



Växthuseffekten och klimatet i Norden - en översikt

Johan Mattsson och Markku Rummukainen
Rossby Centre, SMHI

Norden rör sig mot ett varmare klimat - en förenklad bild av
möjliga klimatförändringar i Norden under en global uppvärmning.
Bakgrunden visar medeltemperaturen under vintern i dagens klimat.

Växthuseffekten och klimatet i Norden - en översikt

Johan Mattsson och Markku Rummukainen
Rosby Centre, SMHI

Innehållsförteckning

Bakgrund	3
Sammanfattning	3
<i>Effekter av en klimatförändring i Norden</i>	6
Inledning	7
Klimatmodellering	7
Globala klimatmodeller på 80-talet	8
Kopplade globala klimatmodeller på 90-talet	9
Regionala klimatmodeller	10
Statistisk nedskalning	10
Dynamisk nedskalning	11
Simuleringar av Nordens klimat	12
Effekter av klimatförändringar i Norden	14
<i>Studie 1</i>	14
<i>Studie 2</i>	15
<i>Studie 3</i>	16
Ett svenskt regionalt klimatforskningsprogram	17
Referenser	18

Bakgrund

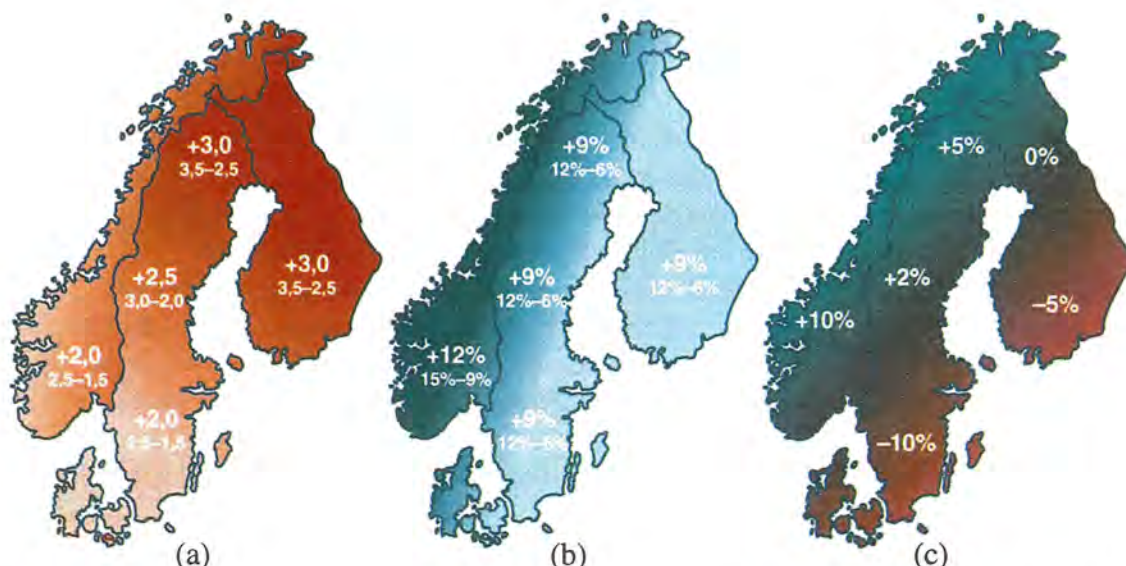
I samband med att det svenska klimatforskningsprogrammet SWECLIM startade 1997 uppstod ett behov att på ett enkelt sätt redogöra för dagens kunskaper om framtida klimatförändringar i Norden relaterade till växthuseffekten och en global uppvärmning. Speciellt inleddes ett samarbete med Klimatdelegationen, som önskade en sammanställning av kunskap och diskussion av möjliga svenska klimatscenarier. Föreliggande skrift avser att ge en översiktlig bild av hur klimatet kan tänkas ändras till mitten på nästa århundrade, och vilka effekter det kan tänkas ge. Denna bild bygger på litteraturstudier och kan sägas vara utgångspunkten för det fortsatta arbetet inom SWECLIM. Syftet med SWECLIM är att stödja svenska beslutsfattare och planerare med välgrundade bedömningar av klimatutvecklingen i Norden under nästa sekel.

Sammanfattning

Ett fåtal regionala klimatscenarier finns gjorda för de nordiska länderna. Dessa utgår från scenarier som typiskt anger en globalt stigande medeltemperatur med runt 0.3°C per årtionde vid en ökning av koldioxidhalten med 1 procent per år, samt en globalt ökad nederbörd med 2-6 procent per grad ökning i medeltemperatur. Enligt dessa scenarier kommer jordens medeltemperatur 2050 vara omkring 2 grader varmare än idag, där man anger en osäkerhet på cirka $\pm 1^{\circ}\text{C}$. I globala scenarier man har gjort på senare tid ges något lägre värden, med stigande medeltemperaturer runt 0.2°C per årtionde och ökande nederbörd runt 2 procent per grad ökning i medeltemperatur. Den något lägre uppvärmningstakten beror framförallt på att man i senare modellberäkningar har tagit hänsyn till stoftpartiklars nedkylande effekt på klimatet samt räknat med långsammare ökning av koldioxidhalten.

De regionala klimatscenarierna för Norden som sammanfattas nedan bygger alltså på äldre globala klimatscenarier. Vidare har man mer eller mindre direkt använt resultaten från de globala scenarierna. Bland annat på grund av den grova upplösningen lämpar sig de globala scenarierna dåligt för en direkt regional tolkning. Sammantaget innebär detta att de befintliga regionala scenarierna har en betydande osäkerhet. I ett nystartat svenskt klimatforskningsprogram, SWECLIM, har man som mål att utveckla regionala klimatmodeller och ta fram nya detaljerade klimatscenarier för Norden baserade på de senaste globala scenarierna. Genom att använda bättre metoder för nedskalning, med finupplösta regionala modeller inuti de grova globala modellerna på samma sätt som för väderprognoser, skall de nya regionala scenarierna vara tillförlitligare och ha en större detaljrikedom.

En sammanfattande bild av de nu något äldre scenarierna för Norden visar en temperaturökning med 0.4°C per årtionde, alltså en något större ökning än det globala medelvärdet på 0.3°C per årtionde. Medeltemperaturen 2050 i Norden skulle enligt dessa scenarier vara omkring 2.5 grader varmare än 1990. Osäkerheten i denna uppskattning är större än i de globala scenarierna, och kan vara åtminstone $\pm 1.5^{\circ}\text{C}$. Alternativt kan osäkerheten beskrivas som att det kan bli ett 2.5 grader varmare klimat



Figur 1. En tänkbar klimatutveckling i Norden baserad på en sammanvägning av äldre studier. Temperaturökning 1990 - 2050, årsmedel samt ökningen under vintern och sommaren (a), nederbördsökning 1990 - 2050, årsmedel samt ökningen under vintern och sommaren (b), samt förändring i avrinning 1990 - 2050 (c).

någon gång mellan 2030 och 2130. Osäkerheten bör hållas i minnet när klimatutvecklingen i scenarierna beskrivs nedan. Klimatutvecklingen är alltså en av flera tänkbara, vilket bland annat understryks av att det ännu inte finns regionala nedskatningar för Norden av de senaste globala scenarierna. Det är dock rimligt att anta att nya nedskatningar skulle ge en lägre uppvärmningstakt, i linje vad man funnit för den globala medeltemperaturen.

Med en uppvärmning på 2.5°C kommer klimatet i Mälardalen grovt sett motsvara dagens klimat i sydvästra Skåne, och Luleå ha samma medeltemperatur som Gävle. Temperaturökningen är olika stor under olika delar av året (Fig.1). Temperaturökningen är störst vintertid, runt 0.5°C per årtionde, och mindre under sommaren med 0.3°C per årtionde. Ökningen är också olika i olika delar av Norden. I väster närmast havet anges en något lägre uppvärmning (0.35°C per årtionde) och en något större i de östra delarna över Finland (0.45°C per årtionde). Denna skillnad har sin förklaring i att uppvärmningen är större över kontinenten än över havet, med ett uppvärmningsmaximum i Sibirien och uppvärmningsminimum över Nordatlanten.

I de regionala scenarierna ökar nederbörden typiskt med 1.5 procent per årtionde i Norden, vilket motsvarar en ökning med knappt 4 procent per grad ökning i medeltemperatur. Enligt dessa uppskattningar kommer nederbörden 2050 ha ökat med ungefär 10 procent i Norden. Även beträffande nederbörden är ökningen störst på vintern (2 procent per årtionde) och lägre under sommaren (1 procent per årtionde). Den geografiska fördelningen är omvänd temperaturökningen, och på årsbasis kan nederbörden öka med 2 procent per årtionde väster om fjällkedjan. Förändringarna i nederbörd är behäftade med en betydande osäkerhet. Enbart osäkerheten i globala scenarierna är på cirka ± 1 procents ökning per årtionde, samtidigt som nederbördsändringarna i de regionala scenarierna visar en stor spridning.

Vid sidan av förändringar i temperatur och nederbörd har scenarier för avrinningen tagits fram. Som ett resultat av den geografiska fördelningen av ökningarna i temperatur och nederbörd, förväntas avrinningen öka i nordväst och minska i sydost. Minskningen i sydost beror på att avdunstningen, som är relaterad till temperaturen, ökar mer än nederbörden. Säsongsfördelningen i avrinning ändras också på grund av att mer nederbörd faller som regn istället för som snö. Som en följd av detta blir på många ställen vårfloden mindre och uppträder tidigare. Avrinningen blir jämnare fördelad över året. De kvantitativa uppskattningarna talar om en ökning i avrinning 2050 på runt 10 procent i västra Norge, omkring 5 procent i norra Sverige och en minskning på 5 - 10 procent i södra Sverige och Finland. I mellersta Sverige och Finland blir det praktiskt taget oförändrat. Hur osäkra dessa resultat är avspeglas emellertid av att en av studierna har ett scenario med ökad avrinning i Finland. Denna stora osäkerhet kan bero på den kombinerade effekten av osäkerheter i temperatur- och nederbördsförändringarna. Till de mer säkra resultaten räknas den ändrade säsongsfördelningen som ju mest beror på ett varmare klimat.

Den bild av det framtida klimatet i Norden som skisseras ovan är som sagt mycket osäker. I grunden finns en osäkerhet i hur känsligt det globala klimatsystemet är för ökade halter av växthusgaser, samt i hur de framtida utsläppen och halterna av växthusgaser kommer att se ut. Det är detta som ger en osäkerhet på $\pm 1^\circ\text{C}$ i ökningen av jordens medeltemperatur fram till 2050. Tillförlitligheten i de globala modellerna testas genom att jämföra simuleringar av dagens klimat med observationer. De bästa klimatmodellerna kan då ge acceptabla simuleringar av storskaliga företeelser i klimatsystemet med dess säsongsvariationer och geografiska fördelning. Exempel är temperaturskillnader mellan land och hav, respektive mellan pol och ekvator. På regional skala är överensstämmelsen sämre, bland annat beroende på att den grova upplösningen inte kan återge exempelvis berg, sjöar och kustlinjer tillräckligt noggrant. Dessa kan ha stor betydelse för det regionala klimatet. Det har också visat sig att olika modeller, som ger överensstämmande bilder av klimatutvecklingen på kontinental skala, kan ge mycket olika resultat på regional skala. Sammantaget betyder det att regionala tolkningar av de globala modellernas klimatscenarier blir mycket osäkra, att addera till den grundläggande osäkerheten med avseende på den globala klimatkänsligheten och ökningen av växthusgaser.

För Nordens vidkommande så tillkommer osäkerheten i hur havscirkulationen i Nordatlanten utvecklas. Som följd av ökad nederbörd kan färskvattentillskottet till Grönlandshavet och Norska havet öka. Därmed kan djupvattenbildningen försvagas, och möjligen värmetransporten norrut med Nordatlantiska strömmen minska eller upphöra. Händer detta så kan det till och med bli kallare i framtiden i Norden. Om och när detta skulle kunna ske är det emellertid inga modeller idag som kan förutse.

Med all denna osäkerhet redovisad kan det vara på sin plats att uttrycka en viss optimism. I takt med att förståelsen av klimatsystemet ökar och man får tillgång till snabbare och större datorer som ger möjlighet till fler och längre klimatsimuleringar, förväntas osäkerheten i de storskaliga scenarierna minska. Med nya och förbättrade metoder för nedskalning av de globala modellernas storskaliga resultat kan också osäkerheten i de regionala scenarierna minska.

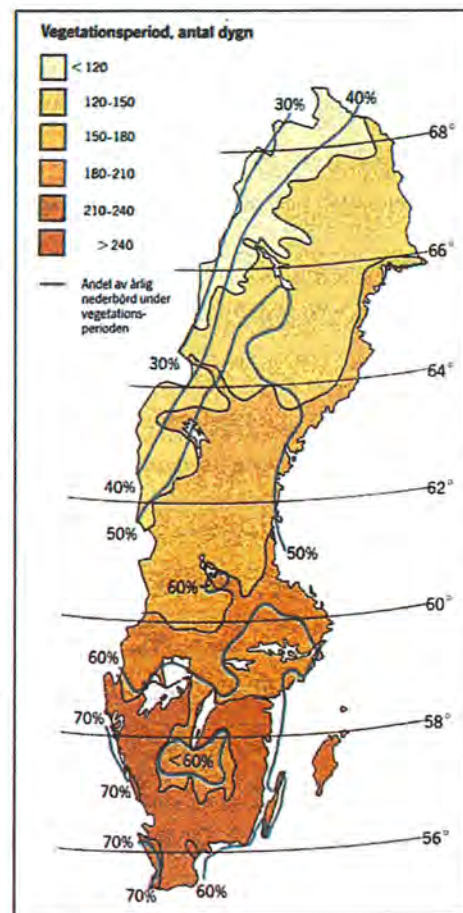
Effekter av en klimatförändring i Norden

Det finns även ett antal studier av de ekonomiska och ekologiska effekterna i Norden av en klimatförändring. Som nämnts ovan förväntas avrinningen öka i nordväst och minska i sydost. Detta har betydelse bland annat för vattenkraften. Den potentiella vattenkraftproduktionen beräknas 2050 därmed ha ökat med 6 procent i Norge, 2 procent i Sverige och vara oförändrad i Finland. Samtidigt kan energibehovet ha minskat något på grund av minskade uppvärmningsbehov. Som en följd av en förändrad avrinning förändras även risken för översvämningar, vilket har betydelse för dammsäkerhet till exempel. I det uppmåladet scenariet ökar risken för översvämning under vintern i områden med snötäcke idag, medan risken för översvämning i samband med vårfloden kan minska.

En annan effekt av längre snöfria perioder är minskade kostnader för vinterväghållning. På grund av ökade temperaturer kan negativa effekter av markfrost minska, vilket bland annat innebär att underhåll av vägar och annan infrastruktur kan bli billigare. Å andra sidan kan ökad temperatur och markfuktighet öka risken för ras och förflyttning av markmaterial.

För skogen innebär ett varmare klimat att lövskog gynnas på bekostnad av barrskog då barrskogszonen förskjuts norrut. Skogsbruket kan uppleva en ökad produktion, men eventuellt av sämre kvalitet på grund av den snabbare tillväxten. Under en övergångsperiod kan produktionen även minska om klimatförändringen är snabb. Den högre temperaturen och fuktigheten kan också gynna skadeinsekter och växtsjukdomar.

För jordbruket innebär högre medeltemperatur och mer CO₂ en längre växtperiod. 2050 kan växtperioden vara en månad längre, och växtzonerna förflyttats 300 km norrut (jämför Figur 2). En minskad markfuktighet under sommaren kan emellertid ge mindre skördar. Vidare påpekas att en del grödor som är viktiga idag, exempelvis vete, inte kan dra nytta av förutsättningarna för snabbare tillväxt. Även för ekosystemen generellt innebär uppvärmningen en förflyttning av vegetationsbälten och biologiska livszoner norrut. Vissa arter som är känsliga för snabba klimatförändringar kan då slås ut, medan andra kan vinna på förändringarna.



Figur 2. Växtperiodens längd i dagens klimat.

Inledning

Det framstår allt tydligare att människan påverkar jordens klimat. Utsläpp, främst genom användandet av fossila bränslen, har orsakat högre halter av växthusgaser i atmosfären samtidigt som jordens medeltemperatur har ökat. I sin senaste bedömning av klimatförändringar och dess orsaker fastslår IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change): "The balance of evidence suggests a discernible human influence on global climate".

Medan en fortsatt global uppvärmning under nästa sekel är trolig är det mera osäkert hur klimatförändringarna slår regionalt. De klimatmodeller dagens forskare arbetar med är i första hand globala - de handlar om jordens klimat i stort. Grövre uppskattningar om regionala ändringar kan göras, som att växthuseffekten ger större temperaturökningar kring polerna än mot ekvatorn.

Hur ändras till exempel klimatet i Sverige om växthuseffekten ger någon grads uppvärmning världen över de närmaste årtiondena? Någorlunda detaljerade svar på den frågan skulle ha stor betydelse, både för myndigheter, näringsliv och allmänheten i stort. Det kan handla om hur nederbörden förändras och vilka följder det kan få för vattenkraft och jordbruk, eller om det blir vanligare med kraftiga oväder, vilket kan ställa nya krav på byggnader eller transportsystem.

SWECLIM, Swedish Regional Climate Modelling Programme, är ett nytt svenskt klimatforskningsprogram finansierat av MISTRA och SMHI. Avsikten är just att göra detaljerade scenarier av det framtida klimatet i Norden. Centrum för forskningen är förlagd till Rossby Centre vid SMHI i Norrköping. Projektet siktar till att utveckla och förbättra regional klimatmodellering. Speciell vikt läggs vid klimatprocesser som är särskilt viktiga i Norden. Det kan handla om processer som innefattar snö och tjäle, molnbildning och Östersjöns speciella betydelse för regionens klimat. Men sammantaget handlar det som sagt om att kunna ge en bild av Nordens framtida klimat - att föregå förändringarna och lägga grunden för åtgärder.

Klimatmodellering

Klimatsimuleringar fungerar på många sätt som dagens datorbaserade väderprognoser. Atmosfären delas in i ett rutnät och fysikens lagar för hur väder och luftströmmar fungerar ligger till grund för datorberäkningar där hela systemet stegas fram i tiden. Vädret är atmosfärens detaljerade tillstånd vid en viss tid och idag kan man oftast förutsäga vädret upp till flera dagar fram i tiden. Längden på väderprognosen begränsas framförallt av otillräcklig information om vilket tillstånd atmosfären har vid starten av prognosberäkningen. Till skillnad från väderprognoser handlar klimatsimuleringarna om att se på atmosfärens medelegenskaper över längre perioder. Det är då inte nödvändigt att känna starttillståndet. Det man söker är jämviktstillståndet i atmosfären för olika styrka på en yttre drivning. I klimatforskningen är det då viktigt att få med samtliga delar av jordens klimatsystem. Idag behandlas förutom atmosfären också haven, landytorna, hur olika områden täcks av is, snö eller vegetation, och hur cirkulationen av vatten och energi sker mellan och inom de olika systemen.

Med hjälp av klimatsimuleringar kan man studera de långa trenderna, speciellt då vad som händer när atmosfärens innehåll av koldioxid och andra växthusgaser ökar. Det vanligaste har varit att se vad som händer då halterna av växthusgaserna fördubblas jämfört med den förindustriella nivån - ett någorlunda realistiskt scenario för perioden kring 2050 om utsläppen fortsätter som vanligt (business-as-usual). I de mer avancerade versionerna (transient models) får koldioxidhalten öka gradvis, typiskt med 1 procent per år. Man har på senare tid även börjat ta hänsyn till mänskliga utsläpp av sulfater och stoft (aerosols). De reflekterar solljus och har därmed en direkt kylande effekt på klimatet, men de bidrar också indirekt genom en förändrad molnbildning.

De första numeriska klimatsimuleringarna gjordes mer än trettio år tillbaka. Modellerna var mycket enkla och hela jorden beskrevs av en enda volym. Något senare införde man fördelningen i höjdled, så kallade endimensionella modeller. Standard vid klimatsimuleringar idag är tredimensionella modeller, så kallade General Circulation Models (GCM). Hur komplex man väljer att göra klimatmodellen, och under hur långa tidsrymder man vill studera klimatet sätter begränsningar för hur detaljerade simuleringarna kan bli. Även om dagens superdatorer används så måste noggrannheten och omfattningen av simuleringarna begränsas. Rutorna som jordens atmosfär delas in i är av storleksordningen 200-1000 km i horisontell led, och nätet har 10-20 rutor i höjdled. I en typisk modellsimulering stegas klimatsystemet fram i tiden i korta intervaller - tidssteg - som varierar från 20 minuter till några timmar. Med den grova upplösningen kan landkonturer, topografi, snötäcke och vegetation enbart tas med som grova medelvärden. Och väderfenomen som molnighet och nederbörd måste också behandlas som ett slags medelvärden. Därför talas oftast om en meningsfull upplösning (skillful scale) i globala klimatmodeller som är upp till åtta gånger större än storleken på rutorna jorden delas in i. Det betyder en upplösning runt 2000 km - större än Norden.

Globala klimatmodeller på 80-talet

På 80-talet utfördes de flesta globala klimatsimuleringar med en mycket förenklad beskrivning av jordens hav. I modellerna delades haven in i djuphav och ett välblandat tiotalet meter tjockt ytskikt som togs med i beräkningarna. Värmeflödet i havet fastställdes och betraktades som oföränderligt. Mycket av dynamiken i växelverkan mellan hav och atmosfär gick därmed förlorad. GCM-simuleringar med ett så enkelt hav underskattar klimatvariabiliteten, och är dessutom mycket dåliga på att urskilja regionala klimatförändringar.

I stort visade de tidiga GCM-simuleringarna på en global uppvärmning mellan 2 och 5°C vid en fördubbling av koldioxidhalten (se t ex Hansen et al., 1988). Ökades i simuleringarna halten CO₂ med en procent per år så ökade temperaturen med 0.3°C varje årtionde, efter en något långsammare start. Geografiskt tycktes uppvärmningen störst närmare polerna - ovanför svenska latituder visade resultaten dubbelt så stor uppvärmning än vid ekvatorn. Vintertemperaturerna ökade i simuleringarna mer än sommartemperaturerna.

Kopplade globala klimatmodeller på 90-talet

På 90-talet har mer avancerade metoder tagits fram. I kopplade modeller beräknas explicit havsströmmar och värmetransport i haven, och utbytet av värme och ånga mellan hav och atmosfär. På det sättet har viktiga förbättringar gjorts. På grund av den mycket fina balansen mellan in- och utflödena av värme och ånga mellan haven och atmosfären, har det än så länge varit svårt att få alla detaljerna korrekt i modelleringen. Det har visat sig att flödena mellan hav och atmosfär måste anpassas för att klimatet i det kopplade systemet inte skall driva iväg (se Manabe et al., 1991). Justeringarna kan vara olika inom olika geografiska områden, men ändras inte under själva simuleringen. De kopplade modellerna har understrukit den betydelse haven och växelverkan mellan hav och atmosfär har för jordens klimat. Men flera problem återstår att lösa (se Manabe and Stouffer, 1988). I en del regioner, som norra Atlanten, är justeringarna av flödena mellan hav och atmosfär lika stora som flödena själva - det kan ifrågasättas om detta är rimligt.

Grovt sett påminner resultaten från kopplade modeller om tidigare GCM-simuleringar, det vill säga en global uppvärmning på mellan 2 och 5°C vid en fördubbling av koldioxidhalten. En väsentlig skillnad är att temperaturökningarna är mindre över hav än över land, speciellt kring Antarktis och i norra Atlanten. Orsaken anses hänga samman med havscirkulationen som på dessa platser karaktäriseras av djupvattenbildning. För norra Atlanten är temperaturförändringarna minst kring Island och Grönland, medan de ökar mot kontinentala Europa. Den stora betydelse haven har i de kopplade modeller visar att den äldre typen av GCM inte kan användas. De nyare simuleringarna visar också hur komplicerad regionen kring norra Atlanten är. För Danmark och Norges västkust kan Atlantens dämpande effekt ha stor betydelse. Hur det är för övriga Skandinavien är ännu svårt att säga.

I den omfattande genomgång av modernare klimatsimuleringar som ges i IPCC:s rapport från 1996 redovisas liknande resultat (IPCC, 1996). Den stora skillnaden är att effekter av stoft behandlats bättre. Medtas de mänskliga utsläppen av stoft under 1900-talet, men utan att anta att stofthalterna kommer öka från dagens nivåer så pekar resultaten på en uppvärmning mellan 1 och 4.5°C vid en fördubbling av koldioxidhalten. En ökning av koldioxidhalterna med 1 procent per år medför en stigande medeltemperatur runt 0.3°C per årtionde. Om däremot utsläppen av stoft fortsätter att öka så ger det något lägre uppvärmning: mellan 1 och 3.5°C, och 0.2°C per årtionde. Alltså, när stoftutsläppen inkluderas i modellerna, kompenserar de till viss del för koldioxidens effekter men det blir ändå en märkbar global uppvärmning.

Även om stoftutsläppen hamnat alltmer i fokus på senare år återstår många oklarheter kring vilken betydelse de egentligen har. Tydligt är att stoft ger en dämpning i uppvärmning globalt sett. Simuleringar för att återge klimatutvecklingen under 1900-talet stämmer bättre överens med observerat klimat när stoftutsläpp tas med. Stoft har mycket kortare livslängd i atmosfären än koldioxid. Det gör att stoftet är mest koncentrerat kring områdena för utsläpp, och stoftutsläppen kan förändra bilden lokalt. Vissa områden kan få en tydligt dämpad uppvärmning, ibland till och med en viss nedkylning, som står i stark kontrast mot den globala uppvärmning som ändå sker. Generellt reducerar stoftutsläppen uppvärmningen på det norra halvklotet och ökningen av vintertemperaturen kring nordliga latituder dämpas också.

När det gäller nederbörd och markfuktighet är bilden mer oklar än när det gäller förändringar i medeltemperatur - speciellt när det gäller markfuktighet är osäkerheten ännu ganska stor. Klart är att dagens kopplade GCM-simuleringar pekar på en ökad nederbörd globalt sett. Tydligast blir ökningen på nordliga latituder och under vinterhalvåret. För markfuktighet är som sagt osäkerheten större, men grovt gäller samma sak: den tydligaste förändringen är en ökning kring nordliga latituder under vintertid. Flera modeller ger en viss uttorkning av marken under sommaren i samma område. Orsaken kan vara att avdunstning ökar mer än nederbörden.

Regionala klimatmodeller

De kopplade GCM-simuleringarna blir alltmer avancerade. Medtagandet av stoftutsläpp har berörts ovan. Förbättringar av behandlingen av moln, molnbildning och hur moln påverkar energi- och vattenflödet är områden man nu arbetar med. Uppdelning av molnvattnet i flytande form och isform, behandlingen av hav, kopplingen mellan olika delar av klimatsystemet, och behandlingen av hur kol cirkulerar är andra områden där modellerna håller på att förbättras. Hur kemiska processer i atmosfären påverkar klimatet har också börjat studeras. Men framför allt arbetas på många håll med att förbättra upplösningen i klimatsimuleringarna. Målet är att kunna göra mer realistiska förutsägelser på regional nivå.

Även om vissa slutsatser idag kan dras om hur klimatförändringar slår lokalt på olika håll i världen så är upplösningen alldeles för grov för att realistiska regionala scenarier skall kunna göras. Problemen blir extra tydliga i områden där topografi och markförhållanden varierar mycket. Däremot reproducerar de globala simuleringarna med relativt god noggrannhet de stora dragen i jordens klimatsystem. Men för att konstruera bra regionala scenarier krävs någonting utöver globala GCM-simuleringar. Sedan början av 90-talet har två huvudidéer utvecklats för att tolka GCM-resultat: statistisk nedskalning (statistical downscaling) och dynamisk nedskalning (dynamical downscaling).

Statistisk nedskalning

Vid statistisk nedskalning försöker man först fastställa statistiska samband mellan klimatvariabler på regional nivå (sk prediktander) och variabler för det storskaliga klimatet (sk prediktorer). Man antar sedan att de statistiska sambanden gäller också när man bygger klimatscenarier. Som prediktander används till exempel lokal marktemperatur och nederbörd. Som prediktorer används sådana variabler som beskriver luftmassornas egenskaper eller atmosfärens regionala cirkulationsmönster. Lämpliga val är fördelningen av marktrycket över ett större område, höjden av en tryckyta eller luftmassans medeltemperatur. Därefter används de statistiska sambanden för att göra regionala förutsägelser baserat på GCM-simuleringar av det framtida klimatet. Vilka prediktorer och prediktander som används vid nedskalningen har naturligtvis stor betydelse. Många olika kombinationer har testats (se Rummukainen, 1997). Eftersom GCM-modeller brukar vara bättre på att simulera klimatet i den fria atmosfären anses statistisk nedskalning med sådana prediktorer vara bäst.

En variant på statistisk nedskalning är användandet av sk stokastiska vädergeneratorer (stochastic weather generators). Idén bygger på att representera de lokala väderförändringarna med stokastiska processer, alltså ta fram färdiga statistiska samband som ungefär återger hur det lokala vädret varierar kring medelvärdet. De lokala, statistiskt framtagna tidsserierna anpassas sedan till vanliga GCM-simuleringar. Stokastiska metoder används alltså i första hand för att bättre återge de snabba, naturliga variationer i väder och klimat som återges dåligt i globala GCM-simuleringar (se t ex Carter, 1996).

Tillgången på bra klimatdata är ofta avgörande för om statistisk nedskalning kan användas. Temperaturförhållanden är generellt sätt lättare att skala ner än värden för nederbörd som karaktäriseras av att den förekommer diskontinuerligt i tid och rum. När väl bra data finns har metoden visat på goda resultat vad gäller att återge regionala klimatförhållanden. Upplösningen är betydligt bättre än för vanliga GCM-simuleringarna. Statistisk nedskalning är i regel också mindre datorkrävande än andra metoder för regional klimatsimulering. Problemet är att man inte kan veta säkert om de statistiska sambanden håller i ett förändrat klimat.

Dynamisk nedskalning

Dynamisk nedskalning är det övergripande namnet för metoder som enbart förlitar sig på fysikaliska datormodeller - inga statistiska samband används. Fördelen med detta är att resultaten är internt konsistenta och att resultaten är giltiga även om de statistiska sambanden ändras. Nackdelen är att det krävs stor datorkapacitet.

I huvudsak finns tre varianter av dynamisk nedskalning. Vanligast är den så kallade inbäddningstekniken (nesting technique eller one-way nesting technique). I den används globala GCM-simuleringar som utgångspunkt för regionala klimatsimuleringar (Regional Climate Models, RegCM, eller Limited Area Models, LAM). Resultaten för de globala körningarna används för att ställa upp randvillkor vid de geografiska gränserna för de regionala körningarna. En variant på inbäddningstekniken är ett "time-slice" experiment. Där används resultaten från en vanlig global GCM-simulering som startvärden för globala simuleringar över ett kortare tidsintervall - ett time-slice - där man använder betydligt högre upplösning. En annan variant är att göra GCM-simuleringar där upplösningen varierar över olika områden - man kan satsa på mycket god upplösning över de områden man är intresserad av, men släppa på upplösningen på andra sidan jorden. Metoden kallas global simulering med variabel upplösning (variable-resolution global model) (Déqué och Piedelievre, 1995).

Upplösningen i regionala klimatsimuleringar med dynamisk nedskalning varierar. Som bäst har det finskaliga rutnät som använts varit ett par mil i horisontell led. Få regelrätta jämförelser har gjorts mellan de olika metoderna för nedskalning till regional nivå. Till exempel har Max-Planck-Institute für Meteorologie (MPI) i en rapport (Cubasch et al., 1996) jämfört statistiska och dynamiska metoder. I studien används en time-slice-version för dynamisk nedskalning. Slutsatserna var att även om dynamiska modeller kräver betydligt mer datorkraft, så ger de ett trovärdigare resultat jämfört med statistiska metoder. Framför allt förlitar sig dynamisk nedskalning inte på att det finns tillräckligt

många och bra klimatobservationer. Det simulerade klimatet är som påpekats helt baserat på fysikaliska principer.

Simuleringar av Nordens klimat

En rad försök att studera hur framtida klimatförändringar slår i Norden har gjorts sedan början av 90-talet. En översiktlig genomgång av vad som åstadkommits fram till 1994 beskrivs i en rapport från det nordiska forskningsprojektet "Klimatförändringar och energiproduktion" (Jóhannesson et al., 1995). De flesta klimatscenarier som tagits fram baseras helt på existerande globala GCM-simuleringar. I de arbetena har alltså ingen regelrätt statistisk eller dynamisk nedskalning utförts. Istället har resultaten från GCM-körningarna interpolerats för att få fram en regional bild. Hänsyn till stoftutsläpp har heller inte tagits i någon större utsträckning.

Bland de tidigare arbetena tas här upp resultaten från tre stycken studier. Den första ingick i ett norskt nationellt forskningsprogram och presenterades 1991 (Miljøverndepartementet, 1991). Klimatscenarier är gjorda för Norge och baserade på den tidens GCM-modeller. Vid en fördubbling av koldioxidhalten mellan 2020 och 2050 pekade studierna på temperaturökningar mellan 1.5 och 3.5 °C. En finsk studie ger klimatscenarier för hela Norden (Aittoniemi, 1992). Vid en fördubbling av koldioxidhalten år 2025 redovisas temperaturökningar mellan 1.5 och 6°C vintertid, och ungefär hälften under sommaren. Både den norska och den finska studien pekar på ökningar i nederbörd, mellan 5 och 35 procent, beroende på läge och tid under året. En svensk studie (Alexandersson och Dahlström, 1992) redovisar för Sverige mindre klimatförändringar - 0 till 1.5°C kring år 2030, och ökningar i nederbörd upp till 15 procent. Förändringarna av klimatet är störst under vintern och i norra Sverige.

Till de större regionala klimatstudierna i Norden hör det finska SILMU-projektet (Carter et al., 1996 och Carter, 1996). Målet var att presentera framtida klimatscenarier som sedan användes för att studera hur klimatförändringarna slår socialt, ekologiskt och ekonomiskt. Också SILMU-projektet använde sig av befintliga GCM-simuleringar, även om stokastiska metoder också utvecklades. Stoft togs inte heller med i klimatscenarierna och de regionala resultaten erhöles genom interpolation av GCM-data. I stort tydde resultaten på att höjningen i medeltemperatur i Norden blir något större än det globala medelvärdet. Nederbörden ökar under vintertid, medan ändringen i nederbördsmängd under sommarhalvåret är osäker. När det gäller medeltemperaturen pekar SILMU-resultaten på att förändringarna blir störst i Finland (0.6°C per årtionde vintertid, respektive 0.3°C sommartid). I Nordatlanten, på Island visade resultaten på både mindre och mer likartade förändringar under de olika årstiderna (0.15°C per årtionde både sommar och vinter). För Sverige gav SILMU ökade temperaturer med 0.5°C per årtionde vintertid och 0.3°C sommartid. Dras SILMU-scenariet ut till slutet av nästa århundrade så skulle det i klartext innebära att klimatet i södra Finland skulle förvandlas till ett klimat som motsvarar det i dagens Danmark eller norra Tyskland.

Tabell 1. Tabell över de regionala scenarierna för Norden som beskrivs i texten. Intervallen avspeglar osäkerheten och att förändringarna är olika stora i olika delar av Norden.

Regionalt scenario	För tidpunkt	Temperaturökning	Nederbördsökning	Baserad på
Miljøverndepartementet, 1991 (enbart Norge)	2020–2050	3.0–3.5°C vinter 1.5–2.0°C sommar	5% vinter 10% sommar	Baserad på ett flertal scenarier, t ex i IPCC 90
Aittoniemi, 1992	2025	1.2–4.6°C årsmedel 1.5–6.0°C vinter 0.8–3.0°C sommar	10–35% årsmedel	Baserad på ett flertal scenarier, t ex i IPCC 90
Alexandersson och Dahlström, 1992	2030	0–1.5°C vinter 0–0.5°C sommar	0–15% vinter -5–10% sommar	Subjektiv bedömning, delvis baserad på ett flertal scenarier
SILMU, 1996 (resultaten för Finland ges här)	2050	2.4°C (0.6–3.6°C) årsmedel 3.6°C (0.8–4.5°C) vinter 1.8°C (0.5–2.7°C) sommar	6% (2–9%) årsmedel 12% (2–15%) vinter 6% (2–9%) sommar	MPI (ECHAM 1) (Cubash et al., 1992), GFDL (Manabe et al., 1991), UKTR (Murphy, 1995)
Jóhannesson et al., 1995	2050	2.1–2.7°C årsmedel 2.7–3.6°C vinter 1.5–1.8°C sommar	9–12% årsmedel 12–15% vinter 6–9% sommar	MPI (ECHAM 1) (Cubash et al., 1992), GFDL (Manabe et al., 1992)

De första omfattande studierna av klimatförändringar i Norden där regelrätt nedskalning använts ingick i det nordiska forskningsprojektet "Klimatförändringar och energiproduktion" (Jóhannesson et al., 1995). Klimatsimuleringarna gjordes med hjälp av statistisk nedskalning. Nedskalningen till nordiska förhållanden gjordes med hjälp av klimatdata från tio väderstationer runt om i Norden, och GCM-körningar gjorda vid Max-Planck-Institut für Meteorologie (MPI) i Hamburg. Under arbetet framgick att dåtida GCM-simuleringarna inte kunde återge klimatförhållandena över Nordatlanten på tillfredsställande sätt (Kaas, 1993). Vid själva framtagandet av klimatscenarier användes dels de statistiskt nedskalade resultaten, dels andra GCM-körningar från Geophysical Fluid Dynamics Laboratory (GFDL) vid Princeton (Manabe et al., 1992), som bättre ansågs återge förhållandena över Nordatlanten. För sommarhalvåret visade de nedskalade resultaten ingen större skillnad från de vanliga GCM-körningarna, men för vinterhalvåret gav de i Finland och Skandinavien större uppvärmning än GCM-resultaten. I stort pekade den statistiska nedskalningen på att ökningen i temperatur blir störst under vinterhalvåret, och i Finland och norra Skandinavien. Minst ökning i temperatur fann man kring Island och Färöarna. Förändringarna under sommarhalvåret var mer jämnt fördelade. För nederbörd var resultaten betydligt mer osäkra, även om de på det hela taget visade på en ökning.

Det slutgiltiga klimatscenariet som redovisades gjordes som en utvald mix av GCM-simuleringarna från GFDL och de statistiskt nedskalade resultaten. För de västra delarna av Norden visar scenariet på en ökning i medeltemperatur kring 0.35°C per årtionde vintertid och 0.25°C sommartid. Temperaturökningen blir större i de östra delarna av Norden. I Finland, norra Norge och Sverige pekas på stigande medeltemperaturer kring 0.6°C per årtionde vintertid och 0.3°C på sommaren. För nederbörd var bilden mindre tydlig. Mellan 3 och 6 procent mer nederbörd antogs per grad ökning av medeltemperaturen. De högre värdena förutspåddes kring Norges västkust. Överlag pekades på större förändringar vintertid än sommartid. I studien betonas svårigheterna att med den tidens teknik och metoder göra trovärdiga regionala klimatscenarier, och

osäkerheten i de redovisade resultaten framhölls. Det påpekas att det är svårt att göra regionala klimatbedömningar just kring Norden, på grund av osäkerhet kring hur havscirkulationen i Nordatlanten förändras med klimatet i stort.

Sedan ovannämnda studier har utveckling av bland annat dynamisk nedskalning pågått och nyligen prövats vid en simulering av dagens klimat i Skandinavien (Christensen et al., 1997). I detta arbete vid Dansk Meteorologisk Institut utnyttjas inbäddningstekniken i två omgångar. I slutändan erhålls en horisontell upplösning på 18 km. Simuleringarna baserades på GCM-körningar från MPI. Författarna menar att hög upplösning är nödvändig för att simulera klimatet i Skandinavien, inte minst beroende på att man annars missar lokal topografi och då speciellt höga bergstoppar i den skandinaviska bergskedjan. Klimatsimuleringarna som presenteras ger relativt realistiska resultat, men det påpekas att modellen alltid begränsas av brister i de underliggande grovskaliga GCM-körningarna. Många av de fel som finns i de slutgiltiga resultaten kan enligt artikelförfattarna helt hänföras till systematiska fel i GCM-simuleringarna.

Effekter av klimatförändringar i Norden

I slutändan är en av de intressantaste tillämpningarna av klimatsimuleringar att se vilka följder klimatförändringar får ekologiskt, ekonomiskt och socialt. Ett antal sådana effektstudier (impact studies) har utförts för de nordiska länderna. Här redovisas resultaten från tre av dem.

Studie 1

Den första är gjord 1990 och baseras på simuleringar med GCM-simuleringar från GISS (Goddard Institute for Space Studies, USA) gjorda i slutet av 80-talet (Boer et al., 1990). Studien omfattar hela Skandinavien och gäller för en tidpunkt då klimatet kommit i jämvikt vid en fördubbling av dagens koldioxidhalt. Klimatscenariet som användes pekar på öknings i medeltemperatur mellan 4.5 och 6.5°C vintertid - högst kring nordöstra Finland och lägst i de västligaste delarna av Skandinavien. Sommartid är förändringarna mer jämnt fördelade och något annorlunda - mellan 2 och 3.5°C ökning i temperatur anges.

I effektstudien behandlas först effekter på geologi. Det pekas på att vittringsprocesser till följd av frost kan minska till följd av uppvärmningen. Å andra sidan hävdas att kemisk och biokemisk vittring kan stimuleras. Vidare varnas för att ökad temperatur och markfuktighet kan ge mer ras och förflyttning av markmaterial. I norr kan också minskad permafrost och ökad smältning av permafrost och is förstärka rörelse av markmaterial. Förändringar av vittring, markförflyttning och permafrost kan i slutändan ställa till problem för till exempel vägar och järnvägar. När det gäller erosionsprocesser påpekas att det krävs data för hur ofta kraftiga regnväder förekommer, något som inte gick att utläsa från de klimatsimuleringar som användes.

Beträffande påverkan på ekosystem påpekas i studien att ökade koldioxidhalter dels kan ha följder genom klimatförändringar, dels direkt genom att mer koldioxid stimulerar fotosyntesen och därmed hela växtligheten. Tidigare klimatvariationer i Skandinavien har visat att också små förändringar kan ha stora följder i form av förflyttningar av

vegetationsbälten och olika biologiska livszoner. En uppvärmning skulle grovt sett ge en förflyttning av olika biologiska områden norrut. I subalpina och subarktiska områdena kan till exempel alltmer skog få fäste. En del växter och djur som inte anpassats för snabba klimatförändringar kan slås ut, medan andra kan vinna på förändringarna.

För skogs- och jordbruk är det idag det kalla nordiska klimatet som sätter gränser för produktionen. Ökade medeltemperaturer skulle därför generellt ge ökad växtlighet och större skördar. Men effekterna kan vara mer komplexa, påpekas i klimatstudien. I de södra delarna av Skandinavien kan ökad markfuktighet och nederbörd ställa till problem inom jordbruket, speciellt där det finns mycket lera i jorden. När det gäller skogsbruk uppskattas att produktionen på sina håll kan öka med hela 43 procent. Men, påpekas det, då har inte hänsyn tagits till att träd och skog är känsligare för klimatförändringar än jordbruksplanter - framför allt genom sin betydligt längre livstid och långsammare genetiska anpassning.

Avslutningsvis diskuteras i studien följder för markvatten och avrinning. Enligt klimatscenariet kommer avrinningen öka över hela Skandinavien. Upp till 15 procent sägs ökningen kunna bli i Sverige och hela 40 procent i Finland. På grund av uppvärmningen kommer en större del av nederbörden att falla som regn, och därmed kommer säsongsvariationerna i avrinning att minska - vårfloden blir mindre. För vattenkraften i Sverige skulle den ökade avrinningen ge en ökning i elproduktion.

Studie 2

Den andra effektstudien är det nordiska forskningsprojektet "Klimatförändringar och energiproduktion" (Sælthun et al., 1997). Forskningsprojektet startades i samarbete mellan hydrologiska myndigheter och vattenkraftsindustrin i Norden, bland annat just för att kunna göra bättre effektstudier av klimatförändringar på avrinning och vattenkraftsproduktion. De regionala klimatscenarier som använts för projektet ~~er~~ baserade på statistisk nedskalning och presenterades i förra avsnittet. I en sammanfattning av resultaten från effektstudien konstateras att klimatförändringar lär förändra både mönster för avrinning och energibehovet i Norden (Bergström et al., 1997). Därmed kan klimatförändringar få stor betydelse för vattenkraften.

I studien används hydrologiska simuleringar för att undersöka följderna av ett förändrat klimat. Det konstateras att klimatförändringarna påverkar avrinningen på ett komplext sätt: dels genom ökad nederbörd, dels genom högre temperaturer och därmed ökad avdunstning, och dels genom längre snöfria perioder. Simuleringsresultaten för 30 år fram i tiden pekar på en minskad avrinning med 6 procent i södra Sverige, ingen påverkan i mellersta Sverige, och en ökning med upp till 5 procent i norra Sverige. För områden som matas av glaciärer, som på Island, ökade istället avrinningen med hela 30 procent. Efter 100 år hade förändringarna förstärkts. Då var minskningen 21 procent i södra Sverige, medan förändringar i mellersta Sverige fortfarande var små, och ökning i norra Sverige växt till 11 procent. För glaciärområden hade ökningen blivit ända upp till 74 procent.

När det gäller vattenkraftsproduktionen beräknas i studien att Sverige som helhet efter 30 år kan räkna med en ökning i elproduktionen med 0.8 procent. I Norden som helhet var motsvarande siffra 2 procent. Efter 100 år hade siffran för hela Norden ökat till 6 procent. En ökad medeltemperatur i Norden lär dessutom förändra energibehovet.

Enligt effektstudien kommer energikonsumtionen minska med ungefär 2 procent under de kommande 30 åren - ett nettoresultat av minskade uppvärmningsbehov och ökade kylbehov. Avslutningsvis påpekas att förändringarna i avrinning också har betydelse för dammsäkerheten och förmågan att hålla vattenreservoarerna fulla under längre perioder av året. Dessutom påpekas att effektstudier av det här slaget fortfarande är mycket osäkra - till största delen därför att klimatmodellerna ännu inte kan ge tillräckligt noggranna regionala klimatscenarier.

Studie 3

I det finska SILMU-projektet (Roos, 1996) gjordes omfattande effektstudier med avseende på hydrologi, jordbruk, skog, våtmarker, mm. Strategin var att först konstruera klimatscenarier med en kombination av GCM-resultat, samt med resultat från en enklare global modell. Scenarierna beskriver på säsongsbasis ändringar i temperatur, nederbörd och havsnivå, för tre olika hastigheter på koldioxidökningen fram till år 2100. Dessutom konstruerades en stokastisk modell för att få fram den dagliga variabiliteten när medelförhållandena (klimatet) ändras.

Enligt resultaten blir årsmedelvattenbalansen inte avsevärt annorlunda i Finland. Avrinningen minskar med några procent i vattendrag med stora insjöar. I andra vattendrag blir det en jämförbar ökning. Säsongsvariationer däremot ändras kraftigt. I södra Finland ökar avrinningen vintertid på grund av ökad nederbörd och intensivare snösmältning. Under sommaren är nettoeffekten en minskning på grund av en ökning i avdunstningen. Den ökar speciellt från insjöar (124 till 180 procent vid år 2100) och något mindre (runt 75 procent) från landytor. Nederbördsökningen är omkring 80 procent. Andra komponenter i den hydrologiska cykeln påverkas också. Snötäcket blir tunnare i hela landet och mer variabel under vintern i södra och mellersta Finland. Detta leder till ökad avrinning. Under sommaren minskar både avrinning och markfuktighet, på grund av den kraftiga avdunstningen. Vad gäller översvämning ökar riskerna i södra och mellersta Finland under perioden från höst till vår. I norra Finland kommer vårfloden tidigare med mer variation från år till år. Ändringar i den hydrologiska cykeln har betydelse för regleringsbehovet av vattendrag, både för kraftproduktion och för att minska översvämningsrisker.

När SILMU-scenarierna tillämpades i modeller av skogar, kunde man konstatera snabbare tillväxt (orsakad av mer CO₂ och ökad temperatur) och en ökning av den totala mängden skog. Omsättningstiden (från plantering till skörd) förkortas med 20-25 år. Regionala ändringar präglas av en förskjutning av tallzonen norrut och en gynnsammare miljö för lövträd. Riskerna blir också större då mindre markfrost ökar stormförluster på vintern, och högre temperatur och fuktighet gynnar skadeinsekter och växtsjukdomar. Den snabbare tillväxten kan försämra kvaliteten på trävirket (tall som växer snabbare får mer grenar). Generellt betonar man att det är viktigt med aktiv skogsvård och planering för att minska riskerna och dra nytta av klimatförändringen.

Högre medeltemperatur och mer CO₂ ger en längre växtperiod (speciellt på hösten) i jordbruket. Förlängningen är cirka 9-11 dygn per grad ökning av medeltemperatur. De nordliga gränserna för olika grödor förflyttas med 50 km per årtionde om temperaturändringen är 0,4°C per årtionde. Den minskade markfuktigheten under sommaren kan ha en negativ effekt på skörden. En del grödor som är viktiga idag kan inte dra nytta av snabbare tillväxt. Veteskördar, till exempel, kan i stället bli mindre.

För att dra nytta av de nya förhållanden kräver en del grödor (C3-grödor, till exempel korn) mer gödsling. Mer nederbörd under hösten kan försämra kvaliteten på grödor och försvåra själva skörden. På samma sätt som för skogen betyder klimatförändringen en ökad risk för förluster på grund av skadeinsekter och växtsjukdomar. För att dra nytta av klimatförändringen och för att minimera de negativa effekterna tog man upp behovet av att introducera nya grödor i jordbruket. För boskapskötseln kunde man mestadels se förbättringar. Med mildare och kortare vintrar blir inomhusperioden kortare, och lagringstiden av foder minskar.

Ett svenskt regionalt klimatforskningsprogram

Behovet av mindre osäkra regionala klimatscenarier har på senare år blivit allt tydligare. Det svenska klimatforskningsprogrammet SWECLIM startades 1997 för att utveckla regionala klimatmodeller och ta fram klimatscenarier för Norden. Klimatscenierna skall vara inriktade på en tidsperiod 50-100 år fram i tiden. De skall kunna anpassas för myndigheter, företag och organisationer som kan påverkas av klimatförändringar - det kan handla om vattenkraftsindustrin, skogs- och jordbruk, vägmyndigheter, fiskeriindustri eller svenska organisationer och myndigheter som arbetar internationellt med klimatkonventioner. Dessutom skall programmet satsa på grundforskning kring klimatförändringar och klimatmodellering. Ett viktigt delmål är att få fram forskare och nya experter inom området.

Klimatprogrammet finansieras av forskningsstiftelsen MISTRA tillsammans med SMHI, och skall bedrivas i samarbete mellan universiteten i Stockholm, Uppsala och Göteborg, och SMHI. Centrum för programmet blir det nystartade Rossby Centre vid SMHI i Norrköping. För de mest datorkrävande delarna av forskningen skall den nyaste superdatorn i Linköping användas.

SWECLIM är den första riktigt stora svenska satsningen på att undersöka de regionala effekterna av klimatförändringar. Insikten om att globala klimatförändringar kan stå för dörren har idag blivit större - något som inte minst markeras av att problematiken alltmer hamnat i världspolitikens centrum. Det nordiska klimatet är både komplext och känsligt för förändringar. Ökade kunskaper är därför nödvändiga för att förutse och kunna möta hur klimatförändringar slår regionalt - både ekologiskt, socialt och ekonomiskt. Sverige har sedan länge haft ett starkt engagemang i frågor som rör påverkan av miljö och klimat. SWECLIM kan ses som en viktig del i ett fortsatt engagemang.

Referenser

- Aittoniemi, 1992, Influences of Climate Change in the Finnish Energy Economy, *Nordisk Hydrologisk Konferens 1992 (NHK-92)*, *NHP-rapport nr. 30*, Nordisk Hydrologisk Program, Oslo, 75-84.
- Alexandersson and Dahlström, 1992, *Future Climate in the Nordic Region*, SMHI RMK nr. 64, 46 pp.
- Bergström et al., 1997, *Sensitivity of Hydropower Production to Climate Change - Example from Northern Europe*, SMHI och NIVA, Norwegian Institute for Water Research, 9 pp.
- Boer et al., 1990, Greenhouse Impact in Fennoscandia - Preliminary Findings of a European Workshop on the Effects of Climate Change, *Ambio*, **19**, 2-10.
- Carter, 1996, Developing Scenarios of Atmosphere, Weather and Climate for Northern Regions, *Agriculture and Food Science in Finland*, **5**, 235-249..
- Carter et al., 1996, The SILMU Scenarios: Specifying Finland's Future Climate for Use in Impact Assessments, *Geophysica*, **32** (1-2), 235-260.
- Christensen et al., 1997, Very-High-Resolution Regional Climate Simulations Over Scandinavia. Present Climate, submitted.
- Cubasch et al., 1992, Time-Dependent Greenhouse Warming Computations with a Coupled Ocean-Atmosphere Model, *Climate Dynamics*, **8**, 55-69.
- Cubasch et al., 1996, Estimates of Climate Change in Southern Europe Using Different Downscaling Techniques, *Report No. 183*, Max-Planck-Institute für Meteorologie, Hamburg, 46 pp.
- Déqué and Piedelievre, 1995, High Resolution Climate Simulation over Europe, *Climate Dynamics*, **11**, 321-340.
- Hansen et al., 1988, Global Climate Changes as Forecast by Goddard Institute for Space Studies Three-Dimensional Model. *Journal of Geophysical Research*, **93** (D9), 10011-10028.
- IPCC, 1990, *Climate Change: The IPCC Scientific Assessment*, Houghton et al. (eds), Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- IPCC, 1996, *Climate Change 1995: The Science of Climate Change*, Houghton et al. (eds), Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- Jóhannesson et al., 1995, Climate Change Scenarios for the Nordic Countries, *Climate Research*, **5**, 181-195.

Kaas, 1993, Greenhouse Induced Climate Change in the Nordic Countries as Simulated with the Hamburg Climate Model. Part 2: Statistical Interpretation, *Scientific Report* 93-3, Danish Meteorological Institute, København, 85 pp.

Manabe and Stouffer, 1988, Two Stable Equilibria of a Coupled Ocean-Atmosphere Model. *Journal of Climate*, 1, 841-866.

Manabe et al., 1991, Transient Responses of a Coupled Ocean-Atmosphere Model to Gradual Changes of Atmospheric CO₂. Part I: Annual Mean Response, *Journal of Climate*, 4, 785-818.

Manabe et al., 1992, Transient Responses of a Coupled Ocean-Atmosphere Model to Gradual Changes of Atmospheric CO₂. Part II: Seasonal Response, *Journal of Climate*, 5, 785-818.

Miljøverndepartementet, 1991, *Drivhuseffekten, virkninger og tiltak*, Miljøverndepartementet, Oslo, 213 pp.

Murphy, 1995. Transient response of the Hadley Centre coupled ocean-atmosphere model to increasing carbon dioxide. Part 1. Control climate and flux correction. *Journal of Climate*, 8, 36-56.

Roos (ed), 1996. The Finnish Research Programme on Climate Change. Final Report. Publications of the Academy of Finland 4/96.

Rummukainen, 1997, *Methods for Statistical Downscaling of GCM Simulations*, Rossby Centre, SMHI, 29 pp.

Sælthun et al., 1997, Climate change impacts on runoff and hydropower in the Nordic countries, Final report from the Nordic project "Climate Change and Energy Production", Oslo.

SMHIs publiceringar

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

Seriernas namn	Publiceras sedan
RMK (Rapport Meteorologi och Klimatologi)	1974
RH (Rapport Hydrologi)	1990
RO (Rapport Oceanografi)	1986
METEOROLOGI	1985
HYDROLOGI	1985
OCEANOGRAFI	1985

I serien METEOROLOGI har tidigare utgivits:

- | | |
|---|---|
| <p>1985</p> <ol style="list-style-type: none"> 1 Hagmarker, A. (1985)
Satellitmeteorologi. 2 Fredriksson, U., Persson, Ch., Laurin, S. (1985)
Helsingborgsluft. 3 Persson, Ch., Wern, L. (1985)
Spridnings- och depositionsberäkningar för av fallsförbränningsanläggningar i Sofielund och Högdalen. 4 Kindell, S. (1985)
Spridningsberäkningar för SUPRAs anläggningar i Köping. 5 Andersson, C., Kvik, T. (1985)
Vindmätningar på tre platser på Gotland. Utvärdering nr 1. 6 Kindell, S. (1985)
Spridningsberäkningar för Ericsson, Ingelstafabriken. 7 Fredriksson, U. (1985)
Spridningsberäkningar för olika plymlyft vid avfallsvärmeverket Sävenäs. 8 Fredriksson, U., Persson, Ch. (1985)
NO_x- och NO₂-beräkningar vid Vasaterminalen i Stockholm. 9 Wern, L. (1985)
Spridningsberäkningar för ASEA transformers i Ludvika. | <ol style="list-style-type: none"> 10 Axelsson, G., Eklind, R. (1985)
Ovädret på Östersjön 23 juli 1985. 11 Laurin, S., Bringfelt, B. (1985)
Spridningsmodell för kväveoxider i gatumiljö. 12 Persson, Ch., Wern, L. (1985)
Spridnings- och depositionsberäkningar för avfallsförbränningsanläggning i Sofielund. 13 Persson, Ch., Wern, L. (1985)
Spridnings- och depositionsberäkningar för avfallsförbränningsanläggning i Högdalen. 14 Vedin, H., Andersson, C. (1985)
Extrema köldperioder i Stockholm. 15 Krieg, R., Omstedt, G. (1985)
Spridningsberäkningar för Volvos planerade bilfabrik i Uddevalla. 16 Kindell, S. Wern, L. (1985)
Luftvårdsstudie avseende industrikombinatet i Nynäshamn (koncentrations- och luktberäkningar). 17 Laurin, S., Persson, Ch. (1985)
Beräknad formaldehydspridning och deposition från SWEDSPANs spånskivefabrik. 18 Persson, Ch., Wern, L. (1985)
Luftvårdsstudie avseende industrikombinatet i Nynäshamn - depositionsberäkningar av koldamm. 19 Fredriksson, U. (1985)
Luktberäkningar för Bofors Plast i Ljungby, II. |
|---|---|

- 20 Wern, L., Omstedt, G. (1985)
Spridningsberäkningar för Volvos
planerade bilfabrik i Uddevalla - energi-
centralen.
 - 21 Krieg, R., Omstedt, G. (1985)
Spridningsberäkningar för Volvos
planerade bilfabrik i Uddevalla -
kompletterande beräkningar för fabrikena.
 - 22 Karlsson, K.-G. (1985)
Information från Meteosat - forskningsrön
och operationell tillämpning.
 - 23 Fredriksson, U. (1985)
Spridningsberäkningar för AB Åkerlund &
Rausings fabrik i Lund.
 - 24 Färnlöf, S. (1985)
Radarmeteorologi.
 - 25 Ahlström, B., Salomonsson, G. (1985)
Resultat av 5-dygnsprognos till ledning för
isbrytarverksamhet vintern 1984-85.
 - 26 Wern, L. (1985)
Avesta stadsmodell.
 - 27 Hultberg, H. (1985)
Statistisk prognos av ytemperatur.
- 1986
- 1 Krieg, R., Johansson, L., Andersson, C.
(1986)
Vindmätningar i höga master, kvartals-
rapport 3/1985.
 - 2 Olsson, L.-E., Kindell, S. (1986)
Air pollution impact assessment for the
SABAH timber, pulp and paper complex.
 - 3 Ivarsson, K.-I. (1986)
Resultat av byggväderprognoser - säsongen
1984/85.
 - 4 Persson, Ch., Robertson, L. (1986)
Spridnings- och depositionsberäkningar för
en sopförbränningsanläggning i Skövde.
 - 5 Laurin, S. (1986)
Bilavgaser vid intagsplan - Eskilstuna.
 - 6 Robertson, L. (1986)
Koncentrations- och depositions-
beräkningar för en sopförbrännings-
anläggning vid Ryaverken i Borås.
 - 7 Laurin, S. (1986)
Luften i Avesta - föroreningsbidrag från
trafiken.
 - 8 Robertson, L., Ring, S. (1986)
Spridningsberäkningar för bromcyan.
 - 9 Wern, L. (1986)
Extrema byvindar i Orrefors.
 - 10 Robertson, L. (1986)
Koncentrations- och depositions-
beräkningar för Halmstads avfalls-
förbränningsanläggning vid Kristinehed.
 - 11 Törnevik, H., Ugnell (1986)
Belastningsprognoser.
 - 12 Joelsson, R. (1986)
Något om användningen av numeriska
prognoser på SMHI (i princip rapporten till
ECMWF).
 - 13 Krieg, R., Andersson, C. (1986)
Vindmätningar i höga master, kvartals-
rapport 4/1985.
 - 14 Dahlgren, L. (1986)
Solmätning vid SMHI.
 - 15 Wern, L. (1986)
Spridningsberäkningar för ett kraftvärme-
verk i Sundbyberg.
 - 16 Kindell, S. (1986)
Spridningsberäkningar för Uddevallas
fjärrvärmecentral i Hovhult.
 - 17 Häggkvist, K., Persson, Ch., Robertson, L.
(1986)
Spridningsberäkningar rörande gasutsläpp
från ett antal källor inom SSAB Luleå-
verken.
 - 18 Krieg, R., Wern, L. (1986)
En klimatstudie för Arlanda stad.
 - 19 Vedin, H. (1986)
Extrem arealnederbörd i Sverige.
 - 20 Wern, L. (1986)
Spridningsberäkningar för lösningsmedel i
Tibro.
 - 21 Krieg, R., Andersson, C. (1986)
Vindmätningar i höga master - kvartals-
rapport 1/1986.
 - 22 Kvick, T. (1986)
Beräkning av vindenergitillgången på
några platser i Halland och Bohuslän.

- 23 Krieg, R., Andersson, C. (1986)
Vindmätningar i höga master - kvartals-
rapport 2/1986.
- 24 Persson, Ch. (SMHI), Rodhe, H.
(MISU), De Geer, L.-E. (FOA) (1986)
Tjernobylolyckan - En meteorologisk
analys av hur radioaktivitet spreds till
Sverige.
- 25 Fredriksson, U. (1986)
Spridningsberäkningar för Spendrups
bryggeri, Grängesberg.
- 26 Krieg, R. (1986)
Beräkningar av vindenergitillgången på
några platser i Skåne.
- 27 Wern, L., Ring, S. (1986)
Spridningsberäkningar, SSAB.
- 28 Wern, L., Ring, S. (1986)
Spridningsberäkningar för ny ugn,
SSAB II.
- 29 Wern, L. (1986)
Spridningsberäkningar för Volvo
Hallsbergverken.
- 30 Fredriksson, U. (1986)
SO₂-halter från Hammarbyverket kring ny
arena vid Johanneshov.
- 31 Persson, Ch., Robertson, L., Häggkvist, K.
(1986)
Spridningsberäkningar, SSAB - Luleå-
verken.
- 32 Kindell, S., Ring, S. (1986)
Spridningsberäkningar för SAABs
planerade bilfabrik i Malmö.
- 33 Wern, L. (1986)
Spridningsberäkningar för svavelsyrafabrik
i Falun.
- 34 Wern, L., Ring, S. (1986)
Spridningsberäkningar för Västhamns-
verket HKVI i Helsingborg.
- 35 Persson, Ch., Wern, L. (1986)
Beräkningar av svaveldepositionen i
Stockholmsområdet.
- 36 Joelsson, R. (1986)
USAs månadsprognoser.
- 37 Vakant nr.
- 38 Krieg, R., Andersson, C. (1986)
Utemiljön vid Kvarnberget, Lysekil.
- 39 Häggkvist, K. (1986)
Spridningsberäkningar av freon 22 från
Ropstens värmepumpverk.
- 40 Fredriksson, U. (1986)
Vindklassificering av en plats på Hemsön.
- 41 Nilsson, S. (1986)
Utvärdering av sommarens (1986) använda
konvektionsprognoshjälpmedel.
- 42 Krieg, R., Kvick, T. (1986)
Vindmätningar i höga master.
- 43 Krieg, R., Fredriksson, U. (1986)
Vindarna över Sverige.
- 44 Robertson, L. (1986)
Spridningsberäkningar rörande gasutsläpp
vid ScanDust i Landskrona - bestämning
av cyanvätehalter.
- 45 Kvick, T., Krieg, R., Robertson, L. (1986)
Vindförhållandena i Sveriges kust- och
havsband, rapport nr 2.
- 46 Fredriksson, U. (1986)
Spridningsberäkningar för en planerad
panncentral vid Lindsdal utanför Kalmar.
- 47 Fredriksson, U. (1986)
Spridningsberäkningar för Volvo BMs
fabrik i Landskrona.
- 48 Fredriksson, U. (1986)
Spridningsberäkningar för ELMO-CALFs
fabrik i Svenljunga.
- 49 Häggkvist, K. (1986)
Spridningsberäkningar rörande gasutsläpp
från syrgas- och bensenupplag inom SSAB
Luleåverken.
- 50 Wern, L., Fredriksson, U., Ring, S. (1986)
Spridningsberäkningar för lösningsmedel i
Tidaholm.
- 51 Wern, L. (1986)
Spridningsberäkningar för Volvo BM ABs
anläggning i Braås.
- 52 Ericson, K. (1986)
Meteorological measurements performed
May 15, 1984, to June, 1984, by the
SMHI.
- 53 Wern, L., Fredriksson, U. (1986)
Spridningsberäkning för Kockums Plåt-
teknik, Ronneby.

- 54 Eriksson, B. (1986)
Frekvensanalys av timvisa temperatur-observationer.
- 55 Wern, L., Kindell, S. (1986)
Luktberäkningar för AB ELMO i Flen.
- 56 Robertson, L. (1986)
Spridningsberäkningar rörande utsläpp av NO_x inom Fagersta kommun.
- 57 Kindell, S. (1987)
Luften i Nässjö.
- 58 Persson, Ch., Robertson, L. (1987)
Spridningsberäkningar rörande gasutsläpp vid ScanDust i Landskrona - bestämning av cyanväte.
- 59 Bringfelt, B. (1987)
Receptorbaserad partikelmodell för gatumiljömodell för en gata i Nyköping.
- 60 Robertson, L. (1987)
Spridningsberäkningar för Varbergs kommun. Bestämning av halter av SO_2 , CO, NO_x samt några kolväten.
- 61 Vedin, H., Andersson, C. (1987)
E 66 - Linderödsåsen - klimatförhållanden.
- 62 Wern, L., Fredriksson, U. (1987)
Spridningsberäkningar för Kockums Plåtteknik, Ronneby. 2.
- 63 Taesler, R., Andersson, C., Wallentin, C., Krieg, R. (1987)
Klimatkorrigering för energiförbrukningen i ett eluppvärmt villaområde.
- 64 Fredriksson, U. (1987)
Spridningsberäkningar för AB Åetå-Trycks planerade anläggning vid Kungens Kurva.
- 65 Melgarejo, J. (1987)
Mesoskalig modellering vid SMHI.
- 66 Häggkvist, K. (1987)
Vindlaster på kordahus vid Alviks Strand - numeriska beräkningar.
- 67 Persson, Ch. (1987)
Beräkning av lukt och föroreningshalter i luft runt Neste Polyester i Nol.
- 68 Fredriksson, U., Krieg, R. (1987)
En överskalig klimatstudie för Tornby, Linköping.
- 69 Häggkvist, K. (1987)
En numerisk modell för beräkning av vertikal momentumtransport i områden med stora råhetelement. Tillämpning på ett energiskogsområde.
- 70 Lindström, Kjell (1987)
Weather and flying briefing aspects.
- 71 Häggkvist, K. (1987)
En numerisk modell för beräkning av vertikal momentumtransport i områden med stora råhetelement. En koefficient-bestämning.
- 72 Liljas, E. (1988)
Förbättrad väderinformation i jordbruket - behov och möjligheter (PROFARM).
- 73 Andersson, Tage (1988)
Isbildning på flygplan.
- 74 Andersson, Tage (1988)
Aeronautic wind shear and turbulence. A review for forecasts.
- 75 Kållberg, P. (1988)
Parameterisering av diabatiska processer i numeriska prognosmodeller.
- 76 Vedin, H., Eriksson, B. (1988)
Extrem arealnederbörd i Sverige 1881 - 1988.
- 77 Eriksson, B., Carlsson, B., Dahlström, B. (1989)
Preliminär handledning för korrektion av nederbördsmängder.
- 78 Liljas, E. (1989)
Torv-väder. Behovsanalys med avseende på väderprognoser och produktion av bränsletorv.
- 79 Hagmarker, A. (1991)
Satellitmeteorologi.
- 80 Lövblad, G., Persson, Ch. (1991)
Background report on air pollution situation in the Baltic states - a prefeasibility study.
IVL Publikation B 1038.
- 81 Alexandersson, H., Karlström, C., Larsson-McCann, S. (1991)
Temperaturen och nederbörden i Sverige 1961-90. Referensnormaler.

- 82 Vedin, H., Alexandersson, H., Persson, M. (1991)
Utnyttjande av persistens i temperatur och nederbörd för vårflödesprognoser.
- 83 Moberg, A. (1992)
Lufttemperaturen i Stockholm 1756 - 1990. Historik, inhomogeniteter och urbaniseringseffekt.
Naturgeografiska Institutionen, Stockholms Universitet.
- 84 Josefsson, W. (1993)
Normalvärden för perioden 1961-90 av globalstrålning och solskenstid i Sverige.
- 85 Laurin, S., Alexandersson, H. (1994)
Några huvuddrag i det svenska temperaturklimatet 1961 - 1990.
- 86 Fredriksson, U. och Ståhl, S. (1994)
En jämförelse mellan automatiska och manuella fältmätningar av temperatur och nederbörd.
- 87 Alexandersson, H., Eggertsson Karlström, C. och Laurin S. (1997).
Några huvuddrag i det svenska nederbörds-klimatet 1961-1990.
- 101 Josefsson, W. (1989)
Computed global radiation using interpolated, gridded cloudiness from the MESA-BETA analysis compared to measured global radiation.



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