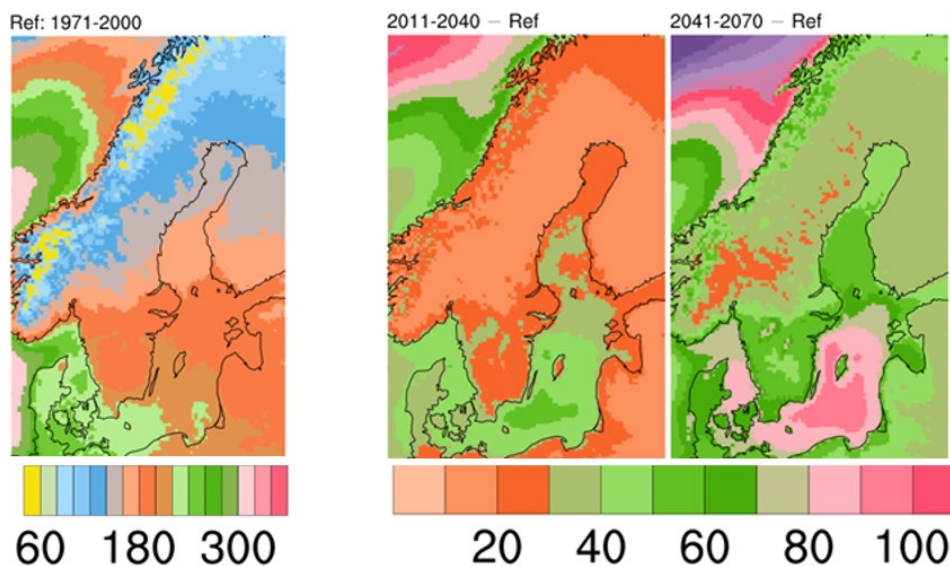


Klimatinformation som stöd för samhällets klimatanpassningsarbete

Erik Kjellström, Lotta Andersson, Lars Arneborg, Peter Berg, René Capell, Sam Fredriksson, Magnus Hieronymus, Anette Jönsson, Lena Lindström, Gustav Strandberg



Pärmbild.

Bilden är ett exempel på klimatinformation baserad på klimatsimuleringar med regionala klimatmodeller. Kartorna visar vegetationsperiodens längd och dess förändring i ett allt varmare klimat. Bilden ingår i sin helhet i den här rapporten som Figur nummer 22.

ISSN: 1654-2258 © SMHI

KLIMATOLOGI Nr 64, 2021

Klimatinformation som stöd för samhällets klimatanpassningsarbete

Erik Kjellström, Lotta Andersson, Lars Arneborg, Peter Berg, René Capell, Sam Fredriksson, Magnus Hieronymus, Anette Jönsson, Lena Lindström, Gustav Strandberg

Granskad och Godkänd av: Lars Barring

Funktion: Klimatforskare vid Rossby Centre

Denna sida är avsiktligt blank

Sammanfattning

Det naturvetenskapliga kunskapsläget kring klimatförändringen blir allt starkare vilket till exempel har rapporterats i rapporten Klimat i förändring 2021 – Den naturvetenskapliga grunden från FN:s klimatpanel, IPCC, 2021. Den globala medeltemperaturen har höjts med mer än 1,1 grader sen andra halvan av 1800-talet. Detta beror i huvudsak på människans utsläpp av koldioxid till atmosfären. Fortsatta utsläpp kommer att leda till ännu större temperaturökning framöver. Exakt hur stora de framtida förändringarna av klimatet kan bli är inte känt eftersom det beror på hur stora de framtida koldioxidutsläppen blir, och eftersom det finns osäkerheter kring exakt hur mycket en ökning av koldioxidhalten påverkar klimatet. Trots detta är det klart att det förutom högre temperaturer för alla jordens regioner också kommer leda till förändringar i nederbördsförhållanden och olika typer av väderextremer. Utbredning av snö och is beräknas minska och den globala havsnivån fortsätta stiga. Dessa typer av förändringar förväntas få en lång rad konsekvenser både för samhälle och naturmiljö.

Den här rapporten tar upp vilken klimatinformation som finns tillgänglig för det svenska samhällets klimatanpassningsarbete, hur informationen kan användas, vilka begränsningar den har och vad som kan förbättras. Fortsatt utveckling av metodik och modeller är en viktig komponent för att kunna ta fram och förbättra klimatinformation för klimatanpassningsarbetet liksom vikten av att säkerställa långa tidsserier för att spegla klimatets variabilitet och förändring. Stora ensembler av högupplösta klimatscenarier behövs för att kunna analysera, förstå och beskriva framtida klimatförändring under olika utsläppsscenarioer. Detta gäller särskilt för att kunna göra sannolikhetsberäkningar av extrema väderhändelser, vilket är en central del i den riskanalys som behövs för att kunna anpassa samhället till både dagens klimat och det klimat vi kan få i framtiden. Rapporten pekar på betydelsen av långsiktighet i arbetet med produktion av klimatdata, samt att det är viktigt att arbeta med hela kedjan från observationer och modeller till användare.

Summary

The scientific basis related to climate change grows stronger, for example as reported by the latest report by the first working group of the IPCC in 2021. Primarily as a result of human emissions of carbon dioxide to the atmosphere, the global mean temperature has increased by more than 1.1 degrees since the second half of the 19th century. Continued emissions will lead to even larger increases in the future. Exactly how strong is unknown as the size of future emissions is not known and as there is an uncertainty related to the climate sensitivity. Despite this, it is clear that, in addition to higher temperatures in all areas, also precipitation will change as will different types of extreme conditions. The extent of snow and ice will decline and global sea level continue to rise. Such changes are expected to lead to various consequences both for society and the environment.

The report presents what types of climate information that are available for work on climate change adaptation, how the information can be used, what limitations it has and what can be improved. Continued development of methods and models is one key component to be able to produce and improve climate information supporting climate change adaptation. Another relates to ensuring the existence of long time series reflecting variability and change. Large ensembles of high-resolution climate scenarios are needed to analyse, understand and describe future climate change under different scenarios. This is especially important for calculating probabilities of extreme weather events, which is a key component of the risk analysis. The report points to the importance of a longterm approach in the work with producing climate change information, and that it is important to involve the whole chain from observations and models to users of the information.

Denna sida är avsiktligt blank

Innehållsförteckning

1	INLEDNING	5
1.1	Syfte	5
1.2	Rapportens struktur och innehåll	6
2	NÅGRA GRUNDLÄGGANDE BEGREPP OM KLIMATET	7
2.1	Klimatsystemet och klimatpåverkan.....	7
2.1.1	Klimatkänslighet.....	7
2.1.2	Klimatets variabilitet och förändring.....	7
2.1.3	Hur vet vi vad som orsakar förändringarna?	8
2.1.4	Vad händer med klimatet i framtiden?	9
3	KLIMATANPASSNING.....	11
3.1	Att använda klimatinformation i klimatanpassningsarbetet ..	11
3.2	Att hantera osäkerheter och svårigheter kring klimatinformationen.....	12
4	KLIMATINFORMATION	13
4.1	Historiskt klimat och klimatet idag	13
4.1.1	Vilka data finns för att studera klimatet i ett långt tidsperspektiv?.....	13
4.1.2	Vilka data finns för att studera klimatet för de senaste 150 åren?	14
4.1.3	Vilka data kan användas för att studera klimatet under de senaste decennierna?	16
4.1.4	Klimatindikatorer	17
4.1.5	Referensperioder	19
4.2	Klimatscenarier för framtiden	20
4.2.1	Klimatmodeller och scenarier	20
4.2.1.1	Globala klimatmodeller	22
4.2.1.2	Regionala klimatmodeller.....	22
4.2.1.3	Hydrologiska modeller	24
4.2.1.4	Oceanografiska modeller.....	25
4.2.1.5	Kopplade regionala klimatmodeller.....	25
4.2.2	Biasjustering	26
4.2.3	Statistisk nedskalning	26
4.2.4	Utsläppsscenarier, strålningsdrivning och klimatscenarier.....	27
4.2.5	Uppvärmningsnivåer och tidsperioder	29
4.3	Klimatinformation för klimatanpassningsarbetet	30
4.3.1	I vilken utsträckning går det att säga hur klimatet varierat?	30
4.3.2	Mer eller mindre robust klimatinformation för framtida klimatförändring .	32
4.3.3	Klimattjänster på smhi.se.....	35
4.3.3.1	SMHIs webbaserade klimatscenariotjänst 2021	36
4.3.3.2	SMHIs webbaserade tjänst för Stigande havsnivåer	38

4.4	Exempel på nationell klimatinformation från andra länder i Europa	40
4.4.1	Nationella klimatscenarier i Storbritannien	40
4.4.2	Nationella klimatscenarier i Schweiz	41
4.4.3	Nationella klimatscenarier i Nederländerna	42
4.4.4	Är klimatinformationen i olika länder jämförbar?	43
5	KUNSKAPSLÄGET KRING DEN GLOBALA KLIMATFÖRÄNDRINGEN	43
5.1	Klimatförändringen fram till idag	43
5.1.1	Ändringar i temperaturklimatet	44
5.1.2	Ändringar i nederbörds klimatet.....	45
5.1.3	Ändringar i atmosfärens storskaliga cirkulation	46
5.1.4	Ändringar i hav och kryosfär	46
5.1.5	Ändring i havsnivå	47
5.2	Framtida klimatförändring	47
5.2.1	Framtida ändringar i temperaturklimatet.....	48
5.2.1.1	Framtida ändringar i Nordeuropas temperaturklimat	49
5.2.2	Framtida ändringar i nederbörds klimatet.....	51
5.2.2.1	Framtida ändringar i Nordeuropas nederbörds klimat.....	51
5.2.3	Framtida ändringar i atmosfärens storskaliga cirkulation	52
5.2.4	Framtida ändringar i hav och kryosfär	53
5.2.5	Framtida ändring av havsnivån	53
5.3	Effekter av klimatförändringen.....	54
6	SVERIGES KLIMAT	56
6.1	Sveriges klimat i ett långt tidsperspektiv	56
6.2	Sveriges klimat under de senaste 150 åren	57
6.3	Sveriges framtida klimat.....	60
6.3.1	Temperaturklimat.....	61
6.3.2	Nederbörds klimat.....	65
6.3.3	Snö, markfuktighet och vattenflöden	66
6.3.4	Vindklimat	68
6.3.5	Förändringar i havet.....	69
6.3.6	Förändringar i havsnivå	70
7	SAMMANFATTNING OCH FRAMÅTBlick	72
8	TACKORD	75
9	REFERENSER	75

1 Inledning

Den globala uppvärmningen till följd av människans klimatpåverkan fortsätter och klimatet ändras i snabb takt. Globalt har jordens medeltemperatur ökat med mer än 1,1 grad sen andra halvan av 1800-talet som även kallas förindustriell tid. Om dagens ökningstakt på cirka 0,2 grader per årtionde fortsätter är det alltså mindre än 20 år kvar tills att en global uppvärmning på 1,5 grader nås, vilket är den nivå som Parisavtalet strävar mot att begränsa uppvärmningen till¹. Människans totala globala utsläpp av koldioxid i kombination med det kvarvarande utrymmet av kol som kan släppas ut till atmosfären innan uppvärmningen når 1,5 grader gör att det krävs exceptionella åtgärder för att begränsa utsläppen och därmed hålla temperaturökningen till under 1,5 grader. Det är också svårt att begränsa utsläppen till en nivå som motsvarar en global uppvärmning på 2 grader så det finns en risk att även den nivån överskrids. Effekterna av klimatförändringar är stora redan vid 1,5 eller 2 graders global temperaturökning. Detta betyder att samhället behöver anpassa sig till nya förhållanden. Bättre kunskap och information om vilka de förväntade förändringarna är, liksom vilka effekter de kan få ökar möjligheten till ändamålsenlig klimatanpassning. Eftersom effekterna blir mer påtagliga vid högre grad av temperaturökning ökar också behovet av klimatanpassning i paritet med uppvärmningen.

I ett globalt perspektiv är temperaturökningen större över kontinenterna än över haven och större närmare polerna, detta medför att Sverige utsätts för en omfattande klimatförändring som märks tydligt redan idag. Fortsatt förändring av Sveriges klimat kommer att påverka samhälle och naturmiljö och ställa krav på att klimatanpassningsåtgärder genomförs i Sverige.

Bättre kunskap och information om vilka de beräknade förändringarna är och vilka effekter de kan få ökar möjligheten till ändamålsenlig klimatanpassning. Klimatinformationen inkluderar då såväl uppföljning av observerade förändringar som arbete med scenarier över framtida klimatutveckling. SMHI tar fram olika typer av klimatinformation för både historiskt och framtida klimat som beskriver klimatförändringen och dess effekter. Arbetet involverar allt från observationer och fältarbete, utveckling och implementering av nya fjärranalysmetoder för övervakning, liksom utveckling och användning av klimatmodeller. Verksamheten spänner över en lång rad olika aktiviteter, från dagliga observationer, forskningsverksamhet vid universitet och forskningsinstitut i Europa och på global skala, till utveckling av klimattjänster vid nationella väderinstitut och andra organisationer som tillhandahåller sådana. Klimattjänster är behovsanpassad information om klimatet och klimatförändring och som exempelvis kan användas i det direkta klimatanpassningsarbetet. En central aspekt i detta arbete är interaktionen mellan de som producerar informationen och de som använder den. SMHI samarbetar med en rad målgrupper för att få fram information och tjänster som ger största möjliga nytta för det svenska samhället. En lång rad olika användare finns till exempel vid expertmyndigheter, länsstyrelser och kommuner, samt privata företag och enskilda personer.

1.1 Syfte

Denna rapport utgör ett underlag till den huvudrapport som Nationella expertrådet för klimatanpassning skall lämna till regeringen, senast den 11 februari 2022. Expertrådets rapport ska innehålla förslag på inriktning av det nationella arbetet för klimatanpassning, en prioritering av anpassningsåtgärder, en sammanfattande analys av klimatförändringens effekter på samhället, samt en uppföljning och utvärdering av det nationella arbetet med klimatanpassning. I den här rapporten ges en uppdatering av det klimatvetenskapliga kunskapsläget och en genomgång av hur klimatinformation kan produceras och användas i klimatanpassningsarbetet med syfte att utgöra en central grund för expertrådets rapport

¹ Senast upprepat vid COP26-mötet i Glasgow, se <https://unfccc.int/documents/310475>

som kommer att vara ett underlag för fortsatt arbete med implementering och vidareutveckling av Sveriges nationella klimatanpassningsstrategi.

1.2 Rapportens struktur och innehåll

Den här rapporten handlar om klimatinformation som finns tillgänglig för stöd i samhällets klimatanpassningsarbete. Rapporten kan läsas i sin helhet eller i sina delar vilka presenteras här nedan. I rapporten finns korsreferenser mellan de olika kapitlen för att underlätta fördjupning.

I kapitel 2 ges bakgrundsinformation om klimatsystemet inklusive en kortfattad genomgång av en del grundläggande begrepp och definitioner. Till exempel behandlas klimatkänslighet och olika tids- och rumsskalor som används för att beskriva klimatets variation och förändring. Kapitlet tar också upp begreppet attribution, dvs. i vilken grad kan människans klimatpåverkan härledas som orsaken till klimatförändringen eller enskilda extremhändelser.

I kapitel 3 beskrivs vad som menas med klimatanpassning och hur detta skiljer sig från arbetet med minskad klimatpåverkan samt kortfattat om hur klimatinformation kan användas i klimatanpassningsarbetet.

I kapitel 4 presenteras mer ingående de olika typer av klimatinformation som finns tillgängliga och hur dessa produceras och kan vidareutvecklas. Det inkluderar såväl observationer och resultat från klimatmodeller, som analyser av klimatförändringar och dess effekter. Där beskrivs också i mer detalj hur klimatinformation kan tolkas och exempel ges på hur den kan användas i klimatanpassningssammanhang. Fokus ligger främst på information om Sveriges klimat som används i det nationella klimatanpassningsarbetet. Utblickar ges också mot övriga Europa och andra delar av världen då klimatanpassning ur ett svenskt perspektiv också handlar om hur Sverige påverkas i förhållande till andra länder och hur effekter i andra länder i sin tur påverkar Sverige. Exempel ges också på hur behovet av klimatinformation har hanterats i några andra länder. Då klimatforskningen bedrivs i ett internationellt sammanhang beskrivs också i korthet ett par av de viktigaste internationella forskningssamarbetena. I kapitlet pekas också på kunskapsluckor och brister i den information som finns tillgänglig idag och ges förslag på förbättringsåtgärder.

I kapitel 5 sammanfattas det naturvetenskapliga kunskapsläget kring den globala klimatförändringen vilket i stor utsträckning bygger på Klimat i förändring 2021 – Den naturvetenskapliga grunden från FN:s klimatpanel IPCC (IPCC, 2021). Här tolkas också IPCC-rapportens resultat och slutsatser i ett regionalt perspektiv för Nordeuropa. Detta innefattar bland annat klimatförändringssignaler baserat på ett stort antal globala och regionala klimatmodeller.

I kapitel 6 presenteras resultat för Sverige från den senaste stora uppsättningen av regionala högupplösta europeiska klimatscenarier vilka ligger till grund för SMHI:s nya webbaserade klimattjänst.

Rapporten avslutas i kapitel 7 med en framåtblick som också pekar på möjligheter och utmaningar inför framtiden.

2 Några grundläggande begrepp om klimatet

I det här kapitlet ges en kortfattad genomgång av ett par centrala begrepp om klimatsystemet, dess naturliga variabilitet och förändring, samt vad som är känt om orsakerna till dagens förändring och om vad som kan komma att hända i framtiden.

2.1 Klimatsystemet och klimatpåverkan

Klimatsystemet är komplext och inkluderar förutom atmosfären och dess växelverkan med markytan också haven, sjöar och andra vattendrag, kryosfären (snö och is), samt också biosfären med djur- och växtliv i hav och på land. En lång rad processer påverkar förhållandena i klimatsystemets olika delar på tidsskalor från sekunder till hundratusentals år. Utöver interna processer i, eller mellan, klimatsystemets olika delar påverkas det också av olika yttre faktorer. Hit hör människans klimatpåverkan genom direkta utsläpp av en rad olika växthusgaser, andra gaser och partiklar som påverkar atmosfärens sammansättning, samt ändrad markanvändning. Andra, yttre, naturliga, påverkansfaktorer är till exempel ändringar i solinstrålningens intensitet, påverkan på systemet av större vulkanutbrott och mycket långsiktiga förändringar i jordbanans form och jordaxelns lutning. För att beskriva och förstå klimatet och dess förändring med tiden behöver hänsyn tas till alla dessa processer.

2.1.1 Klimatkänslighet

Förändringar i yttre påverkansfaktorer, som till exempel en ökning av halten växthusgaser i atmosfären, påverkar klimatet. Storleken på den resulterande klimatförändringen beror utöver graden av påverkan också på klimatsystemets känslighet. Begreppet klimatkänslighet avser hur många grader jordens medeltemperatur skulle öka om halten av koldioxid fördubblades. Två olika mått brukar användas: i) den transienta klimatresponsen (TCR, "transient climate response") som anger hur stor ökningen i medeltemperaturen är vid den tidpunkt fördubblad koldioxidhalt nås, och ii) jämviktsresponsen (ECS, "equilibrium climate sensitivity") för medeltemperaturen då klimatsystemet till stor del hunnit ställa in sig i en ny jämvikt, vilket kan ta flera hundra år. ECS är uppskattad till 3 °C (2,5 °C – 4 °C) i IPCC (2021). Uppskattningen bygger på en rad olika källor till information, som exempelvis kunskap om klimatsystemets processer och rekonstruktioner av jordens klimat under långa tidsperioder (Sherwood et al., 2020).

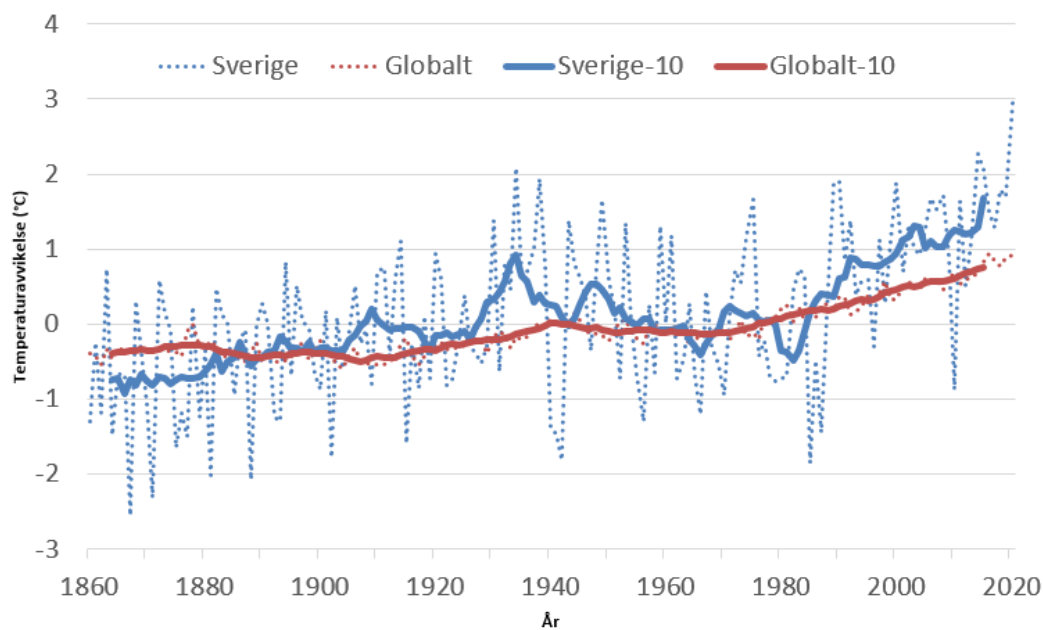
2.1.2 Klimatets variabilitet och förändring

Inom klimatologin beskrivs hur vädret på olika platser typiskt ser ut i ett längre perspektiv. Det handlar till exempel om medelvärden, max- och minimivärden samt om frekvenser, dvs. hur ofta olika väderhändelser inträffar. För att beskriva klimatet används vanligen medelvärden som sträcker sig över 20 år eller mer för att beskriva typiska förhållanden eftersom klimatet uppvisar en stor variabilitet mellan enskilda år eller decennier. Ur ett klimatförändringsperspektiv är det viktigt att kartlägga hur sådana typiska förhållanden ändras med tiden, liksom variationerna inom 20-årsperioderna.

Klimatet varierar naturligt på en mängd olika tidsskalor, från skillnaden mellan dag och natt till skillnaden mellan istider och värmeperioder under tiotusentals år. Utöver förändring till följd av yttre påverkansfaktorer finns också variationer som beror på intern dynamik i klimatsystemet. Enskilda år, decennier eller århundraden kan vara varmare eller kallare än andra motsvarande perioder utan att yttre påverkansfaktorer spelar in. Ett exempel är fenomenet El Niño, vilket är förknippat med att stora områden av Stilla Havet är varmare än normalt. Under ett år med El Niño-förhållanden blir den globala medeltemperaturen är högre än andra år. Motsatsen, La Niña, med kalla förhållanden över Stilla Havet, ger istället år med lägre global medeltemperatur. För svenska förhållanden präglas vårt väder i hög grad av storskaliga vindar och förhållanden i våra omgivningar. En lågtrycksdominerad regnig vinter med mildluft från Atlanten är till exempel väsentligt varmare än en högtrycksdominerad vinter med ostvindar och snö på marken (Kjellström

et al., 2021a). Den här typen av variationer i klimatet som inte styrs av yttre påverkansfaktorer utan av inre processer kallas intern, eller naturlig, variabilitet.

Den interna variabiliteten är olika stor beroende på vilken klimatvariabel och vilket geografiskt område som studeras. Vissa variabler, som till exempel nederbörd, uppvisar större lokal variation än andra som exempelvis temperatur. Variationerna över tid är större för små geografiska områden jämfört med stora områden (Hawkins och Sutton, 2009). Detta kan illustreras av skillnaderna hur temperaturen ändrats över tid i ett globalt medelvärde eller för Sverige (Figur 1).



Figur 1. Avvikelse i årsmedeltemperatur jämfört med medelvärdet för referensnormalperioden 1961–1990 (se vidare kap. 4.1.5) i Sverige (blått) och globalt (rött) från 1860 till och med 2020. De prickade linjerna visar data för varje år. De heldragna tjocka linjerna visar ett löpande 10-årsmedelvärde där punkten är plottad för det femte året i respektive 10-årsperiod. Data för Sverige är från SMHIs klimatindikator (se vidare kap. 4.1.4). Globala data är från HadCRUT5.0 (Morice et al., 2021).

2.1.3 Hur vet vi vad som orsakar förändringarna?

För att i detalj förstå vad som ligger bakom en klimatförändringssignal kan en s.k. attributionsstudie² göras (t. ex. Chen et al., 2021a). Eftersom olika faktorer påverkar klimatet på olika sätt är de alla förknippade med olika signaturer, eller ”fingeravtryck”³, i klimatet. Till exempel skiljer sig regional och vertikal temperaturförändring beroende på om den orsakas av ändrade halter av växthusgaskoncentrationer i atmosfären eller på ändringar i solinstrålning. I en attributionsstudie undersöks om det går att identifiera sådana fingeravtryck i den observerade klimatförändringen.

² En attributionsstudie innebär att man utreder orsakerna bakom en händelse eller ett skeende. I detta sammanhang innebär det vanligen att man utreder i vad mån händelsen/skeendet kan tillskrivas mänsklig klimatpåverkan (eller någon annan extern faktor).

³ Idén om ”fingerprinting” fördes fram av Klaus Hasselmann, nobelpristagare i fysik 2021. Se Hasselmann (1993).

Attributionsstudier handlar inte bara om långsiktiga klimatförändringar. På senare tid har allt fler studier gjorts också för enstaka extremhändelser, se till exempel World Weather Attribution (WWA)⁴ eller de årliga sammanställningarna av extremhändelser från Bulletin of the American Meteorological Society⁵. I korthet går detta ut på att:

- i) identifiera och beskriva händelsen,
- ii) utvärdera tillgängliga klimatmodeller för att se i vilken grad de kan representera en sådan händelse,
- iii) undersöka hur sannolik händelsen är i ett historiskt perspektiv och
- iv) tolka och göra en syntes av händelsen.

Sannolikheten för händelsen undersöks dels i dagens klimat, som är påverkat av människan, och dels i ett klimat som inte alls, eller bara i mindre grad, är påverkat av människan, vilket alltså kan handla om klimatet i mitten av 1900-talet eller ännu tidigare. En mer utförlig beskrivning av den metodik som tillämpas av WWA finns i Otto et al. (2018).

2.1.4 Vad händer med klimatet i framtiden?

Hur framtidens klimat kommer att bli beror av en rad olika yttre påverkansfaktorer: människans klimatpåverkan, klimatkänsligheten och naturliga variationer i klimatet.

Eftersom det inte är exakt känt hur mycket de olika påverkansfaktorerna kommer att ändras går det inte att exakt beräkna hur framtidens klimat kommer att ändras. Trots detta, är så pass mycket känt om de olika påverkansfaktorerna att det i stora drag är klart vad som kommer hända. I dagens situation är det de kraftigt ökande halterna av växthusgaser i atmosfären till följd av människans utsläpp som driver den globala uppvärmningen (IPCC, 2021). Även förändringar i markanvändning och i atmosfärens halt av aerosolpartiklar påverkar klimatet. I dagsläget finns till exempel i vissa regioner höga halter av aerosolpartiklar i luften vilket verkar kylande på klimatet. Efter åtgärder för att förbättra luftkvaliteten kan dessa komma att minska och därmed bidra till ytterligare global temperaturökning. Till skillnad från aerosolpartiklar och mer kortlivade växthusgaser försvinner koldioxid endast mycket långsamt från atmosfären, vilket innebär att i princip alla utsläpp av koldioxid till atmosfären bidrar till en långsiktig klimatpåverkan. Även kraftigt reducerade koldioxidutsläpp innebär därför också en fortsatt temperaturhöjning. Inte förrän netto-nollutsläpp⁶ uppnås globalt kan koncentrationen av koldioxid i atmosfären börja sjunka tills ett nytt jämviktsläge nås. Det beräknas ta många århundraden, eller kanske till och med årtusenden, innan den tillförda koldioxiden så småningom försvinner ur systemet genom sänkor på land och i hav.

Fortsatt ökning av växthusgaser gör att det blir varmare, men inte lika mycket överallt. Haven håller nere temperaturökningen, dels på grund av att värmestillskottet fördelas på ett djupt havsskikt och dels eftersom avdunstning håller ner temperaturökningen i atmosfären nära havsytan. Över kontinenterna är avdunstningen generellt mindre, särskilt i torra områden, och eftersom värmestillskottet fördelas i ett relativt grunt skikt nära markytan kan temperaturen öka mer än över hav. Allra mest ökar temperaturen över Arktis till följd av att de mörkare ytorna, som framträder när snö och is minskar i omfattning, reflekterar solljuset sämre och därmed bidrar till att mer värme tas upp i systemet, den så kallade albedoeffekten. Dessutom försvinner snö- och istäckets isolerande egenskaper

⁴ <https://www.worldweatherattribution.org/>

⁵ <https://www.ametsoc.org/ams/index.cfm/publications/bulletin-of-the-american-meteorological-society-bams/explaining-extreme-events-from-a-climate-perspective/>

⁶ Dvs. att utsläppen motsvaras av motsvarande kolsänkor där kol tas bort från atmosfären genom aktiva åtgärder som till exempel koldioxidinfångning.

vilket gör att värmeledning från marken bidrar till att hålla temperaturen i atmosfären uppe. Den kraftiga uppvärmningen i lägre delen av atmosfären bidrar till att ytterligare förstärka växthuseffekten till följd av att den vertikala temperaturprofilen ändras (exv. Boeke et al., 2021).

Andra förändringar som kommer med ökad temperatur handlar till exempel om att det hydrologiska kretsloppet blir mer intensivt. Detta styrs av ökad avdunstning, vilket följer av att atmosfärens förmåga att innehålla vattenånga ökar vid högre temperatur. Den ökade mängden vatten som tillförs till atmosfären ger i sin tur mer nederbörd. Ett varmare klimat medför också att många extrema väderhändelser blir vanligare och mer intensiva. Detta gäller såväl värmeböljor och varma extremer som kraftig nederbörd och torka. Kalla extremer minskar istället både i frekvens och intensitet.

På kort sikt, upp till något eller ett par årtionden, spelar naturlig variabilitet en relativt stor roll, särskilt i ett lokalt eller regionalt perspektiv. På längre sikt, i takt med allt större klimatpåverkan, kommer klimatsystemets klimatkänslighet att spela större roll för hur stora förändringarna blir. Klimatforskningen arbetar med att förstå och kartlägga dessa påverkansfaktorer. En viktig del i detta arbete syftar till att undersöka i vilken grad klimatmodeller och klimatscenarier kan representera olika aspekter av klimatförändringen. En annan om att kartlägga hur robust information för klimatanpassning det går att få fram givet de osäkerheter som finns.

Vid högre grad av påverkan och större avvikelser från det förindustriella klimatet ökar sannolikheten för händelser som idag har låg sannolikhet att inträffa men som kan medföra stora konsekvenser. En typ av osäkerhet handlar om att oväntade och oförutsägbara händelser som påverkar klimatet mycket kraftigt skulle kunna inträffa. Det kan till exempel handla om att kraftiga vulkanutbrott tillfälligt kan lindra uppvärmningen eller kanske till och med leda till en global avkylning⁷. Den här typen av osäkerhet är vanligtvis inte med i beräkningarna av de klimatscenarier som produceras och analyseras.

Till händelser med låg sannolikhet hör också så kallade tippningspunkter. När och om klimatförändringen når en viss nivå finns möjligheten att klimatet kan ”tippa” in i ett nytt jämviktsläge, den nivån kallas en tippningspunkt⁸. Ett exempel på en tippningspunkt i klimatsystemet berör den Atlantiska meridionala cirkulationen (AMOC⁹). AMOC är ett storskaligt system av havsströmmar där Golfströmmen ingår som skulle kunna avstanna helt vid fortsatt kraftig global uppvärmning. I ett sådant läge kan temperaturerna över Nordatlanten komma att minska och påverka Europa genom lägre, eller inte lika kraftigt ökande, temperaturer och minskad nederbörd. En annan möjlig tippningspunkt är att snabb avsmältning av permafrost kan leda till att infruset metan (s.k. metanhydrater) frigörs. Eftersom metan är en kraftfull växthusgas skulle detta, om tillräckligt stora mängder frigörs under tillräckligt lång tid, kunna pressa jordens klimatsystem mot ett nytt, ännu varmare läge.

Tippningspunkter kan också finnas i naturliga ekosystem som om de påverkas tillräckligt kraftigt kan hamna i ett nytt läge. En sådan potentiell tippningspunkt är att stora skogsområden (t ex Amazonas) minskar kraftigt i utbredning vilket i sin tur skulle påverka det regionala klimatet. En annan är att tropiska korallrev skulle kunna minska kraftigt, dock utan någon större direkt påverkan på klimatet.

⁷ Eftersom temperatursänkningen till följd av stora vulkanutbrott, som till exempel Mount Pinatubos utbrott på Filippinerna 1991, klingar av efter ett eller ett par år (Parker et al., 1996) skulle en långvarig avkylning bara vara möjlig om det sker flera sådana utbrott efter varandra under många år eller decennier.

⁸ På engelska ”tipping point”.

⁹ Atlantic Meridional Overturning Circulation

3 Klimatanpassning

Klimatanpassning handlar om att anpassa samhället till ett föränderligt klimat. Syftet är att minska samhällets sårbarhet och att skapa en förmåga att hantera de risker och möjligheter som följer med en klimatförändring.

Klimatanpassning handlar alltså inte om att minska vår klimatpåverkan (till exempel genom minskade utsläpp av växthusgaser eller förändrad markanvändning) utan om att hantera konsekvenserna av att klimatet ändras. Även om klimatanpassningsarbetet i hög grad är lokalt till sin natur så har det precis som arbetet med att minska klimatpåverkan, en global dimension eftersom klimatet ändras i alla regioner i världen. Det finns också flera andra beröringspunkter mellan klimatanpassning och minskad klimatpåverkan, vilket yttrar sig både i form av målkonflikter och synergier. Ett framgångsrikt arbete med att minska klimatpåverkan ger minskad klimatförändring och därmed ett minskat behov av klimatanpassning. Andra aspekter handlar om att klimatanpassningsåtgärder i sig kan ha olika grad av klimatpåverkan och att åtgärder för minskad klimatpåverkan direkt kan påverka i vilken grad klimatanpassningsåtgärder krävs. Frågorna kan alltså inte hanteras helt åtskilda. I den här rapporten är fokus på klimatinformation för arbetet med klimatanpassning. Det faktiska arbetet med aktiviteter för minskad klimatpåverkan tas inte upp direkt, även om resultatet av det tas med indirekt i form av olika framtidsscenarier och resulterande uppvärmningsnivåer.

3.1 Att använda klimatinformation i klimatanpassningsarbetet

Klimatanpassningsarbetet är komplext och spänner över många samhällssektorer med olika sårbarhet, behov och möjligheter. Verktyg för klimatanpassningsarbete kan därför se mycket olika ut beroende på tillämpning samt i vilken grad klimatanpassningsarbetet syftar till att minska olika risker. Exempel på detta är olika typer av guider, vägledningar, checklistor, metodbeskrivningar, kartor eller diagram. Det är dock grundläggande att beslut om aktiviteter för klimatanpassning bör grundas på bästa tillgängliga klimatinformation, hur klimatet har förändrats och beräknas förändras i framtiden samt skillnaden däremellan. För det svenska klimatanpassningsarbetet är det viktigt att veta vilka klimateffekterna och konsekvenserna beräknas bli för olika sektorer och på olika platser i landet. Det finns också en stor efterfrågan på information om beräkningarnas robusthet.

Klimatanpassningsarbete sker i flera steg. En grund handlar om att analysera klimatutmaningar och sårbarheter samt vilka behov av anpassningsåtgärder som detta kan ge upphov till. För denna analys behövs information både om vilka risker och sårbarheter som finns redan idag, samt om hur dessa kan komma att ändras i ett förändrat klimat. För att göra en riskanalys behövs information om sannolikheten för en händelse samt vilka konsekvenser det får om händelsen inträffar. Både sannolikhetsbedömning och konsekvensbedömning kan göras mer eller mindre kvalitativt eller kvantitativt. Om tillgången till klimatinformation är god finns större möjlighet till kvantitativa beräkningar. Ofta finns det dock begränsningar som gör att en kvalitativ bedömning är att föredra. För många beslut kopplat till klimatanpassning är det ofta tillräckligt att veta vilken förändring som är sannolik. Kommer förändringen kräva att åtgärder behöver genomföras för att till exempel minska sårbarheten för värmeböljor

Ur ett mer praktiskt klimatanpassningsperspektiv är det oftast inte nödvändigt att ha detaljerad information om hela klimatsystemet och om hur det ändras med tiden. För att kartlägga och beskriva hur sannolikheter för olika händelser förändras behövs emellertid information om klimatets variationer både i dagens klimat och för framtiden, samt om hur robust informationen är. För framtida klimat handlar det om allt från de närmaste åren till slutet av århundradet eller längre, beroende på aktuell tidshorisont för klimatanpassningsarbetet. Dessutom är det viktigt att ha en förståelse för hur klimatinformationen hänger ihop med andra faktorer, som exempelvis samhällsutvecklingen. Hur överensstämmer

utsläppsscenarierna med framtidsscenarierna för den sektor eller plats som är i fokus inför en klimatanpassningsåtgärd? Ändras konsekvenserna av en klimathändelse med tiden även om sannolikheten för en viss händelse inte gör det?

Utöver att fokusera enbart på dagens situation är ett längre historiskt perspektiv också värdefullt, inte minst för att kartlägga om det skett en förändring över tid av förekomst av extremhändelser jämfört med vad som observeras i dagens klimat och som simuleras av klimatmodellerna för framtiden. Det är också viktigt för att kunna dra slutsatser om hur samhälle och naturmiljö har påverkats av klimatets tidigare variationer och förändring med tid (Ljungqvist et al., 2021). Dagens samhälle är i stor utsträckning anpassat till det som var rådande klimat för flera decennier sedan vilket i väsentliga delar skiljer sig från dagens klimat. Då klimatförändringen i viss mån kan ses som att klimatzoner flyttas geografiskt betyder det också att information om historiskt klimat på en plats som hade ett visst klimat för hundra år sen, såväl som effekterna av detta, i viss mån kan vara relevant för en annan plats idag eller om ett par decennier (exv. Chen och Chen, 2013).

3.2 Att hantera osäkerheter och svårigheter kring klimatinformationen

Att bedöma klimatinformation handlar till viss del om att arbeta med, eller åtminstone vara medveten om, klimatinformationens begränsningar. Att känna till osäkerheterna och förstå var de kommer ifrån är också ett sätt att hantera dem. Det är också viktigt att komma ihåg att osäkerhet inte är samma sak som okunskap. Det kan handla om ett observationsunderlag där data från en viss geografisk plats saknas och att det därför inte går att göra bra sannolikhetsberäkningar för hur ofta en extremhändelse statistiskt sett kan inträffa på den platsen. Det kan också handla om att beroende av vilken klimatmodell som används kan det resulterande framtidsscenariet se olika ut, något som kan ge upphov till frågor och tolkningssvårigheter. Att det inte är exakt fastställt varken hur klimatet historiskt har varierat eller hur framtidens klimat kan komma att bli betyder inte att det inte går att säga någonting alls. Från den information som finns tillgänglig gäller det att välja ut och använda för ändamålet så robust information som möjligt. Det går oftast att dra slutsatser utifrån den information som finns och i många fall är den informationen fullt tillräcklig för direkta klimatanpassningsåtgärder. Ibland behövs mer detaljerad information vilket kan vara förknippat med större behov av ytterligare beräkningar. De klimatscenarier som finns kanske inte levererar information med önskvärd upplösning i tid eller rum, någon viktig variabel kanske saknas, eller att extremvärden med lång återkomsttid kanske inte kan beräknas.

En korrekt och för ändamålet anpassad information om klimatinformationens begränsningar är också viktig information inför olika beslut. Här är det viktigt med dialog mellan producent av klimatinformationen och med användare för att bygga en förståelse för vilken information som är lämplig att använda i olika situationer men också det omvända, vilken information som inte är lämplig för vissa ändamål. Dialogen hjälper också till att driva utvecklingen av metoder och verktyg för att producera och tillhandahålla klimatinformation genom att allt mer avancerade och preciserade önskemål kommer fram.

Det finns sätt att hantera begränsningarna i klimatscenarierna, både i hur resultaten tolkas och hur de kommuniceras. Kunskap om begränsningarna bidrar till att klimatinformationen blir mer robust och trovärdig. En av de viktigaste källorna till osäkerhet kopplad till information om framtidens klimat är hur de av människan orsakade utsläppen av växthusgaser kommer att utvecklas. I sammanhanget är det viktigt att påminna om att regeringen i den nationella strategin för klimatanpassning tydligt uttalar att osäkerhet

kring utsläpp av växthusgaser och framtida klimateffekter inte får ses som en anledning att inte vidta åtgärder¹⁰.

Förståelse av klimatförändringen och hur den kan beskrivas med hjälp av klimatmodeller ses ofta som relativt svårt och komplicerat av användare av klimatinformation. Vid bedömning av klimatinformationens begränsningar är en dialog mellan producent av klimatinformation och användare mycket viktig. Här finns en ömsesidig möjlighet att utveckla klimatinformationen till att bli mer robust och användaranpassad. Direkt samarbete mellan klimatforskare och de som tillhandahåller klimatinformationen, samt med dem som använder informationen för klimatanpassningsåtgärder är ett effektivt sätt att överbrygga kunskapsgapen. Sådant direkt samarbete har till exempel använts för att bygga upp SMHIs klimattjänster (Kjellström et al., 2016) och för att sammanställa vilka indikatorer som finns tillgängliga eller saknas för olika sektorer (Wiréhn, 2021). SMHIs webbaserade klimatscenariotjänst 2021 (kap. 4.3.3.1) är framtagen som ett resultat av användarnas behov av uppdaterad, mer högupplöst klimatinformation kombinerat med möjligheten för myndigheten att enkelt uppdatera och uppgradera informationen. I behovsanalysen framkom också önskemål att tjänsten också skulle tillhandahålla information om klimatförändring kopplad till oceanografiska och hydrologiska variabler.

Den snabba klimatförändring som observeras idag, i kombination med utvecklingen inom klimatforskningen, gör att klimatinformationen ständigt förbättras. Till exempel innebär det att mer detaljerad information för den lokala skalan successivt blir allt mer tillgänglig.

4 Klimatinformation

Det här kapitlet beskriver vilka typer av klimatinformation som finns för såväl dagens klimat som för historiskt och framtida klimat. Här beskrivs också hur den kan användas för klimatanpassningsarbetet. För Sveriges framtida klimat ligger fokus på att beskriva information från SMHI men utblickar ges också internationellt. Kunskapsluckor och brister i informationen pekas ut, samt var det finns potential att förbättra informationen.

4.1 Historiskt klimat och klimatet idag

4.1.1 Vilka data finns för att studera klimatet i ett långt tidsperspektiv?

För att få information om klimatets variation längre tillbaka i tiden, dvs. flera hundra år eller mer, innan det finns faktiska observationer, går det att rekonstruera till exempel temperatur och nederbörd från indirekta datakällor, så kallade proxies. En klimatproxy är något som påverkas av klimatet och därför kan användas för att säga något om klimatets variationer. En vanligt använd proxy är trädtingsdata, som i olika delar av världen kan användas för att ge information om hur temperatur eller fuktighetsförhållanden har varierat historiskt. För Norrland finns rekonstruktioner av sommartemperatur för de senaste 500 åren (Linderholm et al., 2015). För Sverige finns trädtingsdata för det senaste millenniet över kombinerade variationer i nederbörd och avdunstning (Seftigen et al., 2017). Exempel på andra typer av proxies som i någon mån påverkas av temperatur och/eller nederbörd är förekomsten av olika typer av pollen, bottensediment i sjöar och hav samt isotoper av kol- eller syre i olika molekyler som lagrats i inlandsisar eller i dropstenar i grottor (Moberg et al., 2006) eller i trädringar (Treydte et al., 2007; McCarroll et al., 2009). Historiska dokument kan också användas (Huhtamaa and Ljungqvist, 2021). Ett exempel är hur isförhållanden i Stockholms hamn använts för att rekonstruera temperaturer under vinter och vår (januari-april) för de senaste 500 åren (Leijonhufvud et al., 2010). På liknande sätt har frekvensen av sommartorka i Sverige

¹⁰ https://www.riksdagen.se/sv/dokument-lagar/dokument/proposition/nationell-strategi-for-klimatanpassning_H503163

under perioden 1400–1800 rekonstruerats baserat på kombinerad information från brev, dagböcker, anteckningar mm (Leijonhufvud och Retsö, 2021).

Den här typen av proxybaserad information blir inte lika exakt som direkta mätningar, men kan ändå ge en god indikation om hur klimatet har varierat och ändrats. I tolkningen av proxydata är det viktigt att ta hänsyn till representativiteten. Som exemplen ovan visar är flera typer av proxies enbart representativa för en viss säsong och kan därför inte användas för att göra generella utlåtanden om en viss period utanför denna säsong. När det gäller historiska noteringar finns risken att enstaka extrema väderhändelser med stora konsekvenser för samhället tolkas som tecken på långsiktig klimatförändring (Ljungqvist et al., 2021). Utöver de osäkerheter som kan uppkomma vid tolkning av data, tillkommer i vissa fall också en osäkerhet i datering. Tidsupplösningen skiljer sig beroende på typ av proxybaserad information. För väldaterade trädringsserier eller historiska data från dagböcker kan data fås fram för individuella år medan bottensediment i hav och sjöar endast kan bidra med information med en tidsupplösning från decennier upp till århundraden.

Det finns exempel på att olika typer av proxies använts för att rekonstruera olika klimatologiska företeelser för Sverige under de senaste århundradena eller till och med i ett millennieperspektiv, i Moberg et al. (2006) görs en sammanställning av en del av dessa studier. IPCC har i sina tidigare rapporter (exv. IPCC, 2007; 2013) haft med ett kapitel som varit tillägnat det historiska klimatet. I senaste rapporten (IPCC, 2021) fanns detta inte med utan den typen av information vävdes istället in i övriga kapitel.

Klimatmodeller kan också användas för att ge information om förntida och historiskt klimat. Det finns internationella projekt där klimatmodeller jämförs både mot varandra och mot olika typer av proxydata för att på så sätt skapa en bild av klimatet vid olika tidpunkter. Inom det internationella projektet PMIP¹¹ har klimatmodeller använts för att studera klimatet vid senaste istidens maximala utbredning för cirka 21 000 år sedan och under mellersta Holocen för cirka 6 000 år sedan som var en tidsålder präglad av varma förhållanden. För svensk del finns studier för olika perioder av senaste istiden (Kjellström et al., 2010; Strandberg et al., 2011; Ludwig et al., 2017) och varma förhållanden under mellanistider (Strandberg et al., 2014; Russo och Cubash, 2016) samt för det senaste millenniet (Schimanke et al., 2012; Gómez-Navarro et al., 2015).

4.1.2 Vilka data finns för att studera klimatet för de senaste 150 åren?

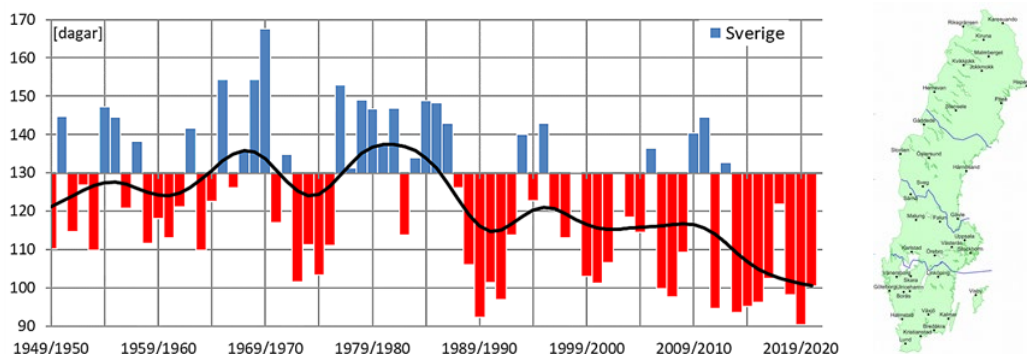
För att kartlägga klimatet mer i närtid används olika typer av observationer. I Stockholm och Uppsala, samt i ett fåtal andra europeiska städer, finns temperaturserier som sträcker sig tillbaks till 1700-talet, vilket ger en unik möjlighet att studera klimatets variation under flera århundraden (se t. ex. Camuffo och Jones, 2002). Antalet temperatur- och nederbördsserier som sträcker sig tillbaka till slutet av 1800-talet (jfr. Fig. 1) är fler och används för att följa upp hur klimatet utvecklas över tid, så kallade klimatindikatorer (se kap 4.1.4). Andra variabler har tillkommit efter hand och flera av dessa används också som klimatindikatorer (Fig. 2).

Observationer relevanta för klimatologiska studier finns i stor mängd men tyvärr ofta i pappersform i olika arkiv. Dessa data som till exempel finns i SMHI:s arkiv, journaler eller i äldre tidskrifter behöver digitaliseras för att på så sätt tillgängliggöras för studier av klimatets historiska variabilitet (Belušić et al., 2019). För ett antal variabler eller fenomen finns äldre sammanställningar men ingen systematisk uppföljning, exempelvis den utförliga genomgången av hagelförekomst i Sverige under sent 1800-tal och tidigt 1900-tal av Hamberg (1917).

Även om det finns relativt många och långa temperaturserier så är informationen begränsad både i tid och rum. För de flesta andra klimatvariablerna är tidsserierna betydligt kortare och för en del av de längre serierna har mätningar över tiden skett olika

¹¹ Paleoclimate Modelling Intercomparison Project, <https://pmip.lsce.ipsl.fr/>

ofta eller på olika tider på dygnet vilket försvårar jämförelser över tid. Den geografiska täckningsgraden varierar i olika delar av landet och är inte alltid optimal för att studera klimatets förändring. Det är till exempel glest med stationer som mäter snötäcke i stora delar av Norrlands kustland och i delar av södra Svealand (Fig. 2). Det är just i dessa områdena som förväntade förändringar i snötäcket är som störst (kap. 6.3.3).



Figur 2. Exempel på en klimatindikator. Antalet dagar med snötäcke under perioden från vintern 1949/50 till vintern 2020/21 presenteras. Data visar ett medeltal baserat på 37 stationer utspridda över Sverige enligt kartan till höger. Källa: SMHI¹².

För att undersöka klimatets förändring över tid är det viktigt att säkerställa att eventuella förändringar beror på klimatet och inte andra faktorer, som till exempel instrumentbyten, ändringar i omgivning eller mätmetodik. Ett exempel på sådana faktorer som haft inverkan är införandet av observationsburar för att minska påverkan från direkt solstrålning vid mätning av temperatur, ett annat exempel är övergången från manuella mätningar till automatstationer med nya typer av instrument. Lokala ändringar i temperaturklimatet till följd av ökad grad av urbanisering är en faktor att ta hänsyn till för stationer i tätorter.

Ändringar har också gjorts inom observationsnätet för nederbörd. Till exempel har bättre vind- och avdunstningsskydd införts och det är ännu inte fastställt i vilken utsträckning det kan påverka långsiktiga trender. För att komma tillrätta med den här typen av problem bedriver SMHI en omfattande kvalitetskontroll av observationsdata.

För vissa typer av observationer rekommenderar WMO att data också homogeniseras, det innebär att enstaka observationer kan justeras för att bättre representera de klimatologiska förhållanden som rådde vid tillfället i fråga. För att genomföra homogenisering behövs god information från närliggande stationer (Alexandersson och Moberg, 1997; Moberg och Alexandersson, 1997; Joelsson et al., 2021; Coscarelli et al., 2021). Homogenisering av temperatur och nederbörd utförs på SMHI men även vindhastighet kan homogeniseras. För Sverige har till exempel vinddata från 24 stationer från 1956 till 2013 analyserats och homogeniserats med hjälp av geostrofisk vindhastighet som referensdata (Minola et al., 2016). Ett ännu längre homogeniserat dataset för vind har tagits fram som täcker perioden från 1925 (Zhou et al., 2022).

Utöver enskilda observationstidsserier och proxybaserad information (kap. 4.1.1) finns också olika typer av griddade dataset för historiskt klimat för de senaste århundradena, med ”griddad” avses att data finns tillgängligt på ett regelbundet rutnät. Det handlar dels om att data interpolerats i rummet för att täcka till exempel Skandinavien eller Europa (se exempel i Chen et al., 2020) och dels om så kallade historiska återanalyser (se vidare kap. 4.1.3) som täcker in tiden från 1800-talets mitt och fram till idag (Compo et al., 2011; Slivinski et al., 2021). Återanalyser handlar om globala och regionala griddade dataset som kombinerar väderprognosmodeller med väderobservationer.

¹² <http://www.smhi.se/klimat/klimatet-da-och-nu/klimatindikatorer/klimatindikator-antal-dagar-med-snotacke-1.91081>

4.1.3 Vilka data kan användas för att studera klimatet under de senaste decennierna?

De senaste årtiondena har det skett en omfattande automatisering av många markbaserade stationer, vilket inneburit en förändring i observationsserierna. Det har bland annat inneburit ökad observationsfrekvens då flera instrument är igång och läses av i realtid. En nackdel är att homogeniteten i långa serier kan ha påverkats vid bytet från de manuella avläsningarna till automatobservationerna. Generellt har antalet observationsstationer i Sverige minskat under de senaste decennierna. Utöver direkta punktmätningar är det därför nu vanligt att använda griddade dataset där information från de enskilda stationerna interpolerats till ett rutnät som täcker ett större geografiskt område. Hit hör till exempel E-OBS (Cornes et al., 2018) med dagliga data för temperatur (dygnsmedelvärde, maximi- och minimitemperaturer), nederbörd, relativ fuktighet, vindhastighet, lufttryck samt globalstrålning för hela Europa med ca 10 km rumslig upplösning från år 1950 och framåt. Interpolationen i griddade dataset kan vara gjord med olika grad av förfining. Allt från enkel interpolation där hänsyn endast tas till avstånd mellan en observationsstation och närmaste gridruta till mer sofistikerade metoder som tar hänsyn till inbördes rumsliga korrelationer, höjdinformation, vindriktning etc. Exempel på det senare är det så kallade PTHBV-datasetet som täcker Sverige med 4x4 km upplösning för temperatur och nederbörd (Johansson och Chen, 2003).

För de senaste decennierna har nya möjligheter tillkommit, exempelvis fjärranalysdata i form av satellitbaserad information och radardata. Dessa typer av data är yttäckande och ger ett mycket bra komplement till punktbaserade markobservationer. Det är dock inte enkelt att översätta och tolka informationen från satellit och radar till något som representerar klimatologiska variabler och även här finns ibland problem med homogenitet. Exempel på fjärranalysbaserade klimatologiska dataset är den radarbaserade HIPRAD-produkten där radardata kompletterats med information från SMHIs nederbördsräknare för att ge yttäckande information om nederbördsmängder. HIPRAD täcker Sverige med 2x2 km upplösning från år 2000 (Berg et al., 2016). Ett annat exempel är CLARA-A2 som är ett satellitbaserat dataset för moln och strålningsförhållande med global täckning från 1982 till 2015 (Karlsson et al., 2017). Utvecklingen inom området går snabbt och det finns goda möjligheter att utöka användningen av fjärranalysdata inom ramen för utveckling av olika klimattjänster vilket till exempel görs inom Copernicus Climate Change Services (C3S)¹³.

Utöver observationer och fjärranalysprodukter så kan dagens klimat beskrivas med hjälp av återanalyser. Återanalyser produceras med hjälp av observationer och en väderprognosmodell och ger användaren information om platser och tidpunkter där det inte finns observationer. Information om atmosfärens tillstånd innehåller bland annat temperatur, nederbörd, vind och lufttryck under en period och i ett rutnät över ett geografiskt område. På motsvarande sätt finns återanalyser också för oceanografiska förhållanden då till exempel temperatur, salthalt och strömförhållanden räknats ut i en havsmodell med hjälp av observationer i havet.

I daglig vädertjänst används väderprognosmodellerna för att göra en analys av väderläget från vilken väderprognosmodellen kan ta sin utgångspunkt. I det analysarbetet utgår modellen från en tidigare prognos till den aktuella tidpunkten. I en process som kallas dataassimilation använder modellen därefter alla tillgängliga observationer för tillfället ifråga för att på ett optimalt sätt styra prognosmodellen så nära det aktuella väderläget som möjligt (Gustafsson et al., 2012; Lindskog and Landelius, 2019). Den typen av väderanalyser finns tillgängliga för de senaste decennierna, men eftersom väderprognosmodellerna ständigt förbättras är materialet inte homogent.

¹³ <https://cds.climate.copernicus.eu/>

För att få homogenitet i materialet skapas därför återanalyser för vissa perioder, då en och samma prognosmodell används för att göra om alla analyser för flera decennier. Till exempel finns nu den globala återanalysen ERA5 med data på 310 x 310 km upplösning från 1950 och framåt (Hersbach et al., 2020). För Europa finns ännu mer högupplöst data (11 x 11 km) tillgängligt i form av UERRA-data (Schimanke, 2020) som täcker in perioden 1961–2019. Till skillnad från de historiska återanalyserna (se kap. 4.1.2) som sträcker sig långt tillbaka i tiden baseras återanalyserna för de senaste decennierna på ett mycket bättre observationsunderlag och har därför högre kvalitet.

I arbetet med SMHIs scenariotjänst (kap. 4.3.3) identifierades behov av ett nytt referensdataset för klimat, det har nu tagits fram för perioden 1961–2018. Datasetet bygger på en kombination av observationer och återanalyser (SMHI GridClim). Data täcker de nordiska länderna med en horisontell upplösning av 2,5 x 2,5 km. Variablerna som tagits fram är lufttemperatur och relativ luftfuktighet vid två meters höjd med en upplösning av 1, 3 eller 6 timmar beroende av tidsperiod, samt dygnsupplöst min- och maxtemperatur, nederbörd och snödjup.

Datasetet är framtaget med optimal interpolation av stationsdata genom analysverktyget gridpp, som är en öppet tillgänglig programvara från Norska Meteorologiska Institutet. Observationer till analysen har, förutom från SMHI, också erhållits från de norska och finska meteorologiska instituten, samt från ECMWF (European Centre for Medium range Weather Forecasts). En ansats gjordes också att använda datasetet ECA&D¹⁴ från KNMI, men på grund av svårigheter med att tidsstämplarna för data från olika länder inte överensstämde, uteslöts datasetet ur analysen. Kvalitetskontroll av observationerna gjordes med programvaran TITAN, som även den finns tillgänglig från och utvecklats av Norska Meteorologiska Institutet.

En gedigen kvalitetskontroll exkluderar fysikaliskt orimliga värden. Observationerna sammanställs till ett griddat dataset med hjälp av en ”första gissning” från den regionala återanalysen UERRA vilket möjliggör att klimatvariabeln antar värden i områden där observationer saknas givet det aktuella väderläget. I nästa steg skalas UERRA:s återanalys ner från 11 x 11 till 2,5 x 2,5 km horisontal upplösning med optimal interpolation vilket minskar avvikelsen från observationer samtidigt som den bevarar ”mönstret” från återanalysen, dvs. med bibehållen konsistens med det storskaliga väderläget.

Anpassningen gjordes med nedskalningsparametrar som varierar över året och dygnet. I GridClim representeras varje parameter således av medelvärdet för en ruta på 2,5 x 2,5 km. Trots sin höga upplösning motsvarar värdena i GridClim inte exakt det uppmätta värdet vid en observationspunkt. Tidsvariabiliteten i stationsdata kommer därför att vara högre än variabiliteten för motsvarande ruta i GridClim. Som en biprodukt av den optimala interpolationsmetoden fås ett konfidensintervall för gridrutans medelvärde. Kvalitén hos SMHI GridClim med avseende på genomsnittligt RMSE är liknande den som tagits fram för griddade data för andra nordiska länderna med varierande analysmetoder; ”seNorge” från Norge och ”FMI-ClimGrid” från Finland.

4.1.4 Klimatindikatorer

Klimatindikatorer är mått som används för att visa förändringar eller på ett enkelt sätt göra komplexa fenomen tydliga. I vissa fall kan klimatindikatorn fungera som en varningssignal. Indikatorerna kan användas i ett större sammanhang, till exempel vid jämförelser med andra länders indikatorer eller andra klimatanalyser. Indikatorerna kan även användas för att studera förändringar över tiden och i rummet. Vanliga mått är års-, säsongs- eller månadsvärden av olika variabler som beskriver klimatet. Det är av största vikt att de indikatorer som används är homogena (likformiga och jämförbara) över tiden och helst också i rummet. När det gäller indikatorer för klimatet ställs stora krav på

¹⁴ <https://www.ecad.eu/>

tillgång till långa serier eftersom förändringarna ofta sker långsamt och bakgrundsbruset (den naturliga variationen) är betydande.

Tabell 1. Elva klimatindikatorer baserade på observationer från SMHI. Förkortningar för tre månaders säsonger enligt Vinter (DJF), Vår (MAM), Sommar (JJA) och Höst (SON). Källa: SMHI¹⁵.

Klimatindikator	Vad är detta?	Startår	Geografiskt område
Temperatur	Års- samt säsongsmedeltemperatur för DJF, MAM, JJA, SON	1860	Sverigemedelvärde baserat på 35 stationer
Nederbörd	Års- samt säsongsvis nederbörd för DJF, MAM, JJA, SON	1860	Sverigemedelvärde baserat på 87 stationer
Extrem nederbörd	1. Medel av årets största dygnsnederbörd 2. Antal fall med dygnsnederbörd om minst 40 mm 3. Årets största dygnsnederbörd	1900	1.–2. Sverige-medelvärde baserat på cirka 60 stationer 3. Samtliga SMHIs stationer
Havsvattenstånd	Medelvärde över havsnivåhöjningen korrigerad för lokal landhöjning	1886	14 stationer längs Sveriges kust
Havsis	Maximal isutbredning (baseras på dagliga iskartor)	1957	Östersjön och Kattegatt
Antal dagar med snötäcke	Antal dagar med snötäckt (minst 50%) mark	1949/50	Sverigemedelvärde baserat på 37 stationer samt uppdelning på Götaland, Svealand, N och S Norrland
Vinterns största snödjup	Maximalt snödjup under vintersäsongen	1904/05	Sverigemedelvärde baserat på 43 stationer samt uppdelning på Götaland, Svealand, N och S Norrland
Vårflodsstart	Tidpunkt för starten på vårflödet	1910	Medelvärde för 22 vattendrag i norra delen av landet
Vegetationsperiodens längd	Perioden av året då dygnsmedeltemperaturen överstiger +5°C	1961	Södra Sverige (20 stationer i Götaland och södra Svealand) Norra Sverige (16 stationer i norra Svealand och Norrland)
Globalstrålning	Års- samt säsongsvis globalstrålning (total mängd solstrålning som träffar en horisontell yta) för DJF, MAM, JJA, SON	1983	Sverigemedelvärde baserat på 8 stationer.
Geostrofisk vind	Beräknad vind utifrån skillnad i observerat lufttryck mellan tre platser 1. Medelvind 2. Maxvind 3. Antal dagar med vind över 25 m/s 4. Potentiell vindenergi	1879	9 trianglar över landet

¹⁵ <http://www.smhi.se/klimat/klimatet-da-och-nu/klimatindikatorer/klimatindikatorer-1.7050>

Klimatindikatorer kan tas fram såväl baserat på historiska observationer och griddade dataset som på klimatmodellresultat för framtiden. Klimatindikatorer kan till exempel handla om att följa upp jordens medeltemperatur eller havsisens utbredning i Arktis. Det kan också handla om att följa upp hur olika typer av väderextremer ändras över tid i olika delar av Europa. En rad olika listor av sådana klimatindikatorer, eller index, har tagits fram inom olika projekt (t.ex. Kjellström et al., 2021b) och är något som det samarbetas kring i internationella sammanhang som inom den världsmeteorologiska organisationen WMO¹⁶.

Baserat på tillgänglig klimatinformation för Sverige har SMHI tagit fram 11 klimatindikatorer för att löpande kunna följa klimatets utveckling över tid (Tabell 1). Av tabellen framgår att observationsunderlaget är mycket olika för de olika indikatorerna samt att tidsserierna varierar där några startar redan 1860 (temperatur och nederbörd) medan andra startar långt senare, i något fall så sent som 1983 (global-strålning).

För klimatindikatorerna saknas som regel jämförelser med yttäckande griddade dataset och det kan därför vara svårt att tolka informationen i ett mer lokalt perspektiv.

4.1.5 Referensperioder

Eftersom vädret och klimatet varierar så krävs långa perioder för att på ett bra sätt kunna beskriva vad som är normala variationer i ett visst klimat. Världsmeteorologiska organisationen (WMO) bestämde redan på 1930-talet att en så kallad normalperiod, som täcker in variationer över en längre tid, ska sträcka sig över en lång period och beslöt använda 30-års-perioder för ändamålet. Perioden 1 januari 1901 till 31 december 1930 bestämdes som den första internationella normalperioden.

I takt med att tiden går så blir en viss normalperiods beskrivning av dagens klimat allt mindre representativ, särskilt i en tid av snabb klimätförändring. Normalperioder används både för att beskriva det nuvarande klimatet och hur klimatet har förändrats jämfört med tidigare normalperioder. På grund av de snabba förändringarna behöver den rådande normalperioden regelbundet bytas ut så att jämförelse av dagens förhållanden kan göras mot en så aktuell normalperiod som möjligt. Samtidigt är det av intresse att använda någon tidigare normalperiod för att följa upp och studera den långsiktiga klimatförändringen.

WMO har gjort följande definitioner:

- Periodmedelvärden: Medel av klimatdata beräknade över en period på minst tio år som startar 1 januari ett år som slutar med siffran 1. Exempelvis 1 januari 1981 till 31 december 2000.
- Normalvärden: Medelvärden beräknade för en enhetlig och relativt lång period som innehåller minst tre tioårsperioder.
- Standardnormalvärden: Medelvärden beräknade för 30-årsperioderna 1961–1990, 1971–2000, 1981–2010, 1991–2020 och så vidare.

På SMHI används idag perioden 1991–2020 för jämförelser med dagens väder och referensnormalperioden 1961–1990 för studier av klimätförändringen. Notera att perioden 1991–2020 refererar till en historisk period för ett klimat i snabb förändring. Det betyder att den inte nödvändigtvis är representativ för dagens klimat och att skillnaden ökar ju längre tiden går. Därför är det bestämt att normalperioden byts ut vart 10:e år, nästa gång 2031 då 2001–2030 blir ny normalperiod. Referensnormalperioden 1961–1990 kommer även då fortsätta att gälla. Detaljerade analyser för andra perioder, liksom för skillnader mellan normalperioder görs inte rutinmässigt.

¹⁶ <https://climipact-sci.org/about/project/>

Trots att dessa definitioner fastställts, används ibland andra tidsperioder. Till exempel har IPCC ibland använt de senaste 20–30 åren som den referens mot vilken den beräknade klimatförändringen jämförs med eftersom det är detta material som varit tillgängligt i den forskning som utvärderats (IPCC, 2007; 2013; 2021). Ibland finns det problem med att välja en period nära nutiden. I många av de klimatsimuleringar som används i dag börjar ”framtiden” redan 2006 eller 2016 med de scenarier av växthusgaser som fanns tillhanda när simuleringarna gjordes. Det kan också finnas andra praktiska orsaker att 1961–1990 inte används som referensperiod. Klimatmodellsimuleringar utförs på superdatorer och kräver mycket stora beräkningsresurser. Därför finns det till exempel simuleringar med regionala klimatmodeller som inte startar förrän 1970, detta för att spara datorkraft. Då används ofta perioden 1971–2000 som en kompromiss mellan datorkraft och historisk referens.

Även för observationer kan begränsningar i datatillgång styra över vilka referensperioder som används. Ett exempel är tillgången till satellitbaserad information som ofta är begränsad för 1960- och 1970-talen. När nya bättre satelliter utvecklas finns ny information men den är då endast tillgänglig för de allra senaste åren. Ett annat exempel handlar om de bojar som används för att kartlägga temperatur och salthalt i haven¹⁷, vilka placerats ut under de senaste två decennierna.

I andra sammanhang kan det vara önskvärt att jämföra mot förindustriella förhållanden. I sådana fall sätts referensperioden, beroende på tillgång till data, vanligen till någon gång i slutet av 1800-talet, t.ex. 1861–1890 eller 1850–1900, eller ibland sätts till ”omkring år 1750”.

Till följd av de begränsningar som diskuteras här ovan används olika referensperioder i olika sammanhang även i den här rapporten.

4.2 Klimatscenarier för framtiden

För att ta fram klimatscenarier för framtiden görs simuleringar med numeriska klimatmodeller under antagande om olika scenarier för framtida klimatpåverkan.

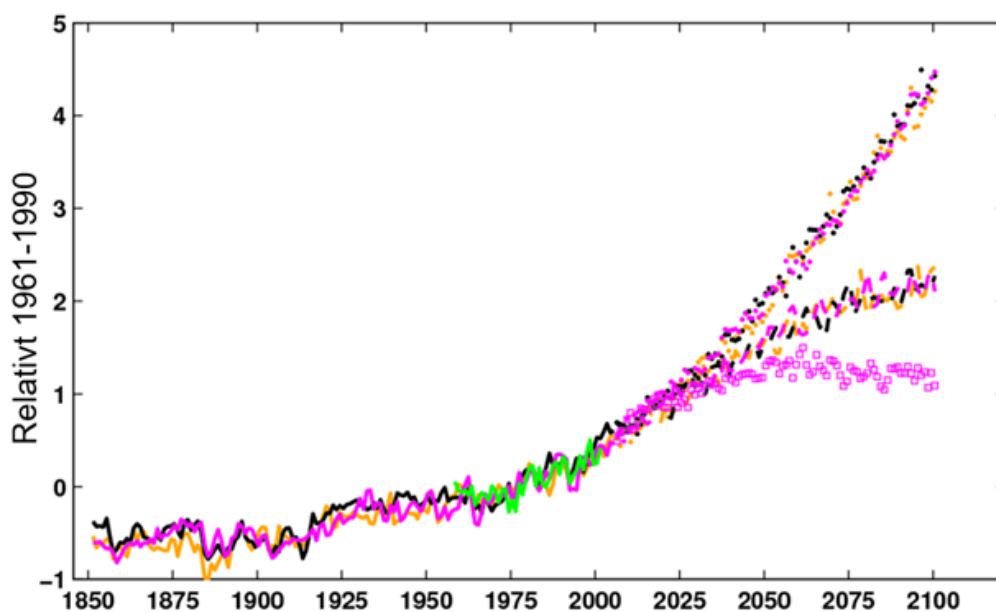
4.2.1 Klimatmodeller och scenarier

Numeriska klimatmodeller har utvecklats sen 1960-talet då de första beräkningarna gjordes med förenklade modeller, bland annat av 2021 års Nobelpristagare i fysik, Syukuro Manabe, som är en av pionjärerna inom området. Dagens mest avancerade modeller är mer kompletta klimatsystemmodeller genom att de beskriver fysikaliska, kemiska och biologiska processer i atmosfär, land och hav. För att kunna göra beräkningar och få fram klimatscenarier behövs mycket kraftfulla datorresurser och därför körs klimatsimuleringar på superdatorer. Modellerna utvecklas kontinuerligt allt eftersom det tillkommer ny teoretisk kunskap och processförståelsen ökar. Därmed inkluderas successivt fler processer som är relevanta för klimatsystemet och beskrivningen av redan inkluderade processer förbättras. I takt med att även observationer och fjärranalysmetoder utvecklats har utvärderingen av modellerna kunnat göras mer sofistikerad och täcker in fler aspekter och relevanta processer i klimatsystemet. Särskilt har modellernas förmåga att representera de klimatförändringar som observerats under de senaste decennierna bidragit till att förbättra uppskattningen av jordens klimatkänslighet.

De resultat som presenteras från beräkningar av framtida klimat med klimatmodeller brukar betecknas klimatscenarier eller klimatprojektioner. Även om en klimatmodell beräknar hur väderläget ser ut för varje tidpunkt i en klimatsimulering kan detta inte direkt jämföras med den faktiska utvecklingen och alltså inte heller med väderobservationer från en specifik plats vid någon enskild tidpunkt. Vädrets utveckling är på längre tidsskala än några dagar kaotiskt och dess utveckling i en given klimatmodell är en

¹⁷ <http://www.argo.net/>

fullt tänkbar realisering, men det finns många tänkbara realiseringar och endast en verklighet. Även om klimatet i två klimatmodeller är exakt detsamma kan det vara resultatet av helt olika utveckling i vädret. På samma sätt kan två körningar med samma klimatmodell, och därmed identiskt klimat, men olika startdag ha helt olika väder en given dag. Klimatscenariot baseras på antaganden om framtiden och även om klimatmodellen räknar fram en väderutveckling läggs fokus på hur beräkningarna representerar vädrets statistiska beteende, det vill säga klimatet. Klimatscenarier är alltså inte samma sak som väderprognoser, vilka ger information om vad som kommer att kunna hända under en kortare tid. Skillnaden beror på att väderprognosen startar från en analys av den faktiska situationen medan klimatmodellen startar från ett godtyckligt modelltillstånd. På lite längre sikt, efter drygt en vecka, har väderprognosmodellens tillstånd drivit iväg från det faktiska tillståndet och prediktabiliteten är i princip noll. En klimatsimulering som startar från ett godtyckligt modelltillstånd kommer med största sannolikhet aldrig att ligga nära det exakta väderläget vid någon viss tidpunkt men fångar upp långsiktiga trender till följd av ändrad klimatpåverkan. Det här betyder också att om en och samma klimatmodell körs två gånger från olika starttillstånd men i övrigt under samma antaganden om ändringar i klimatpåverkan kommer detta resultera i två olika klimatscenarier där utvecklingen inte är i fas med varandra. Även om den långsiktiga utvecklingen - klimatet - är densamma skiljer sig resultaten alltså från ett år till nästa, såväl som mellan olika årtionden (Fig. 3).



Figur 3. Simulerad ändring i global medeltemperatur (°C) med den globala klimatmodellen EC-Earth. Modellen har här körts tre gånger med start från 1850 (svart, gul och rosa). Fram till 2005 har rekonstruerad ändring i klimatpåverkan använts. Från och med 2006 har tre olika scenarier för klimatpåverkan använts; RCP2,6 (lägsta, bara rosa), RCP4,5 (mellersta, alla tre) och RCP8,5 (störst påverkan, alla tre). Se kapitel 4.2.4 för en beskrivning av scenarierna. Den gröna linjen visar motsvarande data från den globala återanalysen ERA40 (Uppala et al., 2005). Skillnaden mellan olika år och årtionden beror dels på naturlig variabilitet och dels på ändrad klimatpåverkan där det utöver de långsiktiga trenderna mot ett allt varmare klimat också noteras att stora vulkanutbrott medfört tillfällig nedkylning 1883 (Krakatoa), 1962 (Agung) och 1991 (Pinatubo).

4.2.1.1 Globala klimatmodeller

Stora internationella forskningssamarbeten har bidragit till utvecklingen av klimatmodeller och även till att producera de klimatscenarier som används för att ta fram klimatinformation. För globala klimatmodeller handlar det om stora internationella experiment som CMIP3 (Meehl et al., 2007), CMIP5 (Taylor et al., 2012) och CMIP6 (Eyring et al., 2016) där CMIP står för "Coupled Model Intercomparison Project". Att modellerna är "kopplade" innebär att modeller för klimatsystemets olika delar, atmosfär, hav och land tillåts att direkt påverka varandra under simuleringens gång. Den vanligaste horisontella upplösningen för de olika generationerna av CMIP brukar anges vara ca 250 km i CMIP3, 150 km i CMIP5 och omkring 100 km i CMIP6, där flera modeller också körts med ca 50 km upplösning (Xin et al., 2021). Det ständiga utvecklingsarbetet med klimatmodellerna leder till att de blir allt bättre på att representera klimatsystemet. Fler processer har inkluderats över tid och idag representerar många modeller förutom det mer traditionella fysikaliska atmosfär-hav-land-systemet också atmosfärskemi och aerosolpartiklar, biogeokemiska processer i haven, dynamisk vegetation och glaciärer.

Systematiska jämförelser mellan modeller från de olika generationerna visar på mindre avvikelser från observationerna i CMIP6 än i CMIP5, vilka i sin tur var bättre än de äldre CMIP3-modellerna (Bock et al., 2020). Även om många processer är inkluderade i klimatmodellerna finns fortfarande stora osäkerheter i samband med flera av dem, till exempel permafrost, landisar, marina stratocumulusmoln och den termohalina cirkulationen i haven.

I Sverige har flera forskargrupper bidragit till utveckling och användning av olika globala klimatmodeller. Särskilt kan nämnas att SMHI under de senaste dryga femton åren, tillsammans med forskare från Stockholms Universitet och Lunds Universitet arbetat med att utveckla den globala klimatmodellen EC-Earth (Döscher et al., 2022). EC-Earth bygger i delar på den gemensamma europeiska väderprognosmodellen från ECMWF och EC-Earth utvecklas inom ramen för ett internationellt konsortium, med över 25 olika forskargrupper i Europa, som idag leds från SMHI. Utöver modellutveckling har Sverige genom EC-Earth-arbetet bidragit med klimatscenarier både till CMIP5 och CMIP6 och därmed till IPCCs femte och sjätte rapport (IPCC, 2013; 2021). Medverkan från svenska forskargrupper i dessa internationella sammanhang är nödvändig för att bygga den expertis som krävs för att på ett kvalitetssäkrat sätt kunna skala ner och analysera de modellresultat som är så viktiga för att kunna klimatanpassa det svenska samhället.

4.2.1.2 Regionala klimatmodeller

En viktig del i utvecklingen av klimatmodeller handlar om att öka upplösningen i tid och rum då det förbättrar möjligheten att representera olika fenomen, särskilt för att kunna producera användbara resultat för klimatomställning och anpassning. En metod för att kunna höja upplösningen, som utvecklats bland annat vid SMHI, handlar om så kallad dynamisk nedskalning med regionala klimatmodeller (Giorgi, 1990; Rummukainen, 2010). Metodiken innebär att data från en grovt upplöst global klimatmodell används som indata på de horisontella gränsytor till en regional modell som satts upp för ett begränsat område, till exempel Europa eller Skandinavien. Där kan den regionala modellen köras med högre upplösning och därmed bättre representera påverkan från fördelningen av land, hav och sjöar samt höjden på bergskedjor inom området. Tillsammans med bättre förmåga att simulera väderfenomen, som lågtryckssystem med tillhörande fronter, förbättrar detta möjligheten att simulera till exempel nederbörd på ett realistiskt sätt. Specifikt för Skandinavien innebär det att grovskaliga globala modeller vanligen ger för lite nederbörd längs Norges västkust och för mycket nederbörd i norra Sverige öster om fjällkedjan. Det kan också handla om att bergstoppar i verkligheten är högre än hur de representeras i en grovskalig modell, vilket gör att de i modellen täcks med för lite snö då den beräknade lufttemperaturen är högre än vad den borde vara på hög höjd.

På motsvarande sätt som för CMIP och global klimatmodellering finns samarbeten kring regional klimatmodellering inom ramen för CORDEX ("Coordinated Regional Climate Downscaling Experiment", se Jones et al., 2011). Specifikt för Europa har regionala klimatmodeller körts med 50 x 50 respektive 12,5 x 12,5 km horisontell upplösning inom EURO-CORDEX (Jacob et al., 2014). I dagsläget har EURO-CORDEX-modellerna använts i relativt stor omfattning och det finns en stor mängd simuleringar med 12,5 x 12,5 km upplösning för hela Europa att använda för att ta fram information om framtida klimat (Coppola et al., 2021).

Liknande jämförelser som för de globala modellerna har visat att högre upplösning i regionala modeller ger förbättringar i representationen av det regionala klimatet. Till exempel undersökte Prein et al. (2016) hur 12,5 x 12,5 km upplösning gav bättre representation av nederbörds-klimat i de regionala modellerna jämfört med när de kördes vid 50 x 50 km upplösning. Trots det har de flesta klimatmodeller, både globala och regionala, som används idag, fortfarande för grov upplösning för att på ett bra sätt representera kraftiga regnskuror vilket leder till stora säkerheter i vad som kan sägas om framtida skyfall (Belušić et al., 2019). Att annat exempel handlar om vindhastighet. För två EURO-CORDEX-modeller som körts på 12,5 x 12,5 km upplösning för en 20-årsperiod (1996–2016) visar en jämförelse mot vindobservationer för Sverige att modellerna har förmågan att simulera byvindhastighet i kustområdena men att vindförhållanden i inlandet eller bergskedjan inte representeras på ett bra sätt (Minola et al., 2021a).

Regionala klimatmodeller har utvecklats och använts vid Rossby Centre på SMHI sedan centret etablerades för närmare 25 år sedan. Regionala klimatscenarier med olika versioner av Rossby Centres regionala klimatmodell RCA har tagits fram i omgångar och använts som underlag i klimatanpassningsarbete i Sverige under lång tid (SOU, 2007; Sjökvist et al., 2015; Kjellström et al., 2016). Den senaste omgången CMIP5-baserade EURO-CORDEX-scenarier med RCA4 och ett stort antal andra europeiska regionala klimatmodeller utgör underlag i SMHIs klimatscenariotjänst 2021 på smhi.se (se vidare kap. 4.3.3.1). Genomgången av dessa beräknade klimatförändringar i Sverige visar att den höga upplösningen som används i de regionala modellerna (12,5 x 12,5 km) möjliggör simuleringen av detaljerade skillnader i klimatet mellan olika delar av landet, mellan kustzon och inland och mellan låglänta och höglänta bergsområden (Kjellström et al., 2021a) även om alla detaljer inte fångas till fullo. Klimatmodellerna representerar mycket av klimatsystemets variabilitet på olika rums- och tidsskalor. Resultaten visar på en tydlig förbättring jämfört med tidigare material som baserades på modeller med lägre upplösning. SMHI har påbörjat arbetet med nedskalning av globala klimatmodeller från CMIP6 med förhoppningen att kunna kvalitetssäkra, analysera och inkludera även dessa nyare scenarier i tjänsten.

Parallellt med arbetet med RCA har det under den senaste 10-årsperioden skett utvecklingsarbete med en annan regional modell som går att köra med ännu högre horisontell upplösning. Vid språnget i upplösning från omkring 10 x 10 km storlek på beräkningsnätets gridrutor till omkring 2–4 km ändras förutsättningarna i modellerna eftersom konvektiva processer, kopplade till de djupa konvektiva molnen som är förknippade med kraftiga regnskuror kan beskrivas mer direkt i modellerna. I de grövre upplösta modellerna måste konvektion parametreras, dvs. den relativt småskaliga processen måste på något sätt uttryckas i modellens variabler som är representativa för den större, upplösta gridskalan. Tester av dessa mycket högupplösta, så kallade konvektionstillåtande modeller, visar det sig att de på ett väsentligt bättre sätt representerar konvektiv nederbörd (Lind et al., 2016; Belušić et al., 2020; Lind et al., 2020). I en del fall har det också visats att den typen av högupplösta modeller ger en kraftigare klimatförändringssignal när det gäller konvektiv nederbörd (Kendon et al., 2014). Med andra ord, simulerade skyfall blir ännu kraftigare, vilket tyder på att de grövre upplösta modellerna saknar beskrivning av viktiga processer för detta fenomen.

Klimatmodeller med grövre upplösning visar på ökad nederbörd i både mängd och intensitet i ett varmare klimat, de nya konvektionstillåtande modellerna pekar på möjligheten för ännu större förändringar. Detta är ett aktivt forskningsfält där klimatmodellerarna står inför flera utmaningar. Inte minst handlar detta om kraven på väsentligt kraftigare datorresurser för beräkningar jämfört med tidigare och än så länge finns endast ett par enstaka klimatsimuleringar med den typen av modeller för Sverige.

4.2.1.3 Hydrologiska modeller

För att förstå vilka processer som styr vattnets flöde och variation i tid och rum i en föränderlig värld kombineras olika typer av data (t.ex. fältmätningar, jordobservationer, radar, meteorologiska modeller) och variabler (t.ex. topografi, nederbörd, markanvändning, jordarter, mänsklig vattenhantering) med numerisk modellering av hydrologiska processer. Hydrologiska processer verkar på olika skalor, beroende på avrinningsområdets storlek och karaktär. I stora och övervägande naturliga områden omvandlas regn och snö över ett stort område långsamt till vattenflöde. Det tar lång tid (dagar, veckor) för vattenbidrag från perifera delar av området att nå floden och rumsliga variationer över området utjämnas över tiden. I små avrinningsområden, särskilt i urbana miljöer, är processen mycket snabbare och flödesrespons på regn eller snösmältning kan ske inom några timmar eller till och med minuter. Responsen är mycket känslig för rumsliga variationer, särskilt den exakta platsen för höga eller extrema regnintensiteter. Hydrologiska system visar stor variation över hela världen och hur de påverkas av nederbörd är väldigt olika. Till och med närliggande floder kan skilja sig mycket i vattenföring och markfuktighet. Detta kan bero på landskapets karaktär, annorlunda klimat, eller mänsklig påverkan genom reglering av flöden, bevattning m.m.

Simuleringar med hydrologiska modeller som tar hänsyn till ovan nämnda faktorer görs för olika avrinningsområden för såväl historiskt som framtida klimat. De hydrologiska modellerna körs vanligen för en rad olika avrinningsområden och delområden som samverkar med varandra. Viktiga steg i utvecklingen av de hydrologiska modellerna involverar processororienterad rumslig indelning inom delområden, beskrivning av specifika hydrologiska komponenter, kalibrering och utvärdering. I kalibreringssteget körs modellerna med observerade data för att reproducera historiska flöden. Här finns en rad utmaningar, till exempel relaterat till att vattenföringen kan vara svår att övervaka på grund av fluktuationer i vattendragen, att nederbörden ofta är heterogen i avrinningsområdet liksom att avdunstning från vattenytor eller vegetation är svår att mäta och att olika vattenförråd ofta är okända, särskilt de som finns under marken. För simuleringar med indata från klimatmodeller behöver ofta s.k. biasjustering (kap. 4.2.2) först göras för att de beräknade flödena skall vara realistiska.

I SMHI:s nya webbaserade klimatscenariotjänst 2021 (kap 4.3.3.1) visas beräkningar för ändrade hydrologiska förhållanden. Dessa har utförts med den hydrologiska modellen S-HYPE (Lindström et al., 2010). S-HYPE beräknar vattenföring och andra hydrologiska parametrar baserat på matematiska representationer av lagrings- och flödesprocesser i och på marken samt i sjöar och vattendrag. Den rumsliga indelningen i S-HYPE följer vattendragens avrinningsområden, och modellen beräknar vattenbalansen i cirka 40 000 delavrinningsområden i Sverige samt angränsande uppströmsområden. Modelleringen omfattar också sjöarnas och dammarnas påverkan på flödesdynamiken och även regleringsrutiner är inkluderade i modellen. Regleringar modelleras som säsongsberoende nyckelvärden som magasinstorlek, produktionsflöden med mera. Nätverk av vattenmagasin inkluderar överledningar mellan olika avrinningsområden, även de parametriserade i modellen. Antaganden om reglering av vattendrag är oförändrade under hela processen med effektmodellering.

Avdunstning från växtlighet, mark och sjöar utgör en stor osäkerhetsfaktor för den hydrologiska effektmodelleringen, med påverkan på enskilda processer och den totala balansen mellan förväntad ökad nederbörd och ökad avdunstning på grund av ökande

temperaturer. Avdunstning är en utmanande parameter att observera eftersom den skiljer sig väsentligt mellan olika marktyper och växtlighet och påverkas av temperatur, vindhastighet, strålning med mera. I S-HYPE uppskattas avdunstningen direkt från dygnsmedeltemperaturen, men andra parametreringar använder flera parametrar, som till exempel vindhastighet, minimi- och maximitemperatur. Med avsaknad av bra observationsdata för avdunstning är det problematiskt att utvärdera vilken rutin som presterar bäst över landet som helhet. Även effektmodeller för brandrisk i skog och mark är kritiskt beroende av en bra beskrivning av avdunstning, men här med fokus på de översta centimetrarna av markskikten och dess variation över dygnet.

En annan osäkerhetsfaktor handlar om effekten av förändrade extremhändelser på hydrologin, både vad gäller lågflöde och högflöde, särskilt då extremerna ligger utanför det referensklimate som modellen kalibrerades mot. Eftersom S-HYPE har kalibrerats över hela Sverige täcker den in varierande klimatologiska förhållanden i dagsläget. Trots det är osäkerheten kring förändring i extremhändelser betydande.

4.2.1.4 Oceanografiska modeller

För att få kunskap om effekter av framtida klimatförändring på haven runt Sverige är det viktigt med högupplösta havsmodeller som till exempel kan beskriva inflöden av saltvatten till, och utflöden av bräckt vatten från, Östersjön genom de smala danska sunden, samt hur dessa vattenmassor blandas och skiftar sig i Östersjöns olika bassänger, samt i Kattegatt och Skagerrak. De regionala haven påverkas av Nordsjön och Atlanten, av värme- och vattenflöden, avdunstning, nederbörd och vindpåverkan från atmosfären, samt av tillrinning av sötvatten från land. Havsmodellen måste därför ta in information från storskaliga havsmodeller, från regionala atmosfärsmodeller samt från hydrologiska modeller. SMHI har använt sig av en version av den regionala atmosfärsmodellen RCA4 (kap. 4.2.1.2) som är kopplad till havsmodellen NEMO för att skala ner projektioner från globala klimatmodeller till Östersjön (Gröger et al. 2019). NEMO har en horisontell upplösning på 3,7 x 3,7 km. Kopplingen mellan atmosfärs- och havsmodellerna behövs för att få en bra beskrivning av interaktionen mellan atmosfär och hav. Med detta modellsystem är det möjligt att beräkna hur fysiska parametrar som salthalt, temperatur, vattenstånd, och havsis kommer att förändras i framtiden.

För ekosystemen i havet är det förutom fysiska parametrar även viktigt hur näringsämnen, algbloomningar och syrehalter i havet förändras. Dessa påverkas till stor del av hur mycket kväve och fosfor som tillförs havet via tillflöde från land och från atmosfärsdeposition. Klimatförändringen påverkar också genom ökade temperaturer, förändrad skiktning, och förändrad tillrinning av sötvatten från land och därmed förändrat tillflöde av näringsämnen. SMHI har undersökt hur dessa processer påverkar framtida havsmiljön genom att använda havsmodellen RCO-SCOB1 som är en kopplad fysisk biogeokemisk modell som täcker Östersjön och Kattegatt (Saraiva et al. 2019).

Det bedrivs för närvarande arbete med att ta fram en sammanhållen biogeokemisk havsmodell för samtliga svenska hav. I SMHIs webbaserade klimatscenariotjänst 2021 (kap. 4.3.3.1) används data från tre olika modeller för att täcka in de svenska haven och de olika indikatorerna.

4.2.1.5 Kopplade regionala klimatmodeller

På samma sätt som för globala klimatmodeller finns kopplade modellsystem även för regional klimatmodellering, se 4.2.1.5. Till exempel finns modellsystem där Östersjön och/eller Nordsjön är beskriven med en dynamisk havsmodell som direkt interagerar med atmosfären (Döscher et al., 2002; Gröger et al., 2015, 2019; Wang et al., 2015). Trots att sådana kopplade modeller har använts för klimatsimuleringar är tillgången till flera olika scenarier relativt begränsad och det finns fortfarande inga sådana scenarier som inkluderar alla havsområden inom hela Europa.

Regionala klimatmodeller har också kopplats med dynamiska vegetationsmodeller, vilket kan ge lokala eller regionala skillnader i klimatet (Smith et al., 2011). Inte heller här finns klimatscenarier för hela Europa i någon större utsträckning.

De flesta av EURO-CORDEX-modellerna (kap. 4.2.1.2) beskriver inte heller tids-varierande aerosolpartiklar, vilket gör att de avviker från de globala modellerna (Boé et al., 2020). Det betyder också att de inte på ett realistiskt sätt representerar de stora trender i strålningsklimat som observerats över Europa under de senaste decennierna, med först ökande grad av partikelhalt fram till omkring 1990, och därefter gradvis allt renare luft. En konsekvens av detta är att attributionsstudier som går ut på att klargöra vilka faktorer som påverkat klimatet försvåras (kap. 2.1.3). Det betyder också att framtidsscenarier kan skilja sig åt gentemot globala klimatmodeller, särskilt i områden där stora förändringar i luftkvalitet förväntas. En genomlysning av vad detta kan innebära för Sveriges klimat och de klimatscenarier som är framtagna saknas idag.

4.2.2 Biasjustering

Trots långvarigt arbete med förbättring av processbeskrivningar i klimatmodeller och högre upplösning i beräkningarna uppvisar modellerna fortfarande avvikelser gentemot det observerade klimatet (Vautard et al., 2021). I vissa fall är skillnaderna så stora att vidare användning av data från modellerna inte är meningsfull. Ett exempel är hydrologisk modellering som ställer stora krav på vattenbalansen och där även mindre avvikelser i nederbörd kan leda till stora fel i beräkning av totala flödet i ett vattendrag. För att kunna använda data från klimatmodeller i effektstudier har därför metoder utvecklats som går ut på att reducera eller ta bort avvikelserna, så kallad biasjustering, eller biaskorrigering. Det finns flera metoder som skiljer sig i detalj men som alla har gemensamt att de använder observationer som modellens resultat justeras, eller korrigeras mot. Detta görs först i det historiska klimatet, då korrektionsfaktorer tas fram. I ett nästa steg antas att faktorerna är desamma i ett framtida varmare klimat varvid de appliceras på modellens framtida klimatscenario. Metoder har testats som justerar alla modelldata på samma sätt eller, mer sofistikerat, på olika sätt för olika delar av en fördelningsfunktion (Yang et al., 2010).

För SMHIs klimatscenariotjänst 2021 (se kap 4.3.3.1) har biasjusteringsmetoden MidAS (Multi-scale bias Adjustment; Berg et al., 2021) utvecklats. Metoden har utvärderats med goda resultat jämfört med internationell state-of-the-art, där biasjustering tillämpas som ett nödvändigt steg inför effektmodellering. För den historiska perioden beräknas en algoritm som justerar alla modellens värden så att de överensstämmer med observationer. För att säkerställa kontinuitet i underlaget till SMHIs scenariotjänst är observationerna i det här fallet data från det nya referensdatasetet GridClim som beskrivs i kap 4.1.3. Samma algoritm används sedan på framtida scenarier, som därvid blir mer lämpade till effektmodellering och framtagande av klimatindikatorer.

Biasjustering sker normalt för en variabel i taget och i ett lokalt perspektiv. Det här betyder att justeringarna kan vara olika stora för till exempel nederbörd och temperatur vid ett tillfälle eller för någon av variablerna på olika geografiska platser och att den interna konsistens som finns mellan variablerna i klimatmodellen därmed inte bevaras. En begränsande faktor vid all biasjustering är att även observationerna som används som referens kan vara förknippade med fel. I en del fall påverkas också klimatförändrings-signalen av biasjusteringen. En påverkan på klimatsignalen kan vara befogad om biasjusteringen till exempel tydligt förbättrar resultaten från en specifik process, men oftast är det svårt att bevisa och därför eftersträvas att hålla påverkan på klimatsignaler så begränsad som möjligt.

4.2.3 Statistisk nedskalning

Klimatanpassning handlar ofta om att arbeta med lokala förhållanden som normalt inte kan lösas upp av klimatmodeller. Detta gäller särskilt för globala grovskaliga klimatmodeller, men ofta även i mer högupplösta regionala klimatmodeller.

Statistisk, eller empirisk, nedskalning är ett sätt att kunna komma ner till finare lokal skala. Det finns en rad olika metoder för statistisk nedskalning (t.ex. Rummukainen, 1997). Nedskalning kan innebära att arbeta med olika typer av analogier eller någon form av transferfunktioner. Detta kan göras genom att kartlägga hur de lokala förhållandena relaterar till den storskaliga atmosfäriska cirkulationen. Det kan innebära att undersöka hur lokalt observerad nederbörd eller temperatur förhåller sig till storskaliga tryck-, temperatur- och fuktighetsfält. De lokala observationerna kan utgöras antingen av punktdata eller griddade data. För de storskaliga fälten kan atmosfäriska återanalyser användas. Relationen kan sedan användas för att från en global eller regional klimatmodell beräkna lokala förhållanden som motsvarar den storskaliga vädersituationen i modellen. Detta kan göras direkt på klimatmodelldata, antingen från körningar för historiskt klimat eller för framtida klimatförhållanden. Olika metoder har använts för skandinaviska förhållanden (se till exempel Hanssen-Bauer et al., 2005).

Stokastiska, så kallade, vädergeneratorer är en annan typ av verktyg. Metoden använder observerade förhållanden mellan flera vädervariabler för att skapa syntetiska väderförhållanden. Vädergeneratorn sätts upp med parametrar som producerats genom att ”träna” på det observerade klimatet. Träningen går ut på att de statistiska egenskaperna hos de skapade väderserierna ska representera motsvarande observerade tidsserier, exempelvis för medelvärden och olika beskrivningar av variabilitet. Parametrarna kan sedan ändras för att generera väder i ett framtida klimat givet förändringar i klimatet, till exempel hur månadsmedeltemperaturen ändras i en global klimatmodell. Exempel på användning av vädergeneratorer för svenska förhållanden ges i Chen et al. (2014; 2016) och Rayner et al. (2016).

En fördel med statistisk nedskalning jämfört med dynamisk nedskalning (regionala klimatmodeller) är att de inte kräver så stora datorresurser för beräkningar och inte kräver lika stor mängd sparad data från de globala drivande modellerna, för regional klimatmodellering krävs typiskt fulla tre-dimensionella tillstånd vart 3e eller 6e timme. Metodiken kan begränsas av att det ibland saknas bra observationer av relevanta variabler. Det kan också vara oklart om förhållandet mellan storskalig atmosfärs-cirkulation och lokala variabler är stationära eller om de ändras över tid.

4.2.4 Utsläppsscenarioer, strålningsdrivning och klimatscenarioer

Människans framtida klimatpåverkan styrs till stor del av våra utsläpp av koldioxid (kap. 5.2) som bland annat beror på befolkningens mängd, teknikutveckling och politik. Under åren har en rad alternativa utsläppsscenarioer för koldioxid och scenarioer för andra klimatpåverkande faktorer tagits fram och använts i klimatmodeller för att göra beräkningar av framtida klimat. Dessa beräkningar, eller klimatprojektioner, utgör olika klimatscenarioer. Eftersom olika generationer av klimatscenarioer utgår från delvis olika utsläppsscenarioer försvåras jämförelser av studier över klimatförändringar och dess effekter då en enkel ”översättning” mellan olika scenarioer inte alltid är möjlig. I det här sammanhanget används ibland begreppet ”strålningsdrivning” för att beteckna hur mycket olika nivåer av ändrade växthusgaskoncentrationer eller partikelhalter påverkar klimatet. Strålningsdrivning anges i enheten Wm^{-2} och anges relativt förindustriell tid innan människan påverkat atmosfärens koldioxidhalt (vilket enligt IPCC i det här sammanhanget anges till år 1750).

Här beskrivs kort de tre senaste generationernas klimatscenarioer som använts för att ta fram klimatinformation under de senaste cirka 20 åren:

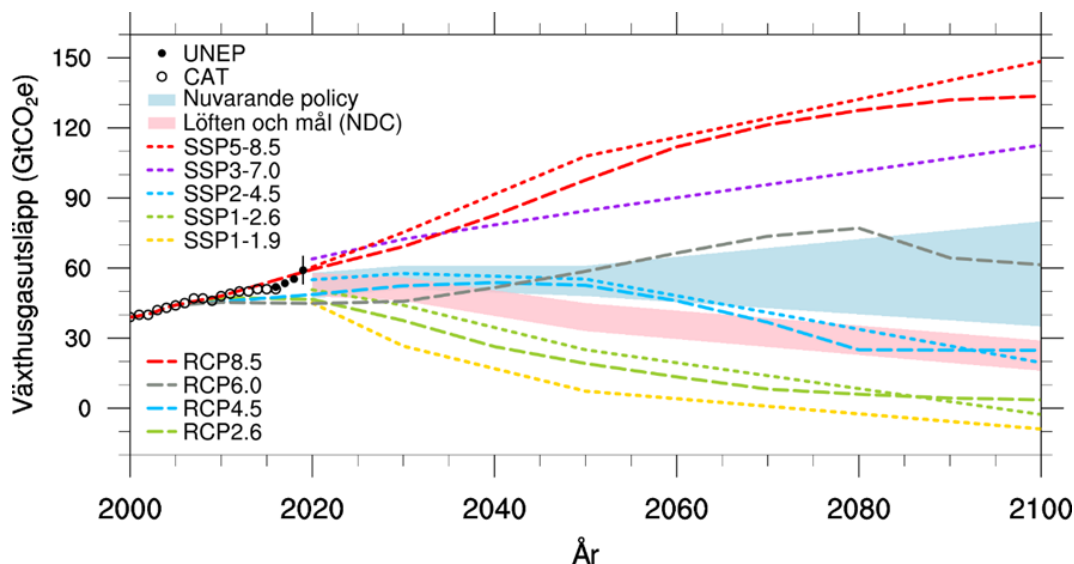
1. I IPCCs fjärde utvärderingsrapport (IPCC, 2007) används de s.k. SRES-scenarioerna, där SRES står för ”Special Report on Emission Scenarios” (Nakićenović & Swart, 2000). SRES tar upp fyra familjer av socioekonomiska scenarioer (A1, A2, B1 and B2) som beskriver olika framtida utvecklingar i två huvuddimensioner: den ena med fokus på ekonomisk utveckling kontra miljöhänsyn och den andra med fokus på global kontra regional utveckling. SRES-

scenarierna används inte aktivt i klimatmodellering idag men fortfarande finns mycket litteratur baserad på de här scenarierna. SRES-scenarierna användes inom ramen för CMIP3 för att ta fram globala klimatscenarier. Viss regional nedskalning gjordes baserat på CMIP3 (Kjellström et al., 2005; Déqué et al., 2007). I Sverige har en lång rad klimatindikatorer från de regionala klimatscenarierna (Persson et al., 2007) använts till exempel i samband med Klimat- och sårbarhetsutredningen (SOU, 2007).

2. I IPCCs femte utvärderingsrapport (IPCC, 2013) användes de s.k. RCP:erna, där RCP står för "Representative Concentration Pathways". RCP:erna beskriver hur nivåerna av växthusgaser och andra strålningsdrivare förändras över tid. RCP-scenarierna betecknas med siffror som anger den strålningsdrivning de olika utvecklingsvägarna ger upphov till år 2100. I scenariot med minst klimatpåverkan, RCP2,6, handlar det om $2,6 \text{ Wm}^{-2}$ och i scenariot med störst klimatpåverkan, RCP8,5, om $8,5 \text{ Wm}^{-2}$. Som jämförelse kan nämnas att strålningsdrivningen för 2019 var $2,72 \text{ Wm}^{-2}$ (IPCC, 2021). I RCP2,6 beskrivs alltså scenarier som från dagens nivåer fortsätter öka något för att senare under 2000-talet minska ner till en nivå strax under dagens. Det var ett medvetet val att i RCP:erna inte inkludera några socioekonomiska "berättelser". De globala klimatmodellerna i CMIP5, som användes tillsammans med RCP-scenarierna, hade nu fått en högre horisontell upplösning om i genomsnitt omkring $150 \times 150 \text{ km}$. I Sverige har SMHI inom ramen för det internationella EURO-CORDEX-arbetet tagit fram detaljerade regionala klimatscenarier som bygger på dessa RCP:er, först vid $50 \times 50 \text{ km}$ upplösning (Strandberg et al., 2015; Kjellström et al., 2016) och senare i $12,5 \times 12,5 \text{ km}$ upplösning, de senare ligger till grund för SMHIs klimatscenariotjänst 2021 (se kap 4.3.3.1).
3. I IPCCs sjätte utvärderingsrapport (IPCC, 2021) har även SSP:er tagits med. SSP står för "Shared Socioeconomic Pathways" och beskriver socioekonomiska scenarier. De inkluderar faktorer som befolkningensmängd, ekonomisk tillväxt, utbildning, urbanisering och teknisk utveckling. Totalt belyses fem olika banor för hur världen kan komma att utvecklas utifrån klimatpolitik och hur olika nivåer av begränsad klimatförändring kan nås när olika klimatomål från RCP:erna kombineras med olika SSP:er. Kombinerade SSP-RCP-scenarier har hittills inte använts i någon större utsträckning för nedskalning med regionala modeller och det finns inte några detaljerade scenarier med regional klimatinformation för Sverige, bortsett från framtida medelvattenstånd längs Sveriges kust (kap. 4.3.3.2). I dagsläget planeras inom EURO-CORDEX vilka globala klimatmodeller som skall skalas ner och med vilka regionala modeller. SMHI arbetar med nedskalning av dessa och första CMIP6-baserade SSP-scenarier med regionala modeller förväntas bli tillgängliga för vidare analys under 2022.

I Figur 4 jämförs utsläppen av växthusgaser från RCP:erna i CMIP5 med SSP:erna i CMIP6. Det framgår att utsläppen för de olika nivåerna av strålningsdrivning (respektive $2,6 \text{ Wm}^{-2}$, $4,5 \text{ Wm}^{-2}$ och $8,5 \text{ Wm}^{-2}$) skiljer sig något mellan de olika experimenten. Till exempel är utsläppen av CO_2 -ekvivalenter högre i SSP5-8,5 jämfört med RCP8,5 varför SSP5-8,5 har en högre grad av klimatpåverkan än RCP8,5. Ur figuren framgår också att det bara är i scenarierna med strålningsdrivning om 1,9 och $2,6 \text{ Wm}^{-2}$ som utsläppen går ner mot noll eller därunder under det här seklet. Utöver RCP:erna och SSP:erna visas i figuren också en sammanställning av historiska utsläpp under de senaste 20 åren. I dagsläget är utsläppsnivån mer i paritet med scenarier med högre utsläppsnivåerna än med de som leder till att Parisavtalets temperaturmålsättningar kan komma att klaras. På lite längre sikt pekar dagens politik ("nuvarande policy" i Fig. 4) på att utsläppen leder till en strålningsdrivning någonstans mellan nivåerna $4,5$ och 6 Wm^{-2} . Om de nationella åtaganden ("löften och mål (NDC)" i Fig. 4) som världens länder presenterat räknas in ser det ut som att nivån $4,5 \text{ Wm}^{-2}$ är den mest aktuella.

Figuren indikerar att varken scenarier med högre ($6,0 \text{ Wm}^{-2}$ och däröver) eller lägre ($2,6 \text{ Wm}^{-2}$ och därunder) grad av klimatpåverkan speglar en trolig framtid givet dagens situation. Dessa scenarier har trots det en relevans. Detta handlar delvis om osäkerheten kring den framtida utvecklingen och huruvida de utfästa åtagandena uppfylls eller ej. Men det handlar också om osäkerheter i klimatsystemets respons, där till exempel högre grad av klimatpåverkan kan representera en värld som har en högre klimatkänslighet än vad den bästa uppskattningen ger vid handen. För scenarierna med låg grad av påverkan handlar det om att kunna visa hur dessa skiljer sig mot det klimat jorden går emot och därmed till exempel peka på möjliga skillnader vad gäller klimatanpassningsbehov.



Figur 4. Utsläpp av växthusgaser enligt historiska data och olika scenarier för framtiden. Data från UNEP¹⁸, Climate Action Tracker (CAT)¹⁹, RCP (Meinshausen et al., 2011) database²⁰ och SSP (Riahi et al., 2017) database²¹. Utsläppen av olika växthusgaser är omräknat till koldioxidekvivalenter och enheten är miljarder ton.

Med tiden har antalet olika klimatmodellexperiment och antalet simuleringar ökat vilket ger bättre möjligheter att studera olika aspekter av klimatförändringen och att bättre kategorisera vad som är mer eller mindre robust eller osäkert. Till exempel kan nämnas att antalet klimatscenarier i CMIP6 som ingår i den forskning som utvärderas i IPCC (2021) är ungefär dubbelt så många i antal jämfört med motsvarande från CMIP5 som beskrevs i IPCC (2013). Att det tillkommer många nya klimatscenarier betyder inte per automatik att tidigare scenarier blir inaktuella. Det innebär att CMIP6-scenarierna kan ses som ett komplement och en utvidgning av CMIP5-scenarierna. På motsvarande sätt kommer nya CORDEX-simuleringar med regionala modeller baserat på CMIP6-resultat komplettera tidigare simuleringar baserade på CMIP5.

4.2.5 Uppvärmningsnivåer och tidsperioder

I beräkningar av framtida klimatförändring jämförs ofta en normalperiod (kap. 4.1.5) med en fördefinierad 30-årsperiod i framtiden; till exempel klimatet 2071–2100 jämfört med 1971–2000. Detta är till exempel fallet med SMHI:s klimatscenariotjänst 2021 (kap. 4.3.3.1). I vissa fall kan det finnas intresse att beräkna hur stor klimatförändringen är när

¹⁸ <https://www.unep.org/resources/emissions-gap-report-2020>

¹⁹ <https://climateactiontracker.org/>

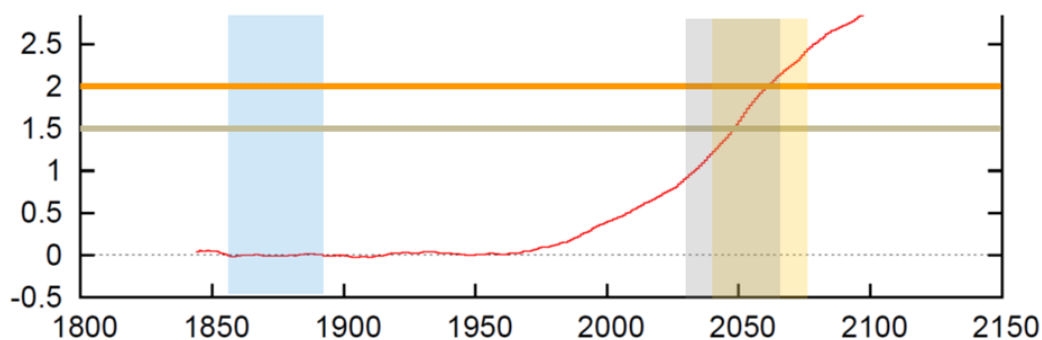
²⁰ <http://www.iiasa.ac.at/web-apps/tnt/RcpDb>

²¹ <https://tntcat.iiasa.ac.at/SspDb>

den globala temperaturhöjningen uppgår till en specifik nivå, till exempel $+1,5^{\circ}\text{C}$ eller $+2^{\circ}\text{C}$ över förindustriell nivå. Eftersom olika klimatmodeller svarar olika på en viss förändring av växthusgaser kan detta inträffa vid olika tidpunkt i olika modeller även om de drivs av ett och samma utsläppsscenario.

För att göra en jämförelse vid en viss uppvärmningsnivå beräknas först löpande medelvärden av den globala medeltemperaturen över långa tidsperioder, vanligen 30 år. Därefter identifieras den första tidsperiod varvid temperaturökningen når upp till en bestämd uppvärmningsnivå i förhållande till förindustriell tid som ofta sätts till någon gång i slutet av 1800-talet, till exempel 1861–1890 (Fig. 5). På så sätt går det att jämföra delvis olika tidsperioder från olika klimatmodeller eftersom den globala uppvärmningen är samma i båda. Vid en sådan jämförelse går det ifrån att ha en osäkerhet i global uppvärmning vid en viss tidpunkt till att ha en osäkerhet i tid när en viss uppvärmningsnivå nås.

Figur 5 visar att perioderna i exemplet för $+1,5^{\circ}\text{C}$ respektive $+2^{\circ}\text{C}$ delvis överlappar varandra. Här noteras också att den globala medeltemperaturen är olika i början respektive slutet av 30-årsperioderna för respektive $+1,5^{\circ}\text{C}$ och $+2^{\circ}\text{C}$, vilket betyder att de analyserade perioderna som regel inte är beskrivningar av ett stationärt klimat. Detta kan ha en påverkan på tolkningen, särskilt när det gäller extremhändelser som kan vara mer vanligt förekommande i slutet på en 30-årsperiod än i dess början till följd av kraftigare klimatpåverkan (Bärring och Strandberg, 2018).



Figur 5. Illustration av metodik för att identifiera när en viss uppvärmningsnivå nås. Kurvan visar ett löpande 30-årsmedelvärde av den globala medeltemperaturen i en global klimatmodell. Den blåa rektangeln motsvarar en 30-årig "förindustriell" period som är referensnivån vilken får medelvärdet 0°C . Den gråa rektangeln motsvarar den 30-årsperiod för vilken den globala medeltemperaturen först når $1,5^{\circ}\text{C}$ över den förindustriella nivån (i exemplet 2033–2062). Den gula rektangeln på motsvarande sätt fast för 2°C över förindustriella förhållanden (här 2046–2075). Från Kjellström et al. (2021b).

4.3 Klimatinformation för klimatanpassningsarbetet

4.3.1 I vilken utsträckning går det att säga hur klimatet varierat?

För de senaste decennierna finns relativt mycket information om det historiska klimatet insamlat (jfr. kap 4.1). Men eftersom klimatet varierar kraftigt på tidsskalor från år till flera decennier är det ofta önskvärt med väsentligt längre tidsserier för att kunna beskriva det lokala klimatet på en plats. Även om mycket klimatdata samlats in under åren så är informationen om det historiska klimatet långt ifrån fullständig. I vissa avseenden kan den vara tillräcklig; till exempel kan det, med relativt hög grad av säkerhet, beskrivas hur Sveriges medeltemperatur varierat från 1860-talet och framåt (Fig. 1, Tabell 1). De 35 stationerna som används för klimatindikatorn för temperatur är dock inte jämnt fördelade över landet vilket gör att detta oftast inte går att beskriva för någon enskild kommun eller lokal plats i landet. Situationen är likartad eller ännu svårare för många andra klimatindikatorer, till följd av kortare tidsserier.

Utöver traditionella meteorologiska och klimatologiska variabler som temperatur, nederbörd och vindhastighet, kan en rad andra variabler också vara av intresse ur ett klimatanpassningsperspektiv. Exempel på detta är åska och hagel för vilka datamaterialet inte täcker in så långa tidsserier eller inte följts upp på samma systematiska sätt över tid. Andra, sektorsspecifika indikatorer kan också vara av intresse. Till exempel kan det handla om tidpunkt när marken är tillräckligt torr för att jordbruksmaskiner skall kunna köras utan att orsaka markpackning, eller i vilken grad marken är tjälad vilket möjliggör utforsling av timmer från skogen på skogsbilvägar.

Ett särskilt problem är extremhändelser, som till sin natur är ovanliga. Med hjälp av data och extremvärdesteori går det att beskriva hur extremerna uppträder och beräkna deras återkomsttider. Återkomsttiden beskriver hur ofta en händelse inträffar i medeltal givet en viss datamängd. Till exempel betyder en återkomsttid om 100 år att händelsen i genomsnitt inträffar en gång på hundra år. För varje år är alltså sannolikheten att en sådan händelse inträffar 1%. Med tiden ackumuleras sannolikheterna och efter 100 år är sannolikheten att en 100-årshändelse inträffat något år 63%. För extremer med lång återkomsttid betyder kravet på mycket långa tidsserier att underlaget generellt är sämre. Det här betyder att för de kraftigaste extremerna, som ofta är dimensionerande för olika verksamheter eller tekniska system och därför viktiga att förstå ur ett klimatanpassningsperspektiv, är informationen osäker. Därför bör försiktighet iakttas vid användning av värden med lång återkomsttid.

Det är inte bara längden på observationsserier som kan vara begränsande. Även den geografiska täckningsgraden är begränsande. Särskilt gäller detta för lokala fenomen. Till exempel gäller att i förhållande till utbredningen av regnskuror är observationsnätet mycket glest och det är stor sannolikhet att observationerna inte representerar den faktiska nederbörden på ett helt realistiskt sätt. Detta gäller särskilt för extremhändelser med kort varaktighet, till exempel skyfall i samband med enstaka Cumulonimbusmoln med begränsad utsträckning, vilka helt kan falla mellan observationsstationerna. En konsekvens av detta är att kunskapen om olika typer av nederbördsextremer är begränsad även om nya mer yttäckande radaradata förbättrat situationen för de senaste decennierna (Olsson och Josefsson, 2015).

Utöver punktobservationer kan griddade data användas för att undersöka klimatets variabilitet över tid. Långa tidsserier, som till exempel de historiska återanalyserna, skulle också kunna användas för att mer i detalj studera enstaka historiska extremhändelser med stora konsekvenser som till exempel Julstormen 1902, som främst drabbade delar av Sydsvetige²² eller Yrväderstisdagen i januari 1850 då ett plötsligt och mycket intensivt snöoväder krävde uppskattningsvis ett hundratal dödsoffer i främst nordöstra Götaland och östra Svealand²³. De här två fallen är exempel på situationer för vilka viss information samlats och tillgängliggjorts i form av översiktliga artiklar. Under åren har det naturligtvis förekommit en lång rad liknande extrema vädersituationer. Ett annat omskrivet, men sämre dokumenterat, exempel är den så kallade "isstormen" i oktober 1921 då omfattande mängder blöt snö i kombination med mycket hård vind ledde till svåra skador på skog och omfattande avbrott i el- och teleförbindelserna i främst norra Götaland och södra Svealand²⁴. Även om tidsserier av observationsdata finns tillgängliga

²² <https://www.smhi.se/kunskapsbanken/meteorologi/den-stormiga-julen-1902-1.5693>

²³ <http://www.smhi.se/kunskapsbanken/meteorologi/yrvaderstisdagen-1850-1.19745>

²⁴ <https://www.smhi.se/kunskapsbanken/meteorologi/tidiga-och-sena-snofall/tidiga-snofall-i-sverige-1.32935>

vid SMHI²⁵ och en del extremsituationer är något mer utförligt dokumenterade²⁶ finns idag ingen sökbar databas över extrema väderhändelser i Sverige med koppling mot effekter på samhälle och naturmiljö. En del av denna information samlas under SMHI:s webbsidor för klimat men en behovsanalys som skal ligga till grund för förbättringsmöjligheter inom detta område skall göras under 2022.

I tillägg till olika typer av observationer och återanalyser, kan också klimatmodeller användas för att beskriva det historiska klimatet. En kombination av en global historisk återanalys (för hela 1900-talet eller för de senaste decennierna) som skalas ner till högre upplösning med en regional klimatmodell skulle kunna användas för frågeställningar kring vad som orsakat historiska förändringar i det regionala klimatet. Med olika antaganden om förändring i halten av växthusgaser, partikelhalter eller markanvändning kan responsen i sådana klimatmodeller användas för att i detalj undersöka det historiska klimatet och orsaker bakom förändringar.

Alternativt kan enstaka historiska väderhändelser tolkas i ett varmare klimat genom att situationen körs i samma klimat- eller väderprognosmodell med ändrade förutsättningar, t ex högre temperaturer i atmosfär och hav för att motsvara en två grader varmare värld (Hazeleger et al., 2015; Lenderink et al., 2019). En annan användning handlar om att utnyttja data från stora ensembler med många körningar med samma klimatmodell och samma grad av klimatpåverkan. Om modellen representerar variabiliteten på ett bra sätt kan den typen av stora modellensembler användas för att på ett mer robust sätt utvärdera sannolikheter för olika historiska händelser (Aalbers et al., 2018; Wilcke et al., 2020), vilket är en grundläggande del i attributionsstudier (jfr. kap. 2.1.3).

4.3.2 Mer eller mindre robust klimatinformation för framtida klimatförändring

Graden av framtida klimatpåverkan (kap. 2.1), osäkerhet kring klimatsystemets känslighet (kap. 2.1.1) och den naturliga variabiliteten (kap. 2.1.2) är de tre huvudsakliga faktorerna som påverkar robustheten i information om framtidens klimat.

I ett kortsiktigt perspektiv är det särskilt den naturliga variabiliteten som dominerar osäkerheten, där enstaka år, årtionden eller till och med ännu längre perioder helt naturligt kan avvika från den långsiktiga trenden. För att kunna avgöra om en händelse ligger inom ramen för den förväntade naturliga variabiliteten krävs som regel långa tidsserier, vilket ofta saknas för det observerade historiska klimatet (kap. 4.1.4). I det här sammanhanget finns en fördel med klimatmodeller, både för historiskt och framtida klimat, eftersom de kan köras många gånger för samma klimat för att ge en säkrare bild av den (simulerade) naturliga variabiliteten (jfr. Fig. 3). Till exempel ger 100 körningar med en klimatmodell 100 alternativa beskrivningar för en given 30-årsperiod, vilket ger bättre möjlighet att beräkna den statistiska signifikansen av en förändring utöver den naturliga variabiliteten. Sådana stora dataset är särskilt bra att analysera om fokus ligger på extremhändelser, som till sin natur är ovanliga och därför svåra att identifiera och karakterisera. En förutsättning är förstås att klimatmodellen i fråga kan simulera den typ av händelse som är intressant. Motsvarande teknik, med stora ensembler med många medlemmar för att kunna spegla och karakterisera osäkerhet, tillämpas dagligen i väderprognossammanhang; där till exempel ECMWF kör 50 olika 14-dagarsprognoser vid fyra tillfällen per dygn. I det fallet handlar det om att fånga upp och beskriva betydelsen av osäkerheter i indata och alternativa väderutvecklingar i den aktuella vädersituationen²⁷.

²⁵ <https://www.smhi.se/data>

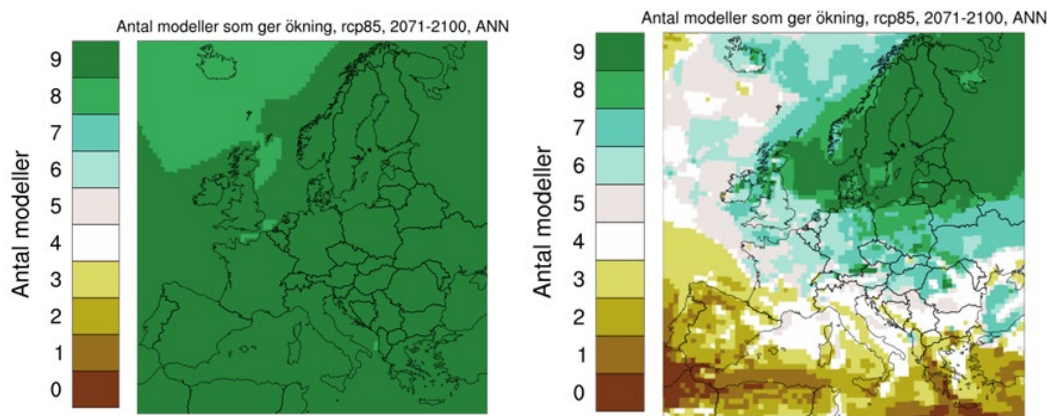
²⁶ <https://www.smhi.se/kunskapsbanken/hydrologi/oversvamningar/historiska-oversvamningar-1.7827>

²⁷ <https://www.ecmwf.int/en/forecasts/datasets/set-iii>

På längre sikt är koncentrationerna av växthusgaser i atmosfären, tillsammans med klimatsystemets känslighet, avgörande för vad som händer med klimatet. Utsläppen av växthusgaser i framtiden beror på samhällsutvecklingen, med faktorer som till exempel befolkningens mängd, teknikutveckling och politik där alla delar är osäkra i sig. Med en större befolkning ökar utsläppen, men det kan balanseras av politiska beslut och energi-effektivisering; teknikutveckling och politik kan också påverka utsläppen åt båda håll. Det finns ingen naturlag som beskriver samhällsutvecklingen som kan användas för att beräkna framtida utsläpp av växthusgaser. Det beror på mänsklighetens agerande. För att ändå kunna säga något om hur framtidens klimat kan komma att bli används olika scenarier för klimatpåverkan (se kap 4.2.4). Ett sätt att hantera scenarioosäkerheten handlar om att använda flera olika scenarier på samma gång.

Osäkerheten kring klimatsystemets känslighet ligger dels i att systemet inte är känt i alla sina detaljer, men också i hur dessa är formulerade i klimatmodellerna. Då formuleringar kan göras på olika sätt kommer olika klimatmodeller att ge delvis olika resultat. Klimatmodellerna har också varierande grad av komplexitet, vissa modeller beskriver kolcykeln, vegetation eller atmosfärskemik medan andra inte gör det. Det simulerade klimatet beror alltså på valet av modell. Normalt går det inte att självklart säga vilken modell som är bäst i alla sammanhang. Det är till exempel inte säkert att en modell som är bäst på att representera dagens klimat också har den mest realistiska klimatförändringssignalen. Vid jämförelser visar det sig ofta att olika modeller är bra för olika aspekter och att det inte är lätt att utesluta någon modell (Christensen et al., 2010). Ett vanligt sätt att hantera modell-osäkerheten är att använda information från många olika klimatmodeller på samma gång. Spridningen mellan resultaten ger då ett mått på vilken osäkerheten är och i vilken grad olika typer av förändringssignaler kan anses vara robusta.

Generellt för att hantera alla tre källorna till osäkerhet är alltså att använda stora ensembler med många klimatsimuleringar. Ensemblerna användas för att ge information om spridning och också räkna på sannolikheter för olika utfall. En modellensemble kan till exempel bestå av flera modeller som använder samma scenario för framtida klimatpåverkan, eller olika scenarier med samma modell, eller samma scenario med samma modell använd flera gånger med små förändringar i startvärde. Beroende på hur ensemblen är utformad kan den användas för att svara på frågor om hur känsligt klimatet är för förändringar i halterna av växthusgaser, hur känsliga modellerna är för förändringar i halterna av växthusgaser, samt hur stora de naturliga klimatvariationerna är. Om många modellsimuleringar pekar på en viss förändring så kan den förändringen anses vara mer robust. Om resultaten från modellerna inte överensstämmer så indikerar det en större osäkerhet. Ett exempel visas i Figur 6 där framtida temperaturökning är ett robust resultat i hela Europa. För nederbörd är den övergripande klimatförändringssignalen också robust, med ökad nederbörd längst i norr och minskningar i sydligaste Europa. Däremot är ökad nederbörd inte en robust klimatförändringssignal i området däremellan, där vissa klimat-scenarier antyder ökning och andra minskning. I ett sådant område kan den naturliga variabiliteten eller osäkerhet kopplat till modellernas beskrivning av fysikaliska processer dominera även på lång sikt och det är inte säkert att någon robust klimatförändringssignal syns ens i slutet av seklet även under mycket kraftig klimatpåverkan (Kjellström et al., 2013). Som nämnts ovan så kan det vara ett problem i klimatanpassningsarbetet att ett resultat är osäkert, men om resultaten är osäkra så är det bra att veta det i riskvärderingen, så att robusta åtgärder implementeras som tillsammans möjliggör anpassning till ett stort spann av möjliga framtida klimat. Ett enkelt mått på robusthet/osäkerhet kan alltså vara hur stor andel av modellerna som är överens om tecknet på förändringen. Ett sådant mått kan sedan göras mer raffinerat genom att inkludera förändringens storlek jämfört med naturliga variationer.

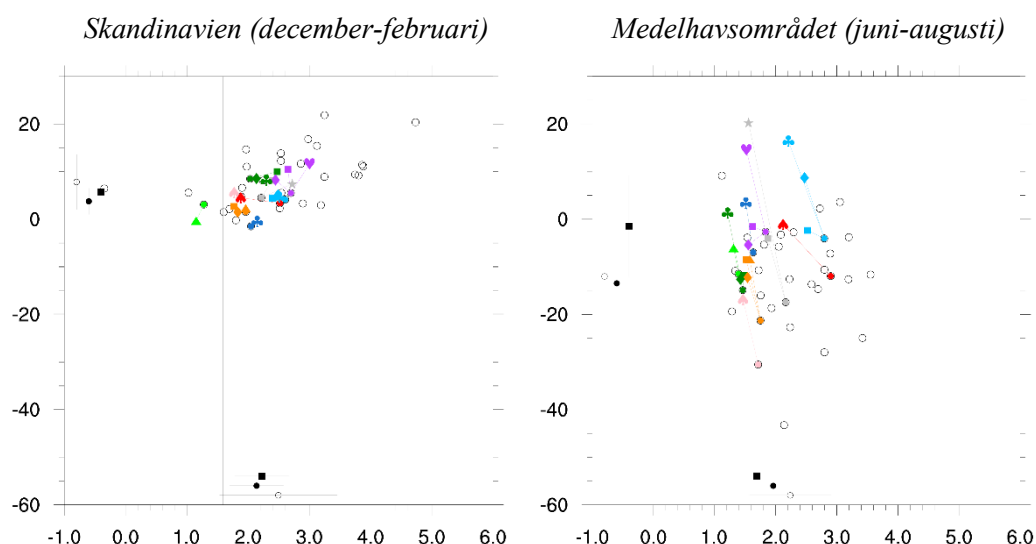


Figur 6. Antal modeller som är överens om ökad årsmedeltemperatur (vänster) och årsnederbörd (höger) i slutet av seklet (2071–2100 jämfört med 1971–2000) enligt scenario RCP 8,5. Att det blir varmare råder det ingen tvekan om, det är alla modeller överens om. Nederbörden beräknas däremot både minska och öka. I norra Europa visar alla modeller att nederbörden ökar. I södra Europa visar alla modeller att nederbörden minskar. I centrala Europa finns ett område där ungefär hälften av modellerna ger ökad nederbörd och hälften minskad (Strandberg m.fl., 2015). Den storskaliga förändringen med ökad nederbörd i norr och minskad nederbörd i söder kan ses som en robust signal. Om fokus istället ligger på centrala Europa, till exempel Paris, är det väsentligt mer osäkert vad som händer.

Klimatforskningen och utvecklingen av klimatmodeller går hela tiden framåt och i kap. 4.2.1 beskrivs att klimatmodellerna successivt blir allt bättre på att representera dagens klimat och de observerade trenderna. Utvecklingen har också inneburit att fler processer i klimatsystemet successivt tillkommit allteftersom de blivit bättre kända och beräkningskapaciteten ökat. Utöver det har ökade möjligheter att köra modeller med hög upplösning och att generera stora modellensembler inneburit ett bättre utbud av data för klimatstudier. Den här utvecklingen väntas fortsätta och dessutom tillkommer nya scenarier för framtida klimatpåverkan som till exempel fångar upp vad som händer i arbetet med att begränsa klimatpåverkan. Sammantaget betyder detta att klimatinformationen kring framtida klimat kommer att behöva uppdateras kontinuerligt. Ur ett klimatanpassningsperspektiv är det därför viktigt att inte låsa arbetet vid fasta värden på framtida klimat, utan möjliggöra ett robust arbete med klimatanpassning som möjliggör ytterligare åtgärder i takt med att ny klimatinformation blir tillgänglig. Det ställer dessutom krav på klimatforskare och producenter av klimattjänster att tillgängliggöra jämförelser mellan ny och tidigare klimatinformation, med kommunikation om förändringar och om möjligt med förklaring till orsaker till dem.

Ett generellt problem med tillgången till klimatscenarier handlar om att det för de allra mest högupplösta modellerna som regel finns färre klimatsimuleringar än vad det finns för motsvarande grövre modeller. Till exempel finns det sammanlagt ett drygt hundratal EURO-CORDEX-simuleringar med högupplösta regionala klimatmodeller för Europa. Motsvarande för de globala CMIP5-modellerna som använts för att driva de regionala modellerna är flera hundra. Ett lämpligt sätt att hantera detta på kan vara att använda den mer högupplösta informationen för en specifik studie men att också sätta den i ett större sammanhang genom att jämföra mot en större underliggande ensemble.

I Figur 7 visas ett exempel där det klart framgår att ett begränsat urval av globala klimatmodeller inte alltid representerar spridningen i en större ensemble och att de regionala modellerna till viss del ändrar klimatförändringssignalen jämfört med de drivande globala klimatmodellerna (i exemplet är det senare särskilt tydligt för nederbörd i Medelhavsområdet på sommaren).



Figur 7. Procentuell ändring i nederbörd (y-axeln) mot temperaturökning (x-axel) vid två graders global uppvärmning jämfört med kontrollperioden 1971–2000. Cirkarna representerar globala CMIP5-modeller (i); ifyllda cirklar de globala modeller för vilka regionala modeller använts för nedskalning över Europa (ii); övriga färgade symboler resultat från de regionala modellerna (iii). Längst ut vid axlarna finns information om medelvärde och spridning för de tre ensemblerna i)-iii). Från Kjellström et al. (2018).

På motsvarande sätt gäller att den relativt stora EURO-CORDEX-ensemblen är framtagen med regionala klimatmodeller som inte inkluderar en interaktiv havsmodell eller modell för dynamisk vegetation, eller bara inkluderar en rudimentär beskrivning av atmosfäriska aerosolpartiklar och deras klimatpåverkan (se kap 4.2.1.2).

4.3.3 Klimattjänster på smhi.se

SMHI samlar kunskap, tar fram statistik, bedriver forskning och utvecklar tjänster inom klimatområdet. På SMHIs webbsidor under smhi.se/klimat finns information om hur och varför klimatet förändras, hur det påverkar världen och hur anpassning till klimatförändringen kan ske.

Här finns bland annat SMHIs kunskapsbank som innehåller både översiktliga och mer ingående beskrivningar av fenomen och händelser kopplade till meteorologi, hydrologi, oceanografi och klimat, den kompletterar sidorna om "Klimatet då och nu" som innehåller sammanställningar av vädret då och nu, både i Sverige och i världen, här finns också information om hur tillståndet varit i sjöar, vattendrag och havet. Varje månad presenteras här en översiktlig återblick på den gångna månadens väder, läget i sjöar och vattendrag samt tillståndet i havet. Översikter från januari 2004 och framåt finns på smhi.se. Längre tillbaka finns de publicerade i tidskriften Väder och Vatten. Eftersom klimat är väder under längre tid finns även presentationer som sammanfattar årets väder, med start från 2018.

På SMHIs sidor om klimat finns också utbildningsmaterial om klimat och klimat-anpassning, materialet vänder sig till alla som vill studera frågor kring klimat, klimat-påverkan, klimateffekter och klimatanpassning. Utbildningssidorna innehåller ingångar till fördjupning inom klimat, klimatpåverkan, klimateffekter och klimatanpassning.

En rad filmer förklarar kortfattat hur klimatet fungerar, hur det förändras, vad klimat-anpassning är och hur svenska kommuner arbetar med klimatanpassning. Under 2021 startade SMHI en föreläsningsserie, den består av inspelade föreläsningar där SMHIs experter förklarar bland annat hur FN:s klimatpanel (IPCC) arbetar, vad som är nytt i

IPCCs senaste rapport, hur klimatscenarier fungerar och huruvida extrema väderhändelser beror på människans klimatpåverkan.

Under 2021 lanserade SMHI också tjänsten Hur var vädret? på smhi.se för att i ökad utsträckning nå ut med SMHIs klimatinformation till allmänheten. Besökare på SMHIs vädersida vägleds via en länk från vädersidan till den nya tjänsten där olika interaktiva funktioner ger möjlighet att utforska väder- och klimatfrågor på egen hand, till exempel hur varmt eller kallt det var på midsommar eller julafton ett visst år. Användare kan även på ett enkelt sätt nå fördjupande diagram och kunskapsartiklar. Syftet med tjänsten är att bidra till Parisavtalet artikel 12, som beskriver människors rätt till delaktighet och tillgång till information om klimatfrågor. En förväntad effekt av tjänsten är att allmänheten får en ökad förståelse för den pågående klimatförändringen.

4.3.3.1 SMHIs webbaserade klimatscenariotjänst 2021

I SMHIs webbaserade klimatscenariotjänst 2021²⁸ presenteras ett nytt stort datamaterial som beskriver olika aspekter av klimatförändring. Tjänsten innehåller både meteorologiska, hydrologiska och oceanografiska variabler. Materialet bygger på en kombination av klimatmodellresultat och observationer och består av kartor, diagram och fakta som baseras på data från SMHI. Klimatscenariotjänsten är designad för att tillhandahålla beslutsunderlag som enkelt kan uppdateras när klimatinformationen utvecklas. Tjänsten, varav den meteorologiska delen ersätter en tidigare tjänst beskriven i Kjellström et al. (2016), är utvecklad i nära samarbete med användare. Den nya tjänsten har en mer användarvänlig design med mer interaktivitet jämfört med tidigare. Här finns kartor, diagram och data som går att ladda ner samt förklarande information om resultaten bland annat i form av filmer. Till tjänsten hör omfattande beskrivningar av det datamaterial och de beräkningar som ligger till grund för tjänsten.

Målet är att skapa ett användarvänligt gränssnitt där informationen är framtagen med vetenskapliga metoder. Ledstjärnan är att såväl privatpersoner som handläggare på myndigheter, kommuner och i näringslivet utan svårighet ska hitta den klimatinformation som de vill ha och behöver. I den behovsanalys som ligger till grund för tjänsten efterfrågades klimatinformation lämpat både för användare med behov av mer lättillgänglig information såväl som avancerade användare som använder klimatunderlag i sin dagliga tjänsteutövning. Den nya webbtjänsten finns därför i både en enklare och en mer detaljerad form, något som användarna efterfrågat. Den *enklare* inleds med grundfakta om klimat tillsammans med korta förklarande filmer samt hänvisningar exempelvis till SMHIs klimatanpassningsspel²⁹ och till klimatanpassningsportalen³⁰. Den *fördjupade* erbjuder ett väsentligt större urval av variabler från både meteorologi, hydrologi och oceanografi (Fig. 8). Det finns möjligheter att bryta ner den meteorologiska informationen på länsnivå, den hydrologiska på avrinningsområdesnivå och den oceanografiska på olika havsområden och bassänger. Dessutom finns möjlighet att få fram information med avseende på hur robust informationen är om framtida förändringar.

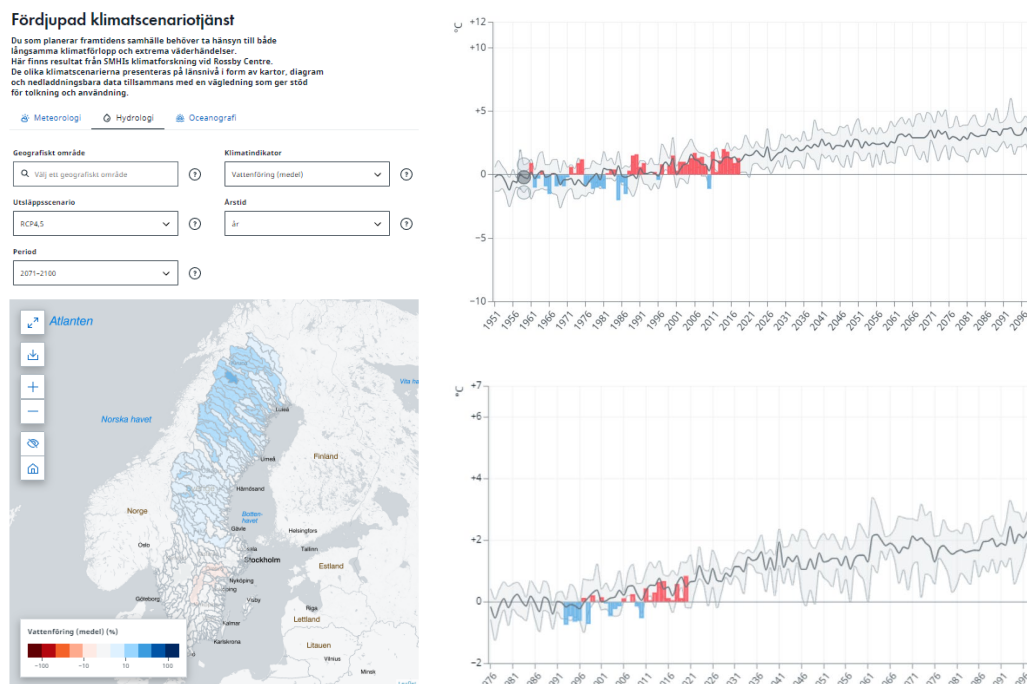
Den meteorologiska delen av webbtjänsten bygger på scenarier från alla regionala klimatmodeller som bidragit till EURO-CORDEX, istället för som i den tidigare tjänsten endast från en regional klimatmodell. De regionala klimatmodellerna har drivits av flera olika globala CMIP5-klimatmodeller. Jämfört med den tidigare tjänsten har den horisontella upplösningen i de regionala modellerna ökat från 50 x 50 km till 12,5 x 12,5 km, vilket ger mer detaljerade resultat (kap. 4.2.1.2). Vidare har resultaten biasjusterats med MIDAS (kap. 4.2.2) med hjälp av referensdata från GridClim (se kap. 4.1.3).

²⁸ <https://www.smhi.se/klimat/framtidens-klimat/framtidens-klimat>

²⁹ <https://www.smhi.se/klimat/utbildning/klimatanpassningsspelet>

³⁰ <https://www.klimatanpassning.se/>

För de meteorologiska fälten presenteras jämförelsematerial för perioden 1961–2018 från SMHIs referensdataset GridClim (kap. 4.1.3). För varje indikator som visas i kartform presenteras utöver ändring i medelvärde också standardavvikelsen för ändringen samt hur många ensemblemedlemmar som visar ökning (jfr. Fig. 6). Klimatförändringssignalen visas för tre fasta normalperioder 2011–2040, 2041–2070 samt 2071–2100 jämfört med normalperioden 1971–2000. Att normalperioden 1971–2000 använts som referens, istället för standardnormalperioden 1961–1990, beror på att alla regionala modeller inte körts för 1960-talet.



Figur 8. Exempel på material som finns tillgängligt via SMHIs klimatscenariotjänst 2021. Till vänster visas procentuell förändring i medelvattenföring för 2071–2100 jämfört med referensperioden 1971–2000. Överst till höger visas förändring i Sveriges medeltemperatur jämfört med referensperioden. Längst ner till höger visas beräknad förändring av årsmedelvärdet för ytvattentemperatur (°C) i Bottniska viken jämfört med referensperioden (här 1976–2005). I diagrammen visar den grå kurvan ett medelvärde för flera klimatsimuleringar. Det grå fältet visar variationsbredden mellan ensemblens 10e och 90e percentil för lufttemperatur, respektive max- och minvärde för ändringen i ytvattentemperatur. De röda och blåa staplarna i diagrammen till höger visar observerade avvikelser. Samtliga delfigurer avser scenariot RCP4,5.

För hydrologisk vidarebearbetning har den hydrologiska modellen S-HYPE använts (kap. 4.2.1.3) för en delmängd av EURO-CORDEX-simuleringarna. I den här delen av tjänsten visas resultat för 262 biflödesavrinningsområden, som sammanfattar avrinningsområden av hela eller delar av vattendrag, samt länsvis sammanfattade kustområden. Indelningen är en sammanvägning av detaljnivån som karttjänstens användare förväntas behöva, och den övergripande osäkerheten i den klimatologisk-hydrologiska modellkedjan. Tidsperioder är desamma som för den meteorologiska delen av tjänsten enligt ovan.

I den oceanografiska delen av tjänsten visas resultat från tre olika havsmodeller (kap. 4.2.1.4) varav en är kopplad till en biogeokemisk modell, vilket möjliggör presentation av såväl fysikaliska som biogeokemiska variabler. Då ändring av de biogeokemiska variablerna förutom klimatförändringen också beror på tillförseln av näringsämnen presenteras även modellberäkningar för följande näringsämnesscenarier:

- Låg: Motsvarar en reduktion av tillförsel av näringsämnen som därmed år 2020 nått ner till den nivå som motsvarar det Östersjöländerna kommit överens om inom samarbetet i HELCOM, den så kallade Baltic Sea Action Plan (HELCOM, 2007, 2013).
- Bas: Motsvarar en tillförsel av näringsämnen till havet i storleksordning av dagens nivå, dvs. koncentrationerna av näringsämnen i vattentillflödet från land ändras inte med tiden. Mängden näringsämnen som når Östersjön beror därför endast på klimatets påverkan på avrinningen (som beror av förhållandet mellan nederbörd och avdunstning över land).
- Hög: Motsvarar en ökning av koncentrationerna av näringsämnen i vattentillflödet och från atmosfären, som representerar förändringar i t.ex. folkökning och jordbruk. Belastningen av näringsämnen till havet påverkas således både av livsstil samt av klimatförändringens påverkan på avrinningen från land.

De olika variablerna presenteras dels per havsbassäng och dels per havsområde vilka följer den fördelning som beskrivs i Havs- och vattenmyndighetens föreskrifter HVMFS 2012:18 (enligt havsmiljöförordningen) som införlivar EU:s havsmiljödirektiv³¹. Nytt är framför allt de biogeokemiska indikatorerna i Östersjön samt temperatur och salthalt i Västerhavet, vilka inte fanns med i tidigare klimatscenariotjänst. Dessutom är tjänsten mer interaktiv inklusive handledning kring hur resultaten kan tolkas och användas.

För de oceanografiska fälten presenteras jämförelsematerial för perioden 1993–2020 som bygger på en regional återanalys som har utförts på SMHI för Copernicus Marine Service (CMEMS) och kan hämtas från Copernicus marina tjänst³². Klimatförändringssignalen visas för samma normalperioder som för den meteorologiska och hydrologiska delen av tjänsten. Men här jämförs de istället med perioden 1976–2005 eftersom det var denna tid som hade senast tillgängliga drivdata (randvillkor) till modellerna då analyserna utfördes. Ensemblen som tar drivdata från fyra olika globala klimatmodeller och tre olika scenarier avseende näringsämnesutsläpp finns beskriven i Meier et al. (2022).

4.3.3.2 SMHIs webbaserade tjänst för Stigande havsnivåer

En del av SMHIs webbaserade tjänst för Stigande havsnivåer³³ vänder sig till de som vill få en introduktion till framtida havsnivåer³⁴. Här beskrivs översiktligt bland annat varför havsnivån stiger, vilka effekter det kan få och vad som kan göra för att begränsa havsnivåhöjningen. Merparten av tjänsten vänder sig dock till de som har behov av kunskap och data i sitt planeringsarbete. På de sidorna finns bland annat beräknade framtida medelvattenstånd för alla Sveriges kustkommuner³⁵, en beskrivning av hur framtida extremnivåer eller högvattenhändelser kan komma att förändras³⁶, ett resonemang kring vilka osäkerheter som finns i underliggande data och hur havsnivån förändras på längre sikt³⁷. Nedan följer en kortfattad beskrivning av hur beräkningarna går till, för mer detaljer se information på tjänsten.

³¹ Marine Strategy Framework Directive (MSFD), <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/data/europe-seas-1>

³² CMEMS <https://marine.copernicus.eu/>

³³ <https://www.smhi.se/klimat/stigande-havsnivaer/stigande-havsnivaer>

³⁴ <https://www.smhi.se/klimat/stigande-havsnivaer/introduktion-till-stigande-havsnivaer-1.179350>

³⁵ <https://www.smhi.se/klimat/stigande-havsnivaer/framtida-medelvattenstand-1.165493>

³⁶ <https://www.smhi.se/klimat/stigande-havsnivaer/hogvattenhandelser-och-extremnivaer-1.165445>

³⁷ <https://www.smhi.se/klimat/stigande-havsnivaer/havsnivahojning-pa-langa-tidsskalor-1.165465>

För en global beräkning av havsnivåhöjning behövs information om hur mycket land-baserad is som smälter och hur mycket värme havet tar upp, medan det för en regional beräkning dessutom behövs information om var isen smälter och var havet tar upp värme. Storskaliga regionala variationer gör att havsnivån inte stiger lika mycket överallt på jorden.

Exempelvis varierar uppvärmningen som driver den termiska expansionen av havsvattnet mellan olika platser. Även den effekt avsmältningen av inlandsisarna har på havsnivån varierar. När inlandsisarna smälter stiger havsnivån generellt, men den stiger inte lika mycket överallt på jorden. Detta beror på att när inlandsisen smälter minskar dess massa och därmed dess dragningskraft. Det leder till att havsvattnet omfördelar sig och havsnivån sjunker i närheten av inlandsisen men stiger längre bort från ismassan. För Sverige betyder detta att en avsmältning av is på Antarktis leder till en högre havsnivåhöjning jämfört med om motsvarande massa av Grönlandsisen smälter av (Hieronymus och Kalén, 2020).

Beräkningarna av framtida medelvattenstånd för Sveriges kustkommuner baseras på regional havsnivåhöjning från IPCC (2021), total landhöjning från modellen NKG2016LU (Vestøl et al. 2019), den elastiska landhöjningen från en studie av Kierulf (2021), samt beräknat medelvattenstånd för referensperioden utifrån mätdata från 23 vattenståndsstationer längs Sveriges kust. Medelvattenståndet anges i cm i höjdsystemet RH 2000 och visas i tjänsten för vart 10:e år fram till 2150 under de fem olika SSP-scenarierna som presenteras i kap. 4.2.4.

För respektive scenario anges ett sannolikhetsintervall som IPCC (2021) bedömer som *troligt*, dvs. med medelhög konfidensnivå. Utöver de fem *troliga* scenarierna anges också två *mindre troliga* intervall som inkluderar högre värden för ett av de lägsta (SSP1-2,6) samt det högsta (SSP5-8,5) scenariot. Att dessa bedöms som *mindre troliga* beror på att de inkluderar processer förknippade med fundamentala osäkerheter kring inlandsisarnas instabilitet (se kap. 5.2.5). För respektive scenario anges medianvärde samt 17:e och 83:e percentilen vilket alltså betyder att det är 66 % sannolikhet att värdet ligger inom det angivna intervallet och att det är 83 % sannolikhet att värdet ligger under den högsta gränsen för respektive scenario. Notera alltså att det övre värdet inte är någon fast gräns och att det enligt bedömningen är 17 % sannolikhet att värdet ligger över det angivna högsta värdet.

De största problemen idag med höga vattenstånd fås i samband med enstaka väderhändelser, då vattenståndet kan stiga kraftigt under kort tid. I samband med exempelvis en lågtryckspassage kan vattenståndet stiga och förbli högt under ett antal timmar eller upp till något dygn. En så kallad högvattenhändelse inträffar. Hur högt vattenståndet blir avgörs bland annat av hur mycket vatten som finns i området innan händelsen, vindens styrka och riktning samt lufttrycket. Under vissa förhållanden stiger vattenståndet till mycket höga nivåer och orsakar översvämningar. Samtidigt når vågorna längre upp på land och kan orsaka erosion eller skador på konstruktioner vid havet.

När extremnivåer ska beräknas för en viss plats behöver hänsyn tas till lokala förhållanden. Vattenståndet lokalt kan avvika från det som observeras vid en närliggande mätstation. Geografin på platsen kan leda till högre nivåer än de som observeras vid mätstationen. Normalt sett ingår inte vågeffekter i uppgifter om vattenstånd. Vid SMHI:s vattenståndsstationer filtreras vågor bort.

Det finns inte färdigberäknad statistik på hur högvattenhändelser och extremnivåer kan komma att ändras i ett framtida varmare klimat för alla platser längs Sveriges kust.

Däremot finns en översiktlig beskrivning som kan användas för att göra den typen av beräkningar³⁸.

I en pågående förstudie tillsammans med Boverket och MSB kring högvattenhändelser med mycket låg sannolikhet undersöks vilket behov bland annat kommuner har av information, data och metodik kopplat till deras arbete exempelvis med översikts- och detaljplaner eller för planering av olika skyddsåtgärder mot översvämningar. Resultaten från denna förstudie kommer användas som underlag för att fylla på och förbättra SMHIs webbaserade tjänst för stigande havsnivåer. Utöver det bevakas kunskapsläget inom området kontinuerligt och när det finns ny relevant information uppdateras också webbsidorna med detta.

4.4 Exempel på nationell klimatinformation från andra länder i Europa

Behovet av klimatinformation för klimatanpassningsarbete är i grund och botten likartat i olika länder. Information krävs om både historiskt och framtida klimat. Som beskrivits ovan (kap. 4.1) finns olika typer av observationsdata, fjärranalysprodukter och återanalyser för att beskriva det historiska klimatet. Produkterna varierar stort mellan olika delar av världen och för olika länder både vad gäller längden på observationsserier, datakvalitet och geografisk täckning. Satellitdata och globala återanalyser har väsentligt förbättrat situationen, men på många håll finns fortfarande idag ”vita fläckar” på kartan där analyser av till exempel förändringar i extremvärden för en viss variabel inte kan göras (se exv. IPCC, 2021). Även för klimatscenarier är situationen olika även om globala klimatsimuleringar finns tillgängliga för alla områden. CORDEX-samarbetet har bidragit till att relativt högupplöst regional klimatinformation nu finns för alla befolkade kontinenter. För dessa är materialet mest omfattande och detaljerat för Europa där ett större antal EURO-CORDEX-modeller körts med hög upplösning (12,5 km, jfr. kap. 4.2.4).

Trots att ett likvärdigt material existerar för Europa i form av en stor ensemble med högupplösta EURO-CORDEX-modeller har olika länder valt att hantera materialet på olika sätt. I det här kapitlet visas på tre exempel från Europa där det gjorts arbete med att ta fram enhetliga material i form av nationella scenarier som stöd i sitt klimatanpassningsarbete: Storbritannien, Nederländerna och Schweiz. De olika koncepten har jämförts av Skelton et al. (2017) som betonar hur olika politisk kultur och olika organisationer i de tre länderna styr användarnas förväntningar på klimatinformationen.

4.4.1 Nationella klimatscenarier i Storbritannien

I Storbritannien har nationella klimatscenarier för riskanalyser och stöd i klimatanpassningsarbete tagits fram i tre omgångar, varav den senaste omgången UKCP18 lanserades under 2018³⁹. Arbetet har gått ut på att ta fram klimatinformation baserad på den mest avancerade klimatforskningen i tät dialog med användare av informationen. Data inkluderar stora ensembler med globala klimatmodeller för att kunna undersöka sannolikheten för förändringar av olika klimatindikatorer. Det innefattar också mycket högupplösta regionala, så kallade konvektionstillåtande modeller för att på ett bra sätt kunna representera extremhändelser. Utöver resultat från klimatmodeller har också observationsdata använts för att uppdatera information om det historiska klimatet. Stort fokus har också legat på att kartlägga hur havsnivåhöjningen påverkar Storbritannien. Utöver data från klimatmodellerna och ett gediget forskningsunderlag har också ett stort informationsmaterial arbetats fram, se exempel i Figur 9.

³⁸ <https://www.smhi.se/klimat/stigande-havsnivaer/hogvattenhandelser-och-extremnivaer-1.165445>

³⁹ <https://www.metoffice.gov.uk/research/approach/collaboration/ukcp/index>

UKCP18 CLIMATE CHANGE OVER LAND

UKCP18 projects greater chance of hotter, drier summers and warmer, wetter winters

This is broadly consistent with UKCP09

Summer and winter changes by the 2070s

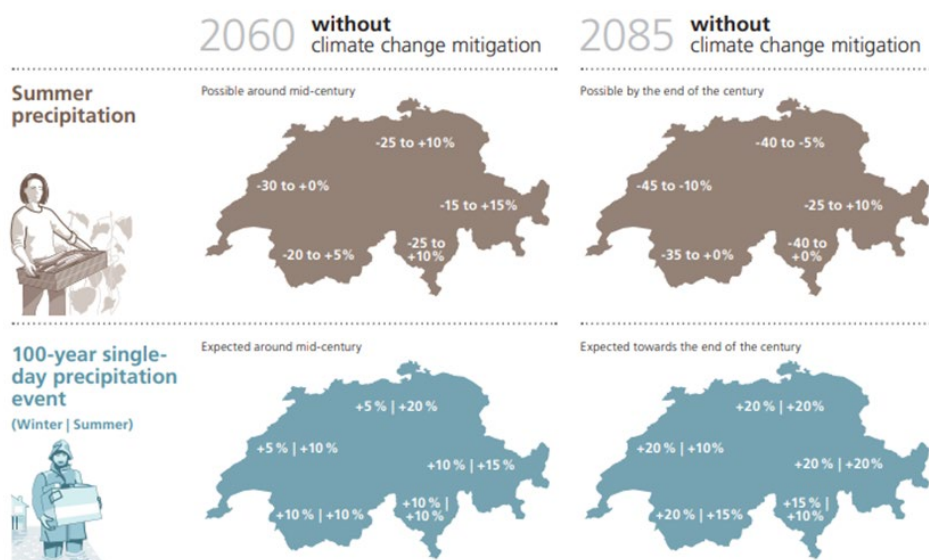


Figur 9. Ett exempel från UKCP18. Intervallen som anges är 10–90 percentilerna för förändring relativt den valda referensperioden 1981–2000. Blå fält motsvarar ett scenario med lägre utsläpp och orange ett med höga utsläpp.

4.4.2 Nationella klimatscenarier i Schweiz

Även i Schweiz har en tredje omgång nationella scenarier för klimatanpassning tagits fram (CH2018⁴⁰). Scenariomaterialet bygger på resultat från den senaste forskningen. I CH2018 har fokus lagts på EURO-CORDEX-scenarierna och informationen baseras på 21 olika simuleringar. Med hjälp av långa observationsserier för vissa variabler har informationen skalats ner ytterligare, inklusive biasjustering, till 2 x 2 km, till exempel för temperatur och nederbörd. Den högupplösta informationen är särskilt viktig i ett land som Schweiz med sin komplexa topografi med höga bergstoppar och djupa dalgångar. Informationsmaterialet som tagits fram utgår delvis från rubriker som ”Torra somrar”, ”Nederbördsextremer”, ”Mer värmeböljor” och ”Snöfria vintrar” och det görs jämförelser mellan ”2060 med reducerad klimatpåverkan” och ”2085 med större klimatpåverkan” (Fig. 10). I scenarierna och det framtagna stödmaterialet diskuteras också konsistensen med föregångaren CH2011.

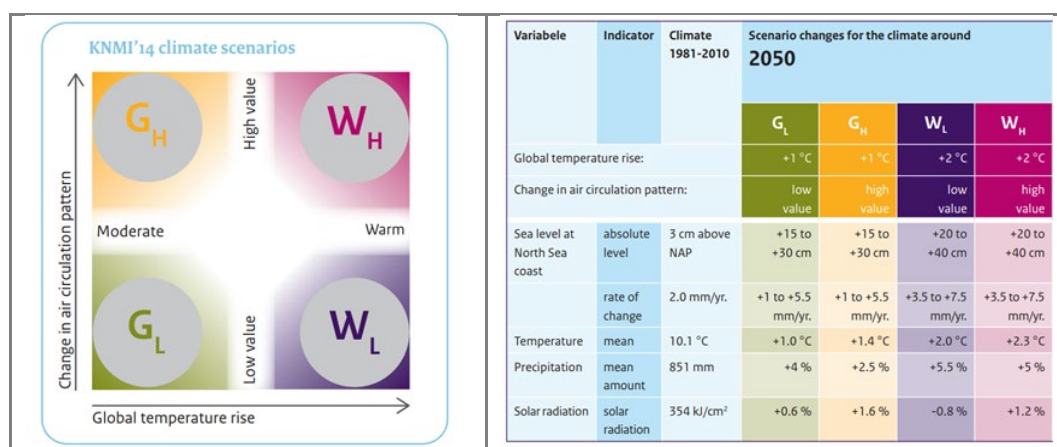
⁴⁰ <https://www.nccs.admin.ch/nccs/en/home/climate-change-and-impacts/swiss-climate-change-scenarios.html>



Figur 10. Ett exempel på budskap från CH2018. Förändring i sommarens medelnederbörd (bruna kartorna) och 100-årsregn baserat på dygnsdata för vinter och sommar. Intervallen som anges är avrundade till 5% noggrannhet.

4.4.3 Nationella klimatscenarier i Nederländerna

I Nederländerna har en annan approach jämfört med Storbritannien och Schweiz valts. Istället för att direkt arbeta med ett stort antal klimatsimuleringar har fyra olika så kallade "storylines" illustrerats (Fig. 11). Dessa är organiserade i två dimensioner, där en handlar om graden av uppvärmning (medel eller hög) och den andra handlar om möjliga förändringar i atmosfärens storskaliga cirkulation (liten eller stor). Valet att titta specifikt på atmosfärens storskaliga cirkulation, alltså vindriktning, handlar om att Nederländerna är mycket sårbart för översvämningar längs kusten. Huruvida översvämningsskydd längs kusterna klarar ökade högvattennivåer är extra viktigt.



Figur 11. Ur broschyren för "KNMI'14 climate scenarios for the Netherlands"⁴¹. Bilden till vänster visar de fyra olika klimatförändringstyperna. Till höger syns motsvarande ungefärliga klimatförändringssignal givet var och en av dessa fyra typer.

⁴¹ <https://www.knmiprojects.nl/projects/climate-scenarios/documents/publications/2015/01/01/folder- knmi14-climate-scenarios>

4.4.4 Är klimatinformationen i olika länder jämförbar?

De tre exemplen ovan (kap. 4.4.1–4.4.3) visar alltså på att klimatinformationen som används på nationell nivå i Storbritannien, Schweiz och Nederländerna bygger på helt eller delvis olika ursprungsdata eller metodik. I Storbritannien har konvektionstillåtande modeller använts vilket ger bättre möjlighet att säga något om skyfall och kraftiga regnskurar än i de andra båda länderna. Även i Schweiz har klimatinformation tagits fram på hög upplösning men då istället genom statistiska metoder. Den höga upplösningen ger ett mervärde särskilt med tanke på den komplexa topografin i Alperna. Trots detta så har de underliggande klimatmodellerna för låg upplösning för att komma åt problematiken med rätt intensitet för regnskurarna. För Nederländerna har ett koncept med storylines valts istället för att tillhandahålla högupplöst klimatinformation.

Andra exempel visar att skillnader i data och metodik gäller i någon grad för de flesta länder där liknande information tagits fram. För fler exempel se Sigel et al. (2016), som jämför 17 olika plattformar med klimatinformation från 14 länder. Det här behöver inte vara något problem men är bra att känna till när jämförelser görs mellan olika länder till exempel för dataset som är delvis överlappande i gränstrakter. Det kan också vara viktigt på ett större internationellt plan i samband med transnationella analyser av klimatförändringens konsekvenser och inför arbete med klimatförhandlingar med bäring på klimatanpassning.

5 Kunskapsläget kring den globala klimatförändringen

Det naturvetenskapliga kunskapsläget inom klimatområdet är gediget och väl beskrivet framför allt genom IPCCs omfattande utvärderingsrapporter. Inom den sjätte utvärderingscykeln (AR6) har utöver huvudrapporten om den naturvetenskapliga grunden kring klimatförändringarna (IPCC, 2021) tre specialrapporter om: i) 1,5 graders uppvärmning jämfört med förindustriell tid (IPCC, 2018), ii) kunskapsläget kring hav och kryosfär (IPCC, 2019a) och iii) kunskapsläget kring land och markanvändning (IPCC, 2019b) färdigställts. För samtliga dessa fyra rapporter har respektive sammanfattning för beslutsfattare översatts till svenska och finns utgivna i SMHIs rapportserie Klimatologi⁴².

I senaste IPCC-rapporten (IPCC, 2021) slås fast att människans klimatpåverkan är otvetydig. De rapporter som hittills publicerats inom ramen för AR6 visar att den pågående klimatförändringen är utbredd och snabb i klimatsystemets alla delar, dvs. inte bara i atmosfären utan också i kryosfären, biosfären och haven. Rapporterna visar vidare på att den pågående klimatförändringen är ovanlig även i ett mångtusenårigt perspektiv och att fortsatt minskning av is, höjning av havsnivån och andra ändringar i klimatsystemet kommer att fortsätta under kommande sekler.

I det här kapitlet sammanfattas kunskapsläget inom ett par olika områden. En utförlig beskrivning finns också i Kungliga Vetenskapsakademiens skrift om kunskapsläget (Chen et al., 2021b). I övrigt hänvisas till IPCC-rapporterna för mer fullständig information.

5.1 Klimatförändringen fram till idag

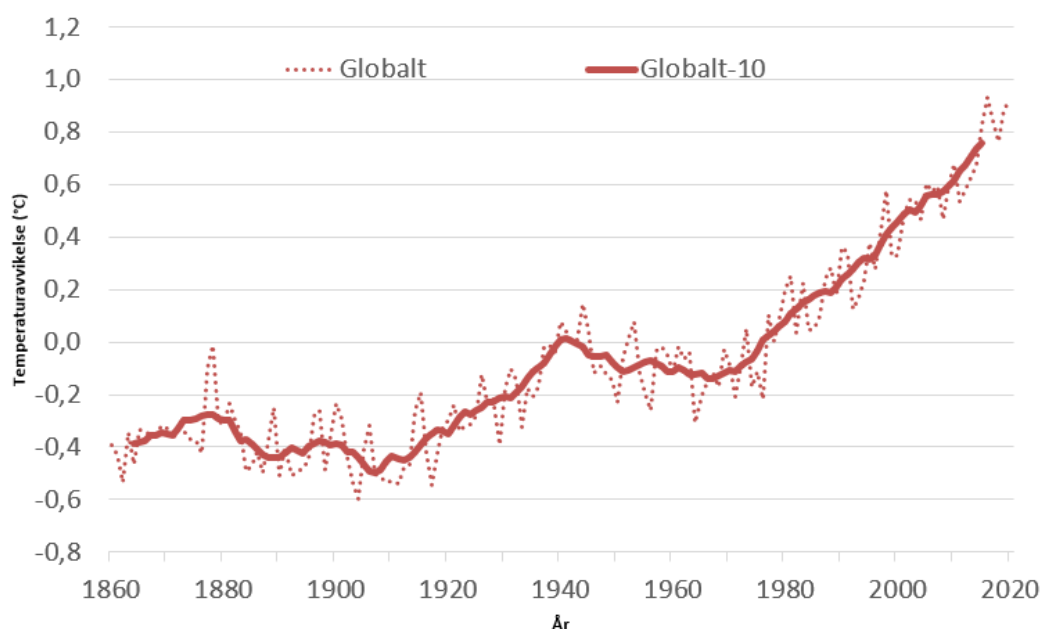
Sen industrialiseringens början omkring 1750 har atmosfärens halt av växthusgaser ökat till följd av människans utsläpp. Detta gäller till exempel koldioxid, som idag nått koncentrationer i närheten av 415 miljondelar⁴³ med de cirka 280 miljondelar som den

⁴² Respektive nummer i rapportserien är 53 (IPCC, 2018), 57 (IPCC, 2019b), 58 (IPCC, 2019a) och 65 (IPCC, 2021).

⁴³ Enligt WMO Greenhouse Gas Bulletin (2021) var medelvärdet för 2020 413,2 miljondelar och fortsatt ökande halter under 2021, se https://library.wmo.int/index.php?lvl=notice_display&id=21975#.YebEw_7MKUK

förindustriella luften innehöll. Ökningen av växthusgaser har bidragit till en uppvärmning på någonstans mellan 1,0 och 2,0°C. Detta har delvis motverkats framför allt av att halten av aerosolpartiklar ökat. Nettoeffekten för aerosolpartiklarnas klimatpåverkan bedöms av IPCC till någonstans mellan 0,0 och -0,8 °C. IPCCs uppskattning är att människans samlade klimatpåverkan står för en ökning av den globala medeltemperaturen med 1,07 °C (osäkerhetsintervall mellan 0,8 och 1,3 °C) för decenniet 2010–2019 jämfört med 1850–1900. De naturliga processer som påverkar klimatet uppskattas inte haft någon signifikant påverkan för motsvarande tidsperiod. Här exemplifieras med att förändringar i solinstrålning eller kraftiga vulkanutbrott kan ha påverkat den globala medeltemperaturen med någonstans mellan -0,1 och +0,1 °C. Motsvarande påverkan från naturlig intern variabilitet är mellan -0,2 och +0,2 °C.

För atmosfären pekar IPCC (2021) på att decenniet 2011–2020 var 1,1 °C varmare jämfört med medelvärdet för 1850–1900, vilket alltså ligger mycket nära uppskattningen av människans klimatpåverkan enligt ovan. Motsvarande siffra för året 2020 är 1,2 °C (WMO, 2021). Den snabba temperaturökningen under perioden från 1960-talet och fram till idag, där varje nytt decennium varit varmare än det närmast föregående, framgår tydligt av Figur 12.

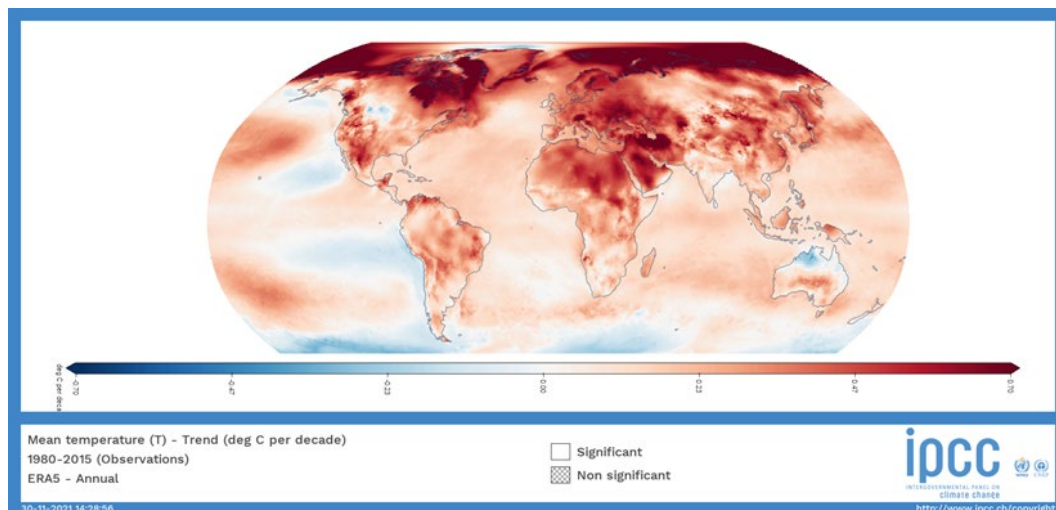


Figur 12. Avvikelse i global årsmedeltemperatur jämfört med medelvärdet för referensnormalperioden 1961–1990 globalt från 1860 till och med 2020. De prickade linjerna visar data för varje år. De heldragna tjocka linjerna visar ett löpande 10-årsmedelvärde där punkten är plottad för det femte året i respektive 10-årsperiod. Data är från HadCRUT5.0 (Morice et al., 2021). I Figur 1 visas samma data tillsammans med motsvarande data för Sveriges årsmedeltemperatur.

5.1.1 Ändringar i temperaturklimatet

De observerade temperaturökningarna uppvisar ett karakteristiskt geografiskt mönster med generellt större ökning över kontinenterna än över haven och allra störst ökning i stora delar av Arktis (Fig. 13). Det är inte bara medelvärdet av temperaturen som ändras, även temperaturextremer påverkas av klimatförändringen. Värmeböljor och varma extremer har blivit vanligare i mer eller mindre alla regioner där det finns observationer och det finns en stark koppling till människans klimatpåverkan. I IPCC (2021) visas till

exempel att det som under perioden 1850–1900 var en 50-årshändelse, dvs. en händelse som inträffar i medeltal en gång per 50 år, nu har blivit en tioårshändelse och alltså inträffar närmare fem gånger på femtio år. Det visas också att en 50-årshändelse har blivit 1,2 °C varmare. Samtidigt har kalla extremer och köldknäppar minskat i intensitet och frekvens.



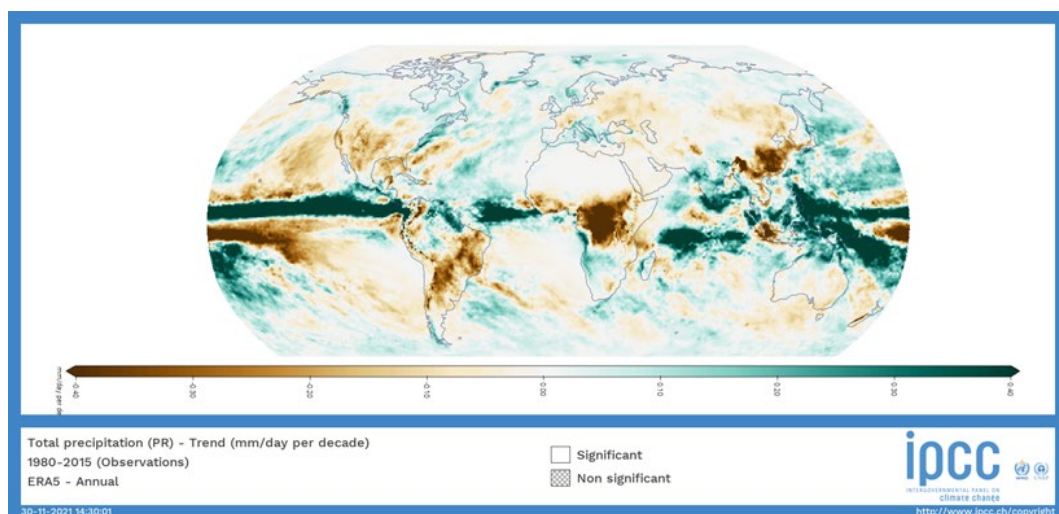
Figur 13. Trend i marknära temperatur för perioden 1980–2015 baserad på den globala återanalysen ERA5. Figuren hämtad från IPCCs interaktiva atlas (Gutiérrez et al., 2021).

5.1.2 Ändringar i nederbördsklimatet

Ett varmare klimat leder till ett intensivare hydrologiskt kretslopp. De observerade nederbördsförändringarna är inte lika stora överallt (Fig. 14). Stora ökningar syns till exempel i närheten av den intertropiska konvergenszonen i närheten av ekvatorn, men också för delar av mellanbreddgradernas västvindsbälten. Detta är områden som redan idag har relativt mycket nederbörd. I andra områden minskar nederbörden istället. Under den aktuella perioden (1980–2015) har nederbörden till exempel minskat i stora delar av centrala Afrika, Sydostasien och delar av Nord- och Sydamerika. I figuren framgår att nederbörden i stora delar av Skandinavien har ökat medan stora delar av övriga Europa sett en minskning.

Även nederbördsextremer har ändrats i takt med det allt varmare klimatet. Till exempel visar IPCC-rapporten både på mer intensiva regn och mer utpräglad torka, ibland i samma region. Klimatförändringssignalen är inte lika entydig som för temperaturextremer och kopplingen till mänsklig klimatpåverkan inte lika framträdande. För många regioner saknas tillräckligt med observationer för en analys, men för de flesta områden där det finns tillräckligt med observationer går det att säga att intensiv nederbörd blivit mer intensiv och det finns inga områden med minskad intensitet.

Enligt IPCC (2021) inträffar det som var en 10-årshändelse under perioden 1850–1900 nu 1,3 gånger så ofta. Sannolikheten för en sådan händelse har alltså ökat med 30%. Intensiteten för en 10-årshändelse har ökat med närmare 7%. För många regioner har torka blivit mer vanligt, särskilt i Medelhavsområdet och västra Nordamerika, men även i mellanöstern och i stora delar av Afrika. Av de drygt 40 regioner som IPCC-rapporten gör samlade bedömningar för är det bara en region, norra Australien, där torka blivit mindre vanligt. Det är också en stor andel regioner där eventuella förändringar inte är entydiga. För de regioner där torka har blivit vanligare har det som var en 10-årshändelse 1850–1900 ökat i frekvens med en faktor 1,7 vilket motsvarar en ökning med 70%.



Figur 14. Trend i nederbörd för perioden 1980–2015 baserad på den globala återanalysen ERA5. Figuren hämtad från IPCCs interaktiva atlas (Gutiérrez et al., 2021).

Andra förändringar i nederbördsklimatet handlar om att monsunregnen ändrats till följd av olika grad av uppvärmning. Här har uppvärmning på grund av ökade halter av växthusgaser i atmosfären i vissa områden motverkats av regional avkylning som en konsekvens av ökade halter av aerosolpartiklar i atmosfären under delar av 1900-talet. I ett senare skede, från 1980-talet när aerosolpartiklar från Europa och Nordamerika återigen minskat, har monsunnederbörden i Västafrika istället ökat.

5.1.3 Ändringar i atmosfärens storskaliga cirkulation

I och med att temperaturändringar skiljer sig åt mellan olika platser påverkas också den storskaliga atmosfäriska cirkulationen. Till exempel pekar IPCC (2021) på en viss utvidgning av Hadley-cirkulationen i tropikerna samt att mellanbreddgradernas lågtrycksbanor i medeltal har flyttats något närmare polerna på båda halvkloten sen 1980-talet. För Nordatlantens och Skandinavien del finns tecken på att den Nordatlantiska lågtrycksbanan möjligen blivit svagare och flyttat något mot nordost samtidigt som antalet djupa lågtryck ökat något (Rutgersson et al., 2022). För högtrycksblockeringar är läget mer oklart och det går inte att urskilja någon konsistent förändring på global eller hemisfärisk skala (IPCC, 2021).

Ökade temperaturer har också påverkat tropiska cykloner för vilka andelen av de kraftiga cyklonerna (kategori 3–5) ökat under de senaste 40 åren. Det finns också tecken på att de tropiska cyklonerna i västra delarna av norra Stilla Havet förskjutits något norröver. I övrigt är det svårt att dra slutsatser om observerade förändringar i de tropiska cyklonerna. Det finns tecken på att nederbörden i samband med cyklonerna ökat i intensitet.

5.1.4 Ändringar i hav och kryosfär

När temperaturen i atmosfären stiger värms även havet upp. Sedan år 1970 har haven tagit upp mer än 90% av klimatsystemets överskottsvärme. Haven har också tagit upp 20–30 % av de antropogena utsläppen av koldioxid. Detta har lett till att haven blivit surare, pH-värdet har minskat. Så kallade marina värmeböljor, korta perioder med lokalt extremt

höga havstemperaturer, ökar i frekvens och styrka. Under 2020 upplevde 80 % av havsytan minst en marin värmebölja (WMO, 2021)⁴⁴.

Konsekvenser av den här typen av temperaturökning och nederbördsförändringar tas upp i IPCCs specialrapporter om 1,5 graders global uppvärmning (IPCC, 2018) och om havet och kryosfären i ett förändrat klimat (IPCC, 2019a). Bland annat konstateras att:

- Havens salthalt har förändrats regionalt till följd av ändrad nederbörd och avdunstning.
- Observationer indikerar att det nordatlantiska strömsystemet (AMOC) i vilket Golfströmmen ingår har försvagats, men det går inte att kvantifiera försvagningen eller att koppla den direkt till klimatförändringen.
- Utbredningen och tjockleken av havsisen i Arktis har minskat och snösäsongen har blivit kortare på många håll.
- Glaciärer och inlandsisar har förlorat massa.

5.1.5 Ändring i havsnivå

Havsnivån stiger till följd av termisk expansion och smältande landisar. Sen 1900 är höjningen 20 cm. Tendensen är ökande och idag är takten cirka 3,7 mm per år vilket domineras av bidraget från smältande landisar.

5.2 Framtida klimatförändring

IPCC (2021) visar på ett tydligt samband mellan ackumulerade utsläpp av koldioxid och den långsiktiga ökningen av den globala medeltemperaturen sen mitten på artonhundratalet. Sambandet är i det närmaste linjärt och visar på hur stor den framtida temperaturökningen kan bli givet olika utsläppsscenarier.

I Parisavtalet fastslås att den globala temperaturökningen ska begränsas till väl under 2 °C över förindustriell nivå, med en strävan att begränsa ökningen till 1,5 °C. Samtidigt har temperaturen redan stigit med över en grad (kap. 5.1). Eftersom det finns en tröghet i klimatsystemet och jämvikt inte råder kommer temperaturen att fortsätta att öka något även efter en stabilisering av växthusgaskoncentrationen i atmosfären. Denna ökning är högst 0,5 °C. Även om nettonollutsläpp uppnås inom en snar framtid är det därför troligt att uppvärmningen överskrider +1,5 °C jämfört med förindustriella nivåer. Med nuvarande uppvärmningstakt på ca 0,2°C per årtionde kommer +1,5 °C att uppnås inom omkring 15 år. Det är också vad klimatscenerierna i CMIP6 pekar på där alla scenarier utom SSP1-1,9 når +1,5 °C jämfört med perioden 1850–1900 under perioden 2021–2041 (jfr. Tabell 2).

Då utsläppen av växthusgaser högst sannolikt kommer att fortsätta under flera årtionden kommer också den globala uppvärmningen att fortsätta. Hur stor den förändringen blir och om +2 °C uppnås beror på hur stora de framtida utsläppen av växthusgaser blir. Exakt när det kan ske är oklart, men scenarier pekar på att det kan ske någon gång mellan 2040 och 2060. I scenarier med kraftfulla åtgärder för att minska klimatpåverkan (SSP1-1,9 respektive SSP1-2,6) är det möjligt att stanna under +2 °C uppvärmning (Tabell 2). För samtliga övriga scenarier kommer nivån att överskridas.

Exakt hur snabbt uppvärmningen går och hur stor den kommer att bli beror också på klimatkänsligheten. Klimatkänsligheten (ECS, kap. 2.1.1) är uppskattad till 3 °C (2,5 °C – 4 °C) enligt IPCC (2021). Jämfört med IPCC (2013), som inte angav något centralvärde och bedömde klimatkänsligheten till (1,5 °C – 4,5 °C), har intervallet snävats in väsentligt både vad gäller låga och höga värden; en följd av en till stora delar ny och vetenskapligt bredare metodologi. Samtidigt uppvisar olika klimatmodeller fortfarande stor spridning i

⁴⁴ <https://public.wmo.int/en/our-mandate/climate/wmo-statement-state-of-global-climate>

klimatekänsligheten och flera modeller ligger utanför intervallet. Generellt uppvisar klimatmodellerna i CMIP6 högre klimatekänslighet (ECS) än modellerna i CMIP5 (Meehl et al., 2020; Meinshausen et al., 2020; Tokarska et al., 2020; Zelinka et al., 2020). Den högre klimatekänsligheten leder till en kraftigare uppvärmning vid samma scenario, särskilt på längre sikt och vid större grad av klimatpåverkan. Det noteras också att scenarierna skiljer sig åt mellan CMIP5 och CMIP6. Även om den nominella strålningsdrivningen vid år 2100 är 8,5 W/m² i både RCP8,5 och SSP5-8,5 har SSP5-8,5 högre koncentrationer av CO₂ och uppvisar, åtminstone i vissa globala klimatmodeller, en kraftigare klimatförändringssignal (Wyser et al., 2020).

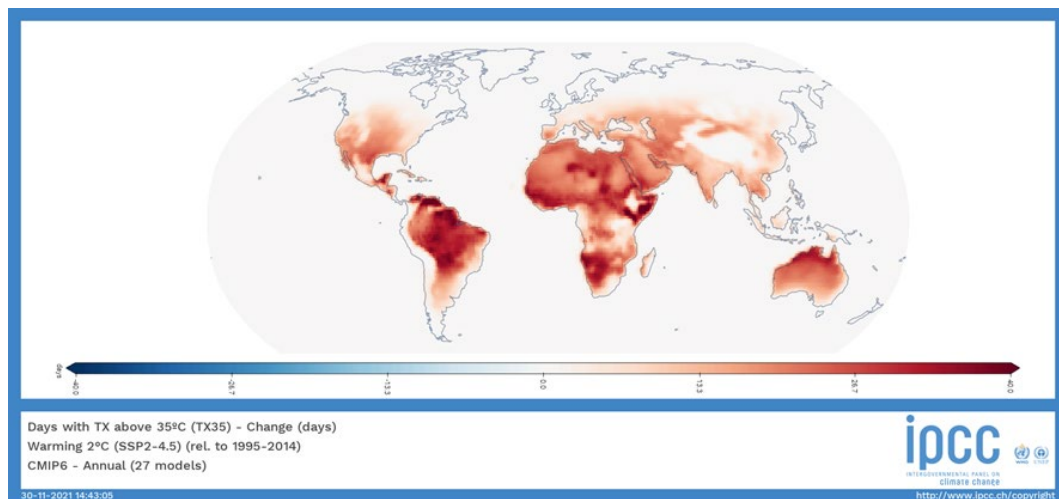
Tabell 2. Framtida ökning av global medeltemperatur enligt IPCC (2021). Centralvärde och osäkerhetsintervall inom vilket det bedöms vara 90% sannolikhet att värdet ligger. Värdena anges relativt medelvärdet för 1850–1900, vilket kan ses som representativt för förindustriella förhållanden.

Scenario	2021–2040		2041–2060		2081–2100	
	Centralvärde (°C)	Intervall (°C)	Centralvärde (°C)	Intervall (°C)	Centralvärde (°C)	Intervall (°C)
SSP1-1,9	1,5	1,2–1,7	1,6	1,2–2,0	1,4	1,0–1,8
SSP1-2,6	1,5	1,2–1,8	1,7	1,3–2,2	1,8	1,3–2,4
SSP2-4,5	1,5	1,2–1,8	2,0	1,6–2,5	2,7	2,1–3,5
SSP3-7,0	1,5	1,2–1,8	2,1	1,7–2,6	3,6	2,8–4,6
SSP5-8,5	1,6	1,3–1,9	2,4	1,3–3,0	4,4	3,3–5,7

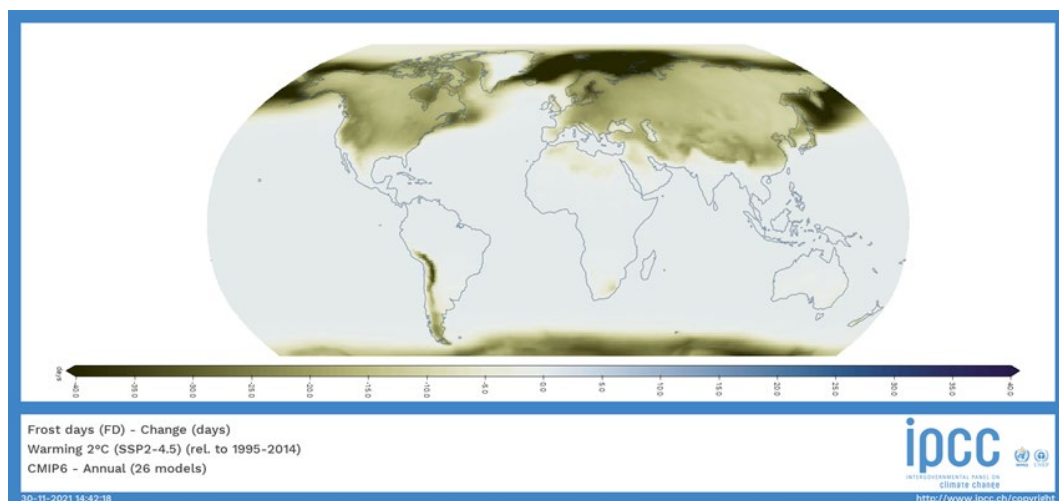
5.2.1 Framtida ändringar i temperaturklimatet

Den framtida regionala uppvärmningen följer geografiskt till stor del den observerade förändringen under de senaste decennierna med generellt större förändring över land än över hav och allra störst ökning i Arktis (visas inte här, se kap 5.1 för historisk förändring). Även temperaturextremer fortsätter att ändras ungefär som under de senaste decennierna. Det som 1850–1900 var en 50-årshändelse och idag är en 10-årshändelse kommer i en 1,5 °C varmare värld att inträffa i medeltal ungefär en gång vart 6:e år och i en 2 °C varmare värld oftare än en gång på fyra år. Figur 15 visar på hur stor ökningen är av antal dagar med maximitemperatur över 35 °C i en 2 °C varmare värld relativt referensperioden 1995–2014, som är den referensperiod som ligger närmast nutid i IPCCs interaktiva atlas. Färgskalan bottnar vid omkring 40 dagar vilket betyder att i stora delar av norra och centrala Sydamerika samt i västra, östra och södra Afrika kan det förväntas uppemot en månad eller mer av så pass varma dagar. Detsamma gäller för stora delar av norra Australien.

På motsvarande sätt minskar antal dagar med kalla förhållanden. Kalla extremer fortsätter minska i frekvens och intensitet. Särskilt stora skillnader kan inträffa när snö- och istäcket försvinner vilket gör att förutsättningarna för riktigt låga temperaturer minskar. Figur 16 visar till exempel på hur antal frostdagar, dvs. dagar då minimitemperaturen går under 0 °C, minskar i en 2 °C varmare värld relativt referensperioden 1995–2014. För huvuddelen av landområdena norr om 35 grader nord väntas minskningar på 2–3 veckor eller mer. För kalla havsområden i norr, Norra Ishavet och Östersjön, är den beräknade ökningen av dagar med minimitemperatur över 0 °C mer än en månad. En del bergsområden sticker ut – särskilt Anderna, men även Klippiga Bergen och Himalaya – med större ändringar än omgivande områden. Här noteras också att ökningen över Grönland är kopplad till de mer kustnära områdena och att den mer centrala delen av inlandsisen inte kommer att se någon större ökning i antal dagar som är helt och hållet på plussidan.



Figur 15. Ändring i antal dagar maximitemperatur över 35 °C i en 2 °C varmare värld relativt referensperioden 1995–2014. Figuren är hämtad från IPCCs interaktiva atlas (Gutiérrez et al., 2021) och materialet bygger på 27 olika globala klimatmodeller för scenariot SSP2-4,5.



Figur 16. Ändring i antal dagar med minimitemperatur under 0 °C i en 2 °C varmare värld relativt referensperioden 1995–2014. Figuren är hämtad från IPCCs interaktiva atlas (Gutiérrez et al., 2021) och materialet bygger på 27 olika globala klimatmodeller för scenariot SSP2-4,5.

5.2.1.1 Framtida ändringar i Nordeuropas temperaturklimat

För Nordeuropas del kommer förändringarna i temperatur leda till fortsatt förskjutning av säsongerna med en allt längre sommarsäsong och vegetationsperiod samt en kortare vinter med kortare säsong för is och snö. För perioden 2021–2040 visar både globala och regionala klimatmodeller på en uppvärmning i Nordeuropa på mellan en och två grader jämfört med 1986–2005 (Tabell 3). De högre värdena gäller främst under vintern och i högre grad i scenarier med högre klimatpåverkan jämfört med scenarier där åtgärder för att minska koldioxidutsläppen börjat få resultat. Intervallen i tabellen anger att modellerna ger 90% sannolikhet för att uppvärmningen hamnar mellan noll och upp emot tre och en halv grad för vintern och mellan noll och två och en halv till tre grader för sommaren. Värdena är i medeltal ett par tiondelar högre i de kraftigaste scenarierna (RCP8,5 och SSP5-8,5). För slutet av seklet (2081–2100) är skillnaderna mellan scenarierna mycket större. Medan RCP2,6 och SSP1-2,6 indikerar en ytterligare höjning

jämfört med 2021–2040 om ca en halv grad är motsvarande ökning mycket kraftigare i de andra scenarierna. I RCP4,5 och SSP2-4,5 är ökningen under vintern ungefär tre och en halv grad i medeltal och i RCP8,5 och SSP5-8,5 drygt sex grader i medeltal med en del modeller som indikerar ändringar om uppemot åtta till nio grader.

Tabell 3. Framtida ökning i medeltemperatur i landområden i Nordeuropa (delar av nordvästra Ryssland, Finland, Skandinavien och Storbritannien) enligt regionala klimatmodeller från EURO-CORDEX samt globala modeller från CMIP5 och CMIP6 för två perioder relativt perioden 1986–2005. Siffrorna anger medianvärde samt, inom parentes, 5e och 95e percentilerna i respektive ensemble. Antalet ensemblemedlemmar i parentes i första kolumnen. Data från IPCCs interaktiva atlas (Iturbide et al., 2021 och Gutiérrez et al., 2021).

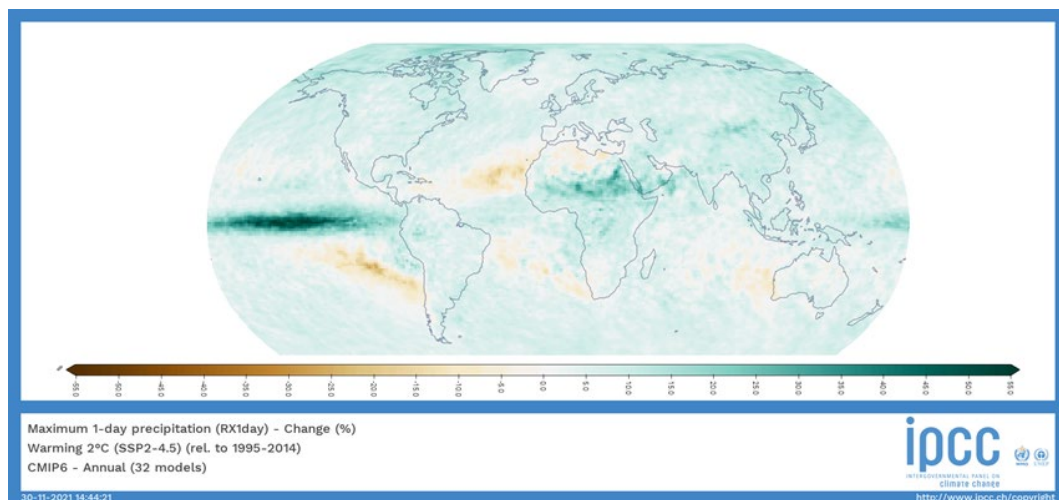
Klimatscenario	Temperaturökning (°C) (2021–2040)	Temperaturökning (°C) (2081–2100)
<i>Vinter (dec-feb)</i>		
EURO-CORDEX RCP2,6 (20)	1,2 (0,7 – 1,7)	1,6 (0,7 – 2,3)
CMIP5 RCP2,6 (21)	1,6 (0,3 – 3,0)	2,1 (0,7 – 3,6)
CMIP6 SSP1-2,6 (32)	1,5 (0,0 – 3,4)	1,9 (-0,1 – 3,6)
EURO-CORDEX RCP4,5 (20)	1,5 (0,7 – 2,3)	3,2 (2,2 – 4,3)
CMIP5 RCP4,5 (28)	1,9 (0,8 – 3,5)	3,7 (1,8 – 5,7)
CMIP6 SSP2-4,5 (34)	1,8 (0,6 – 3,3)	3,4 (1,6 – 5,2)
EURO-CORDEX RCP8,5 (49)	1,7 (0,8 – 2,6)	5,3 (3,6 – 6,6)
CMIP5 RCP8,5 (29)	1,8 (0,6 – 3,3)	6,3 (4,3 – 9,2)
CMIP6 SSP5-8,5 (34)	1,9 (0,4 – 3,5)	6,2 (3,8 – 8,9)
<i>Sommar (jun-aug)</i>		
EURO-CORDEX RCP2,6 (20)	0,8 (0,1 – 1,4)	1,2 (0,7 – 2,3)
CMIP5 RCP2,6 (21)	1,2 (0,5 – 2,2)	1,4 (0,4 – 2,9)
CMIP6 SSP1-2,6 (32)	1,3 (0,5 – 2,4)	1,9 (0,8 – 3,8)
EURO-CORDEX RCP4,5 (20)	1,0 (0,4 – 1,4)	2,1 (1,3 – 2,9)
CMIP5 RCP4,5 (28)	0,8 (0,5 – 2,0)	2,0 (0,9 – 3,8)
CMIP6 SSP2-4,5 (34)	1,4 (0,6 – 2,3)	2,9 (1,3 – 4,8)
EURO-CORDEX RCP8,5 (49)	1,2 (0,6 – 1,8)	4,0 (2,7 – 5,4)
CMIP5 RCP8,5 (29)	1,4 (0,5 – 2,7)	4,7 (2,7 – 6,8)
CMIP6 SSP5-8,5 (34)	1,6 (0,6 – 2,9)	5,3 (2,8 – 7,9)

En jämförelse av de tre ensemblerna visar att temperaturökningen i Nordeuropa generellt är ungefär lika stor i de två generationerna av globala klimatmodeller CMIP5 och CMIP6 för vintern och även för sommaren under den första tidsperioden (2021–2040). I slutet av seklet skiljer de två ensemblerna sig åt under sommaren där CMIP6-modellerna i medeltal visar en starkare signal om ungefär en halv grad i båda scenarierna. De regionala EURO-CORDEX-modellerna visar generellt på mindre temperaturförändringar jämfört med CMIP-modellerna. Skillnaderna handlar om några tiondelar till drygt en halv grad. Här noteras att dessa jämförelser har sina begränsningar då det är olika många modeller som jämförs i de olika ensemblerna. För de regionala modellerna är det ibland flera

regionala modeller som använts för att skala ner en och samma globala modell. Även om antalet använda regionala modeller är många för RCP8,5 representerar de dock bara 8 av totalt 29 av de underliggande globala CMIP5-modellerna. Dessa åtta CMIP5-modeller har också visats ha en svagare temperaturökning än den större CMIP5-ensemblen i Tabell 3 (Coppola et al., 2021).

5.2.2 Framtida ändringar i nederbörds klimatet

Även för nederbörden väntas framtida förändringar i stort följa de geografiska mönster som redan observerats. Det betyder alltså mer nederbörd i delar av tropikerna och på högre breddgrader i västvindbältet. Samtidigt väntas minskad nederbörd i många subtropiska områden. Det här är ett entydigt mönster i olika klimatmodeller och vid olika grad av framtida uppvärmning. Däremot skiljer sig detaljer och i områden som ligger i gränsområden mellan områden med ökad nederbörd och de med minskning kan olika modeller till och med ha olika tecken på förändringen. Det här är en fundamental osäkerhet när det gäller den hydrologiska responsen på klimatförändringar. Även för nederbörd förväntas förändringar av extremer. Generellt finns en ökad sannolikhet i många områden för ökad intensitet i de mer kraftiga regnen oavsett om det väntas ökad nederbörd eller ej i stort. Ett par undantag till detta finns i några av de subtropiska områdena, särskilt över hav (Fig. 17). I medeltal, för många områden, väntas framtida ökning av intensiv nederbörd vara ungefär 7% per grads temperaturökning. I vissa fall kan ökningen överstiga detta. Här noteras att Figur 17 bygger på resultat med globala, relativt grovt upplösta, klimatmodeller. För en del regioner har regionala klimatmodeller med högre horisontell upplösning visat på bättre överensstämmelse med observationer och möjligen till större förändringar i nederbörden i takt med att temperaturen ökar.



Figur 17. Ändring i maximal 24-timmarsnederbörd i en 2 °C varmare värld relativt referensperioden 1995–2014. Figuren är hämtad från IPCCs interaktiva atlas (Gutiérrez et al., 2021) och materialet bygger på 32 olika globala klimatmodeller för scenariot SSP2-4,5.

5.2.2.1 Framtida ändringar i Nordeuropas nederbörds klimat

För Nordeuropas del pekar scenarierna generellt på en fortsatt ökning av nederbörden (Tabell 4). Men både under sommar och vinter finns det modeller som visar på minskad nederbörd utom under vintern i RCP8,5 respektive SSP5-8,5 vid slutet av seklet där alla enstaka simuleringar pekar på kraftig nederbördsökning om minst 10 %. Ökningen är generellt större under vintern och större vid kraftigare klimatpåverkan. Detta gäller inte på samma sätt för sommaren där det i de globala modellerna vid kraftigare klimatpåverkan blir en mindre ökning, och för SSP5-8,5 i slutet av seklet till och med en minskning i ensemblen som helhet.

Tabell 4. Framtida ändring i nederbörd i landområden i Nordeuropa (delar av nordvästra Ryssland, Finland, Skandinavien och Storbritannien) enligt regionala klimatmodeller från EURO-CORDEX samt globala modeller från CMIP5 och CMIP6 för två perioder relativt perioden 1986–2005. Siffrorna anger medianvärde samt, inom parentes, 5e och 95e percentilerna i respektive ensemble. Antalet ensemblemedlemmar i parentes i första kolumnen. Data från IPCCs interaktiva atlas (Iturbide et al., 2021 och Gutiérrez et al., 2021).

Klimatscenario	Nederbördsförändring (%) (2021–2040)	Nederbördsförändring (%) (2081–2100)
<i>Vinter (dec-feb)</i>		
EURO-CORDEX RCP2,6 (21)	3,4 (-0,1 – 8,6)	2,7 (-2,9 – 9,6)
CMIP5 RCP2,6 (21)	4,2 (-5,7 – 12)	5,8 (-2,3 – 15)
CMIP6 SSP1-2,6 (32)	4,3 (-3,5 – 12)	5,8 (-3,8 – 15)
EURO-CORDEX RCP4,5 (21)	4,4 (-5,1 – 8,8)	11 (5,9 – 17)
CMIP5 RCP4,5 (28)	4,4 (-4,0 – 13)	10,8 (1,5 – 22)
CMIP6 SSP2-4,5 (32)	5,2 (-1,4 – 13)	9,9 (3,6 – 18)
EURO-CORDEX RCP8,5 (50)	4,9 (-5,1 – 12)	22 (13 – 34)
CMIP5 RCP8,5 (29)	5,6 (-3,0 – 15)	25 (9,5 – 43)
CMIP6 SSP5-8,5 (33)	6,3 (-1,4 – 14)	25 (12 – 41)
<i>Sommar (jun-aug)</i>		
EURO-CORDEX RCP2,6 (21)	3,5 (-1,8 – 10)	4,3 (-0,9 – 7,5)
CMIP5 RCP2,6 (21)	2,4 (-2,9 – 8,2)	5,2 (-2,7 – 14)
CMIP6 SSP1-2,6 (32)	2,3 (-6,7 – 11)	2,7 (-10 – 13)
EURO-CORDEX RCP4,5 (21)	4,5 (-1,8 – 10)	8,1 (-0,7 – 18)
CMIP5 RCP4,5 (28)	2,9 (-4,3 – 9,1)	4,3 (-5,9 – 18)
CMIP6 SSP2-4,5 (32)	1,6 (-5,1 – 10)	2,0 (-11 – 16)
EURO-CORDEX RCP8,5 (50)	4,5 (-2,3 – 10)	9,3 (-6,2 – 27)
CMIP5 RCP8,5 (29)	3,2 (-4,2 – 11)	1,9 (-16 – 24)
CMIP6 SSP5-8,5 (33)	1,5 (-8,7 – 10)	-1,6 (-20 – 14)

Jämförelse av de tre ensemblerna visar mycket lika resultat för de två globala ensemblerna. Men, precis som för temperatur, finns en skillnad under sommaren då CMIP6-modellerna visar på en något mindre nederbördsökning, eller till och med en viss minskning av nederbörden, vid kraftigare klimatpåverkan. De regionala modellerna tenderar att ge en något mindre ökning under vintern och en kraftigare ökning under sommaren vid kraftig klimatpåverkan.

5.2.3 Framtida ändringar i atmosfärens storskaliga cirkulation

Fortsatt global uppvärmning förväntas leda till ytterligare expansion av tropikerna, dvs. en expansion av Hadley-cirkulationen. Andelen av de intensiva tropiska cyklonerna (kategori 4–5) förväntas öka liksom intensiteten i vindhastighet som förknippas med dem. Tillsammans med fortsatt ökning av nederbörd i samband med cyklonerna och fortsatt höjning av havsnivån kan därför de potentiella skadeverkningarna i utsatta områden förväntas öka.

En fortsatt förflyttning av mellanbreddgradernas lågtrycksbanor mot polerna är generellt att vänta. För Nordatlanten är det dock osäkert i vilken grad detta kan komma att ske. För Sveriges del är effekten av detta antagligen relativt liten då lågtrycksbanorna fortfarande kommer att beröra Skandinavien i ungefär samma utsträckning som idag. Enligt IPCC (2021) går det inte att identifiera någon entydig klimatförändringssignal gällande högtrycksblockeringar för Europa eller Nordatlanten. Inte heller går det att med säkerhet säga huruvida de stora väntade förändringarna i snö och is i Arktis kan komma att påverka den storskaliga atmosfäriska cirkulationen över mellanbreddgraderna.

5.2.4 Framtida ändringar i hav och kryosfär

Under resten av detta århundrade kommer haven fortsätta bli varmare, pH-värdet kommer att fortsätta minska och även syrehalten kommer att minska. Marina värmeböljor blir vanligare och kraftigare, till slutet av seklet 20–50 gånger vanligare än de är idag beroende på klimatscenario. Största ökningen i antal marina värmeböljor beräknas ske i Arktis och i de tropiska haven. Hastigheten och storleken på förändringarna beror på i vilken grad växtgasutsläppen begränsas; de blir mindre om utsläppen av växthusgaser minskar i framtiden. Haven reagerar mycket långsammare än atmosfären och kommer fortsätta värmas under lång tid även om utsläppen skulle sluta idag. Extrema El Niño och La Niña beräknas bli vanligare i takt med att haven blir varmare, vilket förstärker redan existerande problem med ändrad nederbörd i olika delar av världen.

Temperatur- och nederbördsförändringar enligt ovan (kap. 5.2.1 och 5.2.2) väntas också få konsekvenser för bland annat:

- AMOC beräknas försvagas ytterligare i framtiden, en kollaps inom detta århundrade bedöms däremot inte som trolig (IPCC, 2019a).
- Ökad avsmältning av permafrost och minskad utbredning av snö och is.
- För Arktis förväntas en första isfri sommar (mitten av september, då isutbredningen naturligt är som minst) inträffa åtminstone en gång före 2050.
- Massförluster i glaciärer, tinande permafrost och minskat snötäckande beräknas fortsätta även i framtiden på grund av fortsatt uppvärmning. Istäckena på Grönland och i Arktis beräknas smälta fortare under andra halvan av seklet.

5.2.5 Framtida ändring av havsnivån

Den fortsatta avsmältningen av glaciärer och inlandsisar kommer, i kombination med fortsatt termisk utvidgning av haven, leda till fortsatt ökade havsnivåer. Tabell 5 visar hur stora höjningar det kan vara frågan om till år 2100 respektive 2150. De högsta värdena i de angivna intervallen representerar den nivå till vilket det bedöms sannolikt (83% sannolikhet) att höjningen begränsas till, till exempel 1,01 m till år 2100 eller 1,88 m till 2150 under det värsta scenariot SSP5-8,5. Notera att bedömningen innebär 17% risk att dessa värden överskrids och IPCC-rapporten pekar på att det inte går att utesluta ökningarna om uppemot 2 m till 2100 eller 5 m till 2150. Sådana stora höjningar handlar framför allt om att varmt havsvatten kan komma åt och smälta bort de delar av inlandsisarna som vilar på havsbotten eller flyter på havets yta. Exakt hur fort det kan ske är oklart.

Utöver en höjning av medelvattenståndet är det framför allt i samband med enstaka högvattenhändelser eller extremnivåer som de största problemen med havsnivån kan uppstå. IPCC (2021) tar upp en rad undersökningar av extrema högvattenhändelser världen över och visar att den nivå på vattenståndet som i genomsnitt beräknas uppnås en gång per århundrade i dagens klimat, kan komma att inträffa årligen år 2100. Detta gäller vid mer än hälften av de 634 mätstationer som undersökts, oavsett utsläppsscenario. På vissa platser riskerar detta ske redan år 2050.

Tabell 5. Framtida ökning av den globala havsnivån enligt IPCC (2021). Intervall anges inom vilket det bedöms vara 66 % sannolikhet att värdet ligger (övre gränsen motsvarar det värde för vilket sannolikheten är 83% att det inte uppnås). Värdena för år 2100 respektive 2150 anges relativt medelvärde för 1995–2014.

Scenario	Ökning av havsnivån (m) (vid år 2100)	Ökning av havsnivån (m) (vid år 2150)
SSP1-1,9	0,28 – 0,55	0,37 – 0,86
SSP1-2,6	0,32 – 0,62	0,46 – 0,99
SSP2-4,5	0,44 – 0,76	0,66 – 1,33
SSP3-7,0	0,55 – 0,90	0,89 – 1,65
SSP5-8,5	0,63 – 1,01	0,98 – 1,88

På grund av termisk tröghet som gör att det tar lång tid för haven att ställa in sig till en ny jämvikt kommer havsnivån fortsätta stiga på mycket lång sikt. Höga nivåer är konsekvent med vad paleodata visar för tidigare varma perioder i jordens historia. Till exempel var havsnivån någonstans mellan 5 och 10 meter högre för ca 125 000 år sedan då den globala medeltemperaturen senast var mellan 0,5 och 1,5 °C varmare än under 1850–1900. Tidsförloppet för att komma till de nivåerna sträcker sig troligen över århundraden till årtusenden. I IPCC-rapporten bedöms en höjning mellan 2 och 3 meter kunna inträffa inom 2 000 år om den globala uppvärmningen begränsas till 1,5 °C. Motsvarande siffror är 2 till 6 meter om uppvärmningen begränsas till 2 °C och 19–22 m om temperaturökningen blir 5 °C.

5.3 Effekter av klimatförändringen

Effekter av den pågående klimatförändringen är tydliga både för samhälle och naturmiljö. Uppvärmningen har medfört såväl ändrade säsonger, ökad frekvens och intensitet i värmeböljor som minskad frekvens av kalla extremer. Ändrade nederbördsmonster och förändringar både av intensiv nederbörd och torka påverkar redan stora delar av världen. Exempel på effekter med stora konsekvenser handlar till exempel om allt fler påverkas av vattenbrist och höga havsnivåer. I detta ligger både själva klimatförändringen men också en växande befolkning i utsatta områden vilket ökar exponeringsgraden.

Specialrapporten om klimatförändringar och marken (IPCC, 2019b) pekar bland annat att på att klimatzoner redan har förflyttats mot polerna på båda halvkloten. Zonerna för polarklimat har krympt, medan till exempel torra områden ökat i utbredning. Samtidigt har klimatförändringen och de ökade halterna av koldioxid lett till mer grönska i vissa områden och mer öken och försämrade markförhållanden i andra. Utanför tropikerna har växtsäsongen på norra halvklotet blivit längre med i medeltal två dagar per decennium sen 1950-talet. Rapporten slår också fast att förutsättningarna för väder som är gynnsamt för uppkomsten av skogsbränder har ökat.

Fortsatt global uppvärmning kommer att förstärka många av effekterna och det finns en tydlig koppling mellan graden av global uppvärmning och hur omfattande effekterna blir. Till exempel visas i IPCC (2018) att en global uppvärmning till 1,5 °C över förindustriell nivå kommer att medföra större problem jämfört med den uppvärmning om 1 °C som redan observeras. Vidare pekas på att skillnaden mellan en 1,5 °C och en 2 °C varmare värld är betydande. Eftersom uppvärmningen inte är jämnt fördelad så kan den lokala klimatförändringen vara betydligt större än det globala medelvärdet. Alla förändringar är inte linjära. Vissa extremer förändras snabbare än medelvärdet. Det finns alltså betydande skillnader mellan 1,5 °C och 2 °C uppvärmning. Risken för allvarliga händelser ökar för varje tiondels grad temperaturökning.

Människan påverkar idag direkt 70 % procent av den globala isfria landytan (IPCC, 2019a). Samspelet mellan marken, växtligheten och klimatet är komplext. Klimatet påverkar växtligheten. Vilken slags växtlighet som finns på en viss plats är starkt beroende av klimatförhållandena. Klimatförändringen och ökad halt av koldioxid har lett till mer grönska i vissa områden och försämrade markförhållanden och öken i andra. På motsvarande sätt påverkar klimatet även andra arters utbredning och det finns starka kopplingar mellan klimatförändringar och ekosystem, artsammansättning och biodiversitet (Pörtner et al., 2021).

Växtligheten och marken påverkar också klimatet. Ungefär 25 % av de antropogena koldioxidutsläppen tas upp av växtligheten, och lagras i biomassa eller i jorden. Växtligheten påverkar alltså tydligt halten av växthusgaser i atmosfären och därför också klimatet. Ökad mängd biomassa sänker halten av växthusgaser i atmosfären, medan till exempel skogsskövling och ökenspridning höjer den. Växtligheten kan också ha en direkt påverkan på det lokala klimatet genom ändringar i jordens albedo samt värme- och vattenflöden. Förändrade markförhållanden kan antingen förstärka eller dämpa uppvärmningen och påverka intensiteten och frekvensen och varaktigheten av extremhändelser. Med hur mycket beror på plats och årstid. Både global uppvärmning och urbanisering höjer temperaturen i städer, särskilt vid varma tillfällen som värmeböljor.

Klimatförändringen orsakar ytterligare stress på mark och växtlighet, och därmed också på mat- och vattenförsörjning. Detta förstärker riskerna för biologisk mångfald, mat- och vattensäkerhet, hälsa och infrastruktur. Riskerna för skogsbränder, tinande permafrost, vattenbrist, jorderosion och kusterosion ökar alla i takt med att det blir varmare. Risker som uppstår på grund av klimatförändringen påverkas bland annat av storleken på uppvärmningen, demografi, konsumtion, produktion, teknisk utveckling och markanvändning. En framtid med högre efterfrågan på mat och vatten samt mer resursintensiv konsumtion och produktion och låg grad av teknologisk utveckling ger högre sårbarhet för vattenbrist och jordförsämring.

Även människans hälsa påverkas av klimatförändringen. Direkta konsekvenser handlar här om att en växande andel av jordens befolkning utsätts för höga temperaturer i samband med värmeböljor (se Fig. 15 för höga maximitemperaturer) vilket kan vara direkt hälsovådligt. Samtidigt minskar sannolikheten för kyla vilket kan ha en positiv effekt på människans hälsa då extrem kyla kan vara hälsovådligt. En nära relaterad effekt handlar om utsläpp av partiklar eller gaser som bidrar till att öka atmosfärens partikelhalt vilka ofta är skadliga med direkt påverkan på lungor och hjärt- och kärlsjukdomar. Utöver luftföroreningar och direkta värmerelaterade problem handlar hälsoproblematik också om tillgång till rent vatten vilket riskerar minska i ett allt varmare klimat med ökad vattenbrist och påverkan på vattenkvalitet. Även en rad vektorburna sjukdomar, som malaria och denguefeber, kan påverkas av klimatförändringen genom att nya områden kan komma att drabbas.

Den kraftiga påverkan på den marina miljön förväntas få stora konsekvenser för livet i haven. Vid hög grad av uppvärmning påverkas det marina livet negativt. De tropiska korallreven pekas ut som en av de mest utsatta ekosystemstyperna på jorden. Även arktiska livsmiljöer drabbas hårt. Utöver den direkta påverkan på dessa ekosystem påverkas också människans möjligheter till fiske med direkt inverkan på vår livsmedelsförsörjning. Här pekas särskilt kustnära samhällen ut som extra sårbara vilket också förstärks av en stigande havsnivå.

6 Sveriges klimat

I det här kapitlet ges först en kort historisk återblick på Sveriges klimat dels i ett lite längre perspektiv, samt dels för de senaste århundradena. Därefter presenteras resultat från klimatmodeller för framtida förändringar i Sveriges klimat, delvis från SMHIs nya webbaserade karttjänst 2021 (kap. 4.3.3.1). Utöver IPCCs utvärderingar baseras kapitlet på olika vetenskapliga studier och rapporter vilket inkluderar regionala utvärderingar för Östersjöområdet (BACC, 2015; Christensen et al., 2022; Rutgersson et al., 2022), Nordsjöområdet (NOSCCA, 2016) och Arktis (AMAP, 2017).

6.1 Sveriges klimat i ett långt tidsperspektiv

När den senaste istiden kulminerade för ca 21 000 år sedan var Skandinavien täckt av ett flera hundra till tusen meter tjockt istäcke (Peltier, 2004). Årsmedeltemperaturen var i stora delar av Europa 3–9 grader lägre än idag. De kalla och korta somrarna och den låga halten av koldioxid i atmosfären gjorde att växtligheten påminde om tundra och fjällskog (Strandberg et al., 2011).

De följande dryga 10 000 åren präglades av en gradvis uppvärmning. Under denna period stiger havsnivån med närmare 130 meter på grund av de smältande isarna (IPCC, 2021). Även om uppvärmningen präglar perioden så är den varken jämn eller obruten. Den mest anmärkningsvärda perioden av avbruten uppvärmning var Yngre Dryas för cirka 13 000 år sedan då kallare förhållanden präglar en period om 500 till 1 000 år (Rasmussen et al., 2006). Under denna tid avstannade avsmältningen av inlandsisen i Skandinavien. Det som troligen hände var att delar av istäcket över Nordamerika blev instabilt och släppte ifrån sig stora mängder is och sötvatten. Detta minskade transporten av varmt vatten från Mexikanska golfen till Nordatlanten; Golfströmmen och dess förlängning, vilket ledde det till en hastig och tillfällig avkylning av klimatet i Nordeuropa (Meissner, 2007).

De senaste 10 000 åren har i ett perspektiv på hundratusentals år präglats av ett stabilt klimat. Denna period kallas Holocen, och är förstås inte heller utan temperaturvariationer. De är emellertid betydligt mer begränsade än mellan istider och värmeperioder. Om skillnaden i global medeltemperatur mellan senaste istiden och Holocen var 4–6 grader så är skillnaden mellan delar av Holocen högst en grad (Masson-Delmotte, 2013). I stora drag präglas Holocen av en värmeperiod för omkring 6 000 år sedan som följs av en avkylning som sträcker sig fram till slutet av 1800-talet (Ljungqvist, 2017). Värmeperioden i mitten av Holocen har troligtvis sin förklaring i ökad solstrålning på sommaren. Uppvärmningen var inte jämnt fördelad, men orsakade i stora delar av världen ett klimat som var varmare än perioden kring år 1900 (Bartlein et al., 2011). I Skandinavien var denna period troligen både varmare och blötare än perioden kring år 1900 (Strandberg et al., 2014). Sverige hade fortfarande inte höjt sig efter att ha varit nedtryckt av inlandsisen. Eftersom haven stigit på grund av de smältande isarna såg den svenska kustlinjen mycket annorlunda ut än idag. Hela Mälardalen låg till exempel under vatten (Peltier, 2004).

Ett avbrott i den allmänna avkylningstrenden sedan mitten av Holocen är den så kallade medeltida värmeperioden som inträffade för ungefär 1 000 år sedan. Även om flera områden kring Nordatlanten upplevde varma förhållanden omkring den här tiden så var det inte samtidigt händelser. Den medeltida värmeperioden inträffar vid olika tider i olika regioner (Neukom et al., 2019). Denna tid är bland annat känd för att skandinaver koloniserade Island och Grönland (Ljungqvist, 2017). I norra Skandinavien inträffade denna period omkring år 1 000. I Skandinavien var denna period ungefär lika varm som det tidiga 1900-talet (Büntgen et al., 2013). Eftersom värmeperioderna inträffade vid delvis olika tidpunkter i olika delar av världen är det inte troligt att det finns en global förklaring. Istället är den troliga förklaringen naturlig intern variabilitet i klimatet. Regionalt kan de naturliga variationerna vara stora och oberoende av en storskalig trend (Xie et al., 2015).

Den avkylning som pågått i mer eller mindre 6 000 år kulminerar i det som kallas lilla istiden, troligen den kallaste perioden under Holocen. I nordvästra Europa inträffar den under 1600-talet (Neukom et al., 2019). Inte heller detta är en global synkroniserad händelse. De kallaste perioderna i olika delar av världen är utspridda mellan 1500-talet och mitten av 1800-talet. Det är inte klarlagt vad som orsakade den lilla istiden. Det troligaste är att det var flera olika samverkande faktorer som kan ha varit olika i olika delar av världen. De viktigaste av dessa är: ändring i astronomiska förhållanden (Imbrie och Imbrie, 1986), minskad solaktivitet, vulkanaktivitet och naturlig intern variabilitet (Broecker, 2000; Guiot et al, 2000; Hunt, 2006; Kaufman et al., 2009; Robock 1979). Den i Sverige kanske mest kända historien från denna tid, som också är ett tecken på hur kallt det var, är när Karl X, med armé, vintern 1658 marscherade på isen över Stora och Lilla Bält (Ljungqvist, 2017).

Parallellt med temperaturvariationerna har också de hydroklimatologiska förhållandena varierat. Chen et al. (2020) visar i en genomgång av rekonstruerad nederbörd, potentiell avdunstning och markfuktighet under de senaste 2 000 åren att dagens klimat är förhållandevis blött i ett långsiktigt perspektiv. De pekar också på att det historiska klimatet visat på stora variationer med torra eller blöta förhållanden mellan olika år och årtionden. Bland annat noterar de att torra förhållanden rådde under perioden mellan 1000–1200. De pekar också på svårigheter med analysen då olika studier baseras på olika tidsperioder, tidsskalor och analysmetoder.

6.2 Sveriges klimat under de senaste 150 åren

Tiden från andra halvan av 1800-talet har framför allt präglats av en kraftig uppvärmning, både i Sverige och globalt. Enligt SMHIs klimatindikator för temperatur ökade Sveriges medeltemperatur med 1,7 °C mellan perioderna 1860–1900 och 1991–2019. Enligt motsvarande klimatindikator för nederbörd har det skett en ökning med närmare 20 % från knappt 600 mm per år under 1860–1900 till knappt 700 mm under 1991–2019.

De senaste 50 åren har klimatförändringen varit extra tydlig i Sverige. Jämfört med perioden 1961–1990 var perioden 1991–2020 ungefär en grad varmare och ungefär 8 % mer nederbördsrik. Skillnaden mellan de två normalperioderna visar att temperaturen ökat under alla årstider, mest under vinter (+1,8 °C) och vår (+1,2 °C), minst under höst och sommar (0,7 °C respektive +0,8 °C). De högre temperaturerna har lett till en längre vegetationsperiod⁴⁵. Ökningen är ungefär två veckor i södra delarna av landet och tio dagar i norr. Största förändringen har inträffat på våren. Under vinterhalvåret har uppvärmningen lett till en kortare säsong med snö på marken med undantag för Norra Norrland. I Svealand och Götaland handlar det om närmare en månad kortare snösäsong. Samtidigt har vinterns största snödjup minskat, framför allt i Götaland men också i Svealand. I Norrland går det inte att se någon långsiktig trend i observationerna.

Uppvärmningen har också lett till en kraftig minskning av havsisens största utbredning i Östersjön som under perioden minskat från i medeltal omkring 200 000 km² till lite drygt 130 000 km². I sammanhanget noteras att många av klimatindikatorerna visar på en pågående trend och att förändringarna i nuläget (2022) är större än vad jämförelsen mellan medelvärdena för 1860–1900 och 1991–2020 indikerar.

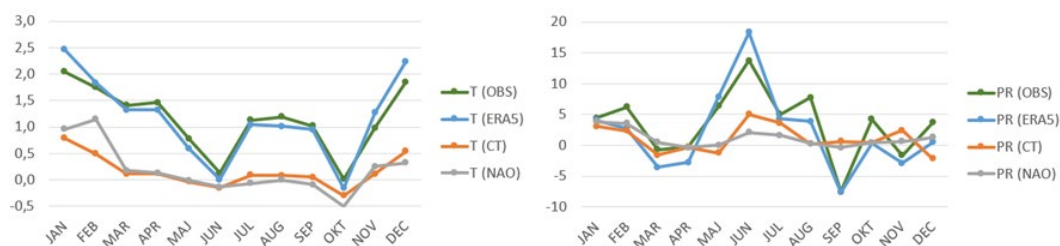
Den långsiktiga uppvärmningen i Sverige och Europa hänger, liksom för alla andra regioner i världen, ihop med den globala uppvärmningen vilken primärt drivs av ökade halter av växthusgaser i atmosfären (IPCC, 2021). För Europa har också renare luft under de senaste decennierna bidragit till ökningen i temperatur. Minskade aerosolkoncentrationer från 1980-talet har lett till ökad instrålning, något som också framträder

⁴⁵ Antal dagar då dygnsmedeltemperaturen överstiger +5 °C vilket betyder ungefär 5–6 månader i medeltal för Götaland och Svealand och 6–7 månader i medeltal för Norrland.

tydligt i SMHIs mätdata (se ”klimatindikator globalstrålning”⁴⁶). På Europeanivå bedöms detta kunna ha bidragit med omkring 25 % av temperaturökningen under de senaste decennierna (IPCC, 2021). För Sverige har ingen detaljerad studie om aerosolers påverkan gjorts. Tidigare under 1900-talet har motsvarande ökning av halterna av aerosolpartiklar bidragit till en minskning av temperaturen eller en lindring av temperaturökningen i Europa och över Nordatlanten (se exv. Hegerl et al., 2018).

I en studie över Sveriges temperatur- och nederbörddklimat visas att för de klimatförändringar som observerats under de senaste 160 åren har ändringar i storskalig cirkulation spelat viss roll (Kjellström et al., 2021a; 2022). I Figur 18 framgår att skillnader i temperatur och nederbörd delvis kan kopplas till ändringar i det så kallade NAO-indexet alternativt till ett antal cirkulationstyper som beskriver hur luften rör sig mot Skandinavien. Resultaten innebär att den större andelen vintrar som dominerats av västvindar med mild Atlantluft under den senare 30-årsperioden bidragit till högre vintertemperaturer och mer nederbörd under vintermånaderna. På motsvarande sätt har ändringar i den storskaliga cirkulationen bidragit till att hålla temperaturökningarna nere i juni och oktober. I rapporten visas också att motsvarande skillnader mellan tidigare 30-årsperioder också delvis kan förklaras av skillnader i storskalig cirkulation. Delar av skillnaderna mellan olika 30-årsperioder kan alltså förklaras av skillnader i storskalig atmosfärisk cirkulation. Studien visar också tydligt att de långsiktiga trenderna i temperatur och nederbörd kan inte förklaras med hjälp av detta. Till exempel konstateras att det under de senaste 30 åren mestadels varit varmare än under de föregående 30 åren givet samma typ av vädersituation under alla årets månader. Skillnaderna är olika under olika delar av året.

Jämförelsen mellan 1961–1990 och 1991–2020 visar också att variabiliteten mellan kalla och varma dagar som regel har minskat under vintern och ökat under sommaren. För nederbörden är ändringarna i variabilitet inte systematiska.

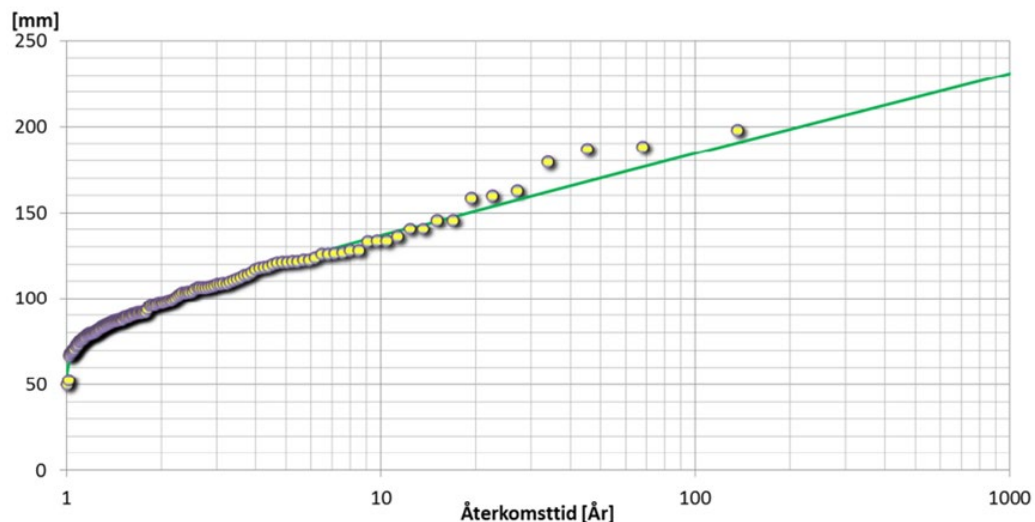


Figur 18. Skillnad i temperatur (vänster) och nederbörd (höger) mellan 1961–1990 och 1991–2020. Data är från SMHIs observationer (OBS) och ECMWFs återanalys ERA5 (ERA5). Motsvarande modellerade värden baserat på relationen mellan NAO-index (NAO) och temperatur/nederbörd i Sverige samt för relationen mellan ett antal cirkulationstyper (CT) och temperatur/nederbörd visas också. För detaljer se Kjellström et al. (2022).

Problem med tillgång till data (se kapitel 4.1.3) och genom att extremhändelser till sin natur inte observeras ofta gör att det är svårt att identifiera eventuella trender i extremhändelser för en plats eller ett litet geografiskt område som Sverige. I en SMHI-rapport från 2019 om extremhändelser visas att extremhändelser med hög lufttemperatur har ökat och att köldperioder har blivit mindre vanliga och mindre intensiva (Belušić et al., 2019). En av de mest utpräglade extremerna i Sverige under senare år var värmeböljan under sommaren 2018. I en studie baserad på observationer och stora ensembler med många klimatsimuleringar visar Wilcke et al. (2020) att sannolikheten för den typen av händelse ökat väsentligt i dagens klimat jämfört med klimatet i slutet av 1800-talet eller mitten av 1900-talet då människans klimatpåverkan var väsentligt mindre.

⁴⁶ <http://www.smhi.se/klimat/klimatet-da-och-nu/klimatindikatorer/stralning-1.17841>

Även om Nordeuropa är en region där extremnederbörd har blivit vanligare (IPCC, 2021) går det inte baserat enbart på SMHIs data att urskilja några trender i extrem korttidsnederbörd, dvs på dygnsbasis eller för högre tidsupplösning. Som Belušić et al. (2019) konstaterar krävs att området utvidgas så att mer data kan tas hänsyn till för att en trend skall bli detekterbar. I Figur 19 visas återkomster för högsta uppmätta dygnsnederbörd i Sverige för hela perioden 1881–2015. Ur figuren framgår att ett 10-årsregn motsvarar 137 mm och ett 100-årsregn 185 mm. I Figur 19 kan noteras att de sju högsta värdena ligger ovanför kurvan med beräknad återkomsttid, vilket kan tyda på en underskattning av intensiteten hos de mest extrema regnen (Olsson och Josefsson, 2015).



Figur 19. Återkomsttid för årets största dygnsnederbörd som uppmätts på någon väderstation i Sverige från 1881 till 2015. Anpassning enligt Gumbel. Från Olsson och Josefsson (2015).

I rapporten om extremer (Belušić et al., 2019) visas också att höga flöden med 100 och 200 års återkomsttid generellt ökar i Sveriges vattendrag med undantag för områden som domineras av snösmältning. Samtidigt är det oklart kring långsiktiga trender för torka. Vidare saknas data för att kunna säga något om trender i lokala extremer i samband med konvektiva moln, till exempel hagel, åska eller tromber.

Starka vindar och stormar är i Sverige oftast förknippat med lågtryck under vinterhalvåret. Det finns en brist på homogena observationer av vind över lång tid i Sverige. Det är därför svårt att dra slutsatser direkt från observationerna (Belušić et al., 2019). En del alternativa tillvägagångssätt har använts för att belysa långsiktiga variationer i vindklimatet. Ett sätt att rekonstruera vindklimatet är genom att utnyttja den geostrofiska vinden som beräknas utifrån observationer av lufttrycket (Wern och Barring, 2009). Observationer av lufttrycket är representativa för större områden och är mer homogena, därför går det att använda dessa för att rekonstruera vindklimatet i hela Sverige. Den geostrofiska vinden kan sägas vara ett slags idealiserad genomsnittlig vindhastighet, och kan på så sätt användas för att observera variationer i vindklimatet.

SMHIs klimatindikator för geostrofisk vind i Sverige visar på variationer av medelvindhastighet, maximal vindhastighet och dagar då den geostrofiska vindhastigheten överstiger 25 m/s. Inget av dessa mått visar någon tydlig trend sedan 1900-talets början för Götaland eller sedan 1940-talet för övriga Sverige där data först då blev tillgängliga. Däremot finns en variabilitet mellan årtionden med något högre vindhastighet och fler blåsiga dagar under vissa årtionden än under andra. Detta bekräftar bilden från en lång rad studier av vindklimatet i Sverige och Nordeuropa under olika perioder, det vill säga att det finns en stor variabilitet men att långsiktiga trender inte går att detektera (till exempel Minola et al. 2021b; Rutgersson et al., 2022).

6.3 Sveriges framtida klimat

I det här delkapitlet presenteras och diskuteras resultat från SMHI:s webbaserade karttjänst för klimatscenarier (kap. 4.3.3.1) som utnyttjar indata från simuleringar med regionala EURO-CORDEX-modeller för de tre scenarierna RCP2,6, RCP4,5 och RCP8,5. Här presenteras enbart 30-årsmedelvärden över respektive ensemble. I karttjänsten finns också mått på spridning som standardavvikelse över medlemmarna samt hur robusta resultaten är i form av hur många ensemblemedlemmar som visar på ökning i respektive variabel. Generellt gäller att resultaten är mycket robusta för förändringar i olika temperaturindikatorer där mer eller mindre alla modeller visar på ökad temperatur redan vid relativt låg grad av klimatpåverkan och för den tidigaste perioden. För indikatorer där resultaten inte är lika robusta diskuteras detta nedan. I kapitlet visas också resultat från den hydrologiska modellen S-HYPE som använts för att göra hydrologiska effektstudier baserat på ett urval av de regionala EURO-CORDEX-modellerna som presenteras i detta kapitel, samt från oceanografiska modeller.

Karttjänsten ersätter tidigare versioner som beskrivs i Kjellström et al. (2014, 2016) för meteorologiska data från regionala klimatmodeller och Sjökvist et al. (2015) för data från hydrologiska effektmodeller. Den nya tjänsten beskrivs i mer detalj i kap. 4.3.3.1. Huvudsakligen handlar skillnaderna jämfört med tidigare versioner om:

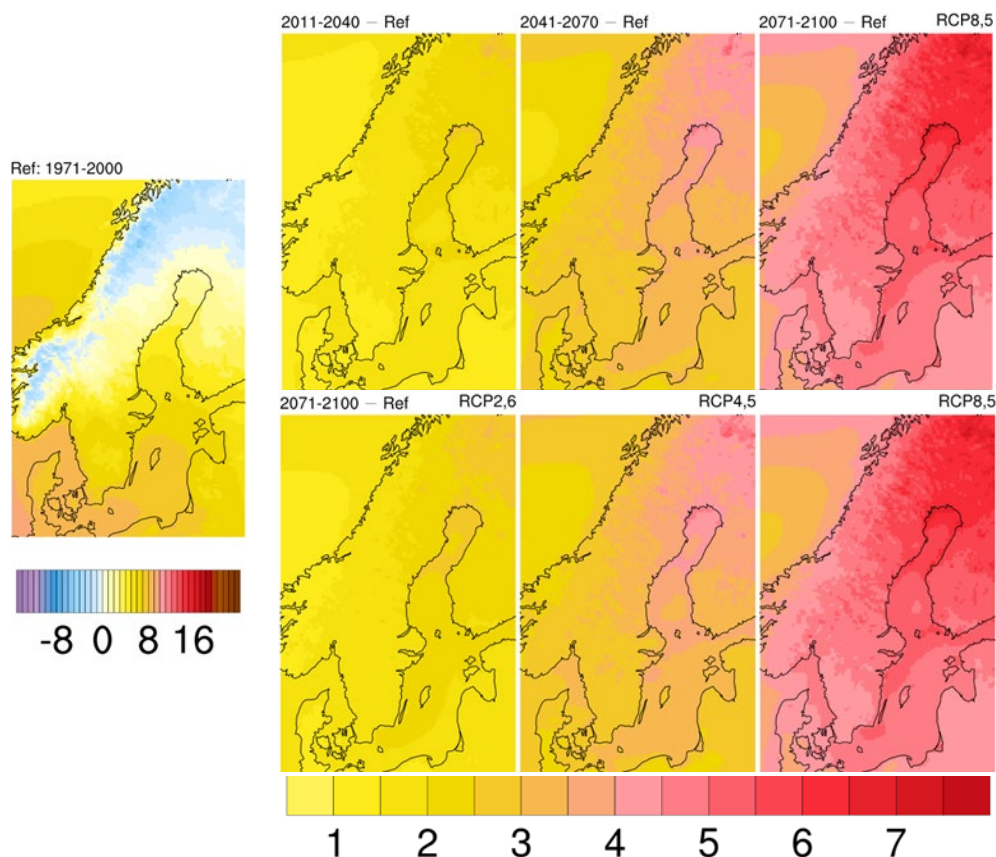
1. Högre upplösning i de regionala klimatmodellerna (gridavstånd 12,5 x 12,5 km istället för 50 x 50 km).
2. Många fler regionala klimatmodeller och klimatsimuleringar: RCP2,6 (27 simuleringar), RCP4,5 (22) och RCP8,5 (62) jämfört med nio simuleringar med en regional modell per scenario i den äldre versionen.
3. Biasjusterade klimatindikatorer för de meteorologiska fälten som nu finns tillgängliga med mycket högre upplösning.
4. Indikatorer för havsmiljön i Östersjön (Bottensyrehalt, koncentration av löst oorganiskt fosfor (DIP) och kväve (DIN) i ytvattnet) för två klimatscenarier (RCP4,5 och RCP8,5) samt för tre olika scenarier avseende utsläpp av näringsämnen.
5. Fysiska havsmiljöindikatorer visas även för Västerhavet.

Skillnaden i hur tjänsten är uppbyggd leder till att resultaten delvis skiljer sig från tidigare. Viktiga skillnader är att den högre upplösningen innebär att höjdskillnader mellan hög- och låglänt terräng är bättre representerade, vilket är viktigt inte minst för representationen av snö. Den högre upplösningen betyder också att land-/havsförhållanden är bättre beskrivna och att till exempel öar är bättre representerade. Utöver detta är flera processer bättre representerade vilket visar sig i en mer realistisk representation av nederbörd (Prein et al., 2016). De många fler simuleringarna betyder att den nya ensemblen på ett bättre sätt fångar in spridningen i resultat från de underliggande globala klimatmodellensemblerna, vilket gör att osäkerheter och grad av robusthet blir bättre representerade (Coppola et al., 2021; Christensen and Kjellström, 2020). Biasjusteringen innebär att det simulerade klimatet i referensperioden ligger närmare det observerade.

Även om klimatförändringen som representeras av skillnader mellan 30-årsperioder är tydlig är det viktigt att komma ihåg att det framtida klimatet, liksom historiskt klimat, i hög grad väntas uppvisa en stor variabilitet mellan åren med omväxlande varma och kalla år respektive nederbördsrika och torra år. Det betyder att samhället fortsatt måste kunna hantera variationer i väder och klimat. Det betyder också att enskilda år, eller perioder av år, kan uppvisa ett klimat som förstärker eller försvagar, den beräknade trenden. Alla år kommer inte att vara varmare och blötare än föregående år även om det är vad de långsiktiga trenderna pekar på.

6.3.1 Temperaturklimat

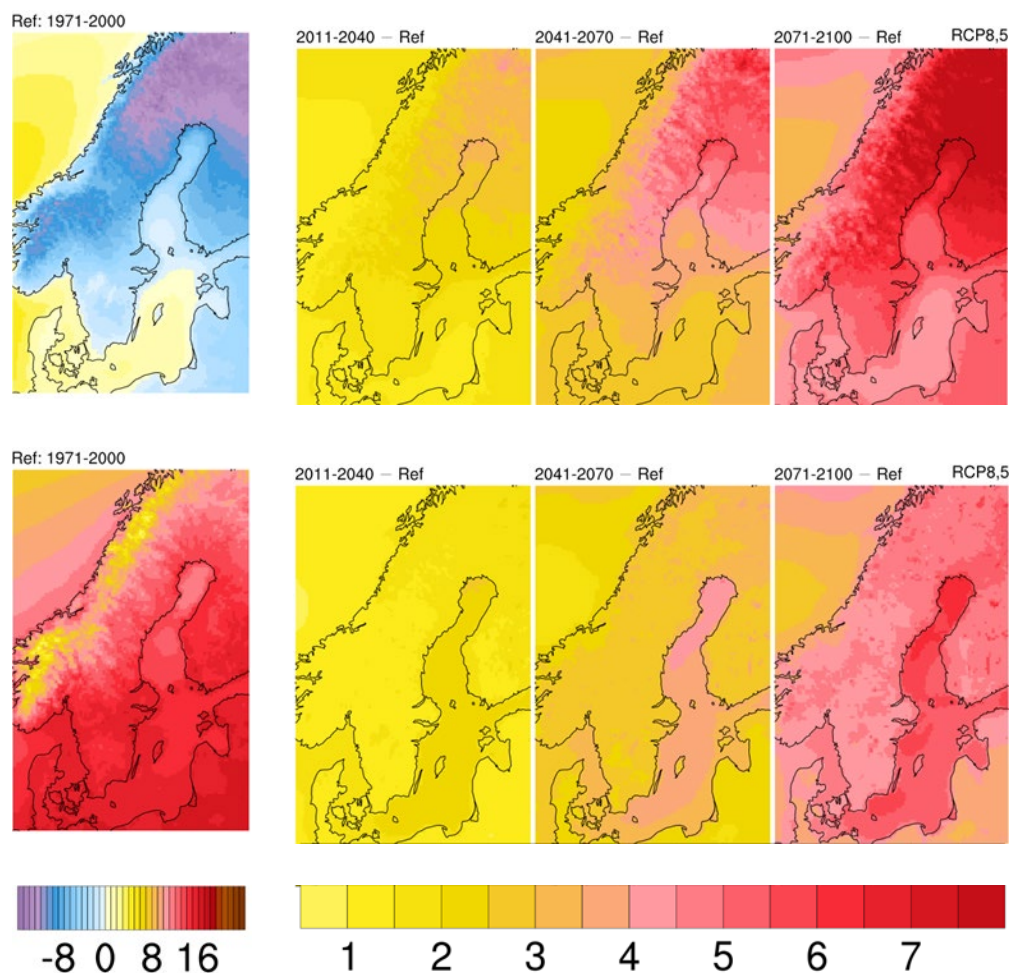
Årsmedeltemperaturen ökar i hela Sverige men mest i de norra delarna. Figur 20 visar tydligt på den gradvisa förändringen där årsmedeltemperaturen ökar över tid för att vid slutet av detta seklet förväntas ha ökat med 5–6 grader i stora delar av norra Sverige (översta raden). Den nedre raden av kartor visar tydligt hur stor skillnaden är mellan de olika scenarierna. Vid till exempel RCP2,6 (längst till vänster) stannar uppvärmningen på nivåer som liknar de som ses redan för 2011–2040 i RCP8,5 (övre raden längst till vänster). För RCP4,5 visar på ungefär samma sätt att uppvärmningen vid slutet av seklet (nedre raden i mitten) påminner om den som syns i RCP8,5 för den tidigare perioden 2041–2070 (övre raden i mitten).



Figur 20. Medelvärde över EURO-CORDEX-modellerna av årsmedeltemperatur för referensperiodens (1971–2000) klimat (vänster) samt i högra delen skillnader mellan referensperioden och de tre framtida scenarioperioderna 2011–2040, 2041–2070 och 2071–2100 för scenariot RCP8,5 (överst). Den nedre högra delen av figuren visar på förändringen i samtliga tre scenarier RCP2,6, RCP4,5 och RCP8,5 vid slutet av seklet (2071–2100) jämfört med under referensperioden. Enhet (°C).

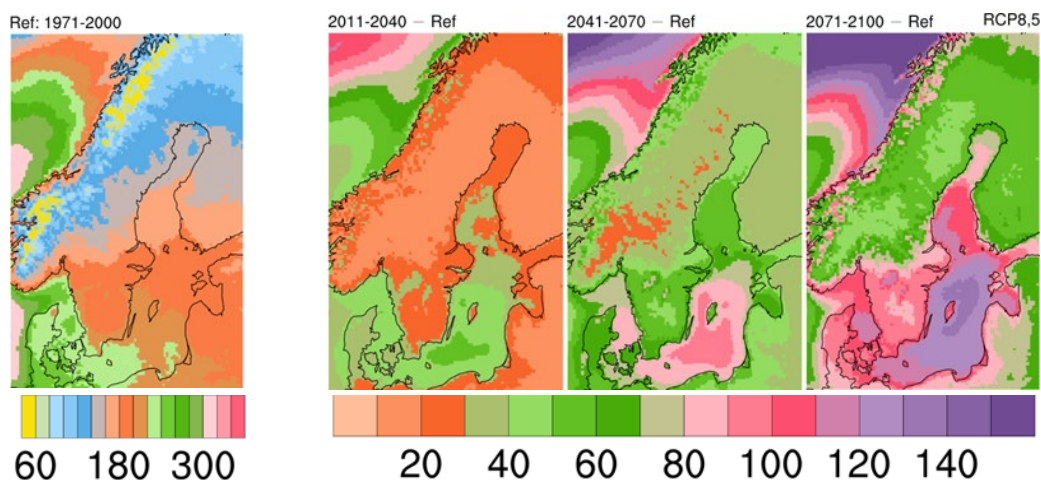
Uppdelat på säsonger framgår tydligt att uppvärmningen är som störst under vintern i landets norra delar samt över Bottenviken (Fig. 21). Ökningen längst i söder och i Östersjöns södra delar, liksom i Nordatlanten utanför Norges kust är väsentligt mindre. Vid jämförelse med referensperiodens klimat står det klart att klimatförändringssignalen i viss mån minskar de nuvarande temperaturskillnaderna inom regionen under vintern. Också för sommaren framträder geografiska skillnader i uppvärmningen som över land återigen är kraftigast längst i norr. Samtidigt visar de här scenarierna på en ännu större uppvärmning över större delen av Östersjön. Återigen är uppvärmningen som minst

utanför Norges kust. På sommaren bidrar alltså klimatförändringen till ökade temperaturkontraster i regionen. Båda dessa förändringar, med minskad geografisk variation under vintern och ökad under sommaren, kan ses som en fortsättning på de förändringar som redan observerats i variabilitet mellan 1961–1990 och 1991–2020 (se kap. 6.2).



Figur 21. Medelvärde över EURO-CORDEX-modellerna säsongsmedeltemperatur för referensperiodens (1971–2000) klimat (vänster) samt i högra delen skillnader mellan referensperioden och de tre framtida scenarioperioderna 2011–2040, 2041–2070 och 2071–2100 för scenariot RCP8,5. Den övre raden visar på förändring under vintern (december till februari) och den nedre raden på förändringar under sommaren (juni till augusti).

Det allt varmare klimatet betyder att vegetationsperiodens längd fortsätter öka (Figur 22). Jämfört med klimatet i slutet av 1900-talet syns ökningarna med 3–4 veckor i stora delar av landet redan vid den första perioden 2011–2040. Längs kusterna i södra delarna av landet kan ökningen bli ännu större. I scenarier med högre grad av klimatpåverkan ökar vegetationsperiodens längd ännu mer och i mitten av seklet under RCP8,5 eller vid slutet av seklet i RCP4,5 (visas inte) är ökningen uppemot 2 månader i stora delar av Götaland och södra Svealand.

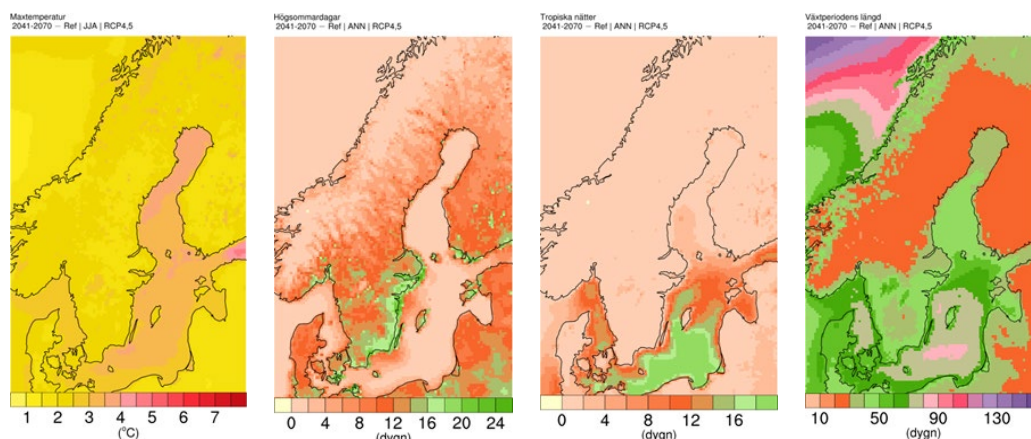


Figur 22. Vegetationsperiodens längd definierad som antal dygn från och med det första dygnet i den första sammanhängande perioden om minst 6 dygn med medeltemperatur $> 5^{\circ}\text{C}$, till det första dygnet efter 1:a juli i en sammanhängande period om minst 6 dygn med medeltemperatur $< 5^{\circ}\text{C}$. Medelvärde över EURO-CORDEX-modellerna för referensperiodens (1971–2000) klimat (vänster) samt i högra delen skillnader mellan referensperioden och de tre framtida scenarioperioderna 2011–2040, 2041–2070 och 2071–2100 för scenariot RCP8,5.

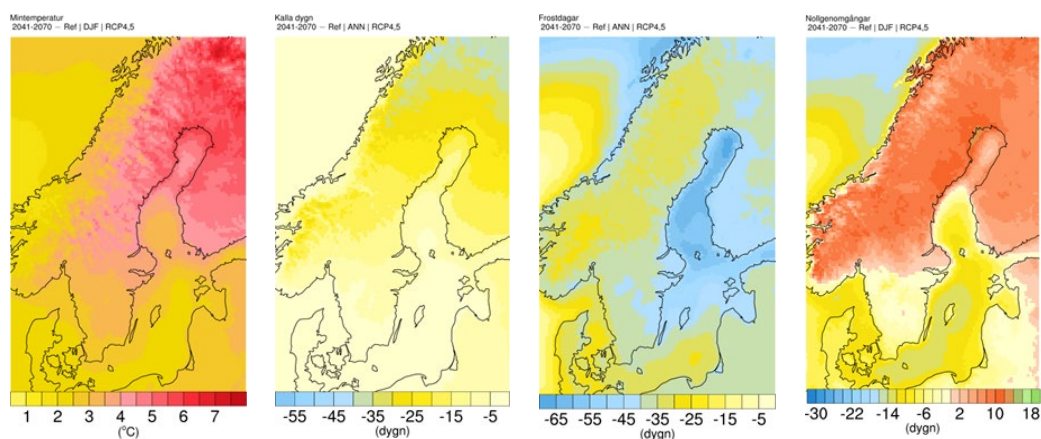
En mer detaljerad bild på olika aspekter av förändringar i sommarens temperaturklimat visas i Figur 23 för förändringar till mitten av seklet (2041–2070) under RCP4,5. Medelvärdet av sommarens dygnsmaximitemperaturer ändras ungefär lika mycket som medeltemperaturen och förändringen över landet är relativt jämn. De största förändringarna i maximitemperatur syns för Östersjön liksom för medeltemperaturökningen (jfr. Fig. 20). Antal högsommardagar, dvs. dagar då maximitemperaturen överskrider 25°C ökar i hela landet utom i fjällkedjan. Ökningarna är större längre söderut och allra störst längs södra delarna av Östersjökusten. Över större delen av Östersjön syns inte någon kraftig ökning vilket pekar på att havsytetemperaturen fortfarande är under 25°C vilket håller nere lufttemperaturen. Detta gäller dock inte för alla områden och längs med kusterna. I söder syns en ökning med en till två veckor eller mer. För fjällkedjans högsta delar samt delar av Östersjön är det inte alla modeller som visar på ökat antal högsommardagar vid lägsta graden av klimatpåverkan (RCP2,6 för perioden 2011–2040). På längre sikt vid hög klimatpåverkan ändras bilden och då är det bara över Nordatlanten som modellerna visar att dagar med temperatur över 25°C inte blir vanligare ens i RCP8,5.

Det är också framför allt över hav som ökningen i minimitemperaturer syns. Detta framgår av ökningen i antal tropiska nätter, dvs. dygn då temperaturen inte underskrider 20°C . Detta är vanligast över vatten då temperatursänkning över land effektivt håller nere minimitemperaturen under natten även i ett varmare klimat. Figuren visar på fler tropiska nätter både över västerhavet och stora delar av Östersjön. Det är bara allra längst i norr som ingen ökning syns vilket indikerar att havsytetemperaturerna fortsatt är under 20°C . Vid RCP4,5 i slutet av seklet syns en tydlig ökning i antalet tropiska nätter i alla modeller också över land i stora delar av Sverige, även längs Norrlandskusten. I RCP8,5 (ej visat) är det i princip enbart för fjällkedjan som modellerna inte visar på någon ökning.

Förändringar i vegetationsperiodens längd följer samma geografiska mönster som för RCP8,5 ovan (Fig. 22) men med något lägre amplitud. I det här exemplet visar kartan på ökning med minst en månad för hela Götaland och stora delar av Svealand samt för delar av fjällkedjan. I övriga Svealand och Norrland handlar det om en ökning med tre till fyra veckor.



Figur 23. Förändring i medelvärde av sommarmånadernas dygnsmaximitemperatur (längst till vänster), antal högsomnardagar då maximitemperaturen är över 25 °C (andra från vänster), antal dagar då temperaturen är över 20 °C under hela dygnet (tredje från vänster) och vegetationsperiodens längd (se definition i Fig. 21, längst till höger). Medelvärde över EURO-CORDEX-modellerna under scenariot RCP4,5 för perioden 2041–2070 jämfört med 1971–2000.



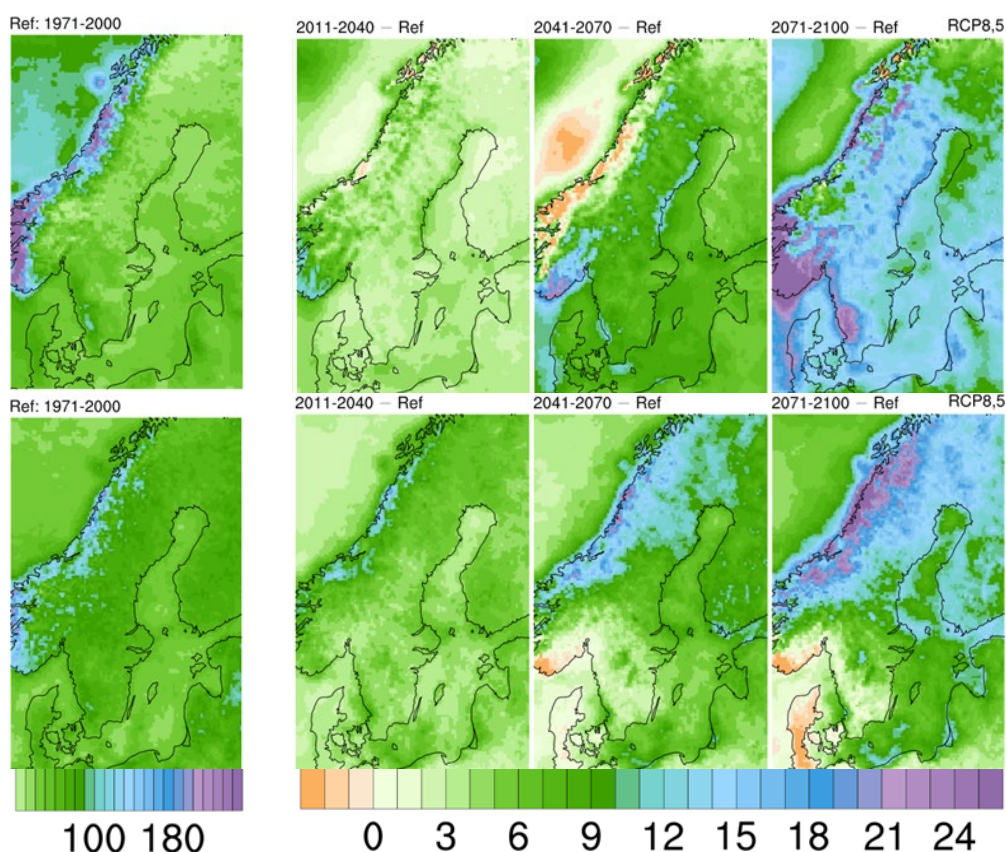
Figur 24. Förändring i vintermånadernas dygnsminimitemperatur (längst till vänster), antal kalla dygn då temperaturen är under -7 °C (andra från vänster), antal frostdagar då minimitemperaturen är under 0 °C (tredje från vänster), och antal dagar med nollgenomgångar då temperaturen är över och under noll 0 °C under samma dygn under vintermånaderna (längst till höger). Medelvärde över EURO-CORDEX-modellerna scenariot RCP4,5 för perioden 2041–2070 jämfört med referensperioden (1971–2000).

På vintern är ökningen av minimitemperaturer störst i norra Sverige (Fig. 24). Här är ökningen av minimitemperaturer större än ökningen av medeltemperatur (inte visat). Detta visar på den typiskt asymmetriska förändringen av temperaturs fördelningsfunktion som syns i områden där snö och is minskar i omfattning (Kjellström, 2004). De stora förändringar i vinterklimatet i norr framgår också av att antalet kalla dagar då temperaturen inte går över -7 °C minskar med omkring en månad eller mer i stora delar av inre och norra Norrland. Den minskningen är ungefär lika stor som minskningen i antalet frostdagar då minimitemperaturen alltså ligger under 0 °C. I södra delarna av landet skiljer de två kartbilderna sig åt då det redan i dagens klimat är ovanligt med kalla dagar under -7 °C. Antalet frostdagar, å andra sidan, är desto vanligare och det är i de södra delarna av landet den största minskningen syns, med 5–6 veckor i det aktuella exemplet. Ännu större ökning syns över Bottenhavet och Bottenviken med uppemot två

månader kortare period med frostdagar. Det allt mildare klimatet i norr innebär också att det där blir vanligare med dagar med nollgenomgångar, dvs. att temperaturen under samma dygn ligger både över och under 0 °C. I söder minskar nollgenomgångarna liksom för hela landet på årsbasis men under vintermånaderna kan detta alltså komma att bli vanligare i norr.

6.3.2 Nederbördsclimat

Förändringarna i nederbörd som visas i Figur 25 pekar på ökad nederbörd med ökad grad av klimatpåverkan. Regionala undantag finns som till exempel längst i söder där är nederbördsökningen under sommaren är mindre. Under senare delar av seklet väntas nederbördsökningen vara närmare noll eller till och med negativ i delar av Danmark och södra Norge. Här noteras också att det för delar av Norge under perioden 2041–2070 handlar om en liten minskning i vinternederbörden i stora delar av landet något som för senare delen av seklet övergår i en nederbördsökning även där. Den här typen av modifiering av nederbördsökningen i anslutning till skandinaviska fjällkedjan har pekats på även i tidigare regionala klimatscenarier och då förknippats med förändringar i atmosfärens storskaliga cirkulation (se till exempel Räisänen et al., 2004). För Sveriges del är nederbördsökningarna under vintern som kraftigast i delar av fjällkedjan, längs norrlandskusten samt längs västkusten. Under sommaren är de simulerade ökningarna som tydligast i de norra delarna av landet, särskilt i fjällkedjan.



Figur 25. Förändring i nederbörd (mm/månad). Medelvärde över EURO-CORDEX-modellerna för referensperiodens (1971–2000) klimat (vänster) samt i högra delen skillnader över tid mellan referensperioden och de tre framtida scenarioperioderna 2011–2040, 2041–2070 och 2071–2100 för scenariot RCP8,5. Den övre raden visar på förändring under vintern (december till februari) och den nedre raden på förändringar under sommaren (juni till augusti).

För nederbörden är klimatförändringssignalen mindre robust än motsvarande för temperaturer, dvs. skillnaden mellan olika ensemblermedlemmar är större. För samtliga säsonger, tidsperioder och scenarier finns ensemblermedlemmar som inte visar på ökad nederbörd för hela Sverige.

Klimatsimuleringar visar att intensiv och extrem nederbörd ökar i ett varmare klimat och det gäller även för Nordeuropa och Sverige. Till exempel visar Nikulin et al. (2011) på att det som var ett 20-årsregn under vintern (december-februari) under perioden 1961–1990 kan komma att inträffa så ofta som en gång vart sjätte till en gång vart tionde år för 2071–2100 under utsläppsscenario SRESA1B⁴⁷. Motsvarande för sommaren är en gång vart annat till en gång vart fjärde år. En studie med regionala klimatmodeller från EURO-CORDEX ger en ökning med 10% på alla undersökta återkomsttider redan inom de kommande årtiondena (Olsson et al., 2017). Ökningen förstärks sedan i slutet av seklet beroende på scenario. Det är troligt att sådana klimatmodeller underskattar förändringar i nederbörd med varaktighet på mindre än 12 timmar i Sverige (Berg et al., 2019). De regionala EURO-CORDEX-modellerna som används i SMHIs webbaserade klimattjänst har för grov upplösning för att korrekt kunna representera kortvariga intensiva skyfall i samband med konvektiva moln. I mer högupplösta, s.k. konvektionstillåtande, modeller går detta att göra. Idag finns inte några klimatscenarier för Skandinavien med konvektionstillåtande modeller vilket gör att det är osäkert vad som kan förväntas kring intensitetsförändringar i samband med framtida extremnederbörd i samband med regn- och åskskurar. Som diskuterats i kap 4.2.1.2 finns studier för andra delar av världen med konvektionstillåtande modeller som i vissa fall pekar på starkare ökning av intensiv nederbörd än vad till exempel de regionala EURO-CORDEX-modellerna indikerar, vilket alltså betyder att återkomsttiden för extrema skyfall kan komma att minska ännu mer än vad som hittills antagits.

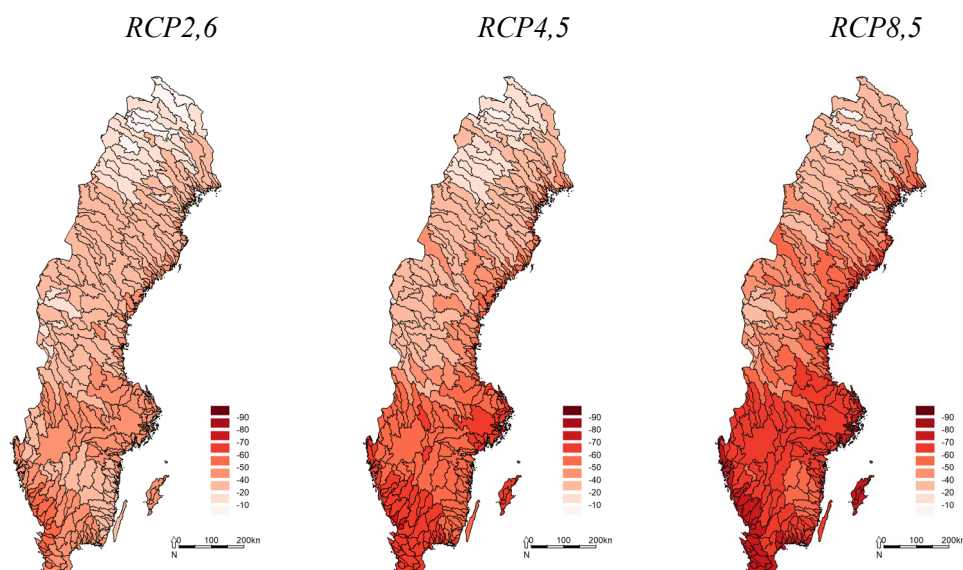
6.3.3 Snö, markfuktighet och vattenflöden

Trots mer nederbörd på vintern beräknas snö bli ovanligare i hela landet. Jämfört med referensperioden 1971–2000 visar EURO-CORDEX-scenarierna som regel ungefär en månad kortare snösäsong för stora delar av Sverige vid en global uppvärmning om +2 °C (Kjellström et al., 2021b). I Figur 26 visas hur maximala vatteninnehållet i markens snötäcke minskar i de tre scenarierna vid 2041–2070 jämfört med referensperioden 1971–2000. Största absoluta minskningarna syns i Götaland, södra Svealand och områden längs med Norrlandskusten. I inre delarna av Svealand och Norrland är minskningen relativt sett mindre då det där fortfarande kommer att vara tillräckligt kallt i alla scenarier för att det åtminstone tidvis kommer att kunna vara snö på marken. I samband med kraftig nederbörd kan det tidvis då förväntas mycket snö. Figur 26 visar förändringarna inom olika hydrologiska avrinningsområden. För en del höglänta områden i fjällen, som är mindre än dessa avrinningsområden, kan minskningen vara relativt liten, eller till och med i vissa punkter indikera mer snö än i referensklimatet. Förändringarna i snö beror på en kombination av mindre andel snöfall och större grad av smältning av den snö som fallit på marken (Räisänen, 2021).

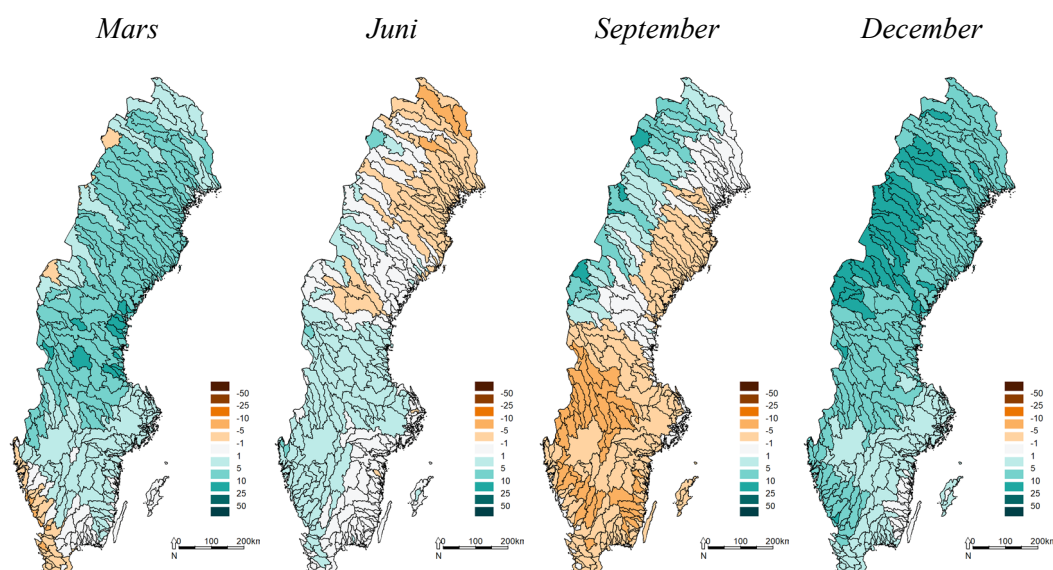
Mer nederbörd i scenarierna leder inte odelat till fuktigare markförhållanden eftersom ökad temperatur också leder till kraftigare avdunstning. I Figur 27 visas hur resultat från SMHIs hydrologiska modell indikerar ändringar i effektiv nederbörd (nederbörd minus avdunstning) vilket också påverkar säsongsdynamiken för en delmängd av de regionala klimatscenarierna. Generellt visar scenarierna på fuktigare markförhållanden under stora delar av vintersäsongen och särskilt i de norra delarna av landet. Under sommarsäsongen råder omvända förhållanden med många områden där det snarare kan väntas bli torrare i markerna. Vad som räknas till vintersäsong respektive sommarsäsong här styrs av vilken del av landet som betraktas. Tendensen mot torrare förhållanden uppträder under vår,

⁴⁷ SRESA1B ligger ungefär mitt emellan RCP4,5 och RCP8,5.

sommar och tidig höst. Motsvarande beräkningar för markfuktighet förstärker den här bilden (inte visat här). Liknande resultat, med lägre framtida grad av markfukt under stor del av året, presenterades för de globala CMIP5-modellerna av Ruosteenoja et al. (2018).



Figur 26. Hydrologiska beräkningar av förändring i snöns maximala vatteninnehåll för 2041–2070 jämfört med referensperioden 1971–2000 i RCP4,5.

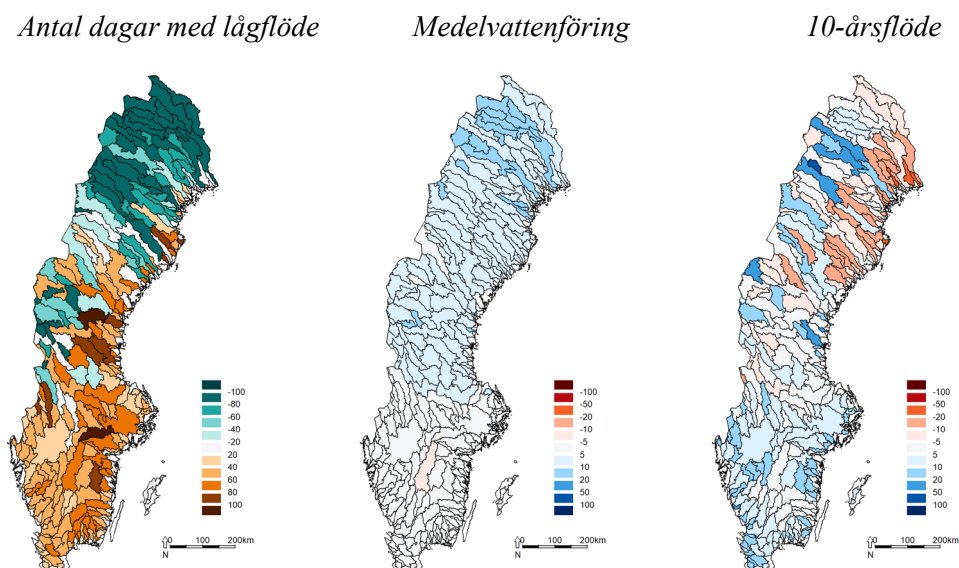


Figur 27. Hydrologiska beräkningar av förändring i markfuktighet illustrerad av effektiv nederbörd (nederbörd minus avdunstning) för 2041–2070 jämfört med referensperioden 1971–2000 i RCP4,5.

Tidigare arbeten kring höga flöden och översvämningar visar att förändringar i översvämningens frekvens framför allt styrs av temperaturen och i mindre grad av nederbörden (Matti et al., 2017; Arheimer och Lindström, 2015). Ett varmare klimat innebär kortare snösäsong samt tidigare och svagare vårflod. En tydlig trend i framtiden är att risken för översvämning i Sverige minskar på våren. Samtidigt ökar risken under höst och vinter i och med att en större andel av nederbörden faller som regn (Vormoor et al., 2015).

Baserat på de regionala klimatscenarierna som presenteras ovan visar hydrologisk modellering av framtidens flöden att responsen på en viss klimatförändring kan vara olika i olika områden. Den huvudsakliga konsekventa förändringen är, precis som i observationer och i tidigare studier (exv. Sjökvist et al., 2015), att vårfloden kommer tidigare och att en större andel av nederbörden faller som regn i stället för snö.

Beräkningar av flöden i våra vattendrag visar att det för norra delen av landet som helhet i genomsnitt väntas högre vattenföring (Fig. 28, mitten). Figuren visar också på skillnader över landet vad gäller risk för översvämningar och torka. Överlag framgår en ökning av 10-årsflödena (högra delfiguren) på de flesta håll. Undantaget är en del avrinningsområden i Norrland där dagens höga flöden domineras av vårens snösmältning vilket är något som kommer att minska i takt med ett varmare klimat och kortare snösäsong med större inslag av smältning under vintern. Även mer extrema översvämningar med återkomsttider på 100 och 200 år väntas på samma sätt öka i Sverige förutom i norra Sverige i de områden som domineras av kraftiga vårfloder (Eklund et al., 2015). Den vänstra delfiguren visar på ett ökande antal dagar med låga flöden i vattendragen i stora delar av framför allt södra Sverige.



Figur 28. Hydrologiska beräkningar av förändring i vattenföring för 2041–2070 jämfört med referensperioden 1971–2000 i RCP4,5.

6.3.4 Vindklimat

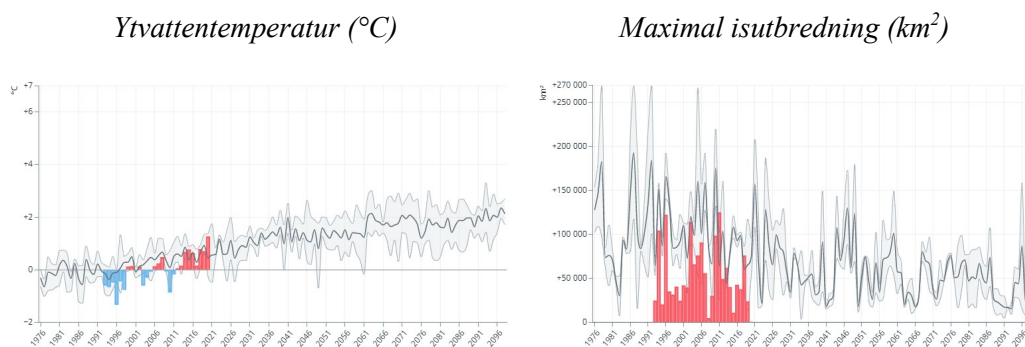
I en studie av vindklimatets förändring i ett stort antal av de regionala EURO-CORDEX-modeller som används i SMHI:s nya karttjänst och diskuteras ovan, kunde inte några systematiska ändringar i vindklimat över Sverige påvisas (Kjellström et al., 2021b). I studien undersöktes bland annat ändringar i medelvindhastighet för 10-metersnivå liksom för ett par trycknivåer i atmosfären (925 och 850 hPa), ändringar i byvindhastighet, antal dagar med byvindhastighet över 21 m/s och antal dagar med lugna förhållanden (vindhastighet under 2 m/s). För samtliga vindindikatorer finns variationer mellan år och decennier i de individuella simuleringarna vilket tyder på en stor intern variabilitet. Över de norra delarna av Östersjön (främst Bottenviken) visar resultaten på en mindre ökning i vindhastighet under vinterhalvåret. Troligen är detta kopplat till minskad utbredning av havsis och därigenom mindre stabila förhållanden under vinterhalvåret. Detta styrks av en motsvarande minskning i vindhastighet i högre liggande skikt (925 och 850 hPa) vilket indikerar att det vertikala utbytet av momentum ökar. På motsvarande sätt syns en ökning i vindhastighet på låg nivå över stora delar av Östersjön

och Västerhavet under sommarhalvåret, möjligen är detta också kopplat till ändringar i vertikal stabilitet då havsyttans temperatur fortsätter öka kraftigt i scenarierna. En osäkerhet i sammanhanget är att havsyttetemperaturerna i Östersjön i alla de använda scenarierna från EURO-CORDEX kommer från globala modeller med grov upplösning. I vilken grad de representerar realistiska förhållanden för Östersjön är inte helt klart men problem med liknande regionala klimatscenarioer har tidigare rapporterats (exv. Kjellström och Ruosteenoja, 2007).

6.3.5 Förändringar i havet

Temperatur- och nederbördsförändringarna som presenteras ovan får också konsekvenser för de omgivande havsområdena. Som beskrivits i kap. 4.3.3.1 presenteras även information om en rad oceanografiska indikatorer i nya klimatscenariotjänsten.

Det allt varmare klimatet avspeglas även i ökande temperaturer i havet. Figur 29 visar som ett exempel de simulerade förändringarna i temperatur och maximal isutbredning i RCP4,5 i Egentliga Östersjön⁴⁸. Ytvatten-temperaturerna ökar under hela året i hela Östersjön, med undantag av områden där det även i framtiden finns utbredd havsis och där överskottsvärme går åt till att smälta is. Havsisen minskar i utbredning och säsongen med havsis blir kortare. Under sommaren ökar frekvens och varaktighet av marina värmeböljor, särskilt i södra delarna av Östersjön utom i områden med uppvällning. Osäkerheter gällande förändringar i vindhastighet, regionala vattenflöden (nederbörd, avdunstning, avrinning) och global havsnivå gör att det inte går att se någon robust signal i förändringar av Östersjöns salthalt.

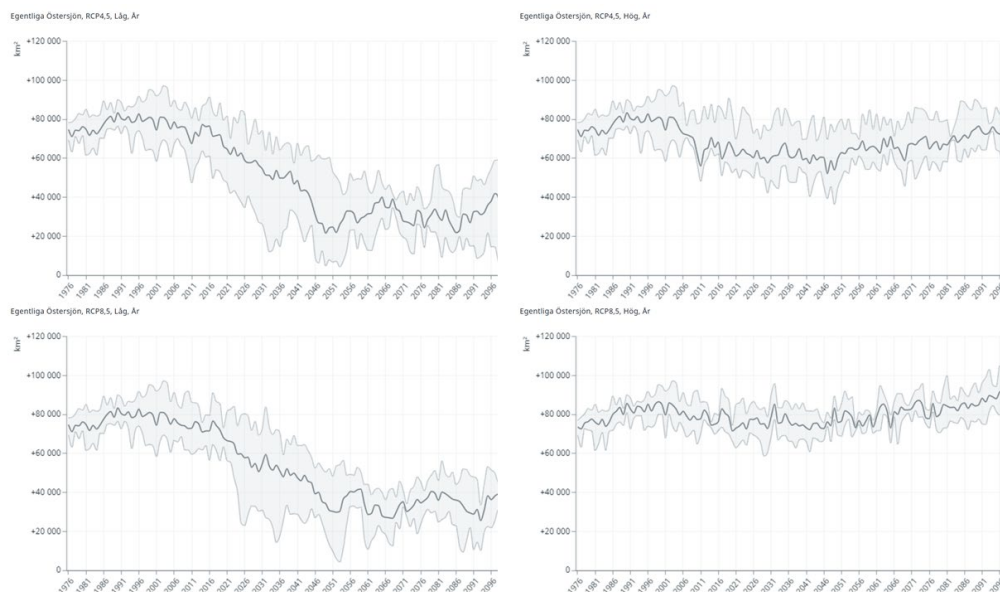


Figur 29. Oceanografiska beräkningar av förändring i ytvattentemperatur och maximal isutbredning i Egentliga Östersjön jämfört med referensperioden 1976–2005 i RCP4,5. De röda och blåa respektive röda staplarna visar historiska variationer under perioden 1993–2020 baserat på återanalysdata. Den grå kurvan visar ett medelvärde för ingående klimatsimuleringar och det grå fältet visar variationsbredden mellan ensemblens maximi- och minimivärde.

Tjänsten ger också möjlighet att presentera förändringar i biogeokemiska förhållanden. Här framgår till exempel att medelkoncentrationen av löst syrgas kan komma att öka i de djupare delarna av Östersjön i ett framtida klimat. Det beror troligen på att åtgärder som vidtagits sedan 1980 talet för att minska näringsämnesutsläppen och på så sätt motverka övergödning får en större effekt än de negativa effekterna från klimatförändringen. Den långa omsättningstiden för fosfor i vatten och sediment gör att dessa åtgärder ännu inte har fått effekt. Figur 30 visar hur stor bottenarea i Egentliga Östersjön där det råder låga syrehalter (< 2 ml / l) över tid. I näringsämnesscenario ”Låg” sker en tydlig minskning av

⁴⁸ Det vill säga området mellan de smalaste och grundaste ställena i Öresund samt lilla och stora Bält och Skärgårdshavet och Ålands hav i norr.

arean under de närmaste decennierna. I motsvarande scenario "Hög" syns inte någon motsvarande minskning. Även om näringssscenarioet är avgörande för halten av syrgas så kan klimatförändringen i kombination med hög näringsbelastning komma att betydligt försämra syrehalterna i bottenvattnet. Detta är tydligast för RCP8,5 i kombination med högt näringsämnestillflöde.



Figur 30. Oceanografiska beräkningar av förändring i hur stor bottenarea i Egentliga Östersjön där det råder låga syrehalter ($< 2 \text{ ml/l}$) över tid. Den övre raden visar förhållanden enligt RCP4,5 och den nedre enligt RCP8,5. Diagrammen till vänster visar på näringsämnesscenario "Låg" och den högra på "Hög". Den grå kurvan visar ett medelvärde för de fyra ingående klimatsimuleringarna i respektive ensemble och det grå fältet visar variationsbredden mellan ensemblens maximi- och minimivärde.

Det finns stora osäkerheter när det rör sig om biogeokemiska variabler som framtida syrehalter och algbloomningar (t.ex. Meier et al 2019). Osäkerheterna beror både på osäkerheter runt hur tillförseln av näringsämnen kommer att se ut och på att kunskapen runt processerna som styr omsättningen av näringsämnen fortfarande är bristfällig. Dessutom behöver modellerna byggas ut för att få med hela kolcykeln och därmed kunna beskriva försurningen som sker när koldioxid tas upp i havet och de kolsänkor som finns i de marina ekosystemen.

6.3.6 Förändringar i havsnivå

Hur mycket havsnivån kommer att ändras i Sverige beror på hur stor den globala uppvärmningen blir men också vilken del av landet som betraktas. En stor del av osäkerheten i framtida globala medelvattenstånd är kopplad till hur stor ökningen i den framtida klimatpåverkan blir. Men det handlar också om fundamentala osäkerheter kring hur inlandsisarna på Antarktis och Grönland kommer att påverkas av uppvärmningen (se kap. 5.2.5). I Sverige höjer sig land fortfarande efter att ha varit nedtryckt av stora ismassor under den senaste istiden. Längs kusterna i norra Östersjön är landhöjningen snabb och kompenserar mer än väl för havsnivåhöjningen. I södra Sverige är landhöjning långsammare och framför allt i södra Skåne där den är närmare noll syns effekterna av stigande havsnivåer redan nu.

För framtida förhållanden fortsätter det vara stora skillnader beroende på vilken del av landet som betraktas till följd av skillnader i landhöjning. I Tabell 6 har värden från tjänsten⁴⁹ för kustkommunerna Malmö (landhöjning 0,092 cm/år), Norrtälje (0,584 cm/år) och Umeå (0,951 cm/år) tagits med. I söder visar tabellen att det i Malmö är en ökning att vänta oavsett scenario och att höjningen jämfört med idag är tydlig redan till 2050. För Norrtälje syns endast mycket liten ändring till 2050. För samtliga scenarier så täcker sannolikhetsintervallet in nollan vilket betyder att det är osäkert huruvida det kommer att ske någon ändring över huvud taget i Norrtälje till dess. För Umeå däremot är det tydligt att landhöjningen dominerar för samtliga scenarier fram till 2050.

*Tabell 6. Beräknad havsnivåhöjning i cm för Umeå (översta raden), Norrtälje (mitten), Malmö (nederst) kommun för tre årtal relativt medelvärde för perioden 1995–2014. För de fem SSP-scenarierna (se kap. 4.2.4) anges medianvärden respektive ett sannolikhetsintervall definierat av 17:e och 83:e percentilen. För de två scenarierna markerade med * har högre värden tagits med i enlighet med de bedömningar om ökning av global havsnivå som IPCC (2021) anger som mindre troliga, vilka inkluderar processer förknippade med fundamentala osäkerheter kring inlandsisarnas instabilitet (kap. 5.2.5). För att tydliggöra skillnad mellan ökning och minskning har alla värden som indikerar höjd lokal havsnivå markerats med fetstil.*

	2050	2100	2150
SSP1-1,9	-18 (-24 – -10) -1 (-7 – 7) 20 (10 – 32)	-42 (-62 – -19) -7 (-26 – 16) 39 (17 – 64)	-69 (-101 – -30) -14 (-46 – 24) 56 (21 – 97)
SSP1-2,6	-17 (-26 – -7) 1 (-8 – 10) 22 (14 – 32)	-40 (-60 – -16) -4 (-22 – 19) 44 (26 – 65)	-69 (-105 – -26) -13 (-46 – 27) 60 (31 – 97)
SSP1-2,6*	-18 (-27 – -7) 0 (-8 – 10) 22 (14 – 32)	-42 (-64 – -16) -5 (-24 – 19) 43 (26 – 65)	-67 (-105 – -26) -11 (-46 – 29) 62 (31 – 102)
SSP2-4,5	-16 (-23 – -7) 3 (-5 – 11) 24 (16 – 34)	-28 (-46 – -4) 10 (-8 – 33) 57 (40 – 80)	-43 (-76 – 1) 15 (-18 – 59) 88 (56 – 132)
SSP3-7,0	-16 (-25 – -6) 2 (-7 – 12) 24 (15 – 34)	-20 (-43 – 8) 18 (-3 – 46) 66 (45 – 93)	-27 (-72 – 29) 33 (-9 – 88) 108 (68 – 160)
SSP5-8,5	-14 (-22 – -5) 4 (-4 – 14) 26 (16 – 37)	-8 (-33 – 22) 30 (7 – 61) 78 (54 – 108)	-8 (-54 – 53) 52 (7 – 114) 126 (81 – 188)
SSP5-8,5*	-15 (-23 – -3) 4 (-5 – 16) 26 (16 – 39)	-1 (-33 – 41) 38 (7 – 81) 86 (54 – 131)	54 (-54 – 355) 115 (7 – 415) 190 (81 – 491)

⁴⁹ <https://www.smhi.se/klimat/stigande-havsnivaer/framtida-medelvattenstand-1.165493>

Längre fram i tiden håller tendenserna i sig. För Malmö ökar graden av havsnivåhöjning och till 2150 visar samtliga scenarier på mer än en halv meter höjning i medianvärde. För Norrtäljes del har det nu blivit mycket tydligt att framtida scenario kommer att avgöra huruvida kommunen får se en höjning eller sänkning av den lokala havsnivån. För Umeås del fortsätter landhöjningen att dominera över havsnivåhöjningen för de flesta scenarierna. Men, för de två scenarierna med mest klimatpåverkan (SSP3-7,0 och SSP5-8,5) pekar den övre percentilen på en havsnivåhöjning till 2150 medan den lägre percentilen fortfarande indikerar att landhöjningen dominerar. För scenariot med extra hög avsmältning av de stora landisarna ökar naturligtvis risken för stor höjning av havsnivån även i Umeå.

En konsekvens av att havsnivån i medeltal stiger är att kustöversvämningar på grund av tillfälliga högvattenhändelser som historiskt sett varit ovanliga kan inträffa oftare. För Sveriges del blir kustöversvämningar därför vanligare i södra Sverige där landhöjningen är långsam. Motsvarande översvämningar i norra Sverige, där landhöjningen är snabbare, kommer istället kunna bli ovanligare (Hieronymus & Kalén 2020). Exakt var gränsen mellan större och mindre problem med kustöversvämningar går beror på scenario, tidsperspektiv och återkomsttid. I grund och botten är det känsligheten för klimatförändringen hos de stora inlandsisarna som styr. Vid mycket kraftig avsmältning som alltså bedöms som *mindre trolig* av IPCC (2021) men ändå inte kan uteslutas, kan hela Sveriges kuststräcka vid scenarier med hög klimatpåverkan komma att se mer problem med höga vattenstånd. Påverkan på samhället beror till stor del på hur exponerat området är.

Däremot kan det antas säkert att Sveriges sårbarhet för havsnivåhöjningar i ett internationellt perspektiv, givet den stora landhöjningen och närheten till Grönland, åtminstone är betydligt mindre än många andra länders sårbarhet. Sveriges sårbarhet är dock väldigt regionalt varierande med större påverkan i den södra halvan av landet än i den norra.

7 Sammanfattning och framåtblick

Kunskapsläget kring den globala klimatförändringen är gediget och det står klart att det pågår en snabb klimatförändring som huvudsakligen beror på människans utsläpp av växthusgaser till atmosfären (kap. 5.1). Hade luften inte samtidigt förorenats med aerosolpartiklar hade uppvärmningen varit ännu större. Den globala uppvärmningen syns tydligt redan idag vilket också innefattar regionala klimatförändringssignaler. Inte minst för svensk del ses en kraftig uppvärmning som från slutet av 1800-talet till idag är nästan dubbelt så stor som den globala medeltemperaturökningen (kap. 6.2).

En avgörande osäkerhet inför framtiden handlar om hur stora utsläppen av växthusgaser, särskilt koldioxid, kommer att bli. IPCCs rapporter sätter inga sannolikheter på olika scenarier utan presenterar en samling som representerar ett mycket stort osäkerhetsspann. I dagsläget, givet dagens utsläppsnivåer och ambitioner om att minska utsläppen i framtiden, finns anledning att i första hand peka mer mot ett antal scenarier ”i mitten” (se kap. 4.2.4). Det betyder alltså att både scenarierna med fortsatt snabb ökning av klimatpåverkan och scenarier med snabbt minskande klimatpåverkan inte kan anses som de mest troliga. De har däremot fortfarande sin plats i arbetet med klimatanpassning, dels för att scenarier med lägre påverkan visar på ett klimat som med mycket stor sannolikhet kommer att ”passeras” under de närmaste decennierna på väg mot högre uppvärmningsnivåer, och dels då scenarier med högre påverkan kan ses som ”värsta tänkbara” scenarier vilka skulle kunna inträffa om klimatsystemets känslighet är större än vad dagens kunskapsläge pekar på. Scenarier med högre påverkan kan förstås också komma att bli mer relevanta om det visar sig att arbetet med att minska utsläppen inte lyckas och om utsläppen istället fortsätter att öka. Det finns stor anledning att fortsätta följa utvecklingen

kring utsläpp och utsläppsscenarier. Eftersom frågeställningarna kring detta inte bara handlar om klimat utan spänner över många olika områden såsom energipolitik, transportfrågor och miljöpolitik bör den typen av uppföljning göras av en expertgrupp med bred kompetens och förankring hos en rad olika expertmyndigheter.

Kännedomen om klimatsystemet och hur det fungerar gör att det i huvuddrag står klart vad som kommer att hända de närmaste decennierna även om alla detaljer inte är säkra (kap. 5.2 och 6.3). Många av de förändringar som observeras redan idag kommer att bli mer utpräglade i takt med att uppvärmningen fortsätter. För svensk del innebär detta fortsatt förskjutning av säsongerna och ändringar av deras egenskaper. Gradvis blir det mindre av snö och is och istället en allt längre vegetationsperiod. För temperaturklimatet pekar scenarierna på ökad variabilitet med större kontraster mellan kalla och varma perioder under sommaren och minskad variabilitet under vintern. Samtidigt ändras också nederbörds-klimatet då både frontnederbörd i samband med lågtryckspassager och konvektiv nederbörd i samband med regnskurar väntas bli mer intensiv. Även om det generellt väntas bli mer nederbörd ökar sannolikheten för torka under sommarhalvåret till följd av ökad avdunstning. För vindklimatet går det inte att identifiera några statistiskt signifikanta förändringar i scenarierna. Däremot finns en stor naturlig variabilitet i vindklimatet varför det inte kan uteslutas att framtida decennier kan ge antingen mer eller mindre vind än idag.

I takt med pågående klimatförändring ökar kunskapen om denna genom omfattande forskning som i hög grad bygger på internationell samverkan genom bland annat IPCC men också mellan klimatforskare som gemensamt utvecklar och använder klimatmodeller och gör analyser över klimatets förändring över tid. För att klimatanpassningsarbetet skall kunna dra nytta av det här arbetet är det viktigt att den typen av ny information kan tillgodogöras i det fortsatta arbetet. I den här rapporten går igenom vilken typ av klimatinformation som finns tillgänglig för kartläggning både av historiskt klimat och av olika möjliga framtida klimatförhållanden. I rapporten tas också upp olika luckor och bristfälligheter kring olika typer av klimatinformation. Här listas en rad utvecklingsmöjligheter som skulle kunna leda till förbättrad klimatinformation och bättre öka möjligheten att använda informationen i det svenska klimatanpassningsarbetet.

För det historiska klimatet finns möjligheter till förbättring genom att:

- I detalj sammanställa vilken information som finns tillgänglig för att rekonstruera och studera historiska klimatförhållanden i Sverige (kap. 4.1.1).
- Gå igenom och sammanställa vilka historiska klimatdata som finns i arkiven men inte är direkt tillgängliga för studier samt vad som skulle krävas för att tillgängliggöra dessa (kap. 4.1.2).
- Fortsätta arbetet med kvalitetskontroll och homogenisering av olika dataset för en rad variabler (kap. 4.1.2).
- Bibehålla och förlänga långa serier med nya data som är viktiga för att följa upp långsiktiga klimatförändringssignaler (kap. 4.1.2 och 4.1.3).
- I högre grad använda kvalitetskontrollerade och homogeniserade dataserier som indata i nästa generations historiska återanalyser (kap. 4.1.2).
- Utvidga tidsserier för återanalyser både bakåt och framåt i tiden (kap. 4.1.3).
- Förbättra referensdatasetet GridClim genom att förbättra metoder och genom att utvidga till fler variabler som till exempel vindhastighet eller strålningsförhållanden och genom att utvidga tidsserien både bakåt och framåt i tiden (kap. 4.1.3).
- Komplettera klimatindikatorerna med bästa tillgängliga information från återanalysdata eller från referensdatasetet GridClim för de senaste decennierna för att bättre kunna följa upp klimatförändringen på olika geografiska platser (kap. 4.1.4).
- Om möjligt utvidga klimatindikatorernas tidsserier bakåt i tiden (se kap. 4.1.4).

- Lägga till möjligheten att kunna välja referensperiod i olika webbtjänster för klimatet (kap. 4.1.5 och 4.3.3).
- Utvidga analyser som i mer detalj kartlägger klimatet under olika normalperioder. Sträva efter en operationalisering av detta så att analyser fortlöpande publiceras, till exempel på årlig basis (kap. 4.1.5).

Även klimatmodeller behöver fortsätta utvecklas och användas på ett optimalt sätt.

Möjliga förbättringsåtgärder involverar:

- Fortsatt vidareutveckling av befintliga beskrivningar av fysikaliska processer. Utveckling och implementering av andra viktiga processer i klimatsystemet som hittills inte varit representerade. Detta gäller specifikt både för globala och regionala klimatmodeller var för sig men det kan också underlätta jämförelser om de båda modelltyperna beskriver samma typer av processer (kap. 4.2.1).
- Fortsatt arbete med förbättringar både vad gäller prestanda och vidareutveckling av modellerna med avseende på hur bra de representerar de processer de simulerar (kap. 4.2.1).
- Undersök balansen mellan avdunstning och nederbörd i hydrologiska processer genom hydrologiska effektmodeller – fristående eller dynamiskt kopplade till klimatmodeller (kap. 4.2.1)
- Undersök möjligheter till fortsatt förbättring av biasjustering vilket innefattar både observationer och metoder (kap. 4.2.2).
- Arbete med bättre ”översättningar” mellan olika generationer av scenarier så att det är enklare att jämföra till exempel CMIP5- och CMIP6-baserade resultat (kap. 4.2.4).
- Att använda förbättrade regionala modeller som bättre beskriver relevanta processer för att ta fram nya CMIP6-baserade scenarier för Europa (kap. 4.2.4).
- Att använda nya konvektionstillåtande modeller för att ta fram nya klimatscenarier för Skandinavien med utgångspunkt från CMIP6-baserade scenarier (kap. 4.2.4).
- Att följa upp pågående internationellt klimatarbete så att framtida klimatscenarier bättre tar hänsyn till internationella klimatförhandlingar och nationella åtaganden om utsläppsbegränsningar (kap. 4.2.4).

Förbättrad information om framtida klimat skulle kunna fås genom att:

- Upprätta en sökbar databas över historiska extrema väderhändelser med koppling mot effekter på samhälle och naturmiljö (kap. 4.3.1).
- Använda klimatmodeller för att tolka enstaka historiska väderhändelser i ett varmare klimat genom att situationen körs i samma klimat- eller väderprognosmodell med ändrade förutsättningar, t ex högre temperaturer i atmosfär och hav för att motsvara en två grader varmare värld (kap. 4.3.1).
- Utnyttja data från stora ensembler med många körningar med samma klimatmodell och samma grad av klimatpåverkan för att på ett mer robust sätt utvärdera sannolikheter för olika extremhändelser och räkna på sannolikheter för olika utfall (kap. 4.3.1 och 4.3.3).
- Uppdatera klimatinformationen för framtida klimat med mer eller mindre jämna mellanrum baserat på när det internationella klimatmodellerarsamfundet genom CMIP och CORDEX producerat nya scenarier (kap. 4.3.3).
- Jämföra sådan ny klimatinformation mot den som tidigare använts med motivet att kunna följa upp och utvärdera resultatet av tidigare analyser och åtgärder (kap. 4.3.3).
- Sätta olika typer av klimatscenarier i relation till varandra. Detta kan innebära att data från ett mindre antal regionala modeller jämförs med de större ensemblerna av globalmodeller, eller att enstaka körningar med

konvektionstillåtande modeller jämförs mot andra regionala modeller (kap. 4.3.3).

- Sätta scenarier med regionala klimatmodeller som inte inkluderar en interaktiv havsmodell, modell för dynamisk vegetation, eller bara inkluderar en rudimentär beskrivning av atmosfäriska aerosolpartiklar och deras klimatpåverkan i relation till mer komplexa globala klimatmodeller (kap. 4.3.3).
- Ta fram klimatscenarier med hjälp av mer avancerade och högupplösta regionala modeller (kap. 4.3.3).

För att utveckla SMHIs nya klimatscenariotjänst finns en rad möjligheter. Bland annat kan fortsatt arbete och möjlig vidareutveckling av tjänsten involvera:

- En utökning av antalet indikatorer som går att visa (kap. 4.1.4 och 4.3.3.1)
- Införa större flexibilitet kring val av referens- och framtida normalperioder (kap. 4.1.5) vilket även kan inkludera olika uppvärmningsnivåer (kap. 4.2.5).
- Att sätta resultaten från visade klimatscenarier i ett större sammanhang (kap. 4.3.3)
- Underlätta jämförelse mellan de olika deltjänsterna (meteorologiska, hydrologiska och oceanografiska data) givet ett enhetligt underlag (kap. 4.3.3).
- Arbeta för att klimatinformationen i olika länder relateras mot en och samma bas, till exempel med referens till IPCCs interaktiva atlas för att bättre kunna jämföra klimatanpassningsåtgärder i olika länder (kap 4.3.3).
- Arbeta för att klimatinformation produceras gemensamt för olika länder för vidare användning i nationella sammanhang, till exempel för att tillhandahålla nationella scenarier (kap 4.4.4).

8 Tackord

Denna rapport är framtagen under en längre period där ny information succesivt tillkommit och diskuterats efterhand. Vi vill tacka en lång rad kollegor vid SMHI som bidragit både direkt och indirekt till rapporten genom sitt arbete med den klimatinformation rapporten handlar om. Vi vill också särskilt tacka den externa referensgrupp som varit till stor hjälp i arbetet. I gruppen har ingått: Deliang Chen Göteborgs universitet, Anna Rutgersson Uppsala universitet, Michael Tjernström Stockholms universitet, Pelle Boberg Naturvårdsverket, Per Bodin Jordbruksverket, Hillevi Eriksson Skogsstyrelsen, Anneli Harlén Havs- och vattenmyndigheten, Sara Nordmark MSB, Alexander Öjelid Energimyndigheten.

9 Referenser

Aalbers EE, Lenderink G, van Meijgaard E et al. 2018 Local-scale changes in mean and heavy precipitation in Western Europe, climate change or internal variability? *Clim. Dyn.* 50 4745–66.

Alexandersson H, Moberg, A 1997 Homogenization of Swedish Temperature data. PART I: Homogeneity Test for Linear Trends. *International Journal of Climatology*, 17: 25–34. doi: 10.1002/(SICI)1097-0088(199701)17:1<25::AID-JOC103>3.0.CO;2-J

AMAP, 2017. Snow, Water, Ice and Permafrost in the Arctic (SWIPA) 2017. Arctic Monitoring and Assessment Programme (AMAP), Oslo, Norway. 269 pp.

Arheimer B, Lindström G 2015 Climate impact on floods. Changes in high flows in Sweden in the past and the future (1911–2100). *Hydrology and Earth System Sciences*, 19(2), 771–784. <https://doi.org/10.5194/hess-19-771-2015>

- BACC 2015 Second Assessment of Climate Change for the Baltic Sea Basin. Eds. The BACC II Author Team. Springer International Publishing, 501 pp. Doi. 10.1007/978-3-319-16006-1
- Bartlein PJ, Harrison SP, Brewer S et al. 2011 Pollen-based continental climate reconstructions at 6 and 21 ka: a global synthesis. *Clim Dyn* 37, 775–802. <https://doi.org/10.1007/s00382-010-0904-1>
- Belušić D, Berg P, Bozhinova D et al. 2019 Climate extremes for Sweden. State of knowledge and implications for adaptation and mitigation. SMHI, SE-60176 Norrköping, 75 pp.
- Belušić D, de Vries H, Dobler A et al. 2020 HCLIM38: A flexible regional climate model applicable for different climate zones from coarse to convection-permitting scales. *Geosci. Model Dev.*, 13, 1311–1333, DOI: 10.5194/gmd-13-1311-2020.
- Berg P, Norin L, Olsson J 2016 Creation of a high resolution precipitation data set by merging gridded gauge data and radar observations for Sweden. *Journal of Hydrology*, 541(A), 6–13.
- Berg P, Christensen OB, Klehmet K et al. 2019 Summertime precipitation extremes in a EURO-CORDEX 0.11 degrees ensemble at an hourly resolution. *Natural hazards and earth system sciences*, 19(4), 957-971.
- Berg P, Bosshard T, Yang W et al. 2021 MIDAS version 0.1 framtagande och utvärdering av ett nytt verktyg för biasjustering. SMHI rapport Klimatologi 63, SMHI, SE-60176 Norrköping, Sverige, 23 pp.
- Bock L, Lauer A, Schlund M et al. 2020 Quantifying progress across different CMIP phases with the ESMValTool. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 125, e2019JD032321. <https://doi.org/10.1029/2019JD032321>
- Boé J, Somot S, Corre L et al. 2020 Large discrepancies in summer climate change over Europe as projected by global and regional climate models: causes and consequences. *Clim Dyn* 54, 2981–3002. <https://doi.org/10.1007/s00382-020-05153-1>.
- Boeke RC, Taylor PC, Sejas SA 2021 On the nature of the Arctic's positive lapse-rate feedback. *Geophysical Research Letters*, 48, e2020GL091109. <https://doi.org/10.1029/2020GL091109>
- Broecker W 2000 Was a change in thermohaline circulation responsible for the Little Ice Age? *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 97 (4): 1339–42.
- Büntgen U, Kyncl T, Ginzler C et al. 2013 Filling the Eastern European gap in millennium-long temperature reconstructions, *PNAS*, January 29, 2013 110 (5) 1773-1778.
- Bärring L, Strandberg G 2018 Does the projected pathway to global warming targets matter? *Environmental Research Letters*, 13 (2), 024029, DOI: 10.1088/1748-9326/aa9f72
- Camuffo D, Jones P 2002 Improved understanding of past climatic variability from early daily European instrumental sources. *Clim Change* 53(1–3):1–4 CH2018 (2018), CH2018 – Climate Scenarios for Switzerland, Technical Report, National Centre for Climate Services, Zurich, 271 pp. ISBN: 978-3-9525031-4-0
- Chen D, Chen HW 2013 Using the Köppen classification to quantify climate variation and change: an example for 1901-2010. *Environmental Development*, 6, 69-79.
- Chen D, Achberger C, Ou T et al. 2014 Projecting future local precipitation and its extremes for Sweden. *Geografiska Annaler*, DOI:10.1111/geoa.12084.

- Chen D et al. 2016 Nederbörd och översvämningar i framtidens Sverige. Myndigheten för samhällsskydd och beredskap, Karlstad, (www.msb.se), Publikationsnummer MSB 973-februari 2016, ISBN 978-91-7383-641-8, pp 79.
- Chen D, Zhang P, Seftigen K et al. 2020 Hydroclimate changes over Sweden in the 20th and 21st centuries: a millennium perspective. *Geografiska Annaler: Series A, Physical Geography*. DOI: 10.1080/04353676.2020.1841410.
- Chen D, Rojas M, Samset BH et al. 2021a Framing, Context, and Methods. In: "Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change", Eds. Masson-Delmotte V, Zhai P, Pirani A et al., Cambridge University Press. In Press.
- Chen D, Björk S, Kjellström E et al. 2021b Om klimatet. *Vetenskapen säger*, 2, Kungliga Vetenskapsakademien.
- Christensen JH, Kjellström E, Giorgi F et al. 2010 Weight assignment in regional climate models. *Clim. Res.*, 44(2-3), 179-194.
- Christensen OB, Kjellström E 2020 Partitioning uncertainty components of mean climate and climate change in a large ensemble of European regional climate model projections. *Clim Dyn* 54, 4293–4308 (2020). <https://doi.org/10.1007/s00382-020-05229-y>
- Christensen OB, Kjellström E, Dieterich C et al. 2022 Atmospheric regional climate projections for the Baltic Sea Region until 2100, *Earth Syst. Dynam. Discuss.* [preprint], <https://doi.org/10.5194/esd-2021-51>, accepted for publication.
- Compo GP, Whitaker JS, Sardeshmukh PD et al. 2011 The Twentieth Century Reanalysis Project. *Quarterly J. Roy. Meteorol. Soc.*, 137, 1-28. <http://dx.doi.org/10.1002/qj.776>
- Coppola E, Nogherotto R, Ciarlo JM et al. 2021 Assessment of the European climate projections as simulated by the large EURO-CORDEX regional climate model ensemble. *J. Geophys. Res.: Atmospheres*, 126, e2019JD032356, DOI: 10.1029/2019JD032356
- Cornes R, van der Schrier G, van den Besselaar EJM et al. 2018 An Ensemble Version of the E-OBS Temperature and Precipitation Datasets, *J. Geophys. Res. Atmos.*, 123. doi:10.1029/2017JD028200
- Coscarelli R, Caroletti GN, Joelsson M et al. 2021 Validation metrics of homogenization techniques on artificially inhomogenized monthly temperature networks in Sweden and Slovenia (1950–2005). *Sci Rep* 11, 18288. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-97685-7>
- Déqué M, Rowell DP, Lüthi D et al. 2007 An intercomparison of regional climate simulations for Europe: assessing uncertainties in model projections. *Climatic Change.*, 81 (Suppl. 1), 53-70. doi:10007/s10584-006-9228-x.
- Döscher R, Willén U, Jones C et al. 2002 The development of the regional coupled ocean–atmosphere model RCAO. *Boreal Environment Research*, 7, 183–192.
- Döscher R, Acosta M, Alessandri A et al. 2022 The EC-Earth3 Earth System Model for the Climate Model Intercomparison Project 6, *Geosci. Model Dev. Discuss.* [preprint], <https://doi.org/10.5194/gmd-2020-446>, in review.
- Eklund A, Axén Mårtensson J, Bergström S et al. 2015 Sveriges framtida klimat – underlag till dricksvattenutredningen. SMHI Klimatologi 14. SMHI, Norrköping, 81 pp, ISSN: 1654–2258
- Eyring V, Bony S, Meehl GA et al. 2016 Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization *Geosci. Model Dev.* 9 1937–58.

- Gómez-Navarro JJ, Bothe O, Wagner S et al. 2015 A regional climate palaeosimulation for Europe in the period 1500–1990–Part 2: Shortcomings and strengths of models and reconstructions. *Climate of the Past*, 11(8), 1077-1095.
- Giorgi F 1990 Simulation of regional climate using a limited area model nested in a general circulation model. *Journal of Climate*, 3, 941–963.
- Gröger M, Dieterich C, Meier HEM et al. 2015 Thermal air-sea coupling in hindcast simulations for the North Sea and Baltic Sea on the NW European shelf, *Tellus A*, 67, 586-599.
- Gröger M, Arneborg L, Dieterich C, et al. 2019 Summer hydrographic changes in the Baltic Sea, Kattegat and Skagerrak projected in an ensemble of climate scenarios downscaled with a coupled regional ocean-sea ice-atmosphere model. *Climate Dynamics* 53(3) DOI: 10.1007/s00382-019-04908-9.
- Guiot J, Christophe C and ESCARSEL members 2010 Growing season temperatures in Europe and climate forcings over the past 1400 yr, *PLoS ONE*, 5, e9972.
- Gustafsson N, Huang X-Y, Yang X et al. 2012 Four-dimensional variational data assimilation for a limited area model. *Tellus A* 2012, 64, 14985, DOI:10.3402/tellusa.v64i0.14985.
- Gutiérrez JM, Jones RG, Narisma GT et al. 2021 Atlas. In *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Eds. Masson-Delmotte V, Zhai P, Pirani A, et al]. Cambridge University Press. In Press. Interactive Atlas available from Available from <http://interactive-atlas.ipcc.ch/>
- Hamberg H 1917 Frequence de la grole en Suede 1865–1917: Haglets frekvens i Sverige 1865–1917., *Almqvist & Wiksells boktryckeri-a.-b.*
- Hanssen-Bauer I, Achberger C, Benestad RE et al. 2005 Statistical downscaling of climate scenarios over Scandinavia. *Clim. Res.* 29(3), 255-268. DOI:10.3354/cr029255
- Hasselmann K 1993 Optimal fingerprints for the detection of timedependent climate change, *J. Climate*, 6, 1957–1971.
- Hawkins E, Sutton R 2009 The potential to narrow uncertainty in regional climate predictions. *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 90, 1095–1107
- Hazeleger W, van den Hurk B, Min E et al. 2015 Tales of future weather. *Nature Clim Change* 5, 107–113. <https://doi.org/10.1038/nclimate2450>
- Hegerl GC, Brönnimann S, Schurer A et al. 2018 The early 20th century warming: Anomalies, causes, and consequences. *WIREs Clim Change*. 9:e522. <https://doi.org/10.1002/wcc.522>
- Hersbach H, Bell B, Berrisford P et al. 2020 The ERA5 global reanalysis. *Q J R Meteorol Soc.* 146: 1999–2049. <https://doi.org/10.1002/qj.3803>
- Hieronymus M, Kalén O 2020 Sea-level rise projections for Sweden based on the new IPCC special report: The ocean and cryosphere in a changing climate. *Ambio* 49, 1587–1600. <https://doi.org/10.1007/s13280-019-01313-8>
- Huhtamaa H, Ljungqvist FC 2021 Climate in Nordic historical research – a research review and future perspectives, *Scandinavian Journal of History*, DOI: 10.1080/03468755.2021.1929455
- Hunt BG 2006 The Medieval Warm Period, the Little Ice Age and simulated climatic variability. *Climate Dynamics*. 27 (7–8): 677–94.
- Höglund A, Pemberton P, Hordoir R et al. 2017 Ice conditions for maritime traffic in the Baltic Sea in future climate. *Boreal Environ. Res.* 22, 245-265.

- Imbrie J, Imbrie KP 1986 *Ice Ages: Solving the Mystery*. Harvard University Press. p. 158. ISBN 978-0-674-44075-3.
- IPCC 2007 Summary for Policymakers. In: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Solomon S, Qin D, Manning M et al. (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- IPCC 2013 In: Stocker TF, Qin D, Plattner G-K et al. (Eds.), *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, p. 1535.
- IPCC 2018 *Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty* [Masson-Delmotte V, Zhai P, Pörtner H-O et al. (eds.)]. In Press.
- IPCC 2019a Summary for Policymakers. In: *IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate* [Pörtner H-O, Roberts DC, Masson-Delmotte V et al. (eds.)]. In press.
- IPCC 2019b Summary for Policymakers. In: *Climate Change and Land: an IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems* [Shukla PR, Skea J, Calvo Buendia E et al. (eds.)]. In press.
- IPCC 2021 Summary for Policymakers. In: *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Masson-Delmotte V, Zhai P, Pirani A et al. (eds.)]. Cambridge University Press. In Press.
- Iturbide M, Fernández J, Gutiérrez JM et al. 2021 Repository supporting the implementation of FAIR principles in the IPCC-WG1 Atlas. Zenodo, DOI: 10.5281/zenodo.3691645. Available from: <https://github.com/IPCC-WG1/Atlas>
- Jacob D, Petersen J, Eggert B et al. 2014 EURO-CORDEX: new high-resolution climate change projections for European impact research. *Reg. Environ. Change* 14 (2), 563–578.
- Joelsson LMT, Sturm C, Södling J et al. 2021 Automation and evaluation of the interactive homogenisation tool HOMER. *Int. J. Clim.* <https://doi.org/10.1002/joc.7394>
- Johansson B, Chen D 2003 The influence of wind and topography on precipitation distribution in Sweden: Statistical analysis and modelling. *International Journal of Climatology*, 23, 1523-1535.
- Jones C, Giorgi F, Asrar G 2011 The coordinated regional downscaling experiment: CORDEX, An international downscaling link to CMIP5. *CLIVAR Exchanges*, No. 56, 16 (2), 34–40.
- Karlsson K-G, Anttila K, Trentmann J et al. 2017 CLARA-A2: the second edition of the CM SAF cloud and radiation data record from 34 years of global AVHRR data, *Atmos. Chem. Phys.*, 17, 5809–5828, <https://doi.org/10.5194/acp-17-5809-2017>.
- Kaufman DS and Arctic Lakes 2k Project Members, 2009 Recent Warming Reverses Long-Term Arctic Cooling. *Science*. 325 (5945): 1236–39.
- Kendon EJ, Roberts NM, Fowler HJ et al. 2014 Heavier summer downpours with climate change revealed by weather forecast resolution model *Nat. Clim. Change* 4 570–6.

- Kierulf H, Steffen H, Barletta VR et al. 2021 A GNSS velocity field for geophysical applications in Fennoscandia. *Journal of Geodynamics* 146. <https://doi.org/10.1016/j.jog.2021.101845>
- Kjellström E 2004 Recent and future signatures of climate change in Europe. *Ambio*, 33(4-5), 193-198.
- Kjellström E, Ruosteenoja K 2007 Present-day and future precipitation in the Baltic Sea region as simulated in a suite of regional climate models. *Climatic Change*, 81 (Suppl. 1), 281-291, DOI: 10007/s10584-006-9219-y.
- Kjellström E, Bärring L, Gollvik S et al. 2005 A 140-year simulation of European climate with the new version of the Rossby Centre regional atmospheric climate model (RCA3). *Reports Meteorology and Climatology*, 108, SMHI, SE-60176 Norrköping, Sweden, 54 pp.
- Kjellström E, Brandefelt J, Näslund J-O et al. 2010 Simulated climate conditions in Europe during the Marine Isotope Stage 3 stadial. *Boreas*, 436-456, DOI: 10.1111/j.1502-3885.2010.00143.x.
- Kjellström E, Thejll P, Rummukainen M et al. 2013 Emerging regional climate change signals for Europe under varying large-scale circulation conditions, *Clim. Res.*, 56, 103–119, DOI: 10.3354/cr01146.
- Kjellström E, Abrahamsson R, Boberg P et al. 2014 Uppdatering av det klimatvetenskapliga kunskapsläget. *Klimatologi* 9. SMHI, SE-60176 Norrköping, Sweden. 65pp (in Swedish).
- Kjellström E, Bärring L, Nikulin G et al. 2016 Production and use of regional climate model projections – a Swedish perspective on building climate services. *Climate Services*, 2-3, 15-29, DOI: 10.1016/j.cliser.2016.06.004.
- Kjellström E, Nikulin G, Strandberg G et al. 2018 European climate change at global mean temperature increases of 1.5 and 2 °C above pre-industrial conditions as simulated by the EURO-CORDEX regional climate models, *Earth Syst. Dynam.*, 9, 459-478, DOI: 10.5194/esd-9-459-2018.
- Kjellström E, Hansen F, Belušić D 2021a Betydelsen av storskalig atmosfärisk cirkulation för Sveriges temperatur- och nederbörds klimat: En jämförelse av normalperioder. *Klimatologi* 61, SMHI, SE-60176 Norrköping. ISSN: 1654-2258/1654-2258, 36 pp.
- Kjellström E, Strandberg G, Lin C 2021b Förändringar i klimatet som påverkar energisektorn i Sverige. *Energiforsk rapport nr 2021:745*, ISBN 978-91-7673-745-3, 64 pp.
- Kjellström E, Hansen F and Belušić D 2022 Contributions from changing large-scale atmospheric conditions to changes in Scandinavian temperature and precipitation between climate normals. Accepted for publication in *Tellus*.
- Leijonhufvud L, Retsö D 2021 Documentary evidence of droughts in Sweden between the Middle Ages and ca. 1800 CE, *Clim. Past*, 17, 2015–2029, <https://doi.org/10.5194/cp-17-2015-2021>.
- Leijonhufvud L, Wilson R, Moberg A et al. 2010 Five centuries of Stockholm winter/spring temperatures reconstructed from documentary evidence and instrumental observations. *Climatic Change* 101, 109–141. <https://doi.org/10.1007/s10584-009-9650-y>
- Lenderink G, Belušić D, Fowler H et al. 2019 Systematic increases in the thermodynamic response of hourly precipitation extremes in an idealized warming experiment with a convection-permitting climate model. *Environ. Res. Lett.* 14, 074012. DOI: 10.1088/1748-9326/ab214a.

- Lind P, Lindstedt D, Kjellström E et al. 2016 Spatial and Temporal Characteristics of Summer Precipitation over Central Europe in a Suite of High- Resolution Climate Models. *J Clim*, 29, 3501–3518, DOI: 10.1175/JCLI-D-15-0463.1
- Lind P, Belušić D, Christensen OB et al. 2020 Benefits and added value of convection-permitting climate modeling over Fenno-Scandinavia. *Clim. Dyn.* DOI: 10.1007/s00382-020-05359-3.
- Linderholm HW, Björklund J, Seftigen K et al. 2015 Fennoscandia revisited: a spatially improved tree-ring reconstruction of summer temperatures for the last 900 years. *Clim Dyn* 45, 933–947. <https://doi.org/10.1007/s00382-014-2328-9>
- Lindskog M, Landelius T 2019 Short-Range Numerical Weather Prediction of Extreme Precipitation Events Using Enhanced Surface Data Assimilation. *Atmosphere*, 10, 587; doi:10.3390/atmos10100587.
- Lindström G, Pers CP, Rosberg R et al. 2010 Development and test of the HYPE (Hydrological Predictions for the Environment) model – A water quality model for different spatial scales. *Hydrology Research* 41, 3–4:295–319.
- Ljungqvist FC 2017 *Klimatet och människan under 12 000 år*. Stockholm: Dialogos Förlag, p. 456. ISBN: 978-91-7504-323-4
- Ljungqvist FC, Seim A, Huhtamaa H 2021 Climate and society in European history. *WIREs Clim Change*, 12:e691. <https://doi.org/10.1002/wcc.691>
- Ludwig P, Pinto JG, Raible CC et al. 2017 Impacts of surface boundary conditions on regional climate model simulations of European climate during the Last Glacial Maximum. *Geophysical Research Letters*, 44(10), 5086–5095.
- Matti B, Dahlke HE, Dieppois B et al. 2017 Flood seasonality across Scandinavia—Evidence of a shifting hydrograph? *Hydrological Processes*. 31: 4354– 4370. <https://doi.org/10.1002/hyp.11365>
- Masson-Delmotte V, Schulz M, Abe-Ouchi A et al. 2013 Information from paleoclimate archives. In *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Stocker TF, Qin D, Plattner G-K et al. (Eds.) Cambridge University Press, pp. 383–464, doi:10.1017/CBO9781107415324.013.
- McCarroll D, Gagen MH, Loader NJ et al. 2009 Correction of tree ring stable carbon isotope chronologies for changes in the carbon dioxide content of the atmosphere. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 73(6), 1539–1547.
- Meehl GA, Covey C, Delworth T et al. 2007 *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 88, 1383–1394.
- Meehl GA, Senior CA, Eyring V et al. 2020 Context for interpreting equilibrium climate sensitivity and transient climate response from the CMIP6 Earth system models. *Science Advances*, 6(26), eaba1981. <https://doi.org/10.1126/sciadv.aba1981>
- Meier HEM, Edman M, Eilola K et al. 2019 Assessment of uncertainties in scenario simulations of biogeochemical cycles in the Baltic Sea. *Frontiers in Marine Science*, 6, 46.
- Meier HEM, Dieterich C, Gröger M et al. 2022 Oceanographic regional climate projections for the Baltic Sea until 2100, *Earth Syst. Dynam. Discuss.* [preprint], <https://doi.org/10.5194/esd-2021-68>, in review.
- Meinshausen M, Smith SJ, Calvin K et al. 2011 The RCP greenhouse gas concentrations and their extensions from 1765 to 2300. *Climatic Change* 109, 213. <https://doi.org/10.1007/s10584-011-0156-z>

- Meinshausen M, Nicholls ZRJ, Lewis J et al. 2020 The shared socio-economic pathway (SSP) greenhouse gas concentrations and their extensions to 2500, *Geosci. Model Dev.*, 13, 3571–3605, <https://doi.org/10.5194/gmd-13-3571-2020>.
- Meissner KJ 2007 Younger Dryas: a data to model comparison to constrain the strength of the overturning circulation. *Geophysical Research Letters* 34, L21705, doi: 10.1029/2007GL031304
- Minola L, Azorin-Molina C, Chen D 2016 Homogenization, assessment and attribution of observed near-surface wind speed trends across Sweden, 1956–2013. *Journal of Climate*, DOI: 10.1175/JCLI-D-15-0636.1.
- Minola L, Azorin-Molina C, Guijarro JA et al. 2021a Climatology of near-surface daily peak wind gusts across Scandinavia: Observations and model simulations. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 126, e2020JD033534. <https://doi.org/10.1029/2020JD033534>.
- Minola L, Reese H, Lai H-W et al. 2021b Wind stilling-reversal across Sweden: The impact of land-use and large-scale atmospheric circulation changes. *International Journal of Climatology*. DOI: 10.1002/joc.7289.
- Moberg A, Alexandersson H 1997 Homogenization of Swedish Temperature data. PART II: Homogenized Gridded Air Temperature Compared with a Subset of Global Gridded Air Temperature since 1861. *International Journal of Climatology*, 17: 35–54. doi: 10.1002/(SICI)1097-0088(199701)17:1<35::AID-JOC104>3.0.CO;2-F
- Moberg A, Kjellström E, Gouirand I et al. 2006 Climate in Sweden during the past millennium – Evidence from proxy data, instrumental data and model simulations. SKB TR 06-35, Svensk Kärnbränslehantering AB, 63 pp.
- Morice CP, Kennedy JJ, Rayner NA et al. 2021 An updated assessment of near-surface temperature change from 1850: the HadCRUT5 dataset. *Journal of Geophysical Research*. doi:10.1029/2019JD032361
- Nakićenović N, Swart R (ed.) 2000 Special report on emissions scenarios. A special report of Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press. 612 pp.
- Neukom R, Steiger N, Gómez-Navarro JJ et al. 2019 No evidence for globally coherent warm and cold periods over the preindustrial Common Era. *Nature* 571, 550–554. <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1401-2>
- Nikulin G, Kjellström E, Hansson U et al. 2011 Evaluation and Future Projections of Temperature, Precipitation and Wind Extremes over Europe in an Ensemble of Regional Climate Simulations. *Tellus*, 63A(1), 41–55, DOI: 10.1111/j.1600-0870.2010.00466.x.
- NOSCCA 2016 North Sea Region Climate Change Assessment. Eds. Quante M, Colijn F. Springer, Cham, 528. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-39745-0>
- Olsson J, Josefsson W 2015 Skyfallsuppdraget ett regeringsuppdrag till SMHI. Rapport Klimatologi, 37. SMHI, SE-60176 Norrköping, Sweden, 45 pp.
- Olsson J, Berg P, Eronn A et al. 2017 Extreme rainfall in present and future climate, SMHI Climatology No 47, SMHI, 601 76 Norrköping, Sweden, 82 pp
- Otto FEL, Philip S, Kew S et al. 2018 Attributing high-impact extreme events across timescales—a case study of four different types of events. *Climatic Change* 149, 399–412. <https://doi.org/10.1007/s10584-018-2258-3>
- Parker DE, Wilson H, Jones PD et al. 1996 The Impact of Mount Pinatubo on World-Wide Temperatures. *International Journal of Climatology*. 16 (5): 487–497. doi:10.1002/(SICI)1097-0088(199605)16:5<487::AID-JOC39>3.0.CO;2-J.

- Peltier WR 2004 Global glacial isostasy and the surface of the ice-age earth: The ICE-5G (VM2) Model and GRACE. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, Vol. 32:111-149. <https://doi.org/10.1146/annurev.earth.32.082503.144359>
- Pemberton P, Löptien U, Hordoir R et al. 2017 Sea-ice evaluation of NEMO-Nordic 1.0: a NEMO-LIM3. 6-based ocean-sea-ice model setup for the North Sea and Baltic Sea. *Geoscientific Model Development*, 10(8), 3105-3123.
- Persson G, Barring L, Kjellström E et al. 2007 Climate indices for vulnerability assessments. *Reports Meteorology and Climatology*, 111, SMHI, SE-60176 Norrköping, Sweden, 64 pp.
- Prein AF, Gobiet A, Truehertz H et al. 2016 Precipitation in the EURO-CORDEX 0.11° and 0.44° simulations: high resolution, high benefits? *Clim. Dyn.*, 46, 383-412, DOI: 10.1007/s00382-015-2589-y.
- Pörtner HO, Scholes RJ, Agard J et al. 2021 IPBES-IPCC co-sponsored workshop report on biodiversity and climate change; IPBES and IPCC. DOI:10.5281/zenodo.4782538.
- Rasmussen SO et al. 2006 A new Greenland ice core chronology for the last glacial termination, *J. Geophys. Res.*, 111, D06102, doi:10.1029/2005JD006079.
- Rayner D, Achberger C, Chen D 2016 A multi-state weather generator for daily precipitation for the Torne river basin, northern Sweden/western Finland, *Advances in Climate Change Research*. DOI: 10.1016/j.accre.2016.06.006.
- Räsänen J 2021 Snow conditions in northern Europe: the dynamics of interannual variability versus projected long-term change, *The Cryosphere*, 15, 1677–1696, <https://doi.org/10.5194/tc-15-1677-2021>.
- Räsänen J, Hansson U, Ullerstig A et al. 2004 European climate in the late 21st century: regional simulations with two driving global models and two forcing scenarios. *Clim. Dyn.*, 22, 13–31.
- Riahi K van Vuuren DP et al. 2017 The Shared Socioeconomic Pathways and their energy, land use, and greenhouse gas emissions implications: An overview, *Global Environmental Change*, Volume 42, Pages 153-168, ISSN 0959-3780, DOI:10.1016/j.gloenvcha.2016.05.009
- Robock A 1979 The "Little Ice Age": Northern Hemisphere Average Observations and Model Calculations. *Science*. 206 (4425): 1402–04.
- Ruosteenoja K, Markkanen T, Venäläinen A et al. 2018 Seasonal soil moisture and drought occurrence in Europe in CMIP5 projections for the 21st century. *Climate Dynamics* 50: 1177–1192.
- Rummukainen M 1997 Methods for downscaling of GCM simulations. SMHI Report RMK 80, Norrköping Sweden. 29pp.
- Rummukainen M 2010 State-of-the-art with regional climate models. *WIREs Climate Change*, 1, 82–96.
- Russo E & Cubasch U 2016 Mid-to-late Holocene temperature evolution and atmospheric dynamics over Europe in regional model simulations. *Climate of the Past*, 12(8), 1645-1662.
- Rutgersson A, Haapala J, Stendel M et al. 2022 Natural Hazards and Extreme Events in the Baltic Sea region, *Earth Syst. Dynam. Discuss.* [preprint], <https://doi.org/10.5194/esd-2021-13>, in review, 2021.
- Saraiva S et al 2019 Uncertainties in Projections of the Baltic Sea Ecosystem Driven by an Ensemble of Global Climate Models, *Frontiers in Earth Science* 6

- Saraiva S et al 2019 Baltic Sea ecosystem response to various nutrient load scenarios in present and future climates, *Climate Dynamics* 52(5-6): 3369-3387.
- Schimanke S 2020 UERRA Product User Guide. Available online: http://datastore.copernicus-climate.eu/documents/uerra/D322_Lot1.4.1.2_User_guides_v3.3.pdf.
- Schimanke S, Meier HEM, Kjellström E et al. 2012 The climate in the Baltic Sea region during the last millennium simulated with a regional climate model. In: *Climate of the Past* 8 (5), S. 1419–1433. DOI: 10.5194/cp-8-1419-2012.
- Seftigen K, Goosse H, Klein F et al. 2017 Hydroclimate variability in Scandinavia over the last millennium – insights from a climate model–proxy data comparison, *Clim. Past*, 13, 1831–1850, <https://doi.org/10.5194/cp-13-1831-2017>.
- Sherwood SC, Webb MJ, Annan JD et al. 2020 An assessment of Earth’s climate sensitivity using multiple lines of evidence. *Rev Geophys* 58: e2019RG000678
- Sigel M, Fischer A, Zubler E et al. 2016 Dissemination of climate change scenarios – a review of existing scenario platforms. Technical Report MeteoSwiss, 257, 88 pp.
- Sjökqvist E, Axén Mårtensson J, Dahné J et al. 2015 Klimatscenarier för Sverige: Bearbetning av RCP-scenarier för meteorologiska och hydrologiska effektstudier. SMHI Rapport Klimatologi, 15. pp 36, ISSN: 1654–2258
- Skelton M, Porter JJ, Dessai S et al. 2017 The social and scientific values that shape national climate scenarios: a comparison of the Netherlands, Switzerland and the UK. *Reg Environ Change* 17, 2325–2338. <https://doi.org/10.1007/s10113-017-1155-z>
- Slivinski LC, Compo GP, Sardeshmukh PD et al. 2021 An Evaluation of the Performance of the Twentieth Century Reanalysis Version 3, *Journal of Climate*, 34(4), 1417-1438.
- Smith B, Samuelsson P, Wramneby A et al. 2011 A model of the coupled dynamics of climate, vegetation and terrestrial ecosystem biogeochemistry for regional applications. *Tellus* 63A, 87–106
- SOU 2007 Sweden Facing Climate Change – Threats and Opportunities Stockholm, Sweden, Swedish Government Office Reports No. 2007:60, 726 pp.
- Strandberg G, Brandefelt J, Kjellström E et al. 2011 High resolution regional simulation of Last Glacial Maximum climate in Europe. *Tellus*, 63A(1), 107-125, DOI: 10.1111/j.1600-0870.2010.00485.x.
- Strandberg G, Kjellström E, Poska A et al. 2014 Regional climate model simulations for Europe at 6 k and 0.2 k yr BP: sensitivity to changes in anthropogenic deforestation, *Clim. Past*, 10, 661-680, DOI: 10.5194/cp-10-661-2014.
- Strandberg G, et al. 2015 CORDEX scenarios for Europe from the Rossby Centre regional climate model RCA4. SMHI Meteorology and Climatology Rep. 116, 84 pp., https://www.smhi.se/polopoly_fs/1.90275!/Menu/general/extGroup/attachmentColHold/mainCol1/file/RMK_116.pdf.
- Taylor KE, Stouffer RJ, Meehl GA 2012 An overview of CMIP5 and the experiment design. *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 93, 485–498. <http://dx.doi.org/10.1175/BAMS-D-11-00094.1>.
- Tokarska KB, Hegerl GC, Schurer AP et al. 2020 Observational constraints on the effective climate sensitivity from the historical period. *Environ. Res. Lett.*, 15, no. 3, 034043, doi:10.1088/1748-9326/ab738f.
- Treydte K, Frank, D, Esper J et al. 2007 Signal strength and climate calibration of a European tree-ring isotope network, *Geophys. Res. Lett.*, 34, L24302, doi:10.1029/2007GL031106.

- Uppala SM, Kållberg PW, Simmons AJ et al. 2005 The ERA-40 re-analysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 131, 2961–3012.
- Vautard R, Kadygrov N, Iles C et al. 2021 Evaluation of the large EURO-CORDEX regional climate model ensemble. *J. Geophys. Res.* DOI: 10.1029/2019JD032344
- Vestøl O, Ågren J, Steffen H et al. 2019 NKG2016LU: a new land uplift model for Fennoscandia and the Baltic Region. *J Geod* 93, 1759–1779.
<https://doi.org/10.1007/s00190-019-01280-8>
- Vormoor K, Lawrence D, Heistermann M et al. 2015 Climate change impacts on the seasonality and generation processes of floods—projections and uncertainties for catchments with mixed snowmelt/rainfall regimes. *Hydrology and Earth System Sciences*, 19(2), 913–931. <https://doi.org/10.5194/hess-19-913-2015>
- Wang S, Dieterich C, Döscher R et al. 2015 Development and evaluation of a new regional coupled atmosphere–ocean model in the North Sea and Baltic Sea. *Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography*, 67, 24284 (1).
- Wern L, Barring L 2009 Sveriges vindklimat 1901 – 2008: Analys av förändring i geostrofisk vind. SMHI Meteorologi 138, 57 pp. ISSN 0283–7730.
- Wilcke R, Kjellström E, Liu C et al. 2020 The extreme warm summer 2018 in Sweden - set in a historical context. *Earth System Dynamics*, 11, 1107–1121. DOI: 10.5194/esd-11-1107-2020.
- Wiréhn L 2021 Climate indices for the tailoring of climate information – A systematic literature review of Swedish forestry and agriculture. *Climate Risk Management*, 34, 100370. <https://doi.org/10.1016/j.crm.2021.100370>.
- Wyser K, Kjellström E, König T et al. 2020 Warmer climate projections in CMIP6: the role of changes in the greenhouse gas concentrations from CMIP5 to CMIP6. *Environ. Res. Lett.*, 15, 054020, DOI: 10.1088/1748-9326/ab81c2.
- Wyser K, Koenig T, Fladrich U et al. 2021 The SMHI Large Ensemble (SMHI-LENS) with EC-Earth3.3.1, *Geosci. Model Dev.*, 14, 4781–4796, <https://doi.org/10.5194/gmd-14-4781-2021>.
- Xie S-P et al. 2015 Towards predictive understanding of regional climate change. *Nat. Clim. Chang.* 5, 921–930.
- Xin X, Wu T, Jie W et al. 2021 Impact of Higher Resolution on Precipitation over China in CMIP6 HighResMIP Models. *Atmosphere*, 12, 762.
<https://doi.org/10.3390/atmos12060762>
- Yang W, Andréasson J, Graham LP et al. 2010 Distribution-based scaling to improve usability of regional climate model projections for hydrological climate change impacts studies. *Hydrology Research*, 41(3–4), 211–229.
- Zelinka MD, Myers TA, McCoy DT et al. 2020 Causes of higher climate sensitivity in CMIP6 models. *Geophysical Research Letters*, 47, e2019GL085782.
<https://doi.org/10.1029/2019GL085782>
- Zhou C, Azorin-Molina C, Engström E et al. 2022 HomogWS-se: A century-long homogenized dataset of near-surface wind speed observations since 1925 rescued in Sweden. Submitted to *Earth System Science Data*.

SMHI Publikationer

SMHI publicerar sju rapportserier. Tre av dessa, R-serierna är avsedda för internationella läsare och skrivs oftast på Engelska. I de övriga serierna används oftast Svenska men även Engelska.

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 (University KwaZulu Natal) (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 Doescher, Henrik Smith (2011)
Uppdatering av den vetenskapliga grunden för klimatarbetet. En översyn av naturvetenskapliga aspekter
5. Sten Bergström (2012)
Framtidens havsnivåer i ett hundraårsperspektiv – kunskapssammanställning 2012
6. Jonas Olsson och Kean Foster (2013)
Extrem korttidsnederbörd i klimatprojektioner för Sverige
7. FNs klimatpanel – Sammanfattning för beslutsfattare. Effekter, anpassning och sårbarhet. Bidrag från arbetsgrupp 2 (WG 2) till den femte utvärderingen (AR 5) från Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC (2014)
8. Att begränsa klimatförändringar. FNs klimatpanel – Sammanfattning för beslutsfattare. Bidrag från arbetsgrupp 3 (WG 3) till den femte utvärderingen (AR 5) från Intergovernmental Panel on Climate Change (2015)
9. Erik Kjellström SMHI. Reino Abrahamsson, Pelle Boberg. Eva Jernbäcker
Naturvårdsverket. Marie Karlberg, Julien Morel Energimyndigheten och Åsa Sjöström SMHI (2014)
Uppdatering av det klimatvetenskapliga kunskapsläget
10. Risker och konsekvenser för samhället av förändrat klimat – en kunskapsöversikt (2014)
11. Gunn Persson (2015)
Vägledning för användande av klimatscenarier
12. Lotta Andersson, Anna Bohman, Lisa van Well, Anna Jonsson, Gunn Persson och Johanna Farelus (2015)
Underlag till kontrollstation 2015 för anpassning till ett förändrat klimat
13. Gunn Persson (2015)
Sveriges klimat 1860-2014. Underlag till Dricksvattenutredningen

14. Anna Eklund, Jenny Axén Mårtensson, Sten Bergström, Emil Björck, Joel Dahné, Lena Lindström, Daniel Nordborg, Jonas Olsson, Lennart Simonsson och Elin Sjökvist (2015) Sveriges framtida klimat. Underlag till Dricksvattensutredningen
15. Elin Sjökvist, Jenny Axén Mårtensson, Joel Dahné, Nina Köplin, Emil Björck, Linda Nylén, Gitte Berglöv, Johanna Tengdelius Brunell, Daniel Nordborg, Kristoffer Hallberg, Johan Södling, Steve Berggreen-Clausen (2015) Klimatscenarier för Sverige - Bearbetning av RCP-scenarier för meteorologiska och hydrologiska effektstudier
16. Elin Sjökvist, Gunn Persson, Jenny Axén Mårtensson, Magnus Asp, Steve Berggreen-Clausen, Gitte Berglöv, Emil Björck, Linda Nylén, Alexandra Ohlsson och Håkan Persson (2015) Framtidsklimat i Dalarnas län – enligt RCP-scenarier
17. Linda Nylén, Magnus Asp, Steve Berggreen-Clausen, Gitte Berglöv, Emil Björck, Jenny Axén Mårtensson, Alexandra Ohlsson, Håkan Persson, Elin Sjökvist (2015) Framtidsklimat i Värmlands län – enligt RCP-scenarier
18. Gunn Persson, Magnus Asp, Steve Berggreen-Clausen, Gitte Berglöv, Emil Björck, Jenny Axén Mårtensson, Linda Nylén, Alexandra Ohlsson, Håkan Persson, Elin Sjökvist (2015) Framtidsklimat i Örebro län – enligt RCP-scenarier
19. Alexandra Ohlsson, Magnus Asp, Steve Berggreen-Clausen, Gitte Berglöv, Emil Björck, Anna Johnell, Jenny Axén Mårtensson, Linda Nylén, Håkan Persson, Elin Sjökvist (2015) Framtidsklimat i Västmanlands län – enligt RCP-scenarier
20. Elin Sjökvist, Magnus Asp, Steve Berggreen-Clausen, Gitte Berglöv, Emil Björck, Anna Johnell, Jenny Axén Mårtensson, Linda Nylén, Alexandra Ohlsson, Håkan Persson (2015) Framtidsklimat i Uppsala län – enligt RCP-scenarier
21. Magnus Asp, Steve Berggreen-Clausen, Gitte Berglöv, Emil Björck, Anna Johnell, Jenny Axén Mårtensson, Linda Nylén, Alexandra Ohlsson, Håkan Persson, Elin Sjökvist (2015) Framtidsklimat i Stockholms län – enligt RCP-scenarier
22. Magnus Asp, Steve Berggreen-Clausen, Gitte Berglöv, Emil Björck, Anna Johnell, Jenny Axén Mårtensson, Linda Nylén, Alexandra Ohlsson, Håkan Persson, Elin Sjökvist (2015) Framtidsklimat i Södermanlands län – enligt RCP-scenarier
23. Magnus Asp, Steve Berggreen-Clausen, Gitte Berglöv, Emil Björck, Anna Johnell, Jenny Axén Mårtensson, Linda Nylén, Alexandra Ohlsson, Håkan Persson, Elin Sjökvist (2015) Framtidsklimat i Östergötlands län – enligt RCP-scenarier
24. Gitte Berglöv, Magnus Asp, Steve Berggreen-Clausen, Emil Björck, Jenny Axén Mårtensson, Linda Nylén, Alexandra Ohlsson, Håkan Persson, Elin Sjökvist (2015) Framtidsklimat i Västra Götalands län – enligt RCP-scenarier
25. Alexandra Ohlsson, Magnus Asp, Steve Berggreen-Clausen, Gitte Berglöv, Emil Björck, Anna Johnell, Jenny Axén Mårtensson, Linda Nylén, Håkan Persson, Elin Sjökvist (2015) Framtidsklimat i Jönköpings län – enligt RCP-scenarier
26. Gunn Persson, Magnus Asp, Steve Berggreen-Clausen, Gitte Berglöv, Emil Björck, Jenny Axén Mårtensson, Linda Nylén, Alexandra Ohlsson, Håkan Persson, Elin Sjökvist (2015) Framtidsklimat i Kalmar län – enligt RCP-scenarier

27. Gitte Berglöv, Magnus Asp, Steve Berggreen-Clausen, Emil Björck, Jenny Axén Mårtensson, Linda Nylén, Alexandra Ohlsson, Håkan Persson, Elin Sjökvist (2015)
Framtidsklimat i Kronobergs län – Enligt RCP-scenarier
28. Gunn Persson, Magnus Asp, Steve Berggreen-Clausen, Gitte Berglöv, Emil Björck, Jenny Axén Mårtensson, Linda Nylén, Alexandra Ohlsson, Håkan Persson, Elin Sjökvist (2015) Framtidsklimat i Hallands län – enligt RCP-scenarier
29. Alexandra Ohlsson, Magnus Asp, Steve Berggreen-Clausen, Gitte Berglöv, Emil Björck, Anna Johnell, Jenny Axén Mårtensson, Linda Nylén, Håkan Persson, Elin Sjökvist (2015)
Framtidsklimat i Skåne län – enligt RCP-scenarier
30. Alexandra Ohlsson, Magnus Asp, Steve Berggreen-Clausen, Gitte Berglöv, Emil Björck, Anna Johnell, Jenny Axén Mårtensson, Linda Nylén, Håkan Persson, Elin Sjökvist (2015)
Framtidsklimat i Blekinge län – enligt RCP-scenarier.
31. Gunn Persson, Magnus Asp, Steve Berggreen-Clausen, Gitte Berglöv, Emil Björck, Jenny Axén Mårtensson, Linda Nylén, Alexandra Ohlsson, Håkan Persson, Elin Sjökvist (2015) Framtidsklimat i Gotlands län – enligt RCP-scenarier
32. Gitte Berglöv, Magnus Asp, Steve Berggreen-Clausen, Emil Björck, Jenny Axén Mårtensson, Linda Nylén, Alexandra Ohlsson, Håkan Persson, Elin Sjökvist (2015)
Framtidsklimat i Norrbottens län – enligt RCP-scenarier
33. Gitte Berglöv, Magnus Asp, Steve Berggreen-Clausen, Emil Björck, Jenny Axén Mårtensson, Linda Nylén, Alexandra Ohlsson, Håkan Persson, Elin Sjökvist (2015)
Framtidsklimat i Västerbottens län – enligt RCP-scenarier
34. Linda Nylén, Magnus Asp, Steve Berggreen-Clausen, Gitte Berglöv, Emil Björck, Jenny Axén Mårtensson, Alexandra Ohlsson, Håkan Persson, Elin Sjökvist (2015)
Framtidsklimat i Jämtlands län – enligt RCP-scenarier
35. Linda Nylén, Magnus Asp, Steve Berggreen-Clausen, Gitte Berglöv, Emil Björck, Jenny Axén Mårtensson, Alexandra Ohlsson, Håkan Persson, Elin Sjökvist (2015)
Framtidsklimat i Västernorrlands län – enligt RCP-scenarier
36. Linda Nylén, Magnus Asp, Steve Berggreen-Clausen, Gitte Berglöv, Emil Björck, Jenny Axén Mårtensson, Alexandra Ohlsson, Håkan Persson, Elin Sjökvist (2015)
Framtidsklimat i Gävleborgs län – enligt RCP-scenarier
37. Jonas Olsson, Weine Josefsson (red.) (2015) Skyfallsuppdraget - ett regeringsuppdrag till SMHI
38. Gunn Persson, Linda Nylén, Steve Berggreen-Clausen, Peter Berg, David Rayner och Elin Sjökvist (2015)
Från utsläppsscenarioer till lokal nederbörd och översvämningssrisker
39. Anna Eklund, Jenny Axén Mårtensson, Sten Bergström och Elin Sjökvist. (2015)
Framtidens vattentillgång i Mälaren, Göta älv, Bolmen, Vombsjön och Gavleån. Underlag till Dricksvattenutredningen
40. Anna Bohman (Centrum för klimatpolitisk forskning, CSFR) vid Linköpings universitet, Lotta Andersson, SMHI och CSFR, Linköpings universitet samt Åsa Sjöström, SMHI. (2016)
Förslag till en metod för uppföljning av det nationella klimatanpassningsarbetet. Redovisning av ett regeringsuppdrag December 2016

41. (2017)
Karttjänst för framtida medelvattenstånd
längs Sveriges kust
42. Anna Eklund, Linda Tofeldt, Johanna
Tengdelius-Brunell, Anna Johnell, Jonas
German, Elin Sjökvist, Maria Rasmusson,
Elinor Andersson (2017)
Vattennivåer, tappningar, vattentemperaturer
och is i Vättern
Beräkningar för dagens och framtidens
klimatförhållanden
43. Anna Eklund, Anna Johnell, Linda Tofeldt,
Johanna Tengdelius-Brunell, Maria
Andersson, Cajsa-Lisa Ivarsson, Jonas
German, Elin Sjökvist och Elinor Andersson
(2017)
Vattennivåer, tappningar, vattentemperaturer
och is i Hjälmaren Beräkningar för dagens
och framtidens klimatförhållanden
44. Anna Eklund, Linda Tofeldt, Anna Johnell,
Maria Andersson, Johanna Tengdelius-
Brunell, Jonas German, Elin Sjökvist, Maria
Rasmusson, Ulrika Harbman, Elinor
Andersson (2017)
Vattennivåer, tappningar, vattentemperatur
och is i Vänern Beräkningar för dagens och
framtidens klimatförhållanden
45. Sofie Schöld, Cajsa-Lisa Ivarsson, Signild
Nerheim och Johan Södling (2017)
Beräkning av högsta vattenstånd längs
Sveriges kust
46. Katarina Stensen, Johanna Tengdelius-
Brunell, Elin Sjökvist, Elinor Andersson,
Anna Eklund (2017)
Vattentemperaturer och is i Mälaren
Beräkningar för dagens och framtidens
klimatförhållanden
47. Jonas Olsson, Peter Berg, Lennart Wern,
Johan Södling, Lennart Simonsson,
Wei Yang, Anna Eronn (2017)
Extremregn i nuvarande och framtida klimat
– Analyser av observationer och
framtidsscenarier.
48. Signild Nerheim, Sofie Schöld, Gunn
Persson och Åsa Sjöström (2017)
Framtida havsnivåer i Sverige
49. Anna Eklund, Katarina Stensen, Ghasem
Alavi, Karin Jacobsson, Diala Abdoush
(2018)
Sveriges stora sjöar idag och i framtiden.
Klimatets påverkan på Vänern, Vättern,
Mälaren och Hjälmaren.
Kunskapssammanställning januari 2018
50. Gunn Persson, Christina Wikberger,
Jorge Amorim (2018)
Klimatanpassa städer med grönska
51. Katarina Losjö, Lennart Wern, Johan
Södling (2019)
Uppföljning av riktlinjer för bestämning
av dimensionerande flöden
52. Sjökvist, Elin (2019)
Sommaren 2018 – en glimt av framtiden?
53. Översättning av Summary for
Policymakers (2019)
FN:s klimatpanel – Sammanfattning för
beslutsfattare
Global uppvärmning på 1,5°C
54. Karin Hjerpe, Therése Sjöberg, Karin
Lundgren Kownacki, Lotta Andersson,
Åsa Sjöström (2020)
Myndigheters arbete med
klimatanpassning 2019
55. Therése Sjöberg, Karin Hjerpe, Karin
Lundgren Kownacki, Lotta Andersson
(2020)
Kommunernas arbete med
klimatanpassning 2019 - Analys av
statusrapportering till SMHI
56. Klimatförändringar och biologisk
mångfald – Slutsatser från IPCC och
IPBES i ett svenskt perspektiv (2020)
57. FN:s klimatpanel IPCC –
Sammanfattning för beslutsfattare (2020)
Specialrapport om Klimatförändringar
och marken
58. FN:s klimatpanel IPCC –
Sammanfattning för beslutsfattare (2020)
Specialrapport om Havet och kryosfären
i ett förändrat klimat
59. Erik Engström
(ej publicerad)

60. Karin Hjerpe, Åsa Sjöström (2020)
Förslag på system för uppföljning och
utvärdering av det nationella arbetet med
klimatanpassning
61. Erik Kjellström (2021)
Betydelsen av storskalig atmosfärisk
cirkulation för Sveriges temperatur- och
nederbördsklimat
En jämförelse av normalperioder
62. Karin Hjerpe, Therése Sjöberg, Bodil
Englund, Anna Jonsson (2021)
Myndigheters arbete med
klimatanpassning 2020
63. Peter Berg (2021)
MIdAS version 0.1
framtagande och utvärdering av ett nytt
verktyg för biasjustering

Denna sida är avsiktligt blank



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

ISSN 1654-2258

