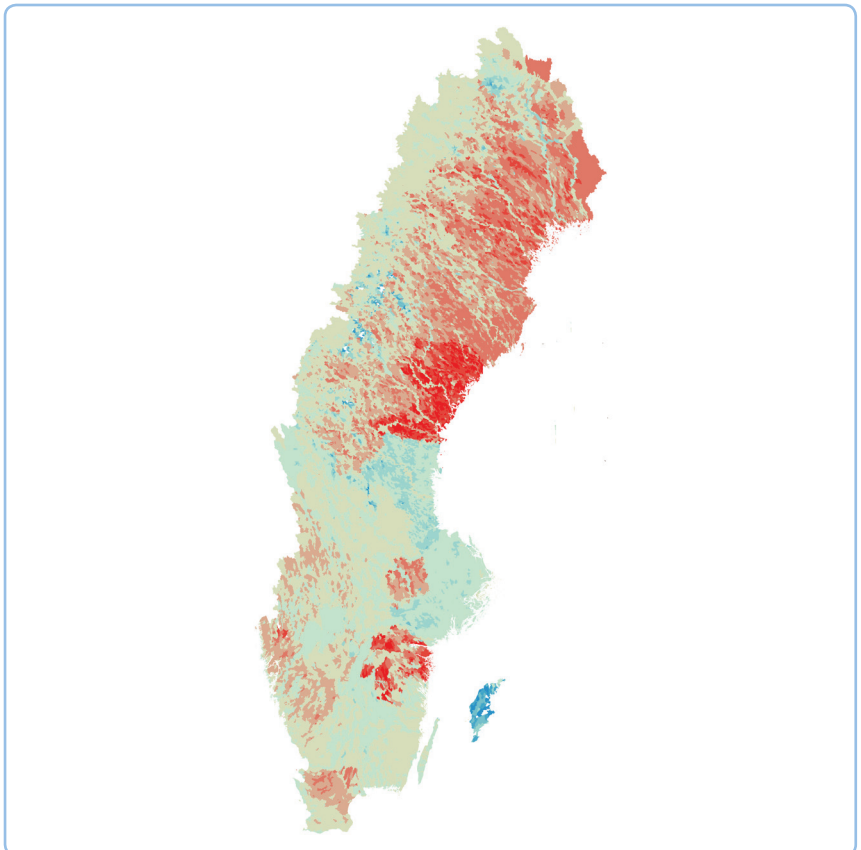
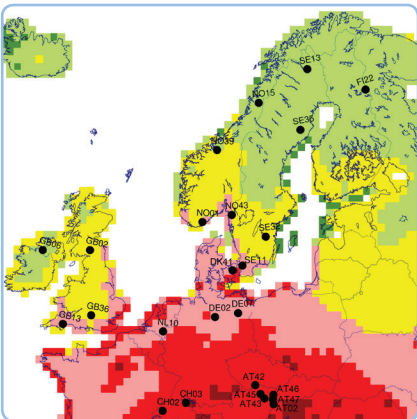


Klimatförändringen och miljömål

RAPPORT 6705 • FEBRUARI 2016



Klimatförändringen och miljömål

Beställningar

Ordertel: 08-505 933 40

Orderfax: 08-505 933 99

E-post: natur@cm.se

Postadress: CM Gruppen AB, Box 110 93, 161 11 Bromma

Internet: www.naturvardsverket.se/publikationer

Naturvårdsverket

Tel: 010-698 10 00 Fax: 010-698 10 99

E-post: registrator@naturvardsverket.se

Postadress: Naturvårdsverket, 106 48 Stockholm

Internet: www.naturvardsverket.se

ISBN 978-91-620-6705-2

ISSN 0282-7298

Rapporten har även rapportnummer C170 i IVL Svenska Miljöinstitutets rapportserie

© Naturvårdsverket 2016

Tryck: Arkitektkopia AB, Bromma 2016

Omslag: IVL Svenska Miljöinstitutets

Förord

Forskningsprogrammet CLEO, Climate Change and Environmental Objectives, har varit inriktat på att kvantifiera hur klimatförändringen kommer att påverka våra möjligheter att nå miljömål som även påverkas av långdistanstransporterade luftföroreningar: *Frisk luft*, *Bara Naturlig Förurning*, *Ingen övergödning* och i viss mån *Giffri miljö*. Programmet har fokuserat dels på förändringar i emissioner, spridning och nedfall av luftföroreningar, dels på hur framtida utlakning av försurande ämnen, kväve och kvicksilver från skogsmark till ytvatten kommer att påverkas av klimatförändringen. Även skogsbrukets påverkan har studerats liksom synergier och konflikter mellan olika åtgärdsstrategier för luftföroreningar och klimat.

Programmet har pågått under två faser i perioden 2010 till 2015. Under 2014 lämnades en delrapport som underlag för Fördjupad Utvärdering av miljömålen (FU 2015) där en mer fullständig beskrivning av resultaten finns presenterad. Rapporten finns tillgänglig på projektets hemsida www.cleoresearch.se eller via www.ivl.se/publikationer.

Denna rapport är författad av ett stort antal forskare i programmet (se baksida). John Munthe och Jenny Arnell, IVL Svenska Miljöinstitutet har varit redaktörer. Författarna svarar själva för rapportens innehåll. Projektet har finansierats med medel från Naturvårdsverkets miljöforskningsanslag.

Stockholm, december 2015

Naturvårdsverket

Innehåll

FÖRORD	3
SUMMARY	7
SAMMANFATTNING	11
FÖRKORTNINGAR OCH FÖRKLARINGAR	15
ETT FORSKNINGSPROGRAM FÖR ATT STUDERA MILJÖMÅL I ETT FÖRÄNDRAT KLIMAT	17
MILJÖMÅL I EN FÖRÄNDERLIG FRAMTID - DRIVKRAFTER	19
Vilka faktorer kommer att påverka miljömålen i framtiden?	20
Metoder inom CLEO	20
FRÅN UTSLÄPP TILL MILJÖEFFEKTER	24
Utsläpp av luftföroreningar	24
Halter av marknära ozon	25
Partiklar	28
Nedfall av kväve och svavel	29
Svavel, försurning och återhämtning	32
Utlakning av kväve och övergödning	40
Relativ betydelse av tre drivkrafter: klimat, skogsbruk och luftföroreningar	43
Episoder och störningar – allt viktigare vid utvärderingen av miljömålen	45
Utlakning av kvicksilver	47
Skogen och ekosystemtjänster	49
SYNERGIER OCH KONFLIKTER MELLAN MILJÖMÅL OCH MILJÖPOLICIES – SKOGSBRUKS- OCH UTSLÄPPSPERSPEKTIV	53
Effekter av skogsbruksåtgärder på miljömålen - synergier och konflikter	53
Synergier och konflikter mellan miljömål och miljöpolicies	56
FRAMTIDSUTBLICK FÖR MILJÖMÅL OCH ÅTGÄRDSARBETE	60
Miljö kvalitetsmålen i ett förändrat klimat, behöver vi ett annat angreppssätt i framtiden?	60
Framtida viktiga frågor	61
KÄLLFÖRTECKNING	63

Summary

The CLEO research programme – CLimate change and Environmental Objectives – was set up in 2010 in response to a call from the Swedish Environmental Protection Agency for research with following general aims:

1. To analyse and quantify how changes in the climate, such as temperature, precipitation and run-off, affect our potential to achieve the Environmental Objectives that are influenced by long-range transport of air pollution.
2. To describe and analyse synergies and conflicts between national and international measures that aim to reduce emissions of greenhouse gases and other air pollutants in order to achieve the set objectives.
3. To improve our understanding of the underlying processes in order to develop reliable forecasts and scenarios for making progress towards the Environmental Objectives; improve input data for existing models; and enable better integration of models for the climate, air and ecosystems.

The programme focused on the Environmental Objectives of *Clean Air*, *Natural Acidification Only*, *Zero Eutrophication* and to some extent *A Non-Toxic Environment*. Because the aim was to produce results that are relevant to ongoing work on Environmental Objectives and long-term planning, CLEO looked at future scenarios that focus on the relatively near future (2030), and in some respects a longer-term perspective (2100).

Scenarios and models

Two regional climate projections from SMHI were used in CLEO, based on ECHAM and HADLEY (two leading global climate models). Average annual temperature and precipitation figures from the projections were adjusted and distributed across Sweden as part of the programme. National Forestry Board scenarios, SKA 08, were used to describe future developments in forestry, with some additions. Mass balances for forest soils were calculated on the basis of forestry scenarios. Historic estimates and projections for emissions of air pollutants are based on the ECLIPSE research programme, supplemented by estimates for 2005–2030 that were made prior to negotiations on a new ceiling directive for emissions of air pollutants within the EU – this scenario is known as CLEO Eurobase.

Various models covering hydrology, bio-geochemical processes and leaching from forest land into surface water were used to study the effects of climate change and future emissions of air pollutants. The following models were used: MATCH, HYPE, CoupModel, MAGIC, PROFILE, RIM, FLUXMASTER, NET and ForSAFE.

Emissions, concentrations and deposition of air pollutants

Future deposition of air pollutants over Sweden is affected by emission levels, mainly in Europe, as well as shipping and changes in the climate. Climate changes play a smaller role, but do affect factors such as precipitation levels and residence times, and hence the distance air pollutants are transported. The residence times for sulphur dioxide and nitrogen oxides are expected to increase due to climate change, but fall for ammonia. This means that ammonia emissions will be deposited closer to their sources in the future.

Concentration of ground-level ozone

Peak levels of ozone have fallen, while background levels have risen. Ozone concentrations are highest over the sea. If emissions of ozone precursors decrease as forecast by 2050 it is calculated that ozone impact on vegetation, measured as AOT40, will not exceed the threshold values set out in the Convention on Long-range Transboundary Air Pollution (LRTAP). However, if ozone flux is used as a criterion the current threshold values will continue to be exceeded over southern Sweden. Emissions of ozone precursors such as nitrogen oxides have a greater influence on future levels than climate impact and rising background levels.

Particles

The calculated change in anthropogenic emissions between 2005 and 2030 is expected to lead to a clear reduction in particles measured as PM_{2.5}, by around 20 per cent in Götaland and parts of Svealand. The reduction in northern Sweden is expected to be less than 10 per cent.

Small-scale combustion is now the largest single contributor to emissions of particles from combustion in Sweden. The CLEO programme has contributed to the development of a particle module for modelling their formation and dispersion, which has made it possible to develop better future forecasts for particle levels.

Risk of nitrogen leaching

There are currently forest areas with elevated levels of nitrogen leaching, primarily in south-west Sweden. A sensitivity analysis covering changes in climate, forestry and nitrogen deposition (not from fertiliser) shows that climate change is calculated to have a greater impact on nitrogen leaching from forest soil than airborne deposition and forestry. Reduced nitrogen deposition does not however always lead to less risk of nitrogen leaching. Increased biomass extraction can reduce the risk of nitrogen leaching from areas that are at risk of nitrogen leaching and favour *Zero eutrophication*, while the use of nitrogen fertiliser can have a negative effect. By the year 2050 it is calculated that climate change and increased biomass removal will not have any significant effect on nitrogen leaching.

Recovery from acidification

The deposition of acidifying substances has affected the acidity of soil, surface water and groundwater over a long period. Acidification impact was greatest at the

end of the 1980s, but there has been a strong regional recovery since then, and the percentage of acidified lakes and waterways has fallen. In the short term, until 2030, this recovery is expected continue even with an increased biomass removal, but in the longer term, forestry could have a negative impact on recovery. A model was applied to the soils surrounding 2,631 lakes. In 2010, there was an annual net increase in calcium reserves and thus recovery of base saturation in the surrounding soils at 22 per cent of the modelled sites. In 2030, the proportion of lakes with rising exchangeable calcium in the soil rises to 30 per cent and 26 per cent respectively for the BUS and MBR forestry scenarios, which indicates continued recovery from acidification. However, the proportion of catchment areas with rising calcium reserves drops to 18 per cent for the most intense forestry scenarios, HBR, which shows a risk of delayed recovery, and in the worst case re-acidification. According to scenario calculations up to 2050, recovery is affected by both climate change and increased biomass removal from forests, with forestry having the greatest influence. The main impact of climate change is increased precipitation, which can lead to greater run-off and increased leaching of substances such as dissolved organic material (DOC), and through temperature rise, which accelerates weathering. By 2050 it is calculated that there will be a moderate rise in DOC concentrations in waterways, mainly in northern Sweden.

Leaching of mercury

Mercury levels are still too high in roughly half of Swedish lakes. Forestry may also have a negative effect and lead to an increase of up to six per cent in the mercury burden in surface water, which could result in higher concentrations of mercury in fish. Climate change may have an impact by leaching out mercury as a result of increased precipitation and run-off. Extreme precipitation may lead to additional, localised leaching of mercury, mainly in the form of methyl mercury.

Synergies and conflicts between Environmental Quality Objectives

The report describes the synergies and conflicts that may arise when various measures are taken to reduce air pollutant emissions, and gives advice on how these may be handled. Many of the methods that have been implemented to limit climate gas emissions or air pollution emissions also favour other Environmental Quality Objectives. Examples include EU directives for transport, energy efficiency or reducing methane emissions. In some cases however there will be conflicts, where measures that target one Environmental Objective will have negative effects on another. For example, around half of the 1.3°C temperature rise reported so far in the Arctic may be due to a reduction in sulphur emissions in Europe, since sulphur particles have a cooling effect. Because Europe now has much lower emissions of sulphur than in the 1970s, further reductions in emissions of sulphur ought to have very little effect on the climate.

Harvesting of forest residue is desirable to replace fossil fuels and meet the objective of *Limited Climate Impact*, and may also reduce the risk of accelerated nitrogen leaching, but also entails a risk of conflict with *Natural Acidification Only*

by increasing the removal of alkaline substances, and with *A Non-Toxic Environment* by increasing the risk of wheel rutting and hence the risk of mercury leaching. Increased combustion of biofuels can lead to higher emissions of particles, PM2.5, especially through small-scale wood burning.

Sammanfattning

Forskningsprogrammet CLEO, Climate change and Environmental Objectives, startades 2010 efter en utlysning från Naturvårdsverket där man efterfrågade forskning med en övergripande målsättning att få:

4. En analys och kvantifiering av hur förändringar i klimatet, såsom temperatur, nederbörd och avrinning, påverkar förutsättningarna att nå de miljömål som påverkas av långväga transporterade luftföroreningar
5. En beskrivning och analys av synergier och målkonflikter av åtgärder, både nationellt och internationellt, för att minska utsläpp av växthusgaser och andra luftföroreningar för att nå uppsatta miljömål.
6. Förbättrad kunskap om grundläggande processer för att ta fram tillförlitliga prognoser och scenarier för utvecklingen mot miljömålen, förbättrade indata till existerande modeller samt bättre sammanlänkning av modeller för klimat, luft och ekosystem.

Programmet har fokuserat på miljömålen *Frisk luft*, *Bara Naturlig Förurning*, *Ingen övergödning* och i viss mån *Giffri miljö*. Då målsättningen var att ta fram resultat som är relevanta för pågående arbete med miljömålen och för långsiktiga överväganden så har CLEO arbetat med framtidsscenarier som både fokuserat på en relativt nära framtid (2030), och i vissa avseenden ett längre tidsperspektiv (2100).

Scenarier och Modeller

Två regionala klimatprojektioner från SMHI har använts inom CLEO, baserade på ECHAM och HADLEY (två ledande globala klimatmodeller). Årsmedelvärden för temperatur och nederbörd från projektionerna har anpassats och fördelats geografiskt inom programmet. Skogsstyrelsens SKA scenarier, SKA 08, har använts för att beskriva skogsbrukets framtida utveckling med vissa kompletteringar. Utifrån skogsbruksscenarier har ämnesbalanser för skogsmark beräknats. Historiska uppskattningar av och prognoser för utsläpp av luftföroreningar baseras på forskningsprogrammet ECLIPSE kompletterat med uppskattningar för 2005-2030 som tagits fram inför förhandlingarna om ett nytt takt direktiv för utsläpp av luftföroreningar inom EU, scenariot benämns CLEO Eurobase.

För att studera effekter av klimatförändringen och framtida utsläpp av luftföroreningar har tillämpning av olika modeller för hydrologi, biogeokemiska processer och utlakning från skogsmark till ytvatten använts. Följande modeller har använts: MATCH, HYPE, CoupModel, MAGIC, PROFILE, RIM, FLUXMASTER, NET och ForSAFE.

Utsläpp, halter och nedfall av luftföroreningar

Framtida nedfall av luftföroreningar över Sverige påverkas av såväl utsläppsnivåer främst i Europa, inkl. sjöfart, som av förändringar i klimatet. Klimatförändringarna spelar mindre roll, men påverkar t.ex. nederbörds mängder och uppehållstider och därmed hur långt luftföroreningarna färdas. Upphållstiden för svaveldioxid och kväveoxider beräknas öka vid en klimatförändring, medan den minskar för ammoniak. Det innebär att ammoniakutsläppen kommer deponeras närmare källorna i framtiden.

Halter av marknära ozon

De höga halterna av ozon har minskat medan bakgrundshalterna ökat. Ozonhalterna är högst över havet. Om utsläppen av ozonbildande ämnen minskar enligt prognos till 2050 beräknas ozonets påverkan på vegetation mätt som AOT40 inte överskrida de gränsvärden som satts upp inom luftvårdskonventionen (LRTAP), men om man använder måttet ozonflux kommer gällande gränsvärden fortsatt överskridas i södra Sverige. Utsläpp av ozongenererande ämnen, som kväveoxider, har större betydelse för framtida halter än klimatpåverkan och ökande bakgrundshalter.

Partiklar

Den beräknade förändringen i antropogena utsläpp mellan 2005 - 2030 beräknas leda till tydlig minskning av partiklar mätt som PM_{2.5} med ca 20 % i Götaland och delar av Svealand. Minskningen i norra Sverige beräknas bli mindre än 10 %.

Småskalig förbränning är den källa som i dagsläget står för det enskilt största bidraget till utsläpp av partiklar från förbränning i Sverige. CLEO-programmet har bidragit till utveckling av en partikelmodul för modellering av bildning och spridning vilket gett möjligheter för bättre framtidsprognoser för partikelhalter.

Risken för kväveläckage

Idag finns skogsområden med förhöjt kväveläckage framför allt i sydvästra Sverige. En gjord känslighetsanalys innefattande förändringar i klimat, skogsbruk och kvävenedfall (ej gödsling) visar att en klimatförändring beräknas ha större inverkan på kväveläckage från skogsmark än deposition och skogsbruk. Minskat kvävenedfall leder dock alltid till minskad risk för kväveläckage. Ett ökat biomassauttag kan minska risken för kväveläckage i områden med risk för kväveläckage och kan påverka *Ingen övergödning* positivt medan kvävegödsling kan ge en negativ effekt. Fram till år 2050 beräknas klimatförändringen och ett ökat biomassauttag inte påverka läckaget av kväve i någon större omfattning.

Återhämtning från försurning

Nedfallet av försurande ämnen har påverkat försurningstillståndet i mark och yt- och grundvatten under lång tid. Försurningspåverkan var som störst i slutet av 1980-talet, men sedan dess har en kraftig regional återhämtning skett och andelen försurade sjöar och vattendrag har sjunkit. På kort sikt, till år 2030, beräknas

återhämtningen fortsätta även med ökat biomassauttag men på längre sikt kan skogsbruket påverka återhämtningen negativt. En modellering gjordes av omgivande mark till 2 631 sjöar. År 2010 fanns det en årlig nettouppbyggnad av kalciumförrådet och därmed återhämtning av basmättnadsgraden i omgivande mark på 22 % av de modellerade områdena. År 2030 ökade andelen sjöar med stigande utbytbar kalcium i marken till 30 % respektive 26 % för skogsbruksscenerierna BUS och MBR vilket beskriver en fortsatt återhämtning från försurning. Däremot sjunker antalet avrinningsområden med uppbyggnad av kalciumförråd till 18 % för det mest intensiva skogsbruksscenerier HBR, vilket innebär en risk för inbromsad återhämtning och i värsta fall återförsurning. Enligt scenarioräkningar fram till 2050 påverkar både klimatförändringen och en ökad intensitet i skogsbruket med ökat biomassauttag återhämtningen, med skogsbruket som den viktigaste faktorn. Klimatförändringen påverkar främst genom ökad nederbörd som kan ge ökat avrinning och ökad utlakning av exempelvis löst organiskt material (DOC) samt genom ökad temperatur som ger ökad vittring. Till år 2050 beräknas en måttlig ökning av DOC-halterna i vattendrag, främst i norra Sverige.

Utlakning av kvicksilver

Idag är fortfarande kvicksilverhalten för hög i ca hälften av Sveriges sjöar. Skogsbruk kan också påverka negativt och medföra en ökad belastning på ytvatten med upp till 6 % vilket kan medföra en ökad halt av kvicksilver i fisk. Klimatpåverkan kan ha en påverkan genom att utlakningen av kvicksilver följer nederbörd och avrinning. Vid extrem nederbörd kan en ytterligare ökad utlakning av kvicksilver, främst metylkvicksilver, ske lokalt.

Synergier och konflikter mellan miljö kvalitetsmål

I rapporten redogörs för de synergier och konflikter som kan uppstå när man vidtar olika åtgärder för att minska luftföroreningsutsläpp och råd ges om hur man kan hantera dessa. Många av de styrmedel som implementerats för att begränsa klimat- eller luftföroreningsutsläpp är till nytta för flera miljö kvalitetsmål. Det kan gälla t.ex. EU direktiv inom transportsektorn, energieffektivisering eller minskade metanutsläpp. I några fall blir det dock konflikter kopplat till åtgärder för ett miljö mål som ger negativa effekter för ett annat. Exempelvis kan en hittills observerad temperaturökning på 1,3 grader i Arktis till hälften vara orsakad av minskade svavelutsläpp i Europa, eftersom svavelpartiklar har en kylande effekt. Då Europa idag har mycket lägre utsläpp av svavel än på 70-talet bör fortsatta utsläppsminskningar av svavel ha mycket liten effekt på klimatet.

Uttag av grot är önskvärt som ersättning av fossila bränslen för miljö målet *Begränsad klimatpåverkan* och kan även betyda mindre risk av förhöjd kväveutlakning, men innebär en konfliktrisk med *Bara Naturlig Försurning* genom ökad bortförsl av basiska ämnen och med *Gifrfri miljö* genom ökad risk för körskadorna och därmed ökad risk för utläckage av kvicksilver. Ökad förbränning av biobränsle kan ge ökade utsläpp av partiklar, PM2.5, speciellt vid småskalig vedeldning.

Förkortningar och förklaringar

A1B	Globalt emissionsscenario för CO ₂ och andra klimatpåverkande ämnen.
ANC	Syraneutraliserande förmåga (Acid Neutralizing Capacity)
AOT40	Ozonmått för ackumulerad ozondos över 40 ppb
BAG	BehovsAnpassad Gödsling
BUS	(BUSINESS as usual) Ett av tre scenarier för framtida skogsbruk i Sverige för perioden 2010-2100: som representerar dagens skogsbruk;
CH₄	Metan
CLE	Current Legislation
CLEO	Climate change and Environmental Objectives
CLEO Eurobase	Ett utsläppsscenario framtaget inom fas 2 av CLEO
CO	Kolmonoxid
CoupModel	Dynamisk modell för kväve- och kol-omsättning i terrestra ekosystem.
DOC	Löst organiskt kol (Dissolved Organic Carbon)
DON	Löst organiskt kväve (Dissolved Organic Nitrogen)
ECHAM	Global klimatprojektioner/modell
ECHAM5_A1B3	En global klimatprojektion framtaget med ECHAM5-modellen. Denna projektion utgår från emissionsscenario A1B och ”starttillstånd 3”. Förkortningen används också för den regionala nedskalningen av denna klimatprojektion.
ECLAIRE	EU projektet <i>Effects of Climate Change on Air Pollution and Response Strategies for European Ecosystems</i>
EMEP	<i>The European Monitoring and Evaluation Programme</i>
EU NEC IA option 1	EU kommissionens bas-scenario (som låg till grund för EU-kommissionens förslag till ett nytt Utsläppstaksdirektiv),
ForSAFE	Dynamisk ekosystemmodell för studier av kol och näringsämnen i mark
FLUXMASTER	Modell för att studera hydrologi och ämnestransport i små avrinningsområden
FU15	Fördjupade utvärderingen av miljömålen 2015
GIS	Geografiska informationssystem/kartor
GROT	Grenar och toppar
HADLEY	Global klimatprojektioner/modell
HBR	Skogsbruksscenario (High Biomass Removal) med högt uttag av biomassa
HYPE	Hydrologisk storskalig modell

LBR	Skogsbruksscenario (Low biomass removal) med ett minskat bortförande av växtrester i skogsmark med 30 %.
MAGIC	Modell för att studera försurning och återhämtning
MATCH	Modell för beräkning av spridning och nedfall av luftföroreningar, samt vegetationsexponering för ozon.
MBR	(Medium Biomass Removal) motsvarande ett högre uttag av biomassa men med miljörestriktioner
mekv, µekv	Milli- respektive mikroekvivalenter. Ekvivalenter är en måttenhet för substansmängd som motsvarar en mol laddning. 1 mekv = 1000 µekv.
NET	Verktyg för uppskalning
NH3	Ammoniak
NMVOC	Flyktiga kolväten
NOX	Kväveoxider
PM10, PM2.5, PMBC, PMOC	Partiklar ($\leq 10\mu\text{m}$, $\leq 2.5\mu\text{m}$, BlackCarbon, OrganicCarbon)
PROFILE	Modell för att studera vittring i skogsmark
RCP4.5	Ett av FN:s klimatpanels (IPCC:s) scenarier för framtida klimatförändringar
SKA VB-08	Skogliga konsekvensanalyser och virkesbalanser 2008
SLCF/SLCP	Kortlivade klimatpåverkande föroreningar (Short-Lived Climate Forcers/Pollutants)
SOX (SO₂)	Svaveloxider, svaveldioxid
Total-N	Totalkväve
VOC	Lättflyktiga organiska föreningar(volatile organic compound)

Ett forskningsprogram för att studera miljömål i ett förändrat klimat

Fakta om CLEO

Svensk titel: Klimatförändringen och Miljömål
Engelsk titel: Climate change and environmental objectives
Finansiär: Naturvårdsverket
Löptid: 2010 – 2012 (Fas 1), 2013-2015 (fas 2)
Hemsida: www.cleoresearch.se
Deltagare: IVL Svenska Miljöinstitutet (koordinator), SMHI, Göteborgs Universitet, Stockholms Universitet, Lunds Universitet, Sveriges Lantbruksuniversitet

Bakgrund

CLEO, Climate change and Environmental Objectives, startades 2010 efter en utlysning från Naturvårdsverket där man efterfrågade forskning med en övergripande målsättning att få:

1. En analys och kvantifiering av hur förändringar i klimatet, såsom temperatur, nederbörd och avrinning, påverkar förutsättningarna att nå de miljömål som påverkas av långväga transporterade luftföroreningar
2. En beskrivning och analys av synergier och målkonflikter av åtgärder, både nationellt och internationellt, för att minska utsläpp av växthusgaser och andra luftföroreningar för att nå uppsatta miljömål (se nedan).
3. Förbättrad kunskap om grundläggande processer för att ta fram tillförlitliga prognoser och scenarier för utvecklingen mot miljömålen, förbättrade indata till existerande modeller samt bättre sammanlänkning av modeller för klimat, luft och ekosystem.

Programmet har fokuserat på miljömålen *Frisk luft*, *Bara Naturlig Förurning*, *Ingen övergödning* och i viss mån *Giftfri miljö*. Möjligheterna att nå dessa mål påverkas av långväga transport av luftföroreningar från utsläpp utanför Sverige och även klimatförändringen förväntas ha en inverkan. Påverkan av luftföroreningar, klimatförändringen och skogsbruk på övriga miljömål än de ovan nämnda ingår ej i programmet. Efter utvärdering av den första fasen av CLEO lades i fas två en något större vikt på skogsbrukets påverkan på möjligheterna att nå miljömålen.

I denna rapport presenteras en sammanfattning av ett urval av programmets forskningsresultat. En fullständig bild av resultaten finns i den rapport som

CLEO-programmet levererat som underlag till den fördjupade utvärderingen av miljömålen 2015 (FU15), samt andra rapporter och publikationer som finns tillgängliga på programmets hemsida www.cleoresearch.se/publications.

Miljömål i en föränderlig framtid - drivkrafter

Miljömål och forskningsfrågor i CLEO-programmet

Frisk luft: Luften ska vara så ren att människors hälsa samt djur, växter och kulturvärden inte skadas.

- *Forskningsfrågor i CLEO: Hur kommer spridning och nedfall av luftföroreningar förändras i ett framtida förändrat klimat och hur kommer framtida utsläppsförändringar påverka halten av luftföroreningar i Sverige. Hur kommer effekter av ozon på vegetation att förändras?*

Bara Naturlig Försurning: Försurande effekter av nedfall och markanvändning ska underskrida gränsen för vad mark och vatten tål. Nedfallet av försurande ämnen ska inte heller öka korrosionshastigheten i markförlagda tekniska material, vattenledningssystem, arkeologiska föremål och hållristningar.

- *Forskningsfrågor i CLEO: Hur kommer den pågående återhämtningen av försurade ytvatten att påverkas av framtida nedfallsförändringar, ett förändrat klimat och ett förändrat skogsbruk? Kommer utlakningen av försurande ämnen från skogsmark att påverkas?*

Ingen övergödning: Halterna av gödande ämnen i mark och vatten ska inte ha någon negativ inverkan på människors hälsa, förutsättningar för biologisk mångfald eller möjligheterna till allsidig användning av mark och vatten.

- *Forskningsfrågor i CLEO: Hur kommer läckage av kväve från skogsmark till ytvatten att påverkas av nedfallsförändring, klimatförändringen och ett förändrat skogsbruk?*

Giftfri miljö: Förekomsten av ämnen i miljön som har skapats i eller utvunnits av samhället ska inte hota människors hälsa eller den biologiska mångfalden. Halterna av naturfrämmande ämnen är nära noll och deras påverkan på människors hälsa och ekosystemen är försumbar. Halterna av naturligt förekommande ämnen är nära bakgrundsnivåerna.

- *Forskningsfrågor i CLEO: Hur kommer utlakningen av kvicksilver från skogsmark till ytvatten att påverkas av klimatförändringen och ett förändrat skogsbruk?*

Synergier och konflikter mellan miljömålen.

- *Forskningsfrågor i CLEO: Hur påverkar åtgärder för minskade utsläpp av växthusgaser och luftföroreningar varandra? Hur påverkar ett ökat nyttjande av skogens biomassa försurning, övergödning och kvicksilver i skogsmark och ytvatten? Hur påverkar försurning och övergödning skogens ekosystemtjänster?*

Vilka faktorer kommer att påverka miljömålen i framtiden?

Det svenska miljömålssystemet innehåller ett generationsmål, 16 miljökvalitetsmål och 24 etappmål. Generationsmålet anger inriktningen för den samhällsomställning som behöver ske inom en generation för att uppnå miljökvalitetsmålen, medan miljökvalitetsmålen beskriver det tillstånd i den svenska miljön som miljöarbetet ska leda till. Etappmålen beskriver steg på vägen som Sverige kan ta för att nå generationsmålet och ett eller flera miljökvalitetsmål. Mer information om miljömålen, preciseringar och etappmål finns på www.miljomal.se/

Våra möjligheter att nå miljömålen påverkas av en rad faktorer där utsläpp av luftföroreningar är gemensam för de miljökvalitetsmål som ingått i CLEO. Även klimatförändringen förväntas påverka möjligheterna att nå miljömålen liksom ett förändrat skogsbruk. En ökad användning av biomassa från skogen till energi och material för att ersätta fossila källor är en viktig faktor i arbetet mot klimatförändringen. Ett förändrat och intensivare skogsbruk kan dock innebära såväl synergieffekter som konflikter för att nå miljökvalitetsmålen.

Metoder inom CLEO

För att utreda hur miljötillståndet i luft, mark och vatten påverkas i ett framtida förändrat klimat behövs framtidsscenarioer som på bästa möjliga sätt beskriver hur en rad påverkansfaktorer kan komma att förändras. Inom CLEO har scenarioer sammanställts och utvecklats för klimat, utsläpp av luftföroreningar i Europa samt för hur skogstillväxt och skogsbruk förväntas förändras i framtiden. Scenarierna har anpassats och utvecklats för att kunna ligga till grund för modellberäkningar och utvärderingar avseende de vetenskapliga frågeställningar som berörs i programmet.

Skogsbruksscenarioer

Tre scenarioer för framtida skogsbruk i Sverige har formulerats för perioden 2010-2100: BUS (BUSINESS as usual) som representerar dagens skogsbruk; MBR (Medium Biomass Removal) motsvarande ett högre uttag av biomassa men med miljörestriktioner, samt HBR (High Biomass Removal) som representerar ett betydligt högre uttag av biomassa. Samtliga scenarioer visar på ett intensifierat skogsbruk i framtiden, med ett högre biomassauttag från skogen, både med avseende på stammar, GROT och stubbar. Markanvändningen förändras inte alls i BUS- eller MBR-scenariot under seklet men i HBR-scenariot ingår en ökning av den produktiva skogsmarksarealen genom beskogning av åkermark. Tillväxthöjande åtgärder, men framförallt klimatförändringen, leder till att både tillväxt och avverkning ökar i samtliga scenarioer från 2020 och framåt. Stamuttaget vid avverkning (ton torrsbstans) förväntas öka med 45 % i BUS, 62 % i MBR och 70 % i HBR från 2010 till 2100. Samtliga skogsbruksscenarioer bygger på underlag från Skogsstyrelsens redovisning av framtida tillväxtscenarioer och virkesbalanser SKA VB-08 (Skogsstyrelsen, 2008) med kompletteringar av data avseende

stubbtag, gödsling, kalkning samt askåterföring. Det förändrade klimatets inverkan på skogens tillväxt är inkluderat i alla scenarier.

Klimatscenarier

Två klimatprojektioner har använts inom CLEO, baserade på resultat från klimatmodellerna ECHAM och HADLEY. Dessa har visats relativt väl representera spridningen inom de klimatprojektioner som funnits tillgängliga m.a.p. graden av framtida förändringar. Fram till mitten på seklet visar projektionerna på en ökning av årsmedeltemperaturen, i ECHAM med c:a 2-2.5°C och i HADLEY med ytterligare c:a 1°C. Ökningen är kraftigare i norra än i södra Sverige. Till slutet av seklet är ökningen i båda projektionerna mellan 3.5 och 5°C, även i denna period med kraftigast ökning i norr. Årsmedelnederbörd ökar i projektion HADLEY med 150-300 mm i fjällkedjan fram till mitten av seklet. I sydöstra Sverige är ökningen 50-100 mm/år. I ECHAM är ökningen generellt avsevärt lägre och i västra Sverige indikeras ingen förändring jämfört med idag. Fram till slutet av seklet är ökningen kraftigare i båda projektionerna, med upp till 400 mm i norra Sverige och 50-200 mm i södra Sverige. För användning i hydrologiska modeller har ett antal meteorologiska parametrar tagits fram med högre upplösning än den som var tillgänglig i de ursprungliga scenarierna. Detta har gjorts med hjälp av statistiska metoder som har utvecklats vidare inom forskningsprogrammet.

Emissioner av luftföroeningar

Inom CLEO har vi arbetat med två olika emissionsscenarier i beräkningarna av luftföroeningar över Europa. Inledningsvis användes emissionsdata baserade på det s.k. RCP4.5 scenariot. I ett senare skede tog vi fram ett eget scenario, ”*CLEO Eurobase*”, som är anpassat till EU-kommissionens förslag till nytt Utsläppstakdirektiv. Syftet med *CLEO Eurobase* var att ta fram policyrelevanta, sektorsvisa, och luftföroeningsspecifika utsläppsbanor för 10 kategorier av luftföroeningar under perioden 1960 – 2100 och med en 50 km x 50 km geografisk upplösning. *CLEO Eurobase* innehåller årsvisa emissioner av SOX (SO₂), NOX, CO, NMVOC, NH₃, CH₄, PM10, PM2.5, PMBC, PMOC, och grova partiklar för perioden 1960 till 2100. Emissionsdata samlades in från bl.a. EU-projektet ECLAIRE, EU kommissionens bas-scenario EU NEC IA option 1, det Nordiska projektet ENSCLIM samt EU-projektet ECLIPSE. Interpolering användes för att fylla luckor i datamaterialet.

Modeller

För att studera effekter av klimatförändringen och framtida utsläpp av luftföroeningar har ett antal modeller och verktyg använts. Modellerna beskriver hur processer och tillstånd i luft, skogsmark och ytvatten påverkas av förändrade utsläpp av luftföroeningar, ett förändrat klimat och ett förändrat skogsbruk. Hur modellerna använts beskrivs kortfattat under respektive avsnitt nedan. För att säkerställa att resultat från modellerna är jämförbara och kompatibla har i så stor utsträckning som möjligt gemensamma grundantaganden använts t.ex. avseende

hydrologi, klimat och skogsbruk. De modeller som använts inom CLEO-programmet presenteras kortfattat i Tabell 1.

Tabell 1. Modeller som använts inom CLEO-programmet.

Modell	Användningsområde	Referens
MATCH	För beräkning av spridning och nedfall av luftföroreningar, samt vegetationsexponering för ozon.	Langner m.fl., 2012; Engardt och Langner, 2013; Klingberg m.fl., 2014
CoupModel	Kväve- och kol-omsättning i terrestra ekosystem	Jansson 2012, Jansson och Karlberg 2004
HYPE	Hydrologi, storskaligt	Lindström m.fl. 2010, Strömqvist m.fl. 2012
MAGIC	Försurning och återhämtning	Cosby m.fl., 2001, Moldan m.fl., 2013
FLUXMASTER	Hydrologi och ämnestransport i små avrinningsområden	Schwarz m.fl. 2006, Hytteborn m.fl. 2015.
PROFILE	Vittring i skogsmark	Sverdrup och Warfvinge 1993
RIM	Ämnestransport i små avrinningsområden	Eklöf m. fl. 2015a, Winterdahl m. fl. 2011
NET	Uppskalningsverktyg	Utvecklat inom CLEO
ForSAFE	Basketjoner, kväve och kol i mark	Wallman m.fl. 2005

Modeller användes i kombination med mätdata för att kvantifiera den kombinerade effekten av förändrat klimat, atmosfäriskt nedfall och skogsbruk på utlakning från skogsmark och försurning i hela Sverige.

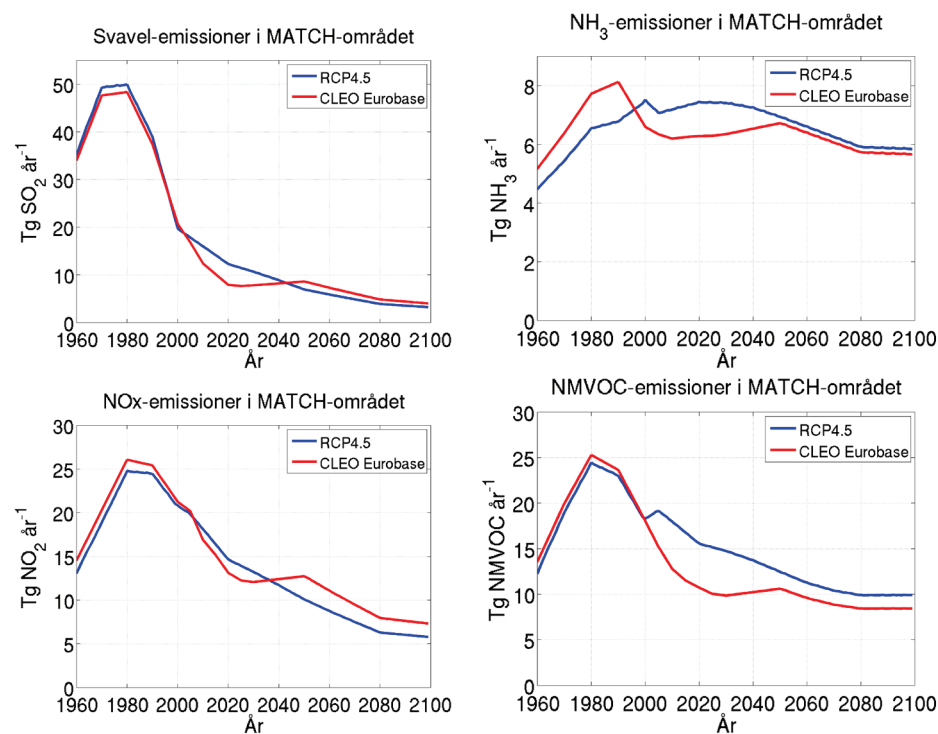
Miljödata

Inom CLEO har forskningen i första hand bedrivits som syntesarbete och med hjälp av olika modeller. En viktig del i detta arbete har varit att harmonisera indata till de olika modellerna och att koppla samman resultaten. Denna forskning skulle inte kunna genomföras utan mätdata från undersökningar i luft, mark och vatten. CLEO har endast i liten utsträckning bidragit till att generera nya miljödata utan har använt data från tidigare och pågående forskning samt från internationell, nationell och regional miljöövervakning. En stor del av de använda miljödata finns tillgängliga i en publik databas på www.slu.se/cleo/data.

Från utsläpp till miljöeffekter

Utsläpp av luftföroreningar

Historiska uppskattningar och projektioner av framtida utsläpp av luftföroreningar – nödvändiga för modellering av spridning, nedfall och effekter– har samlats i scenariot *CLEO Eurobase*. Detta baseras på de europeiska scenarier som ligger till grund för den pågående revideringen av EU:s luftpolitik (nationella total-emissioner under perioden 2005-2030), men är kompletterad med resultat från europeiska forskningsprogram för att möjliggöra årliga rumsfördelade emissioner för hela perioden 1960-2100.



Figur 1. Totalutsläpp av svaveldioxid (SO₂), ammoniak (NH₃), flyktiga kolväten (NMVOC) och kväveoxider (NO_x) i det geografiska område som MATCH-modellen täcker. De två kurvorna representerar de olika emissionsuppskattningarna som använts inom CLEO, RCP4.5 (fas 1) och CLEO Eurobase (fas 2).

I Figur 1 visas utsläpp av ett urval av luftföroreningar summerade över ett område som täcker Europa, delar av Nordafrika och delar av Nordatlanten. Figuren jämför totalutsläppen för perioden 1960 – 2100 i *CLEO Eurobase* med emissionsdata från RCP4.5 för samma område.

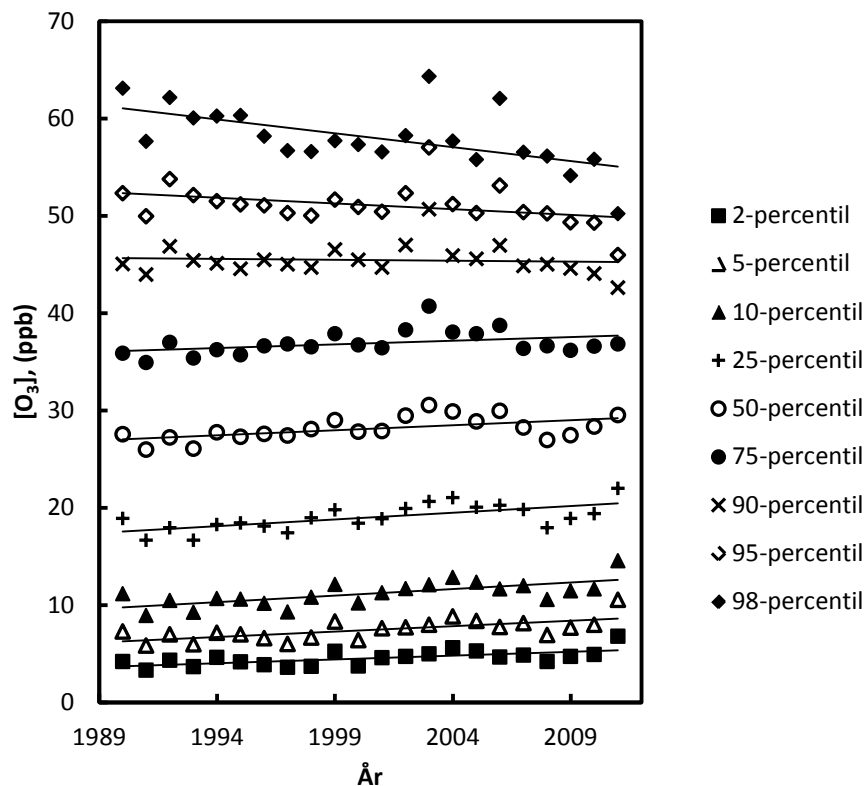
Det är tydligt att utsläppen av de flesta luftföroreningarna i Europa minskat kraftigt sedan slutet av 1970-talet. Den nedåtgående trenden förväntas fortgå ytterligare några år för att sedan plana ut. *CLEO Eurobase* pekar för flera av

luftföroeningarna på kraftigare utsläppsminskningar än i RCP4.5 scenariot som användes tidigare. De största skillnaderna mellan RCP4.5 och *CLEO Eurobase* föreligger för NH₃ och NMVOC, vilka är svårare att uppskatta än t.ex. SO₂ och NO_x. För NH₃ är utsläppskurvan i stort sett helt beroende av jordbrukssektorns framtida utveckling. I *CLEO Eurobase* minskar NH₃ utsläppen mellan 1990 och 2010 för att därefter öka något fram till 2050.

Halter av marknära ozon

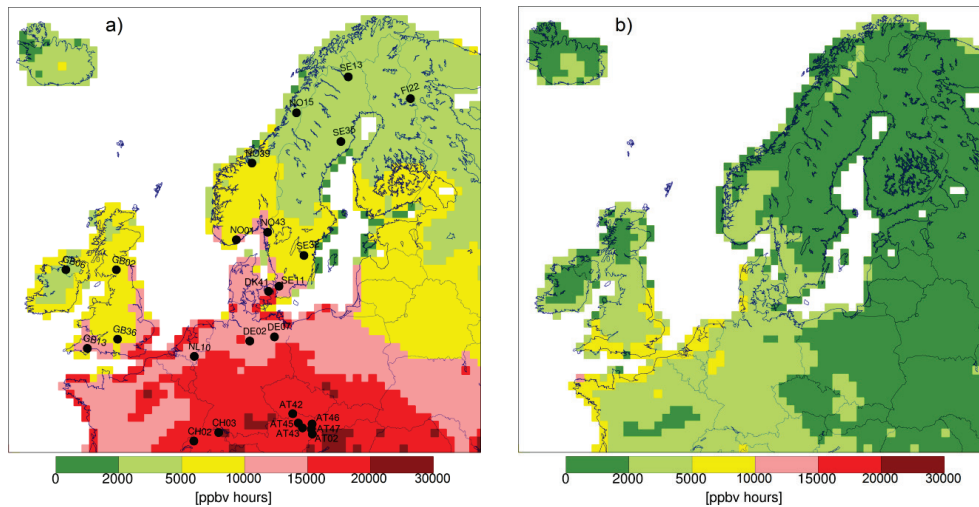
Ozonhalternas utveckling i landsbygds miljön i norra Europa under de senaste drygt tjugo åren karakteriseras av att de högsta halterna, ozontopparna, har minskat, medan de lägre och medelhöga halterna ökat, se Figur 2. Generellt ökande ozonhalter över hela norra halvklotet förklarar troligen de stigande låga till medelhöga halterna.

Ozonhalter i tätortsmiljö har delvis utvecklats annorlunda. Vid en jämförelse av trender för medelozonhalten i tätort och landsbygds miljö under perioden 1997-2010 på västkusten (Pleijel m.fl., inskickat manuskript) kan ingen signifikant trend urskiljas för Råö, en lokal i landsbygds miljö söder om Göteborg, medan det fanns en signifikant stigande trend på en utpräglat urban miljö i centrala Göteborg. Denna urbana ökning av ozonhalten kan sannolikt förklaras av minskade utsläpp av kväveoxider, och därmed minskande nedbrytning av ozon med kvävemonoxid. Under perioden minskade NO₂-halten i Göteborg svagt men signifikant.



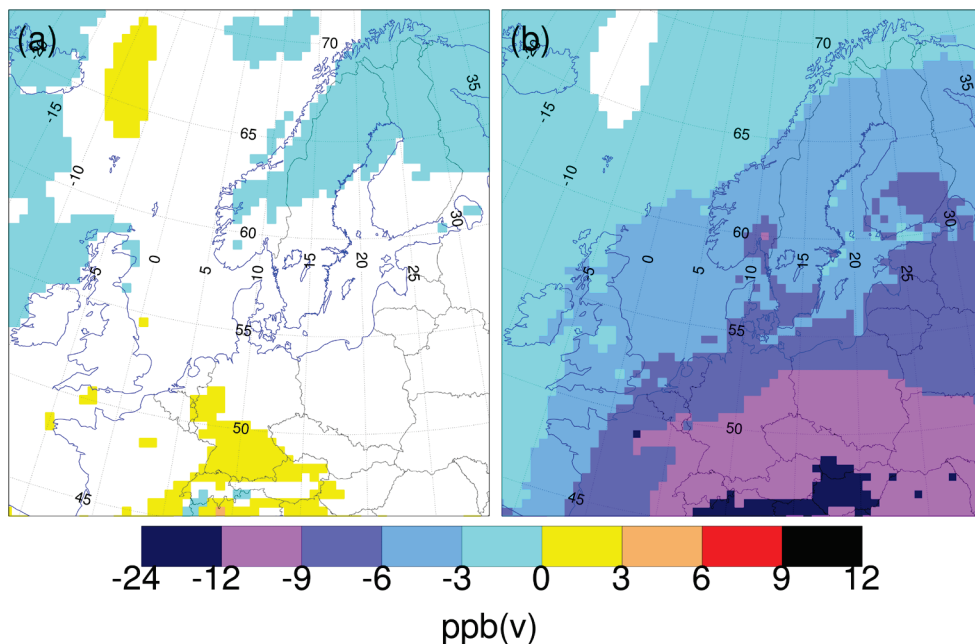
Figur 2. En översikt av trender hos percentiler för ozonhalt 1990-2011 för 25 lokaler i Europa norr om Alpena. Positionerna för platserna visas i Figur 3. Med t.ex. 95-percentil avses den halt som överskrids 5 % av tiden (här baserat på timmedelvärden). 50-percentilen kallas också median och är det typiska värdet som över- och underskrids lika stor del av tiden. Den avtagande trenden för 98-percentilen (de högsta halterna) och de ökande trenderna för 2-, 5-, 10-, 25- och 50-percentilerna är statistiskt signifikanta. Opublicerade data (Klingberg, Pleijel och Karlsson).

Framtida påverkan av ozon på växtlighet och människors hälsa beror av en kombination av förändringar i utsläpp av ozongenererande ämnen och ett förändrat klimat. Om europeiska utsläpp av ozonbildande ämnen minskar i enlighet med CLEO Eurobase scenariot fram till år 2050 beräknas de flesta relevanta ozonmåtten reduceras i Sverige. I Figur 3 visas t.ex. att målvärdet till skydd för växtligheten baserat på AOT40 (ackumulerad ozondos över halten 40 ppb; ppb = miljarddelar av luften) under april-september, 5000 ppb timmar, inte längre kommer att överskridas i Sverige och inte heller i stora delar av övriga norra Europa. Framtida ozonexponering av växtligheten beräknat som ozonflux, dvs. ozonupptag hos växter, kommer dock fortsatt överskrida målvärdet som används inom LRTAP-konventionen (Klingberg m.fl. 2014).



Figur 3. Beräknad AOT40 (ackumulerad ozondos över 40 ppb) under perioden april-september. a) medelvärde för perioden 1990-2009. b) medelvärde för perioden 2040-2059. Spridningsmodellen MATCH har i båda fallen använt meteorologi för respektive period från en nedskalning av modellresultat baserade på ett A1B scenario med den regionala klimatmodellen RCA3. a) visar även vilka stationer som ligger till grund för data i Figur 2. Bilden är baserad på Fig. 3 i Klingberg m.fl. (2014).

Reduceringen i Europa av AOT40 och andra relevanta ozonmått beror framförallt på förändringar i utsläppen av ozongenererande ämnen inom Europas gränser. Klimatförändring och ökande hemisfäriska bakgrundshalter av många ämnen orsakar förvisso signifikanta ändringar i ozonhalter, men dessa förändringar är oftast betydligt mindre än de som orsakas av emissionsförändringar. När förändringen av dygnets högsta ozonhalter under sommaren mellan åren 2000 och 2050 modelleras baserat endast på ett förändrat klimat förändras ozonhalterna över Sverige endast obetydligt. Om den modellerade förändringen istället baseras på både ett förändrat klimat och minskade utsläpp av ozonbildande ämnen minskar ozonhalterna i avsevärt större utsträckning, med en minskning på upp mot 9 ppb i södra Sverige. I Figur 4 presenteras modellresultat för förändring av dygnsmaximum (under april-september) av ozonkoncentrationer från 2000 till 2050.



Figur 4. Modellerad förändring av dygnsmaximum (under april-september) av ozonkoncentrationer från 2000 till 2050. (a) visar effekten av enbart klimatförändringen (ECHAM5_A1B3). I (b) ändras klimatet som i (a) samt att emissionerna av ozongenererande ämnen inom modell-domänen följer RCP4.5. Icke-signifikanta ändringar är vita. Bilden är baserad på Fig. 4 i Langner m.fl. (2012).

Partiklar

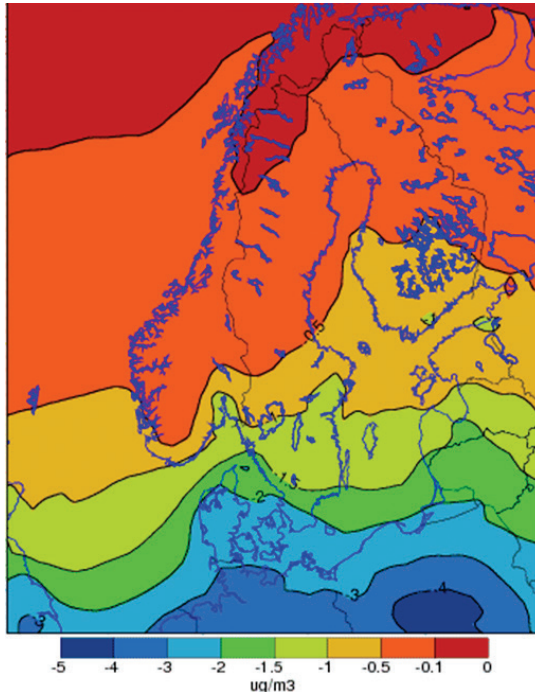
Den förmodade antropogena emissionsförändringen mellan 2005 och 2030 (CLEO Eurobase) beräknas leda till en tydlig minskning av PM_{2.5}-halten i hela Sverige, se Figur 5. I Skåne är minskningen omkring 2 µg/m³ (ca 30 %) och i hela Götaland och delar av Svealand större än 1 µg/m³ (ca 20 %), medan minskningen i norra Sverige är mindre än 0.5 µg/m³ (ca 10 %).

Bakgrundshalten av PM_{2.5} i Sverige beräknas variera från ca 7 µg/m³ i Skåne till ca 2 µg/m³ i Jämtland. Dominerande komponenter i PM_{2.5} är sulfat (ca 20 %) och organiska ämnen (ca 35-50 %). Den organiska fraktionen är komplex, och inom CLEO har utvecklats en modellbeskrivning av emissioner och atmosfäriska processer, som möjliggör en bättre representation av denna.

Vedeldning är den klart dominerande antropogena källan till organiska partiklar i Europa. Nya europeiska vedemissionsinventeringar från det nederländska forskningsinstitutet TNO, indikerar att denna källa hittills kraftigt underskattats (för Sverige bedöms endast ca 1/3 av den verkliga emissionen inkluderats). Den stora osäkerheten i vedeldningsemissionerna gör att beräknade förändringarna av PM_{2.5} också blir osäkra. Detta gäller speciellt de framtida halterna av organiska partiklar.

Emissioner av flyktiga organiska kolväten från europeiska skogar leder till bildning av biogena organiska partiklar. Det finns en mängd frågetecken kring hur dessa biogena emissioner kommer att utvecklas med ett förändrat klimat. Ökad

förekomst av insektsangrepp på träd kan t.ex. komma att leda till betydande ökning av stress-inducerade emissioner av partikelbildande ämnen, och därigenom ökande halter av sekundär organisk aerosol.



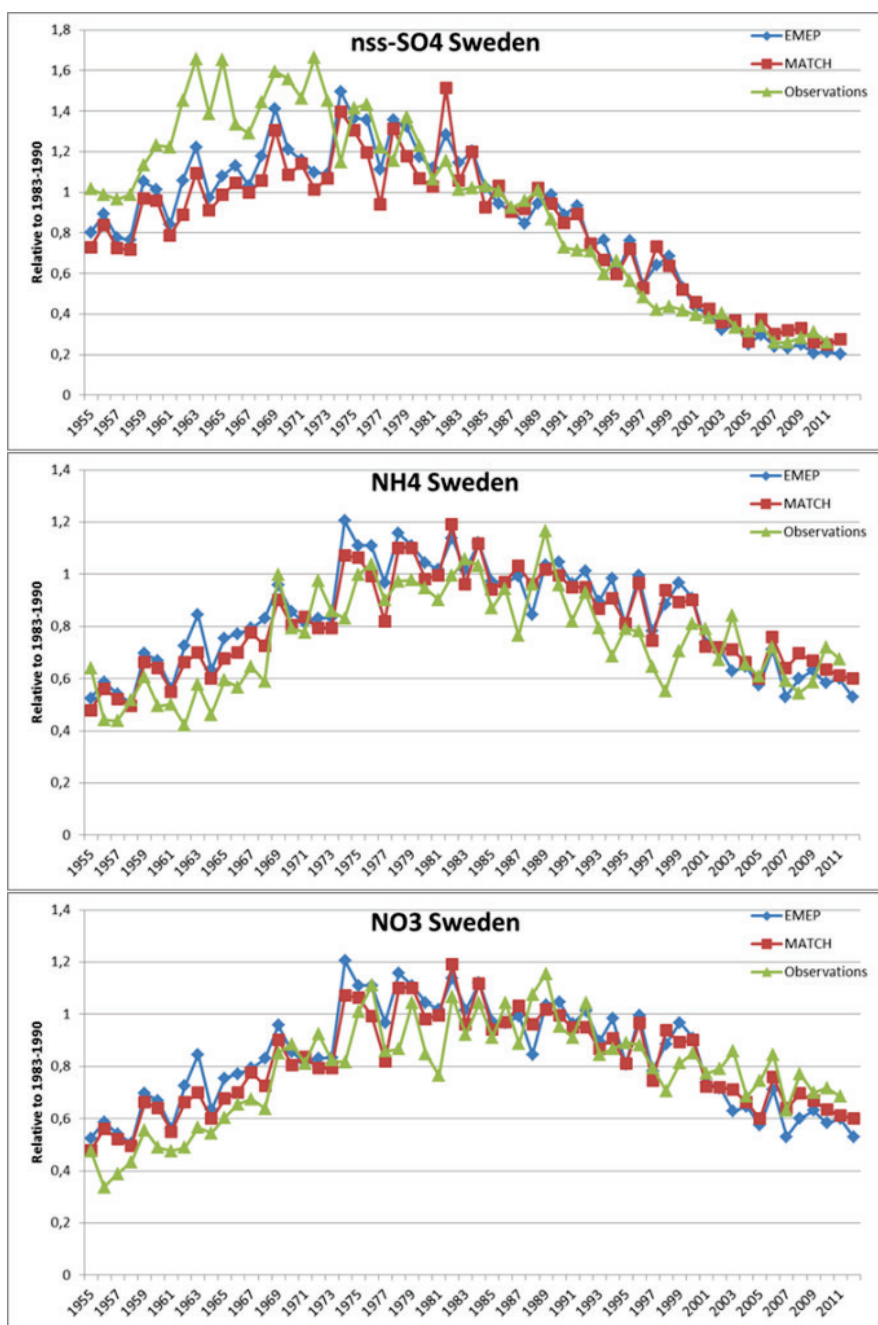
Figur 5. Beräknad skillnad för halten av PM_{2.5} mellan 2030 och 2005 års emissioner. Hänsyn är enbart tagen till förändringar i emissioner, och således inte till ändringar i klimatet. Enhet: $\mu\text{g m}^{-3}$.

Nedfall av kväve och svavel

Framtida nedfall av luftföroreningar påverkas av såväl utsläppsnivåer som förändringar i klimat. Förändring i deposition av svavel och kväve över Sverige fram till 2050 kommer huvudsakligen styras av förändringar av utsläpp i övriga Europa. Klimatförändringen spelar en mindre roll även om den påverkar uppehållstiden av luftföroreningar i atmosfären och därmed hur långt svavel och kväve kan transporteras inom Europa.

Sett över Europa som helhet beräknas nedfallet av svavel och oxiderat kväve minska med storleksordningen 60 respektive 40 % mellan 2000 och 2050. Enligt CLEO Eurobase kommer dock utsläppen av NH₃ inte att minska i lika stor utsträckning, varför nedfallet av reducerat kväve kommer vara i stort sett oförändrat, med en viss ökning nära källområden. Denna lokala ökning beror på att halterna av sulfat och salpetersyra i atmosfären minskar kraftigt, vilket resulterar i en minskad bildning av partiklar med ammoniak och därmed påverkas långdistanstransporten.

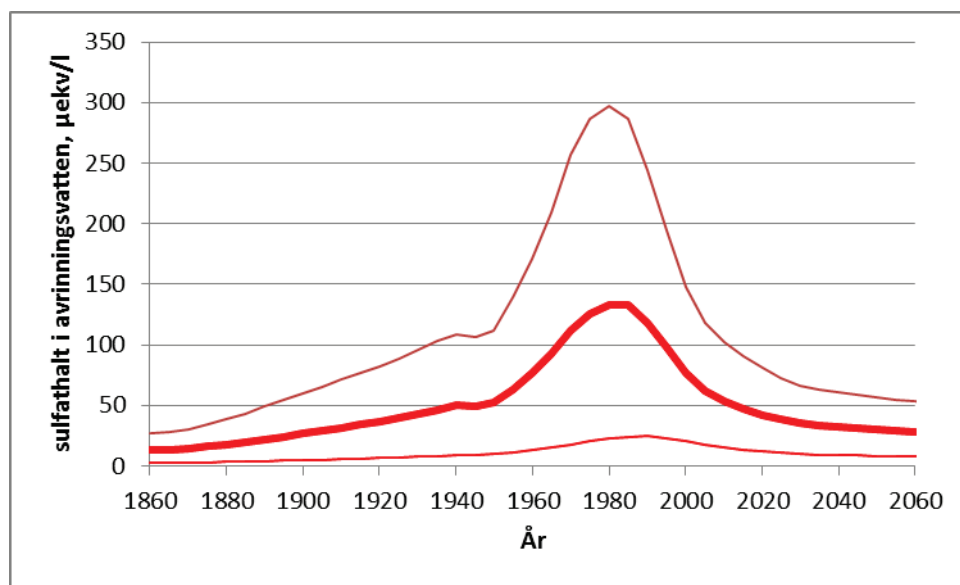
Inom CLEO och det angränsande EU-projektet ECLAIRE har vi även jämfört MATCH-modellen med EMEP-modellen och observationer för en längre period. I Figur 6 presenteras en jämförelse av medelhalter i nederbörd av sulfat, nitrat och ammonium i Sverige för 1955-2011, för de två modellerna samt kvalitetskontrollerade observationsdata. Figuren visar att modellerna ger likartade resultat, men även att de underskattar sulfatkoncentrationerna i nederbörd under 1960- och början av 1970-talet. Halterna av sulfat, nitrat och ammonium i svensk nederbörd har en nedåtgående trend sedan minst två decennier. När det gäller observerad deposition av de två kväveformerna visar andra studier att trenderna är mer oklara (Hansen m. fl., 2013)



Figur 6. Jämförelse mellan beräknad, med MATCH och EMEP modellerna, och observerad relativ förändring i halt i nederbörd i Sverige av sulfat, nitrat och ammonium för 1955 till 2011. Enhet: relativ förändring gentemot medelvärdet för perioden 1983-1990. nss-SO4 betecknar att halten av sulfat i nederbörden har beräknats exklusive bidraget från havssalt.

Svavel, försurning och återhämtning

Transport och utlakning av ämnen är av stor betydelse för både markens och vattnets kemiska miljö, och därmed för både landbaserade och akvatiska organismer. Vattenmiljön omfattar allt från markvatten till grundvatten, från små skogsbäckar överst i avrinningsområden till sjöar och stora vattendrag som sedan mynnar ut i havet. Mark omfattar marktäckket inom hela avrinningsområdet, men inom CLEO har vi främst fokuserat på skogsmark. Nuvarande och framtida utlakning påverkas av tre huvudsakliga drivkrafter: klimat, markanvändning och luftföroreningar. Den relativa betydelsen av dessa tre faktorer är inte lätt att varken kvantifiera eller generalisera eftersom många processer påverkas och dessa dessutom är sammanbundna med många kopplingar och återkopplingar.



Figur 7. Tidsutveckling av svavelkoncentration i ytvatten modellerat med MAGIC modellen för 2631 sjöar i Sverige. Den tjocka linjen visar medelvärde, de två tunna linjerna visar koncentrationer för de 10 % högst resp. lägst belastade sjöarna (Moldan m.fl., 2013).

Nedfallet av försurande ämnen är idag långt under de högsta nivåerna under 1980- och tidigt 1990-tal, och återhämtningen av utsatta försurade system är påtaglig. Svavelkoncentrationen i ytvatten har följt svaveldepositionens utveckling, med viss fördröjning, vilket illustreras med modellerade svavelkoncentrationer i ytvatten i Figur 7. Utlakning av sulfat orsakar mark- och vattenförsurning då markens buffringsförmåga i form av utbytbara baskatjoner minskar och aciditeten i mark-, grund- och ytvatten ökar. Sulfatkoncentrationen i avrinningsvattnet ökade flerfaldigt under andra halvan av 1900 talet och svaveldeposition var då den enskilt största orsaken till försurningen. Skogsbruket innebär bortförsel av baskatjoner från marken då baskatjoner tas upp av träden, byggs in i biomassan och skördas bort vid avverkning. Skogsbrukets relativa betydelse var betydligt mindre under perioden med hög sulfatdeposition. Dagens situation är mycket annorlunda; sulfathalterna har sjunkit kraftigt sedan 1990 och baskatjonförlusterna har minskat i samma takt.

Den relativa betydelsen av skogsbruket har idag blivit aktuell i försurnings-sammanhang på grund av den minskade svaveldepositionen, men även genom moderniseringen och intensifieringen av skogsbruket som idag resulterar i mer bortförd biomassa per arealenhet.

Att modellera framtida försurningsutveckling skulle vara relativt enkelt om luftföroreningar var den enda drivande orsaken. Kunskap om försurningsprocesser finns idag tack vare de massiva forskningsinsatser som gjordes när försurningsproblemet började uppmärksammas för drygt 30 år sedan. Men, frågan kvarstår hur återhämtningen påverkas av den framtida klimatförändringen, i kombination med skogsbruk och det kvarvarande atmosfäriska nedfallet.

För arbetet att beräkna framtidens utveckling har försurningsmodellen MAGIC (Cosby m.fl., 1985; 2001) använts, med indata beräknade för tre skogsbruksscenarioer (BUS, MBR och HBR), ett depositions-scenario (modifierad motsvarande current legislation, CLE) samt två klimatprojektioner (baserade på ECHAM respektive HADLEY).

Framtida klimatprojektioner innebär en gradvis förändring av nederbörd och vattenföring samt ökad temperatur. Ytterligare en klimatrelaterad faktor är mineralvittring i marken. En framtida temperaturökning skulle kunna öka vittringshastigheten som i sin tur påskyndar återhämtning (eller motverkar återförsurning) genom att baskatjonförrådet i marken återuppbyggs snabbare. För att ta hänsyn till detta beräknades förändringen i vittringshastighet orsakat av stigande temperatur med PROFILE-modellen (Sverdrup och Warfvinge, 1993), och dessa resultat fördes in i MAGIC-modellen.

Framtida återhämtning från försurning

På kort sikt fram till 2030 kommer återhämtningen från försurningen fortsätta under samtliga skogsbruksscenarioer och klimatprojektioner som utvecklats inom CLEO. Vattnets buffringsförmåga uttryckt som ANC (Acid Neutralizing Capacity) kommer öka mest i de mest försurningskänsliga sjöarna. I sjöar med ett ANC runt 30 $\mu\text{ekv/l}$ år 2010 kommer buffringsförmågan stiga med 6 till 8 $\mu\text{ekv/l}$ fram till 2030, beroende på vilket skogsbruksscenario och klimatprojektion som använts. Modellresultaten för ANC presenteras i Tabell 2. I genomsnitt kommer ANC i sjöar stiga med 2 till 4 $\mu\text{ekv/l}$. Längre fram kommer skillnader mellan scenarierna vara något större. År 2050 kommer de två intensivare skogsbruksscenarioerna i många fall innebära en svag återförsurning jämfört med statusen år 2030. Med BUS scenariot kommer återhämtningen plana ut eller svagt fortsätta under klimatprojektioner baserad på ECHAM. Däremot leder BUS i kombination med klimatprojektioner baserad på HADLEY till en svag återförsurning jämfört med 2030. Ännu längre fram blir skillnaderna mellan scenarierna ännu tydligare. Mot slutet av seklet kommer HBR scenariot betyda en i genomsnitt sämre vattenkvalitet jämfört med både år 2010 och med år 2030. För BUS och MBR scenarierna varierar resultaten år 2100 beroende på hur vittringen behandlas och vilken

klimatprojektion som använts, se Tabell 2. Detta gäller såväl för genomsnittet av alla sjöar som för de mest försurningskänsliga sjöarna där risken för biologiska skador är högst.

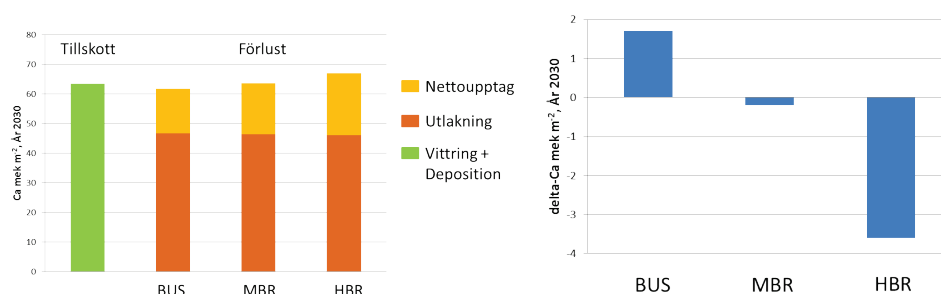
Skillnaderna i utlakningen av aciditet och alkalinitet beräknas vara relativt små fram till 2030 mellan skogsbruksscenarioerna. Anledningen är främst att 20 år (2010 – 2030) är en relativt kort tid med tanke på de små årliga förändringar som skogsbruksscenarioerna innebär.

Tabell 2. ANC ($\mu\text{ekv/l}$) i ytvatten beräknat med MAGIC-modellen för olika år och scenarier. S=skogsbruk och V=förändrad vittring. Resultaten avser medel för 2631 sjöar utspridda över hela Sverige.

		2030			2050			2100			2010 (observerat)
Skogsbruk		BUS	MBR	HBR	BUS	MBR	HBR	BUS	MBR	HBR	
ECHAM	S+V	168	167	166	169	168	165	170	166	155	164
	S	168	167	166	168	166	163	163	158	147	
HADLEY	S+V	167	167	166	166	165	162	167	163	152	164
	S	167	166	165	164	163	160	159	155	143	

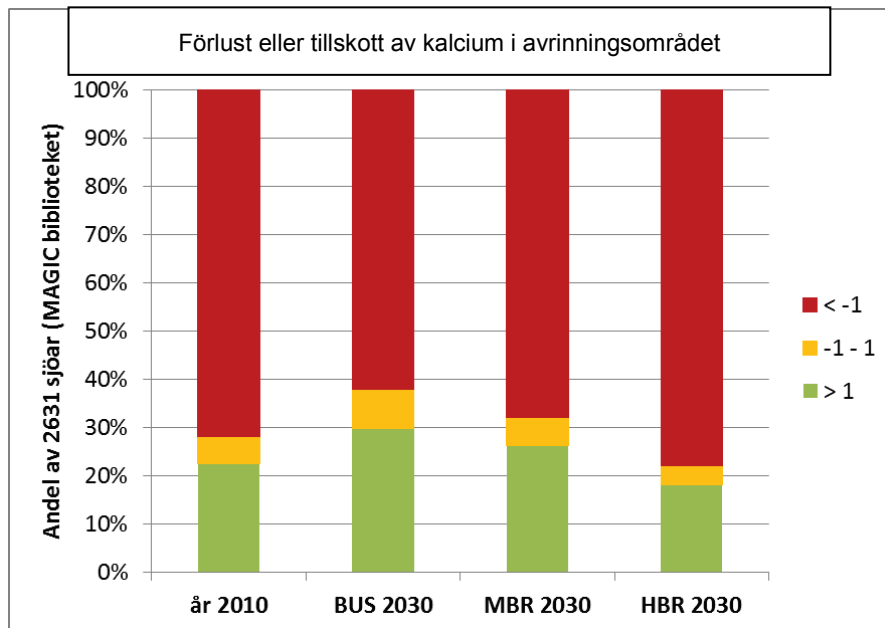
Detta kan illustreras med massbalansen för kalcium som presenteras i Figur 8. Både det årliga tillskottet av kalcium från vittring och nedfall, och den årliga förlusten genom utlakning och upptag till träden ligger i genomsnitt på drygt 60 mekv/m²/år. BUS-scenariot lämnar knappt 2 mekv/m²/år till uppbyggnaden av basmättnad i marken som långsiktigt leder till återhämtning. HBR-scenariot orsakar en årlig förlust på knappt 4 mekv/m²/år och leder därmed till en långsam återförsurning. En ytterligare faktor som bidrar till långsam påverkan på ANC är att förrådet av utbytbara baskatjoner är relativt stort (i svensk skogsmark vanligtvis mellan 10 000 och 20 000 mekv/m²) och ändras långsamt.

Klimatförändringen och miljömål



Figur 8. Tillskott och förlust av kalcium (Ca) under skogsbruksscenarioerna med klimat enligt HADLEY-projektionen. Vänster bild: Tillskott från vittring och deposition, samt förlust genom, nettoupptag och utlakning, Höger bild: skillnad mellan tillskott och förlust av kalcium (mekv/m²) år 2030.

Även om det är relativt små *genomsnittliga* skillnader i massbalansen av baskatjoner så är påverkan av de olika skogsbruksscenarioerna på den individuella utvecklingen av de modellerade sjöarna i vissa fall stora. Bakom genomsnittet finns sjöar med bra förutsättningar som kommer att fortsätta återhämta sig även vid ett mycket intensivt skogsbruk, och tvärt om, sjöar där även BUS-scenariot innebär en återförsurning på längre sikt. Andelen av de 2 631 modellerade sjöarna för år 2030 där det finns en årlig nettoupbyggnad av kalciumförrådet i marken, och därmed återhämtning av basmättnadsgraden, minskar från 30 % för BUS-scenariot till 26 % för MBR-scenariot. För HBR-scenariot sjunker antalet ytterligare till 18 %. Andelen av sjöar där skogsbruket kommer leda till en nettoförlust av Ca från marken ökar från 62 % (BUS) till 68 % (MBR) och 78 % (HBR). Samtidigt minskar andelen sjöar där tillskott och bortförsl av Ca är nära balans (årlig skillnad inom ± 1 meqCa/m²/år) från 8 % vid BUS till 6 % och 4 % vid MBR och HBR. Detta kan jämföras med situationen år 2010, där 22 % avrinningsområden hade nettoupbyggnad av Ca förrådet i marken, 72 % netto förlorade Ca och 6 % var i balans (Figur 9).



Figur 9. Andel av de 2631 modellerade sjöar där tillskott av kalcium till marken i sjöarnas avrinningsområden (atmosfäriskt nedfall och mineralvittring) överväger (grönt) respektive understiger (rött) årlig förlust i form av utlakning och upptag till skogen med mer än 1 meqCa/m²/år år 2010 och i år 20130 under 3 skogsbruks scenarier. Avrinningsområden där tillskott och förlust är i balans ±1 meqCa/m²/år i orange. Baserat på HADLEY-scenariot år 2030.

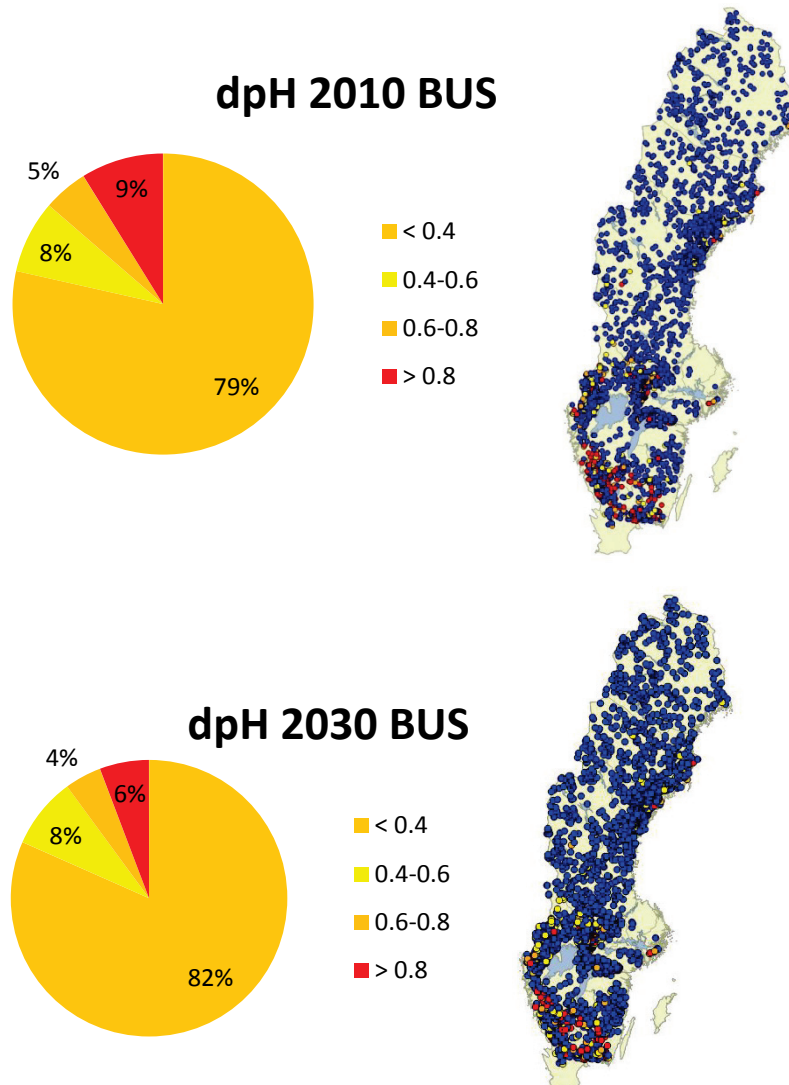
Försurningskänsliga sjöar är kraftigt överrepresenterade bland de modellerade sjöarna och det är därmed högst sannolikt att situationen är betydligt mindre allvarlig om man ser till det totala antalet sjöar i Sverige. För de mest försurningskänsliga sjöarna tyder dock resultaten på att ett icke anpassat skogsbruk kan leda till ytterligare utarmning av redan försurade system där förmågan att återhämta sig är låg.

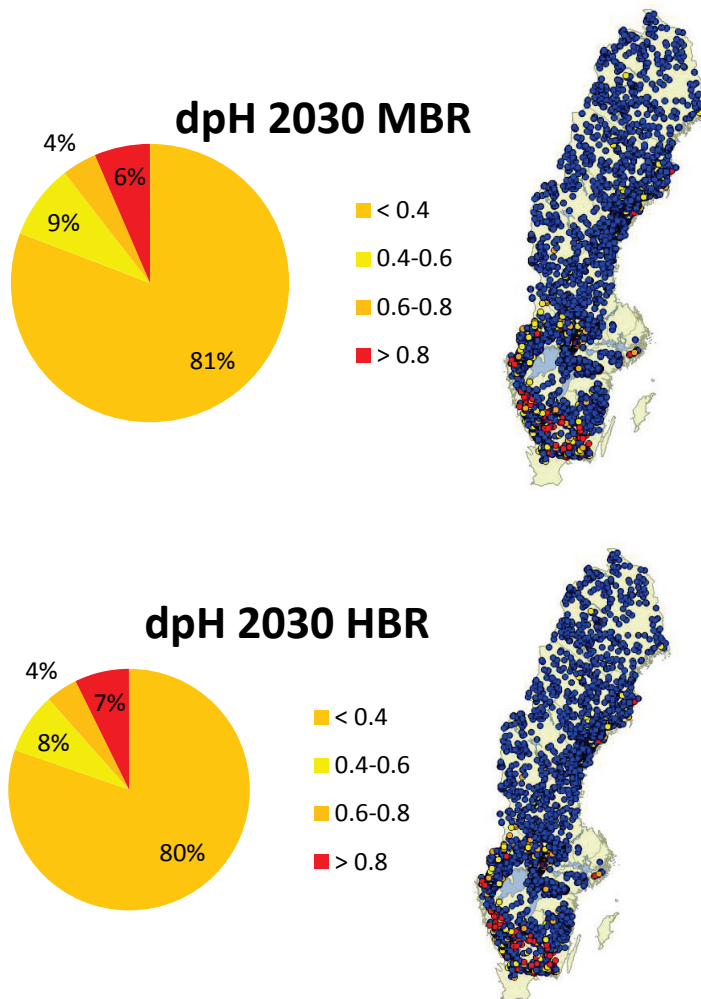
Framtida tillstånd i sjöar

Försurningsproblematiken kretsar runt förändringar av markens baskatjonförråd i sjöarnas avrinningsområden. ANC i sjövattnet erbjuder ett bra mått på försurningsstatus, som är både mätbar och modellerbar. Men försurningen handlar framförallt om påverkan på vatten- och markbaserade organismer. För att beskriva påverkan på biota lämpar sig pH bättre än ANC. Därför definieras försurning av sjöar i Sverige av en pH-sänkning med minst 0.4 pH-enheter från 1860 till det år som undersöks. Förändringen av pH räknas fram från modellerat ANC värde och betecknas ”dpH”.

Totalt modellerades 2631 sjöar med MAGIC. Sjöarna representerar ett urval försurningsdrabbade sjöar i Sverige. Resultaten kan därför inte rakt av jämföras med de uppskattningar av försurningsdrabbade sjöar som tidigare presenterats med viktade värden i Naturvårdsverket rapport (Naturvårdsverket, 2007), där varje sjö

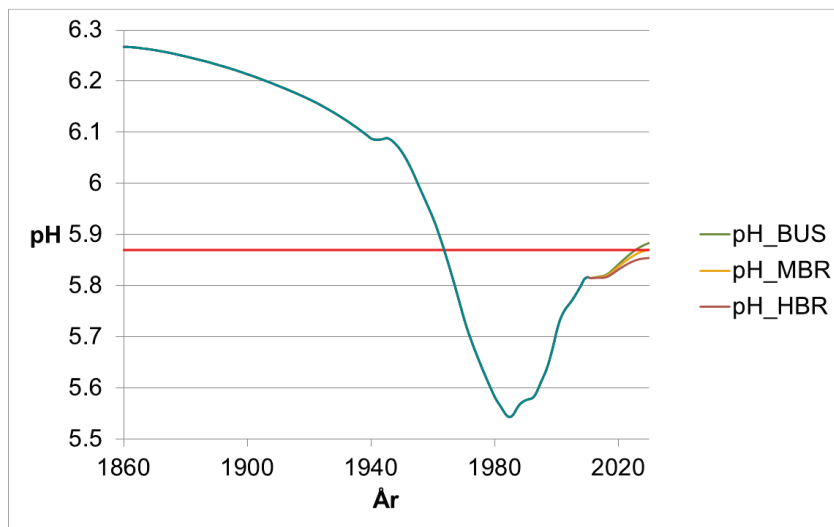
representerar en viss andel av Sveriges totala antal sjöar. En större andel av de modellerade sjöarna som presenteras här är alltså försurningspåverkade. Av de 2 631 modellerade sjöarna återfinns de flesta försurade sjöarna ($dpH > 0,4$) i södra Sverige. Om skogsbruket fortsätter som idag (scenario BUS) så kan en viss återhämtning från försurningen ske till år 2030, se Figur 10. Det är endast små skillnader mellan BUS och MBR, vilket kan förklaras av att avverkningen ibland (beroende på typ av avverkning och på område) är lägre i MBR än i BUS. Detta beror på att MBR-scenariot inte bara speglar ökad produktion (jämfört med idag) utan även hårdare miljökrav, vilket gör att vissa parametrar kan bli lägre i MBR än i BUS. HBR, med mer intensivt skogsbruk, visar också på återhämtning från försurning till år 2030, men därefter sker en viss återförsurning till år 2100. Andelen försurade sjöar år 2100 är dock lägre än idag.





Figur 10. Andel av de modellerade 2631 sjöarna som är försurade (ändring i pH (dpH) är mindre än 0.4 enheter) idag (2010), eller som kommer vara försurade år 2030 under de tre skogsbruksscenerierna. Flest försurade sjöar återfinns i södra Sverige, men det finns även försurningsproblematik i kustområden i norra Sverige.

Skillnader i återhämtningsförloppet framgår tydligare när ett urval av endast de mest försurningskänsliga sjöarna görs. Av de modellerade 2 631 sjöarna hade 783 (motsvarande 30 %) sjöar ett pH-värde över 6,7 år 2010. Dessa kan anses som relativt ohotade av försurning, antingen för att de aldrig har försurats eller för att de redan har hunnit återhämta sig. Genomsnittet av de resterande 1848 sjöarna sjönk från ett pH på 6,26 under mitten av 1800-talet till det lägsta genomsnittet (pH 5,54) under mitten av 1980-talet. Fram till 2010 har det skett en viss återhämtning där medelvärdet för pH har stigit till 5,82. Denna nivå är dock fortfarande >0,4 pH-enheter lägre än det förindustriella värdet. Om genomsnittet kommer att stiga tillräckligt för att passera dpH gränsen på 0,4 ser olika ut för de 3 modellerade scenarierna. Under HBR scenariot kommer återhämtningen plana ut under dpH 0,4 nivå, MBR kommer att tangera den och för BUS kommer genomsnittet inte längre överskrida försurningskriteriet, dpH<0,4 (Figur 11).



Figur 11. Tidsutveckling av genomsnittlig pH i sjövattnet under faktisk skogsbruks- och luftföroreningsförhållande från 1860 till 2010 samt för de tre skogsbruksscenarierna (BUS, MBR och HBR) från 2011 till 2030. Den horisontella röda linjen indikerar $\text{dpH}=0,4$ under den förindustriella nivån (1860). Sjöarna med högst pH ($\text{pH}_{2010}>6,7$, ca 30 % av de modellerade 2631 sjöarna) ingår inte.

Påverkan av DOC på försurning

Utlakning av löst organiskt kol (DOC) påverkar pH och ANC i vattnet. Enligt modellresultat från FLUXMASTER kommer DOC i bäckvattnet att stiga något mellan 2010 och 2030. I genomsnitt blir ökningen 0.1 mg/l enligt ECHAM och 0.26 mg/l enligt HADLEY, d.v.s. några enstaka procent av de vanligt förekommande DOC halter på mellan 5 och 10 mg/l. Detta tas inte hänsyn till i MAGIC-resultaten för ANC, då ett konstant DOC över tid använts i den modelleringen, eftersom det bedömts som försumbart (en förändring på som mest 0.003 pH enheter).

Vittring i ett förändrat klimat

Ökad vittring till följd av högre temperaturer har nämnts som en process som i viss mån skulle kunna ”kompensera” för ökad baskatjonförlust vid grot-uttag. Inom CLEO har massbalansberäkningar utförts för att undersöka detta. Indirekta effekter på vittring och uttagets storlek till följd av ändrad tillväxt och nedbrytning hanterades dock inte i studien, och inte heller förändrad fuktighet. Vittringsökningen till 2050 enligt de två klimatprojektionerna (ECHAM och HADLEY) beräknades med PROFILE-modellen, och jämfördes med ökningen i baskatjonförlusterna om biomassa-uttaget ökas från enbart stam till stam och grot. Resultaten visar att ökad vittring inte kompenserar för förlusterna vid grot-uttag, förutom i ett begränsat område i nordligaste Norrland. I södra Sverige var baskatjonförlusterna vid grot-uttag avsevärt större än den ökade vittringen. Detta innebär att ökad vittring orsakad av ökad temperatur inte generellt kan förväntas kompensera för baskatjonförlusterna vid grot-uttag.

Utlakning av kväve och övergödning

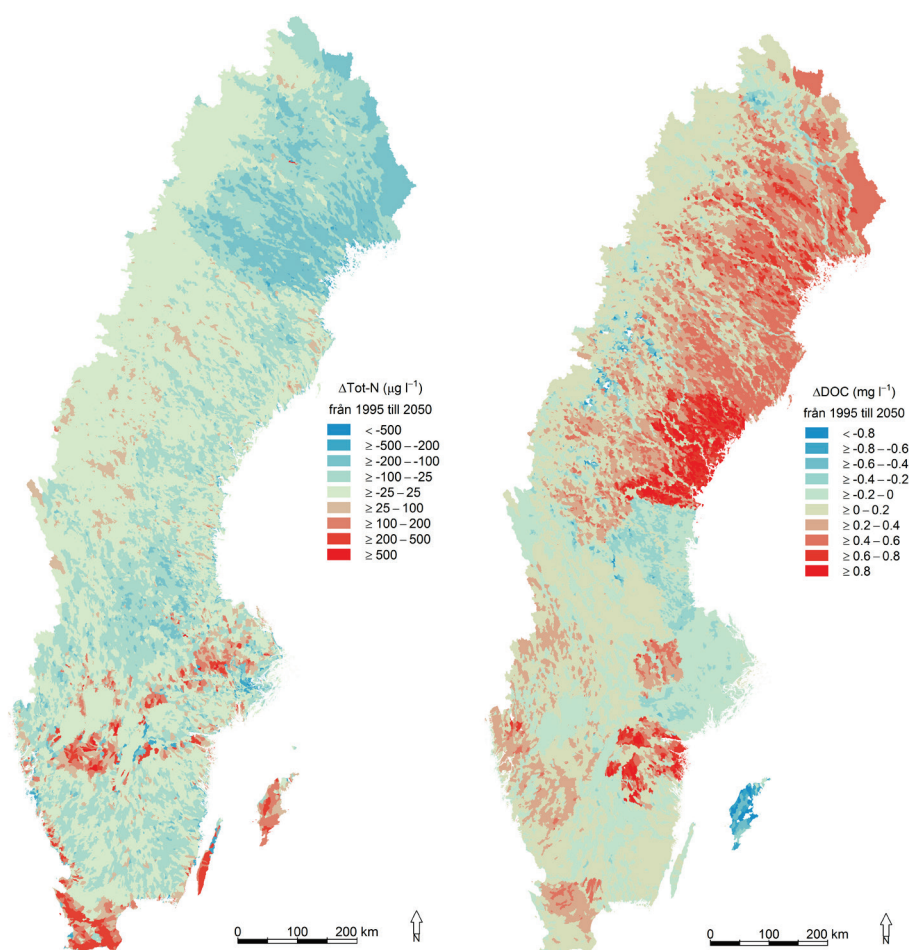
Kväveläckage från skogsmark utgör en mindre del av den totala belastningen på ytvatten men med klimatförändring och ett intensifierat skogsbruk finns en risk för ett ökat läckage och därmed en ökad påverkan på övergödningensstatus i sjöar, vattendrag och kustområden.

Inom CLEO har framtida utlakning studerats med hjälp av olika beräkningsmodeller. Modellerna beskriver de komplexa processer som styr kvävet omsättning i mark och vatten som även innefattar upptag och utsöndring från mikroorganismer och vegetation. Den komplexa omsättningen av kväve i ekosystemen är svår att beskriva med modeller och det finns osäkerheter i hur de ingående processerna påverkas av klimatförändringen. Små förändringar i antaganden om upptag och omsättning kan därför ge stora relativa skillnader i beräknat läckage. Detta gör att resultat blir beroende av vilka antaganden som gjorts i modellerna och resultat från olika modeller (CoupModel, S-HYPE och FLUXMASTER) presenteras därför här.

Framtida läckage av kväve och kol

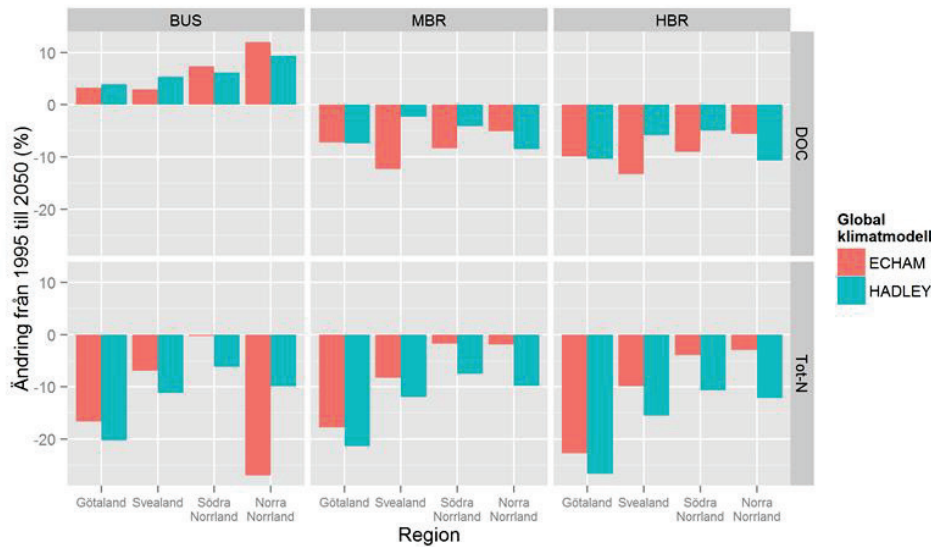
Enligt en analys av vädrets och klimatets inverkan på vattendragens kemi i nio väl undersökta små svenska skogsområden visade sig vattenkemin i små vattendrag inte vara speciellt känslig för temperaturförändringar, men däremot för ändrat vattenflöde. Den kombinerade effekten av ändrat klimat, atmosfärsdeposition och skogsbruk i totalt 18 scenarier för hela landet med hög rumslig upplösning simulerades med beräkningsmodellerna CoupModel, S-HYPE och FLUXMASTER. Resultaten indikerar måttlig ökning av DOC-halter (ca 2-7 %, baserat på två modeller) i BUS-scenariot, men minskande halter i MBR och HBR (en modell). Resultaten från CoupModel sammanfattas i Figur 12. För transport till havet var retention i sjöar och vattendrag betydande för kväve, medan retentionen av DOC var mindre.

Klimatförändringen och miljömål



Figur 12. Simulerade förändringar i Total-N ($\mu\text{g/l}$, till vänster) och DOC (mg/l , till höger) enligt uppskalning av simuleringsresultat från CoupModel via NET. Scenariot avser ECHAM BUS 2050 jämfört med 1995.

I Figur 12 presenteras simulerade förändringar i Total-N och DOC enligt uppskalning av resultaten från CoupModel via uppskalningsverktyget NET, för scenariot ECHAM BUS 2050 jämfört med 1995. Total-N-halterna minskar i simuleringarna med CoupModel med ECHAM till 2050. ECHAM scenariot innehåller en ökad temperatur vilket ger en högre skogstillväxt och växtupptag, också det minskande N-nedfallet i ECHAM scenariot leder till minskade Total-N-halter. Baserat på de länsvisa beräkningarna med CoupModel förändrades kvävehalterna i avrinningen från skogen för skogsbruksscenarioet BUS med i medeltal -12 % (standardavvikelsen = 12 %), motsvarande värden för kol är +5 % (8 %). DOC ökade fram till 2050 i ECHAM BUS i de norra delarna av landet där temperaturen ökade mest. En snabbare nedbrytning av organiskt material och en något högre produktion av förna förklarar denna ökning. De beräknade förändringarna var dock relativt måttliga.



Figur 13. Förändringar i halterna av DOC och Tot-N enligt simuleringar med CoupModel för ECHAM och Hadley klimat scenarier och skogsbruksscenarier BUS, MBR och HBR.

Resultaten från CoupModel för båda klimatscenarierna ECHAM och Hadley och alla skogsbruksscenarier BUS, MBR och HBR sammanfattas i Figur 13. Resultaten indikerar måttlig ökning av DOC-halter (ca 2-7 %, S-HYPE erhöill liknande resultat) i BUS-scenariot, men minskande halter i MBR och HBR. För transport till havet var retention i sjöar och vattendrag betydande för kväve, medan retentionen av DOC var mindre.

I S-HYPE-simuleringarna erhöill i genomsnitt ökade kvävehalter med ökande temperatur. Ökningen överstiger enligt modellresultaten den minskning av atmosfärsdepositionen av kväve som ingår i scenarierna, och ökningen av denitrifikation som också sker vid ökad temperatur. Det finns dock ingen återkoppling i HYPE-modellen som gör att skogstillväxten kan öka vid förbättrad näringstillgång, vilket kan medföra att den simulerade ökningen av kväveläckage är något överskattad. En ytterligare osäkerhet i scenariosimuleringarna är beskrivningen av långsiktiga förändringar i markens kväveförråd.

Även om processbeskrivningarna i CoupModel och HYPE har likheter, så kvarstår skillnaderna (t.ex. avseende återkoppling till skogstillväxt) och dessutom kan hastigheten hos ingående processer skilja mellan uppsättningarna av modellerna. Användandet av flera modeller kan vara en fördel som en metod för att belysa osäkerheter i resultaten, och tydliggöra vilka processer som påverkar uppskattat utlakning. Sammantaget pekar modellernas resultat åt olika håll, men förändringarna i kvävetransport var storleksmässigt relativt måttliga.

Jordbrukets roll i jämförelse med utlakning från skogar

Kvävehalterna i avrinningen från jordbruksmark är generellt betydligt högre än från skogsmark. Eftersom fokus inom CLEO har varit skogsmark, beräknades

förändringar i kväveläckage från övriga markklasser med standardversionen av S-HYPE-modellen. Resultaten för jordbruksmark var i relativa tal mindre tydliga, med såväl minskningar som ökningarna i modellerat kväveläckage.

Hur stort kan problemet med kväveutlakningen vara i framtiden?

I de kombinerade scenarierna var förändringar i kvantifierade halter och ämnestransport förhållandevis små fram till år 2050, särskilt i relation till osäkerheterna i modeller och indata, och i relation till den naturliga variationen. För kvävehalter i avrinningen från skog erhöles delvis motstridiga resultat, då halterna minskade svagt i klimatscenerierna enligt en modell, men ökade enligt en annan modell. För transporten till havet var förändringarna relativt små. Effekten av temperaturhöjningen är liten men ökad framtida nederbörd förväntas däremot ha något större effekt.

Kvävenedfallet har inte minskat lika mycket som svavelnedfallet, och södra Sverige tar idag fortfarande emot kraftigt förhöjda mängder av kväve från atmosfären jämfört med förindustriellt tillstånd. Totalt sett tyder dock resultaten på att klimatförändringen och ett förändrat skogsbruk inte kommer att påverka läckaget av kväve i någon större omfattning. I denna del av studien har dock inte effekter av gödsling enligt s.k. BAG ingått. Det finns dock med i avsnittet om Synergier och konflikter nedan.

Eutrofiering och försurning är allvarliga hot mot Östersjöns framtida miljö och här bidrar många föroreningskällor och orsaker utöver avrinning från skogsmark. Åtgärds- och förvaltningsstrategier behöver därmed ta hänsyn till en rad faktorer inklusive klimatförändringen för att uppnå ett tillfredsställande miljötillstånd i framtiden (Jutterström m.fl. 2014).

Relativ betydelse av tre drivkrafter: klimat, skogsbruk och luftföroreningar

Vid en jämförelse av den relativa påverkan från framtida klimatförändring, skogsbruk och luftföroreningar framgår att den del av miljöpåverkan som orsakas av luftföroreningar i många fall minskar i jämförelse med de som orsakas av klimatförändringar och skogsbruk. Detta är inte osannolikt med tanke på de fortsatt avtagande emissionerna (och därmed nedfallet) i framtida scenarier. Dock ska man ha i åtanke att detta är den relativa påverkan och för systemet som helhet måste även de mindre påverkansfaktorerna räknas med. Det kvarvarande nedfallet av svavel och kväve fortsätter påverka ekosystemen, och ytterligare utsläppsminskningar utöver de redan avtalade som finns med i beräkningen inom CLEO skulle vara gynnsamma för försurningsåterhämtning och för att minska risken för framtida övergödningsproblem.

Försurning

Ett intensivare skogsbruk har enligt våra resultat potential att i värsta fall orsaka återförsurning i skogsmark och avrinning från skog. En ökad vittring på grund av

temperaturhöjning orsakad av klimatförändringen kan i viss mån motverka detta, men den potentiella ökningen i vittringen är generellt betydligt mindre än de ökade baskatjonförlusterna vid ett intensivare skogsbruk. Svavelnedfallet kommer fortsätta ha en försurande effekt på mark och vatten, även om i kraftigt minskad omfattning tack vare den konstaterade och förväntade nedfallsminskningen. Baskatjonutlakningen orsakad av avverkning kommer alltså att öka i betydelse, framförallt med ett intensivare skogsbruk.

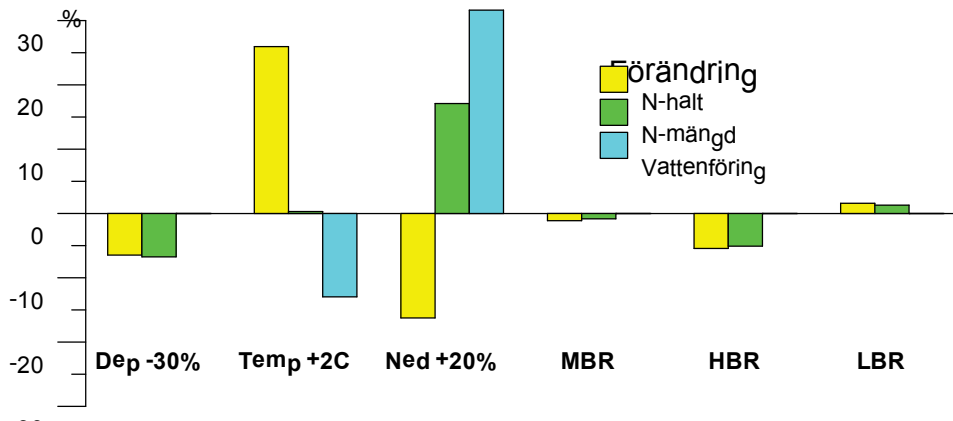
Kväveläckage

För kväveläckage har både skogsbruk och deposition mindre inverkan jämfört med klimatförändringen, såsom förändringar i nederbörd och temperatur. Klimatet är även den dominerande faktorn när det gäller förändring i framtida utlakning av DOC. Förväntade förändringar i DOC (och DON) halter är i det kortare perspektivet (10–15 år) relativt små.

De kombinerade scenarieräkningarna utgår från realistiskt sammansatta framtida förändringar i klimat, deposition och skogsbruk. Men sammansatta scenarier där flera faktorer ändras samtidigt erbjuder inte möjligheter att utvärdera påverkan av klimat, skogsbruk och luftföroreningar var och en för sig. För att isolera/uppskatta betydelsen av enskilda påverkansfaktorer har en känslighetsanalys med S-HYPE-modellen gjorts för hela Sverige. Känslighetsanalysen utgår från en S-HYPE referenskörning med uppmätta klimatdata för perioden 1999 till 2008, och är alltså inte kopplad till klimatsceniernas drivdata. Syftet är att visa modellens känslighet för förändringar i faktorer som också ingår i de kombinerade CLEO skogsbruks- och klimatscenierna och på så sätt urskilja dominerande faktorer.

Resultat av känslighetsanalysen presenteras i Figur 14 och tyder på att förändringar i klimatet kan betyda mer för kväveläckaget än förändringar i deposition och skogsbruk.

Klimatförändringen och miljömål



Figur 14. Resultat från känslighetsanalysen där en faktor i taget förändrades. Förändringar i långtidsmedelvärde av kvävehalt och mängd transporterat till havet från hela Sverige enligt simuleringar med S-HYPE anges i procent från referenssimuleringen (1999-2008).

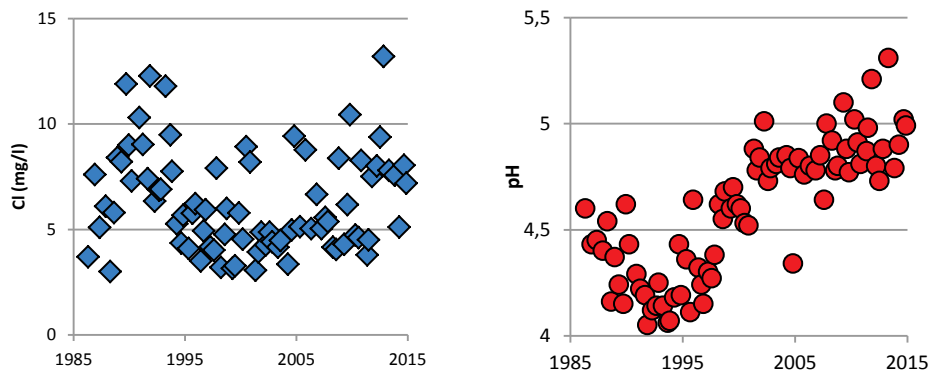
Halten kväve i avrinning ökade med ökande temperatur, men den totala mängden N transporterad till havet var nästan oförändrad. Förändringar i nederbörd gav relativt stort utslag för både halter och transport för hela landet, medan skogsbruksscenarioerna hade en mindre inverkan på beräknade framtida läckage, liksom förväntad minskad atmosfärsdeposition. För känslighetsanalysen konstruerades ytterligare ett skogsbruksscenario LBR ("Low biomass removal") vilket innebär ett minskat bortförande av växtrester i skogsmark med 30 %. De förhållandevis låga reaktionerna på förändringar i skogsbruk beror på att en stor andel av kvävet som når havet härrör från andra källor än skog, samt att skogsmarkens kväveförråd är så stora att de omsätts långsamt. Intensivt skogsbruk (HBR scenario) kan leda till minskad kväveutlakning i ungefär samma omfattning som det fortsatt minskande kvävenedfallet. Påverkan från de två mindre intensiva skogsbruksscenarioerna leder till en förhållandevis liten minskning (MBR) eller ökning (LBR) av kväveutlakning.

Episoder och störningar – allt viktigare vid utvärderingen av miljömålen

I takt med att svavelnedfallet minskat har betydelsen av episoder och störningar för mark- och ytvattenstatus ökat. Kraftiga havssaltsepisoder, då stormar för med stora mängder havssalt som deponeras i skogen, ger kraftiga men tillfälliga effekter på markvattnet. Störningar i form av stormar eller insektsangrepp, som påverkar skogens hälsa negativt, kan orsaka kraftigt förhöjda halter av nitratkväve i markvattnet. Nitrifieringen innebär även ökad förurning. Påverkan på markvattnet kan potentiellt även medföra effekter i ytvatten. Idag när halten av sulfationer är lägre, har anjonerna klorid och nitrat fått ökad betydelse för transport mellan mark och vatten.

Surstötter vid havssaltsepisoder

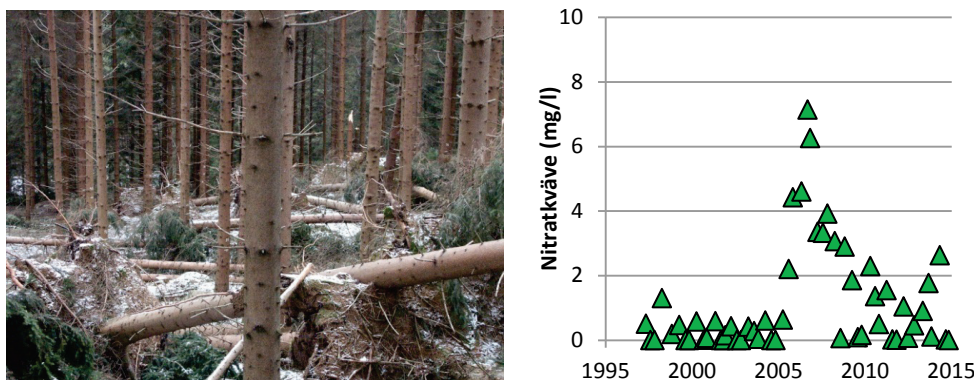
Även om havssalt är neutralt, är detta viktigt att beakta vid uppföljning av miljömålet *Bara Naturlig Försurning*. Skälet är att natrium byter plats med andra positiva joner på markpartiklarna, till exempel vätejoner i sura marker, vilket sänker pH i markvattnet och potentiellt även i ytvattnet. Det finns dokumenterade episoder med högt nedfall av havssalt i Sverige och Norge under början av 1990-talet, med bland annat fiskdöd som följd. Dessa episoder är tydliga även i markvattenkemiska mätningar inom Krondroppsnetet, med kraftigt förhöjda klorid- och natriumhalter under perioden. I många fall observeras även effekter på försurningsindikatorer såsom pH, syraneutraliserande förmåga (ANC) och/eller halten oorganiskt aluminium. Ett exempel på förändringar i kloridhalt och pH presenteras i Figur 15.



Figur 15. Kloridhalt (Cl) och pH i markvattnet i Hjärtsjömåla i Blekinge. De förhöjda kloridhalterna i början av 1990-talet avspeglas i en temporär sänkning av pH. pH-kurvan visar, utöver havssaltsepisoden, även på viss pågående återhämtning från försurning.

Kväveutlakning efter störningar

Växande skog vid god hälsa tar i Sverige upp den absoluta merparten av markens oorganiska kväve. Undantaget är sydvästligaste Sverige, där förhöjda nitratkvävehalter i markvattnet idag ofta förekommer. Störningar som påverkar trädens upptag negativt, innebär dock ofta förhöjda nitratkvävehalter även i övriga Sverige. Effekten är ofta störst i de kväverika sydvästra delarna. Det är sedan länge känt att avverkning medför kraftigt förhöjd nitratkvävehalt i markvattnet, med risk för utlakning till ytvatten som följd. I Kallgårdsmåla i Blekinge samt i Västra Torup i Skåne ökade observerad halt nitratkväve till 20-25 mg/l efter avverkning.



Figur 16. Stormskador i halländska Timrilt efter stormen Gudrun i januari 2005 (t.v.) samt observerad halt nitratkväve i markvattnet i Timrilt (t.h.).

Även efter stormen Gudrun 2005 uppvisade många mätplatser inom Krondroppsnetet kraftigt förhöjda halter nitratkväve, exempelvis Timrilt i Halland, se Figur 16. Insektsangrepp är en ytterligare störning som kan påverka markvattenkemin. I Klippan i Västra Götalands län drabbades beståndet av granbarkborrar under 2008, som dödade alla granar. Detta orsakade kraftig förhöjning av nitratkvävehalten i markvattnet under några år.

Ökad betydelse av störningar i framtiden?

Det är oklart om och i så fall hur frekvensen av havssaltsepisoder förändras i framtiden. Det är dock klart att deras relativa betydelse idag ökat då svavelnedfallet minskat. Kloridjonen är i många områden den anjon som har störst potential att dra med sig vätejoner från mark till ytvatten, och har därmed en nyckelroll för kopplingen mellan mark och vatten.

Frekvensen av både storm- och insektsskador kan öka om klimatet blir varmare och fuktigare. Det kan medföra ökad nitrifiering som orsakar ökad försurning och förhöjt läckage av nitratkväve, speciellt i områden där mycket kväve ackumulerats i markerna. Detta kan även ge effekter på ytvatten, speciellt om stora områden drabbas samtidigt.

Utlakning av kvicksilver

Liksom för svavel så har såväl utsläpp som nedfall av kvicksilver minskat kraftigt under de senaste decennierna. Trots detta har ingen lika tydlig återhämtning skett utan kvicksilverhalten i insjöfisk i ett stort antal svenska sjöar är förhöjd över de gränsvärden som satts upp för konsumtion. En del av orsaken är att stora mängder kvicksilver (med både antropogent och naturligt ursprung) under lång tid lagrats upp i skogsmark och kan utgöra en källa till läckage till ytvatten. Läckaget är under normala betingelser relativt långsamt men kan påverkas av skogsbruk och markstörningar som körskador.

För att uppskatta storleken på skogsbrukets påverkan har en nationell kvicksilverdatabas omfattande 166 skogliga områden sammanställts inom CLEO genom inventering av genomförda projekt där total- och metylkvicksilver uppmätts i avrinningsvatten. Med hjälp av databasen uppskalades utlakningen av total- och metylkvicksilver till Sverigenivå för dagens situation och för scenarier med ett förändrat skogsbruk. Uppskalningsstudien visar att utlakning av totalkvicksilver kan öka med upp till 3 % och för metylkvicksilver med upp till 6 % på nationell nivå med intensivare skogsbruk jämfört med dagens nivåer. Halterna av total- och metylkvicksilver är idag generellt högst i sydvästra Sverige. Jämförbara resultat har också presenterats i en experimentell studie (Eklöf m fl., 2015b).

Ett framtida intensifierat skogsbruk och ändrat klimat kan öka störningar i skogen, såsom körskadur och stormskador, vilket påverkar kvicksilverutlakningen. Exempelvis kan en ökad frekvens av körningar, till följd av ökat skogsbränsleuttag, askåterföring och gödsling, i kombination med varmare och fuktigare vintrar öka risken för körskadur i delar av Sverige. Markstörningar leder inte alltid till förhöjda halter av metylkvicksilver, men observationer visar ett statistiskt samband. För ovanstående skador har inget scenario beräknats, däremot användes ett scenario för dikesrensning. Uppskalningen visade att åtgärdens påverkan var ytterst marginell sett ur nationellt perspektiv. Däremot kan dikesrensning få större lokala effekter. Det är troligt att även störningar, såsom körskadur, stormskador och barkborreangrepp, har marginell effekt på utlakningen av kvicksilver ur ett nationellt perspektiv, men lokalt kan påverkan bli större.

Även klimatförändringar kan påverka kvicksilverutlakningen då ökad nederbörd medför ökade avrinningsmängder. En experimentell studie av Munthe m.fl. (2015) visar att halter av totalkvicksilver och i ännu högre grad metylkvicksilver i ytvatten kan öka i regioner där nederbörden ökar.

Ökade kvicksilverhalter i ytvattnet till följd av klimatförändringar och intensivare framtida skogsbruk, kan påverka fiskbeståndet negativt. En experimentell studie av Wu (2015) visar att kvicksilverhalten i fisk ökade ca 15 % i sjöar i avrinningsområden efter skogssavverkning, jämfört med före avverkningen.

En begränsning med den framtagna kvicksilverdatabasen är att urvalet av de 166 mätplatserna inte är gjort för att möjliggöra en generalisering av samband till Sverigenivå utan efter mål i varje enskild studie. Bland annat varierar tidpunkterna för mätningarna och antal observationer per mätplats mellan olika projekt, vilket bidrar till osäkerheter i uppskalningsstudien.

Sammanfattningsvis kan sägas att klimatförändringen och förändringar i framtida skogsbruk kan leda till högre kvicksilverhalter i ytvattnet och sötvattenfisk, och således medföra en konfliktrisk med miljömålet *Giffri miljö*.

Skogen och ekosystemtjänster

Inom CLEO har arbetet med ekosystemtjänster inriktats på att klargöra begreppet, att identifiera och beskriva de viktigaste ekosystemtjänster i svenska skogar samt att göra en kvantitativ analys av de viktigaste ekosystemtjänsterna i skog (Hansen m.fl. 2014; Hansen och Malmaeus 2015). Vidare har en sammanställning av kunskapsläget kring ekonomisk värdering av ekosystemtjänster gjorts, baserat på svenska och nordiska studier. I denna del har också ingått att diskutera framtida behov av forskning för att komplettera och/eller förbättra en ekonomisk värdering av ekosystemtjänster i skog (Tekie och Hansen, 2014). Här presenteras en kvalitativ analys av kopplingen mellan olika ekosystemtjänster och försurning och övergödning (Hansen, 2015).

Hur kopplar försurning och övergödning till ekosystemtjänster?

Luftföroreningar påverkar skogsekosystem genom att ändra en rad vanliga funktioner som till exempel primärproduktion (trädtillväxt) och de biogeokemiska kretsloppen. Försurning (N och S) och övergödning (N) är huvudprocesserna som kopplar till för hög deposition av N och S och detta påverkar i sin tur en lång rad av ekosystemtjänster som vi är beroende av eller utnyttjar för vår överlevnad och för vår välfärd. Dessa kan beskrivas och eventuellt värderas systematiskt genom att vi använder ett ramverk kring ekosystemtjänster (MEA 2005; TEEB 2010). I Tabell 3 beskrivs de viktigaste ekosystemtjänsterna i de svenska skogarna enligt de fyra kategorierna försörjande, stödjande, reglerande och kulturella ekosystemtjänster och hur de kopplar till försurning och övergödning.

Påverkan på försörjande ekosystemtjänster

Tillväxten i svenska skogar begränsas av tillgången på näring, i första hand kväve. Deposition av kväve leder främst till ökad trädtillväxt i kvävebegränsade ekosystem vilket klart framgår av försök med skogsmarksgödning där markant tillväxtrespons ses för både gran och tall på svaga och medelgoda marker. Den relativa responsen är större i norra än i södra Sverige. Effekterna på tillväxten har en positiv effekt på timmerproduktionen och även på försörjningen av biomassa till bioenergi. Å andra sidan kan ytterligare N deposition under N-mättnad leda till en större mortalitet av träd.

Försurning på renbetesmarker kan leda till mindre födotillgång (försurningskänsliga lavar) men då renarna oftast lever i delar av Sverige där försurningen inte är lika utpräglad så är sannolikt denna påverkan begränsad. En del försurningskänsliga svampar svarar på ökat N nedfall som till exempel kantareller som har visat sig minska vid försurning medan en del andra svampar verkar gynnas, till exempel trattkantarell. Ett högre kvävenedfall och en ökad försurning i södra Sverige har förmodligen tillsammans med tätare skogar med ett minskat ljusinsläpp som följd bidragit till minskad lingonförekomst eftersom arealen produktiv lingonmark har drastiskt minskat. Blåbärsproduktionen befaras också minska i svensk skogsmark som en följd av N nedfallet.

Nedfall av försurande ämnen leder till att det avrinnande vattnet från skogsmark blir surt och aluminiumrikt. Detta kan orsaka skador på vattenlevande växter och djur. Bland de bottenlevande djuren är snäckor, musslor och kräftdjur särskilt känsliga. Många fiskarter är också känsliga för försurning till exempel mört och laxfiskar. Tillgängligheten på fisk har effekt på fritidsfisket (kulturell ekosystemtjänster).

Så länge marken behåller sin förmåga att buffra försurande ämnen och vittringen är tillräcklig är grundvattnet skyddat. I områden där detta inte håller sjunker grundvattnets förmåga att neutralisera tillförseln av syra vilket leder till försämrat vattenkvalitet i yt- och grundvatten och vattnets halt av hälsoskadliga metaller ökar. Surt grundvatten som används till dricksvatten fräter på vattenledningarna på väg till hushållen vilket gör att halterna av metaller (koppar, kadmium och zink) ökar i vattnet.

Tabell 3. De viktigaste ekosystemtjänsterna i de svenska skogarna enligt de fyra kategorierna försörjande, stödjande, reglerande och kulturella ekosystemtjänster och hur de kopplar till försurning och övergödning. (+) betyder att försurning/övergödning har positiv effekt medan (-) betyder att försurning/övergödning har negativ effekt.

Typ	Ekosystemtjänst	Luftföroreningars påverkan positiv (+) och negativ (-)
Försörjande tjänster	Timmer, massaved och biobränsle	N deposition kan ge ökad träd tillväxt (+)
	Vilt	Hur viltet påverkas av försurning och övergödning, till exempel upptag av tungmetaller i näringskedjan är inte kartlagt (?)
	Betesdjur och foder	Renlavar är känsliga för försurning, dock liten påverkan i aktuella områden
	Bär	N nedfall i södra Sverige bidrar till minskad bärförekomst (-)
	Svamp	Svampar påverkas av N nedfall (och försurning), vissa arter gynnas, andra missgynnas (+/-)
	Rent dricksvatten	Försurning och kväveläckage kan ge sämre vattenkvalitet i yt- och grundvatten (-)
	Fritidsfiske i skogssjöar	Många fiskarter är känsliga för försurning till exempel mört och laxfiskar, kvicksilverläckage kan göra fisken otjänlig (-)
Stödjande tjänster	Biogeokemiska kretslopp	En rad viktiga processer störs vid förhöjd N nedfall till exempel nedbrytning, mineralisering, vittring och C inlagring
	Markens bördighet	Försurning leder till utlakning av baskatjoner vilket på sikt kan försämra markens bördighet (-)

	Fotosyntes – primärproduktion	N nedfall kan leda till ökad tillväxt, ökad produktivitet (+)
	Habitat och livsmiljöer	Skogens habitat förändras som följd av ändring i artsammanställningen och minskningen av antal arter.
	Biologisk mångfald och genetiska resurser	Vissa arter är känsliga för försurning, andra drabbas indirekt genom att födotillgången förändras, N-nedfall gynnar kväveälskande arter (-)
Reglerande tjänster	Klimatreglering, kolupptag och kolinlagring	N nedfall kan ge ökad tillväxt och ökad kolinlagring
	Förebyggande av stormskador	Ökad N nedfall kan påverka förhållandet mellan rot/träd-biomassa och försvaga rotsystemet (-)
	Naturlig kontroll av skadedjur och sjukdomar	Bestånd som är känsliga som följd av försurning har större risk att drabbas av skadedjur (-)
	Ren syrerik luft	Vegetationen filtrerar partiklar och tar upp gas från luften och renar på så sätt luften (+)
Kulturella tjänster	Vardagsrekreation och träningsaktiviteter	Övergödning påverkar rekreativa fisket. Artsammansättning mot fler kväveälskande arter som till exempel algbloomingar (-)
	Turism	Övergödning, försurning och kvicksilver (se ovan) kan påverka fiske- och friluftsturism (-)
	Mental och fysisk hälsa	Ökade tungmetallhalter i vilt, kvicksilver i fisk (-)
	Miljö och estetik	N nedfall påverkar vilda arters blomning, som ibland förstärks, reduceras och/eller senareläggs specifikt för enstaka arter (-)

Påverkan på stödande ekosystemtjänster

Markens bördighet försämras genom att viktiga baskatjoner lakas ut från marken och genom att nedbrytningen av organiskt material minskar vid lägre pH-värden och därmed minskar även mineraliseringen av N i marken. För höga halter av N kan, om N är tillgängligt i större mängd än vad växterna tar upp, leda till att nitrat lakas ut. Samtidigt leder markförsurning till en ökad vittring. Eftersom förhöjd N nedfall normalt leder till ökad tillväxt binds mer C genom fotosyntesen och inarbetas i biomassan och så småningom i markkolet. Bildning av jordmån sker genom ackumulering av organiskt material (vid ökad N deposition) och genom vittring. Härigenom kan skogen bli känsligare för klimatpåverkan, sjukdomar och insektsangrepp. Mykorrhiza-svampar tål inte lågt pH och finns i mindre mängd och förändrade uppsättningar vid högt N nedfall. Trots detta kan mykorrhiza skydda växtrötterna mot toxiska koncentrationer av aluminium som kan uppstå vid låga pH-värden i marken och genom att öka vittringen av baskatjoner.

Växter och marklevande djur är i allmänhet anpassade till en bestämd surhet i marken. Enskilda arters känslighet för luftföroreningar och försurning varierar. Vissa arter är känsliga för försurning och då innebär försurning att dessa arter försvinner. Till de känsligaste grupperna hör fiskar, lavar, mossor, vissa svampar och vattenlevande smådjur som även drabbas direkt av de låga pH-värden i nederbörden. Andra arter drabbas indirekt genom att födotillgången förändras eller helt försvinner. Ytterligare arter kan vara kväveälskande och tar över och dominerar. Skogens habitat förändras då som följd av ändring i artssammansättningen och minskningen av antal arter.

Påverkan på reglerande ekosystemtjänster

Studier tyder på att N deposition leder till ökad kolinlagring i trädbiomassan i N begränsade skogar. Den ökade tillväxten kan även ge upphov till ökad löv/barrbiomassa och minskad nedbrytning som leder till ökat kollager i marken.

N nedfallets effekt på tillväxten påverkar hur mycket vatten som finns att extrahera och därmed tillgången till färskt vatten. Den tillgängliga mängden av vatten påverkar återigen förhållandet mellan rot/träd-biomassa som kan försvaga rotsystemet i förhållande till storleken på trädbiomassan och lämna träden sårbara för stormskador. Bestånd som är känsliga som följd av försurning har dessutom större risk att drabbas av skadedjur.

Påverkan på kulturella ekosystemtjänster

Ett ökat nedfall av N påverkar arttillgängligheten mot fler kväveälskande arter eventuellt i större mängd som till exempel brännässlor och algblomningar i sjöar nedströms, som kan reducera både de estetiska värdena av landskapet och även vardagsrekreation och träningsaktiviteter. Övergödning av vattendrag och sjöar har implikationer för det rekreativa fisket eftersom näringsväven och populationen av fisk påverkas. Samtidigt har det konsekvenser för hur vi längtar ut i naturen, vilket i sin tur får implikationer för människans hälsa. Kvävenedfall påverkar vilda arters blomning, som ibland förstärks, reduceras och/eller senareläggs specifikt för enstaka arter. Blomning är en viktig del av hur människan uppfattar vilda habitat och det estetiska i naturen.

Synergier och konflikter mellan miljömål och miljöpolicies – skogsbruks- och utsläppsperspektiv

CLEO som helhet syftar till att klargöra hur ett förändrat klimat kan påverka miljötillstånd i luft, mark och vatten. På samma sätt som ett förändrat klimat kan påverka flera miljöproblem samtidigt, så kan även förändrade samhällsaktiviteter, miljöpolitik och utsläppsminskande åtgärder påverka flera miljöproblem samtidigt. Ett tydligt exempel på en samhällsaktivitet med stor miljöpåverkan är produktion av el och värme, som genom åren har orsakat miljöproblem såsom försurning, övergödning, global uppvärmning och kvicksilverutsläpp. Eftersom denna aktivitet påverkar miljön negativt på flera sätt, är det naturligt att även reglering av denna aktivitet påverkar flera miljöproblem samtidigt. Sverige har valt att arbeta med miljöproblem genom att sätta upp 16 enskilda miljömål, och som följer av resonemanget ovan påverkar arbetet med att nå ett givet mål ibland även möjligheten att nå andra miljömål. Frågan är dock: På vilket sätt? Och hur mycket? Dessa frågor är viktiga, för möjligheten att uppnå miljömålen och för kostnaden för samhället.

Inom CLEO har vi arbetat med dessa policynära frågor under paraplybenämningen ”synergier och konflikter”. Vi har fokuserat på kopplingar mellan flera miljöproblem och miljömål för att finna synergier och konflikter i åtgärdsförslag inom miljöpolicies, inom skogsbruket samt den del av miljöpolitiken som hanterar luftutsläpp av svavel, kväve, partiklar, flyktiga organiska kolväten och växthusgaser.

Effekter av skogsbruksåtgärder på miljömålen - synergier och konflikter

Klimatförändringen påverkar skogsekosystemen på många sätt, genom de direkta konsekvenserna av förändrad temperatur och nederbörd som beskrivits i tidigare avsnitt, genom policy-åtgärder för att minska klimatförändringen samt genom ändrad riskbild för skogsskador som även berörts i tidigare avsnitt. I detta avsnitt beskrivs effekter för miljömålen *Bara Naturlig Försurning*, *Ingen övergödning* och *Gifrfri miljö* av två policy-åtgärder – 1) ökat skogsbränsleuttag, i form av grenar och toppar (grot) och 2) behovsanpassad gödsling (BAG) för att öka tillväxten och därmed även skogsbränslepotentialen.

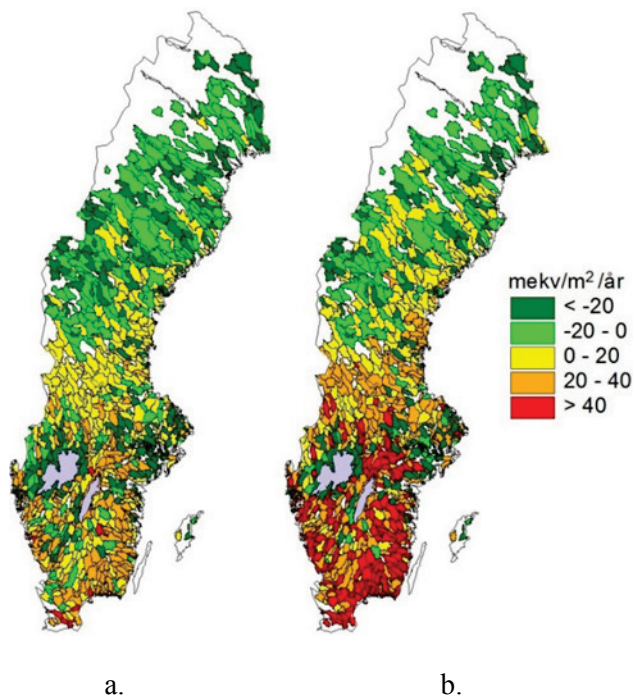
Effekter av skogsbränsleuttag på *Bara Naturlig Försurning* och *Ingen övergödning*

Uttag av grot och stubbar innebär att betydligt mer näringsämnen bortförs från ekosystemet än då enbart stammar tas ut. Bortförelsen av baskatjonerna kalcium, magnesium, kalium och natrium innebär även att en större del av den markförsurning som trädillväxten orsakat permanentas. Om ingen näringskompensation görs, i form av askåterföring, innebär ett ökat uttag därför en konflikt med miljömålet *Bara Naturlig Försurning*.

Inom CLEO och angränsande projekt Naturvårdsverket, har ”kritiskt baskatjonuttag” beräknats. Beräkningen bygger på samma koncept som ”kritisk belastning för försurning” där högsta tillåtna nedfall av försurande ämnen utan att en kritisk gräns överskrids beräknas vid konstant baskatjonupptag. Kritiskt baskatjonuttag beräknas i stället som det högsta tillåtna baskatjonuttaget utan att en kritisk gräns överskrids om nedfallet hålls konstant. I det senare fallet används ANC i markvattnet lika med noll som den kritiska gränsen.

Beräkningarna visar att kritiskt baskatjonuttag generellt överskrids i södra och delar av mellersta Sverige redan vid endast stamuttag, även om överskridandet på många håll är begränsat, se Figur 17. Grot-uttag i dessa delar medför betydligt högre överskridande. Grot-uttag leder även till överskridande på en större andel av skogsmarken i norra Sverige. Modellerings med den dynamiska modellen MAGIC (se tidigare avsnitt) ger resultat i samma riktning, men visar att effekterna på kort sikt, till 2020/2030, förväntas vara små, speciellt i ytvatten.

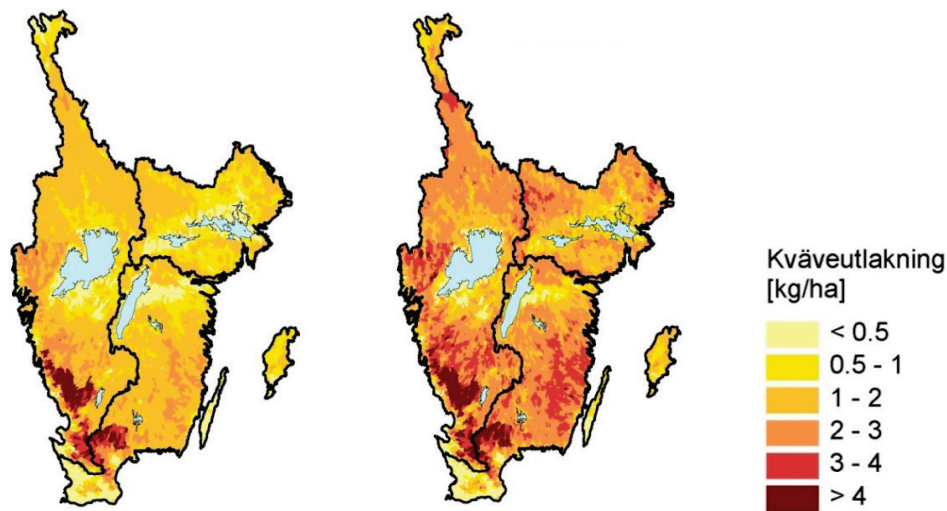
Bortförelsen av kväve vid grot-uttag kan vara positivt för miljömålet *Ingen övergödning*, framför allt i sydvästligaste Sverige med stort kväveöverskott. En simulering med ForSAFE-modellen i Västra Torup i norra Skåne visar på kraftigt förhöjda nitratkvävehalter i markvattnet efter avverkningen 2010, vilket också uppmättes i fält. Simuleringen visar även att kvävehalten var lägre om grot togs ut än om enbart stammar skördades. Skillnaden var ännu större vid avverkning under innevarande omloppstid (Zanchi m.fl., 2014).



Figur 17. Överskridande av kritiskt baskatjonuttag vid *stam-uttag* (a) och *uttag av stam+grot* (b). Positiva värden visar på överskridande medan negativa värden indikerar att det kritiska baskatjonuttaget underskrids. Klimatförändringens effekter på vittring och tillväxt har inte beaktats i dessa beräkningar.

Effekter av behovsanpassad gödsling (BAG) på *Bara Naturlig Förurning* och *Ingen övergödning*

Behovsanpassad gödsling (BAG) har på senare tid diskuterats som en åtgärd för att öka tillväxten, kolinbindningen och potentialen för skogsbränsleuttag. BAG fanns med i ett förslag vid revideringen av Skogsstyrelsens gödslingsrekommendationer, men togs inte med i rekommendationerna. Inom CLEO har en genomgång av befintliga BAG-experiment utförts. Slutsatsen är att behovsanpassad gödsling i vissa fall orsakar mycket hög kväveutlakning, medan det i andra fall inte innebär någon större förändring. Sammanfattningsvis finns det idag inte tillräckligt med kunskap om hur BAG praktiskt ska utföras för att minimera riskerna för miljömålet *Ingen övergödning*. I ett angränsande projekt gjordes en uppskalning av kväveutlakning efter BAG i södra Sverige, baserat på befintliga experiment. I figur 18 presenteras resultat som visar på avsevärt högre bruttoutlakning av kväve då 5 % av skogsmarken gödglas enligt BAG-principerna jämfört med om gödsling utförs som idag. Antalet utförda försök med BAG är dock lågt, så osäkerheterna i effekterna är stora. Effekten av BAG på *Bara Naturlig Förurning* ska teoretiskt vara liten, då inte bara kväve utan även baskatjoner tillförs vid BAG. Om kraftig nitrifiering uppstår frigörs dock vätejoner vilket leder till ökad förurning, så i praktiken kan därför även detta miljömål påverkas negativt.



Figur 18. Kväveutlakning med dagens gödsling och avverkning (a), och med behovsanpassad -gödsling (BAG) på 5 % av den produktiva skogsmarken (b).

Effekter av ökade körningar i skogen på miljömålet *Giffri miljö*

Ett intensivare skogsbruk, exempelvis med ökat grot-uttag samt gödsling, innebär även mer körningar i skogen. Detta kan i sin tur öka risken för kvicksilverutlakning till ytvatten, och därmed ha negativ påverkan på miljömålet *Giffri miljö*. Inom CLEO har sammanställningen av empiriska data givit slutsatsen att kvicksilverhalterna ofta, men inte alltid, är högre efter störningar. Orsakssambanden är dock ännu inte helt klara. En uppskalning av dessa empiriska data till nationell nivå visar att halten metylkviksilver är högst i sydvästra Sverige, följt av sydöstra Sverige och västra Svealand. Varmare och fuktigare framtida klimat förväntas öka risken för körskador och därmed också kvicksilverutlakning.

Synergier och konflikter mellan miljömål och miljöpolicies

Den samlade påverkan av luftföroreningsutsläpp

Utsläpp av svavel, kväve, partiklar, flyktiga kolväten och växthusgaser har flera effekter och påverkar därmed direkt eller indirekt flera olika miljömål. Tabell 4 nedan ger en översikt av de utsläpp som analyserats i CLEO och dess påverkan på fyra av Sveriges miljömål.

Att traditionella luftföroreningar påverkar såväl försurning, övergödning som *Frisk luft* är väl känt. Vad som under senare år fått ökad uppmärksamhet är luftföroreningars påverkan på klimatet genom rollen som kortlivade klimatpåverkande föroreningar (Short-Lived Climate Forcers/Pollutants, SLCF/SLCP). Detta var känt tidigare men fick mycket uppmärksamhet i och med att metan och sotpartiklar bedömdes bidra väsentligt till uppvärmningen och därmed kunde emissionsminskningar bidra till att lättare nå klimatmålet. En svårighet är att andra partikelkomponenter såsom svavel och organiska partiklar kylvärmer klimatet, varför emissionsminskningar av dessa ger ytterligare uppvärmning.

Eftersom värmande och kylande föreningar ofta emitteras från samma källa krävs noggranna avvägningar för att finna de mest effektiva lösningarna ur både effekt- och kostnadssynpunkt.

Tabell 4. Utsläppskällor, luftföroreningar och miljöpåverkan som analyserats för synergier och konflikter i CLEO.

Viktigaste utsläppskälla	Luftutsläpp/ Förorening	Påverkar miljömålet?				Andra miljöeffekter
		Bara Naturlig Förurning	Ingen övergödning	Frisk luft	Begränsad klimat-påverkan	
Förbränning/ Processer	SO ₂ /SO ₄ ²⁻	Ja	Ja	Ja	Ja/SLCP	
Förbränning	NO _x /NO ₃ ⁻ (etc.)	Ja	Ja	Ja	Ja/SLCP	ozon-skador
Jordbruk	NH ₃ /NH ₄ ⁺	Ja	Ja	Ja	Ja/SLCP	
Förbränning/ Slitage	Primära Partiklar			Ja	Ja/SLCP	
Lösningsmedel (tillv/anv)	NMVOG			Ja	Ja/SLCP	ozon-skador
Jordbruk/ Energi	CH ₄			Ja*	Ja/SLCP	ozon-skador
Förbränning	CO ₂				Ja	Försurning av havet

Förbränning, dvs. produktion av el och värme eller i motorer för transport, är den dominerande antropogena källtypen till luftföroreningar (se tabellen ovan), men med fossilt bränsle även en avgörande källa till antropogent CO₂. Omfattande åtgärder, speciellt genom minskat svavelinnehåll i bränsle eller införande av svavelrening av emissioner, har varit mycket framgångsrik i reduktion av SO₂ emissioner, vilket haft en mycket positiv effekt på försurning och hälsa.

Förekomst av marknära ozon är beroende av antropogena emissioner av NO₂ och VOC. Ozon beräknas ha en atmosfärisk livstid om ca en månad vilket innebär att det kan spridas över hela hemisfären. På senare tid har långdistanstransport mellan kontinenterna och de ökande atmosfäriska metanhalterna framförts som orsak till ökande bakgrundshalter.

Ozon påverkar hälsan negativt, ca 25000 förtida dödfall per år inom EU pga. höga ozonhalter (Amann m.fl. 2014). Ozon minskar tillväxt av gröda och skog, och ger därmed minskad mat- och skogsproduktion. Med lägre tillväxt minskar även upptaget av CO₂. Forskning inom området pågår, men det finns uppskattning på upp till 10 % minskat CO₂ upptag, vilket är betydande för den globala kolbudgeten. Metan utgör en nyckel i åtgärderna för att minska ozonhalterna, dels genom sin påverkan på ozonhalter men även som betydande växthusgas. Antropogent metan bedöms av IPCC ge en uppvärmning motsvarande 1 W/m², inklusive det ozon som bildas pga. metan (IPCC 2013). Nuvarande uppvärmning pga. CO₂ beräknas till ca 1.7 W/m².

Det är uppenbart att samspelet mellan luftföroreningar och växthusgaser, deras påverkan på ekosystemen och dess återverkan på atmosfären måste tas med i framtagandet av åtgärdsplaner.

Råd för hur man ska hantera samverkan och konflikter mellan miljömål och utsläppsminskande åtgärder

Generella slutsatser kring hur Sverige kan maximera synergier och minimera konflikter mellan åtgärder för att minska utsläpp av växthusgaser och luftföroreningar är svåra att dra, eftersom det är nödvändigt att även ta hänsyn till bristande kunskap och osäkerheter i underlaget. Baserat på arbetet inom CLEO och syntes av andra studier, presenteras här några generella råd och viktiga aspekter som bör användas vid utformning av åtgärdsarbetet för att minska utsläpp.

1. Luftföroreningarna måste minska pga. deras stora inverkan på speciellt hälsa. Arbetet med att minska svenska luftföroreningar bör därmed styras av deras effekt på luftkvalitet, försurning och övergödning. Dagens svenska utsläpp av luftföroreningar har mycket begränsad påverkan på klimatet och detta bör därmed inte ligga till grund för åtgärdsplaner. Synergier mellan emissioner av luftföroreningar och växthusgaser ska dock naturligtvis beaktas när åtgärdsplaner utformas. Det bör dock noteras att:
 - a. Utsläppsförändringarna av SO₂ inom EU sedan 1980 har haft en signifikant men relativt begränsad värmande effekt på klimatet i Arktis. Dagens emissioner är jämförelsevis relativt små och ytterligare utsläppsminskning av SO₂ inom EU kommer därmed endast innebära en marginell effekt på klimatet (Acosta m.fl. 2015).
 - b. Potentialen för att minska utsläpp av SLCP i Sverige är ganska låg mätt utifrån deras klimatpåverkan. De SLCP-åtgärder som är relativt lätt tillgängliga skulle som mest kunna minska motsvarande 0,1–3 % av Sveriges totala prognosticerade växthusgasutsläpp år 2030 (Kindbom m.fl. 2015).
2. Vid minskning av luftföroreningsutsläpp kan synergier med klimateffekter skapas, dels genom att åtgärder inriktas på att minska ozonhalterna, dels genom att välja de åtgärder som ger lägst CO₂-emission. Minskade

emissioner av den ozonbildande växthusgasen metan är troligtvis den viktigaste svenska luftföroreningsåtgärden ur ett klimatperspektiv. Minskade ozonhalter ger även ökat ekosystemupptag av CO₂ vilket är en väsentlig klimatåtgärd.

3. Energieffektivisering samt vind- och solenergi ger samverkansfördelar.
 - a. CLEO-analyser visar att nationella energiscenarier koncentrerade på energieffektivisering möjliggör samverkansfördelar mellan utsläppsminskningar av luftföroreningar och växthusgaser (Åström m.fl. 2013).
4. Utsläppsminskning av CO₂ genom användning av bibränslen riskerar att orsaka konflikter mellan klimatmål och andra miljömål
 - a. Beräkningar i (CLEO 2014) visar hur elcertifikatsystemet har varit trubbigt och missat hänsynstagande till styrmedlets effekt på utsläpp av luftföroreningar. Den ekonomiska kostnaden orsakad av dessa luftföroreningar motsvarar eller överstiger värdet på de handlade elcertifikaten.
 - b. Samma rapport visar även på ökade utsläpp av luftföroreningar p.g.a. ökad bibränsleanvändning i hushållen. Även Åström & Tohka m.fl. (2013) visar hur nationella energiscenarier koncentrerade på ökad användning av biomassa i form av småskalig vedeldning riskerar öka utsläpp av SLCP/SLCF så mycket att luftkvalitetsmål och klimatmål delvis motverkas.
 - c. Ökad förbränning av biomassa för energiändamål kan ge upphov till ökade emissioner av luftföroreningar, speciellt PM vid småskalig vedeldning. Kan i många fall motverkas genom val av modern teknologi, t.ex. automatiska pellets pannor (Gustafsson och Kindbom, 2014).

Framtidsutblick för miljömål och åtgärdsarbete

Miljökvalitetsmålen i ett förändrat klimat, behöver vi ett annat angreppssätt i framtiden?

Forskningen i CLEO har haft som övergripande mål att studera hur klimatförändringen kan komma att påverka miljöeffekter som till största delen orsakats av nedfall av luftföroreningar. Samband mellan nedfall och effekt blir dock mindre uppenbara när fler faktorer som också påverkar (t.ex. skogsbruk och klimat) övervägs. Försurning, övergödning, skador på hälsa och ekosystem av luftföroreningar samt förhöjda kvicksilverhalter i fisk är välkända problem där riskerna för ekosystem och människors hälsa dokumenterats sedan årtionden. Idag har utsläppen av luftföroreningar som orsakar dessa problem i de flesta fall reducerats kraftigt, men effekterna finns ännu kvar, i varierande omfattning. Det återstår åtgärder att göra på utsläppsidan, i synnerhet när det gäller kväve, och andra påverkansfaktorer har tillkommit som klimatförändringen och ett förändrat skogsbruk. Det senare är till viss del ett resultat av den förra: ett ökat nyttjande av skogsråvara för energi och material är en viktig del av nationella och regionala strategier för att minska användningen av fossila bränslen och därmed minska klimatpåverkan.

Dagens situation är i många avseenden mer komplex med fler påverkansfaktorer som ofta samverkar vilket gör att förutsägelser om framtida effekter, och vilka åtgärder som krävs, blir mer osäkra. Inom CLEO har en rad tydliga resultat framkommit bl.a. avseende ozon och återhämtning från försurning i ett framtida förändrat klimat. För kväveläckage och övergödning av ytvatten har forskningen visat på en rad osäkerheter. Dessa beror till stora delar på att kväve i sina olika former är ett nödvändigt näringsämne, och därmed omsätts och omvandlas i olika delar av ekosystemen. Att ha tillräckligt god kunskap om de inblandade processerna och hur de påverkas av förändringar i klimat är förutsättningar för att kunna göra realistiska framtidsprognoser. Resultaten från CLEO visar att så inte alltid är fallet utan vi får nöja oss med att ange en sannolik riktning och storleksordning i förändringen.

Ovan nämnda komplexitet gör att framtida arbete med miljömål, konsekvensbeskrivningar och åtgärdsstrategier bör genomföras på ett integrerat arbetssätt där flera påverkansfaktorer utvärderas samtidigt, där modellutveckling går hand i hand med fortsatt miljöövervakning och där experimentella resultat används. Detta kommer att ställa högre krav på utveckling av kunskap, modeller och forskningsresultat men också på hur mål ska sättas och hur beslut ska fattas baserat på underlag som inte alltid kan beskriva exakta, kvantitativa förändringar eller effekter.

Hur vi beskriver risker för framtida negativ påverkan på ekosystem och hälsa är en av dessa framtida utmaningar. Andra utmaningar är hur vi når ut med budskapen som är i proportion till problemens omfattning, samt hur vi bidrar till opinion och politisk vilja att hantera de problem som har funnits eller som sannolikt kommer påverka oss i framtiden.

Framtida viktiga frågor

Forskningen i CLEO har gett ny och relevant kunskap som förhoppningsvis är användbar för utveckling av framtidens strategier rörande luftföroreningar, klimat och skogsbruk. Forskningen har också gett en insikt om kunskapsluckor där fortsatt forskning kan ge ytterligare kunskap i de frågeställningar som berörs av programmet, och i närliggande frågor.

Emissioner, spridning och nedfall av luftföroreningar

- Påverkan på lufthalter och nedfall från **globala och hemisfäriska utsläppsförändringar** (främst ozon, PM). Här behövs ökad kunskap om t.ex. sekundära bildning av PM och ozon och koppling till olika emissionskällor.
- Ökad kunskap om **utsläpp av ammoniak** är viktigt för bedömning av ammoniaks påverkan på övergödning men också för ammoniaks inverkan på bildningen av sekundära partiklar.
- Då klimat- och hälsoeffekter från PM beror på **partiklarnas fysikaliska och kemiska egenskaper** finns behov av en ökad förståelse och karakterisering för att underlätta koppling av effekter till utsläppsektorer och åtgärder.
- **Utsläppen av kväve** minskar men det är förvånansvärt svårt att påvisa att nedfallet minskar: ökad kunskap om kvävet nedfallsprocesser och omsättning behövs.
- För framtiden behöver vi bättre förståelse av **långsiktiga effekter av klimatförändringen** både avseende extrema händelser (skogsbränder, värmeböljor) och förändrad växtsäsong, växtlighet osv. Hur påverkas luftkvalitet, ekosystem och vattenkvalitet?

Bättre kunskap om processer som på lång sikt styr utlakning från skogsmark: kol, kväve, kvicksilver.

- Det finns behov av bättre kunskap om **processer som styr utlakning från skogsmark av kol, kväve och kvicksilver**, för att möjliggöra säkrare och mer långsiktiga framtidsprediktioner. Detta inkluderar samspel mellan mark och vatten, vittring, och det organiska materialets omsättning. Experimentella studier och långsiktig miljöövervakning är viktiga för både kunskapen om processer och för att följa upp trender och utvärdera modeller.

- Den **långsiktiga påverkan av klimatförändringen och markanvändningen på markens kol- och kväveförråd** behöver studeras vidare med hänsyn taget till mineralisering, växtupptag och kvävet omsättning för olika typer av mark – samt **inverkan av marknära ozon**.

Åtgärdsstrategier, utsläppsminskningar

- Bättre underlag och verktyg för analys av **kostnadseffektivitet för lokala och nationella åtgärder** i jämförelse med internationella avtal och överenskommelser.
- Ökat fokus på **åtgärdsstrategier för jordbruk och industriella processer** som viktiga sektorer i framtidens åtgärdsarbete. Emissioner från dessa sektorer beror av mer komplexa och sammankopplade aktiviteter jämfört med energi- och transportsektorn och analysmetoder behöver vidareutvecklas och tillämpas.
- Vidareutveckling av metoder för kopplad analys av **åtgärdsstrategier för att minska luftföroreningsemissioner bör alltid inbegripa analyser av klimatgasemissioner**. Målet bör vara att nå största möjliga samverkansfördelar mellan luftföroreningar och växthusgaser.
- Underlag för utveckling av **åtgärdsstrategier för metan**. Bättre kunskap om emissioner, åtgärder, effekter och kostnader/styrmedel.

Skogsbruk och användande av biomassa

- En fortsatt utveckling av nyttjande av de svenska skogsresurserna för energiomställning och som råvara för en framtida biobaserad ekonomi kommer att ställa högre krav på **integrerad bedömning av hållbarhet i olika skogsbruksscenarier**. Skogsbrukets påverkan på kol- och kväveomsättning och läckage till ytvatten, försurning och återhämtning är fortsatt viktiga miljöaspekter som bör beaktas, tillsammans med biologisk mångfald och påverkan på olika ekosystemtjänster.
- Fortsatt uppbyggnad av kunskap kring **emissioner från småskalig vedeldning** och hur de påverkas av pannbeståndets ålder och tekniska status, eldningsvanor m.m. är ett exempel på ett viktigt område där vi behöver en ökad kunskap även kring användningen av biomassa.

Källförteckning

- Acosta Navarro, J., Varma, V., Ekman, A., Riipinen, I., Seland, Ø., Kirkevåg, A., Struthers, H., Gauss, M., Iversen, T. and Hansson, HC. 2015. Amplification of Arctic warming by air pollution reductions in Europe, submitted to Nature Geoscience.
- Amann, M., et al. (2014). The Final Policy Scenarios of the EU Clean Air Policy Package, TSAP report #11.
- CLEO (2014). Klimatförändringen och miljömålen - Rapport till Naturvårdsverket inför Fördjupad Utvärdering 2015. J. Munthe.
- Cosby, B.J., Ferrier, R.C., Jenkins, A. & Wright, R.F. 2001. Modelling the effects of acid deposition: refinements, adjustments and inclusion of nitrogen dynamics in the MAGIC model. *Hydrology and Earth System Sciences*, 5, 499-517.
- Cosby, B.J., G.M. Hornberger, J.N. Galloway, and R.F. Wright. 1985. Modelling the effects of acid deposition: Assessment of a lumped parameter model of soil water and streamwater chemistry. *Water Resources Research* 21: 51-63.
- Eklöf, K., Lidskog R., Bishop K. 2015b Managing Swedish Forestry's Impact on Mercury in Fish: Defining the impact and mitigation measures: Forestry's impact on mercury. *Ambio*, in press.
- Eklöf, K., Kraus, A., Futter, M., Schelker, J., Meili, M., Boyer, E., Bishop, K. 2015a. A parsimonious model for simulating total mercury and methylmercury in boreal streams based on riparian flow paths and seasonality. *Environ. Sci. Technol.* DOI: 10.1021/acs.est.5b00852
- Engardt, M. and Langner, J. 2013. Simulations of future sulphur and nitrogen deposition over Europe using meteorological data from three regional climate projections. *Tellus B* 65, 20348, <http://dx.doi.org/10.3402/tellusb.v65i0.20348>
- Gustafsson, T. och Kindbom, K. (2014) Swedish air pollutant emission scenarios to 2050 - CLEO project report. IVL B2227
- Hansen K., Pihl Karlsson G., Ferm M., Karlsson P.E., Bennet, C., Granat, L., von Brömssen, C., Kronnäs V., Engardt, M., Akselsson, C., Simpson, D., Hellsten S., Svensson, A. (2013). Trender i kvävenedfall över Sverige 1955-2011. IVL Rapport B2119, 76 pp.
- Hansen K., Malmaeus M., Lindblad M. (2014). Ekosystemtjänster i svenska skogar. IVL Rapport B2190, 85 pp.
- Hansen K., Malmaeus M. (2015). Ecosystem services in Swedish forests. *Scandinavian Journal of Forest Research* (In review).
- Hansen, K. (2015). Luftföroreningars påverkan på ekosystemtjänster i svenska skogar. Intern CLEO-rapport.
- Hytteborn, J. K., J. Temnerud, R. B. Alexander, E. W. Boyer, M. N. Futter, M. Froberg, J. Dahne and K. H. Bishop 2015. Patterns and predictability in the intra-annual organic carbon variability across the boreal and hemiboreal landscape. *Science of the Total Environment* 520: 260-269.
- IPCC (2013). Technical Summary. *Climate Change 2013: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. T. F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner et al. Cambridge, UK and New York, USA, Cambridge University Press.

- Jansson, P.E. 2012. CoupModel: Model use, Calibration, and Validation. Transactions of the American Society of Agricultural and Biological Engineers. 55(4).pp.
- Jansson, P.-E. and Karlberg, L., 2004. CoupModel: Coupled heat and mass transfer model for soil-plant-atmosphere systems. TRITA-LWR Report 3087. Stockholm, Sweden: Royal Institute of Technology, Department of Land and Water Resources Engineering.
- Jutterström, S., Anderson, H.C, Omstedt, A., Malmaeus, J.M. (2014). Multiple stressors threatening the future of the Baltic Sea-Kattegat marine ecosystem: Implications for policy and management actions. Marine Poll. Bulletin, 86, 1-2, 468-480.
- Kindbom, K., et al. (2015). Kortlivade klimatpåverkande luftföroreningar (SLCP) - Underlag för övervägande om etappmål, IVL-rapport C99. IVL.
- Klingberg, J., Engardt, M., Karlsson, P.E., Langner, J. and Pleijel, H. 2014. Declining ozone exposure of European vegetation under climate change and reduced precursor emissions. Biogeosciences. 11, 5269–5283. doi:10.5194/bg-11-5269-2014
- Langner, J., Engardt, M. and Andersson, C. 2012. European summer surface ozone 1990–2100. Atmos. Chem. Phys. 12, 10097 ~~10097~~ [10.5194/acp-12-10097-2012](https://doi.org/10.5194/acp-12-10097-2012)
- Lindström, G., Pers, C., Rosberg, J., Strömqvist, J. and Arheimer, B. 2010. Development and testing of the HYPE (Hydrological Predictions for the Environment) water quality model for different spatial scales. Hydrology Research 41.3–4, 295-319.
- MEA: Millennium Ecosystem Assessment (2005). Ecosystems and Human Well-being: Synthesis. World Resources Institute. Island Press, Washington, DC. 137 pp.
- Moldan F., Cosby, B.J. and Wright, R.F. 2013. Modeling Past and Future Acidification of Swedish Lakes. Ambio 42(5):577-86, ISSN 0044-7447, DOI 10.1007/s13280-012-0360-8
- Munthe, J., Moldan, F. och Hultberg, H. Climate change and mobilisation of mercury in forest soil - Effects of artificially increased precipitation on mercury and methylmercury in runoff. I manuskriptform.
- Naturvårdsverket 2007, Bara Naturlig Förurning Underlagsrapport till fördjupad utvärdering av miljömålsarbetet, NV Rapport 5766, 116p.
- Schwarz, G.E., Hoos, A.B., Alexander, R.B. and Smith, R.A. 2006. The SPARROW surface water-quality model: Theory, application, and user documentation. U.S. Geological Survey Techniques and Methods Report, Book 6, Chapter B3, U.S. Geological Survey, Reston, 248 pp. <http://pubs.usgs.gov/tm/2006/tm6b3/PDF.htm>
- Skogsstyrelsen, 2008. Långsiktiga konsekvenser av olika sätt att sköta och bruka den svenska skogen Skogliga konsekvensanalyser och virkesbalanser 2008, SKA-VB 08. <http://www.skogsstyrelsen.se/Global/myndigheten/Projekt/Regeringsuppdrag/SKA-VB%2008%20Popul%C3%A4rversion.pdf>
- Strömqvist, J., Arheimer, B., Dahné, J., Donnelly, C. and Lindström, G. 2012. Water and nutrient predictions in ungauged basins: set-up and evaluation of a model at the national scale, Hydrological Sciences Journal, 57:2, 229-247.
- Sverdrup, H and Warfvinge, P. 1993. Calculating field weathering rates using mechanistic geochemical model – PROFILE. Applied Geochemistry 8, 273-283.
- TEEB (2009). TEEB climate issues update. September 2009. <http://www.teebweb.org/>
- Tekie H., Hansen K. (2014). Ekonomisk värdering av ekosystemtjänster i skog. Intern CLEO rapport, Deliverable D4.3.3, 17 sidor.

- Wallman, P., Svensson, M., Sverdrup, H., Belyazid, S., 2005. ForSAFE - an integrated process-oriented forest model for long-term sustainability assessments. *Forest Ecology and Management* 207, 19-36.
- Winterdahl M., Temnerud, Futter, M., Löfgren, S., Moldan F., and Bishop, K. 2011. Riparian zone influence on stream water total organic carbon concentrations at the Swedish Integrated Monitoring sites. *Ambio*. 40(8): 920-930.
- Wu, P., Martin, J., Åkerblom, S., von Brömssen, C., & Bishop, K. 2015, June. Forestry effects on mercury levels of European perch (*Perca fluviatilis*) in Swedish lakes. Poster session presented at: 12th International Conference on Mercury as Global Pollutant; Jeju, South Korea
- Wu, P., Martin, J., Åkerblom, S., von Brömssen, C., & Bishop, K. In prep. Forest clearcutting effect on lake fish mercury-a pilot study of forestry practices in Swedish boreal lakes.
- Zanchi, G., Belyazid, S., Akselsson, C., and Yu, L.: Modelling the effects of management intensification on multiple forest services: a Swedish case study, *Ecological Modelling*, 284, 48-59, 2014
- Åström, S., et al. (2013). "Potential impact on air pollution from ambitious national CO2 emission abatement strategies in the Nordic countries – environmental links between the UNFCCC and the UNECE – CLRTAP." *Energy Policy* 53: 114-124.

CLEOs forskare och medförfattare

IVL Svenska Miljöinstitutet (IVL) John Munthe (Programchef), Jenny Arnell, Filip Moldan, Per Erik Karlsson, Stefan Åström, Tomas Gustafsson, Karin Kindbom, Sofie Hellsten, Karin Hansen, Sara Jutterström, Maria Lindblad, Haben Tekie, Mikael Malmaeus, Johanna Stadmark.

SMHI Joakim Langner, Berit Arheimer, Göran Lindqvist, Magnuz Engardt, René Capell, Thomas Bosshard, Camilla Andersson, Robert Bergström, Manu Thomas, Lars Gidhagen, Helén Andersson, Charlotta Pers, Johan Strömqvist, Jonas Olsson, Wei Yang och Kean Foster.

Sveriges Lantbruksuniversitet (SLU) *Institutionen för vatten och miljö* Kevin Bishop, Staffan Åkerblom, Johan Temnerud, *Institutionen för mark och miljö* Annemieke Gärdenäs, Martin Rappe George, Linnea Hansson

Göteborgs Universitet (GU) *Institutionen för biologi och miljövetenskap* Håkan Pleijel *Institutionen för kemi och molekylärbiologi* Matthias Hallqvist

Lunds Universitet (LU) *Institutionen för naturgeografi och ekosystemvetenskap* Cecilia Akselsson, Jörgen Olofsson, Veronika Kronnäs

Stockholm Universitet (SU) *Institutionen för Tillämpad Miljövetenskap* Hans-Christen Hansson

Uppsala Universitet Julia Hytteborn

Klimatförändringen och miljömål

RAPPORT 6705

NATURVÅRDSVERKET
ISBN 978-91-620-6705-2
ISSN 0282-7298

Rapporten uttrycker nödvändigtvis inte Naturvårdsverkets ställningstagande. Författaren svarar själv för innehållet och anges vid referens till rapporten.

Hur kommer klimatförändringen att påverka möjligheterna att nå miljömålen Frisk luft, Bara naturlig försurning, Ingen övergödning och Giftfri miljö? CLEO programmet ger svar på frågeställningar kopplade till de utpekade miljömålen samt kring potentiella synergier och konflikter mellan åtgärdsstrategier för luftföroreningar och klimat inklusive effekter av ökad bioenergianvändning.

Inom CLEO har ett antal verktyg och modeller utvecklats och tillämpats för bedömning av hur klimatförändringen, framtida utsläpp av luftföroreningar och utveckling av skogsbruket påverkar miljötillståndet i luft, skogsmark och ytvatten.



KUNSKAP DRIVER
MILJÖARBETET FRAMÅT

