SMHI

KLIMATOLOGI Nr 6, 2013

Extrem korttidsnederbörd i klimatprojektioner för Sverige

Jonas Olsson och Kean Foster

Pärmbilden föreställer ett oväder över Kuddby (foto: Anders Lindgren).

ISSN: 1654-2258 © SMHI

KLIMATOLOGI Nr 6, 2013

Extrem korttidsnederbörd i klimatprojektioner för Sverige

Jonas Olsson och Kean Foster

Sammanfattning

Klimatförändringen förväntas leda till mera intensiv korttidsnederbörd, vilket kan få negativa konsekvenser för t.ex. urban hydrologi. I denna studie analyseras extrem korttidsnederbörd i Sverige simulerad med den regionala klimatmodellen RCA3. En observerad svag ökning från period 1961-1990 till period 1981-2010 av dygnsnederbörd med 10 års återkomsttid kan kvalitativt återskapas av RCA3-modellen, både när den drivs med meteorologisk återanalys (ERA40) och med en ensemble av sex globala klimatprojektioner. Detta är ingen garanti för att simulerade framtida förändringar är korrekta, men tyder på en förmåga att beskriva förändringar av dygnsextremer ifall randvillkoren är de rätta. I ensemblen av framtida projektioner ökar 10-års 30-min nederbörden med 6% från 1981-2010 till 2011-2040, 15% till 2041-2070 och 23% till 2071-2100. Ökningen minskar med ökande varaktighet och på dygnsskala är de relativa förändringarna ungefär halverade. Analyser av inverkan på resultatet av dels den specifika modell som användes (RCA3), dels dess rumsliga upplösning (50 km) antydde möjligheter till både lägre och högre värden på de framtida förändringarna.

En syntes av den forskning kring framtida korttidsextremer som utförts i Sverige till dags dato tyder på en förväntad ökning av extrem korttidsnederbörd (≤ 1 tim) med 10% till mitten av seklet (2050) och 25% till slutet av seklet (2100). Låga och höga uppskattingar bedöms till ±10 procentenheter från de förväntade värdena men även större avvikelser är möjliga. För dygnsextremer förväntas ökningen bli fem procentenheter lägre.

Summary

Climate change is expected to generate higher short-term precipitation intensities, which may have negative consequences for e.g. urban hydrology. In this study, extreme short-term precipitation in simulations with the RCA3 regional climate model for Sweden are analysed. An observed weak increase in the 10-year daily precipitation from 1961-1990 to 1981-2010 is qualitatively reproduced in RCA3 simulations forced with both meteorological re-analyses and an ensemble of six global climate projections. This does not guarantee that estimated future changes are correct, but indicates an ability of the model to describe changes in daily extremes when appropriate boundary conditions are used. In the ensemble of future projections, from 1981-2010 the 10-year 30-min precipitation will increase by 6% until 2011-2040, 15% until 2041-2070 and 23% until 2071-2100. The increase decreases with increasing duration and at the daily scale the percentage values are approximately halved. Assessment of the impacts on the results of both the specific RCM used (RCA3) and its spatial resolution (50 km) suggested possibilities of both lower and higher future changes.

A synthesis of the work on future short-term precipitation extremes performed in Sweden to date suggests an expected 10% increase of the intensity related to very short durations (≤ 1 h) until 2050 and a 25% increase until 2100. Low and high estimates are suggested to be ±10 percentage points from the expected values but also larger deviations are possible. For duration 1 day, the increase is estimated to become five percentage points lower.

Innehållsförteckning

1 BAKGRUND 1

2 SYFTE OCH BEGRÄNSNINGAR 1

3 MATERIAL 2

4 METODIK 3

5 RESULTAT OCH DISKUSSION 4

5.1 Historisk förändring från [1961-1990] till [1981-2010] 5

5.2 Framtida förändringar 7

5.2.1 Förändring från [1981-2010] till [2011-2040] 7

5.2.2 Förändring från [1981-2010] till [2041-2070] 7

5.2.3 Förändring från [1981-2010] till [2071-2100] 8

5.3 Kompletterande analyser 15

5.3.1 Återkomsttid 100 år 15

5.3.2 Äldre vs. nyare projektioner 15

5.3.3 Inverkan av regional klimatmodell 15

5.3.4 Inverkan av den regionala klimatmodellens rumsliga upplösning 15

5.4 Jämförelse med angränsande studier och syntes 16

6 AVSLUTANDE KOMMENTARER 18

TACKORD 19

REFERENSER 19

1 Bakgrund

Klimatförändringen förväntas allmänt påverka nederbördens fördelning i tid och rum. Denna slutsats har dragits dels genom teoretiska resonemang (t.ex. Trenberth m.fl., 2003) men främst genom simuleringar med klimatmodeller (t.ex. Kjellström m.fl., 2011; Nikulin m.fl., 2011). En förväntad effekt av klimatförändringen är intensivare korttidsnederbörd, d.v.s. nederbörd med en kort varaktighet av timmar eller mindre. Detta beror främst på att en varmare atmosfär kan innehålla mer vattenånga, vilket skapar förutsättningar för kraftigare momentan nederbörd. En sådan intensifiering skulle påverka t.ex. avrinningen i urban miljö, som p.g.a. den stora andelen hårdgjord yta är direkt kopplad till korttidsnederbördens intensitet. Potentiellt negativa effekter inkluderar inflöde av dagvatten till reningsverk som överskrider kapaciteten, med ökad bräddning som följd, samt översvämningar i ledningsnätet.

I klimatmodellberäkningarna används ett kort tidssteg, från några minuter upp emot en halvtimme. Data sparas emellertid inte på denna höga tidsupplösning utan t.ex. som timvärden. Utvärdering av nederbörd från klimatmodellsimuleringar sker emellertid oftast på dygnssteg eller längre (månad, årstid). De främsta skälen till att kortare tidssteg sällan utvärderas torde vara att (1) att utvärderingens fokus normalt ligger på ackumulerad nederbörd över längre perioder, (2) nederbördsobservationer oftast har dygnsupplösning och (3) simulerad nederbörd på korta tidssteg är mera osäker än på dygnssteg (t.ex. Hanel och Buishand, 2010).

Således har endast ett fåtal analyser hittills gjorts av korttidsnederbörd i klimatprojektioner för Sverige. De som gjorts har generellt visat på en ökning med 0-25% till mitten av seklet och 5-30% till slutet av seklet (t.ex. Lenderink och van Meijgaard, 2008; Olsson m.fl., 2009, 2010), men även kraftigare ökningar har indikerats (t.ex. Larsen m.fl., 2009). Eftersom analyserna gällt enskilda platser och/eller projektioner är osäkerheten stor.

2 Syfte och begränsningar

Syftet med denna studie är att ge en bild av vad SMHIs nuvarande regionala klimatprojektioner indikerar vad gäller framtida extrem korttidsnederbörd i hela Sverige. Den metodik som används bygger på extremvärdesanalys av årliga nederbördsmaxima mellan varaktigheter 30 min och 1 dygn, extraherade från en ensemble av sex klimatprojektioner drivna av olika globala klimatmodellkörningar. Resultatet uttrycks i procentuell förändring för olika varaktigheter, framtidsperioder och i vissa fall även olika regioner. Osäkerheten i resultatet, d.v.s. spridningen mellan olika projektioner, kvantifieras och diskuteras. Avslutningsvis görs en syntes av den totala mängden forskning om framtida extrem korttidsnederbörd som utförts i Sverige.

Förutom antalet projektioner som analyserats har studien två tydliga begränsningar. Den första är att de regionala klimatprojektionerna har en rumsupplösning på 50×50 km, vilket motsvarar ett avsevärt större område än den lokala skala på vilken extrem korttidsnederbörd har störst påverkan (ner till enskilda km²). Således måste antas att framtida förändringar på skala 50×50 km är representativa också för förändringar på den lokala skalan, vilket inte behöver vara fallet. Den andra tydliga begränsningen är att bara en regional klimatmodell (RCA3) används. Det är väl känt att nederbörden simulerad med olika regionala modeller kan variera kraftigt (t.ex. Lenderink, 2010). Kompletterande studier görs i avsnitt 5.3 för att kvalitativt uppskatta inverkan av dessa båda begränsningar.

Eftersom enbart relativa förändringar mellan perioder beräknas görs ingen analys av RCA3-modellens förmåga att beskriva klimatet i absoluta termer. Det är emellertid väl känt att nederbörden i regionala klimatmodeller har systematiska fel (bias) som varierar med drivning,

region och tidsskala. För Sveriges del överskattas typiskt både årstidstotaler och årliga dygnsmaxima med ~20% i RCA3-modellen (Kjellström m.fl., 2011; Nikulin m.fl., 2011). Vi behöver således göra antagandet att denna bias inte ogiltigförklarar modellens förmåga att beskriva framtida relativa förändringar.

3 Material

Data från sex regionala klimatprojektioner användes (Tabell 1). De är baserade på två globala klimatmodeller, HadCM3 och två versioner (4, 5) av ECHAM, som dynamiskt nedskalats över Europa med SMHI:s regionala klimatmodell RCA3 (Kjellström m.fl., 2011). Ensemblen innehåller tre IPCC utsläppsscenarier - A2, A1B och B2 - som grovt motsvarar kraftig, måttlig och svag framtida ökning av växthusgaskoncentrationen i atmosfären (Nakićenović m.fl., 2000). För kombinationen ECHAM5 och A1B har tre olika initialiseringar av den globala klimatmodellen använts. Dessa avspeglar osäkerheten kopplad till klimattillståndet vid simuleringens start och den resulterande reproduktionen av historiska lågfrekventa klimatsvängningar.

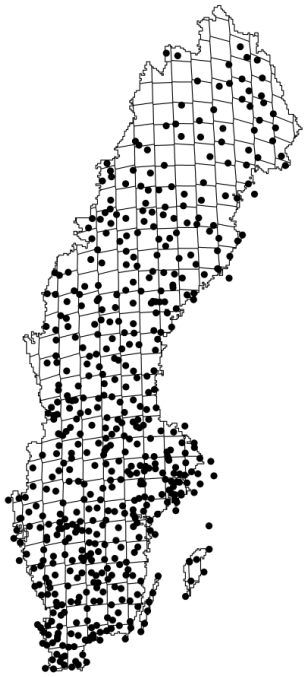
Tabell 1. Analyserade klimatprojektioner.

Förkortning	Global klimatmodell (institut)	IPCC	Init.
E4_A2	ECHAM4 (Max Planck Inst.)	A2	-
E4_B2	ECHAM4 (Max Planck Inst.)	B2	-
E5_1	ECHAM5 (Max Planck Inst.)	A1B	1
E5_2	ECHAM5 (Max Planck Inst.)	A1B	2
E5_3	ECHAM5 (Max Planck Inst.)	A1B	3
HC_3	HadCM3 (Hadley Centre)	A1B	-

Det kan nämnas att två av projektionerna (E4_A2, E4_B2) är några år äldre än de övriga och att en ny version av ECHAM-modellen (5) utvecklats sedan dess. Att dessa projektioner ändå tagits med här beror dels på att de representerar andra utsläppsscenarier än övriga projektioner, dels att de var centrala i Klimat- och sårbarhetsutredningen (SOU, 2007) och därför ligger till grund för mycket av den rådande uppfattningen kring klimatets framtida förändring i Sverige. Det är sålunda intressant att se ifall nyare projektioner skiljer sig i något avseende och en översiktlig jämförelse m.a.p. extrem korttidsnederbörd görs i avsnitt 5.3.2.

Alla projektioner täcker perioden 1961-2100. Ur resultaten har 30 år långa tidsserier med 30-min nederbörd extraherats för samtliga modellgridrutor i Sverige (Figur 1). Två referensperioder har extraherats, 1961-1990 (R1) och 1981-2010 (R2). Period R1 motsvarar WMO:s normalperiod och är den som hittills vanligen använts i klimatförändringssammanhang. Emellertid har klimatet nu hunnit ändra sig en del sedan dess och därför används i denna studie främst den senaste 30-årsperioden (R2). Tre framtida 30-årsperioder motsvarande olika tidshorisont har extraherats; 2011-2040 (F1), 2041-2070 (F2) och 2071-2100 (F3).

Resultaten kan vidare jämföras med trendanalyser i historiska nederbördsserier. I denna studie gjordes en jämförelse mellan R1 och R2 av uppskattad dygnsnederbörd med 10 års återkomsttid baserad på data från utvalda SMHI-stationer (Figur 1). Kravet på stationerna var att minst 15 års data ska finnas i både R1 och R2. Till de årliga dygnsmaxima i varje period anpassades Gumbel-fördelningen (se kapitel 4) varur 10-årsvärdet uppskattades. Avslutningsvis beräknades den relativa förändringen från R1 till R2.



Figur 1. Gridrutor för RCA3-modellen (50×50 km upplösning) och de stationer som användes.

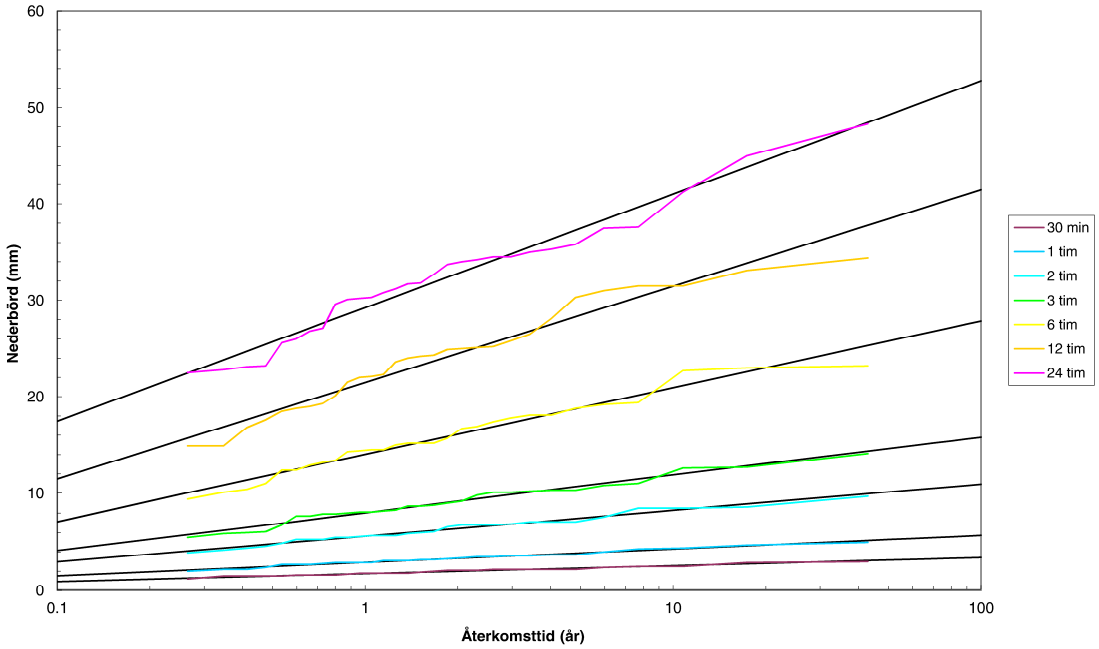
4 Metodik

För varje modellgridruta och tidsperiod beräknades årliga maxima för sex olika varaktigheter: 30 min, 1 tim, 3 tim, 6 tim, 12 tim och 1 dygn. För varaktigheter > 30 min har dessa maxima beräknats med ett 'glidande tidsfönster', d.v.s. ackumulationerna är genomgående gjorda med 30 min mellanrum. För varje kombination av modellgridruta, tidsperiod och varaktighet anpassades till dessa 30 årliga maxvärden en sannolikhetsfördelning anpassad för extremvärden kallad Gumbel-fördelning (WMO, 1981). Detta är en medlem av en familj av fördelningar kallad GEV-fördelning (*Generalized Extreme Value*), i vilken de tre medlemmarna definieras av värdet på parametern θ kopplad till fördelningens form. Fallet θ = 0 ger en Gumbel-fördelning, θ > 0 en Fréchet- fördelning och θ < 0 en Weibull-fördelning (fördelningarna kallas också GEV typ I, II och III).

En inledande analys av parametern θ gjordes genom att optimera GEV-fördelningen till maxvärden för olika varaktigheter över hela Sverige. Resultaten visade att θ i genomsnitt är mycket nära 0, med begränsad spridning mot både positiva och negativa värden och utan tydliga geografiska mönster. Detta visar att Gumbel-fördelningen är lämplig som generell fördelning och därför används denna i den fortsatta analysen. Anpassningen av Gumbel-fördelningen till maxvärdena är generellt god för alla varaktigheter (Figur 2).

Ur Gumbel-fördelningen anpassad till varje kombination av modellgridruta, tidsperiod och varaktighet beräknades nederbörden motsvarande 10 och 100 års återkomsttid. För varje kombination av modellgridruta och varaktighet beräknades relativa skillnader mellan nederbörden för olika tidsperioder.

För att bedöma ifall beräknade förändringar är signifikanta på Sverige-skala användes statistiska tester. En lämplig nollhypotes är då att medelvärdet av förändringen taget över alla modellgridrutor är lika med noll. Kan denna nollhypotes förkastas är den beräknade förändringen således statistiskt signifikant. Vanligen används i detta fall t-test, vilket dock



Figur 2. Exempel på anpassning av Gumbel-fördelningen (svarta linjer) till observerade årliga maxima för olika varaktigheter (färgade linjer) från en modellgridruta.

förutsätter normalfördelade värden. För att verifiera detta användes Lilliefors test, med nollhypotesen att värdena är normalfördelade. Resultaten visade att i c:a hälften av fallen (d.v.s. kombinationer av projektioner, 30-års perioder och varaktigheter) kunde nollhypotesen förkastas (med 5% signifikans) och värdena var således inte normalfördelade (detta berodde generellt på en något förhöjd förekomst av höga extremer som inte var förenlig med en normalfördelning). Därför användes i stället teckentest (med 5% signifikans), som inte förutsätter normalfördelade värden och som har nollhypotesen att medianvärdet av förändringen är lika med noll.

5 Resultat och diskussion

Den huvudsakliga redovisningen av de framtida förändringarna sker i form av kartor i vilka förändringen medelvärdesbildats över de sex projektionerna (avsnitt 5.2). Dessutom visas kartor över standardavvikelsen mellan projektionerna, för att kvantifiera osäkerheten i medelförändringen.

Innan analyserna av framtida perioder görs i avsnitt 5.1 en jämförelse mellan de två referensperioderna R1 (1961-1990) och R2 (1981-2010) och även observations-baserade utvärderingar. Detta är av intresse t.ex. eftersom VA-tekniska dimensioneringsanvisningar hittills varit baserade på äldre nederbördsstatistik (Svenskt Vatten, 2004), motsvarande R1 (och ännu tidigare), men att successivt allt mer högupplösta nederbördsdata från de senaste decennierna, motsvarande R2, blivit tillgängligt och analyserats (Wern och German, 2009). Efter resultaten för de olika framtidsperioderna (5.2) redovisas kortfattade resultat för återkomsttid 100 år (5.3.1) samt skillnaderna mellan äldre och nyare projektioner (5.3.2). Efter kvalitativa analyser av inverkan av dels klimatmodellens rumsliga upplösning (5.3.3), dels valet av regional modell (5.3.4) avslutas kapitlet med en sammanfattande syntes (5.4).

5.1 Historisk förändring från [1961-1990] till [1981-2010]

I större delen av Sverige indikeras i klimatprojektionerna en svag ökning av 10-års dygnsnederbörd från R1 till R2, med upp till 10% (Figur 3a). Det finns ett område med kraftigare ökning vid mellersta norrlandskusten men också områden i norra Sverige i vilka nederbörden minskar i projektionerna. I genomsnitt över hela landet sker en svag ökning med3.7%. För enskilda projektioner varierar ökningen mellan 7.6% och 0.4%. Den sistnämnda förändringen, i projektion E5_1 (Tabell 1), är enligt teckentestet inte statistiskt signifikant men förändringarna i övriga fem projektioner är signifikanta.

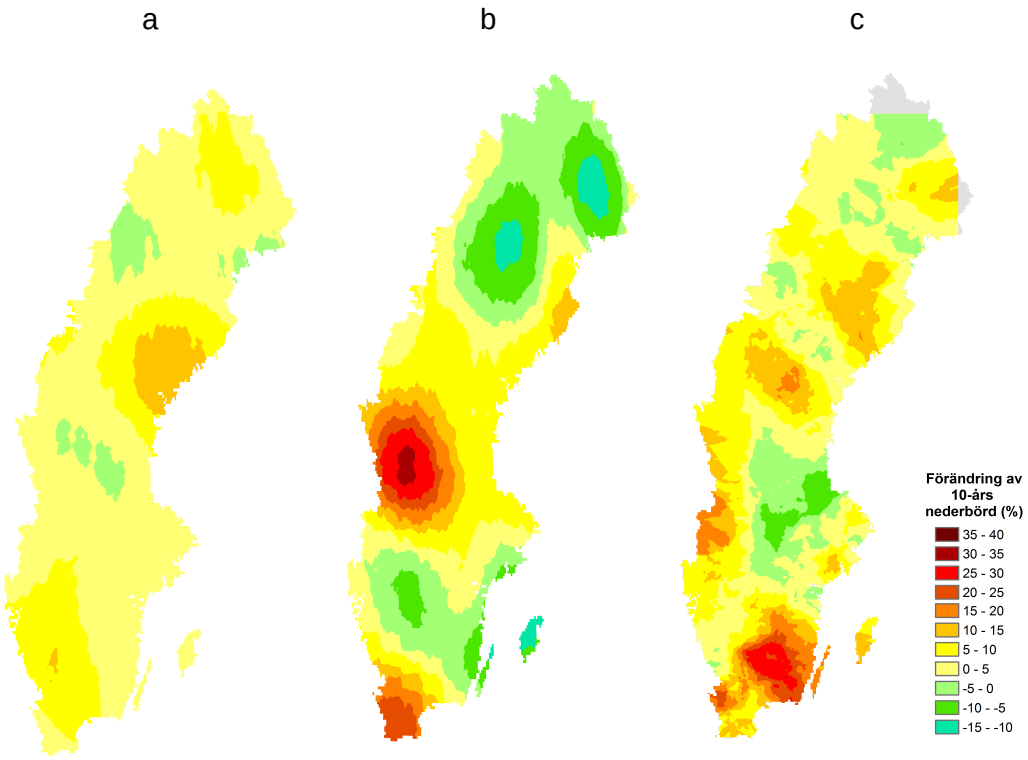
En svårighet med globala klimatprojektioner är, som tidigare nämnts, att lågfrekventa historiska klimatsvängningar är mer eller mindre väl reproducerade i de globala modellerna och modellklimatet således mer eller mindre i fas med det verkliga. Resultat från analyser avnärliggande eller överlappande perioder kan vara starkt påverkade av klimatsvängningarna, och hur väl de reproduceras, och avspegla dessa snarare än långsiktiga trender. Som en kompletterande utvärdering har därför en motsvarande analys gjorts för en RCA3-simulering med en meteorologisk återanalys (ERA40; Uppala m.fl., 2005) som randvärden i stället för en global klimatprojektion. Återanalyser, som inkluderar både modellresultat och olika sorters väderobservationer, är det bästa tillgängliga verktyget för att beskriva atmosfärens tillstånd under de senaste decennierna. Resultaten från RCA3, när den drivits av återanalysdata, ger således den mest troliga bilden av vad som verkligen hänt och kan dessutom jämföras direkt mot observerat klimat.

Generellt indikeras i den ERA40-drivna simuleringen att 10-årsnederbörden har minskat från R1 till R2 i norra Norrland och vissa områden i sydost emedan den ökat i resten av landet (Figur 3b). Vad gäller regional fördelning finns vissa likheter med mönstret i GCM-projektionerna (Figur 3a), men också tydliga skillnader och framför allt är förändringarna avsevärt tydligare i ERA40-simuleringen. Det kan påpekas att ett medelvärde av en ensemble av projektioner till sin natur är mera rumsligt utslätad än resultatet från en enskild simulering.

Förändringen i enskilda gridrutor variarar mellan c:a +40% och -15%. I genomsnitt över hela landet och alla varaktigheter sker i ERA40-simuleringen en statistiskt signifikant ökning med knappt 3.6%, vilket alltså närapå exakt överensstämmer med ökningen i GCM-projektionernas medelvärde. Mot bakgrund av skillnaderna i rumsliga mönster (Figur 3a-b) och de väl kända osäkerheterna i klimatmodellsimulerad nederbörd ska denna överensstämmelse absolut inte övertolkas. Dock tyder det likartade resultatet på att trenden i den drivning av RCA3 som sker genom GCM-ensemblen är tillräckligt lik trenden i ERA40-drivningen för att reproducera förändringen av 10-års dygnsnederbörd i den ERA40-simuleringen.

Resultaten kan vidare jämföras med trendanalyser i historiska dygnsnederbördsserier. Tidigare undersökningar har i allmänhet inte kunnat visa på några tydliga trender (t.ex. Häggström, 2001; Hernebring, 2006; Bengtsson, 2008). För denna studie gjordes en jämförelse mellan R1 och R2 av uppskattad dygnsnederbörd med 10 års återkomsttid baserad på data från utvalda SMHI-stationer (Figur 1). Kravet på stationerna var att minst 15 års data ska finnas i både R1 och R2. Till de årliga dygnsmaxima i varje period anpassades GEV-fördelningen (se kapitel 4) varur 10-årsvärdet uppskattades. Avslutningsvis beräknades den relativa förändringen från R1 till R2.

Vad gäller den rumsliga fördelningen är bilden totalt sett relativt likartad RCA3-resultaten; en generell ökning på 0-10% (gula områden) och isolerade områden med antingen en kraftigare ökning eller en minskning av 10-års nederbörden (Figur 3c). Områdena överensstämmer inte tydligt med ERA40-simuleringen även om vissa likheter finns. Det bör understrykas att extremvärdesanalyser till sin natur är förknippade med stora osäkerheter och att en del av de



Figur 3. Relativ förändring av dygnsnederbörd med 10 års återkomsttid från period R1 (1961-1990) till R2 (1981-2010) i medelvärdet av GCM-projektionerna (a), ERA40-simuleringen (b) och observationer (c).

mönster som framträder därför är resultat av slumpmässig variation snarare än verklig signal. Sett över hela Sverige är dock den genomsnittliga ökningen på 6.4% statistiskt signifikant.

Förutom dygnsnederbörd beräknades skillnader mellan 10-års nederbörden i referensperioderna också för kortare varaktigheter i RCA3-simuleringarna, ner till 30 min. Vad gäller GCM-projektionernas medelvärde är ökningen generellt något större för kortare varaktigheter, i genomsnitt ~5%, dock ökar också spridningen mellan projektionerna med minskande varaktighet. Två projektioner, E5_2 och E5_3 (Tabell 1), indikerar inte någon statistiskt signifikant förändring mellan referensperioderna för varaktighet < 1 dygn. Även i ERA40-simuleringen är ökningen ~5% mellan referensperioderna.

Resultatet för korta varaktigheter kan jämföras med det fåtal analyser som gjorts av uppmätt korttidsnederbörd i ett antal svenska städer i syfte att hitta eventuella trender under 1900-talet och främst de senaste decennierna (t.ex. Hernebring, 2006; Bengtsson och Milotti, 2008). Analyserna har gjorts främst genom visuell granskning av gamla och nya varaktighetskurvor eller av diagram över hur det årliga maxvärdet eller det årliga antalet stora korttidsregn varierat sedan 1970- och 1980-talet. Svaga trender mot både ökande och minskande korttidsregn har återfunnits för olika städer och varaktigheter och den generella slutsatsen har varit att underlaget är för begränsat och osäkert för att någon säker slutsats ska kunna dras. Den svaga ökning av extrem korttidsnederbörd som indikerades i RCA3-simuleringarna har således inte kunnat verifieras i empiriska analyser av observationer, men heller inte kunnat förkastas.

5.2 Framtida förändringar

I Tabell 2 redovisas i kolumn MED den genomsnittliga förändringen av 10-årsnederbörden i Sverige för alla varaktigheter, från referensperiod R2 (1981-2010) till alla framtidsperioder. Även det minsta (MIN) och högsta (MAX) värdet redovisas som ett mått på spridningen över landet. I följande avsnitt beskrivs och diskuteras resultaten för varje framtidsperiod med fokus på geografiska skillnader samt variationer mellan projektioner och statistisk signifikans.

Tabell 2. Uppskattad procentuell förändring av 10-årsnederbörden i Sverige för olika varaktigheter; medelvärde (MED) samt minsta (MIN) och högsta (MAX) värde från sex klimatprojektioner.

	R2 → F1 (%)			R2 → F2 (%)			R2 → F3 (%)		
	MIN	MED	MAX	MIN	MED	MAX	MIN	MED	MAX
30 min	-7	+6	+17	+7	+15	+24	+13	+23	+35
1 h	-5	+4	+18	+3	+11	+19	+7	+18	+28
3 h	-4	+4	+15	+2	+10	+17	+6	+16	+26
6 h	-2	+4	+12	+3	+9	+17	+7	+15	+25
12 h	+1	+4	+11	+3	+9	+17	+8	+14	+25
1 d	-1	+3	+9	+3	+8	+16	+7	+13	+23

5.2.1 Förändring från [1981-2010] till [2011-2040]

I likhet med skillnaderna mellan de båda referensperioderna (Figur 3a) finns även i förändringen från R2 till F1 områden med både ökande och minskande korttidsnederbörd, utan tydligt geografiskt mönster (Figur 4). För de längre varaktigheterna indikeras en minskande 10-års nederbörd främst i sydost, men denna tendens försvinner med minskande varaktighet. Totalt sett syns inga tydliga rumsliga mönster utan den genomsnittliga ökningen representerar överlag väl hela landet. Denna ökning är 3.4% för varaktighet 1 dygn och ökar gradvis till 5.9% för 30 min.

Vad gäller spridningen mellan projektioner, kvantifierad genom standardavvikelsen (Figur 5), syns för korta varaktigheter (≤ 3 tim) förhöjda värden i främst södra och mellersta Norrland. Detta indikerar att osäkerheten är störst i detta område. Götaland och Svealand har generellt sett relativt låg standardavvikelse för alla varaktigheter. Totalt sett ökar standardavvikelsen från 3.1% för 1 dygn till 8.9% för 30 min. Fyra av projektionerna visar på en statistisk signifikant ökning emedan de båda andra (normalt E4_B2 och E5_1) visar på en svag, icke signifikant förändring eller för enstaka varaktigheter t.o.m. en statistiskt signifikant minskning.

Kartorna från de enskilda projektionerna (ej visade) ger en fördjupad bild av spridningen. Det framgår att minskningen vid mellersta norrlandskusten för 30 min är starkt påverkad av främst projektion E4_B2 men också E5_1. Den tydliga ökningen i nordvästra Götaland är emellertid inte starkt kopplad till någon enskild projektion, vilket också indikeras av den låga standardavvikelsen (Figur 5). Även för varaktigheter 3 tim och 1 dygn sticker projektion E4_B2 ut med kraftig minskning längs norrlandskusten och i västra Svealand.

5.2.2 Förändring från [1981-2010] till [2041-2070]

Skillnaden mellan R2 och F2 uppvisar något tydligare rumsliga mönster än tidigare jämförelser (Figur 6). För varaktighet 30 min sker den kraftigaste ökningen i västra Sverige, med lokalt upp till 30%. Från detta område avtar ökningen både söderut, österut och norrut. För längre

varaktigheter sker den kraftigaste ökningen i ett band från den mellersta delen av fjällkedjan ner mot den södra norrlandskusten, men mönstret blir svagare med ökad varaktighet. Ett litet område med minskande nederbörd finns kvar utom för varaktighet 30 min.

För Sverige som helhet ökar ökningen markant med minskande varaktighet. För varaktighet 1 dygn är den genomsnittliga ökningen 8.1%, för att gradvis öka till 15.0% för 30 min. För 30 min är den genomsnittliga ökningen i sydvästra Sverige, väster om longitud 16ºE, knappt 20% och i nordöstra Sverige drygt 10%.

Den kraftiga ökningen i västra Sverige för varaktighet 30 min är förknippad med en något förhöjd standardavvikelse mellan projektionerna, d.v.s. förhöjd osäkerhet (Figur 7). För längre varaktigheter, ≥ 3 tim, framträder gradvis en ökad standardavvikelse vid södra och mellersta Östersjökusten. Generellt sett är dock standardavvikelsen förhållandevis låg och t.o.m. något lägre än den mellan perioder R2 och F1, vilket innebär bättre samstämmighet mellan projektionerna vad gäller utvecklingen till period F2.

För varaktighet 30 min uppvisar de enskilda projektionerna en tämligen enhetlig bild. Alla med undantag av E5_3 har den kraftigaste ökningen i västra Sverige, dock på lite olika latitud. För 3 tim syns att E5_1, precis som mellan R2 och F1, uppvisar en distinkt minskning vid mellersta Norrlandskusten, vilken slår igenom i det medelvärdesbildade resultatet (Figur 6). Vidare kan ses att den höga standardavvikelsen i östra Svealand för varaktighet 1 dygn är kopplad till helt olika signaler i två projektioner. I E4_B2 minskar den extrema dygnsnederbörden med c:a 30% i detta område medan den i E5_1 ökar med ungefär lika mycket.

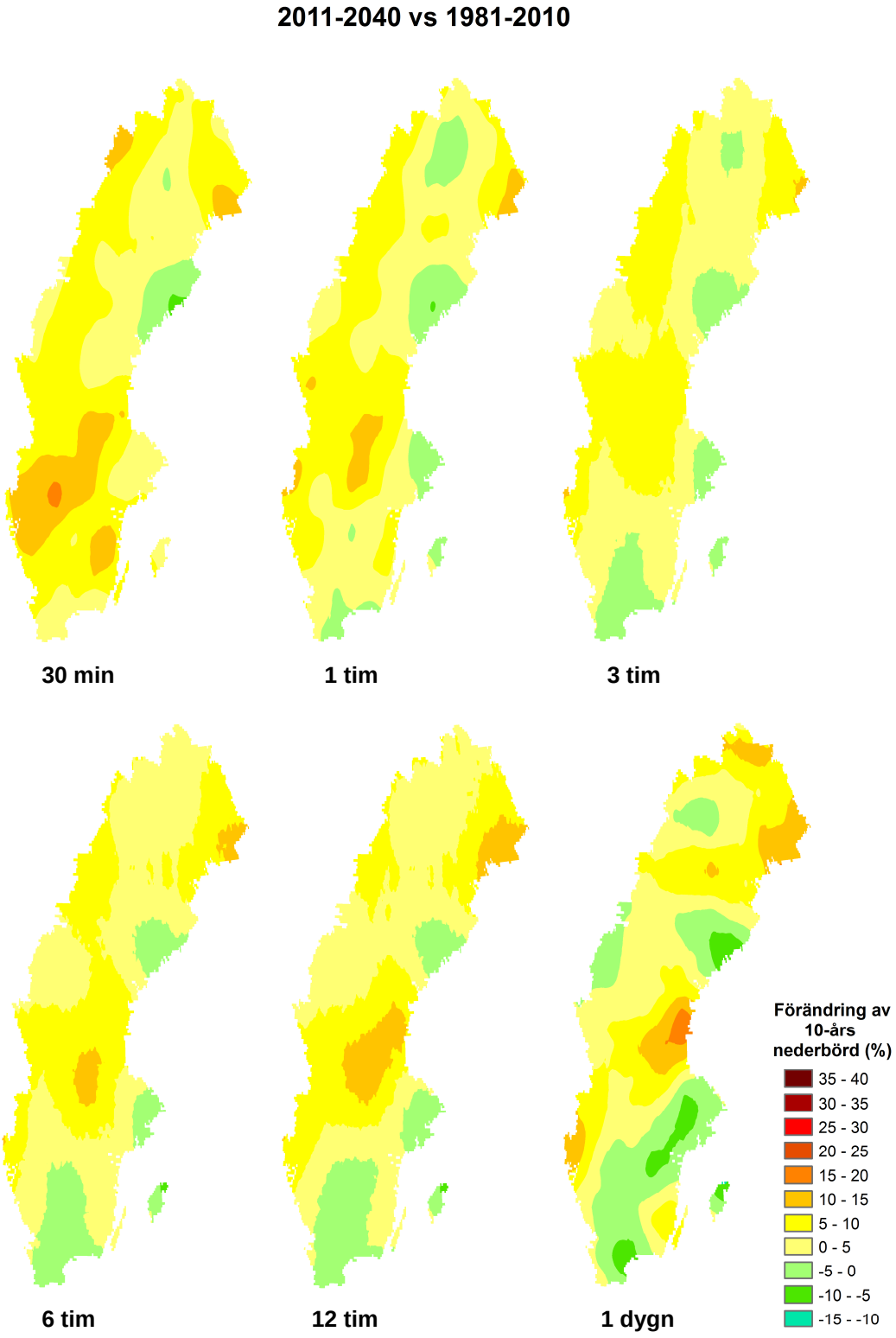
5.2.3 Förändring från [1981-2010] till [2071-2100]

Även fram till slutet av seklet sker den största ökningen av korttidsextremer i västra Sverige (Figur 8), lokalt knappt 40% för varaktighet 30 min. En väst-östlig gradient är tydlig för alla varaktigheter men avtar i styrka med ökad varaktighet. I ingen del av Sverige sker en minskning, men för långa varaktigheter sker lokalt i östra Sverige en ökning med bara ett par procent.

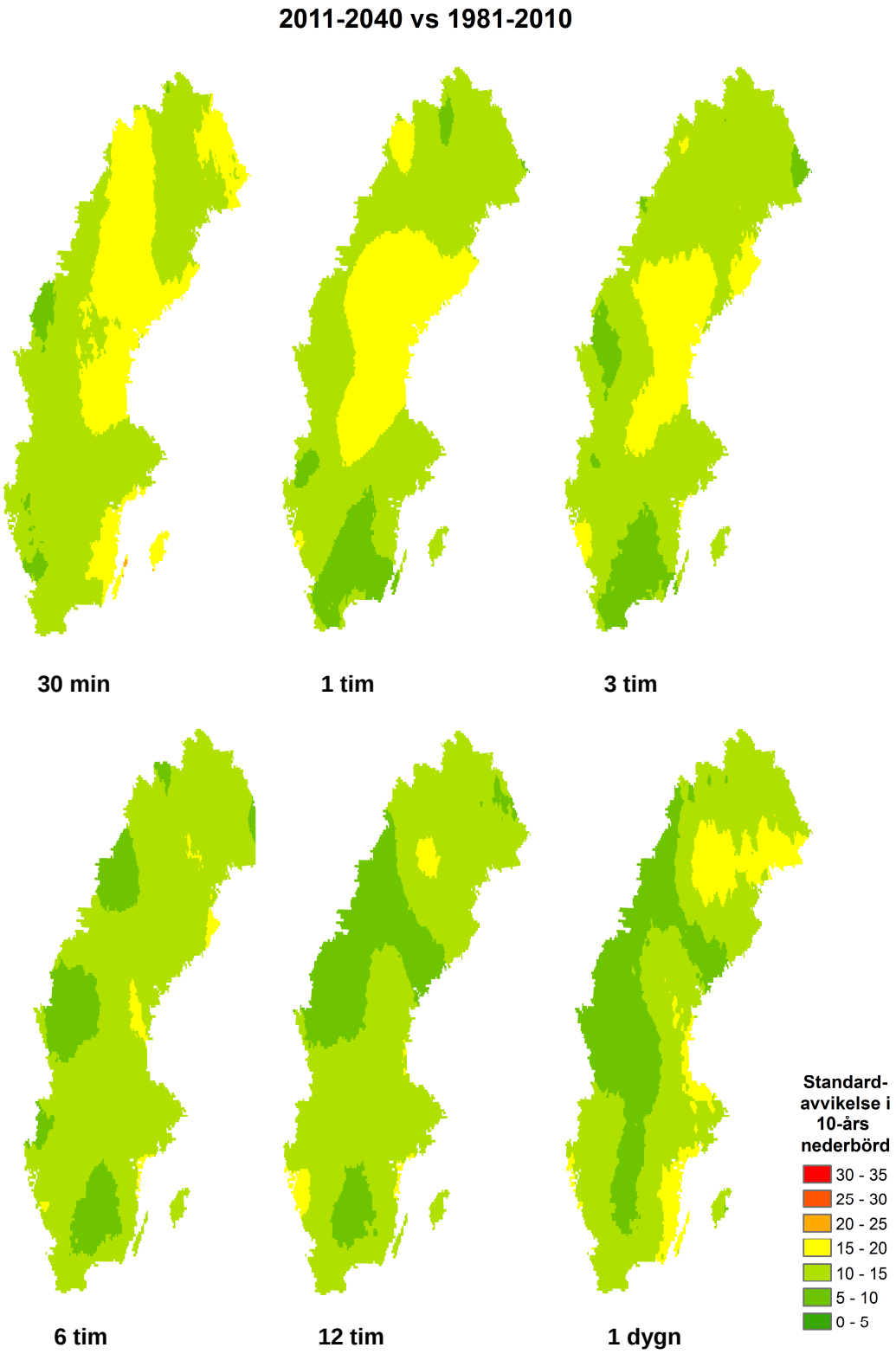
Sett i genomsnitt över landet sker en ökning med 23.1% för varaktighet 30 min. Görs en uppdelning i sydväst och nordost blir medelvärdet några procentenheter högre för den sydvästra delen, men överlag är medelvärdet väl representativt för hela landet. För 1 tim är den genomsnittliga ökningen 18.2% med en distinkt skillnad mellan sydväst (23.4%) och nordost (15.6%). För längre varaktigheter minskar den genomsnittliga ökningen successivt till 12.6% för 1 dygns varaktighet. Skillnaden mellan sydväst och nordost minskar gradvis för att helt försvinna för 1 dygn.

För korta varaktigheter (≤ 3 tim) är osäkerheten i projektionerna markant högre för Norrland och norra Svealand än för södra delen av landet (Figur 9). För längre varaktigheter finns inga tydliga geografiska skillnader.

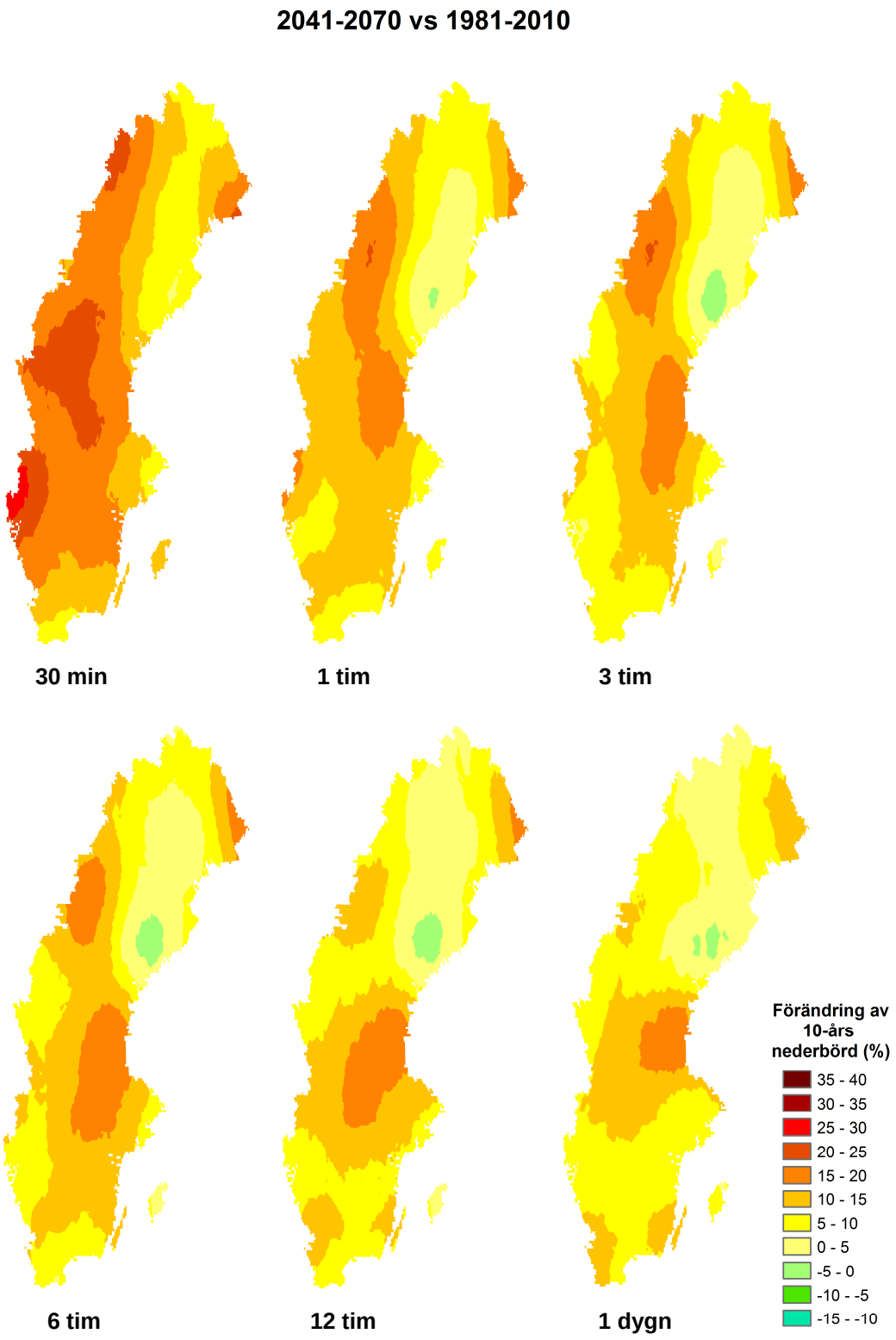
För 30 min är spridningen mellan de enskilda projektionerna stor för norra Sverige, vilket indikerades av standardavvikelsen (Figur 9). I synnerhet projektion E5_3 sticker ut med en mycket kraftig ökning från centrala Svealand och norrut längs fjällkedjan, med lokalt upp till 90%. Å andra sidan finns i E4_A2, E4_B2 och E5_1 överlappande eller närliggande områden med minskande värden. För södra Sverige är nivå och variation överlag likartad. Även för varaktighet 3 tim indikerar E5_3 kraftig ökning i mellersta Sverige. I synnerhet E4-projektionerna visar på tydliga minskningar i Norrland. För 1 dygn finns områden med minskande värden i alla projektioner, noterbart i östra Svealand vilket avspeglades i medelvärdeskartan (Figur 8).



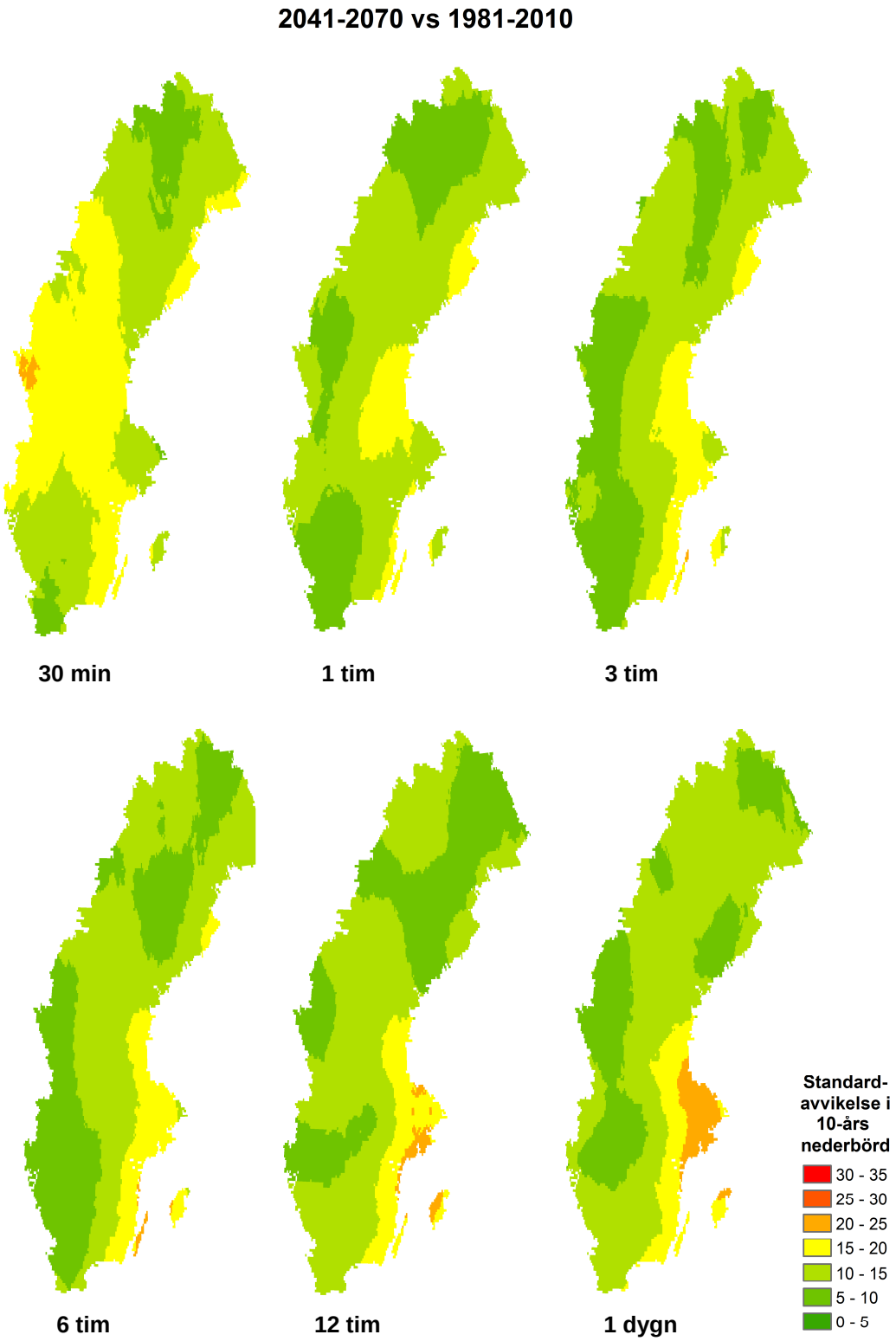
Figur 4. Medelvärdet av projektionernas förändring av korttidsnederbörd med 10 års återkomsttid från period R2 (1981-2010) till period F1 (2011-2040).



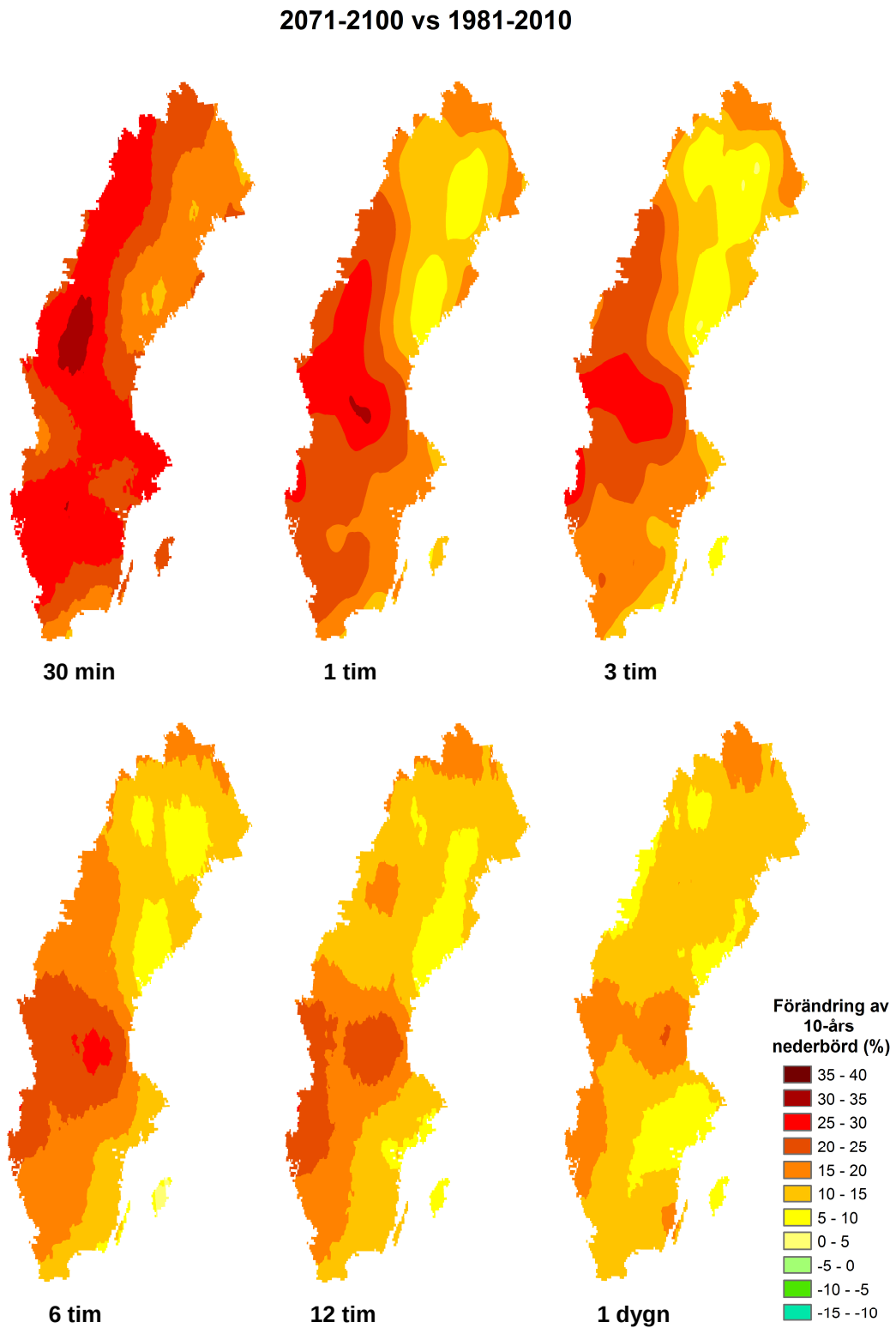
Figur 5. Standardavvikelsen för projektionernas förändring av korttidsnederbörd med 10 års återkomsttid från period R2 (1981-2010) till period F1 (2011-2040).



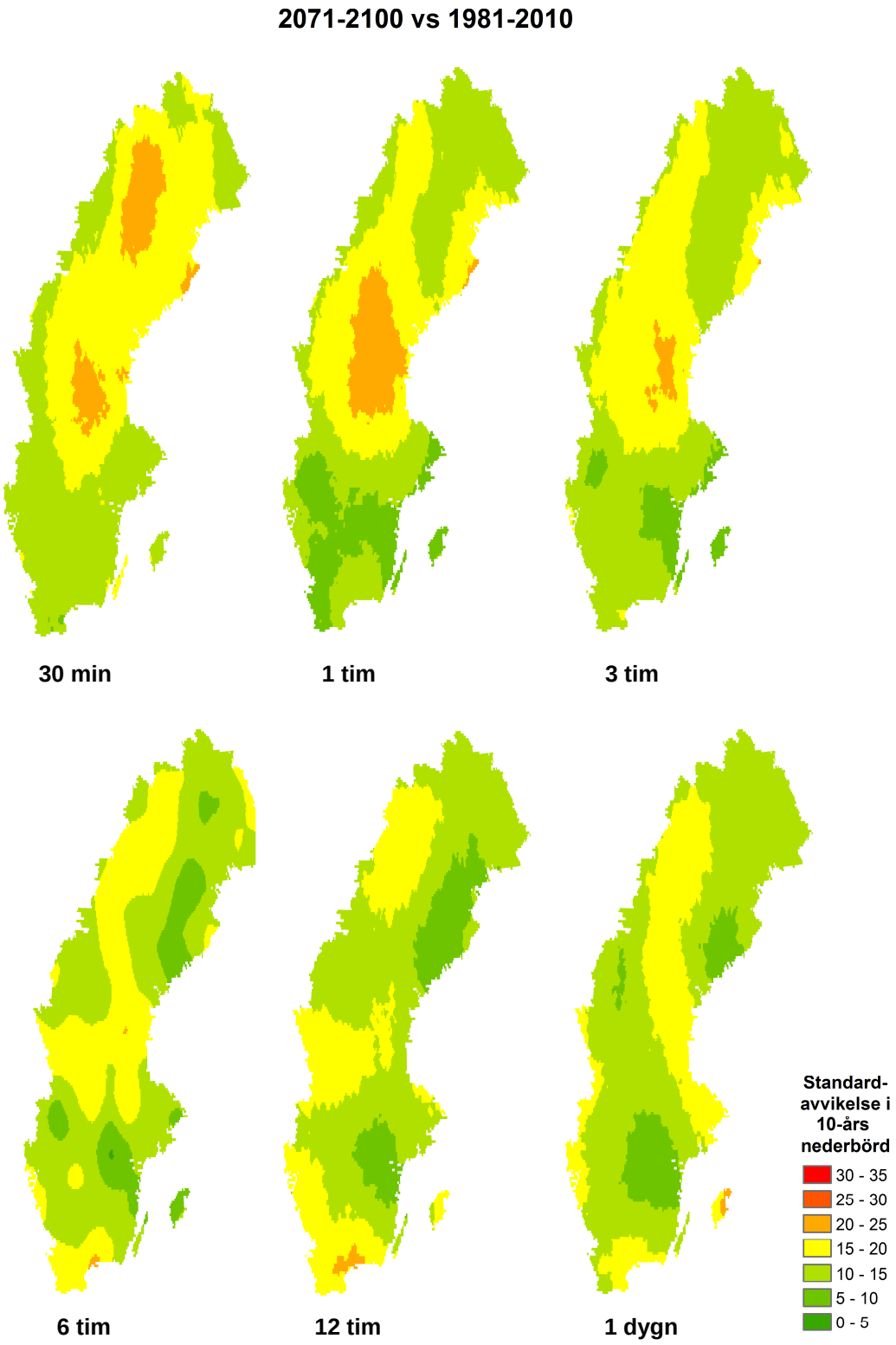
Figur 6. Medelvärdet av projektionernas förändring av korttidsnederbörd med 10 års återkomsttid från period R2 (1981-2010) till period F2 (2041-2070).



Figur 7. Standardavvikelsen för projektionernas förändring av korttidsnederbörd med 10 års återkomsttid från period R2 (1981-2010) till period F2 (2041-2070).



Figur 8. Medelvärdet av projektionernas förändring av korttidsnederbörd med 10 års återkomsttid från period R2 (1981-2010) till period F3 (2071-2100).



Figur 9. Standardavvikelsen för projektionernas förändring av korttidsnederbörd med 10 års återkomsttid från period R2 (1981-2010) till period F3 (2071-2100).

5.3 Kompletterande analyser

5.3.1 Återkomsttid 100 år

Extrapolering till 100 års återkomsttid ökar osäkerheten för den beräknade nederbörden, vilken måste anses synnerligen approximativ. Generellt indikerar resultaten en ökning som är marginellt större men överlag mycket likartad den för 10 års återkomsttid redovisad i avsnitt 5.2. Uttryckt i siffror är den framtida ökningen av 100-årsnederbörden i genomsnitt knappt en procentenhet större än medelvärdena i Tabell 2. Spridningsintervallet mellan största och minsta förändringen inom Sverige ökar med c:a 10 procentenheter jämfört med motsvarande 10-årsintervall.

5.3.2 Äldre vs. nyare projektioner

Som diskuterats i kapitel 3 härstammar två av projektionerna (E4_A2, E4_B2) från tiden innan Klimat- och sårbarhetsutredningen medan övriga projektioner är nyare. I en översiktlig analys jämfördes projektionernas genomsnittliga förändring av 10-årsnederbörden över Sverige för de olika varaktigheterna och framtidsperioderna. Vad gäller förändringen från R2 till F1 ligger både E4_A2 och E4_B2 inom intervallet för de övriga projektionerna. Vad gäller förändringen från R2 till F2 ligger både E4_A2 och E4_B2 strax under intervallet för långa varaktigheter (1 dygn), d.v.s. nyare projektioner indikerar en något kraftigare ökning fram till mitten av seklet. Vad gäller förändringen från R2 till F3 ligger E4_A2 inom intervallet för de övriga projektionerna emedan E4_B2 ligger strax under för samtliga varaktigheter. Detta kan vara kopplat till det faktum att B2 är ett lägre utsläppsscenario, vad gäller framtida koncentrationer av växthusgaser i atmosfären, än A1B och A2. Totalt sett är resultaten från de äldre projektionerna likartade resultaten från de nyare projektionerna, i synnerhet E4_A2 vars förändringar överlag ligger nära de nyare projektionernas genomsnittliga förändringar.

5.3.3 Inverkan av regional klimatmodell

Det är som tidigare nämnts väl känt att olika regionala klimatmodeller leder till olika resultat, inte minst för nederbörd (t.ex. Lenderink, 2010). I en studie av årliga 1-h nederbördsmaxima i klimatprojektioner använde Hanel och Buishand (2010) en ensemble med fyra projektioner som var identiska förutom regional modell. I ensemblen ingick E5_3 (på 25-km skala) samt motsvarande globala projektion regionalt nedskalad till samma upplösning med modellerna RACMO, REMO och HIRHAM (för mer information och referenser, se Hanel och Buishand, 2010). Till projektioner för Holland motsvarande perioder R1 och F3 anpassades två varianter av GEV-fördelningen till årliga 1-h maxima, varefter framtida förändringar beräknades.

Framtida förändringar för enskilda projektioner redovisas inte i Hanel och Buishand (2010), men försteförfattaren ställde vänligen dessa resultat till förfogande för denna kompletterande analys (Martin Hanel, personlig kommunikation). Resultatet indikerar att RCA3 ger en förhållandevis låg framtida ökning. I genomsnitt över båda GEV-varianterna visar RCA3 på en ökning av 10-årsnederbörden i Holland med 14%, vilket är lägst av alla. Motsvarande ökning i övriga tre modeller är i genomsnitt 35%, alltså mer än dubbelt så stor. Detta indikerar således att framtida ökningar av 10-årsnederbörden kan bli högre än värdena i Tabell 2. Resultaten måste dock tolkas med stor försiktighet p.g.a. materialets begränsade omfattning och osäkra relevans för svenska förhållanden. Mera omfattande analyser krävs för att klargöra inverkan av valet av klimatmodell.

5.3.4 Inverkan av den regionala klimatmodellens rumsliga upplösning

Pågående (2013) utvärdering av regionala klimatmodellsimuleringar med hög rumslig upplösning, upp till 6.25×6.25 km, för perioden 1995-2010 indikerar att beskrivningen av lokal

extrem korttidsnederbörd avsevärt förbättras med ökad rumsupplösning. Detta kan innebära att klimatprojektioner med hög rumsupplösning också bättre beskriver framtida förändringar. Studiens resurser har inte räckt till en fullskalig utvärdering, men en begränsad kompletterande analys har genomförts inom ett relaterat forskningsprojekt.

Klimatprojektion E5_3 finns tillgänglig i tre rumsliga upplösningar; 50×50 km, 25×25 km och 12.5×12.5 km. Ur dessa projektioner extraherades data för perioder R2 och F3, för fem svenska städer: Arvika, Göteborg, Lidköping, Malmö och Stockholm. För varje stad extraherades först från 50×50 km-projektionen data från fem modellgridrutor; en centrerad över staden samt en i varje väderstreck. Fem gridrutor användes eftersom resultatet i en enskild gridruta är förknippat med hög osäkerhet. Genom att analysera data från flera gridrutor och medelvärdebilda resultatet kan osäkerheten reduceras och ett mera representativt resultat erhållas. Därefter extraherades från 25×25 km-projektionen (12.5×12.5 km-projektionen) data från de 20 (80) modellgridrutor som täcker samma yta som de fem 50×50 km-gridrutorna. För varje upplösning beräknades årliga maxima för och anpassades Gumbel-fördelningar till tidsserierna från varje gridruta p.s.s. som beskrivits ovan (kapitel 4). Förändringen av 10-årsnederbörden från R2 till F3 beräknades för alla varaktigheter och resultaten medelvärdesbildades över alla gridrutor med samma upplösning.

Resultatet uppvisar stor variabilitet. I fyra städer blir ökningen av 10-årsnederbörden lägre på 25-km skala än på 50-km skala, sett i genomsnitt över alla varaktigheter. I tre av dem (Arvika, Lidköping, Malmö) vänder ökningen åter uppåt på 12.5 km skala men i Göteborg sker en fortsatt minskning till nära 0, d.v.s. 10-årsnederbörden på 12.5 km skala är ungefär densamma i R2 och F3. Bara i Stockholm blir ökningen större för 25 km än för 50 km, för att dock därefter åter bli lägre på 12.5 km skala.

I genomsnitt över alla städer och varaktigheter blir den framtida ökningen av 10-årsnederbörden på både 25- och 12.5-km skala ~30% lägre jämfört med på 50-km skala. Detta indikerar således att framtida lokala ökningar av 10-årsnederbörden kan bli lägre än värdena i Tabell 2. Även dessa resultat måste tolkas med stor försiktighet p.g.a. det begränsade antalet studerade projektioner (1), det begränsade antalet studerade platser (5) och frånvaron av tydliga tendenser i resultatet. Mera omfattande analyser krävs för att klargöra inverkan av klimatmodellens rumsliga upplösning.

5.4 Jämförelse med angränsande studier och syntes

I detta avsnitt görs en jämförelse med resultat från utvalda angränsande studier med fokus på inhemska bidrag. Det finns även ett flertal relevanta utländska (oftast Pan-Europeiska) studier av extrem (korttids-) nederbörd i vår region vars resultat totalt sett ger en likartad bild (t.ex. Frei m.fl., 2006; Lenderink och van Meijgaard, 2008; Larsen m.fl., 2009).

Extrem nederbörd på dygnsskala eller kortare i klimatprojektioner för Sverige har undersökts sedan mer än 10 år. Vad gäller dygnsnederbörd beräknade Räisänen och Joelsson (2001) i en tidig studie framtida förändringar av maximal årlig dygnsnederbörd i två projektioner med olika framtidshorisont. För Skandinavien visade resultaten på en ökning med 15-20%. I en analys av fyra projektioner fann Räisänen m.fl. (2004) en ökning på av den maximala årliga dygnsnederbörden i Sverige med 5-15% från period R1 (1961-1990) till period F3 (2071-2100). Nikulin m.fl. (2011) analyserade framtida förändring av dygnsnederbörd med 20 års återkomsttid i sex projektioner för Europa och fann en ökning (sommartid) från R1 till F3 med 10-30%, generellt högst i västra Sverige. Andréasson m.fl. (2011) analyserade dygnsnederbörd med 100 års återkomsttid i 16 projektioner för Sverige och fann från R1 till F3 en över landet tämligen likartad genomsnittlig ökning på ~20%. I en färsk studie har Hernebring m.fl. (2012) uppskattat förändringsfaktorer som motsvarar de procentuella förändringarna i denna studie.

För fem svenska städer (Göteborg, Malmö, Östersund, Växjö och Västerås) har faktorer har uppskattats genom analys av dygnsnederbörd över den 90de percentilen i nio klimatprojektioner (det kan påpekas att denna definition motsvarar kraftig snarare än extrem nederbörd). Den genomsnittliga ökningen från period R1 befanns vara 5% till period F1, 11% till F2 och 13% till F3.

Vad gäller kortare varaktigheter än 1 dygn uppskattade Räisänen och Joelsson (2001) den framtida ökningen av maximal årlig 6-timmars-nederbörd till 20-25% för Skandinavien. I Klimat- och sårbarhetsutredningen (SOU, 2007) bedöms hur intensiteten av de kraftigaste regnen kommer att utvecklas under seklet. Inga siffror anges men visade kartor (baserade på projektion E4_A2) indikerar en ökning med ~30% fram till slutet av seklet. I några forskningsprojekt utförda vid SMHI under de senaste 5 åren har framtida förändringar i 30-min nederbörd från ett antal (2-6) projektioner studerats i viss detalj för områden kring städerna Kalmar (Olsson m.fl., 2009), Stockholm (Olsson m.fl., 2010) och Arvika (Olsson m.fl., 2013). Dessa analyser har legat till grund för effektstudier avseende påverkan på dagvattenmängder och avloppsnät. Resultaten har visat på ökade korttidsextremer med 20-30% fram till slutet av seklet med tämligen små skillnader mellan städerna. Baserat på 30-min data från klimatprojektioner E4_A2 och E4_B2 gör Svenskt Vatten (2011), i sina rekommendationer avseende dimensionerande nederbördsdata, en bedömning av den framtida förändringen av maximal nederbördsintensitet från period R1 (1961-1990) till period F3 (2071-2100). Förändringen uppskattades till 20-30% i västra Götaland, 5-10% i norra Norrland och 10-20% i övriga landet.

Två slutsatser från genomgången kan noteras. Dels att tidiga uppskattningar av förändringarna visat sig hålla väl, d.v.s. modellutvecklingen och framtagandet av nya projektioner har inte tydligt förändrat nivån på den förväntade framtida förändringen (dock förbättrat möjligheten till osäkerhetsskattning). Dels att ökningen ser ut att bli något större för kortare varaktigheter än för dygnsnederbörd.

Mot bakgrund av det sammanlagda materialet görs i Tabell 3 ett försök att sammanfatta nuläget vad gäller uppskattade framtida förändringar av extrem korttidsnederbörd i klimatprojektioner för Sverige. Syftet är att komplettera nuvarande riktlinjer och rekommendationer samt vara ett stöd vid revision av dessa. Vid bedömningen av olika studier har störst vikt lagts vid nyligen utförda studier med ett förhållandevis stort antal analyserade projektioner (>5), men värdena är generellt i linje även med övriga studier. Medelvärdet motsvarar en projektion som ligger nära mitten av den totala spridning som ges av en ensemble med 5-10 medlemmar. Låg och hög uppskattning ska inte ses som undre och övre gräns utan representativa resultat från de projektioner som ligger i det undre respektive övre skiktet av den totala spridningen; enskilda uppskattningar kan ligga utanför detta intervall. Något tydligt beroende på återkomsttid har i allmänhet inte kunnat ses, varför värdena kan anses gälla även andra återkomsttider än 10 år. Allmänt kan värdena anses gälla hela landet. Även om regionala mönster i vissa fall påträffats, som ofta (men inte alltid) visar på kraftigare ökning i västra Sverige (t.ex. Figur 8), har analyser för enskilda städer gett ett likartat resultat utan tydlig koppling till geografiskt läge.

Tabell 3. Generella uppskattade värden för den framtida procentuella förändringen av 10-års dygnsnederbörd och korttidsnederbörd (varaktighet ≤ 1 tim) i Sverige; medelvärde (MED) samt låg och hög uppskattning.

Varaktighet	Dagens klimat → 2050 (%)			Dagens klimat → 2100 (%)		
	LÅG	MED	HÖG	LÅG	MED	HÖG
≤ 1 tim	±0	+10	+20	+15	+25	+35
1 dygn	±0	+5	+15	+10	+20	+30

Två alternativa sätt att uppskatta framtida förändringar föreslogs och demonstrerades också i Hernebring m.fl. (2012). Till skillnad från studierna ovan används i dessa inte klimatmodelldata med hög tidsupplösning (≤ 1 dygn) utan enbart resultat på årstidsbasis; medeltemperatur och total nederbörd under sommaren (jun-aug), benämnt ”sommarklimat” i det följande. Generellt minskar osäkerheten i klimatmodeller med längden på den period som resultatet integreras över; således bör uppskattade förändringar av årstidsvärden vara säkrare än förändringar av dygnsvärden eller kortare. Å andra sidan krävs en empirisk eller konceptuell koppling mellan årstidsklimatet och korttidsnederbörden, vilken tillför osäkerheter. Oavsett vilken metod som är totalt sett minst osäker, vilket är svårt att bedöma, är det intressant och värdefullt med olika, kompletterande ansatser att bedöma den framtida korttidsnederbörden.

Det ena angreppet baserades på ett empiriskt samband mellan dimensionerande regnintensitet och sommarklimatet, kalibrerat för dels europeiska, dels enbart svenska observationer. Genom att använda framtida beräknade sommarklimat från en klimatprojektion uppskattades effekten på korttidsnederbörd genom de empiriska sambanden. Den europeiska kalibreringen gav för Sverige en ökning från R1 till F3 på upp till ~10% (i södra Sverige indikerades en minsking). Den svenska kalibreringen gav en kraftigare framtida ökning, uppskattningsvis från ~20% i södra Sverige upp till nästan 50% i norra Sverige.

Det andra sättet gick ut på att identifiera en ”klimatanalog plats” i Europa, som har ett sommarklimat motsvarande det som den svenska staden bedöms få i slutet av seklet (och även ligger på en liknande höjd över havet). I en demonstration med en klimatprojektion indikerades i ungefär hälften av fallen (olika kombinationer av stad och varaktighet) svagt minskade korttidsextremer, men även enstaka mycket kraftiga ökningar (upp till 60%).

Sammantaget uppvisar resultaten från de båda alternativa angreppen en stor variation mellan svag minskning och mer än 50-procentig ökning av korttidsnederbörden. Även om det handlade om demonstrationer baserade på en enstaka projektion kan ändå noteras att den totala bilden inte står i motsats till övriga studier baserade på högupplösta klimatmodelldata. Mera omfattande alternativa analyser vore önskvärt som komplement till nuvarande uppskattningar.

6 Avslutande kommentarer

De huvudsakliga resultaten från denna studie kan sammanfattas enligt följande.

- Den regionala klimatmodellen RCA3 reproducerar kvalitativt den ökning av extrem dygnsnederbörd som observerats i Sverige mellan perioder 1961-1990 och 1981-2010, både driven med ERA40 och med en ensemble av sex globala klimatprojektioner. Detta garanterar inte att uppskattningen av framtida förändringar är korrekt, men tyder på en förmåga att beskriva förändringar av dygnsextremer ifall randvillkoren är de rätta.

- I en ensemble av sex framtida projektioner ökar 10-års nederbörden med 30 min varaktighet med 6% från 1981-2010 till 2011-2040, med 15% till 2041-2070 och med 23% till 2071-2100. Ökningen minskar med ökande varaktighet och på dygnsskala är de relativa förändringarna ungefär halverade.

- En syntes av den forskning kring framtida korttidsextremer som utförts i Sverige till dags dato tyder på en förväntad ökning av extrem korttidsnederbörd (≤ 1 tim) med 10% till mitten av seklet (2050) och 25% till slutet av seklet (2100). Låga och höga uppskattingar bedöms till ±10 procentenheter från de förväntade värdena men även större avvikelser är möjliga. För dygnsextremer förväntas ökningen bli fem procentenheter lägre.

Det rekommenderas att inte fokusera på enstaka utvalda procentuella förändringar utan använda resultaten som tänkbara utfall med varierande grad av sannolikhet. Dessa kan användas som grund för analyser av ett system (t.ex. avloppsnät) och dess kapacitet att hantera ökande nederbördsintensiteter. Särskilt viktigt torde vara att identifiera kritiska tröskelnivåer, d.v.s. intensiteter som ifall de överskrids får oproportionellt stora negativa effekter. Att ställa en sådan nivå i relation till de förväntade framtida förändringarna kan vara en bra grund för planering och utformning av eventuell klimatanpassning.

Avslutningsvis ser vi med spänning fram emot nästa generation av mera detaljerade, konvektions-upplösande regionala klimatmodeller som för närvarande utvecklas och utvärderas (t.ex. Kendon m.fl., 2012). Förhoppningen är att alla aspekter av observerad nederbörd, inte minst extrem korttidsnederbörd, kan reproduceras med mindre (och mer väldefinierad) bias än idag, vilket skulle öka trovärdigheten i framtida projektioner. Vad denna nya generation modeller säger om framtidens extrema korttidsnederbörd återstår att se. Preliminära resultat är att vänta inom de närmaste åren, men omfattande projektionsensembler lär dröja p.g.a. de extremt datorintensiva beräkningarna.

Tackord

Studien finansierades främst av Formas, via projekt Hydroimpacts 2.0 (kontrakt nr. 2009-525), med stöd från EU FP7, via projekt ECLISE (kontrakt nr. 265240). Varma tack till Lennart Wern för analysen av stationsdata, till Martin Hanel för tillgängliggörande av resultat från jämförande studie av regionala klimatmodeller, samt till Erik Kjellström och Grigory Nikulin för RCA3 data och värdefulla kommentarer.

Referenser

Andréasson, J., Bergström, S., Gardelin, M., German, J., Gustavsson, H., Hallberg, K. och J. Rosberg (2011) *Dimensionerande flöden för dammanläggningar för ett klimat i förändring*, Elforsk Rapport 11:25, Elforsk AB, Stockholm.

Bengtsson, L. (2008) Extrema dygnsregn och trender i Skåne och på Västkusten, *Vatten*, 64:31-39.

Bengtsson, L. och S. Milotti (2008) Intensiva regn i Malmö, *Vatten* 64:291–304.

Frei, C., Schöll, R., Fukutome, S., Schmidli, J. och P.L. Vidale (2006) Future change of precipitation extremes in Europe: Intercomparison of scenarios from regional climate models, *J. Geophys. Res.*, 111, D06105.

Hanel M. och T.A. Buishand (2010) On the value of hourly precipitation extremes in regional climate model simulations, *J. Hydrol.*, 393:265–273.

Hernebring, C. (2006) *10-års regnets återkomst förr och nu*, VA-forsk publ. 2006-04, Svenskt Vatten AB, Stockholm.

Hernebring, C., Dahlström, B. och E. Kjellström (2012) *Regnintensitet i Europa med fokus på Sverige – ett klimatförändringsperspektiv*, Svenskt Vatten Utveckling Rapport nr. 2012–16, Svenskt Vatten AB, Stockholm.

Häggström, M. (2001) *Utredning om klimatförändring, flödesbestämning och havsnivåförändring*, SMHI-utredning för Vägverket, Bilaga 4.

Kendon, E.J., Roberts, N.M., Senior, C.A. och M.J. Roberts (2012) Realism of rainfall in a very high-resolution regional climate model, *J. Clim.*, 25:5791-5806.

Kjellström, E., Nikulin, G., Hansson, U., Strandberg, G. och A. Ullerstig (2011) 21st century changes in the European climate: uncertainties derived from an ensemble of regional climate model simulations, *Tellus*, 63A:24–40.

Larsen, A.N., Gregersen, I.B., Christensen, O.B., Linde, J.J. och P.S. Mikkelsen (2009) Potential future increase in extreme one-hour precipitation events over Europe due to climate change, *Water Sci. Technol.*, 60:2205–2216

Lenderink, G. (2010) Exploring metrics of extreme daily precipitation in a large ensemble of regional climate model simulations, *Clim. Res.*, 44:151–166.

Lenderink, G. och E. van Meijgaard (2008) Increase in hourly precipitation extremes beyond expectations from temperature changes, *Nature Geosci.*, 1:511–514.

Nakićenović, N., Alcamo, J., Davis, G., de Vries, B., Fenhann, J., Gaffin, S., Gregory, K. och A. Grübler (2000) *Special Report on Emissions Scenarios*, Working Group III, Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), Cambridge University Press, Cambridge.

Nikulin, G., Kjellström, E., Hansson, U., Strandberg, G. och A. Ullerstig (2011) Evaluation and future projections of temperature, precipitation and wind extremes over Europe in an ensemble of regional climate simulations, *Tellus*, 63A:41-55.

Olsson J., Berggren K., Olofsson M. and M. Viklander (2009) Applying climate model precipitation scenarios for urban hydrological assessment: a case study in Kalmar City, Sweden, *Atm. Res.*, 92:364–375

Olsson, J., Dahné, J., German, J., Westergren, B., von Scherling, M., Kjellson, L., Ohls, F., och A. Olsson (2010) *En studie av framtida flödesbelastning på Stockholms huvudavloppssystem*, SMHI Klimatologi nr. 3, SMHI, 601 76 Norrköping.

Olsson, J., Amaguchi, H., Alsterhag, E., Dåverhög, M., Adrian, P.-E. och A. Kawamura (2013) Adaptation to climate change impacts on urban flooding: a case study in Arvika, Sweden, *Clim. Chang.*, 116:231-247.

Räisänen, J. och R. Joelsson (2001) Changes in average and extreme precipitation in two regional climate model experiments, *Tellus*, 53A:547-566.

Räisänen, J., Hansson, U., Ullerstig, A., Döscher, R., Graham, L.P., Jones, C., Meier, H.E.M., Samuelsson, P. och U. Willén (2004) European climate in the late 21st century: regional simulations with two driving global models and two forcing scenarios, *Clim. Dyn.*, 22: 13-31.

SOU 2007:60, *Sverige inför klimatförändringarna – hot och möjligheter*, Slutbetänkande av Klimat- och sårbarhetsutredningen.

Svenskt Vatten (2004) *Dimensionering av allmänna avloppsledningar*, Publikation P90, Svenskt Vatten AB, Stockholm.

Svenskt Vatten (2011) *Nederbördsdata vid dimensionering och analys av avloppssystem*, Publikation P104, Svenskt Vatten AB, Stockholm.

Trenberth, K.E., Dai, A., Rasmussen, R.M. och D.B. Parsons (2003) The changing character of precipitation, *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, 84:1205–1217.

Uppala, S. M. och medförfattare (2005) The ERA-40 re-analysis, *Quart. J. R. Meteorol. Soc.*, 131, 2961-3012.

Wern, L. och J. German (2009) *Korttidsnederbörd i Sverige 1995-2008*, SMHI Meteorologi nr. 139/2009, SMHI, 601 76 Norrköping.

WMO (1981) *Selection of distribution types for extremes of precipitation*, WMO-No. 560, Operational Hydrology Report 15, World Meteorological Organization Geneva, Switzerland.

SMHIs publiceringar

SMHI ger ut sju rapportserier. Tre av dessa, R-serierna är avsedda för internationell publik och skrivs därför oftast på engelska. I de övriga serierna används det svenska språket.

Seriernas namn	**Publiceras sedan**
RMK (Report Meteorology and Climatology)	1974
RH (Report Hydrology)	1990
RO (Report Oceanography)	1986
METEOROLOGI	1985
HYDROLOGI	1985
OCEANOGRAFI	1985
KLIMATOLOGI	2009

I serien KLIMATOLOGI har tidigare utgivits:

1 Lotta Andersson, Julie Wilk, Phil Graham, Michele Warburton (2009)
Local Assessment of Vulnerability to Climate Change Impacts on Water Resources in the Upper Thukela River Basin, South Africa – Recommendations for Adaptation

2 Gunn Persson, Markku Rummukainen (2010)
Klimatförändringarnas effekter på svenskt miljömålsarbete

3 Jonas Olsson, Joel Dahné, Jonas German, Bo Westergren, Mathias von Scherling, Lena Kjellson, Fredrik Ohls, Alf Olsson (2010)
En studie av framtida flödesbelastning på Stockholms huvudavloppssystem

4 Markku Rummukainen, Daniel J. A. Johansson, Christian Azar, Joakim Langner, Ralf Döscher, Henrik Smith (2011)
Uppdatering av den vetenskapliga grunden för klimatarbetet. En översyn av natur-vetenskapliga aspekter

5 Sten Bergström (2012)
Framtidens havsnivåer i ett hundraårsperspektiv - kunskapssammanställning 2012

SMHI

Sveriges meteorologiska och hydrologiska institut
601 76 NORRKÖPING
Tel 011-495 80 00 Fax 011-495 80 01

ISSN 1654-2258