Rapport till Finanspolitiska rådet

2022/3

Klimatförändring, effekter och anpassning

Thorsten Mauritsen och Erik Kjellström

De åsikter som uttrycks i denna rapport är författarnas egna och speglar inte nödvändigtvis Finanspolitiska rådets uppfattning.

Finanspolitiska rådet är en myndighet som har till uppgift att göra en oberoende granskning av regeringens finanspolitik. Rådets uppgifter fullföljs framför allt genom rapporten Svensk finanspolitik som lämnas till regeringen en gång per år. Rapporten ska kunna användas som ett underlag för riksdagens granskning av regeringens politik. Rådet anordnar även konferenser. I serien Studier i finanspolitik publiceras fördjupade studier av olika aspekter på finanspolitiken.

Finanspolitiska rådet
Box 3273
SE–103 65 Stockholm
Fleminggatan 7
Tel: 08-453 59 90
Fax: 08-453 59 64
info@fpr.se
www.fpr.se

ISSN 1654-8000

Innehåll

1. Bakgrund och frågeställning, omfattning och avgränsningar samt metodbeskrivning.. 4
2. Global temperaturutveckling och scenarier 4
3. Klimatförändringen i stort 9
4. Effekter av klimatförändringen 12
5. Ett regionalt perspektiv med fokus på Sverige 15
6. Om klimatanpassning 20
7. Om tippningspunkter 21
8. Sammanfattning 24
9. Referenser 26

1. Bakgrund och frågeställning, omfattning och avgränsningar samt metodbeskrivning

Denna rapport är framtagen för att vara ett underlag i en utredning om huruvida man i ett läge där medel behöver användas för utsläppsminskningar av växthusgaser också behöver reservera medel till att täcka skadekostnader och/eller klimatanpassningsåtgärder. Kostnader kan även uppstå när investeringar måste avskrivas i förtid, exempelvis på grund av förbud mot fortsatt drift, eller dålig lönsamhet till följd av nyinförda skatter, eller i samband med politiskt begränsat nyttjande av skog.

Rapporten beskriver förändringar i klimatet på global och regional skala samt konsekvenser av detta med fokus på olika aspekter av klimatförändringen i Sverige av potentiell relevans för ekonomin. I vissa fall kan finnas möjligheter att kvantifiera kostnader, men då detta ligger utanför rapportförfattarnas expertisområde görs inget försök till en samlad bedömning. Rapporten tar också upp aspekter som är svårare att kvantifiera men som kan ha stor ekonomisk relevans, särskilt diskuteras här s.k. tippningspunkter i klimatsystemet. Vi har valt att främst fokusera på förändringar som kan ske i klimatologisk närtid, vilket vill säga 20-50 år framåt. Rapporten tar också upp en rad aspekter av arbetet med klimatanpassning.

Rapporten är huvudsakligen en litteraturstudie och baseras på olika vetenskapliga studier, men framför allt andra sammanställningar som till exempel IPCCs rapporter inom den sjätte utvärderingscykeln (AR6). Olika nationella rapporter har också använts i arbetet, till exempel SMHIs rapporter om extremhändelser och om klimatinformation som stöd för samhällets klimatanpassningsarbete. För klimatanpassningsdelen har den nyligen publicerade rapporten från regeringens Nationella expertråd för klimatanpassning utgjort ett viktigt underlag.

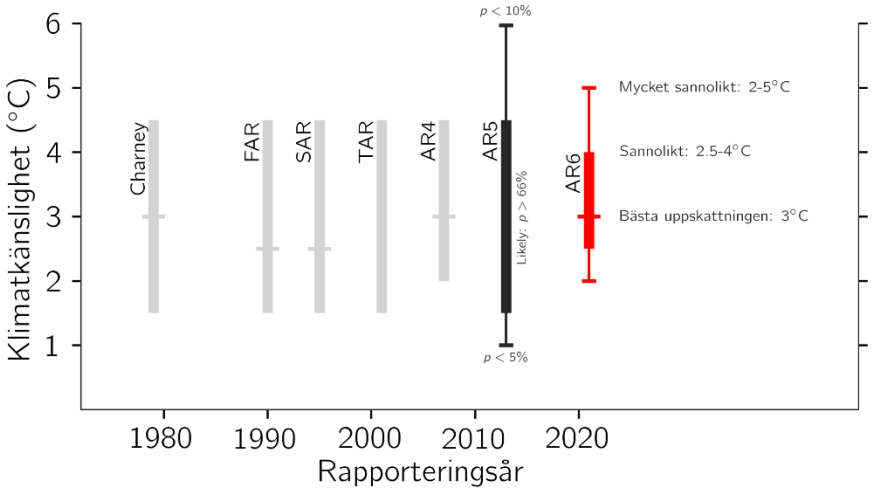
2. Global temperaturutveckling och scenarier

Global uppvärmning till följd av människans utsläpp av framför allt koldioxid är välkänt och förstått genom forskningen som pågått sedan 1800-talet. Att koldioxid och andra växthusgaser värmer jorden beror på att dessa kan absorbera och emittera infraröd strålning, och då atmosfären är kallare än jordytan leder ökade halter av växthusgaser till att balansen mellan inkommande solstrålning och utgående infraröd strålning rubbas. Resultatet blir att jordytan värms upp till dess att balansen i strålningen har återställts. Detta får i dagsläget anses vara grundläggande kvantmekanik och termodynamik och IPCC slår i sin senaste rapport om det naturvetenskapliga kunskapsläget fast att det är otvetydigt att mänsklig påverkan har värmt upp klimatsystemet (IPCC, 2021)[1].

Hur stor den framtida uppvärmningen kommer att bli har dock länge varit osäkert. Detta beror till stor del på osäkerhet kring framtida utsläpp av växthusgaser. En annan viktig anledning har varit att klimatmodeller som utvecklats på forskningsinstitutioner i olika delar av världen har uppvisat en stor spridning i det man kallar klimatkänsligheten. Detta är ett standardiserat mått på uppvärmningen som uppkommer efter man fördubblat mängden koldioxid i atmosfären och djuphaven har värmts upp till jämvikt vilket kan ta tusentals år. I den senaste rapporten

[1] https://www.ipcc.ch/report/sixth-assessment-report-working-group-i/.

från IPCC om det naturvetenskapliga forskningsläget har man dock lyckats minska spridningen med en faktor två genom att systematiskt använda sig av annan information från exempelvis historisk uppvärmning, forntida klimat, satellitmätningar, detaljerade simuleringar av moln och mycket annat. Detta är i princip första gången man lyckats minska osäkerheten kring jordens klimatkänslighet på över 40 år (Figur 1).



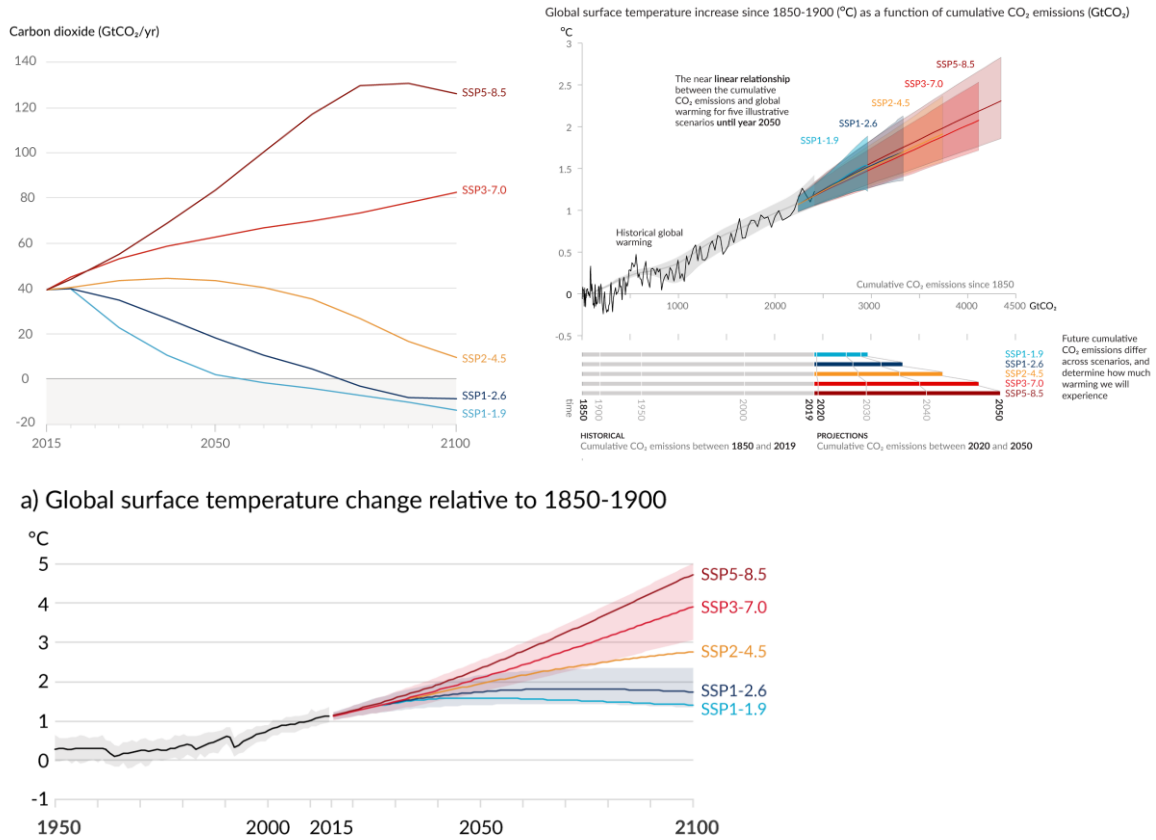
Figur 1. Historisk utveckling av uppskattningen av klimatkänsligheten i olika rapporter, med start från Charney-rapporten från 1979 (Charney et al., 1979) och vidare över de sex olika kunskapssynteserna från IPCC om det naturvetenskapliga kunskapsläget (IPCC, 1990; 1995; 2002; 2007; 2013; 2021).

Denna uppskattning av jordens klimatkänslighet ligger sedan till grund för projektioner av framtida scenarier. Ett givet scenario speglar en viss samhällsmässig utveckling och strategi, och resulterar i utsläpp av ett antal växthusgaser, aerosolpartiklar samt förändringar i markytans egenskaper. Man laborerar i bakgrunden med hundratals scenarier, men oftast diskuteras enbart ett fåtal scenarier. I den senaste IPCC-rapporten (IPCC, 2021) ingår de senaste så kallade SSP-scenarierna (där SSP står för “Shared Socioeconomic Pathway”) och då särskilt:

- SSP5-8.5: Ett fossil-baserat och globaliserat samhälle
- SSP3-7.0: I mindre utsträckning globaliserad ekonomi med regional rivalitet
- SSP2-4.5: “Medelväg” (“Middle of the road”)
- SSP1-2.6: Ett scenario med kraftiga klimatåtgärder syftande mot 2 gradersmålet
- SSP1-1.9: Ett scenario syftande mot 1.5 gradersmålet

Figur 2 visar utvecklingen av koldioxidutsläppen i vardera scenario i gigaton (miljarder ton) koldioxid per år. Ett gemensamt drag för dessa vida åtskilda scenarier är att uppvärmningen är nästintill linjärt beroende av de ackumulerade koldioxidutsläppen: skillnaden i uppvärmning i de fem scenarierna beror till största delen på hur mycket koldioxid som släppts ut ackumulerat över tid vid en given tidpunkt; i det här fallet år 2050. Att det är så beror främst på att tillfört fossilt koldioxid ackumuleras i atmosfär, havens ytskikt och landbaserad vegetation, mellan vilka en relativt snabb balans ställer in sig inom några år. Slutar man släppa ut koldioxid, eller uppnår ett så kallat netto nollutsläpp där människoskapade källor och sänkor tar ut varandra,

kommer temperaturen inom något decennium att stabilisera sig för att sedan ligga på en konstant nivå under flera århundraden, för att därefter långsamt avta. Att det är så beror på att djuphaven tar upp värme och koldioxid i någorlunda samma takt. Som en konsekvens av detta kommer djuphaven fortsätta bli varmare under många århundraden vilket medför att havsnivån fortsätter stiga till följd av termisk expansion.

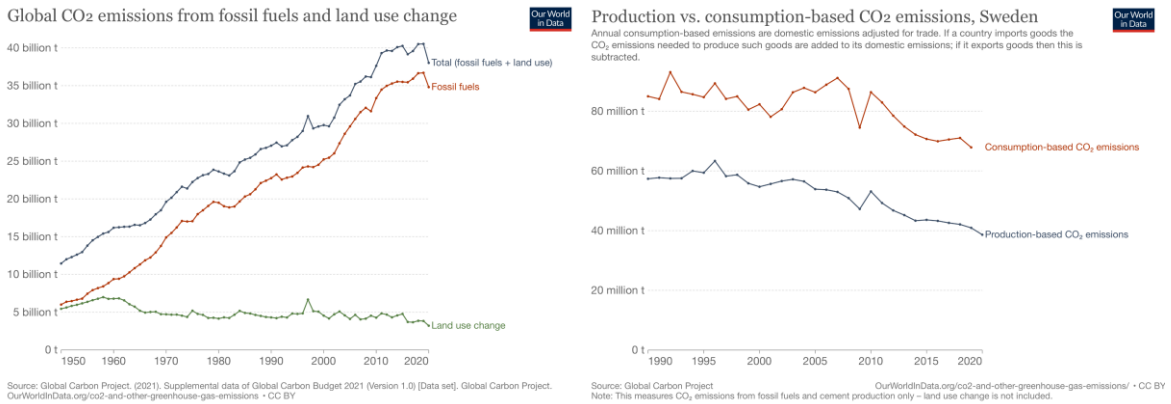


Figur 2. Överst till vänster visas utveckling av de globala utsläppen av koldioxid i de fem huvudscenarierna i IPCC (2021). Överst till höger visas temperaturökningen fram till 2050 som funktion av de ackumulerade koldioxidutsläppen. I den nedre delfiguren visas temperaturutvecklingen i de olika SSP-scenarierna, för SSP3-7.0 (röd skuggning) och SSP1-2.6 (blå skuggning) visas även uppskattade osäkerheten som främst beror på osäkerhet i klimatkänsligheten (Figur 1).

Man talar därför gärna om en maximal utsläppsbudget som är förenlig med att en viss global uppvärmningsnivå inte överskrids. Uppvärmningsnivåer anges relativt förindustriell tid, vilket brukar anges till perioden 1850-1900 som är en kompromiss mellan att gå långt tillbaka i tiden till en period med liten mänsklig klimatpåverkan, samtidigt som det finns tillräckligt mycket observationer för att kunna kartlägga de stora dragen i klimatet. Av diagrammet i övre högra delen av Figur 2 kan man utläsa hur stora totala ackumulerade utsläpp över tid som motsvarar en viss uppvärmningsnivå. Genom att räkna bort de utsläpp som redan gjorts (2 390 ± 240 miljarder ton koldioxid för år 2019) kan återstående utsläppsutrymme innan en viss temperaturnivå uppnås fås fram. Osäkerheten i beräkningarna illustreras av vidden av de skuggade färgade fälten där den övre begränsningen visar hur stora utsläpp som maximalt kan tillåtas för att ha 83 procents (fem av sex) sannolikhet att uppvärmningen stannar vid motsvarande uppvärmningsnivå. Centralvärdet (tjock linje) motsvarar en 50-procentig sannolikhet att klara

en viss temperaturnivå och för den nedre begränsningen har det reducerats till 17 procent (en av sex). Till exempel framgår att de från den 1:a januari 2020 återstod utsläpp om 500 miljarder ton koldioxid innan det med 50 procents sannolikhet är klart att 1,5-gradersnivån passeras eller bara 300 miljarder ton med 83 procents sannolikhet. Med nuvarande utsläppstakt förväntas utsläppsbudgeten för att klara 1,5-gradersmålet vara förbrukad i början av 2030-talet.

Något relativt nytt är att man även börjat göra uppskattningar av uppvärmningen som resulterar från aktuell politik, baserat på de så kallade nationella fastställda bidragen (NDC, “national determined contributions”). Man tittar där på vad de olika nationerna har lovat att åstadkomma i samband med klimatförhandlingarna, och gör då en framskrivning av utsläppen baserat på dessa. Det var den siffran som innan klimatmötet COP26 i Glasgow angavs till 2,4 till 3,5 graders uppvärmning enligt IPCC (2022b[2]). Efter COP26-mötet uppskattas det att NDC-baserade uppvärmningsnivåerna sänkts ungefär 0,3 grader till följd av ytterligare utlovade NDCer[3]. Fortfarande gäller dock i båda dessa fall att uppvärmningen inte avstannar där utan fortsätter under nästa århundrade. Det är inte helt enkelt att översätta dessa åtaganden till tidsberoende utsläpp bortom 2030, och man tar inte heller med länders icke-bindande målsättningar om exempelvis netto noll-utsläpp. I en bedömning där man tar med allt icke-bindande som utlovats landar man på ungefär 0,5 grader lägre uppvärmning jämfört med innan COP26 (UNEP 2021), alltså 1,9 till 3,0 graders uppvärmning om man tar utgångspunkt i IPCC (2022b). Oavsett vilken uppskattning man tittar på står det klart att de nuvarande åtaganden är otillräckliga för att få jordens uppvärmning att avstanna i närtid då många nationer avser att släppa ut koldioxid även bortom år 2100. Hursomhelst har metoden med att översätta NDCer till uppvärmning visat sig vara ett effektivt sätt att kommunicera effekterna av specifika åtgärder som alltså direkt kan översättas till en global uppvärmning som är jämförbar med Parisavtalets målsättningar.



Figur 3. Panelen till vänster visar utvecklingen av koldioxidutsläpp över tid från förbränning av fossila bränslen och som resultat av människans påverkan på landskapet. Enheten på vertikalaxeln är miljarder ton koldioxid ($GtCO_2$). Panelen till höger visar utvecklingen av Sveriges territoriella utsläpp samt konsumtionsbaserade utsläpp som sker utanför Sveriges gränser. De territoriella utsläppen från Sverige är knappt en promille av de globala utsläppen, enheten är miljoner ton koldioxid ($MtCO_2$). Figurerna är skapade på https://ourworldindata.org/co2-emissions.

[2] IPCC AR6 WG3 arbetade med NDCer gjorda innan COP26, se TS4.1 i https://report.ipcc.ch/ar6wg3/pdf/IPCC_AR6_WGIII_FinalDraft_TechnicalSummary.pdf.
[3] https://ukcop26.org/.

Ser man till den faktiska utvecklingen av koldioxidutsläppen ser vi att det varit en närapå linjär ökning av de globala utsläppen från förbränning av fossila bränslen från 1950 till 2010, vartefter ökningstakten minskat avsevärt (Figur 3). Att utsläppen minskade 2020 beror på pandemin, och 2021 var utsläppen tillbaka på 2019 års nivåer. Under samma period har nettoutsläppen från människans påverkan på landskapet, främst genom skogsskövling, minskat långsamt. I relativa termer har dock bidraget minskat dramatiskt från att vara i det närmaste likvärdigt med utsläppen från fossila bränslen i början av 1950-talet till att idag utgöra enbart cirka 10 procent.

I Sverige har utsläppen minskat stadigt sedan början på 2000-talet, medan utsläpp orsakade av importerade varor legat på en stabil nivå vilket ses på skillnaden mellan röda och blåa kurvorna i högra delen av Figur 3. Det är dock lång väg kvar till det politiskt uppsatta målet om 63 procents minskning år 2030 jämfört med 1990[4].

SSP-scenarierna utgår från år 2015 (Figur 2), vilket möjliggör jämförelse med de faktiska utsläppen sedan dess (Figur 3). Dagens utsläpp ligger på nära 40 miljarder ton koldioxid per år och det står klart att världen under tiden från 2015 till idag inte följt scenarierna med de kraftigaste ökningarna av koldioxidutsläppen, SSP3-7.0 och SSP5-8.5. Mötestexten från COP26-mötet i Glasgow visar att utsläppen beräknas öka med närmare 14 procent fram till 2030 jämfört med 2010 års nivå[5], för att därefter minska. Detta liknar mest SSP2-4.5 i närtid, och är alltså inte heller förenligt med vare sig SSP1-1.9 eller SSP1-2.6 där utsläppen antas minska under samma period. I dagsläget pekar utvecklingen på att tvågradersmålet inte kommer att klaras och att den globala medeltemperaturen alltså kommer att öka till mer än två grader över förindustriell nivå.

Värt att notera är även att de båda SSP1-scenarierna har negativa koldioxidutsläpp senare under seklet. För att komma dit krävs att koldioxid aktivt fångas in och tas bort från atmosfären med olika tekniker. I dagsläget är sådana tekniker väldigt dyra och det är oklart i vilken utsträckning dessa kommer kunna skalas upp till de nivåerna som föreskrivs i scenarierna.

Den geopolitiska utvecklingen med reaktioner mot globalisering i exempelvis USA, ökade spänningar och krigshandlingar kan leda till att fokus flyttas från åtgärder för att minska koldioxidutsläppen till att säkra energiförsörjning. Detta kan i vissa länder leda till en tillfällig återgång till kolkraft, men även snabba på omställning till icke-fossila energikällor på annat håll. En något sämre ekonomisk utveckling kan även leda till tillfälligt minskade utsläpp genom minskad konsumtion, men även till uppskjutna investeringar i fossilfria energikällor. Samlat sett är det oklart om en fortsatt sådan geopolitisk utveckling leder till en ändrad global uppvärmning.

Sammanfattningsvis är vår bedömning att världen i nuläget ungefär följer scenariot SSP2-4.5 och att ambitionerna som uttryckts i samband med COP26-mötet i Glasgow inte är tillräckliga för att vara förenliga med Parisavtalets tvågradersmål. Vi förväntar oss därför att en passage av 1,5-gradersnivån är i det närmaste oundviklig inom drygt ett decennium, och att också två grader över förindustriell nivå med stor sannolikhet kommer att passeras inom ett halvsekel.

[4] https://www.naturvardsverket.se/amnesomraden/klimatomstallningen/sveriges-klimatarbete/sveriges-klimatmal-och-klimatpolitiska-ramverk/.
[5] https://unfccc.int/news/cop26-update-to-the-ndc-synthesis-report.

Det är svårt att sätta siffror på denna sannolikheten eftersom det beror på den politiska utvecklingen i framtiden. Men ser man endast till de NDCer som formulerats i samband med COP26 rör det sig om runt 90 procent[6]. Framtida politiska åtgärder utöver NDCerna kan minska den siffran drastiskt.

3. Klimatförändringen i stort

Hur kraftig den globala temperaturökningen blir beror på hur kraftig påverkan klimatsystemet utsätts för, samt hur känsligt klimatsystemet är för denna klimatpåverkan (Figur 2). Olika kombinationer av klimatpåverkan och klimatkänslighet kan alltså ge upphov till en rad olika utfall. Det betyder också att ett och samma scenario för framtida klimatpåverkan kommer att resultera i olika stor förändring i olika klimatmodeller. För att kunna jämföra scenarier och modeller för samma grad av global temperaturökning kan därför uppvärmningsnivåer motsvarande en viss uppvärmning relativt förindustriella förhållanden användas. Till exempel kan +2°C nämnas, vilket motsvarar Parisavtalets tvågradersmål.

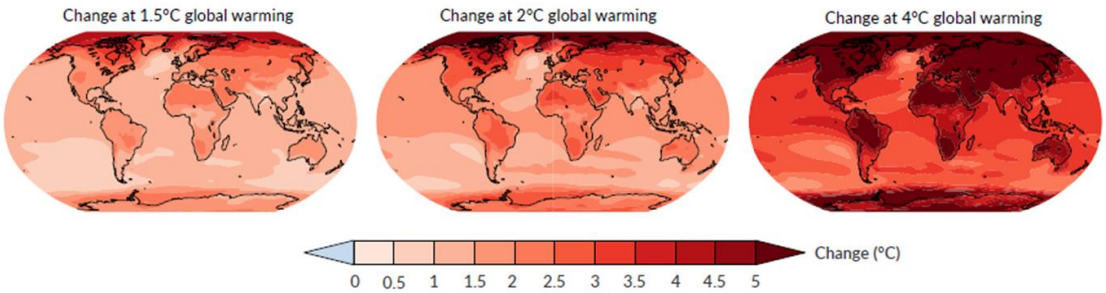
Utöver klimatpåverkan och klimatkänslighet påverkas också uppvärmningen av naturlig variabilitet i klimatsystemet. Detta beror på interna processer som kan bidra till att det under perioder är antingen varmare eller kallare än vad ett långsiktigt medelvärde visar på. Den naturliga variabiliteten är särskilt viktig på regional skala där den till exempel kan bidra till kallare, varmare, blötare eller torrare förhållanden än vanligt under fler år eller årtionden. På så sätt kan naturlig variabilitet leda antingen till förstärkning eller försvagning av den förväntade långsiktiga trenden.

Den globala temperaturökningen uppvisar tydliga geografiska skillnader. I Figur 4 framgår att uppvärmningen är som minst över haven där avdunstning generellt håller nere temperaturökningen. Dessutom skall den ökade värmen i klimatsystemet här fördelas över djupa vattenskikt vilket är särskilt tydligt över delar av södra oceanerna och för ett område sydost om Grönland där blandning av ytvatten sker ner till stora djup. Det senare påverkas av förändringar i havsströmmar, se kapitel om tippningspunkter. Över kontinenterna går det istället desto fortare med en väsentligt kraftigare uppvärmning. Är det dessutom torra förhållanden så kan ökningen vara ännu kraftigare (se till exempel stora områden över Sahara och i södra Afrika). I Europa är temperaturökningen därför större än vad som ges av det globala medelvärdet. Till exempel stiger årsmedeltemperaturen med i medeltal 2,3 grader över landområden i Nordvästeuropa (Norden och de Brittiska öarna)[7] vid 1,5 graders global uppvärmning. På motsvarande sätt med 3 grader vid 2 graders global uppvärmning och 5,5 grader vid 4 graders global uppvärmning.

Allra störst är temperaturökningen över Arktis och i andra områden där snö och is försvinner eller minskar i omfattning vilket är viktigt också för Sveriges del. Det här beror på en s.k. återkopplingsmekanism (eller förstärkningseffekt[8]). När snö och is minskar i utbredning blir ytan

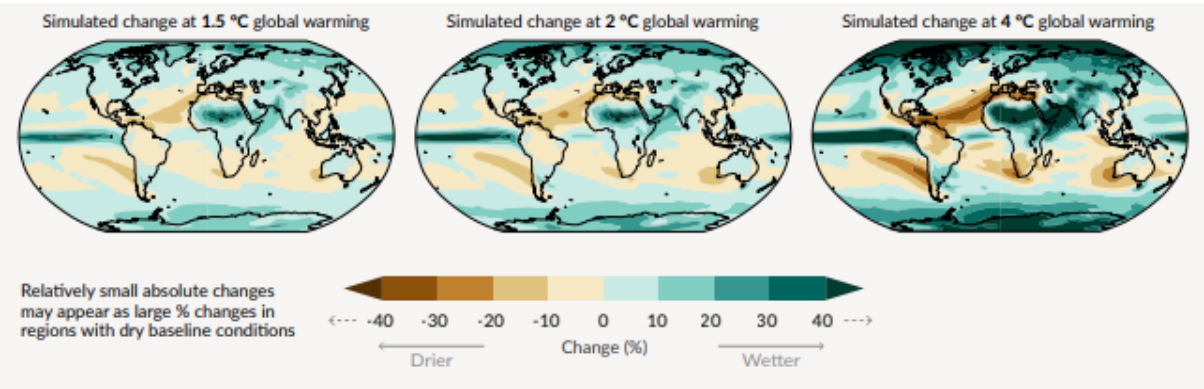
[6] TS4.1 anger 2,4 till 3,5 graders uppvärmning från NDCs innan COP26, och löften avgivna i samband med mötet minskade uppvärmningen med 0,3 grader vilket ger en nedre statistisk gräns strax över 2 grader, https://report.ipcc.ch/ar6wg3/pdf/IPCC_AR6_WGIII_FinalDraft_TechnicalSummary.pdf
[7] Siffrorna här är tagna från IPCCs interaktiva atlas, se https://interactive-atlas.ipcc.ch/.
[8] Återkopplingsmekanismer kan också motverka uppvärmningen och då handlar det alltså istället om försvagning.

inte lika vit och reflekterande vilket gör att mer av den infallande solstrålningen kan tas upp i systemet och bidra till ökad temperatur. Dessutom försvinner is-/snötäckets isolerande egenskaper varvid värme från underlaget (hav/mark) kan tillföras atmosfären vilken därför inte blir lika kall. Ytterligare en mekanism handlar om ändring i atmosfärens vertikala temperaturfördelning till följd av den förstärkta växthuseffekten.



Figur 4. Temperaturökning (°C) vid olika grad av global uppvärmning. Figuren till vänster visar uppvärmningen då den globala medeltemperaturen ökat med 1,5°C jämfört med förindustriella förhållanden, mittenfiguren +2°C och den längst till höger vid +4°C. Från IPCC (2021).

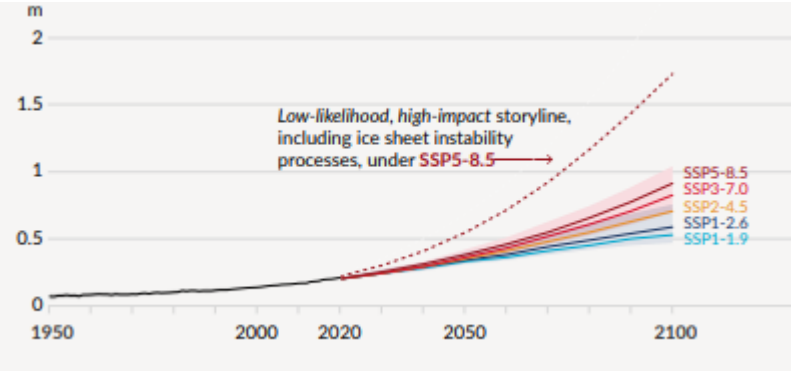
Då varm luft kan innehålla mer vattenånga än kall luft ökar avdunstningen från hav, mark och vegetation. De större vattenmängderna som på så sätt tillförs atmosfären leder också till större nederbördsmängder. Det här betyder att framför allt nederbörd i form av regn ökar. Men, i tillräckligt kalla områden som i Antarktis eller Arktis på vinterhalvåret, eller på hög höjd i olika bergsområden, kan det också bli frågan om ökande snöfallsmängder. Den ökade avdunstningen bidrar också till att torka kan bli vanligare. Generellt kan man säga att nederbörden ökar där det redan idag faller relativt mycket nederbörd och att den minskar där det är torrt, se Figur 5. Det betyder också att extremhändelser som kraftigt regn och skyfall, men också utbredd torka, blir vanligare och mer intensivt. Den globala uppvärmningen leder på så sätt till ett intensivare hydrologiskt kretslopp.



Figur 5. Nederbördsändring (i %) vid olika grad av global uppvärmning. Figuren till vänster visar uppvärmningen då den globala medeltemperaturen ökat med 1,5°C jämfört med förindustriella förhållanden, mittenfiguren +2°C och den längst till höger vid +4°C. Från IPCC (2021).

De regionala skillnaderna i uppvärmning (Figur 4) betyder att temperaturkontraster till exempel mellan pol och ekvator eller mellan kontinenter och hav ändras när klimatet blir varmare. Eftersom de kontrasterna är viktiga för atmosfärens lufttrycksfördelning, vilka styr storskaliga vindar och cirkulationsmönster i atmosfären, kan det också påverka såväl frekvens och intensitet i högtryckssituationer och för lågtryck på högre latituder som frekvens och intensitet hos tropiska cykloner på låga latituder. Generellt väntas en viss förskjutning av mellanbreddgradernas lågtrycksbanor mot polerna samtidigt som det är osäkert vad som kommer att hända med intensitet och frekvens av lågtrycken. Däremot är det mycket tydligt att nederbörden i samband med lågtrycken väntas öka i ett allt varmare klimat. Detsamma gäller för de tropiska cyklonerna, där den senaste forskningen också pekar på att det totala antalet cykloner kan komma att minska men att andelen av de kraftigaste cyklonerna ökar.

Även haven påverkas av den pågående klimatförändringen. Haven har under de senaste decennierna tagit upp emot 91% av den extra värmen som tillförts klimatsystemet på grund av den ökande växthuseffekten. Det betyder att temperaturen i haven stiger vilket i sin tur leder till termisk expansion då varmare vatten har lägre densitet, och därmed tar större plats, än kallare vatten. Tillsammans med ökad avsmältning av glaciärer och de stora landisarna medför detta att den globala havsnivån stiger. Sedan 1900 har havsnivån ökat med i genomsnitt ca 2 decimeter. I dagsläget är ökningstakten ungefär 3,7 mm per år. Vad som kommer att hända med havsnivån i framtiden beror till mycket stor del på hur stora de framtida utsläppen blir, vilket illustreras i Figur 6. För kraftig klimatpåverkan ökar osäkerhetsgraden och den streckade linjen visar att det vid scenariet med kraftigast klimatpåverkan inte går att utesluta väsentligt högre havsnivåökning. Figur 6 slutar vid 2100, men det gör inte havsnivåökningen som beräknas fortsätta under många århundraden. Det finns osäkerheter kring hur snabbt Grönlandsisen och delar av den Antarktiska isen kan smälta av, mycket beroende på möjliga tippningspunkter (se kapitel om tippningspunkter). Även hur mycket av isen som med tiden kan smälta bort är osäkert, men paralleller till andra tidigare perioder i jordens historia med högre temperaturer vittnar om flera meter högre havsnivå. Till exempel var det under Eem, den senaste värmeperioden för omkring 125 000 år sedan, med temperaturer ungefär som idag (dvs. någonstans mellan 0,5 och 1,5°C över nivån under 1850-1900) mellan 5 och 10 meter högre havsnivå än idag. Att komma dit tar dock tusentals år, och är något som troligen kommer att ske oavsett om man får ner utsläppen till noll eller ej. Enligt IPCC (2021) anges att den genomsnittliga globala havsnivån under de kommande 2000 åren kan komma att stiga med omkring 2-3 meter om den globala uppvärmningen begränsas till 1,5°C, 2-6 meter om uppvärmningen begränsas till 2°C, och 19-22 meter vid en global uppvärmning på 5°C, för att sedan fortsätta att stiga under efterföljande årtusenden.



Figur 6. Ökning i global havsnivå fram till 2100 under scenarier för olika klimatpåverkan. För kraftig klimatpåverkan ökar osäkerheten och den streckade linjen visar att det vid scenariot med kraftigast klimatpåverkan inte går att utesluta väsentligt högre havsnivåökning. IPCC (2021).

Precis som i atmosfären kan det även i havet vara extra varmt, eller kallt för den delen, under perioder till följd av naturliga variationer. Högre vattentemperaturer betyder därför en större sannolikhet för marina värmeböljor. De högre temperaturerna betyder också att utbredningen av havsis och sjöis minskar. I Arktis räknar man nu med att en första mer eller mindre helt isfri sommar kommer att infalla före 2050 oavsett vilket av de fem scenarierna ovan som utvecklingen kommer att ligga närmast.

De ökade koldioxidhalterna i atmosfären betyder också att mer koldioxid löses in i havsvattnet. Av den koldioxid som människan tillfört atmosfären har ungefär en fjärdedel tagits upp i haven där det medfört en ökande grad av försurning av havsvattnet. Eftersom ytterligare en fjärdedel har tagits upp av vegetation på land har atmosfärens halt ökat mindre än om all koldioxid hade stannat kvar där. På lång sikt är de här koldioxidupptagen i hav och vegetation mycket viktiga för vilken respons klimatsystemet får för den ökade graden av klimatpåverkan. Eventuella tippningspunkter har diskuterats i samband med avskogning av regnskog i Amazonas (se kapitel om tippningspunkter nedan).

4. Effekter av klimatförändringen

Den pågående klimatförändringen har redan gett upphov till en rad effekter som påverkar både naturmiljö och samhälle i stora delar av världen. Generellt visar den senaste IPCC-rapporten om Effekter, Anpassning och Sårbarhet (IPCC, 2022a) på ett starkare samband mellan effekter och människans klimatpåverkan, delvis till följd av att det blivit varmare under tiden som gått mellan rapporterna, men också till följd av att kunskapsläget blivit bättre. Ofta är effekterna en följd av flera olika orsaker varav klimatförändringen är en. I rapporten pekas på en lång rad effekter, t ex ökande antal värmerelaterade dödsfall, mer omfattande problem med torka och bränder för världens skogar, blekning av korallrev, större skadeverkningar av tropiska cykloner bland annat i kombination med högre havsnivå. Rapporten tar upp att den globala uppvärmningen lett till skador på ekosystem i form av minskad motståndskraft och försämrad förmåga till anpassning för klimatförändringar och också i ökande grad med påverkan på den biologiska mångfalden vilket bland annat innebär irreversibla förluster av djur- och växtarter. I takt med uppvärmning och ändrade säsonger har många arters utbredningsområden börjat förflyttas mot polerna och uppåt mot högre höjd i terrängen.

De observerade effekterna på naturmiljö och ekosystem har också tydliga negativa effekter på samhället. Klimatförändringarna har saktat ner den utveckling mot högre produktivitet i jordbruket som skett under de senaste 50 åren. Förändringarna i haven har haft negativ inverkan på vattenbruk och fiske i en del områden. Till följd av dessa förändringar är miljontals människor utsatta för osäkerhet kring produktion och tillgång till livsmedel. Även andelen människor som upplever brist på vatten har ökat och idag är det över hälften av jordens befolkning som upplever vattenbrist åtminstone under någon del av året vilket delvis beror på klimatrelaterade faktorer. Även hälsoeffekter har observerats: till exempel fler värmerelaterade dödsfall; större inslag av vektorburna sjukdomar; och sjukdomar relaterade till dricksvatten och mat. Många av de här effekterna är extra stora i stadsmiljöer där infrastruktur och trångboddhet förstärker och förvärrar problemen.

Påverkan på jordens befolkning ser olika ut i olika regioner beroende på i vilken grad dessa exponeras för klimatförändringen men också beroende på hur sårbart samhället är och i vilken grad det är klimatanpassat. Vissa positiva ekonomiska effekter av klimatförändringen har uppmärksammats i regioner där energibehovet minskat eller där jordbruks- och turismsektorn sett konkurrensfördelar gentemot andra områden. Ekonomisk skada kopplad till klimatförändringen har uppmärksammats i klimatexponerade sektorer med inverkan på jord- och skogsbruk, fiske, energi och turism. Kombinationen av klimat- och väderrelaterade händelser, som till exempel tropiska cykloner, med hög sårbarhet och utsatthet har visats kunna bidra till minskad ekonomisk tillväxt. IPCC (2022a) skattar att någonstans mellan 3,3 och 3,6 miljarder människor lever i en miljö som i hög grad är sårbar för klimatförändring. På ett generellt plan är det de mest sårbara samhällena som drabbats hårdast.

Vid ytterligare uppvärmning väntas effekterna bli mer utpräglade samtidigt som andra effekter kan framträda. Här spelar varje tiondels grad av global temperaturökning en roll. Som beskrivs tidigare kommer världen inom något årtionde att ha sett en 1,5 graders uppvärmning jämfört med slutet av 1800-talet och ytterligare ett par decennier senare nås 2 grader. Det finns alltså all anledning till att inför de närmaste decennierna förbereda för vad den fortsatta globala temperaturökningen från dagens 1,2 grader upp mot 2 grader eller mer kan komma att innebära.

Skillnaderna i klimatförändringarna som beskrivs ovan är olika för olika regioner. Då effekterna utöver vad som beror på själva klimatförändringen också bestäms av grad av sårbarhet och motståndskraft för respektive samhälle eller specifik naturmiljö som påverkas slår klimatförändringen olika hårt på olika ställen. Forskning visar också att hastigheten med vilken förändringen sker är betydelsefull, ett snabbare förlopp ökar riskerna jämfört med en långsammare utveckling. Det är också klart att en utveckling med ett temporärt överskridande av en global uppvärmningsnivå medför större risk än om utvecklingen bromsar in och inte överskrider gränsen. Klimatanpassning lyfts också fram som ett viktigt sätt att minska riskerna med klimatförändringen. Det är också tydligt att klimatanpassning underlättas av att parallellt, eller kanske i första hand, arbeta med att begränsa klimatpåverkan.

Graden av påverkan på ekosystem och biodiversitet ökar med ökad uppvärmning och rapporten pekar specifikt på tropiska korallrev som ett av de mest utsatta ekosystemen som väntas bli akut hotade vid 1,5 graders uppvärmning för att vid två graders uppvärmning närma sig gränsen för utrotning. IPCC (2022a) tar också upp att många andra naturliga ekosystem i haven och längs kusterna riskerar irreversibla förluster om temperaturökningen överskrider

två graders global uppvärmning. För marina områden pekar man också särskilt på Arktis där minskad havsis och högre vattentemperaturer kommer att ändra förutsättningarna för det liv som finns där idag. En annan aspekt av påverkan på den marina miljön är den indirekta påverkan på människan då vi utnyttjar haven till fiske och vattenbruk. Ökad risk för kraftigt minskade fångster och möjlighet att utnyttja haven som en resurs är en konsekvens i sammanhanget.

Fortsatt stigande havsnivåer i kombination med stor befolkningstillväxt och ökad grad av urbanisering i låglänta kustnära områden väntas leda till en stor ökning av antalet människor som är exponerade för höga havsnivåer under de närmaste decennierna. Jämfört med år 2000 (54 miljoner) nämner IPCC-rapporten en ungefärlig fördubbling till år 2030 (108-116 miljoner) och ytterligare en fördubbling till år 2060 (190-245 miljoner). För 2050 görs bedömningen att ungefär en miljard människor kommer att vara exponerade för en rad olika kustspecifika klimatrisker vilket bland annat inkluderar höga havsnivåer.

På ett globalt plan väntas jordbrukssektorn missgynnas mer om uppvärmningen når två grader jämfört med 1,5 grader. Detta gäller särskilt på lägre latituder samt i områden som får mer utbredda problem med vattentillgång. Exempel som pekas på är: Sahel-området; södra Afrika; Amazonas; men även Medelhavsområdet och centrala Europa. Mer utbredd torka och problem med vattentillgång är ett ökande problem redan idag och det förväntas öka ytterligare i många subtropiska områden. Här skall dock nämnas att många förändringar i nederbördsklimatet är osäkra i sina detaljer och det kan vara stora geografiska skillnader mellan och inom olika regioner.

Fortsatt uppvärmning väntas leda till större problem relaterade till människans försörjning och hälsa. Till exempel anger IPCC-rapporten ytterligare cirka 250 000 årliga dödsfall till följd av malaria, värme, undernäring och diarrésjukdomar hos barn till 2050 jämfört med 1961-1990 under scenarier med medelhög klimatpåverkan. Vid slutet av seklet, under scenarier med höga utsläpp, anges siffran nio miljoner klimatrelaterade dödsfall per år. För människans samhällen är bilden tydlig där de mest sårbara och utsatta grupperna påverkas allra mest. Ursprungsbefolkningar och andra sårbara samhällen som är beroende av jordbruk, fiske eller skogsbruk i olika torra områden, vissa kustregioner eller i Arktiska miljöer pekas särskilt ut. Antalet människor som riskerar hamna i fattigdom eller missgynnas väntas öka i en del befolkningar till följd av fortsatt uppvärmning. I vilken grad detta sker styrs också i hög grad av den socioekonomiska utvecklingen. IPCC-rapporten pekar på att antal människor i extrem fattigdom kan öka från dagens cirka 122 miljoner till 700 miljoner år 2030 i ett scenario med stor ojämlikhet (SSP4).

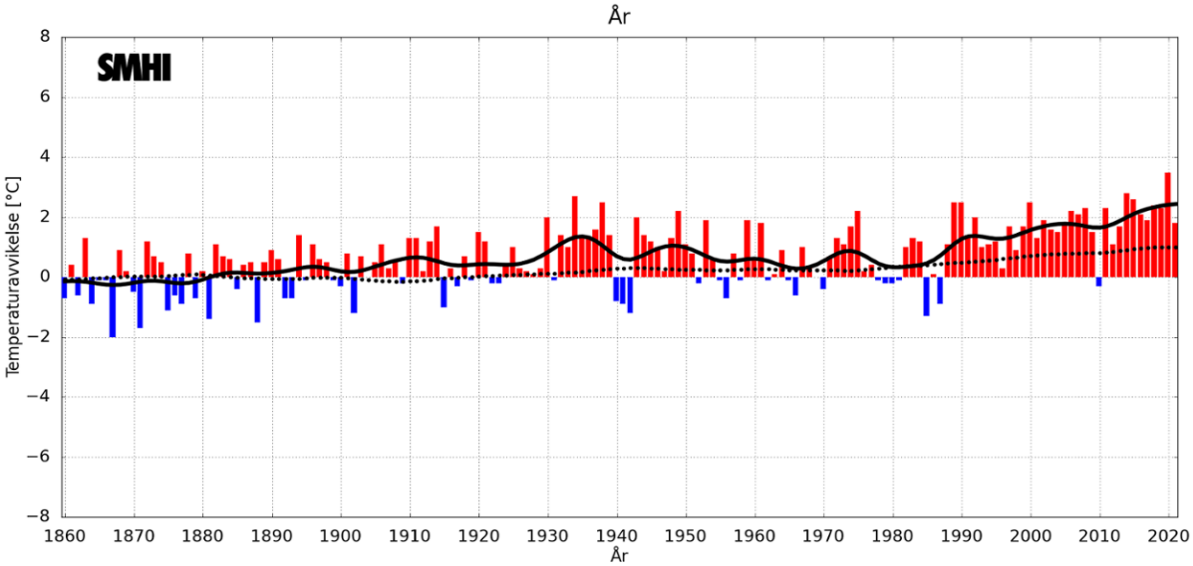
Effekter av klimatförändringarna kan komma att bidra till ökad migration och fler klimatflyktingar. Befolkningstäthet, socioekonomisk utveckling och anpassningsförmåga hos exponerade grupper lyfts fram som viktiga faktorer i sammanhanget. Höga temperaturer, särskilt i kombination med hög luftfuktighet, väntas leda till ökade hälsorisker i många regioner på lägre latituder. Problemet är extra uttalat för stadsmiljöer där så kallade urbana värmeöar bidrar till att driva upp temperaturen ytterligare. Särskilt vid höga uppvärmningsnivåer i kombination med scenarier där den socioekonomiska utvecklingen är långsam är detta något som potentiellt kan komma att spela roll. Just osäkerheter kring socioekonomisk utveckling är en viktig anledning till osäkerhet kring hur många människor som kan komma att tvingas flytta till följd av klimatrelaterade extremhändelser. IPCC-rapporten pekar här på siffror mellan omkring 30

miljoner och drygt 140 miljoner omkring år 2050 för Central- och Sydamerika, Afrika söder om Sahara och Södra Asien. I takt med ökad uppvärmning, och särskilt vid högre uppvärmningsgrad, ökar behovet av planerad omlokalisering av samhällen, särskilt i kustnära områden och för små önationer.

5. Ett regionalt perspektiv med fokus på Sverige

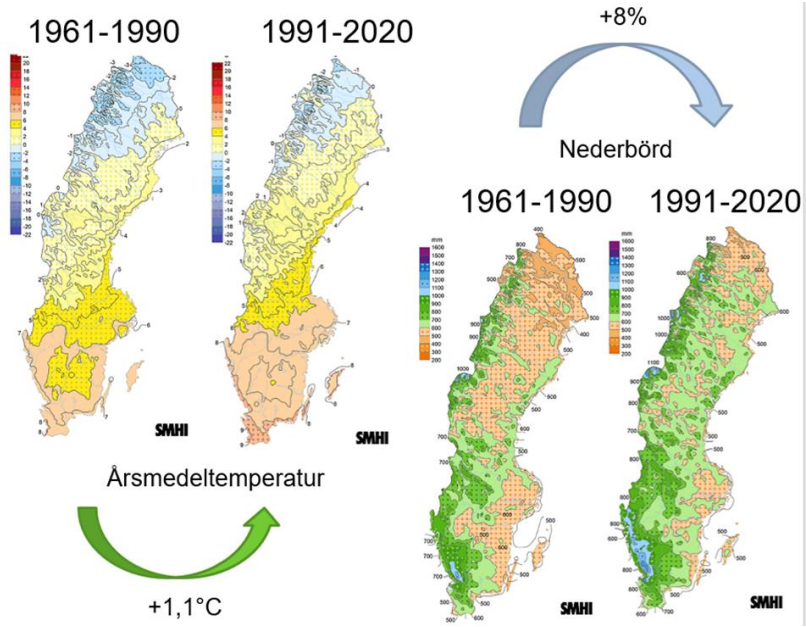
De förväntade klimatförändringarna i Nordeuropa hänger ihop med det mer storskaliga globala mönstret som diskuteras ovan. I stort handlar det för svensk del om: ett fortsatt allt varmare klimat med mer intensiva värmeböljor; varmare vintrar; i medeltal större mängd nederbörd och mer intensiva skyfall och, när det är tillräckligt kallt, kraftigare snöfall; men även större risk för värmeböljor och torka under sommarhalvåret.

Klimatet i Sverige är redan under stark förändring. Sedan slutet av 1800-talet har uppvärmningen varit ungefär dubbelt så kraftig som ökningen i globalt medelvärde (Figur 7). Sveriges medeltemperatur för 1991-2020 var 1,79 grader högre än motsvarande för 1861-1890. Det globala datasetet HadCRUT5[9] ger motsvarande 0,90 graders skillnad. Det är uppenbart att de senaste decennierna varit väsentligt varmare än tidigare perioder även om det var relativt varmt också under 1930-talet. Figur 8 visar i mer detalj hur de stora förändringarna under de senaste 60 åren fördelats över landet för årsmedeltemperatur och årsnederbörd. Temperaturmässigt är det till exempel tydligt hur temperaturzonerna flyttas norrut och i viss mån uppåt i höjdterrängen. För nederbörd syns en ökning över i stort sett hela landet. I de södra delarna antyds en förstärkning av skillnaderna mellan västra och östra delarna av landet medan det längst i norr är frågan om kraftiga ökningar också längre i öster.



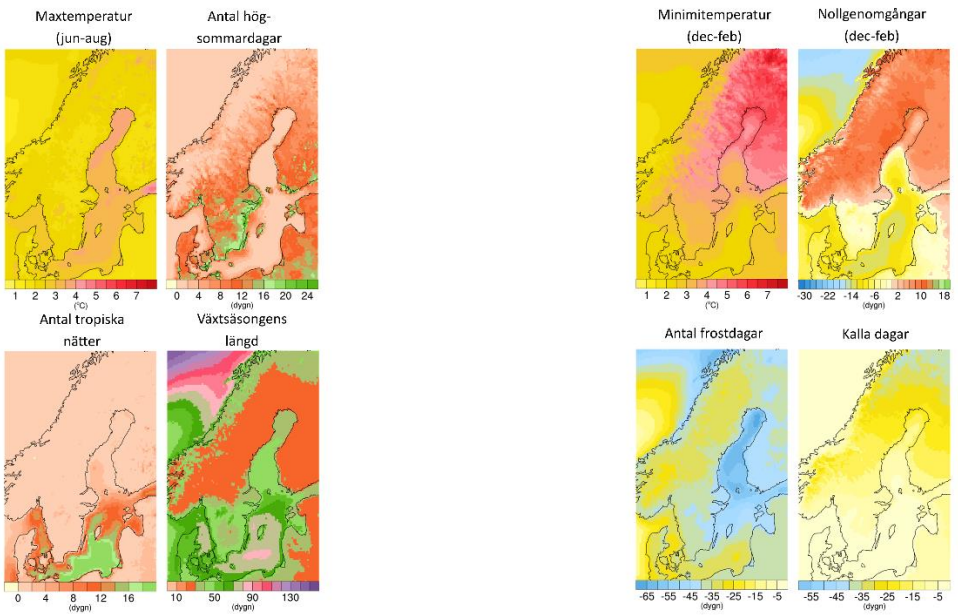
Figur 7. Medelvärde av årsmedeltemperatur från 35 svenska stationer från 1860 till 2021. Staplarna anger avvikelser jämfört med medelvärdet för 1860-1900. Den heldragna svarta linjen visar på ett utjämnat förlopp motsvarande ungefär tioårsmedelvärden. Den streckade linjen visar motsvarande utjämnade förlopp i den globala medeltemperaturen. Diagrammet är hämtat från SMHIs sammanställning om årets väder 2021[10].

[9] https://www.metoffice.gov.uk/hadobs/hadcrut5/.
[10] https://www.smhi.se/klimat/klimatet-da-och-nu/arets-vader/aret-2021-kraftiga-sommarregn-meninga-stormar-1.178449.



Figur 8. Skillnad i årsmedeltemperatur och årsnederbörd mellan de två normalperioderna 1961-1990 och 1991-2020. Figurer från SMHI.

För framtiden pekar scenarierna på fortsatt förskjutning av säsongerna där vintersäsongen fortsätter bli allt kortare samtidigt som sommarsäsongen blir längre. Utöver att säsongerna förskjuts blir de också varmare (Figur 9). Uppvärmningen är tydlig under alla säsonger men mest under vinterhalvåret. Den starka kopplingen mellan temperaturklimat och snö under vintern gör också att kalla extremer blir allt mer sällsynta då de som regel kräver snötäckt mark. På vintern är det just minimitemperaturer som ökar allra mest vilket betyder mindre skillnader mellan varmt och kallt under vintern. På sommaren ökar sannolikheten för värmeböljor och varma extremer och särskilt vid högre uppvärmningsnivåer väntas större skillnader mellan kallt och varmt. Den här typen av förändringar med uppvärmning under alla säsonger och ändrade förhållanden mellan varma och kalla situationer har redan observerats vilket diskuteras för skillnader mellan normalperioderna 1961-1990 och 1991-2020 i Kjellström et al. (2021a).

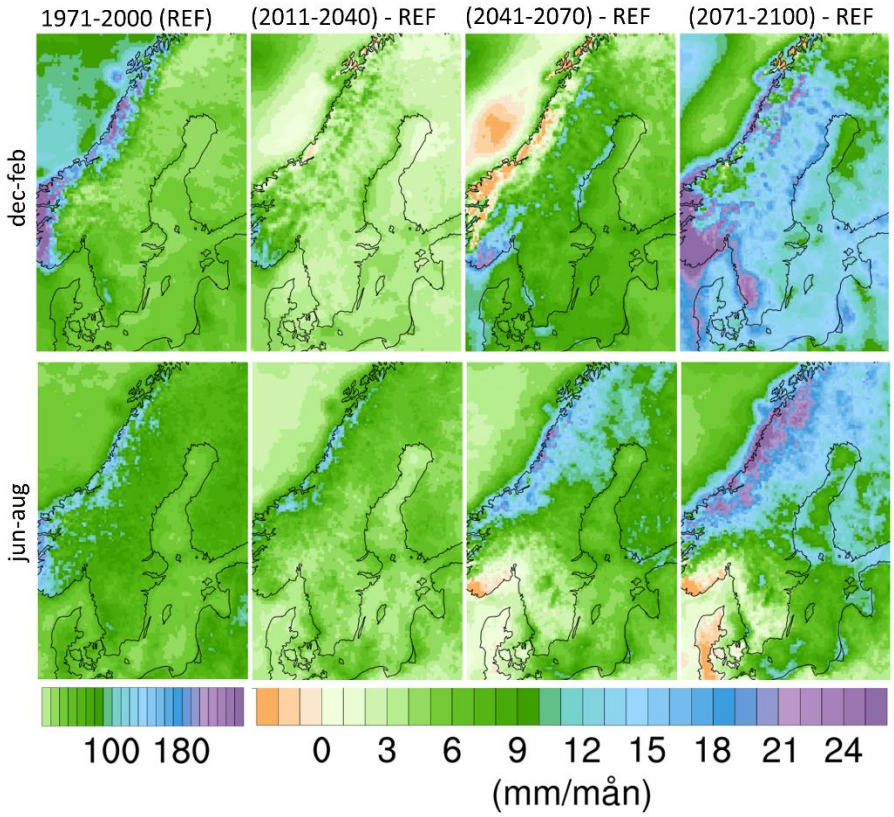


Figur 9. Olika aspekter av klimatförändringen i Sverige från 1971-2000 till 2041-2070 under RCP4.5 baserat på ett stort antal regionala klimatmodeller. Den vänstra delfiguren visar på förändringar under sommarhalvåret: medelvärdet av sommarmånadernas (juni-augusti) dygnsmaximumtemperaturer; antal högsommardagar (maxtemperaturen går över +25°C); antal tropiska nätter (dygn då minimitemperaturen inte går under +20°C); vegetationsperiodens längd (definierat som den sammanhängande perioden med dagar med dygnsmedeltemperatur över +5°C). Den högra delfiguren visar på samma sätt förändringar under vinterhalvåret: medelvärdet av vintermånadernas (december-februari) minimitemperatur; antal dagar med nollgenomgångar (dygn då temperaturen är över 0°C under del av dygnet och under 0°C under en del); antal frostdagar (då temperaturen inte går över 0°C); antal kalla dygn (då temperaturen är under -7°C). Figurer modifierade från Kjellström et al. (2022).

Som nämnts ovan intensifieras det hydrologiska kretsloppet i takt med ökad global uppvärmning. För svensk del innebär det generellt ökad nederbörd. Den allt varmare atmosfären kan innehålla mer vattenånga vilket betyder att både enstaka regnskurar och större sammanhängande regnområden i samband med lågtryck- och frontsystem kan avge mer nederbörd. Scenarierna pekar på mer nederbörd främst under vinterhalvåret (Figur 10). Under sommaren är det lite mer osäkert vad som kan komma att ske. I sydligaste Europa väntas minskad nederbörd och allra längst i norr ökad nederbörd. Exakt var gränsen går mellan ökning respektive minskning är oklar. Enligt en del klimatmodeller hamnar den lite längre norrut vilket betyder att södra delarna av Sverige kan få mindre sommarnederbörd än idag, i andra hamnar gränsen söder om Östersjön vilket betyder mer sommarnederbörd i hela Sverige. I medeltal visar klimatmodellerna som används i SMHIs klimatscenariotjänst[11] på relativt små förändringar längst i söder (Figur 10). Även i fall då modeller visar viss ökning kan dock de högre temperaturerna, och därmed den högre graden av avdunstning, ge större problem med torka under nederbördsfattiga somrar. Vi noterar att detta gäller även längre norrut i landet där nederbörden inte väntas minska. Liksom på global skala kan vi alltså förvänta oss större skillnader

[11] https://www.smhi.se/klimat/framtidens-klimat/fordjupade-klimatscenarier/met/sverige/medeltemperatur/rcp45/2071-2100/year/anom.

mellan vått och torrt.



Figur 10. Förändring i nederbörd (mm/månad). Medelvärde över ett stort antal regionala klimatmodeller för referensperiodens (1971–2000) klimat (till vänster). I den högra delen av bilden visas skillnader över tid mellan referensperioden och 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)

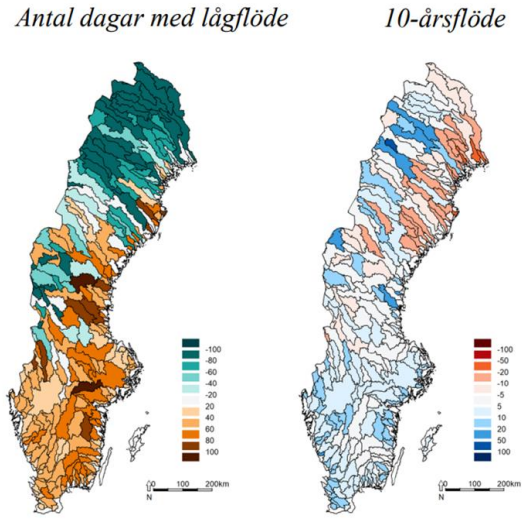
Scenarierna pekar tydligt på att snö och is lägger sig allt senare på hösten eller på vintern. I söder blir det vanligare med vintrar helt utan snö och is och i norr blir det vanligare med inslag av milda perioder med snösmältning och regn även under vintern. Även om framtida nederbörd förväntas öka kommer det därför mestadels inte att bli mer snö på marken även om enstaka snöfall kan bli mer intensiva. På högre höjd i fjällkedjan där klimatet fortfarande kommer att vara tillräckligt kallt kan den ökade nederbörden möjligen ge mer snö på marken under vintern än idag.

Det finns en lång rad av konsekvenser för Sverige av de olika klimatförändringssignalerna som tas upp ovan. Förskjutning i vegetationsperiodens längd med fortsatt längre sommar och kortare vintrar har en direkt konsekvens för såväl naturmiljö som för de areella näringarna. Konsekvenser av ändringar i snö- och is under vinterhalvåret handlar bl a om förutsättningar för rennäring, skid- och vinterturism och vinterväghållning (inklusive isvägar). Bättre förutsättningar för att odla under en längre tid på året behöver ställas mot risken av ökade problem såväl för torka på sommaren under torra år som för kraftiga skyfall och översvämningar. Klimatanpassningsåtgärder, som exempelvis val av tåliga grödor och skogsplantor, hantering av vattenfrågor mm, kan bidra till att minska skadeverkningar och möjliggöra bättre utnyttjande.

Ett närliggande problem handlar om att olika sjukdomar och angrepp av skadedjur kan få en allt större effekt. I Tyskland har man sett att en längre sommarsäsong regionalt har lett till att granbarkborren kunnat reproducera sig två gånger per sommar istället för bara en gång vilket i sin tur leder till en stor tillväxt och angrepp på granskogar som regionalt helt kan dö ut. Även i Sverige finns ett ökande problem med granbarkborrar och då det under lång tid planterats i huvudsak gran finns potential för stor skadeverkan under närmaste decennierna.

Ökad nederbörd och större risk för intensiva skyfall ökar risken för översvämningar. För varje grads temperaturökning ökar luftens förmåga att innehålla vattenånga med omkring 7% vilket betyder att en temperaturökning om 2-3 grader generellt motsvarar 15-20% kraftigare skyfall. Exakt hur stora de här förändringarna kan komma att bli är osäkert. Dagens relativt grovt upplösta klimatmodeller kan inte fullt ut representera kraftiga regnskurar och i modellsimuleringar med ännu mer högupplösta modeller har det visat sig att skurarna, utöver att vara bättre representerade i dagens klimat (Belušić et al., 2020), ibland uppvisar ännu kraftigare ökning i intensitet jämfört med vad mer grovt upplösta modeller visar (Médus et al., 2022). Det här är en viktig begränsning i dagens klimatscenarier och något som potentiellt kan ha stora konsekvenser för klimateffekter och klimatanpassningsarbete (Kjellström et al., 2022).

Scenarierna visar också på minskat snötäcke i kombination med mer regn på vintern (Kjellström et al., 2021b). Det här ändrar de hydrologiska förutsättningarna med minskad vårflod på många håll i norra Sverige samtidigt som flödena i älvarna kan bli kraftigare under vintrarna (Figur 11). För vattenkraftsindustrin kan ett sådant mer jämnt förlopp över vinterhalvåret vara gynnsamt. I vattendrag i de södra delarna av landet, som inte är lika kraftigt präglade av snösmältning, förväntas översvämningsrisker öka.



Figur 11. Förändring i flöde i ett antal svenska vattendrag från 1971-2000 till 2041-2070 under RCP4.5. Till vänster visas hur antalet dagar med lågflöde (medelvärdet av varje års lägsta dygnsvattenföring under referensperioden (1971-2000)) förväntas öka i södra delarna av landet medan istället en minskning syns i norr. I den högra delfiguren visas att 10-årsflöden (flöden som i genomsnitt inträffar en gång per 10 år under referensperioden 1971-2000) ökar i de flesta vattendrag i landet med undantag av vattendrag i norra Sverige förknippat med att vårfloden väntas minska i ett varmare klimat med kortare vintersäsong.

Havsnivåhöjningen kommer främst att påverka de södra delarna av Sverige. I dagsläget, med en global havsnivåhöjning om ca 3,7 mm per år, är landhöjningen i större delen av Sverige fortfarande större. Det här betyder att havsytan relativt sett sjunker för hela Norrlandskusten och Svealandskusten och längst i norr på Västkusten. Det är först söder om en linje ungefär mellan Göteborg och Norrköping som de 3,7 mm överstiger landhöjningen. Längst i söder, i Skåne, där landhöjningen är liten, sker alltså redan idag en tydlig höjning av havsytans nivå med konsekvenser som ökad erosion längs stränder och potentiellt skador på infrastruktur och bebyggelse längs med kusterna.

Trots stor klimatförändring och en lång rad konsekvenser för olika områden är de förväntade effekterna av den globala uppvärmningen på det svenska samhället relativt begränsade i ett globalt perspektiv. Med data för 2019 visas i IPCC-rapporten om Effekter, Anpassning och Sårbarhet (IPCC, 2022a) att Norra Europa är en av de regionerna i världen som, tillsammans med bland annat Australien och Kanada, bedöms vara minst sårbara. Ett undantag från den begränsade sårbarheten gäller för renskötande samer där klimatförändringen i kombination med en rad andra faktorer har stor påverkan redan idag.

6. Om klimatanpassning

Åtgärder för klimatanpassning kan bidra till att minska skadeverkningar och utnyttja möjligheter till följd av klimatförändringen. IPCC (2022a) pekar på att arbetet med klimatanpassning går framåt och att klimatanpassningsåtgärder kan ha en positiv inverkan. Rapporten visar också på stora skillnader mellan olika delar av världen i hur långt arbetet kommit och det är tydligt att det finns ett stort gap mellan vad som bedöms vara nödvändiga åtgärder och vad som faktiskt gjorts.

Även i Sverige finns stora skillnader mellan olika delar av landet och mellan olika samhällssektorer. Även om klimatanpassningsåtgärder har genomförts i någon utsträckning så är de långt ifrån tillräckliga för att hantera det klimat och den förändring som vi ser idag.
Expertrådet för klimatanpassning pekar i sin första utvärderingsrapport till regeringen på att det svenska arbetet med klimatanpassning behöver påskyndas och att omfattande åtgärder behöver genomföras (Schultze et al., 2022). Expertrådet trycker också på att åtgärder inte kan skjutas på framtiden och att anpassningsåtgärder istället behöver genomföras tidigt för att undvika stora framtida kostnader. Konkreta anpassningsåtgärder när det gäller pågående stadsutveckling och investeringar i infrastruktur kan behöva göras för att undvika framtida kostnader för samhälle och enskilda fastighetsägare. Rådet föreslår att arbetet med klimatanpassning inriktas mot behov av stärkta formuleringar i klimatanpassningsstrategin och i olika mål i politik, strategier och planering från nationell till regional och lokal nivå. Rådet pekar också på att de prioriterade utmaningarna för klimatanpassning behöver integreras i större övergripande prioriterade riskområden, i rapporten lyfts tre sådana utmaningar fram: (1) Fysisk säkerhet och markanvändning; (2) Vattensäkerhet; (3) Matsäkerhet. Vidare pekas på att arbetet med klimatanpassning bör integreras i klimatpolitiska ramverk då det finns en stark koppling mellan klimatanpassning och arbetet med att minska klimatpåverkan. Utöver åtgärder för att stärka anpassningsarbetet i Sverige trycker man också på att stärka hänsynen till transnationella klimateffekter i nationella strategier. Detta särskilt med tanke på den ofta mycket större sårbarheten för klimateffekter i andra delar av världen som diskuteras ovan.

Expertrådet har gjort bedömningen att det inte går att göra en traditionell kostnads-/nyttoanalys av klimatanpassningsåtgärder på nationell nivå för Sverige. Däremot ges en del exempel på storleken av kostnader för risker i rapportens sektorsvisa kapitel. Exempelvis omnämns faktiska kostnader för jordbrukssektorn till följd av den exceptionella värmeböljan med tillhörande torkan under sommaren 2018 (totalkostnad mellan 6 och 10 miljarder motsvarande kostnader för arbete och kapital); ökade kostnader i samband med en skyfall och kraftig översvämning (omkring 100 mm nederbörd) i närheten av Hallsberg (medelförlust på drygt 900 000 kr per gård); kostnader i samband med ökande angrepp av skadegörare (exv. mördarsnigel som uppskattas kunna ge kostnader för 100 000-tals kronor per säsong för enskilda större jordbruk). Kostnader för åtgärder tas också upp och här rapporteras till exempel en kostnad på omkring en miljard kronor per år för att öka takten på täckdikning av åkermark. I ett annat exempel från vattensektorn uppskattas att det behövs drygt 4 miljarder kronor för att åtgärda bristande konnektivitet mellan vattendrag för att stärka den biologiska mångfalden genom att underlätta spridning mellan vattendrag då arternas utbredningsområden påverkas. Flera liknande exempel finns i rapporten, men en samlad överblick över kostnader för till följd av klimatrelaterade händelser eller anpassningsåtgärder saknas.

Vidare föreslår Expertrådet en lång rad åtgärder vilka skulle skapa förutsättningar för att ge klimatanpassningsarbetet en ordentlig skjuts framåt. Åtgärder handlar om: (1) Stärkt kunskapsuppbyggnad bland annat för uppföljning men också för detaljerade klimatscenarier och effektstudier; (2) Övergripande analyser av finansieringsbehov inom ett brett spektrum av sektorer; (3) Stärka klimatanpassning i finansiella ramverk och analyser; (4) Stärka incitament för klimatanpassning kopplat till finansiell verksamhet både i Sverige och i utvecklingsländer med svenskt bistånd; (5) Tydliggöra ansvar på nationell, regional och lokal nivå för såväl offentliga som privata aktörer; (6) Ta fram länsövergripande planer för åtgärder som kan kräva samverkan och gränsöverskridande åtgärder; (7) Ställ krav på kommuner och regioner kring initiering, stödjande och uppföljning av klimatanpassningsarbetet; (8) Säkerställ finansiering av klimatanpassningsarbetet; samt (9) Se över lagstiftningen i området.

Som framgår av ovanstående så innebär klimatanpassning av samhället ett stort arbete och att det finns mycket att göra på området. Expertrådet har lämnat in över 170 olika förslag på åtgärder som de anser vara nödvändiga för att främja Sveriges klimatanpassningsarbete. Åtgärderna är antagligen mycket olika kostsamma att genomföra. I de flesta fall startar praktiskt klimatanpassningsarbete med en analys av aktuella 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. I arbetet sätts sedan risker och kostnader för skador i relation mot kostnaden för anpassningsåtgärder. Utfallet kan vara att anpassningsåtgärderna genomförs eller, om det bedöms för dyrt, att de inte genomförs och att man istället accepterar riskerna.

7. Om tippningspunkter

Olika tippningspunkter (från engelskans “tipping points”), har fått stor uppmärksamhet på sistone. Att flera av dessa skulle inträffa inom tidshorisonten som vi här fokuserar på får anses

vara osannolikt, men svårt att helt utesluta och det ligger i sakens natur att dessa är svårförutsägbara. Här kommer vi att förklara vad ett urval av dessa rör sig om och sammanfatta forskningsläget.

En tippningspunkt är formellt ett tillstånd där klimatsystemet, eller en del därav, förlorar sin stabilitet och därför snabbt förändras utan ytterligare yttre påverkan. Det finns förmodligen paralleller med ett börsras där många vill sälja sina värdepapper, vilket leder till att priserna faller, vilket i sin tur resulterar i att allt fler vill sälja, och så vidare. Men precis på samma sätt som att alla börsras tar slut vid någon tidpunkt när priset blivit tillräckligt lågt, så finns också i naturen negativa återkopplingsmekanismer som till slut återskapar stabilitet och klimatsystemet finner ro i ett nytt jämviktstillstånd.

Genom jordens historia har klimatet förändrats, men ändå i ett visst perspektiv legat ganska stabilt och förändringarna har mestadels varit långsamma och gradvisa. Det finns dock undantag med ganska snabba förändringar både när jorden varit väsentligt kallare och varmare än idag.

En särskild stor farhåga är huruvida en global instabilitet skulle kunna triggas igång av den allt kraftigare uppvärmningen och leda till ytterligare accelererad uppvärmning. Ett sådant klimat skulle vara svårbeboeligt för mänskligheten. Detta ledde till att ett antal forskare gick ut och varnade för att vi skulle vara på väg in i ett ‘Hothouse Earth’ klimat (Steffen et al. 2018). Det finns åtminstone två förslag hur detta skulle kunna hända; antingen genom en allt starkare vattenånge-återkoppling så som vissa klimatmodeller uppvisar (Meraner et al. 2013, Popp et al. 2016), eller genom att växtlighet och/eller permafrost minskar vilket gör att växthusgaser frigörs i stället för att tas upp eller fortsätta vara lagrade i permafrostområden. Att vattenångans återkoppling skulle förstärkas i ett varmare klimat är tveklöst, men däremot har andra kompenserande negativa strålningseffekter visat sig att till stor del kompensera för detta. Detta är något som inte finns med i vanliga klimatmodeller (Kluft et al. 2021) och det kan istället förväntas en gradvis ökande klimatkänslighet vid stor uppvärmning, men ingen instabilitet.

I IPCC (2021) undersöktes vidare hur stor förstärkning av växthuseffekten ytterligare utsläpp av koldioxid och metan, utöver de som redan finns med i utsläppsscenarierna (se kap. 2 ovan), i samband med tinande permafrost kan vara. Bedömningen görs att den är relativt liten. Det finns ingen separat uppskattning för specifikt den här effekten, men återkopplingen från alla naturliga källor av metan och lustgas uppskattas till 0,02-0,09 $Wm^{-2}K^{-1}$, vilket som mest motsvarar en 4-procentig ökning av den pågående uppvärmningen. Samtidigt uppskattas koldioxidutsläppen från tinande permafrost vid en grads global uppvärmning motsvara ungefär ett till två års människoskapade utsläpp. Dessa faktorer tas med i de beräknade framtidsscenarierna. Slutligen pekas i IPCC-rapporten på att jordens klimat under Eocen (56 till 34 miljoner år sedan) var uppåt 10-12 grader varmare än i dag, men att klimatet därefter enbart gradvis kylts av fram till början på istiderna för omkring 2,5 miljoner år sedan. Det finns därför inte skäl att tro att en global instabilitet skulle finnas i detta temperaturområde.

Det finns dock andra tippningspunkter som kan ha viktiga effekter på klimatet.

Till exempel finns det idéer om hur landisar, i huvudsak Grönlands inlandsis och Antarktis, skulle kunde bli instabila med en accelererande avsmältning till följd. Detta skulle då kunne leda till en snabbare havsnivåhöjning än väntat, samt möjligtvis påverka havsströmmar genom

att minska salthalten regionalt. I senaste IPCC (2021) gjorde man en uppskattning av hur mycket snabbare avsmältningen som högst kan vara, alltså inget sannolikt scenario utan ett värsta tänkbart utfall med låg sannolikhet. Detta visas i Figur 6, som den streckade linje för scenariot SSP5-8.5 där takten i havsnivåstigningen ungefär fördubblas. IPCC-rapporten skriver även att denna möjliga förstärkningsfaktor minskar om man följer ett scenario med mindre utsläpp.

Det har även föreslagits att Golfströmmen kan kollapsa under global uppvärmning (Rahmstorf 1995), vilket skulle få stora följder för framför allt Europa. Överlagrat på en global uppvärmning skulle det kunna dämpa uppvärmningen regionalt, vilket i och för sig skulle vara positivt, men förändrade havsströmmar kan även leda till minskat nederbörd. En kollaps skulle även påverka vädersystem i tropikerna genom att förflytta monsunen söderut, såväl i Afrika som i Asien. Golfströmmen är en del av det Atlantiska systemet av havsströmmar (Atlantic Meridional Overturning Circulation, AMOC), som består av nedsjunkning av kallt och salt vatten med hög densitet i områden kring Grönland, vilket kompenseras med ytströmmar mot norr och en returström mot söder och ut i alla världshaven ner till ungefär 2000 meters djup varifrån det långsamt stiger upp till ytan igen för att sluta kretsloppet. Om avsmältningen från Grönland skulle öka kraftigt så tillförs en större mängd färskvatten vilket skulle försvåra att uppnå tillräckligt hög densitet för nedsjunkning och därmed skulle en tippningspunkt kunna uppnås. Också den globala uppvärmningen har en dämpande effekt på avkylningen och därmed förmågan att generera nedsjunkning. Man har inte mätt själva styrkan på AMOC längre tillbaka än 2004: fram till 2010 minskade AMOC, men sedan dess har den återhämtat sig. Troligen är dessa signaler uttryck för naturlig variabilitet då tidsserien är för kort för att urskilja en trend. Man har även tittat på ‘fingeravtryck’ av en förändrad Golfström i observerad yttemperatur: ett “uppvärmningshål” söder om Grönland, där temperaturen legat still eller till och med minskat, har lagts fram som bevis för att Golfströmmen redan har försvagats (Cesar et al. 2018), vilket dock visat sig mer sannolikt kopplat till förstärkta havsströmmar längre mot norr in i Norska havet och Grönlandshavet (Keil et al. 2020). IPCC (2021) konkluderar i en något komplicerad sats att det är mycket sannolikt att AMOC kommer försvagas över detta seklet, men man är måttligt övertygad om att AMOC inte kommer att kollapsa.

Vegetation kan också uppvisa olika tröskeleffekter eller tröskelliknande beteenden. I regel är inte detta äkta tippningspunkter, utan snabba förändringar som sker på grund av utifrån kommande påverkan, exempelvis förändrade nederbördsmönster eller temperaturer. Också tidsskalan för en eventuell omställning eller återhämtning är relativt lång sett ur ett mänskligt perspektiv.

I fokus ligger ofta Amazonas och andra tropiska regnskogar. Att dessa minskat till ytan med 17 procent under de senaste 40-50 åren beror främst på att människor skövlar skogen eller sätter eld på den för att göra plats för åker- och betesmarker (Gatti et al. 2021). Att det även blivit varmare kan i visst mån ha påverkat utvecklingen, men anses inte vara huvudorsaken. Amazonas påverkan på svenskt klimat sker huvudsakligen genom koldioxidhalten i atmosfären, och när skogen eldas upp frigörs kol som varit lagrat i biomassan. Åldrade tropiska regnskogar i sig är dock ingen viktig sänka för koldioxid, eller källa till syre, då dessa uppnått en jämvikt mellan fotosyntes och förmultning. Påverkan på den regionala skalan kan dock vara mycket stor då regnskogsområdena har en stor inverkan på det hydrologiska kretsloppet.

Den samlade bilden visar på en begränsad risk för katastrofala tippningspunkter i klimatsystemet med påverkan på Sverige, en global ‘hothouse earth’ eller en kollaps av Golfströmmen, inom detta seklet. Däremot kan klimatförändringarna påverka exempelvis skogsbruk eller biologisk mångfald på ett sätt som kan liknas vid tröskeleffekter. Detta kan till exempel ske om granbarkborren får möjlighet att föröka sig flera gånger per säsong eller om arter helt trängs undan, inte hinner anpassa sig till ett allt varmare klimat eller helt dör ut.

8. Sammanfattning

De senaste decennierna har stora framsteg gjorts inom klimatforskningen. Detta, i kombination med den kraftiga globala uppvärmningen under samma tid, gör att kunskapsläget idag är robust kring den pågående globala uppvärmningen samt i stora drag hur klimatet kan komma att ändras framöver. Det står idag helt klart att den globala uppvärmningen framför allt orsakas av ökade halter av koldioxid i atmosfären till följd av människans utsläpp. Då koldioxid är en långlivad växthusgas kommer en återgång till tidigare tiders klimat knappast vara möjligt med mindre än att stora mängder koldioxid fångas in och tas bort från atmosfären. Hur stor den framtida globala uppvärmningen blir styrs framför allt av hur mycket koldioxid vi ackumulerat släpper ut över tid.

I dagsläget har den globala uppvärmningen nått ungefär 1,2 grader över den förindustriella nivån, här definierat som 1850-1900. Givet dagens utsläppsnivåer och takten av den globala uppvärmningen återstår det nu enbart lite drygt ett decennium innan den globala uppvärmningen når 1,5 grader över förindustriell nivå. De förväntade framtida utsläppen, baserat på faktiska utsläpp och på de politiska åtaganden (NDCer), följer en bana som med stor sannolikhet kommer leda till att den globala medeltemperaturen överskrider 2 graders uppvärmning under 2050-talet, följt av ytterligare uppvärmning om inte ytterligare politiska åtgärder vidtas.

Fortsatt global uppvärmning medför fortsatta förändringar inte bara av temperaturklimatet men också av det hydrologiska kretsloppet där det generellt blir större kontraster mellan vått och torrt. Det här innebär bland annat att många typer av extremhändelser förväntas bli vanligare och intensivare. Detta gäller såväl varma extremer som blöta och torra extremer. Det är större osäkerheter kring vad som kan komma att hända med vindklimat och stormar. Konsekvenser av klimatförändringarna förväntas i högre grad komma att påverka såväl samhälle som naturmiljö. Några av de mest sårbara naturmiljöerna är tropiska korallrev och Arktiska miljöer. För samhället finns sårbara samhällen främst i resurssvaga samhällen och för en rad ursprungsbefolkningar över hela världen.

I det läget är det rimligt att fråga sig vilka kostnader som kan uppkomma för Sverige till följd av globala uppvärmningen. Vi har inte kunnat göra någon uppskattning av detta bland annat till följd av att erforderligt kunskapsunderlag saknas. Vår sammanställning visar att även om klimatförändringen är kraftig och utmaningarna är stora för Sverige, så tillhör landet ändå en av de minst sårbara regionerna i världen, och det besitter dessutom en betydande motståndskraft för att ta itu med problemen.

Utmaningarna som vi ser det relaterat till klimatförändringarna i Sverige är framför allt:

- Ändrade säsonger med påverkan på jordbruk, skogsbruk, turism och rennäring.

- Ökad extremnederbörd och ökad medelnederbörd vilket ökar risken för översvämningar och skador på till exempel infrastruktur och jordbruk.
- Ökad risk för värmeböljor, torka och bränder på sommaren med direkt påverkan på människans hälsa och på skogs- och jordbruket.

Utöver ändringarna i Sverige så är det tydligt att många andra länder kommer att drabbas betydligt hårdare av klimatförändringarna. Indirekt kan detta påverka situationen i Sverige till exempel genom brist på livsmedel, ökande grad av internationella oroligheter och konflikter, mer utbredd fattigdom, större risk för migration och fler klimatflyktingar i omvärlden. Problem relaterade till dessa förändringar kan delvis motverkas och minskas genom införande av klimatanpassningsåtgärder i Sverige och internationellt. Dessa är mest effektiva vid en låg grad av klimatpåverkan och det finns en rad synergier i att betrakta klimatanpassning och mitigation parallellt: Att genomföra klimatanpassningsåtgärder som på bred front möter risker kopplat till klimatförändringarna är ett mycket omfattande arbete som berör en lång rad samhällsaktörer från nationella myndigheter, länsstyrelser, kommuner till branschorganisationer, enskilda företagare och privatpersoner. Det står dock klart att genom minskade utsläpp så minskar även behovet av anpassning och därmed kostnaderna.

9. Referenser

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.

Caesar L, Rahmstorf S, Robinson A et al. 2018 Observed fingerprint of a weakening Atlantic Ocean overturning circulation. Nature 556, 191–196. https://doi.org/10.1038/s41586-018-0006-5

Charney J et al. 1979 Carbon dioxide and climate: A scientific assessment. National Academy of Sciences. Woods Hole, MA.

Gatti LV et al. 2021 Amazonia as a carbon source linked to deforestation and climate change. Nature 595, 388–393.

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 2021: 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.

IPCC 2022a: Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, M. Tignor, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem, B. Rama (eds.)]. Cambridge University Press. In Press.

IPCC, 2022b: Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [P.R. Shukla, J. Skea, R. Slade, A. Al Khourdajie, R. van Diemen, D. McCollum, M. Pathak, S. Some, P. Vyas, R. Fradera, M. Belkacemi, A. Hasija, G. Lisboa, S. Luz, J. Malley, (eds.)]. Cambridge University Press. In press.

Keil P, Mauritsen T, Jungclaus J et al. 2020 Multiple drivers of the North Atlantic warming hole. Nat. Clim. Chang. 10, 667–671. https://doi.org/10.1038/s41558-020-0819-8

Kjellström E, Andersson L, Arneborg L et al. 2022 Klimatinformation för samhällets klimatanpassningsarbete. Klimatologi 64, SMHI, SE-60176 Norrköping. ISSN: 1654-2258, 85 pp.

Kjellström E, Strandberg G, Lin C 2021a 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, Belušić D 2021b Betydelsen av storskalig atmosfärisk cirkulation för Sveriges temperatur- och nederbördsklimat: En jämförelse av normalperioder. Klimatologi 61, SMHI, SE-60176 Norrköping. ISSN: 1654-2258, 36 pp.

Kluft L, Dacie S, Brath M et al. 2021 Temperature-dependence of the clear-sky feedback in radiative-convective equilibrium. Geophysical Research Letters, 48, e2021GL094649. https://doi.org/10.1029/2021GL094649

Médus E, Thomassen ED, Belušić D et al. 2022 Characteristics of precipitation extremes over the Nordic region: added value of convection-permitting modeling. Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 22, 693–711. https://doi.org/10.5194/nhess-22-693-2022.

Meraner K, Mauritsen T, Voigt A 2013 Robust increase in equilibrium climate sensitivity under global warming, Geophys. Res. Lett., 40, 5944– 5948, doi:10.1002/2013GL058118.

Popp M, Schmidt H, Marotzke J 2016 Transition to a Moist Greenhouse with CO2 and solar forcing. Nat Commun 7, 10627. https://doi.org/10.1038/ncomms10627

Rahmstorf S 1995 Bifurcations of the Atlantic thermohaline circulation in response to changes in the hydrological cycle. Nature 378, 145–149.

Schultze L, Keskitalo C, Bohman I et al. 2022 Första rapporten från Nationella expertrådet för klimatanpassning 2022, 684 pp.

Steffen W, Rockström J, Richardson K, et al. 2018 Trajectories of the Earth System in the Anthropocene. Proceedings of the National Academy of Sciences, 115(33), 8252-8259.

United Nations Environment Programme (UNEP) 2021. Emissions gap report 2021: The heat is on - A world of climate promises not yet delivered. Nairobi.