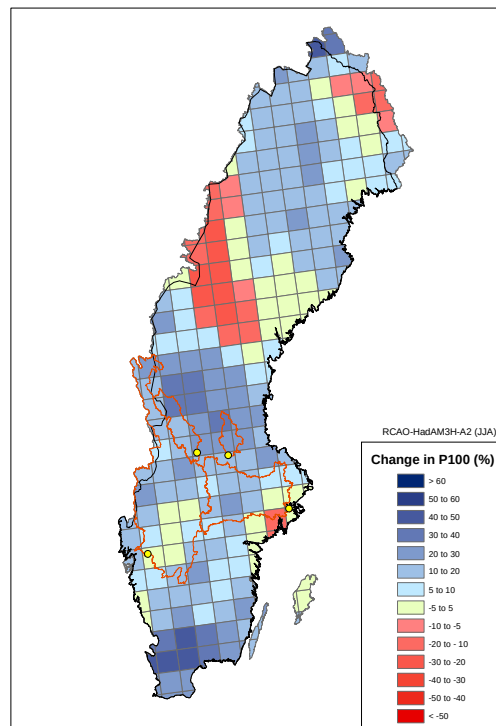
dec.-feb.



mars-maj



juni-aug.

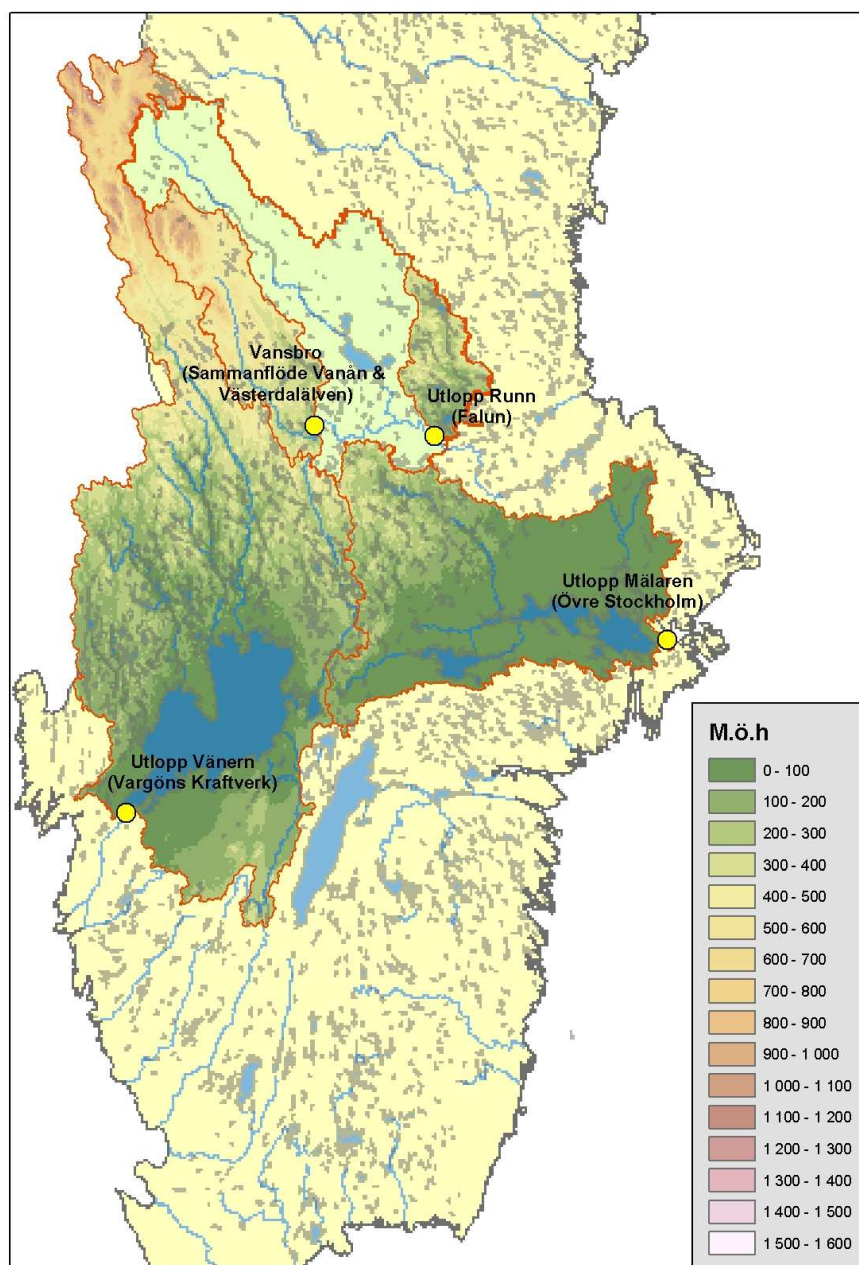


sept.-nov.

Figur 4.1.4. 100-årsnederbörd. Skillnaden i % mellan kontrollperiod och RCAO-H/A2 scenario uppdelat på säsonger.

4.2. Hydrologi

Fyra områden valdes ut för detaljerade studier av framtidens översvämningsrisker (figur 4.2.1.). Kravet var att de, förutom att vara områden med problem redan i dag, också skulle representera områden med olika hydrologisk karaktär. Valet föll på två områden helt dominerade av stora sjöar, utflödet ur Vänern och Mälaren, ett område med relativ snabb respons på nederbörd, sammanflödet Vanån/Dalälven vid Vansbro samt sammanflödet Lillån/Dalälven som påverkar vattenståndet i sjön Runn och därmed i Falun. Eftersom detta



Figur 4.2.1. De fyra områden som valts ut för studier av klimatpåverkan på översvämningsriskerna.

senare område också ligger efter sammanflödet av Väster- och Österdalälven påverkas det av regleringarna i Trängslet och framför allt av Siljan. Både Vansbro och Falun representerar översvämningskänsliga samhällen vid Dalälven. Stränderna runt Mälaren och Vänern är också mycket aktuella områden i översvämningssammanhang, inte minst manifesterat under hösten och vintern 2000/2001.

För varje område görs först en kortfattad genomgång av dess hydrologi. Därefter följer en redovisning av resultaten som bygger på fyra standardiserade klimatscenarier de globala modellerna ECHAM4/OPYC3 och HadAM3H med emissionerna A2 och B2 samt den regionala RCAO-modellen samt HBV-modellen enligt deltametoden (närmare beskriven i avsnitt 3.2.2.). Åren 1961-1990 jämförs med åren 2071-2100.

För att i detalj studera tidsförloppet av förändringen under det kommande seklet har en kontinuerlig (transient), klimatsimulering från Rossby Centre använts (se avsnitt 3.2.3.). För varje område presenteras först en figur i vilken utvecklingen av 100-årsflödena jämförs med nederbörd, temperatur och avrinning. I Väner- och Mälaronrådena, som är tröga system på grund av de stora sjöarna, har dessa beräkningar baserats på löpande 30-dagars medelvärden. För Dalälven har beräkningar över såväl dagliga värden som 30 dagar gjorts.

För att studera årtdynamiken jämförs också två tidsperioder 2011-2040 och 2071-2100 med 1963-1990 för Vänern och Mälaren. Slutligen visas diagram över den kontinuerliga utvecklingen av tillrinningen till Vänern och Mälaren, liksom vattenståndsförändringar och snömagasinets successiva förändring.

Scenarier över översvämningsrisker i kartform har samlats i ett avslutande avsnitt.

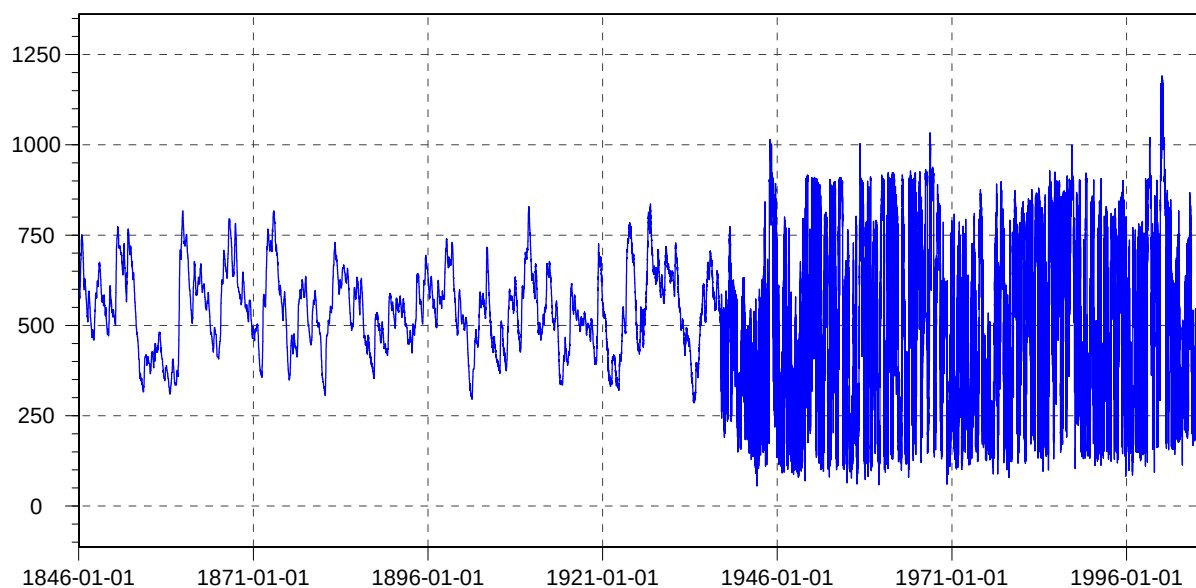
I analysen har även inkluderats resultat från närliggande projekt enligt avsnitt 1.

4.2.1. Vänern

Vänern har en sjöyta på 5 460 km² och är därmed Sveriges största och Europas tredje största sjö efter Ladoga och Onega i Ryssland. Vänern innehåller en tredjedel av Sveriges sötvatten och förser ca 700 000 människor med dricksvatten. Avrinningsområdet för Vänern är 46 880 km² med en sjöprocent, inklusive Vänern, på 35,7 %. Området är påverkat av landhöjningen, som runt Karlstad är 3,5 mm/år och i Vänersborg 2,6 mm/år (Norell, 2000).

Vänerns avrinningsområde sträcker sig från utloppet i Vänersborg upp genom Värmland till Dalarna och in i Norge. Geografiskt sett är området utsträckt och den norra delen, med Klarälven (Trysilälva), Byälven, Upperudsälven, Norsälven och Gullspångsälven, karaktäriseras av maximal tillrinning vid snösmältningen. Under hösten förekommer höga flöden i samband med regn. Tillsammans står de nordliga vattendragen i området för 80 % av tillrinningen till Vänern varav enbart Klarälven för 35 %. Endast cirka 9 % av tillrinningen till Vänern kommer från den södra delen (Statens naturvårdsverk, 1978).

Vänern är reglerad sedan 1937. Detta har fått mycket stor betydelse för såväl vattenstånd som vattenflödet i Göta älv. Hur regleringen påverkade vattenföringen visas i figur 4.2.2. Det oregelbundna mönstret efter 1937 beror på att vattnet används för kraftproduktion.



Figur 4.2.2. Vattenföring i m³/s vid Vänerns utlopp (Vargöns kraftverk) under perioden 1846-2005. Observera regleringens stora betydelse för flödets variationer och det extrema toppvärdet i januari 2001.

Vänern förbinds med Kattegatt via Göta älv som går från Vargön via Trollhättan, Lilla Edet och Kungälv och mynnar ut i havet vid Göteborg. Avrinningsområdets storlek vid mynningen i havet är 51 120 km² och medelvattenföringen ca 550 m³/s, vilket gör Göta älv till Sveriges största vattendrag.

Göta älv har en viktig funktion för sjöfarten samtidigt som det är en vattentäkt för Göteborg. Dess skredkänslighet utgör en begränsande faktor för vattenföringens storlek och högsta tappning är enligt vattendom satt till drygt 1000 m³/s.

Tabell 4.2.1. Grundläggande data om Vänern (källor: Sveriges Nationalatlas 2004; Bergström, 1994; Schröder, 2003; Svenska Kraftverksföreningen och Vattenfall, 1987; Norell, 2000). Observera att dessa uppgifter kan variera något beroende på från vilken källa de hämtas.

Avrinningsområdet för Vänern (inkl. sjön)	46 880 km ²
Avrinningsområdet för Göta älv	51 120 km ²
Vänerns areal	5 650 km ²
Vänerns volym	153 km ³
Vänerns största djup	106 m
Vänerns regleringsamplitud	1,7 m
Regleringsmagasinets volym	9,38 km ³
Göta älvs medelvattenföring	550 m ³ /s
Högsta kända tappning från Vänern (januari 2001)	1190 m ³ /s
Högsta vattenstånd under reglerad tid (januari 2001)	45,67 m

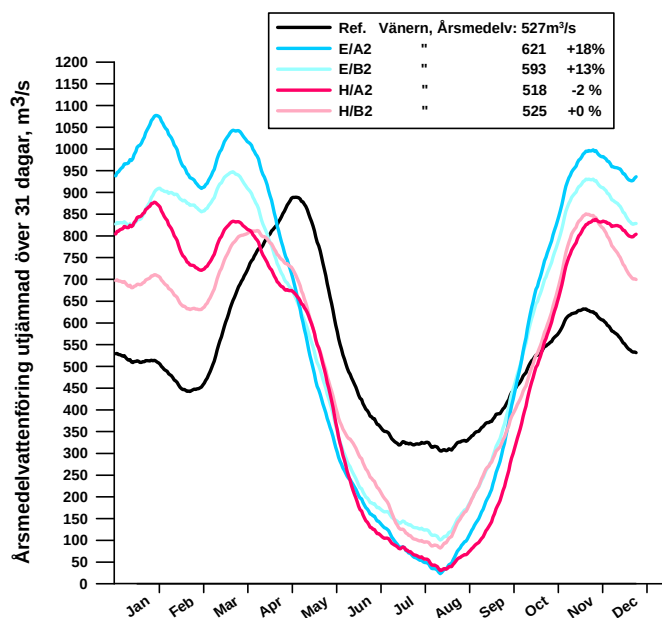
Fyra scenarier för Vänern för perioden 2071-2100

Effekterna av ett förändrat klimat på flödena i Göta älv och nivåerna i Vänern beräknades med utgångspunkt från perioden 1964 – 1990 och fyra klimatscenarier för perioden 2071-2100. Dessa är baserade på två globala klimatmodeller, den engelska HadAM3H –modellen och den tyska ECHAM4/OPYC3–modellen med vardera antaganden om två framtida utsläpp, A2 och B2. Tolkningen till svenska förhållanden har gjorts med den regionala RCAO-modellen och HBV-modellen.

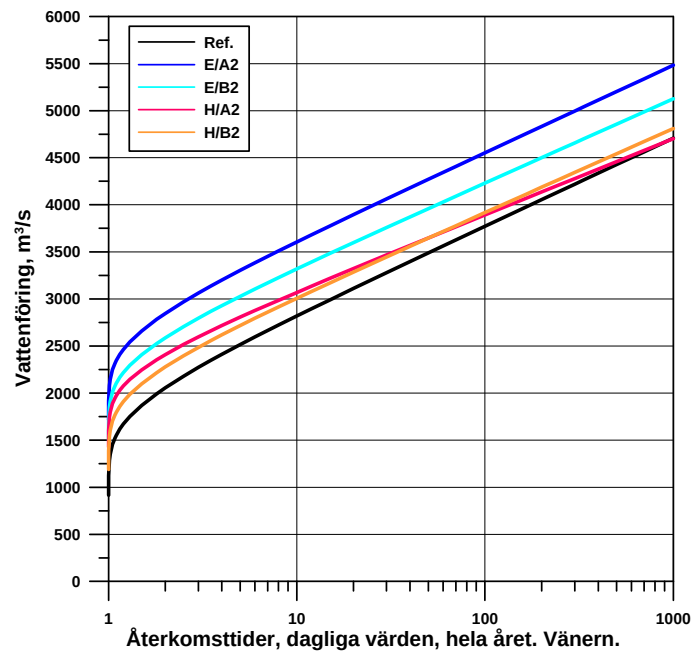
Den sammanlagda tillrinningen till sjön visas i figur 4.2.3. Hänsyn till regleringen och sjöns påverkan på utflödet har alltså inte tagits i dessa beräkningar. Alla fyra scenarier pekar mot en kraftig höjning av tillrinningen under vinterhalvåret. Höjning är i en del fall så stor som 1,5 till 2 gånger 1961-1990 års medelflöden. Sommartid ger alla scenarierna sänkta tillrinningar varför den totala årstillrinningen inte ökar så kraftigt som vinterflödena indikerar. I själva verket pekar RCAO-H scenarierna mot oförändrad årsmedelvattenföring medan RCAO-E scenarierna ger en ökning på upp emot tjugo procent.

I figurerna 4.2.4 - 4.2.9 visas resultatet av frekvensanalyser av tillrinningen enligt de fyra scenarierna. Eftersom Vänern är en stor sjö som reagerar långsamt så har denna frekvensanalys genomförts på såväl dagliga som på 90 dagars löpande medelvärden. Återkomsttiderna enligt 90 dagar blir på detta sätt naturligtvis lägre eftersom enstaka dagar med riktigt hög vattenföring inte slår igenom. Man kan dock konstatera att skillnaderna i ökningen mellan referens och scenario endast blir obetydligt mindre i 90-dagarsfallet.

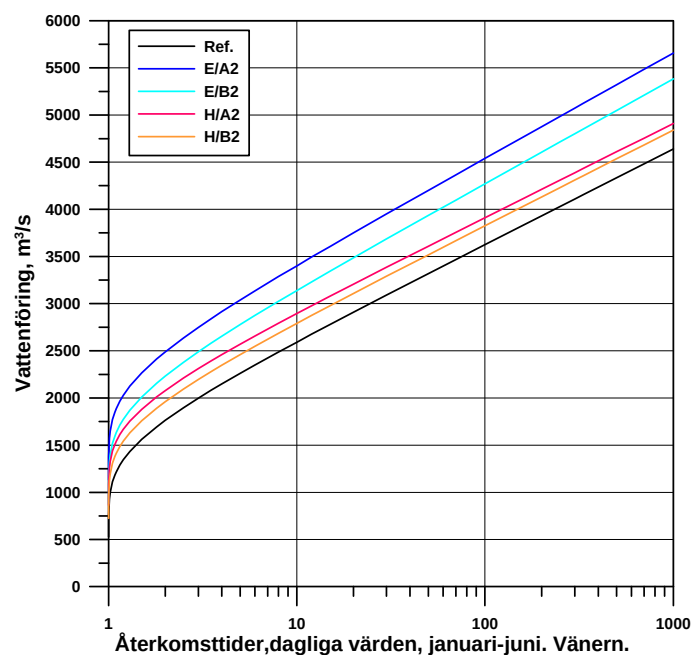
Den samlade bilden av frekvensanalysen av tillrinningen till Vänern är att de maximala flödena ökar betydligt om klimatet utvecklas i enlighet med scenarierna oavsett vilken tidsperiod som analyseras. Detta är en allvarlig indikation om att framtiden kan komma att innebära att den redan svåra översvämningssituationen förvärras.



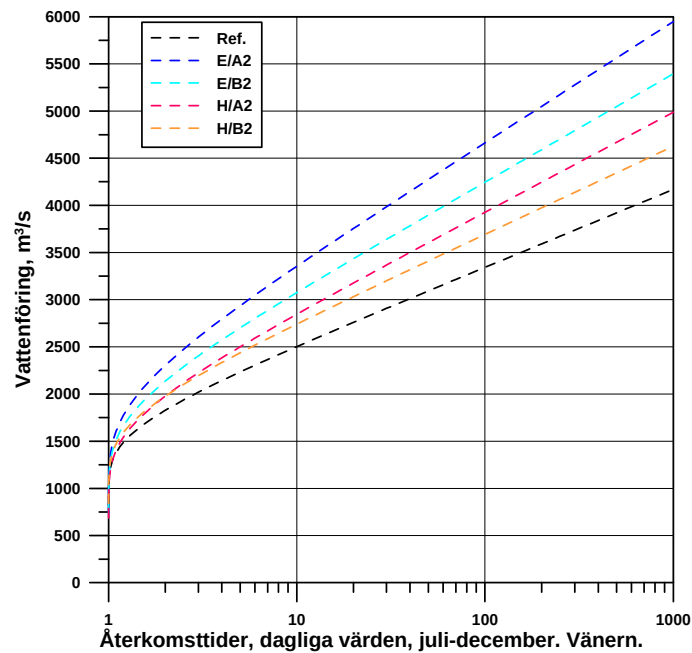
Figur 4.2.3. Genomsnittlig förändring av tillrinningen till Vänern enligt fyra klimatscenarier. Den svarta kurvan avser medelförhållanden under perioden 1961-1990 och de färgade representerar olika scenarier.



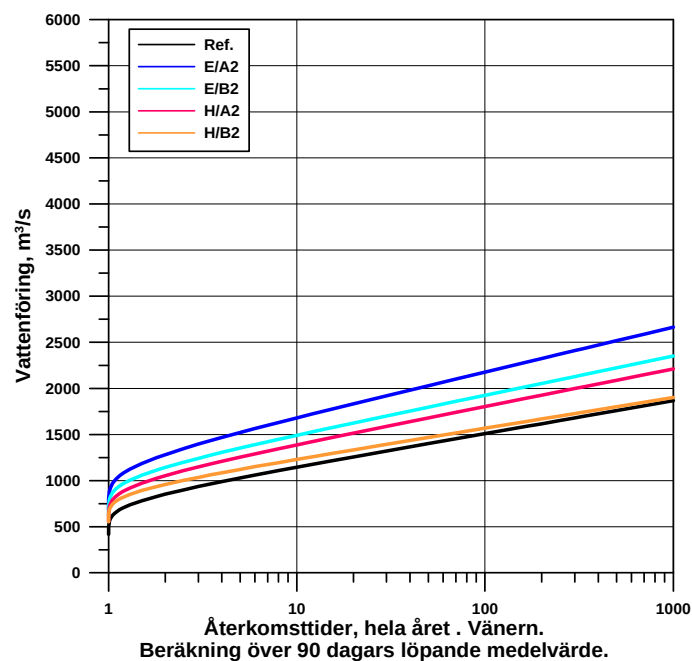
Figur 4.2.4. Återkomsttider för maximala inflöden till Vänern under **hela året** beräknade på dagliga värden under 30 år. Den svarta kurvan avser förhållanden under perioden 1961-1990 och de färgade representerar olika scenarier.



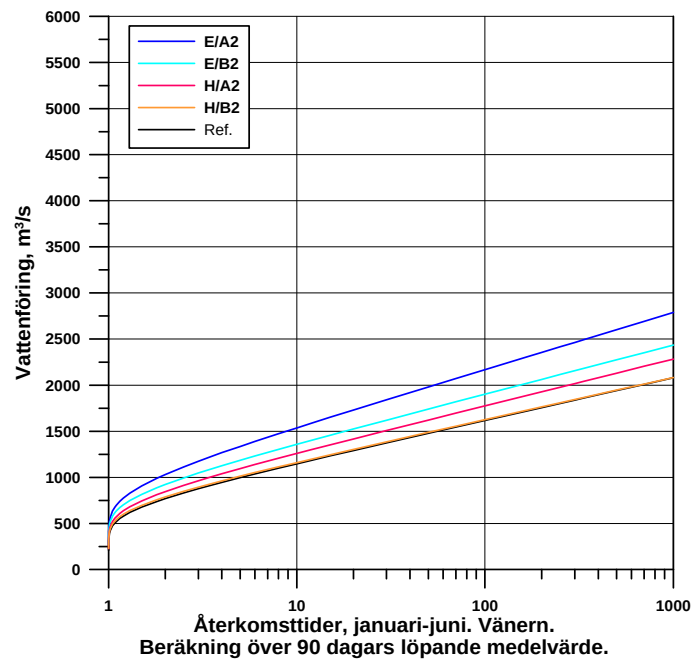
Figur 4.2.5. Återkomsttider för maximala inflöden till Vänern under **januari-juni** beräknade på dagliga värden under 30 år. Den svarta kurvan avser förhållanden under perioden 1961-1990 och de färgade representerar olika scenarier.



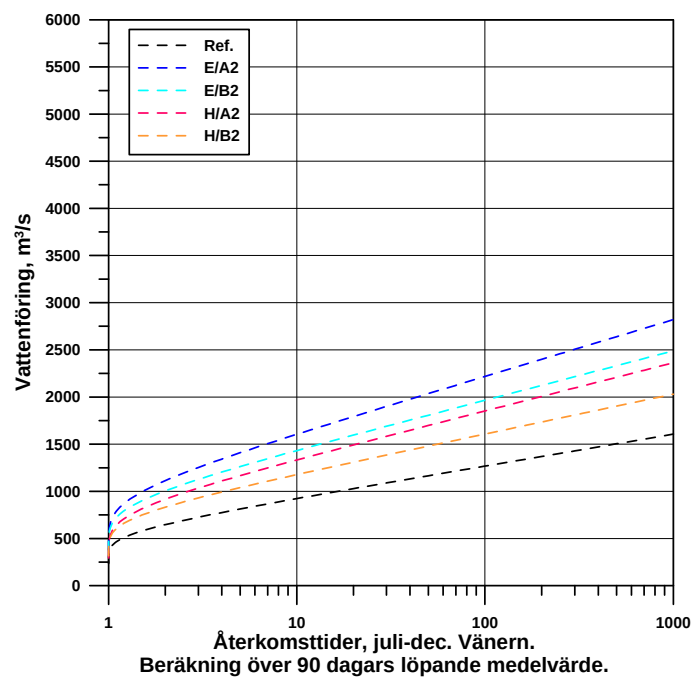
Figur 4.2.6. Återkomsttider för maximala inflöden till Vänern under **juli-december** beräknade på dagliga värden under 30 år. Den svarta kurvan avser förhållanden under perioden 1961-1990 och de färgade representerar olika scenarier.



Figur 4.2.7. Återkomsttider för maximala inflöden till Vänern under **hela året** beräknade på löpande dagliga värden över 90 dagar under 30 år. Den svarta kurvan avser förhållanden under perioden 1961-1990 och de färgade representerar olika scenarier.

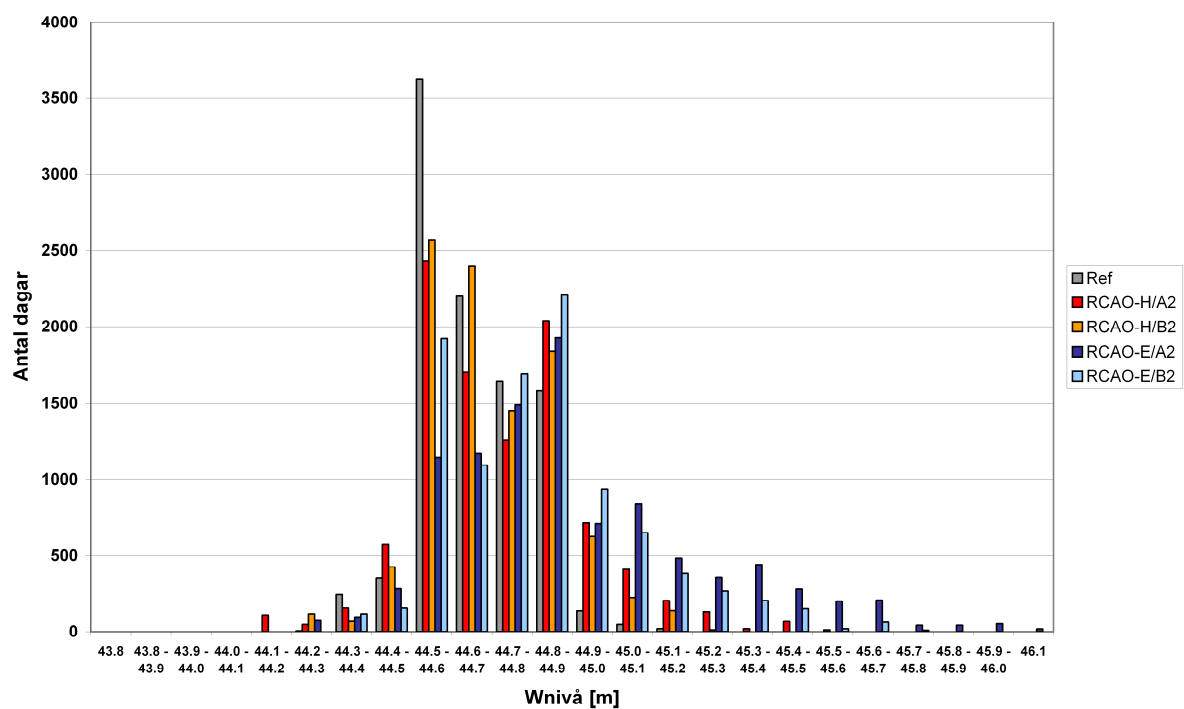


Figur 4.2.8. Återkomsttider för maximala inflöden till Vänern under **januari-juni** beräknade på löpande dagliga värden över 90 dagar under 30 år. Den svarta kurvan avser förhållanden under perioden 1961-1990 och de färgade representerar olika scenarier.

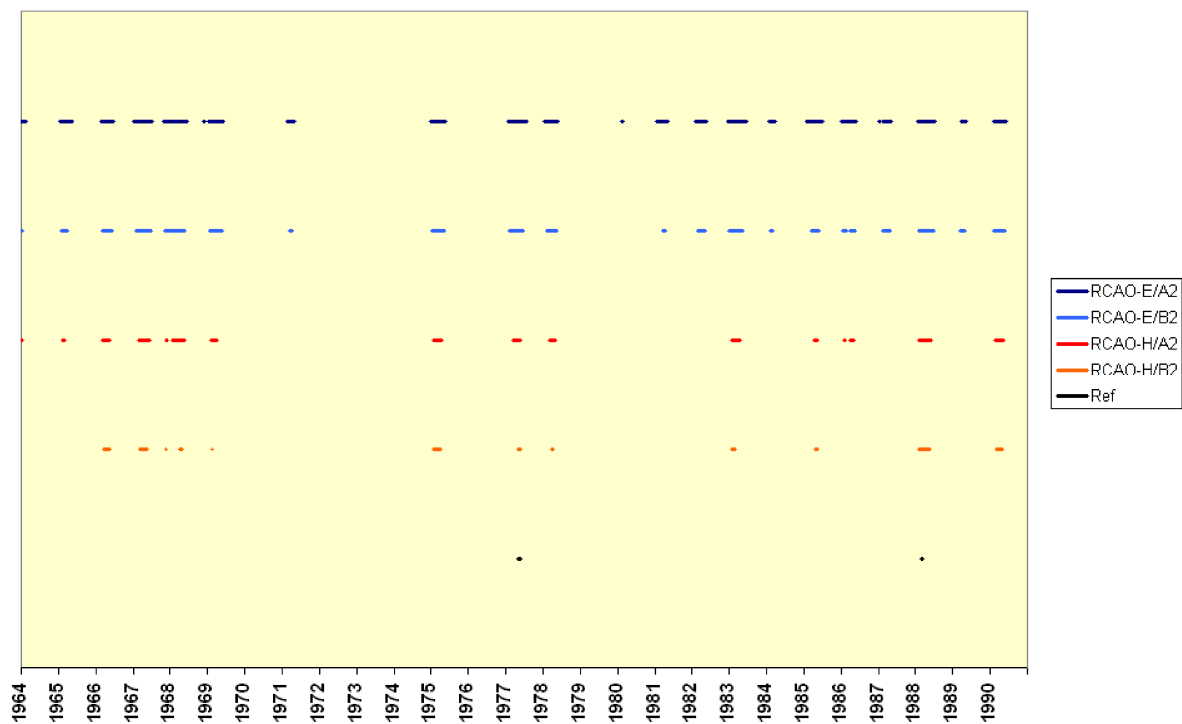


Figur 4.2.9. Återkomsttider för maximala inflöden till Vänern under **juli-december** beräknade på löpande dagliga värden över 90 dagar under 30 år. Den svarta kurvan avser förhållanden under perioden 1961-1990 och de färgade representerar olika scenarier.

'Mitt Lappland' av Sven Hörnell.



Figur 4.2.10. Statistisk fördelningen av vattenständen i Vänerns i dagens klimat och om klimatet ändras i enlighet med de fyra scenarierna.



Figur 4.2.11. Förändringen av antalet dagar då maxtappningen $1030 \text{ m}^3/\text{s}$ uppnås i Göta älv, enligt beräkningar med dagens förhållanden och fyra klimatscenarier.

Vänern är en av de sjöar som för närvarande specialstuderas av den statliga Klimat- och sårbarhetsutredningen. I samband med detta har mer detaljerade studier gjorts av SMHI där även vattenståndsutvecklingen och tappningen i Göta älv beräknats. Figur 4.2.10 visas hur den statistiska fördelningen av vattenstånden i Vänerns förändras om klimatet ändras i enlighet med de fyra scenarierna. Genomgående sker en ökning av antalet dagar vid såväl de högsta som de lägsta nivåerna medan antalet dagar i intervallet 44,50-44,60 minskar kraftigt. Detta innebär en ökad variabilitet beroende på blötare vintrar och torrare somrar med högre avdunstning. På grund av svårigheterna att simulera regleringens effekt fullständigt så avviker nivåerna i absoluta tal något från de observerade. Ändringen på grund av ett ändrat klimat är dock rimliga.

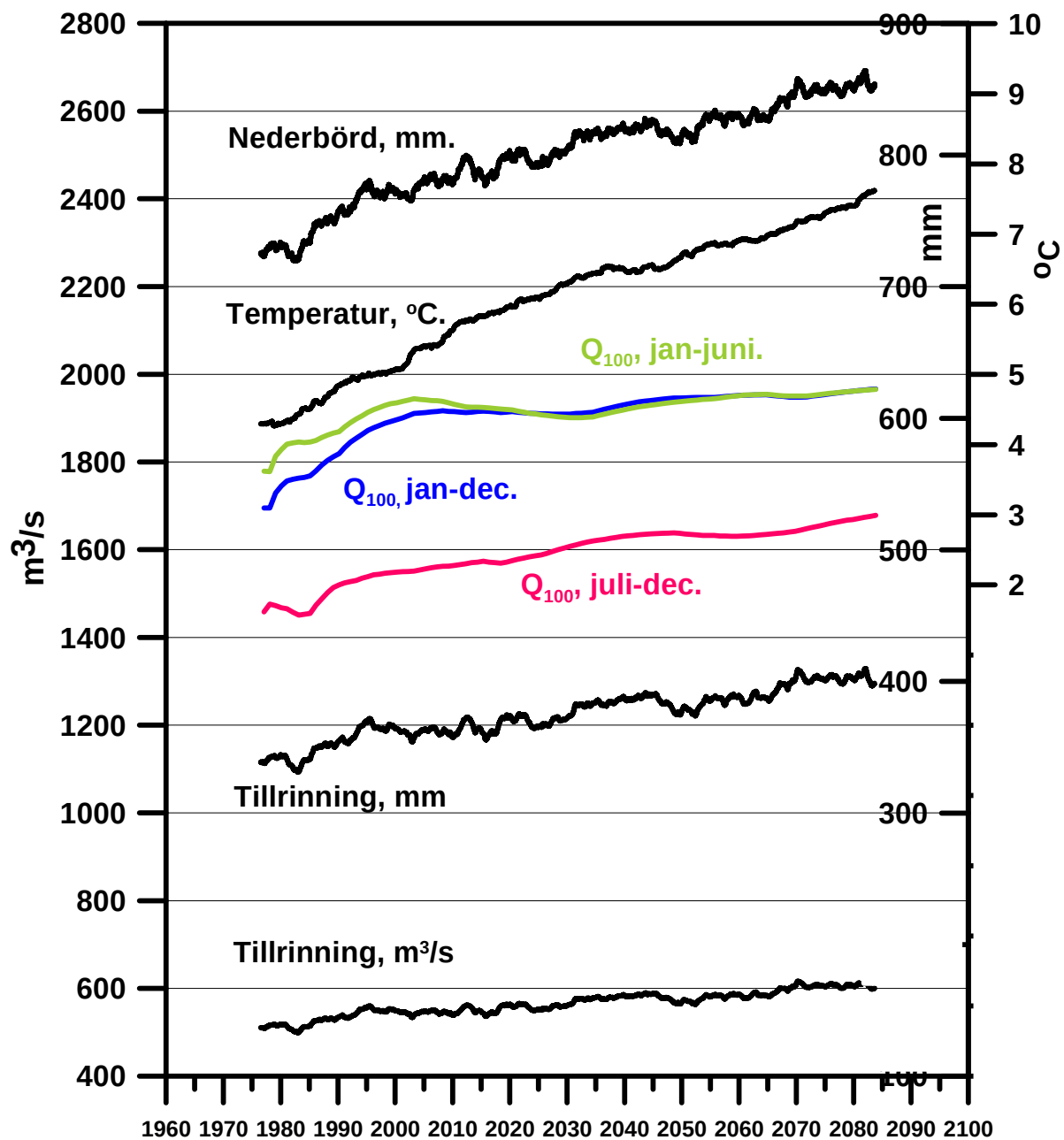
I figur 4.2.11 visas hur det framtida klimatet enligt beräkningarna kan komma att påverka antalet dagar som man måste tappa med nu tillåten full kapacitet, d.v.s. 1030 m³/s i Göta älv. För scenarier baserade på RCAO-H är antalet dagar 20-40 gånger fler än idag och för scenarier baserade på RCAO-E är antalet dagar 70-100 gånger fler. Under dessa klimatförhållanden kommer Vänerns vattenstånd att stiga 10-40 cm och 60-90 cm för respektive modell jämfört med referensperioden. Det är uppenbart att ett mildare och mer nederbördsrikt klimat kommer att leda till stora förändringar för flödena i Göta älv genom att den maximala tappningsförmågan kommer att behöva tas i anspråk i betydligt högre grad än idag. Det blir även betydande effekter på den högsta vattennivån i Vänern.

Kontinuerligt scenario för Vänern för perioden 1961-2100

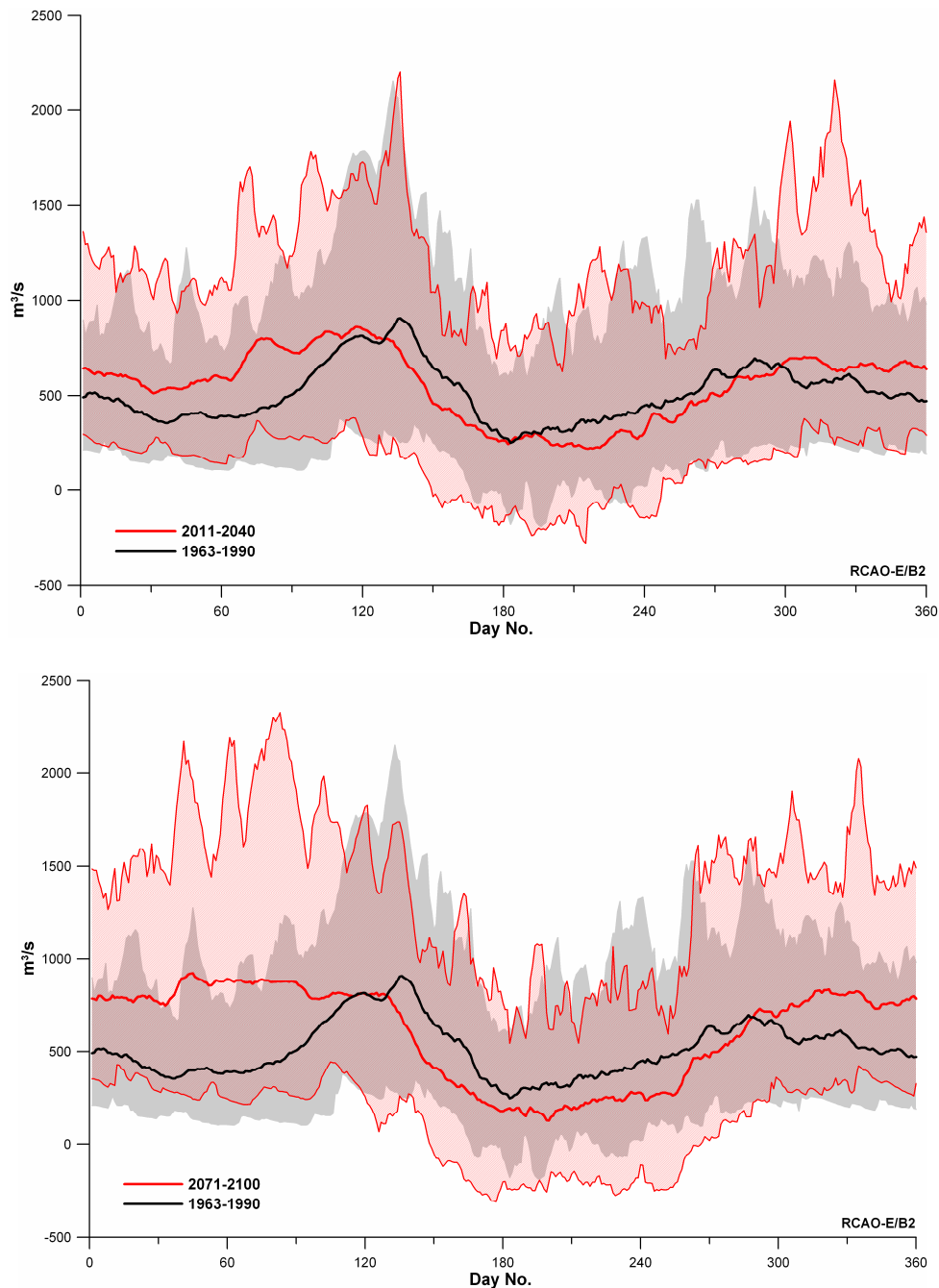
För att mer i detalj studera tidsförloppet av förändringen av tillrinningen till Vänern under det kommande seklet har en kontinuerlig klimatsimulering använts. Beräkningarna bygger på den tyska globala ECHAM4/OPYC3-modellen med utsläppsscenario B2, Rossby Centres senaste version av den regionala klimatmodellen, RCA3, samt den hydrologiska HBV-modellen.

Statistiska beräkningar för det kontinuerliga scenariot redovisas i figur 4.2.12. Vänerns vår- och årskurvor för 100-årsåterkomsttid visar ett intressant förlopp. Under den första delen, från 1961 och fram till ungefär i dag sker en kraftig uppgång varefter en utplaning sker. Detta antyder att vi redan i dag närmar oss de nivåer där 100årsflöden och -vattenstånd kommer att ligga kvar de närmaste hundra åren. Att flödena inte ökar lika mycket som den ökande nederbörden beror på att avdunstningen också ökar med en stigande lufttemperatur. En nederbördsökning på ca 75 mm (från ca 775 mm till 850 mm) mellan åren 2000 till 2085 ger en ökad avrinning på ca 50 mm (från 350 mm till 400 mm) för samma tidsperiod. Beräkningarna är gjorda på löpande 30-dagars medelvärden. Årsmedeltillrinningen i m³/s ökar enligt scenariot från 500 m³/s till ca 600 m³/s.

I figur 4.2.13 presenteras en sammanfattning av tillrinningen till Vänern enligt det kontinuerliga scenariot för två tidsperioder, 2011-2040 respektive 2071-2100. Som framgår av figuren, sker efterhand en förskjutning av flödena mot vinter och höst samtidigt som den totala volymen ökar och sommartillrinningen minskar. Observera att året antagits ha 360 dagar i beräkningarna i figur 4.2.13, vilket är det antal dagar som året har i de kontinuerliga klimatscenerierna.

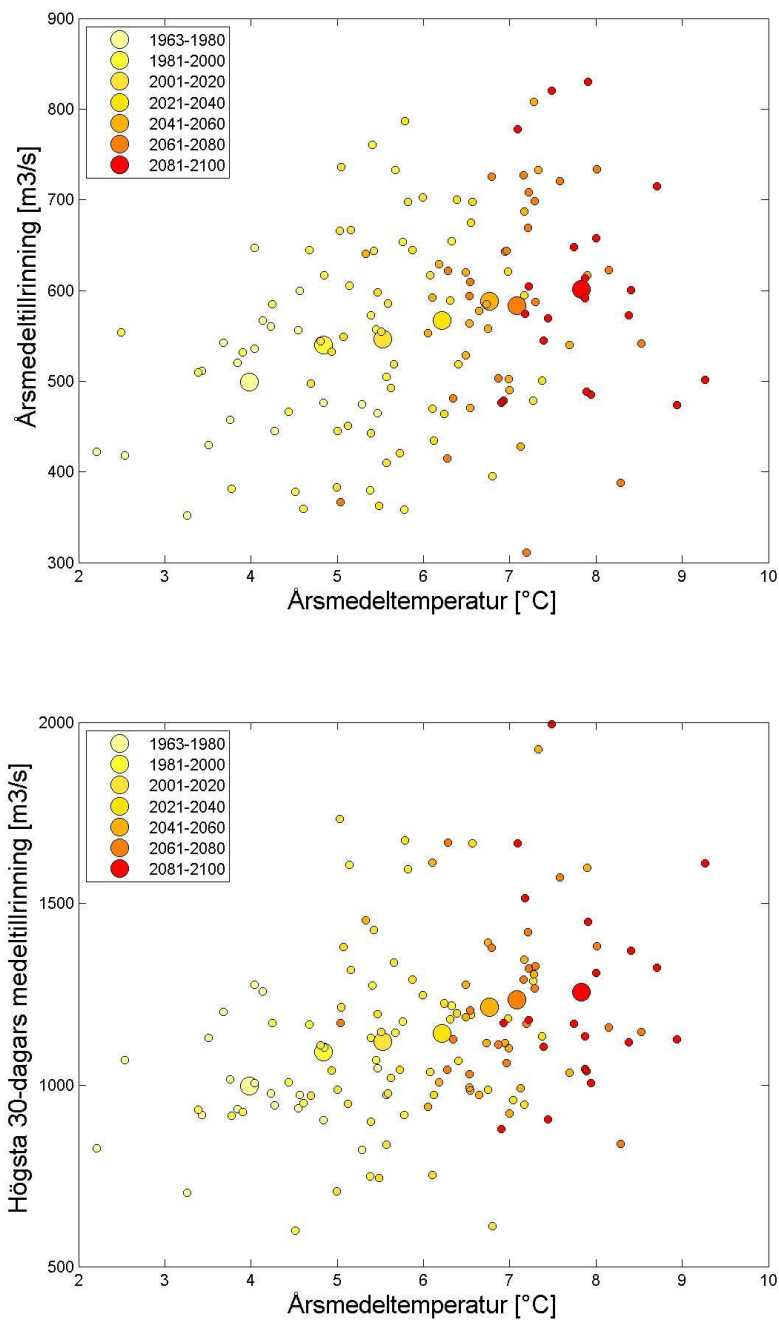


Figur 4.2.12. Statistisk analys av ett kontinuerligt (transient) scenario för tillrinningen till Vänern. 100-årsflöden för hela året, *blå linje*, januari-juni, *grön linje* och juli-december, *röd linje* jämförs med nederbörd, temperatur och avrinning. Alla beräkningar är gjorda på löpande 30-dagars medelvärden och varje punkt på linjen representerar en period av 30 år.

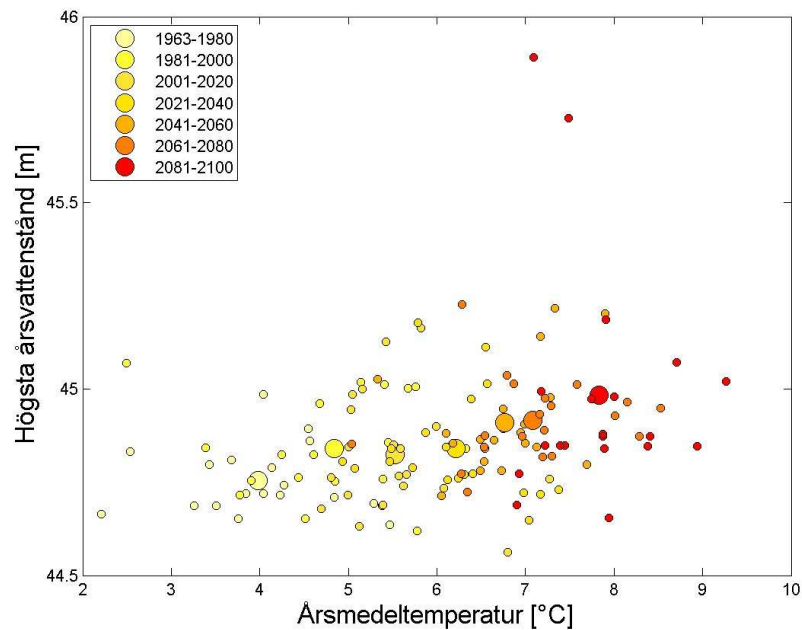


Figur 4.2.13. Beräknad förändring i årsdynamiken i tillrinningen till Vänern enligt det kontinuerliga klimatscenariet. Sammanfattning för de två tidsperioderna 2011-2040 respektive 2071-2100 i jämförelse med 1963-1990 (gråskuggat område). De yttre begränsningarna avser det högsta och lägsta värdet för respektive dag på året.

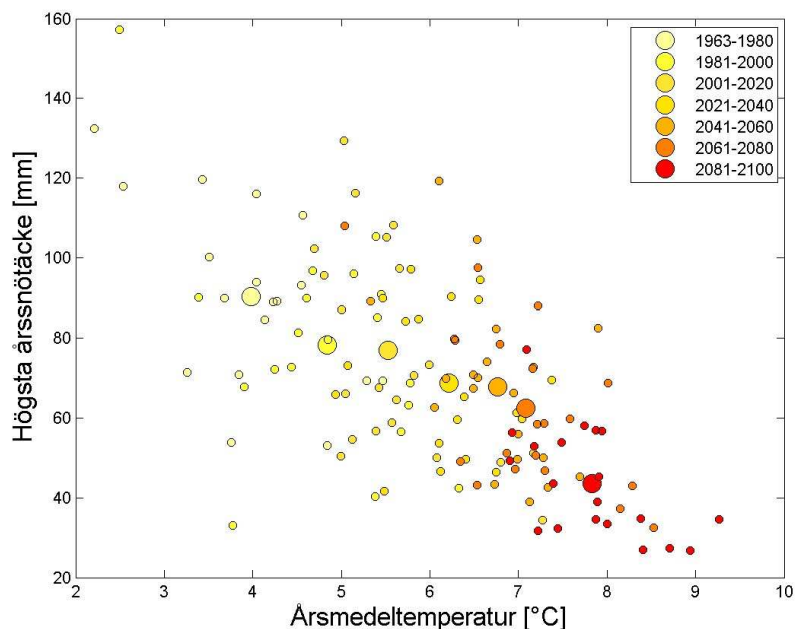
Figureorna 4.2.14 - 4.2.16 visar den kontinuerliga utvecklingen av årsmedeltillrinningen och den maximala tillrinningen till Vänern under 30 dagar, de högsta vattenstånderna samt det största snömagasinet i avrinningsområdet under det kontinuerliga scenariets 137 år, d.v.s. perioden 1963-2100. Vid beräkning av vattenstånd har en förenklad beskrivning av dagens reglering använts. Små ringar representerar årsmedelvärden av respektive variabel och stora ringar medelvärden över 20-årsperioder. Olika 20-årsperioder har olika färgkodning.



Figur 4.2.14. Vänerns högsta årsmedeltillrinning och högsta 30-dagars medeltillrinning vs årsmedeltemperaturen i tjugوårsintervaller för perioden 1963-2100. De små ringarna representerar varje enskilt år och de stora ett medelvärde för respektive tjugوårsperiod. Varje 20-årsperiod har en egen färgkod.



Figur 4.2.15. Vänerns högsta årsvattenstånd, vs årsmedeltemperaturen i tjugوårsintervaller för perioden 1963-2100. De små ringarna representerar varje enskilt år och de stora ett medelvärde för respektive tjugوårsperiod. Varje 20-årsperiod har en egen färgkod.



Figur 4.2.16. Årets största snömagasin i Vänerns avrinningsområde vs årsmedeltemperaturen i tjugوårsintervaller för perioden 1963-2100. De små ringarna representerar varje enskilt år och de stora ett medelvärde för respektive tjugوårsperiod. Varje 20-årsperiod har en egen färgkod.

Liksom konstaterades i figur 4.2.12 så sker under perioden en ökning av medeltillrinningen med ca 100 m³/s, från ca 500 m³/s till ca 600 m³/s, räknat över tjugoårsperioder. De högsta tjugoårstillrinningarna under en period på 30 dagar ökar med ca 250 m³/s, från ca 1000 m³/s till ca 1250 m³/s. En generell iakttagelse är att spridningen tycks bli något större med tiden. Ökningen av den högsta 30-dagarsstillrinningen till Vänern innebär en ökande översvämningsrisk, något som också tidigare konstaterats av frekvensanalyserna.

Utvecklingen i tillrinningsdiagrammen återspeglas även i vattenstånden. Ökningen i högsta årsvattenstånden är 25-30 cm. På grund av den förenklade metod som använts vid beräkningarna av regleringens effekter på vattenstånden så bör dessa värden dock tolkas med försiktighet. De absoluta talen bör inte tas alltför bokstavligt, men trenden är mer säker.

Slutligen kan konstateras att snötillgången i Vänerns avrinningsområde uppvisar en nästan linjär nedgång med ökande temperatur. I dag ligger det största snömagasinet på ca 80 mm vatteninnehåll (i smält form) och om ca 85 år på ca 40 mm enligt scenariot. En mm vatteninnehåll motsvarar ungefär ett snödjup på en cm vid nyfallen snö.

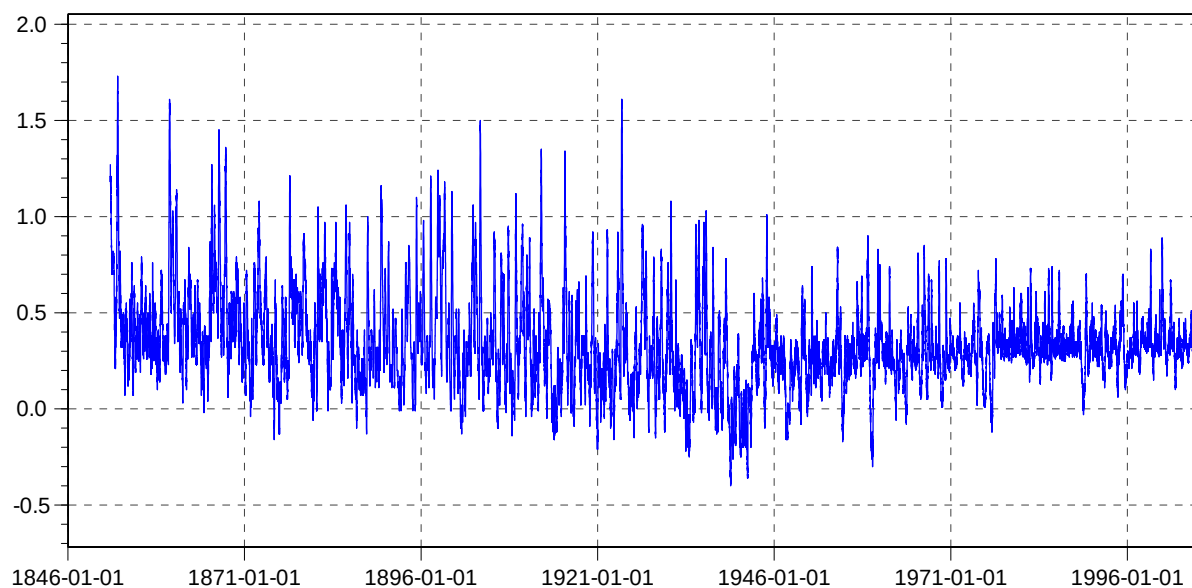
4.2.2. Mälaren och Hjälmaren

Mälaren och Hjälmaren är till ytan Sveriges tredje och fjärde största sjöar med en sjöarea på 1120 km² respektive 480 km². Mälarens vatten används till dricksvatten för ca 1,5 miljoner människor samtidigt som sjön också är transportled för sjöfarten, används till industriella verksamheter, avlopp och fiske (Granström, 2003). Avrinningsområdet är 12 650 km² och sträcker sig från Bergslagen i väster till centrala Stockholm. Liksom i Vänerområdet sker i Mälaronrådet en landhöjning som är ca 4 mm/år (SEAREG, 2004). Via Mälaren avvattnas större delarna av Uppland, Västmanland, Närke samt södra delarna av Dalarna och de norra delarna av Södermanland (Ehlert, 1970).

Hjälmarens avrinningsområde är 4 045 km². Avrinningen sker via Eskilstunaån, som är det näst största enskilda biflödet till Mälaren efter Arbågaån. Övriga viktigare vattendrag som rinner till Mälaren är Fyrisån och bergslagsåarna Arbågaån, Hedströmmen och Kolbäcksån. Det finns två åar som benämns Svartån, den ena mynnar i Hjälmaren i Örebro (Närkes Svartå), den andra i Mälaren i Västerås.

Normalt inträffar den högsta tillrinningen till Mälaren under snösmältningen under april till maj med ett mindre högvattenflöde under hösten. Sommaren och vintern karaktäriseras av låga vattenflöden med undantag från milda vintrar då tillrinningen kan bli betydande. Men skillnader finns inom avrinningsområdet där Bergslagen utmärker sig med ett inlandsklimat vilket ger tidigare snömagasinering och senare och längre avsmältning. Vårflödena i de västra åarna är därför kraftigare. I de östra åarna är vårflödena lindrigare och med ett maximum tidigare än i bergslagen.

För att motverka översvämnningar av jordbruksmark, men även för att gynna sjöfarten, genomfördes en reglering av Mälaren enligt en dom från 1941. Denna reglering togs i bruk 1943. Effekten av regleringen blev inte riktigt vad man tänkt sig. Avsänkningen av högvattenstånden blev ungefär de avsedda, men lågvattenstånden blev betydligt lägre än väntat. Därför har nya regleringsbestämmelser börjat tillämpas från mars 1968.



Figur 4.2.17. Vattenstånd för Mälaren (meter i höjdsystem RH00) i Mälaren vid Stockholm under perioden 1852-2005.

I figur 4.2.17 visas observerade vattennivåer i Mälaren från mitten av 1800-talet till 2005. Där syns effekterna av Mälarens reglering tydligt. Den mest uppenbara effekten är att de högsta vattenstånden minskat och att de allra lägsta flödena försvunnit samtidigt har det genom regleringen blivit vanligare med höga flöden från Mälaren till Saltsjön.

De kraftiga översvämningarna i Sverige under 2000/2001 påverkade också Mälaren, även om de inte blev lika dramatiska som i Dalsland och Värmland. I Mälaren uppmättes i december 2000 det högsta vattenståndet under reglerad tid. Betydligt högre nivåer har dock noterats innan regleringen. Ett av de värsta åren var 1924, från vilket figur 4.2.18. är hämtad. Denna bild representerar förhållanden innan regleringen, men analyser har visat att liknande nivåer inte helt kan uteslutas trots regleringen. Därför pågår en diskussion, bland annat inom Klimat- och sårbarhetsutredningen, om hur avtappningen från Mälaren skall kunna ökas.



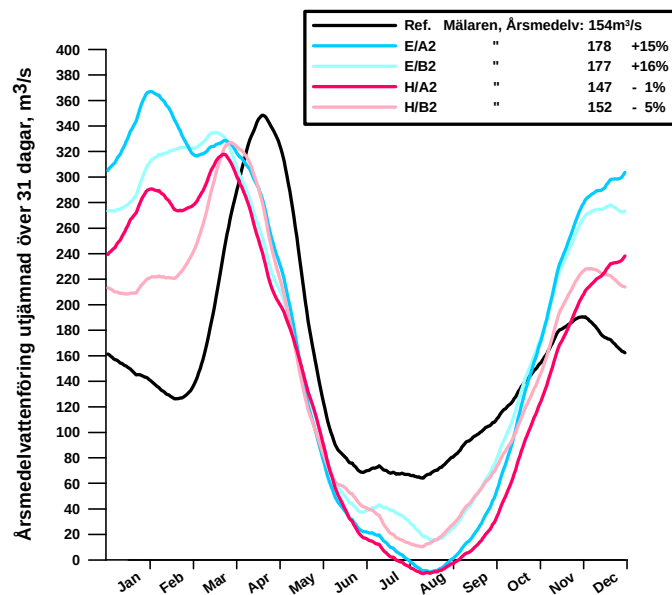
Figur 4.2.18. Mälartorget i Gamla Stan i Stockholm vid översvämningen våren 1924. Foto: S. Ernfors.

Fyra scenarier för Mälaren och Hjälmaren för perioden 2071-2100

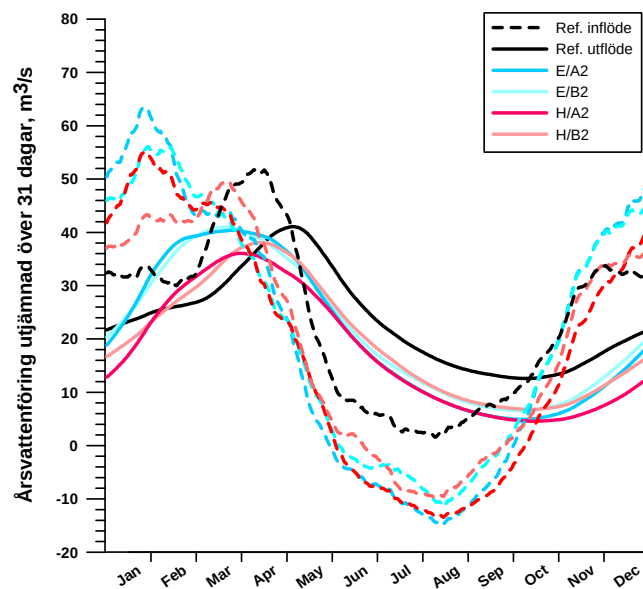
Effekterna av ett förändrat klimat på tillrinningen till Mälaren beräknades på samma sätt som för Vänern med fyra regionala klimatscenarier baserade på RCAO-E, RCAO-H, A2 och B2 samt den samt den hydrologiska HBV- modellen.

Liksom för Vänern har effekterna på tillrinningen studerats i första hand. Som framgår av figur 4.2.19 visar de fyra scenarierna en kraftig höjning av tillrinningen under vinterhalvåret, november till mars, och även här är höjning i en del fall så stor som 1,5 till 2 gånger de värden som i genomsnitt gäller för perioden 1961-1990. Sommartid ger alla scenarierna sänkta tillrinningar. Enligt RCAO-H scenarierna minskar den totala tillrinningen över året några procent medan den för RCAO-E scenarierna ökar med ca 15 %.

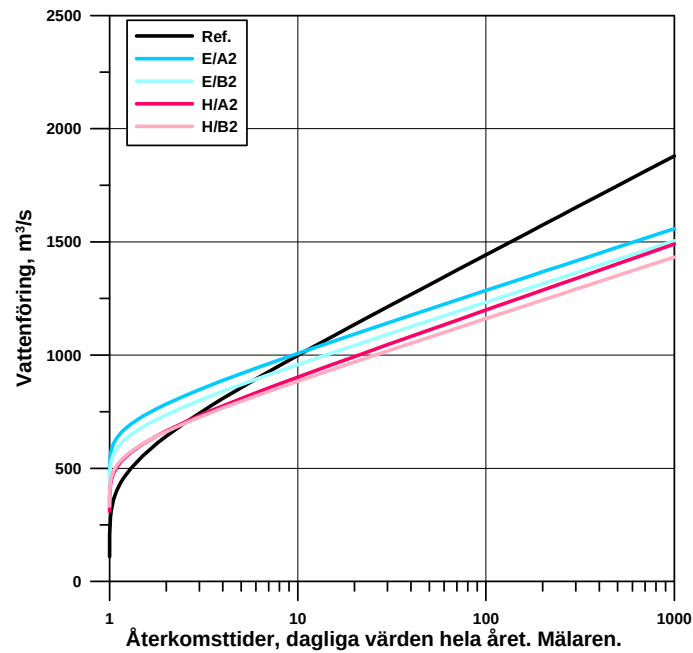
Motsvarande beräkningar för Hjälmaren visas i figur 4.2.20. För att illustrera Hjälmarens dämpande effekt visas här både in- och utflöden ur Hjälmaren. Vinterinflödena till Hjälmaren ligger från början högt varför den relativa ökningen inte blir så stor även om tre scenarier kommer att ligga över referensen.



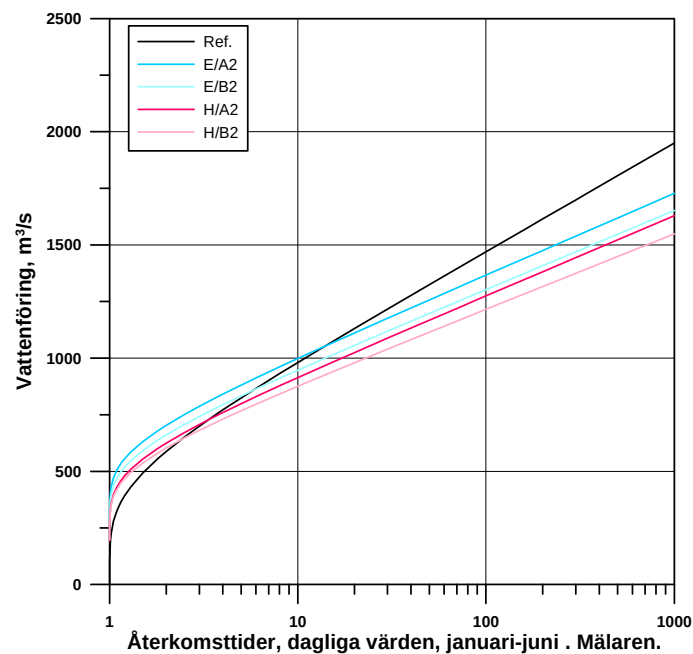
Figur 4.2.19. Genomsnittlig förändring av tillrinningen till Mälaren enligt fyra klimatscenarier.



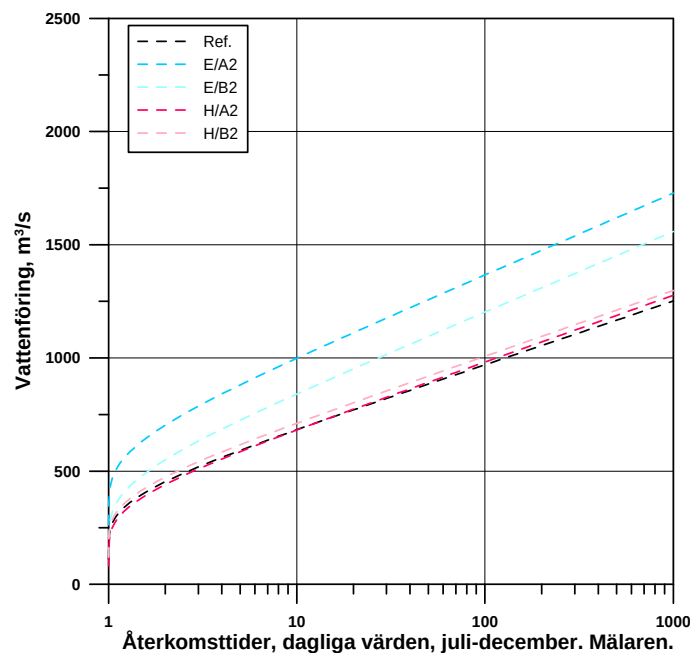
Figur 4.2.21. Genomsnittlig förändring av flödet från Hjälmaren till Mälaren enligt fyra klimatscenarier. Streckade linjer visar Hjälmarens tillflöde och heldragna dess utflöde till Mälaren



Figur 4.2.21. Återkomsttider för maximala inflöden till Mälaren under **hela året** beräknade på dagliga värden under 30 år. Den svarta kurvan avser förhållanden under perioden 1961-1990 och de färgade representerar olika scenarier.

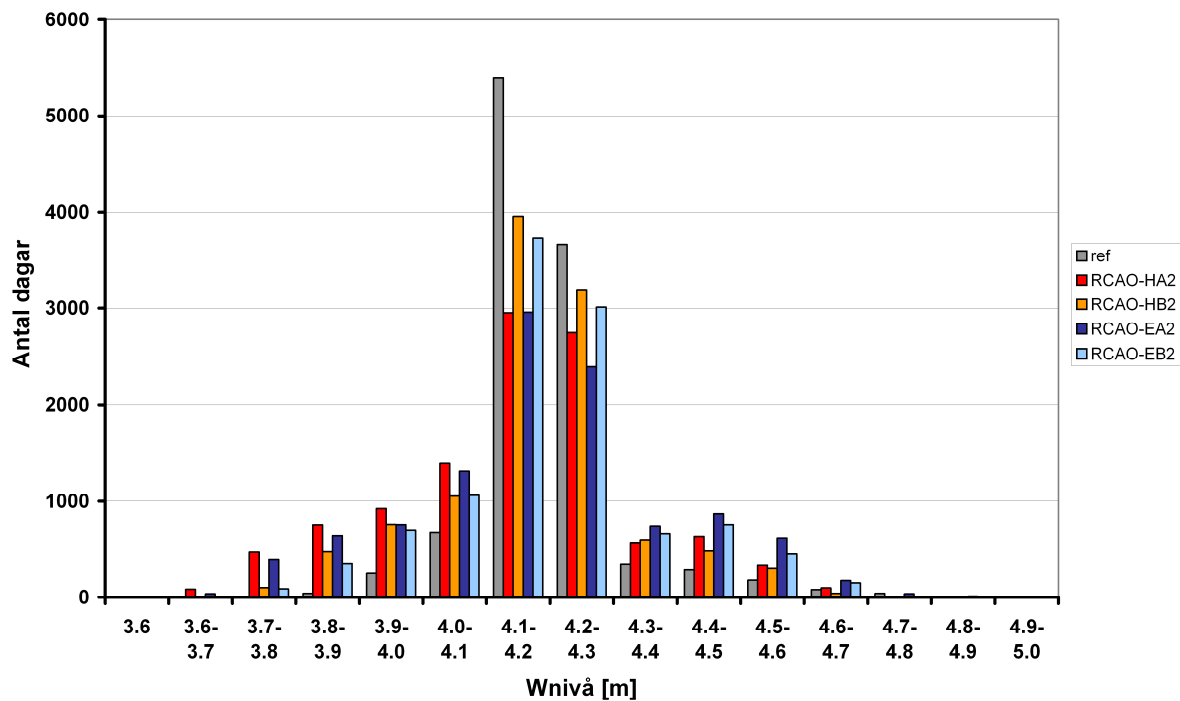


Figur 4.2.22. Återkomsttider för maximala inflöden till Mälaren under **januari-juni** beräknade på dagliga värden under 30 år. Den svarta kurvan avser förhållanden under perioden 1961-1990 och de färgade representerar olika scenarier.

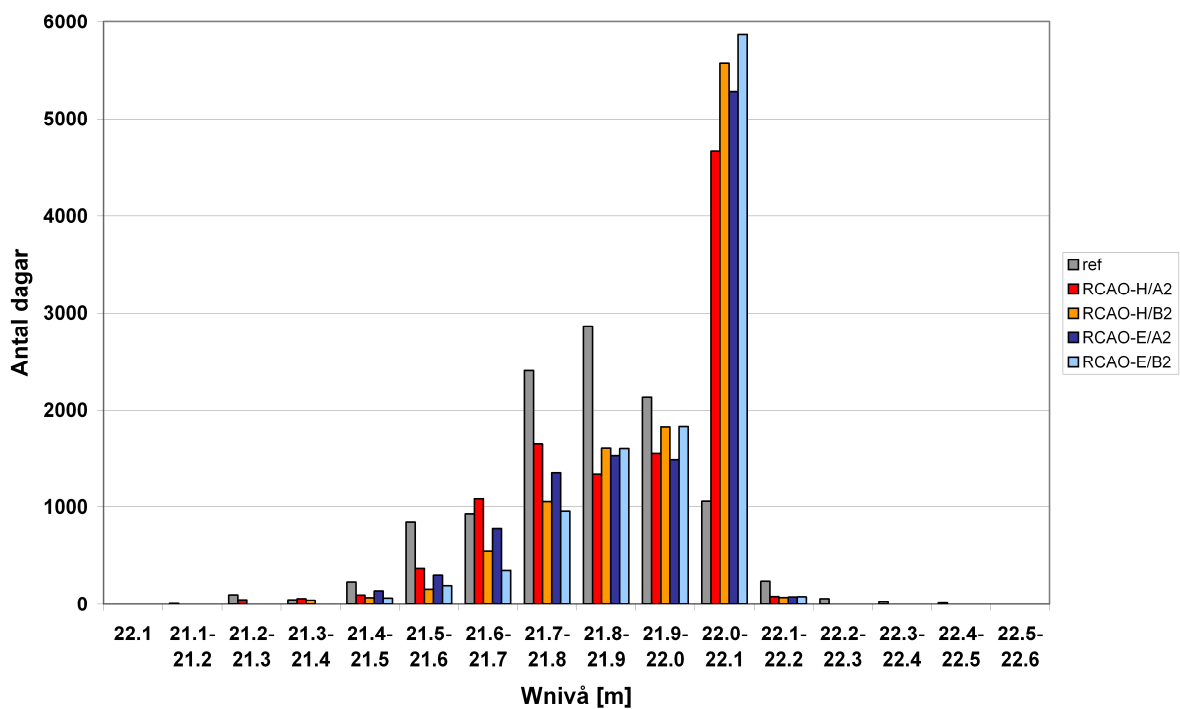


Figur 4.2.23. Återkomsttider för maximala inflöden till Mälaren under **juli-december** beräknade på dagliga värden under 30 år. Den svarta kurvan avser förhållanden under perioden 1961-1990 och de färgade representerar olika scenarier.

I figurerna 4.2.21-4.2.23 visas resultatet av frekvensanalyser av tillrinningen till Mälaren enligt de fyra scenarierna för hela året respektive för två halvår. Till skillnad mot för Väneren så visar beräkningen en minskning av de högsta tillrinningarna sett över hela året. Detsamma gäller för våren. Detta beror på att ett varmare klimat medför ett minskat snömagasin. Snösmältningen ger i dag de högsta tillrinningarna till Mälaren. De högsta 100-årsfrekvenserna under perioden juli-december ökar kraftigt eftersom den nederbörd som brukar komma som snö under hösten nu faller som regn. 100-årsvärdena för RCAO-E/A2 når nästan upp i nivå med dagens 100-årsvärden för övriga delen av året. Dessutom blir det mer nederbörd under hösten enligt klimatscenierna.



Figur 4.2.24. Beräknat antalet dagar med olika vattennivåer i Mälaren enligt dagens förhållanden och fyra klimatscenarier.



Figur 4.2.25. Beräknat antalet dagar med olika vattennivåer i Hjälmaren enligt dagens förhållanden och fyra klimatscenarier.

Liksom Vänern specialstuderas Mälaren och Hjälmaren av den statliga Klimat- och sårbarhetsutredningen. I samband med detta har mer detaljerade studier gjorts av SMHI, där även vattenståndsutvecklingen beräknats. Därvid har en förenklad metod använts för att beskriva effekterna av vattenhushållningsbestämmelserna för respektive sjö. Beräkningarna av Mälarens vattenstånd enligt de fyra klimatscenerierna sammanfattas statistiskt i figur 4.2.24 och motsvarande beräkningar för Hjälmaren visas i figur 4.2.25.

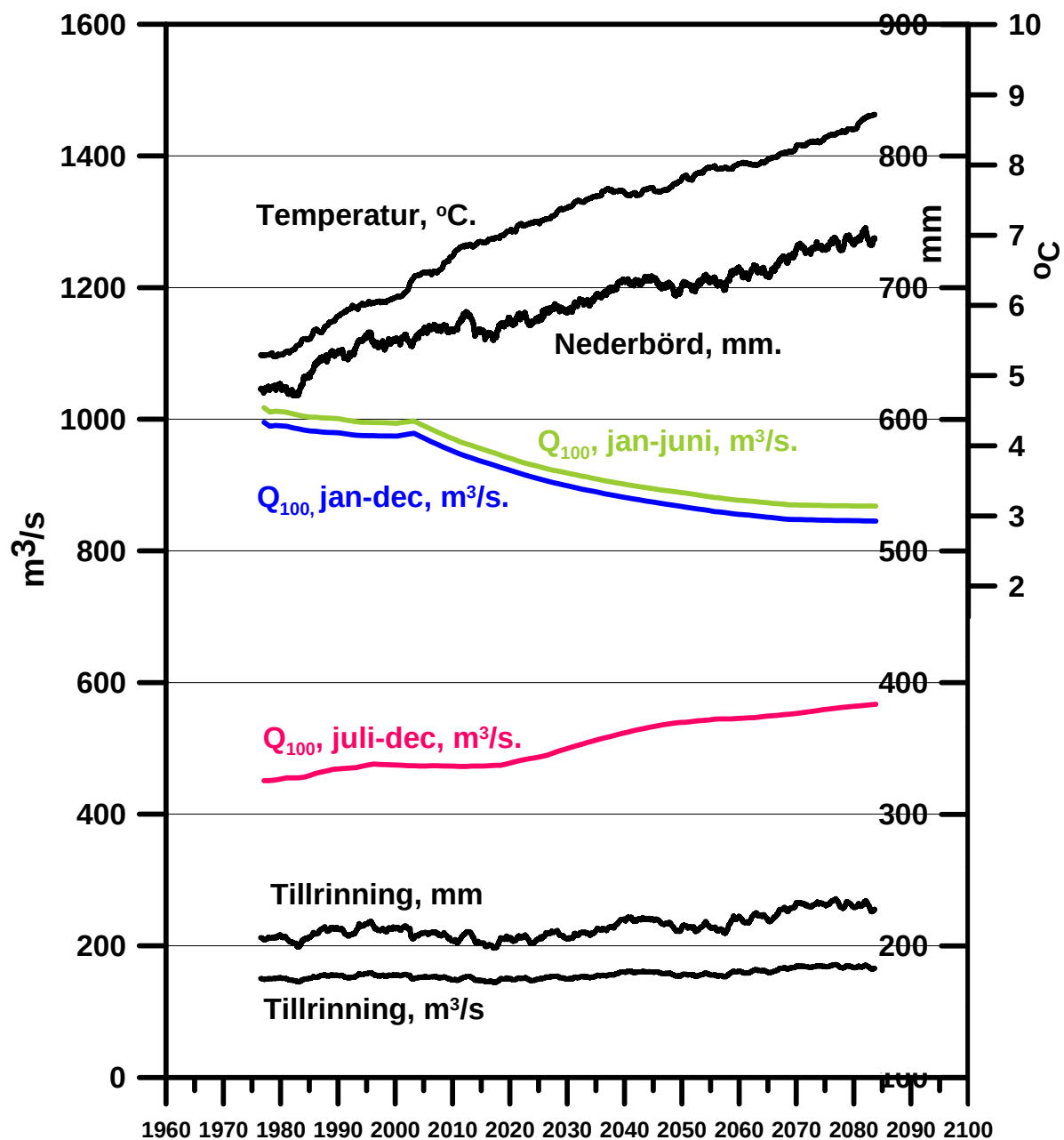
Tolkningen av figur 4.2.24 är att spridningen i Mälarens vattenstånd ökar om klimatet ändras såsom scenarierna anger. Såväl de medelhöga som de låga vattennivåerna blir vanligare enligt scenarierna medan antalet dagar vid mellannivåerna minskar. De höga nivåerna kommer företrädesvis att inträffa vintertid medan de lägsta nivåerna kan väntas under sommaren. De allra högsta nivåerna blir något lägre för tre av de fyra klimatscenerierna. Även för Hjälmarens vattenstånd blir det stora förändringar (figur 4.2.25). Den relativt höga nivån omkring 22 meter kommer att bli betydligt vanligare medan de allra mest extrema värdena inte förvärras.

Kontinuerligt scenario för Mälaren för perioden 1961-2100

På samma sätt som för Vänern har en kontinuerlig klimatsimulering från Rossby Centre använts för att studera tidsförloppet av klimatpåverkan på tillrinningen till Mälaren. Beräkningarna bygger på den tyska globala ECHAM4/OPYC3-modellen med utsläppsscenario B2, Rossby Centres senaste version av den regionala klimatmodell, RCA3, samt den hydrologiska HBV-modellen.

Statistiska beräkningar för det kontinuerliga scenariot redovisas i figur 4.2.26. Graferna för Mälaren avseende tillrinningens värden med 100 års återkomsttid visar för hela året och första halvåret, till skillnad från Vänern, ett nära nog kontinuerligt avtagande förlopp. Liksom för Vänern är samtliga linjer i figuren beräknade från löpande 30-dagars data och omfattande 30 år för varje punkt på linjerna. De högsta 100-årsflödena, som förekommer under årets första sex månader, sjunker från dagens ca 1000 m³/s till ca 850 m³/s. Detta sker trots en med tiden ökande nederbörd, vilket beror på att avdunstningen ökar och snösmältningsbidraget blir allt mindre med tiden. 100-årsflödena under andra halvan av året ökar i stället från ca 450 m³/s till 550 m³/s. En nederbördsökning på drygt 100 mm under perioden ger en tillrinningsökning som är mindre än 50 mm eftersom avdunstningen ökar.

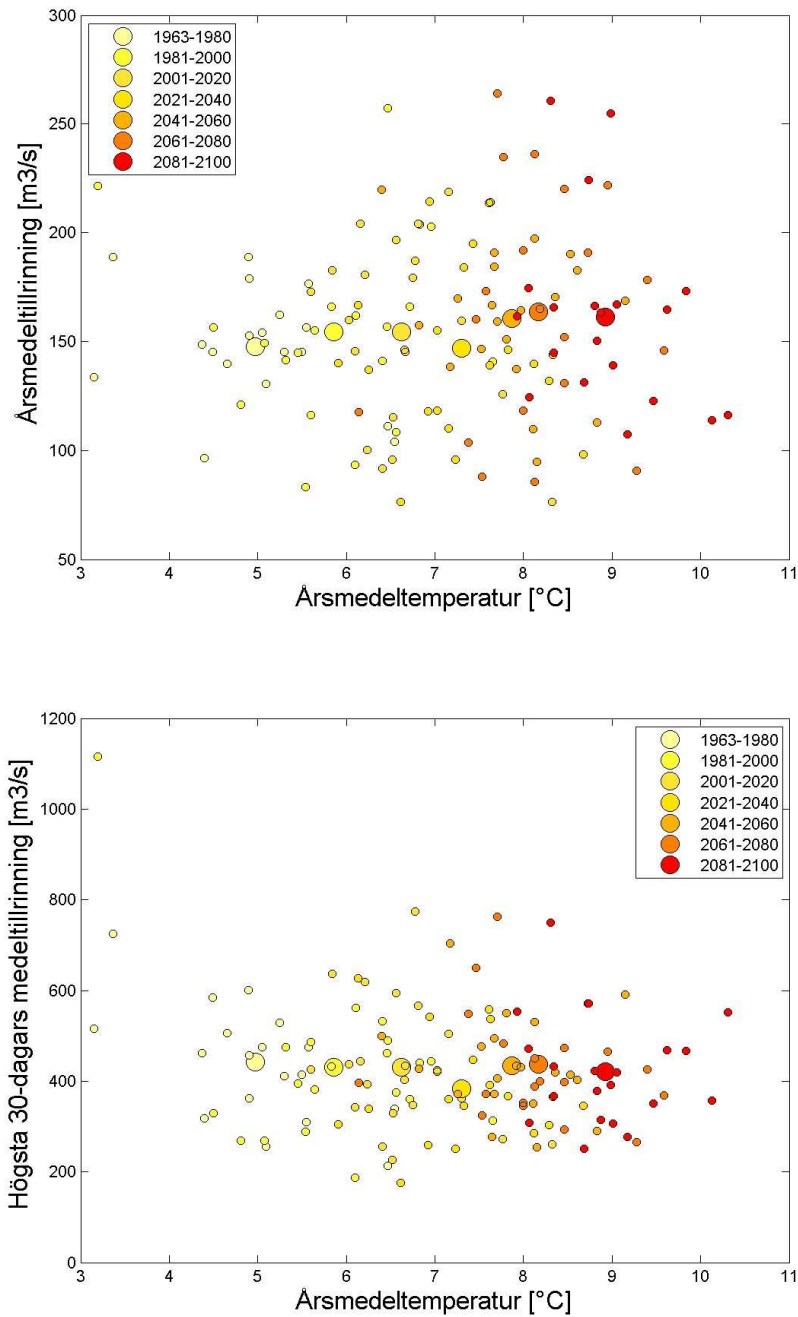
Figur 4.2.27 visar mer i detalj hur årsdynamiken i tillrinningen beräknas förändras efterhand som den globala uppvärmningen fortskrider. Figuren visar tydligt hur vårflo den gradvis förskjuts mot vintern samtidigt som de mest extrema tillrinningarna tenderar att minska. Liksom för beräkningarna för Vänern har året antagits ha 360 dagar i beräkningarna i figur 4.2.27, vilket är det antal dagar som året har i de kontinuerliga klimatscenerierna.



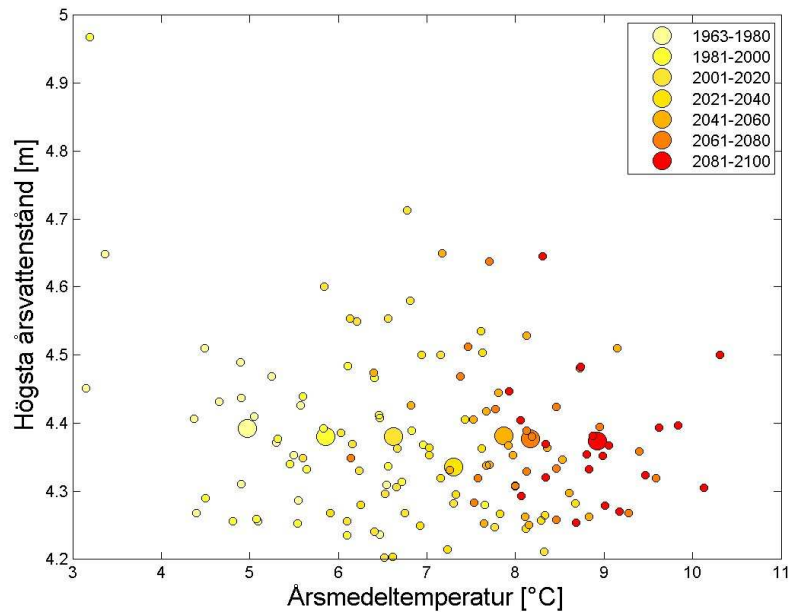
Figur 4.2.26. Statistisk analys av ett kontinuerligt (transient) scenario för tillrinningen till Mälaren. 100-årsflöden för hela året, *blå linje*, januari-juni, *grön linje* och juli-december, *röd linje* jämförs med nederbörd, temperatur och avrinning. Alla beräkningar är gjorda på löpande 30-dagars medelvärden. Varje punkt på linjen representerar en period av 30 år.



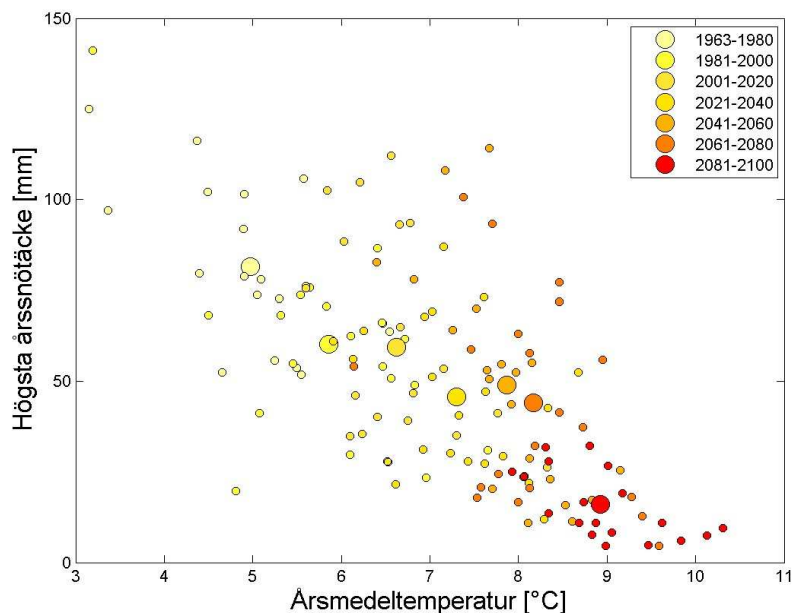
Figur 4.2.27. Beräknad förändring i årsdynamiken i tillrinningen till Mälaren enligt E/B2-scenariet. Sammanfattning för de två tidsperioderna 2011-2040 respektive 2071-2100 i jämförelse med 1963-1990 (gråskuggat område). De yttre begränsningarna avser det högsta och lägsta värdet för respektive dag på året.



Figur 4.2.28. Mälarens högsta årsmedeltillrinning och högsta 30-dagars medeltillrinning vs årsmedeltemperaturen i tjugوårsintervaller för perioden 1963-2100. De små ringarna representerar varje enskilt år och de stora ett medelvärde för respektive tjugوårsperiod. Varje 20-årsperiod har en egen färgkod.



Figur 4.2.29. Vänerns högsta årsvattenstånd, vs årsmedeltemperaturen i tjugoårsintervaller för perioden 1963-2100. De små ringarna representerar varje enskilt år och de stora ett medelvärde för respektive tjugoårsperiod. Varje 20-årsperiod har en egen färgkod.



Figur 4.2.30. Årets största snömagasin i Mälarens avrinningsområde vs årsmedeltemperaturen i tjugoårsintervaller för perioden 1963-2100. De små ringarna representerar varje enskilt år och de stora ett medelvärde för respektive tjugoårsperiod. Varje 20-årsperiod har en egen färgkod.

Figurerna 4.2.28 - 4.2.30 visar den kontinuerliga utvecklingen av årsmedeltillrinningen och den maximala tillrinningen till Mälaren under 30 dagar, de högsta vattenstånden samt det högsta snömagasinet i avrinningsområdet under det kontinuerliga scenariets 137 år, d.v.s. 1963-2100. Vid beräkning av vattenstånd har en förenklad beskrivning av dagens reglering använts. Små ringar representerar årsmedelvärden av respektive variabel och stora ringar medelvärden över 20-årsperioder. Olika 20-årsperioder har olika färgkodning.

Tillrinningen över 20 år visar stationära förhållanden eller svagt avtagande trender. Medeltillrinningen ökar med måttliga $10 \text{ m}^3/\text{s}$ från ca $150 \text{ m}^3/\text{s}$ till ca $160 \text{ m}^3/\text{s}$. De högsta värdena ligger på ca $650\text{-}700 \text{ m}^3/\text{s}$ och ca $400 \text{ m}^3/\text{s}$ för beräkningar över en respektive 30 dagar.

Även för Mälaren är en generell iakttagelse att spridningen av årsmedelvärdena tycks bli något större med tiden, vilket för högsta 30-dagarsstillrinningen skulle innebära en ökande översvämningssrisk i avrinningsområdets olika vattendrag. Detta har också tidigare konstaterats genom frekvensanalyserna.

Utvecklingen i tillrinningsdiagrammen återspeglas i vattenstånden, som samtliga visar på en nedåtgående trend. Liksom för Vänern är vattenstånden beräknade med en förenklad beskrivning av regleringen och de absoluta nivåerna bör därför inte tas alltför bokstavligt. Trenden är mer säker.

Det maximala snömagasinet (som mm vatten) i mälarens avrinningsområde minskar enligt beräkningarna från nuvarande dryga 50 mm till endast drygt 10 mm.

4.2.3. Dalälven

Dalälvens avrinningsområde sträcker sig från Gävlebukten till de södra fjälltrakterna. Älven har två huvudgrenar, Västerdalälven och Österdalälven, som vardera avvattnar cirka 30 % respektive 43 % av avrinningsområdet. Sammanflödet av Västerdalälven och Österdalälven till Dalälven sker vid Djurås nedströms Siljan, som är Dalälvens största sjö på 350 km^2 . Av Dalälvens totala avrinningsområde på ca $29\,000 \text{ km}^2$ är andelen sjöar 6,9 %.

Ett flertal sjöar i Dalälven är reglerade. Regleringarna i Siljan började partiellt redan 1926 och Trängsletdammen byggdes på 60-talet. I båda, men i framför allt Siljan, sker en kraftig flödesdämpning av Österdalälven, speciellt vid normala och låga flöden. Trängsletsjön och Siljan är de största magasinerna 880 respektive 660 Mm^3 respektive. Övriga magasin är mindre än 100 Mm^3 . Dalälven kan lagra ca 26 % av ett års avrinning i sina regleringsmagasin (regleringsgraden är 26 %). Det är en relativt låg siffra jämfört med de mest utbyggda älvarna. För Luleälven är motsvarande siffra 72 % och för Ångermanälven 43 %.

För att något dämpa effekten av Trängslets regleringen sker en viss återreglering vid det strax nedströms Trängslet liggande Åsens kraftverk. I Västerdalälven regleras bland annat Venjansjön, Öjesjön, Flaten och Horrmundsjön som i jämförelse med Siljan och Trängslet har liten magasineringsvolym (Jordbruksdepartementet, 1976).

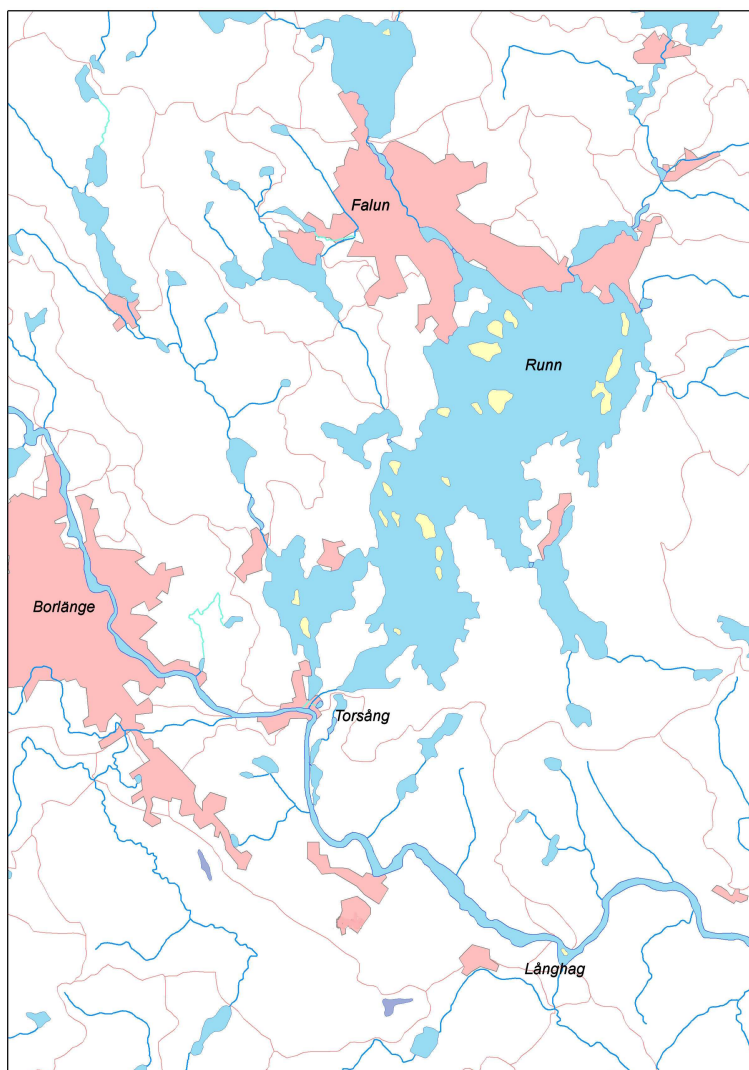
För flödet i Dalälven är både snösmältning och kraftig nederbörd viktiga faktorer. Variationen inom avrinningsområdet är stor, med fjällområden i väster, och ett mera sjörikt och av jord- och skogsbruk dominerande landskap i öster. Avsaknaden av stora regleringar och större sjöar

gör att Västerdalälven har snabbare flödesändringarna än Österdalälven. I båda grenarna inträffar normalt de högsta flödena under våren vid snösmältningen.

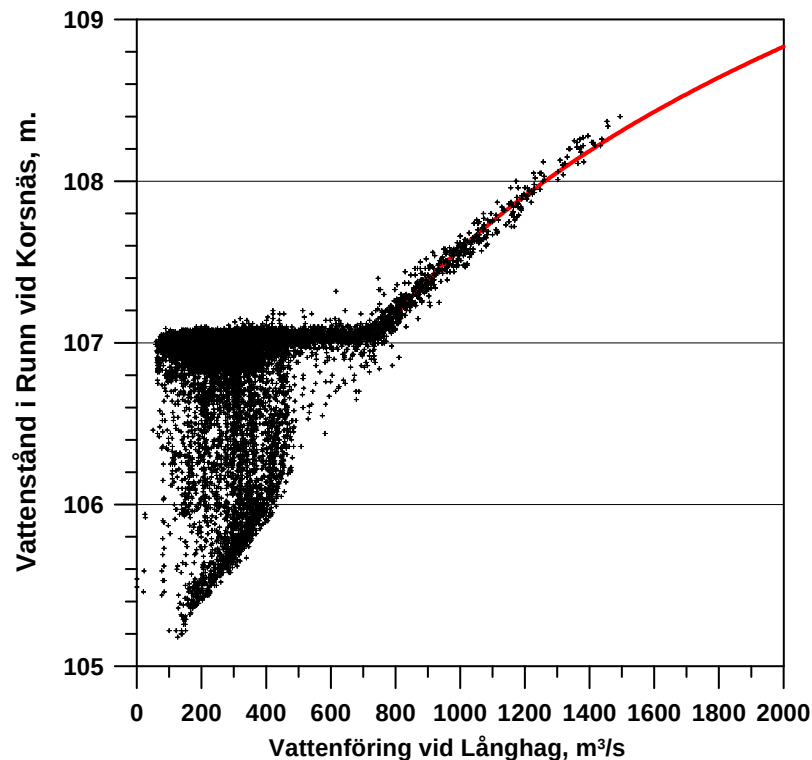
Fyra scenarier för Falun/Långhag för perioden 2071-2100

Sjön Runn och Falun är speciellt intressanta ur översvämningssynpunkt. Det finns många belägg för att detta är översvämningsskänsliga områden. Runn är förbunden med Dalälven via Lillån på ett sätt som gör att vattnet rinner in i sjön vid höga vattenstånd i Dalälven (figur 4.2.31). Det gör att översvämningssriskerna i Falun och runt sjön Runn till stor del är kopplade till Dalälvens höga nivåer. Som framgår av figur 4.2.32, som visar sambandet mellan vattenföringen i Dalälven och vattenståndet i Runn, så är gränsen för när Dalälven bestämmer sjöns vattenstånd ca 750 m³/s.

Vid sju tillfällen sedan 1950 har vattenståndet i sjön Runn varit över 108 meter, nämligen 1957, 1959, 1966, 1977, 1985, 1986 och 1995. 108 meter är den nivå då vattenståndet börjar bli kritiskt. Vid 108,5 meter når vattnet strandnära bebyggelse.



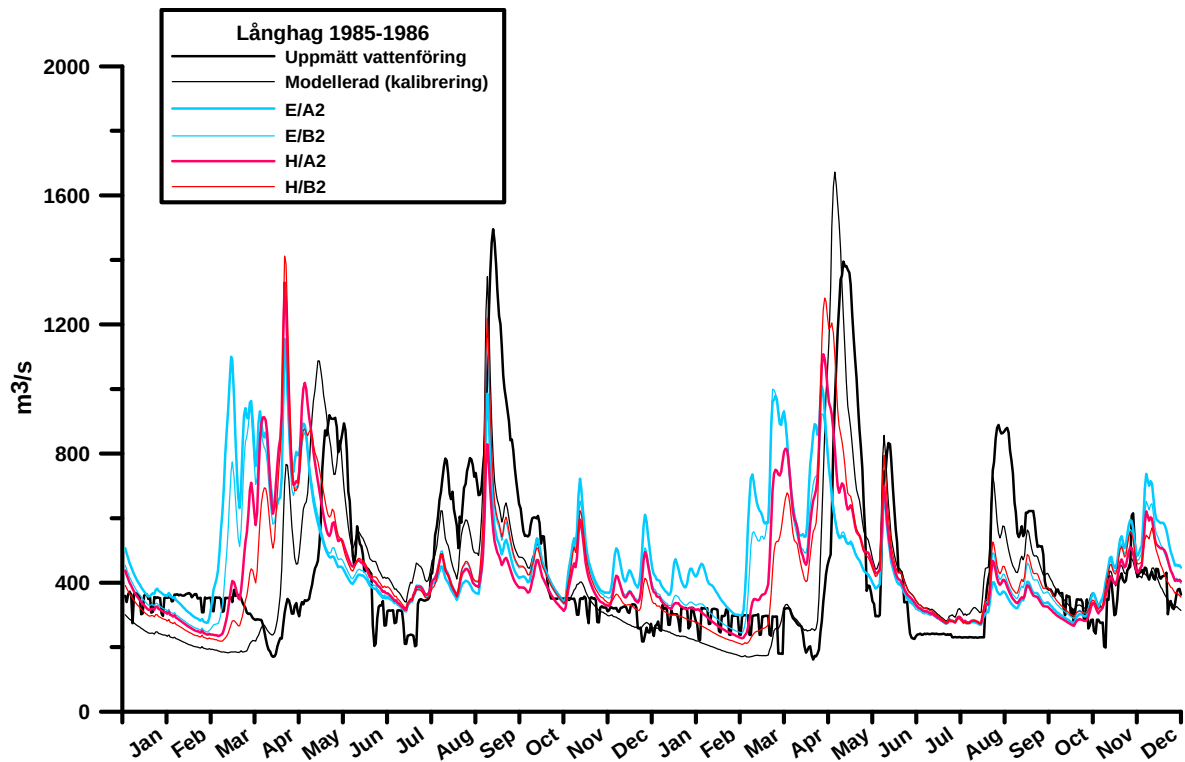
Figur 4.2.31. Vattenståndet i sjön Runn bestäms av både flödet i Dalälven och av tillflödet norrifrån till Runn. Vattenföringsmätningar finns vid Långhag och vattenståndsmätningar finns i Runn vid Korsnäs som ligger nära Falun.



Figur 4.2.32. Sambandet mellan vattenståndet i sjön Runn och vattenföringen i Dalälven vid Långhag 1961-2003. Vid vattenföringar över ca 750 m³/s är vattenståndet i Runn tydligt beroende av flödet i Dalälven. Sambandet mellan flöde och vattenstånd beskrivas med den rödmarkerade logaritmiska kurvan.

För att studera klimatpåverkan på vattenståndet i sjön Runn har den hydrologiska modellen satts upp för Långhag eftersom vattenföringsmätningar finns här. Långhag ligger knappt 15 km nedströms Torsång. Flödet vid Långhag består av både det nästan oreglerade vattnet från Västerdalälven och det vid Trängslet och Siljan reglerade flödet från Österdalälven. Hur regleringarna påverkar vattenföringen framgår tydligt av figur 4.2.33 som är ett exempel från två års beräkningar med den hydrologiska HBV- modellen för Långhag för perioden 1985-1986. Den tjocka svarta linjen i figur visar hur den reglering som sker i kraftverksdammarna och Siljan påverkar vattenföringen. De snabba förändringarna i vattenföring visar på veckoregleringar. Skillnaden mellan de svarta linjerna de första månaderna om året visar en pågående tömning av magasinerna som inte motsvaras av regn eller snösmältning.

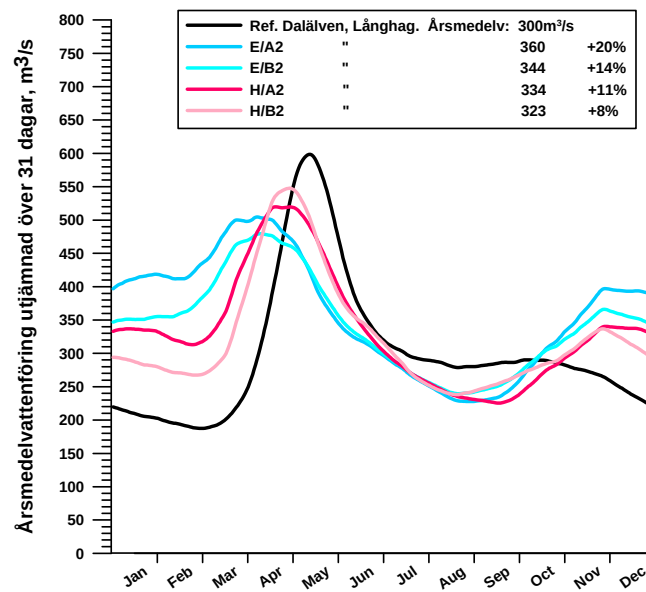
Vid kalibreringen av HBV-modellen har viss hänsyn tagits till Siljans flödesdämpande effekt men övriga regleringar har inte kunnat beskrivas. Detta är en osäkerhet som måste beaktas vid bedömningen av resultaten.



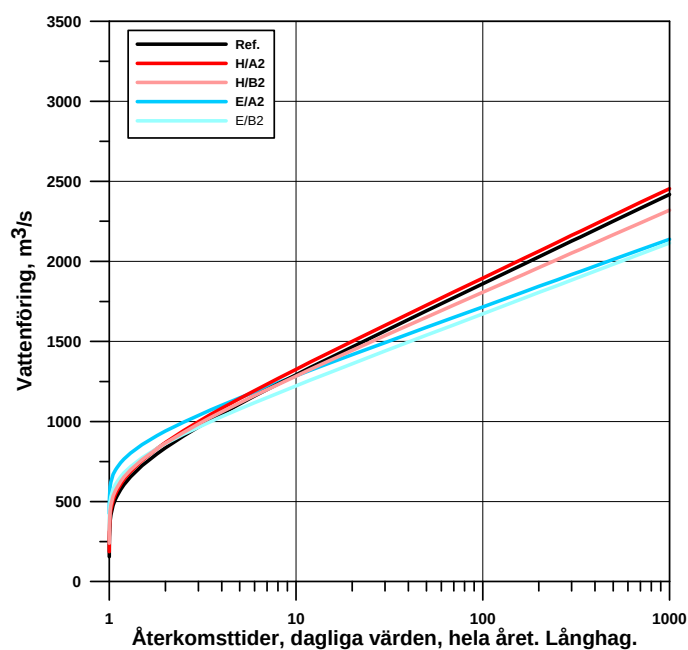
Figur 4.2.33. Ett exempel på kalibrering och scenarier under reglerade förhållanden vid Långhag efter sammanflödet av Väster- och Österdalälven.

Effekterna av ett förändrat klimat på vattenföringen i Långhag beräknades på samma sätt som för Vänern och Mälaren med fyra regionala klimatscenarier RCAO-H, RCAO-E med A2 och B2 samt den hydrologiska HBV-modellen. Av figur 4.2.33 framgår hur vid scenariokörningarna vattenföringen, jämfört med kurvan för dagens klimat, ökar under vintermånaderna och hur snösmältningen tidigareläggs. Åren 1985 och 1986 har valts som exempel på grund av de mycket höga flödena dessa år. 1985 uppmättes som mest hela 1495 m³/s med översvämningar som följde. Så höga flöden har inte uppmätts sedan dess, se bild figur 1.1.

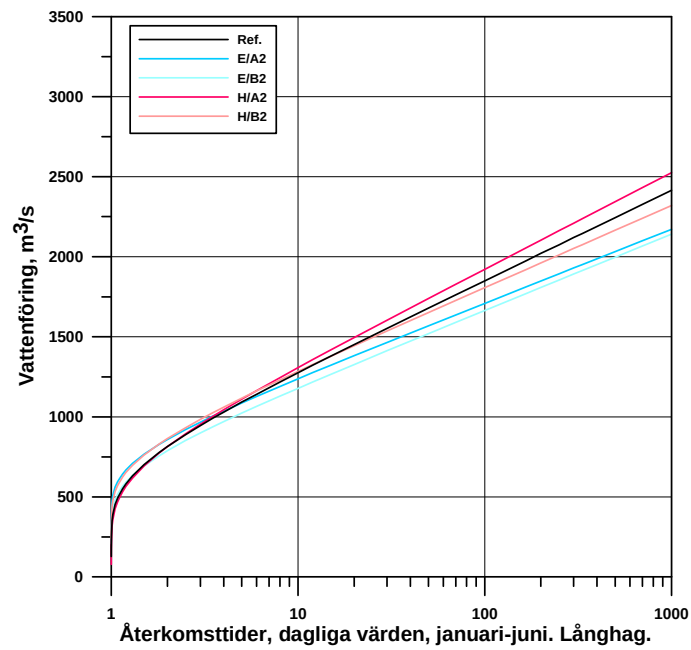
Resultatet av de hydrologiska beräkningarna med de fyra scenarierna illustreras ytterligare i figur 4.2.34. Resultaten visar en minskning och tidigareläggning av vårflödestoppen och en ökning av vinterflödena med 1,5-2 gånger samtidigt som årsmedelvattenföringen ökar med 10-20 %. Figurerna 4.2.35, 4.2.36 och 4.2.37 visar frekvensanalyser, baserade på simuleringarna i figur 4.2.34. Återkomsttiderna visar över lag för hela året samt för januari-juni en marginell minskning av de högsta flödena. Minskningen ligger inom metodens felmarginaler. Ett hundraårsflöde kommer ungefär att motsvara ett 110-årsflöde. 100-års höstflödena, juli-december, kommer däremot att öka, från ca 1100 m³/s till i genomsnitt 1500 m³/s. En vattenföring på 1500 m³/s är nästan lika mycket som uppmättes 1985 och som enligt figur 4.2.32 ger ett vattenstånd på 108,4 meter. Sett över hela året motsvarar 1500 m³/s ungefär ett 120-årsflöde både i dag och om 100 år. Med reservation för framtida regleringar pekar dessa resultat således mot att översvämningar i Falun kommer att förekomma i ungefär samma omfattning om hundra år som i dag.



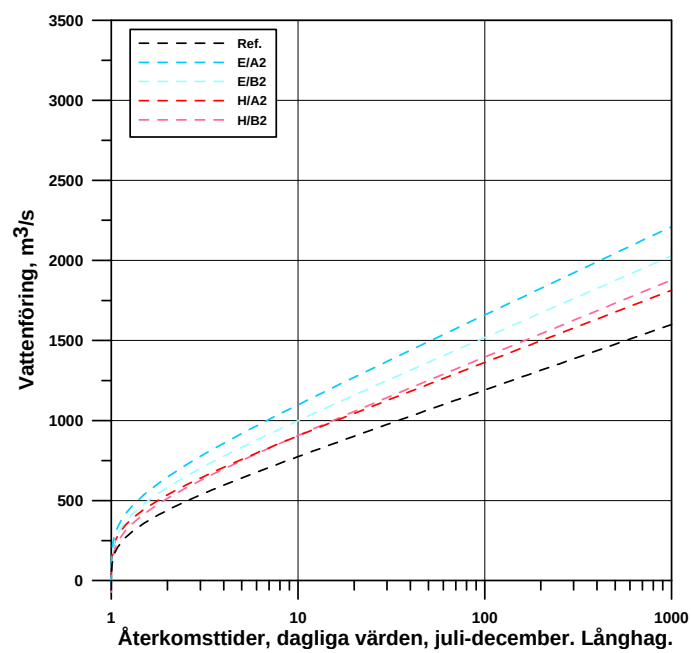
Figur 4.2.34. Genomsnittlig förändring av flödet vid Långhag enligt fyra klimatscenarier



Figur 4.2.35. Återkomsttider för maximala flöden vid Långhag under **hela året** beräknade på dagliga värden under 30 år.



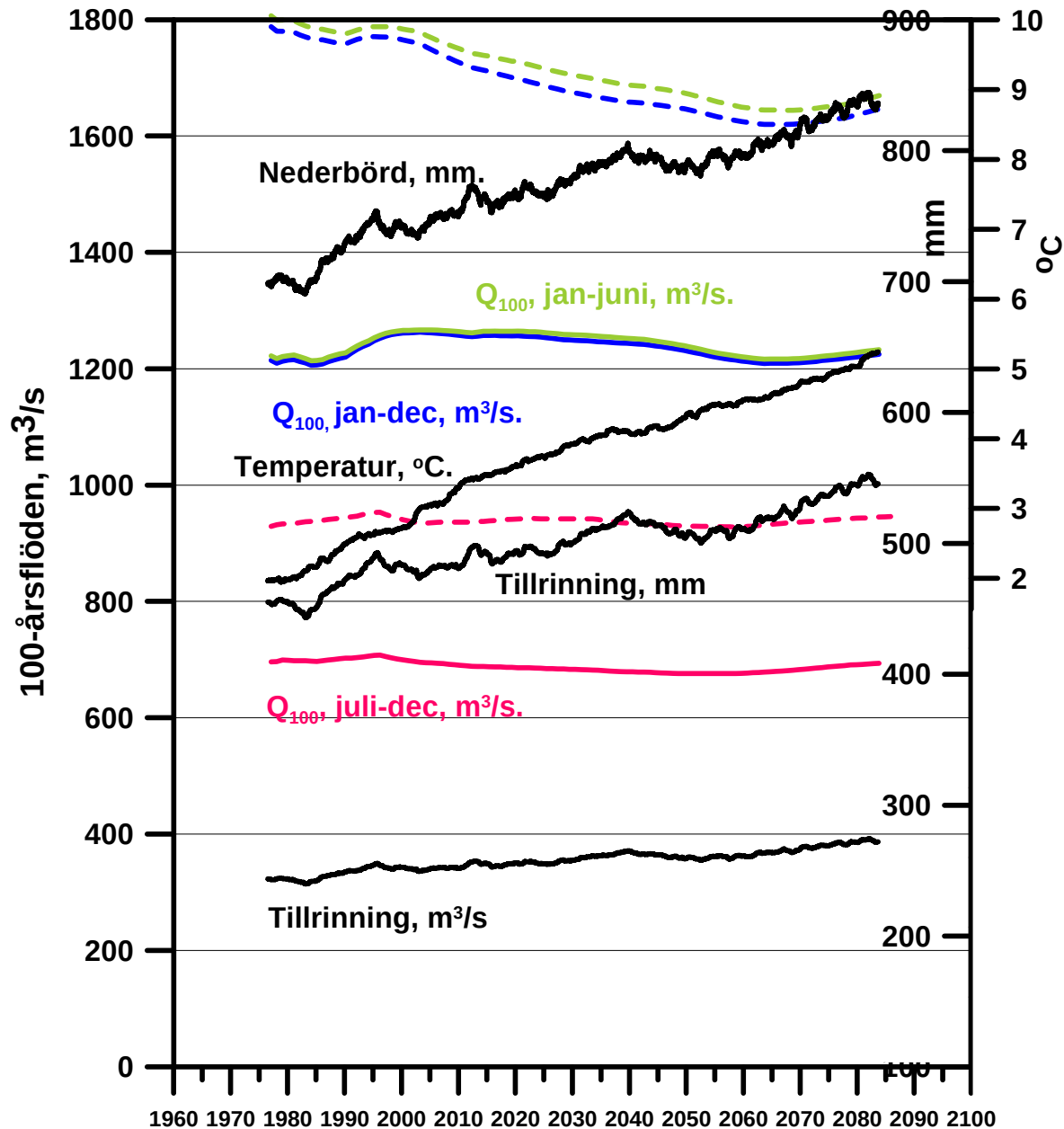
Figur 4.2.36. Återkomsttider för maximala flöden vid Långhag under **januari-juni** beräknade på dagliga värden under 30 år.



Figur 4.2.37. Återkomsttider för maximala flöden vid Långhag under **juli-december** beräknade på dagliga värden under 30 år.

Kontinuerligt scenario för Falun/Långhag för perioden 1961-2100

På samma sätt som för Vänern och Mälaren har en kontinuerlig klimatsimulering från Rossby Centre använts för att studera tidsförloppet av klimatpåverkan på vattenföringen vid Långhag. Beräkningarna bygger på den tyska globala ECHAM4/OPYC3-modellen med utsläppsscenario B2, Rossby Centres regionala klimatmodell, RCA3, samt den hydrologiska HBV-modellen. Statistiska beräkningar för det kontinuerliga scenariot redovisas i figur 4.2.38.

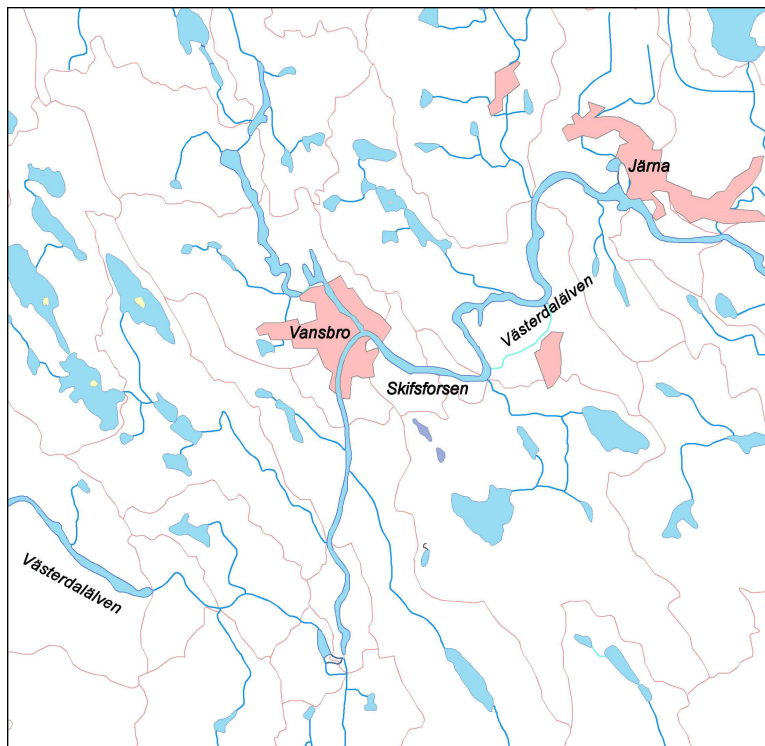


Figur 4.2.38. Statistisk analys av ett kontinuerligt (transient) scenario för vattenföringen i Långhag. 100-årsflöden för hela året, blå linje, januari-juni, grön linje och juli-december, röd linje jämförs med nederbörd, temperatur och avrinning. Heldragna linjer betecknar beräkningar gjorda på löpande 30 dagars medelvärden och streckade linjer är beräknade utifrån dygnsvärden. Varje punkt på linjen representerar en period av 30 år.

I de kontinuerliga scenarierna för Långhag jämförs två alternativa för beräkning av 100-års återkomsttider, nämligen beräkningar baserade på dagliga och på 30-dagars löpande medelvärden. De kontinuerliga scenarierna har gjorts med scaling-metoden och en nyare version av den regionala klimatmodellen, vilket innebär att de inte är direkt jämförbara med resultaten från figurerna 4.2.35 - 4.2.37, som baseras på deltametoden och den äldre RCAO-modellen. Skillnaderna är dock så stora att de väcker nya frågor om vilken strategi som är bäst när det gäller att använda resultat från klimatmodeller för hydrologiska beräkningar. Såväl storleksordningarna i de beräknade hundraårsvärdena som tendensen hur dessa kommer att utvecklas i framtiden skiljer sig åt om man jämför resultaten i figur 4.2.38 med de i figur 4.2.35 - 4.2.37. Utvecklingen av 100-årsflödena visar alla ett avtagande eller konstant förlopp.

Fyra scenarier för Vansbro/Skifsforsen för perioden 2071-2100

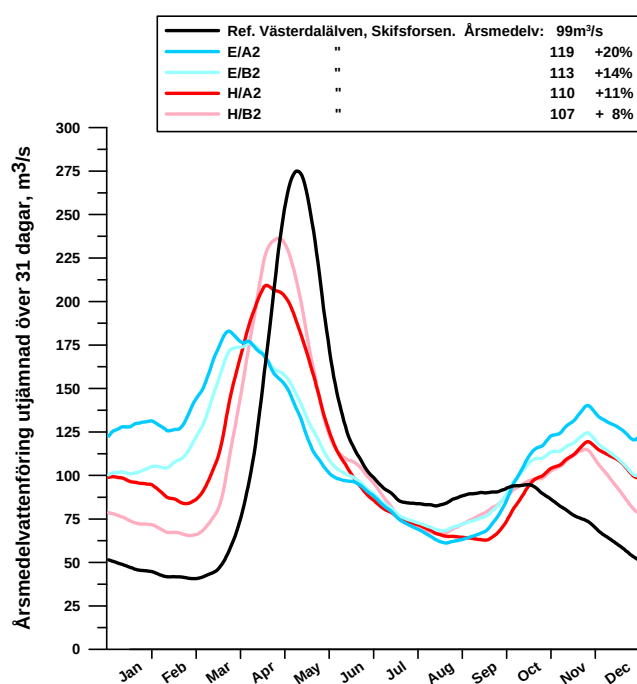
Vanån är det största tillflödet till Västerdalälven innan sammanflödet med Österdalälven. Ungefär 73 % av medelvattenföringen vid Skifsforsen kommer från Västerdalälven och 27 % från Vanån (figur 4.2.39). Några kontinuerliga vattenståndsmätningar i Vansbro finns inte och därmed inte heller något definierat samband mellan vattenföring och översvämningsrisk. Antagligen föreligger ett liknande samband mellan vattenstånd i Vanån i Vansbro och flödet i Västerdalälven som mellan vattenståndet i Runn och flödet i Dalälven. Gjorda scenarier bygger på beräkningar vid Skifsforsen i Västerdalälven. Skifsforsen ligger omedelbart nedströms sammanflödet med Vanån.



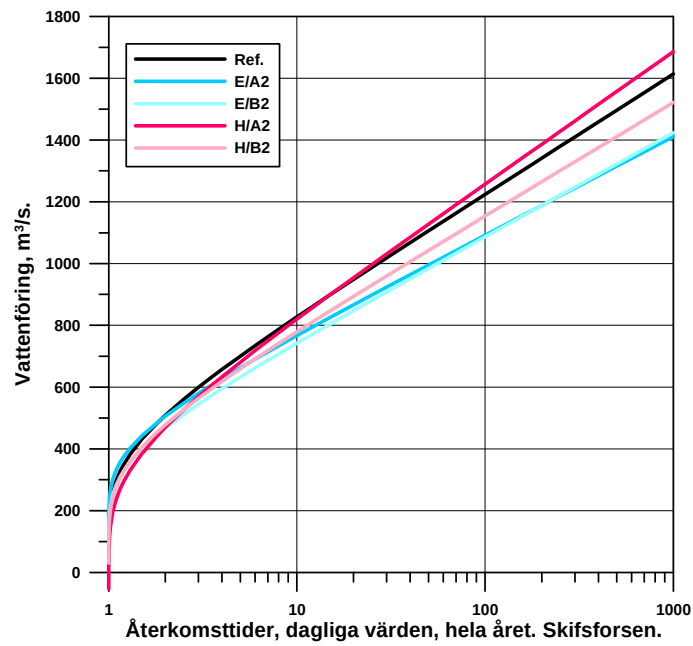
Figur 4.2.39. Samhället Vansbro ligger vid sammanflödet mellan Vanån och Västerdalälven. Scenarieberäkningarna har gjorts efter sammanflödet vid Skifsforsen.

Effekterna av ett förändrat klimat på vattenföringen beräknades på samma sätt som för övriga områden med fyra regionala klimatscenarier RCAO-H, RCAO-E med A2 och B2 samt den hydrologiska HBV-modellen.

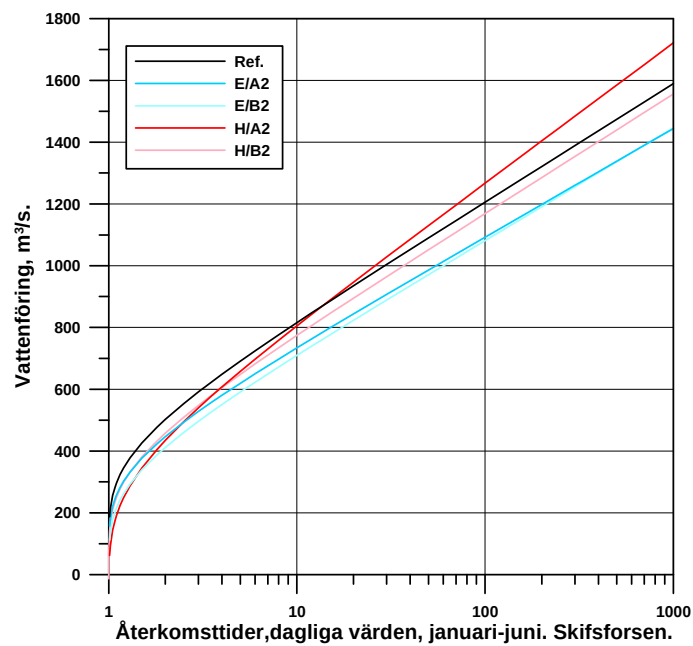
Både den utjämnade medelårskurvan, figur 4.2.40 och frekvensanalyserna för Skifsforsen i figurerna 4.2.41 - 4.2.43 visar mycket stora likheter med resultaten från Långhag. De instabilare vintrarna ger mer avrinning vintertid och lägre vårflöden i genomsnitt samtidigt som flödena ökar under hösten. Enligt tre av de fyra scenarierna minskar de högsta vårflödena medan de maximala flödena under perioden juli-december ökar betydligt enligt samtliga fyra scenarier, dock utan att uppnå samma nivå som nuvarande vårflöden.



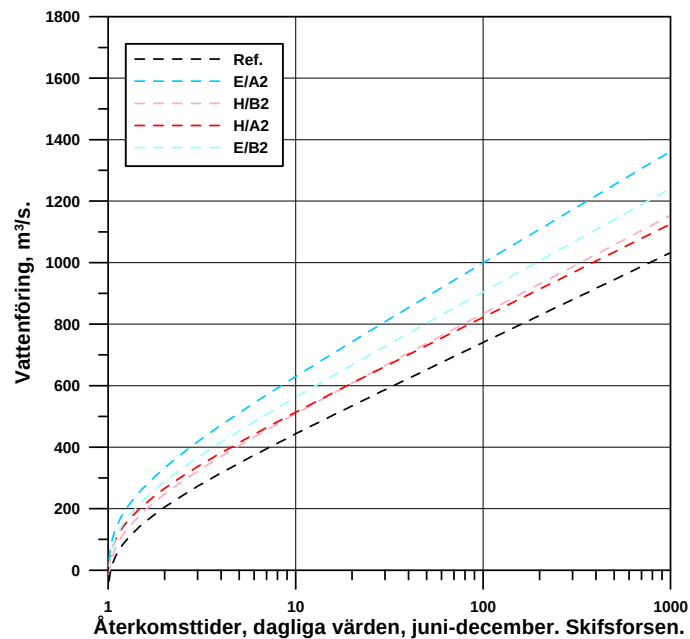
Figur 4.2.40. Genomsnittlig förändring av flödet vid Skifsforsen enligt fyra klimatscenarier.



Figur 4.2.41. Återkomsttider för maximala flöden vid Skifsforsen under **hela året** beräknade på dagliga värden under 30 år.



Figur 4.2.42. Återkomsttider för maximala flöden vid Skifsforsen under **januari-juni** beräknade på dagliga värden under 30 år.

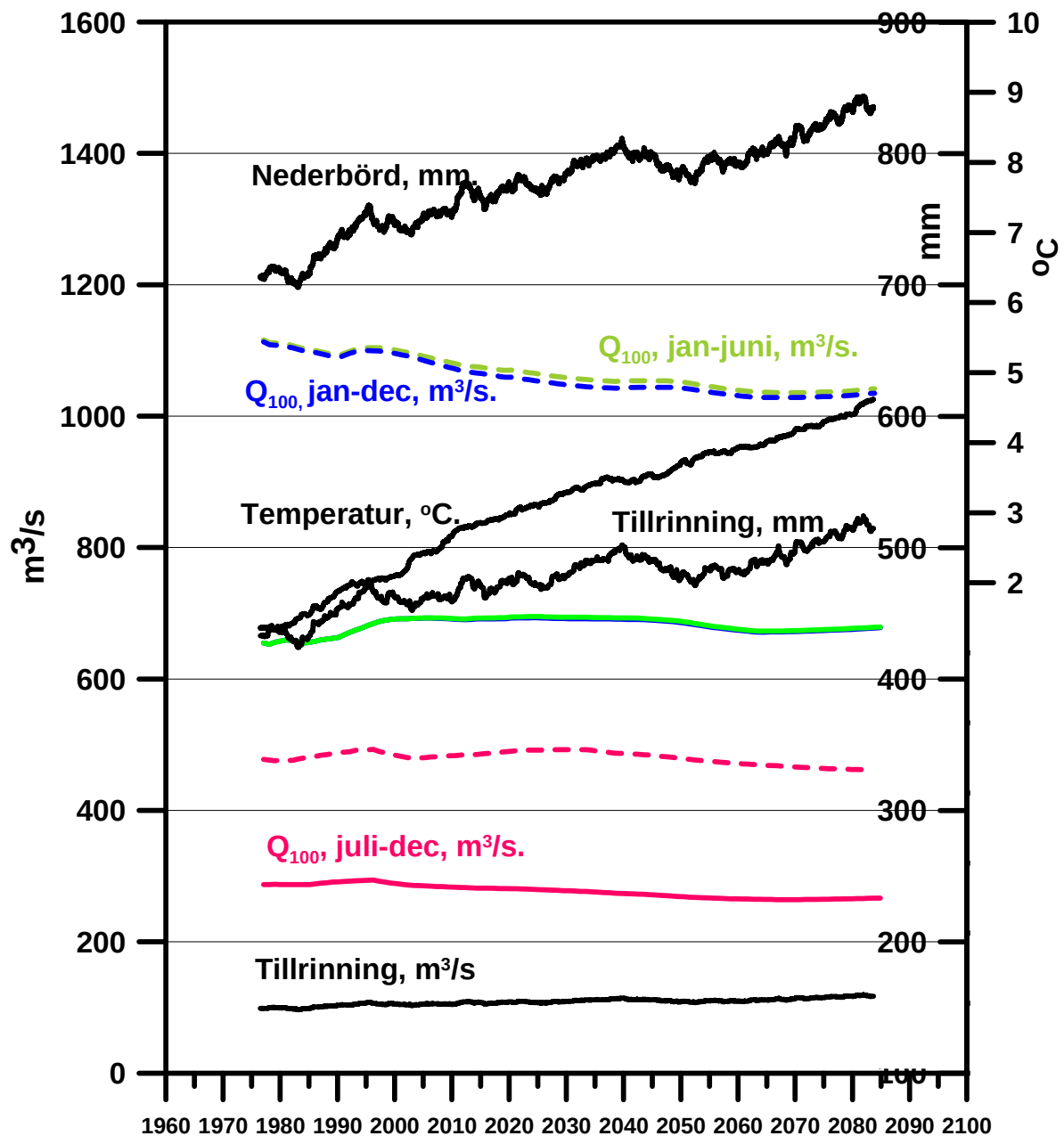


Figur 4.2.43. Återkomsttider för maximala flöden vid Skifsforsen under **juli-december** beräknade på dagliga värden under 30 år.

Kontinuerligt scenario för Vansbro/Skifsforsen för perioden 1961-2100

Även för Skifsforsen har en kontinuerlig klimatsimulering från Rossby Centre gjorts för att studera tidsförloppet vid en klimatpåverkan på vattenföringen. Beräkningarna bygger på den tyska globala ECHAM4/OPYC3-modellen med utsläppsscenario B2, Rossby Centres regionala klimatmodell, RCA3, samt den hydrologiska HBV-modellen. Statistiska beräkningar för det kontinuerliga scenariot redovisas i figur 4.2.44.

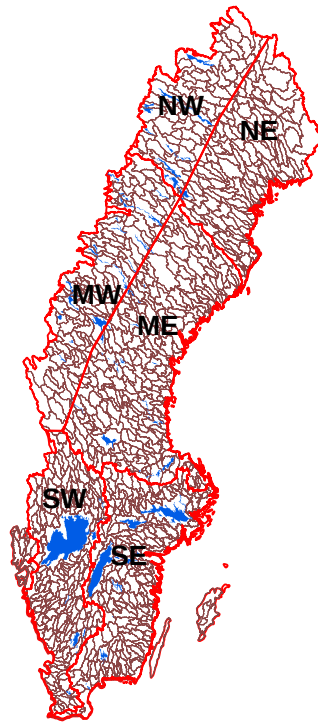
De farhågor, som väcktes vid beräkningarna för Långhag, att olika strategier för att beräkna extrema flöden i ett framtida klimat kan ge olika resultat, bekräftades av studien för Skifsforsen. Även här är skillnaderna uppseendeväckande stora mellan beräknade framtida 100-årsflöden för perioden juli-december. Detta framgår av en jämförelse mellan figur 4.2.41 - 43 och 4.2.44. Det är uppenbart att denna fråga kräver ytterligare studier och att speciellt beräknade förändringar av riskerna för översvämningar på grund av regn måste behandlas med försiktighet. Utvecklingen av 100-årsflödena visar på samma sätt som för Långhag alla ett avtagande eller konstant förlopp.



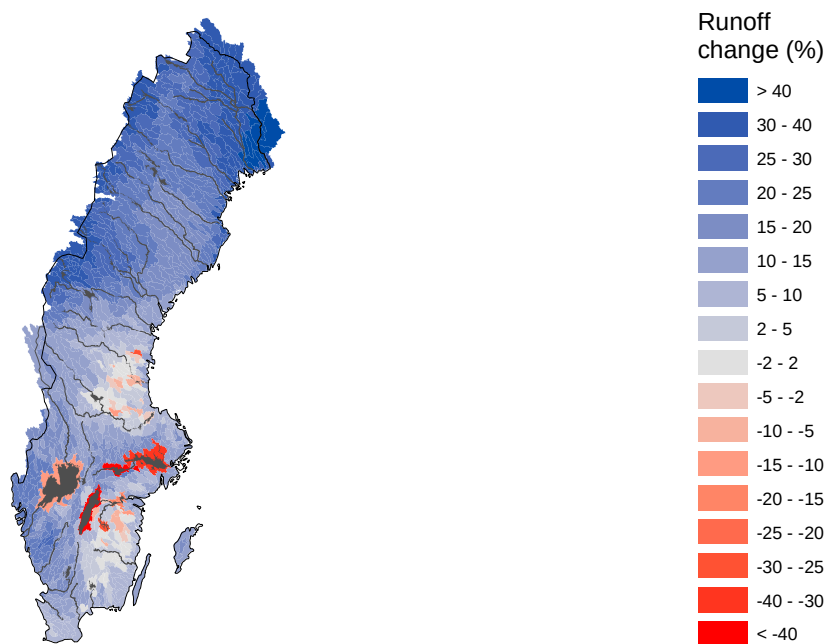
Figur 4.2.44. Statistisk analys av ett kontinuerligt (transient) scenario för vattenföringen i Skifsforsen. 100-årsflöden för hela året, *blå linje*, januari-juni, *grön linje* och juli-december, *röd linje* jämförs med nederbörd, temperatur och avrinning. Heldragna linjer betecknar beräkningar gjorda på löpande 30 dagars medelvärden och streckade linjer är beräknade utifrån dygnsvärden. Varje punkt på linjen representerar en period av 30 år.

4.2.4. Högupplöst svensk hydrologisk modell

Då den första modelleringen av klimatförändringarnas inverkan på hydrologin för hela Sverige gjordes för ca fyra år sedan användes, vid beräkningar enligt deltametoden, samma förändring i temperatur, avdunstning och nederbörd för stora arealer. I en första version delades Sverige in i endast sex områden enligt bokstavsbeteckningarna i figur 4.2.45 (Andréasson et al., 2004). Upplösningen har sedan dess, delvis inom detta projekt, förfinats så att Sverige delas in i ca tusen delområden, vilka vardera utgörs av ett avrinningsområde. Denna indelning används både för beräkningar med deltametoden och med scalingmetoden. Individuella delta- eller scalingfaktorer för nederbörd och temperatur appliceras på varje område. Avdunstning beräknas med en temperatur-index metod. Framtidens avdunstning beräknas på samma sätt utgående från scenariernas temperatur. Denna beräkningsmetod kan leda till att avdunstningsförändringen överskattas något jämfört med deltametoden. Resultaten från dessa beräkningar enligt scalingmetoden visas i figurerna 4.2.46 - 4.2.47.



Figur 4.2.45. Från att från början ha varit uppdelat i sex delar vid scenariokörningarna har Sverige delats upp i ca tusen avrinningsområden och i vart och ett av dessa görs nu beräkningar enligt både delta- och scalingmetoderna.

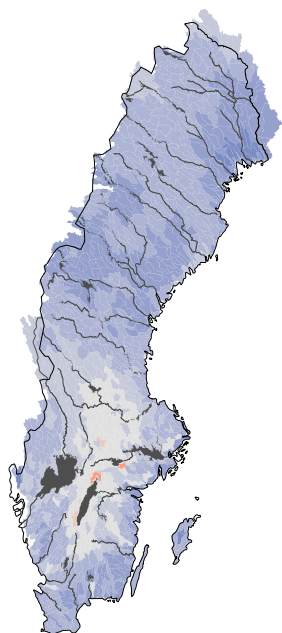


Figur 4.2.46. Förändring av avrinningen i Sverige enligt deltametoden och RCAO-E/B2. De röda områdena kring de stora sjöarna beror på att i denna version så räknades en del av omgivande landområden till sjön med hög avdunstning som följt. Förändringen i avrinning gäller tiden 1961-1990 till 2071-2100.

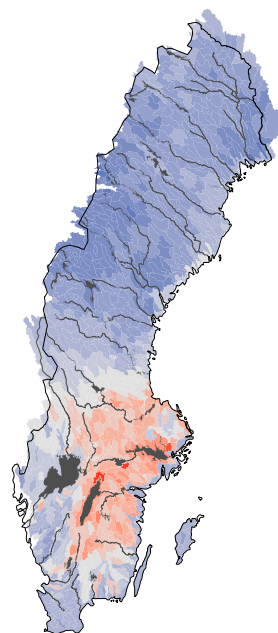
Som framgår av en jämförelse av figurerna 4.2.46 och 4.2.47 så ger beräkningar enligt de båda metoderna ett i stort likartat mönster med största ökningarna i avrinning i Norrlands fjällkedja och västra Götaland och en minskad avrinning i östra Götaland. En minskad eller måttligt ökande avrinning kan även konstateras för sydöstra Norrland. Trettioårsperioderna från det kontinuerliga scenariot visar att utvecklingen inte är linjär. Efter en ökning av avrinningen i hela Sverige sker en minskning i de sydöstra delarna och därefter en ökning igen.

Beräknad förändring av dygnsflöden med 100-års återkomsttid, enligt fyra scenarier, redovisas på kartform i figur 4.2.48. De hydrologiska simuleringarna som använts är baserade på den högupplösta deltametoden. Dagliga värden ger en kartbild som inte är helt representativ för stora områden med stora sjöar beroende på den utjämnande effekt på flödet som dessa har. Alla fyra scenarierna ger en i stort överensstämmer i stort med vad som tidigare visats för de enskilda områdena. Åter igen utpekas Vänern som ett problemområde men nu inkluderas också hela västra Götaland.

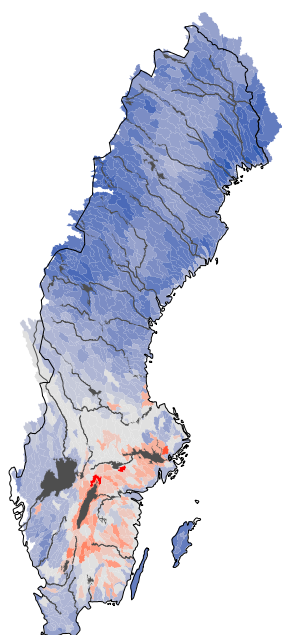
Det är inte oomtvistad hur riskerna för höga flöden skall beräknas utifrån klimatscenarier. Ett problem är hur data skall överföras från klimatmodellen till den hydrologiska modellen utan att de förändringarna i de statistiska egenskaperna som den globala uppvärmningen leder till går förlorade. Deltametoden medför förenklingar som just kan leda till detta. Kartorna i figur 4.2.48 måste därför tolkas med försiktighet och enskilda värden skall inte tas alltför bokstavigt.



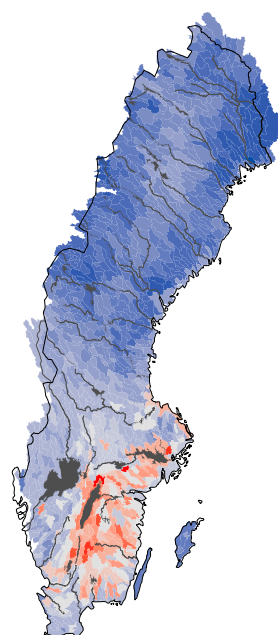
1981-2010



2011-2040

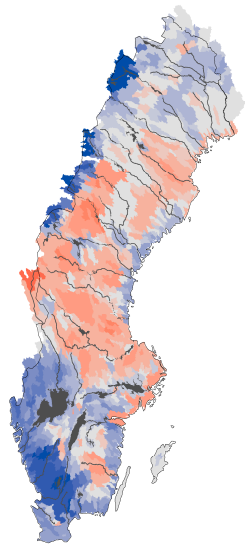


2041-2070

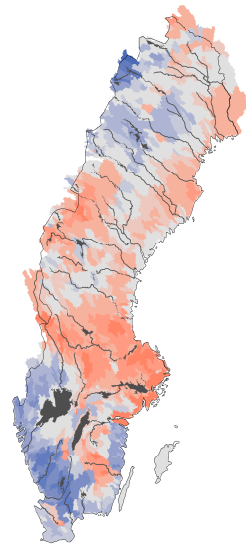


2071-2100

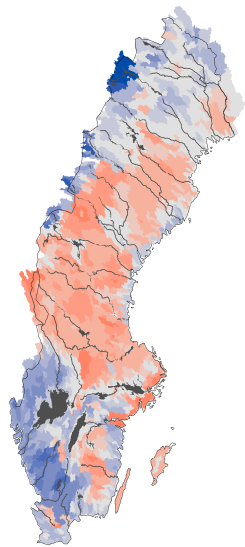
Figur 4.2.47. Förändringen i procent av avrinningen från kontinuerliga beräkningar uppdelad på 30-årsperiode med scalingmetoden och RCA3-E/B2. Samma färgbeteckningar som i legenden i föregående figur 2.4.46 gäller.



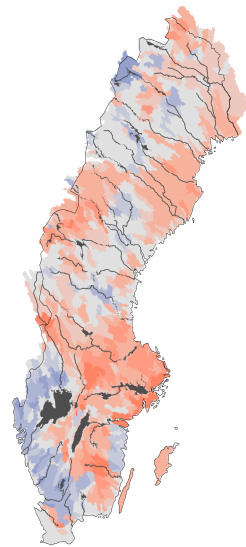
RCAO-E/A2



RCAO-E/B2

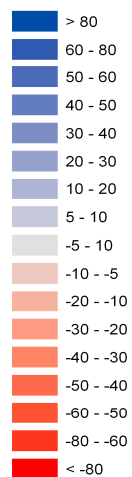


RCAO-H /A2



RCAO-H /B2

Change in Q100 (%)



Figur 4.2.48. Procentuell förändring i flöden med 100 års återkomsttid från 1961-1990 till 2071-2100. Beräkningarna är gjorda på dagliga data och bygger på deltametoden.

5. Diskussion

Klimatets utveckling har stor betydelse för framtidens översvämningsrisker i Sverige. I huvudsak är det tre förhållanden som kan tänkas ändras om klimatet förändras på grund av den globala uppvärmningen.

- Temperaturen stiger vilket medför kortare och mer instabila vintrar. Därmed minskar vårflödena på många håll medan översvämningar på grund av vinterregn ökar.
- Nederbörden förändras. Den väntas öka mest i norra och västra Sverige. Årstidsfördelningen förändras med mer nederbörd under vinterhalvåret och mindre under sommaren. Kombination av ökad vinternederbörd och högre temperaturer ger högre flöden vintertid.
- Avdunstningen ökar. Det kompenserar effekten av den ökade nederbörden på många håll, speciellt i sydöstra Sverige.

Den framtida utvecklingen av riskerna för översvämningar beror på den samlade effekten av dessa förändringar. Den blir olika i olika landsdelar och kan skilja sig åt mellan vattendrag och sjöar av olika storlek och av andra förhållanden.

5.1. Regleringar, vattendomar och fysisk planering

De flesta större svenska vattendrag är påverkade av någon form av reglering. Mest påtagligt är detta i de utbyggda norrlandsälvarna. För vattenkraftsystemets del är den viktigaste avsikten att spara vatten från vår sommar och höst för att klara elproduktionen under vintern. Detta medför också ändrade översvämningsrisker, främst genom att vårfloden minskar i älven när magasinerna fylls på. En klimatförändring, som ju också påverkar uppvärmningsbehovet och därmed efterfrågan på el, kan komma att påverka hur vattenkraftens magasin regleras i framtiden.

För de stora sjöarna Mälaren, Hjälmaren och Vänern är bilden mer komplicerad än för vattenkraftens magasin. Här har man fler syften med regleringarna. De skall underlätta för sjöfarten, minska sjöns vattenståndsvariationer så att man kan odla och bebygga längs dess stränder och, i Vänerns fall, underlätta vattenkraftproduktionen i Göta älvs kraftverk. För Mälaren är ytterligare ett syfte att undvika att saltvatten strömmar in vid höga vattenstånd i havet.

Det är lätt att tro att en reglering minskar översvämningsriskerna, men ofta är det precis tvärtom. Ett reglerat vattendrag bjuder på större överraskningar än oreglerade vid höga vattenflöden. Detta beror på att flöden av mindre storleksordning ofta regleras bort. Därför vänjer man sig vid att vattenståndet inte skall variera speciellt mycket. Man invaggas alltså lätt i en falsk säkerhetskänsla (Bergström, 1999) längs ett reglerat vattendrag och kan lockas att exploatera riskutsatta områden.

Det är viktigt att komma ihåg att de domar som styr hur ett vattendrag skall hanteras ofta är av gammalt datum. Domen för Vänern är t.ex. från 1937 och för Mälaren från 1943 med justering 1968. Sedan dess har samhället förändrats, inte minst vad avser exploatering av översvämningskänsliga och attraktiva områden nära vattnet. Framtidens översvämningsrisker är i allra högsta grad beroende på hur denna utveckling fortskrider.

Säkerhet mot det allra mest extrema

De riktlinjer som togs fram av den s.k. Flödeskommittén (1990) för beräkning av dimensionerande flöden för stora dammar, har fått en särställning vid analys av översvämningsrisker. Ett haveri av en av de större dammarna i Sverige skulle kunna utveckla sig till en stor katastrof. Den teknik som Flödeskommittén utvecklade används numera även för den översiktliga översvämningskarteringen som genomförts av Räddningsverket och i andra sammanhang när man vill skydda stora värden mot de värsta tänkbara översvämningsarna. Ett exempel på det senare är den pågående förnyelsen av Kristianstads skyddsvallar.

En känslighetsanalys av Flödeskommitténs riktlinjer har genomförts av SMHI på uppdrag av Elforsk (Andréasson et al., 2006) och vissa studier har även utförts på uppdrag av den nu pågående statliga Klimat- och sårbarhetsutredningen. Dessa studier berör bl.a. Vänern, Mälaren och Hjälmaren och är i högsta grad relevanta för projektet *Framtidens översvämningsrisker* och beskrivs närmare nedan.

5.2. Resultat för hela Sverige

Trots att olika klimatscenarier ger ganska skilda resultat så finns det vissa tydliga drag rörande framtidens översvämningsrisker som är gemensamma. Beträffande förändringar av risken för skyfall så är bilden ganska splittrad mellan de olika scenarierna, men det är mer som tyder på en ökning än på en minskning. Detta stämmer dessutom med erfarenheten att de allra mest intensiva regnen oftast är kopplade till mycket varm och fuktig luft. Detta stämmer också med den analys av extrem nederbörd som gjordes i samband med känslighetsanalysen av hur känsliga Flödeskommitténs riktlinjer är för en klimatförändring (Andréasson et al., 2006). Ökningen av risken för skyfall påverkar framförallt riskerna för källaröversvämningsar och andra system som är kopplade till dagvattenhantering och avledning av regnvatten.

Beträffande flöden i vattendrag och vattenstånd i sjöar så ökar riskerna främst i de västra fjälltrakterna och i västra Götaland och västra Svealand. Här intar Vänern en särställning som ett av de områden där riskerna ökar mest. Det beror på en kombination av ökad nederbörd, mildare vinter och utveckling av infrastrukturen och därmed ökande riskexponering. Men Vänern och Göta älv påverkas också av att det finns begränsade möjligheterna att släppa fram vatten i älven på grund av risker för översvämningsar och skred.

Beträffande den årstid som är mest utsatt för översvämningsar så innebär det varmare klimatet i de flesta fall en förskjutning så att vårfloden kommer tidigare och blir mindre intensiv medan översvämningsar blir vanligare under andra delar av året. I de stora norrlandsälvarna blir det vanligare med flöden vintertid, inte minst om magasinen är fyllda och det kommer regn eller intensiv snösmältning. Man kan då tvingas öka tappningarna och därmed öka flödena i älven mitt i vintern, något som samhällena nedströms inte är vana vid idag.

Den förändring som innebär mindre vårflöden och högre regnflöden under andra årstider ger sammantaget en riskminskning i de delar av landet där snösmältning dominerar vid översvämningsar. Förändringen gäller dock bara för det tidsperspektiv, 2071-2100, som studerats. I ett längre perspektiv kan bilden bli en annan om nederbörden fortsätter att öka.

Risken för att en översvämningsituation samtidigt skall drabba ett större område har diskuterats med länsförsäkringsgruppen under projektets gång. Det finns ingenting i resultaten som tyder på att de geografiska områden som drabbas samtidigt skulle bli större i framtiden.

Snarare tvärtom, eftersom flöden förknippade med snösmältning blir mindre vanliga medan risken för regnflöden ökar på många håll. Kraftig snösmältning brukar ha större utbredning än kraftiga regn. Däremot kan riskexponeringen ändå öka genom att tätbefolkade områden drabbas av mer intensiva regn, såsom exempelvis Mälardalen och Vänern med Göta älv. Redan idag hade det t.ex. inneburit svåra konsekvenser om det regn som lamslog Orust i augusti 2002 i stället hade fallit över Göteborg, något som är lika sannolikt.

Stora sjöar, stora problem

De tre stora sjöarna Vänern, Mälaren och Hjälmaren är ganska olika till sin karaktär. Trots detta uppvisar de en problembild med gemensamma drag. Denna är kopplad till försök att kontrollera sjöarnas vattenstånd genom regleringar och vattendomar. Samtidigt har samhällets fortsatta utbyggnad snabbt anpassat sig till förhållanden, där man tror sig ha de högsta nivåerna under kontroll. Generellt sett har vattenståndsvariationerna i sjöarna minskat genom regleringarna men detta har skett på bekostnad av att flödesvariationerna i vattendragen nedströms ökat. I Hjälmarens fall har dessutom en drastisk sänkning av vattennivån genomförts under slutet av 1800-talet.

Gemensamt för de tre sjöarna är att deras strandområden på flera platser är exponerade för stora problem i samband med höga vattenstånd redan under det klimat som råder idag. Det har också visat sig att regleringarna inte utgör någon garanti mot höga vattennivåer. En hel del av bebyggelsen och annan infrastruktur översvämmas om extrema flöden, beräknade enligt Flödeskommittén, skulle inträffa. Sannolikheten är visserligen låg för flöden på den nivån, men konsekvenserna blir stora. Erfarenheterna från översvämningarna 2000/2001 visade dessutom att stora problem uppstår redan vid flöden som är betydligt mer vanligt förekommande.

Det är tydligt att det finns stora problem med höga vattenstånd och flöden runt Vänern, Mälaren och Hjälmaren och längs Göta älv under dagens klimatförhållanden. Beträffande framtidens klimat, som det beskrivs av tillgängliga klimatscenarier, så förefaller problemen förvärras runt Vänern och längs Göta älv. Av speciellt intresse är att antalet dagar då full tappning kan komma att behövas i den skredkänsliga och översvämningsskänsliga Götaälvdalen ökar ganska drastiskt enligt samtliga klimatscenarier. Där kompliceras bilden av att havet beräknas stiga på grund av den globala uppvärmningen. Redan idag tvingas man begränsa tappningen av vatten i Göta älv vid höga havsvattenstånd och denna begränsning kan alltså väntas inträffa oftare.

För Mälaren och Hjälmaren ändras inte problembilden vad avser de allra mest extrema nivåerna speciellt mycket, men mer måttliga översvämningar med kortare återkomsttider kan komma att bli betydligt vanligare. På grund av den ändrade dynamiken i tillrinningen kan dock vattentillgången påverkas negativt sommartid för Mälardalen i framtidens klimat. De senare årens relativt milda vintrar har medfört vinterflöden i Mälardalen, som liknar de som klimatscenerierna ger. Vi har alltså fått uppleva situationer som liknar framtidens. Detta gäller dock inte scenariernas minskade sommarflöden.

Det är viktigt att betona att det finns ganska stora problem med säkerheten mot översvämningar i Mälardalen, längs Dalälven och Göta älv och runt Vänern redan under dagens klimatförhållanden. Speciellt för Vänern och Göta älv förväntas dessa förvärras av en global uppvärmning. På grund av utbyggnaden av samhällsstrukturen och de geologiska och geotekniska stabilitetsförhållandena är problematiken runt Vänern och längs Göta älv

dessutom betydligt mer svårlöst än för Mälaren och Hjälmaren. Detta är en av huvudfrågorna för den nu pågående statliga Klimat- och sårbarhetsutredningen.

Dalälven

Dalälven är ett av de vattendrag i Sverige som är mest utsatt för översvänningsrisker. En mycket dramatisk beskrivning av ett tänkbart flöde och dammhaveri har presenterats av Räddningsverket (1996) och det finns exempel på flera år med svåra översvämningar i historisk tid. Framförallt utmärker sig åren 1860 och 1916. Konsekvenserna blir mycket stora den dag dessa flöden upprepas. I Dalälvens avrinningsområde inträffade också den omtalade Fulufjällskatastrofen under sommaren 1997. Det var ett av de värsta regn som registrerats i modern tid, även om analyserna är osäkra på grund av bristen på nederbördsmätningar (Alexandersson et al., 1997). Lyckligtvis föll regnet i gleset befolkade områden.

Längs Dalälven finns ett antal områden som ofta omtalas i översvämningssammanhang. Det finns också erfarenheter, vattenståndsmarkeringar och fotografier från det dramatiska året 1916. Speciellt intressanta platser, som också specialstuderats inom projektet *Framtidens översvänningsrisker*, är Vansbro och Falun (egentligen sjön Runn). Sjön Runn är speciellt intressant eftersom dess nivå styrs helt av vattenståndet i Dalälven under höga flöden i älven. Därmed är förhållandena i hela Dalälven avgörande för riskerna i Falun.

Beräkningarna visar en viss minskning av de framtida översvänningsrisker som orsakas av höga vattenstånd i Dalälven i Vansbro, Falun och stränderna runt Runn. Resultaten är dock inte helt entydiga. Ett av klimatscenarierna antyder en ökning av risken. Det huvudsakliga skälet till minskningen är minskad beräknad vårflood i hela Dalälven. Beräkningarna gav en ökning av risken för översvämningar under hösten, men det är fortfarande våren som ger den värsta situationen även om klimatet ändras. I detta sammanhang är det viktigt att hålla i minnet att riskerna för översvämningar i Vansbro och Falun är förhållandevis stora redan under dagens klimat.

Beräkningarna för Dalälven visar att valet av beräkningsstrategi kan ha betydelse för resultaten. Den kontinuerliga beräkningen av klimatets förändring, som innebar att en annan beräkningsstrategi och en ny version av den regionala klimatmodellen tillämpades vid omräkning till flöden, gav inte den ökning av höstflöden som de fyra standardscenarierna givit tidigare. Ytterligare en osäkerhet beträffande Dalälven är att älvens reglering inte kunnat beskrivas i detalj. Detta har liten betydelse för Vansbro, som ligger längs den nästan oreglerade Västerdalälven, men det kan påverka beräkningarna för Falun något. Dalälven är dock en ganska måttligt reglerad älv. Ca 26 % av en normal årsavrinning kan regleras. Motsvarande siffra för exempelvis Luleälven är 72 % .

5.3. Något om osäkerheter

Klimatets utveckling bidrar med den största osäkerheten vid bedömning av framtidens översvämningar. Här spelar klimatscenarier en central roll. De benämns scenarier och inte prognoser för att markera att de avser en utveckling under vissa givna förutsättningar. Trots det så ges de ett visst prognostiskt värde, när de nu alltmer börjar användas i diskussioner om samhällets anpassning till ett förändrat klimat.

Inom projektet *Framtidens översvänningsrisker* har vi lagt stor vikt vid fyra olika klimatscenarier, baserade på två globala klimatmodeller, två tänkta utvecklingar av framtidens

utsläpp av växthusgaser och en regional modell för tolkning till svenska förhållanden. Avsikten är att försöka ge en bild av osäkerheten i klimatbudskapet genom att visa att olika förutsättningar, som var och en är ungefär lika sannolik, ger stora skillnader vad avser översvämningsrisker. Vi vill visa att det inte bara finns *ett* svar på frågan om framtidens klimat. Dessa fyra scenarier skiljer sig åt, främst beroende på skillnaderna i de globala modellernas beskrivning av det framtida klimatet. Men det betyder inte att utvecklingen behöver ligga inom dessa gränser. Osäkerheten är betydligt större än så. Detta är något som kommer att belysas i ett nytt EU-projekt, *ENSEMBLES*, som, nyligen inletts med medverkan från SMHIs forskningsavdelning. Trots osäkerheterna och de relativt stora skillnaderna mellan de använda klimatscenerierna så uppvisar påverkan på översvämningsriskerna ganska stora likheter. Det framgår när man närmare studerar hur kartbilderna över riskerna förändras.

Osäkerheten i klimatscenerierna är speciellt stor vad avser den beräknade förändringen av extrem nederbörd. Detta innebär att förändringen av vårflöden kan uppskattas säkrare än förändringar av regnflöden. Utöver de osäkerheter som beror på att vi inte vet exakt hur klimatet kommer att utvecklas finns det även osäkerheter orsakade av andra led i beräkningskedjan. Här har det betydelse hur klimatsceneriernas resultat överförs till den hydrologiska modellen. Detta kan göras på mer än ett sätt. Vi har försökt att belysa detta genom att använda de två metoder som benämnts *delta* respektive *scaling*. Valet av metod har främst betydelse för analysen av hur extremvärden utvecklas, något som belystes vid studierna i Dalälven.

Klimatfrågan har tillfört en ny dimension till det hydrologiska säkerhetsarbetet. Det har visat sig att det kan vara riskabelt att inte ta hänsyn till den globala uppvärmningen. Samtidigt är osäkerheten stor och nya beräkningar förväntas komma fram efterhand som forskningen framskrider. Nya resultaten har t.ex. framkommit under den tid som projektet *Framtidens översvämningsrisker* bedrivits. Detta skapar en svår beslutssituation, speciellt i ett läge då omfattande säkerhetshöjande arbete redan pågår. För Sveriges del gäller detta främst för den nu pågående översynen av dammsäkerheten i landet, men resultatet av den översiktliga översvämningskarteringen påverkas också, liksom andra skyddsåtgärder mot översvämnningar.

Likafullt måste underlag tas fram för dagens beslut, som har lång tidshorisont. De scenarier som, med reservation för osäkerheter, tas fram pekar ändå i vissa riktningar och mot vissa prioriterade områden. Genomförande av åtgärder måste ske med flexibilitet, men osäkerheten får inte tas till intäkt för att skjuta nödvändiga beslut på framtiden.

När Kommittén för komplettering av Flödeskommitténs riktlinjer bildades 2002 fick den som tilläggsuppgift att diskutera en övergripande strategi för hur klimatfrågan bör hanteras, även om det inte ansågs realistiskt att fastställa riktlinjer i detta avseende. I kommitténs slutrapport förs också en diskussion om detta (Elforsk, 2005). En slutsats som kommittén drar är att anpassning till Flödeskommitténs riktlinjer måste ha fortsatt hög prioritet och inte får bromsas upp på grund av diskussionen om ett förändrat klimat. När det gäller strategi för hantering av klimatfrågan förslås att frågan fortlopande bevakas och att flexibilitet och marginaler skapas där så är lämpligt. Detta innebär att en lämplig åtgärd kan vara att ta till en extra marginal när man ändå är på plats och genomför säkerhetshöjande åtgärder.

6. Slutsatser

Slutsatserna från projektet *Framtidens Översvämningsrisker* kan sammanfattas i följande punkter:

- **Extrema regn**

Den beräknade förändringen av extrema regn och skyfall i ett framtida klimat uppvisar en ganska splittrad bild med stora skillnader mellan de olika klimatscenarierna. Det är dock mer som tyder på en ökning än en minskning av riskerna i ett framtida klimat. Detta medför en ökning av de översvämningsrisker som är kopplade till dagvattensystem och annan direkt avrinning av regnvatten i stor sett i hela landet.

- **Dagens översvämningsrisker**

Översvämningsriskerna är stora på många håll i Sverige redan idag. Situationen har efterhand förvärrats genom att den fysiska planeringen och utbyggnaden av infrastrukturen inte fullt ut tagit hänsyn till översvämningsriskerna. Regleringar av vattendrag och sjöar har gjort det svårare att överblicka riskbilden och i många fall förstärkt överraskningseffekten vid extrema händelser.

- **Allmänt om översvämningsrisker i Sverige i framtiden**

För Sverige som helhet ökar risken för översvämnningar främst i de västra fjälltrakterna, i västra Götaland och i västra Svealand. I övriga delar av landet minskar riskerna snarare något. Det finns ingenting som tyder på att de geografiska områden som drabbas samtidigt skulle bli större i framtiden. Riskexponeringen kan ändå öka genom att tätbefolkade områden drabbas av mer intensiva regn.

- **Vänern, Mälaren och Hjälmaren**

Riskerna för översvämnningar runt Vänern förväntas öka i ett förändrat klimat. Detsamma gäller riskerna i samband med höga tappningar av vatten i Göta älv. För Mälaren och Hjälmaren ändras inte problembilden vad avser de allra mest extrema nivåerna speciellt mycket, men mer måttliga översvämnningar blir betydligt vanligare.

- **Dalälven**

Riskerna för översvämnningar i Vansbro, Falun och stränderna kring sjön Runn på grund av höga flöden i Dalälven beräknas förbli oförändrade eller minska något i ett framtida förändrat klimat. Resultaten är dock inte helt entydiga. Dessa områden är utsatta för betydande risker redan under dagens klimatförhållanden. För Dalälven innebär älvens reglering, som ju kan ändras om så krävs, att beräkningarna är något osäkrare än för övriga områden.

- **Slutord**

Alla klimatscenarier är behäftade med stora osäkerheter. Det gäller framförallt nederbörden och dess extremvärden. Under den tid som detta projekt genomförts har förändringar i modellerna skett och vi kan förvänta oss ytterligare nya beräkningar från klimatforskningen efterhand, något som kan leda till omprövningar av vissa slutsatser.

Den strategi som tillämpas i beräkningskedjan från klimatscenario till effekter har stor betydelse, framförallt för extremvärden. Detta är ett förhållande som bör belysas mer i framtiden.

När det gäller svenska vattendragen utgör regleringar ett komplicerande moment. Om man vill bedöma hur riskerna kan komma att utvecklas i framtiden måste man ta hänsyn till människans ansträngningar att kontrollera flöden och vattenstånd. Detta är speciellt viktigt i de mest utbyggda älvarna, där människan i normala fall har stora möjligheter att styra över vattenflödena, men måste sätta säkerheten i första hand vid extrema händelser. Handhavandet av magasinen kan mycket väl komma att ändras i framtiden när elmarknaden ser annorlunda ut.

Osäkerheten gör att man inte kan ge entydiga riktlinjer för hur ett anpassningsarbete till klimatförändringar skall bedrivas. Detta betyder att berörda branscher bör utveckla ett förhållningssätt till klimatfrågan som innehåller både marginaler och flexibilitet i form av möjlighet till stegvisa riskminskande åtgärder.

7. Referenser

Alexandersson, H., Eklund, A., Rapp, A. och Vedin, H. (1997) Regnkatastrof på Fulufjället. SMHI, Väder och Vatten, november.

Andréasson, J., Gardelin, M. and Bergström, S. (2002) Modelling hydrological impacts of climate change in the Lake Vänern region in Sweden. Vatten 58, 25-32.

Andréasson, J., Bergström, S., Carlsson, B., Graham, L.P. and Lindström, G. (2004) Hydrological Change – Climate Change Impact Simulations for Sweden. Ambio 33 (4-5), 228-234.

Andréasson, J., Gardelin, M., Hellström, S-S. och Bergström S. (2006) Känslighetsanalys av Flödeskommitténs riktlinjer i ett framtida förändrat klimat. Elforskrapport 06:XX.

Bergström, S. (1976) Development and application of a conceptual runoff model for Scandinavian catchments. SMHI, RHO 7, Norrköping.

Bergström, S. (1992) The HBV Model – its structure and applications. SMHI, RH 4, Norrköping.

Bergström, S. (1994) Sveriges hydrologi – grundläggande hydrologiska förhållanden SMHI/Svenska hydrologiska rådet.

Bergström, S. (1999) Höga vattenflöden i reglerade älvar. SMHI, Fakta 1, Norrköping.

Bergström, S., Carlsson, B., Gardelin, M., Lindström, G., Pettersson, A. and Rummukainen, M. (2001) Climate change impacts on runoff in Sweden - assessments by global climate models, dynamical downscaling and hydrological modelling. Climate Research 16 (2), 101-112.

Bernes C. (2003) En varmare värld: växthuseffekten och klimatets förändringar. NV Monitor 18.

Döscher, R., Willén, U., Jones, C., Rutgersson, A., Meier, H.E.M., Hansson, U. and Graham, L.P. (2002) The development of the regional coupled ocean-atmosphere model RCAO. Boreal Environment Research 7, 183-192.

Döscher R. and Meier. H.E.M. (2004) Simulated Sea Surface Temperature and Heat Flux in Different Climates of the Baltic Sea. Ambio 33(4-5), 242-248.

Ehlert, K. (1970) Mälarens hydrologi och inverkan på denna av alternativa vattenavledningar från Mälaren (The hydrology of Lake Mälaren and influencing effects from alternative water releases, in Swedish). SMHI, RH 8, Norrköping.

Elforsk (2005) Dammsäkerhet – Dimensionerande flöden för stora sjöar och små tillrinningsområden samt diskussion om klimatfrågan. Elforsk Rapport 05:17, Stockholm.

Flödeskommittén (1990) Riktlinjer för bestämning av dimensionerande flöden för dammanläggningar. Slutrapport från Flödeskommittén. Statens Vattenfallsverk, Svenska Kraftverksföreningen, SMHI, Stockholm och Norrköping.

Gardelin, M., Bergström, S., Carlsson, B., Graham, L.P. and Lindström, G. (2002) Climate change and water resources in Sweden – Analysis of uncertainties. Climatic Change: implications for the Hydrological Cycle and for water management. In: Beniston M. (ed). Advances in Global Change Research. Kluwer Academic Publische, Dordrecht, 189-207.

Gordon, C., Cooper, C., Senior, C.A., Banks, H., Gregory, J.M., Johns, T.C., Mitchell, J.B.F. and Wood, R.A. (2000) The simulation of SST, sea ice extents and ocean heat transport in a version of the Hadley Centre coupled model without flux adjustments, Climate Dynamics 16, 147-168.

Graham, L.P. (2004) Climate change effects on river flow to the Baltic Sea. Ambio 33(4-5), 235-241.

Granström, C. (2003) Vattenståndsmätningar i Mälaren. SMHI, Väder och Vatten 8. Norrköping.

IPCC. <http://www.ipcc.ch/present/present.htm> (060430).

Jordbruksdepartementet (1976) Översvämningsskydd i Västerdalälven. Betänkade avgivet av utredningen (Jo 1975:1) rörande översvämningsskydd i Västerdalälven. Stockholm.

Kjellström, E. (2004) Recent and future signatures of climate change in Europe. Ambio 33(4-5), 193-198.

Kjellström, E., Bärring, L., Gollvik, S., Hansson, H., Jones, C., Samuelsson, P., Rummukainen, M., Ullerstig, A., Willén U. and Wyser, C. (2006) A 140-year simulation of European climate with the new version of the Rossby Centre regional atmospheric climate model (RCA3). SMHI, RMK 108, Norrköping.

- Lindström, G. (1993) Floods in Sweden - Trends and occurrence. SMHI, RH 6, Norrköping.
- Lindström, G., Gardelin, M., Johansson, B., Persson, M. och Bergström, S. (1996) HBV-96 – En areellt fördelad modell för vattenkrafthydrologin. SMHI, RH 12, Norrköping.
- Lindström, G. (2002) Vattentillgång och höga flöden i Sverige under 1900-talet. SMHI, RH 18, Norrköping.
- Meier, H.E.M., Broman, B. and Kjellström, E. (2004a) Simulated sea level in past and future climates of the Baltic Sea. *Climate Research* 27, 59-75.
- Meier, H.E.M., Döscher, R. and Halkka, A. (2004b) Simulated distributions of Baltic sea-ice in warming climate and consequences for the winter habitat of the Baltic ringed seal. *Ambio* 33(4-5), 249-256.
- Nakićenović, N and coauthors. (2000) Emission Scenarios. A special Report of Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press.
- Norell, B. (2000) Vattenståndsmätningar i Vänern. SMHI, Väder och vatten 7, Norrköping.
- Pope, D.V., Gallani, M., Rowntree, R. and Stratton, A. (2000) The impact of new physical parameterizations in the Hadley Centre climate model: HadAM3. *Climate Dynamics* 16, 123-146.
- Roeckner E, Bengtsson L., Feichter J, Lelieveld J. and Rodhe H. (1999) Transient climate change simulations with a coupled atmosphere-ocean GCM including the tropospheric sulphur cycle. *Journal of Climate* 12(10), 3004-3032.
- Räddningsverket (1996) Störtflod i Dalälven – Ett scenario. Rapport baserad på ett arbete för Hot- och riskutredningen, Statens Räddningsverk, Karlstad.
- Räisänen, J., Hansson, U., Ullerstig, A., Döscher, R., Graham, L.P., Jones, C., Meier, M., Samuelsson, P. and Willén, U. (2003) GCM driven simulations of recent and future climate with the Rossby Centre coupled atmosphere – Baltic Sea regional climate model RCAO. SMHI, RMK 101, Norrköping.
- Räisänen, J., Hansson, U., Ullerstig, A., Döscher, R., Graham, L.P., Jones, C., Meier, H.E.M., Samuelsson, P. and Willén, U. (2004) European climate in the late twenty-first century: regional simulations with two driving global models and two forcing scenarios. *Climate Dynamics* 22, 13-31.
- Schröder, E. (2003) *Översvämningar i Sverige – orsakssammanhang och fördjupad frekvensstudie för Vänern och Mälaren*. Magisteruppsats från Miljövetareprogrammet, Linköpings Universitet, Institutionen för tematisk utbildning och forskning, campus Norrköping.
- SEAREG (2004) Nyhetsbrev 1 (2). Available from <http://www.smhi.se/sgn0106/if/rc/projects/SEAREG.html>.

Sveriges Nationalatlas (2004) Klimat, sjöar och vattendrag. Bokförlaget Bra Böcker, Höganäs.

Statens naturvårdsverk (1978) Vänern- en naturresurs. LiberFörlag/Allmänna förlaget, Stockholm. ISBN:91-38-03898-6

Svenska Kraftverksföreningen och Vattenfall (1987) Hydropower in Sweden, Stockholm.

SMHIs publications

SMHI publishes six report series. Three of these, the R-series, are intended for international readers and are in most cases written in English. For the others the Swedish language is used.

Names of the Series	Published since
RMK (Report Meteorology och Climatology)	1974
RH (Report Hydrology)	1990
RO (Report Oceanography)	1986
METEOROLOGI	1985
HYDROLOGI	1985
OCEANOGRAFI	1985

Earlier issues published in serie RH

1. Sten Bergström, Per Sandén and Marie Gardelin (1990)
Analysis of climate-induced hydrochemical variations in till aquifers.
2. Maja Brandt (1990)
Human impacts and weather-dependent effects on water balance and water quality in some Swedish river basins.
3. Joakim Harlin (1992)
Hydrological modelling of extreme floods in Sweden.
4. Sten Bergström (1992)
The HBV model - its structure and applications.
5. Per Sandén and Per Warfvinge (1992)
Modelling groundwater response to acidification.
6. Göran Lindström (1993)
Floods in Sweden — Trends and occurrence.
7. Sten Bergström and Bengt Carlsson (1993)
Hydrology of the Baltic Basin. Inflow of fresh water from rivers and land for the period 1950 - 1990.
8. Barbro Johansson (1993)
Modelling the effects of wetland drainage on high flows.
9. Bengt Carlsson and Håkan Sanner (1994)
Influence of river regulation on runoff to the Gulf of Bothnia. Gulf of Bothnia Year 1991.
10. Göran Lindström, Marie Gardelin and Magnus Persson (1994)
Conceptual modelling of evapotranspiration for simulations of climate change effects.
11. Vacant
12. Göran Lindström, Marie Gardelin, Barbro Johansson, Magnus Persson och Sten Bergström (1996)
HBV-96 - En areellt fördelad modell för vattenkrafthydrologin.
13. Berit Arheimer, Maja Brandt, Gun Grahn, Elisabet Roos och Allan Sjöö (1997)
Modellerad kvävetransport, retention och källfördelning för södra Sverige.
14. Bengt Carlsson, Sten Bergström (1998)
The TELFLOOD project. Rainfall –Runoff Modelling and forecasting.
15. Barbro Johansson (2000)
Precipitation and Temperature in the HBV Model
A Comparison of Interpolation Methods.

16. Charlotta Pers (2002)
Model description of BIOLA - a
biogeochemical lake model.
17. Malva Ahlkrona (2002)
Phosphorous in a Biogeochemical Lake
Model.
18. Göran Lindström (2002)
Vattentillgång och höga flöden i Sverige
under 1900-talet.



Swedish Meteorological and Hydrological Institute
SE-601 76 Norrköping · Sweden
Tel +46 11 495 80 00 · Fax +46 11 495 80 01