

2001

*Årsrapport  
Effekter av gränsöverskridande  
luftföroreningar i Sverige*



**ASTA** International and National Abatement  
Strategies for Transboundary Air Pollution

ETT FORSKNINGSPROGRAM FINANSIERAT AV MISTRA SAMT ELFORSK,  
ENERGIMYNDIGHETEN, NATURVÅRDSVERKET OCH SKOGSSTYRELSEN

# ASTA-programmet 1999–2002

ASTA är ett flerårigt forskningsprogram med inriktning mot gränsöverskridande luftföroreningar. Programmets första fas omfattar perioden 1999–2002. Huvudsaklig finansiär är MISTRA men programmet har också finansiering från bland annat Elforsk, Energimyndigheten och Skogsstyrelsen.

Programmets övergripande mål är att ta fram vetenskapligt baserade underlag för internationella åtgärder mot gränsöverskridande luftföroreningar i Europa. Även nationellt utvecklas strategier och åtgärder inom olika sektorer där gränsöverskridande luftföroreningar är av betydelse.

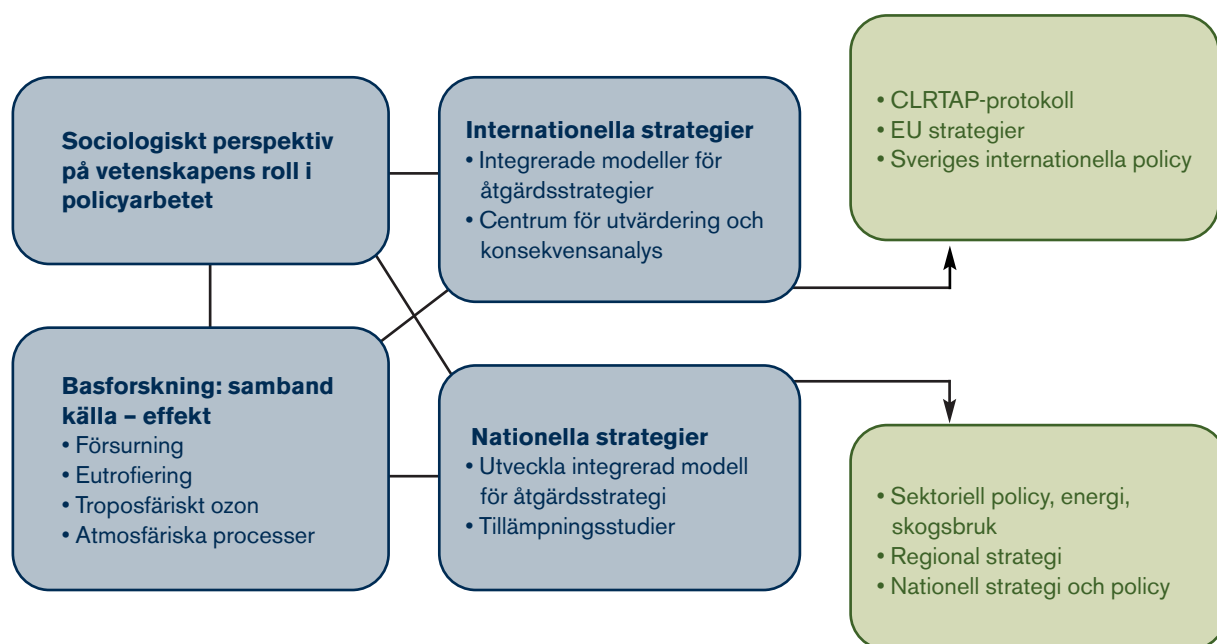
ASTA-programmet är inriktat mot försurning av mark och vatten, kvävet påverkan på ekosystem, effekter av marknära ozon på växter, samt spridning och halter av luftföroreningar i form av partiklar. Dessutom studeras regionala effekter av skogsbränsleuttag och skogsbrukets möjligheter att motverka försurning och övergödning.

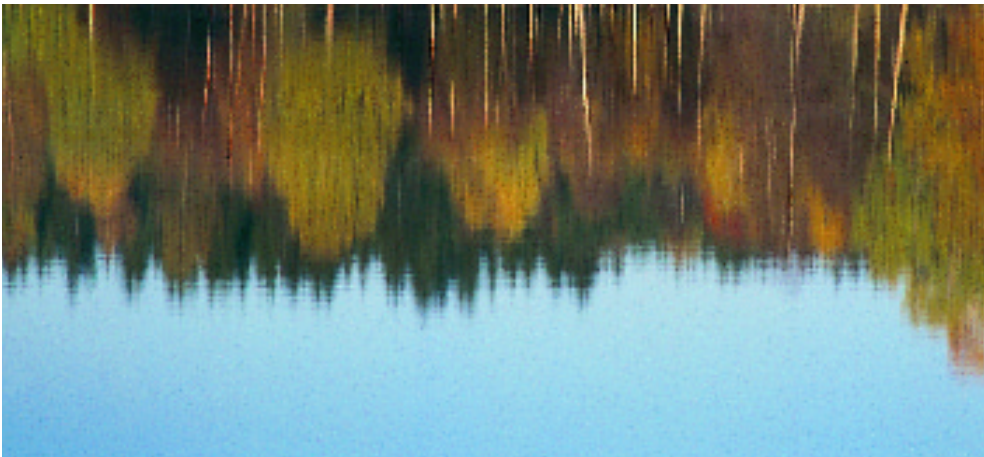
Projektet har dessutom till syfte att

- stärka och för framtiden säkra svensk kompetens som kan användas inom det internationella förhandlingsarbetet,
- via internationella nätverk skapa samförstånd kring uppnådda resultat,
- informera om och visualisera luftföroreningsproblemet för ökad förståelse hos olika beslutsfattare samt
- uppnå bättre förståelse för samspelet mellan vetenskap och politik.

Programmet ska ta hänsyn till andra internationella initiativ via såväl konventioner och EU-direktiv som förändrade strategier och synsätt hos näringsliv, myndigheter och allmänhet.

ASTA-programmets struktur 1999–2002





Arbetet med att utveckla effektiva åtgärdsstrategier för att minska effekterna av gränsöverskridande luftföroreningar är en internationellt angelägenhet. Olika länder studerar effekter och åtgärdsalternativ utifrån sina egna nationella förutsättningar. ASTA-programmet utför en rad studier som beskriver situationen i Sverige, som underlag för åtgärder både inom och utom landet. Årsrapporten 2001 har fokus på den nya kunskap om de nationella frågor som ASTA-programmet bidrar till.

# Innehåll

ASTA och nationella åtgärdsstrategier .....	5
PERINGE GRENNFELT, Programchef	



## SKADLIGA HALTER AV LUFTFÖRORENINGAR

Mindre grus på gatorna – bra för hälsan? .....	6
HANS CHRISTEN HANSSON	

Svenskt sommarklimat ökar risken för skördeförlost hos vete och potatis .....	8
HELENA DANIELSSON	

Marknära ozon kan minska tillväxten hos vuxna granar .....	10
PER ERIK KARLSSON	

ASTA tar fram underlag för miljömålsarbetet .....	12
HÅKAN PLEIJEL	



## KVÄVEPROBLEMET

Kväveupplagringen ökar i skogsmark .....	14
OLLE WESTLING	

Ökat uttag av skog – ett sätt att minska kväveupplagringen .....	16
OLLE WESTLING	

Hyggen läcker kväve .....	18
CECILIA AKSELSSON	

Fältskiktet viktigt för att förhindra nitratutlakning .....	20
URSULA FALKENGREN-GRERUP OCH MAGNUS OLSSON	

Stort nedfall av kväve ger mindre med blåbär och lingon i skogen .....	22
JOACHIM STRENGBOM	



## FÖRSURNING OCH ÅTERHÄMTNING

Varför dynamisk modellering? .....	24
HARALD SVERDRUP OCH PERINGE GRENNFELT	

Försurningen – snart ett minne blott? .....	26
FILIP MOLDAN	

Skogsbrukets roll för försurningstrycket .....	28
OLLE WESTLING	

ASTAs styrelse och styrgrupp för det nationella programmet 2001 .....	30
-----------------------------------------------------------------------	----

Kontakt med årsrapportens författare .....	30
--------------------------------------------	----

Redaktörer OLLE WESTLING och MALIN LAGERSTRÖM IVL Svenska Miljöinstitutet, samt ULLA BERTILLS Naturvårdsverket.

Den fortsatta forskningen för att stärka underlaget för det framtida svenska förhandlingsarbetet om gränsöverskridande luftföroreningar planerades 1998 och gav upphov till ASTA-programmet. Samtidigt diskuterades livligt om och hur en forskning med en internationell inriktning också skulle behandla nationella frågor. Diskussionen ledde så småningom fram till att det fanns stora fördelar att parallellt med den internationellt inriktade forskningen ha en liknande verksamhet kring de nationella miljöfrågor som var beroende av utfallet av det internationella förhandlingsarbetet. Ett särskilt delprogram utarbetades och det blev en tydlig del av det samlade forskningsprogram som beslutades av MISTRA:s styrelse i oktober 1998.

Forskningen inom ASTA-programmet har nu pågått i tre år och vi kan idag se med tillfredsställelse på att ASTA fick en tydlig nationell koppling. Bland annat har detta medfört att den samlade effekten av luftföroreningar och markanvändning kunnat vägas samman, något som är av stor betydelse för bedömning av hur skogen långsiktigt kan utnyttjas i det svenska energisystemet.

ASTA:s forskning har även stor betydelse som policy och kunskapsbas för nationella ställningstaganden inom andra områden. Sådana områden inkluderar hälsoeffekter och åtgärdsbehov när det gäller partiklar samt kvävetts roll för ekosystemeffekter i skogsmark. I årsrapporten 2001 har vi därför valt att särskilt belysa forskning och forskningsresultat som är av betydelse i främst ett nationellt perspektiv. Vi tror att denna avgränsning kommer att göra årsrapporten mer intressant och användbar i Sverige. För den som önskar få en bild av ASTA:s totala verksamhet hänvisar vi till tidigare årsrapporter och den syntesrapport som kommer att publiceras inför programmets utvärdering våren 2002. Dessa kan erhållas antingen via ASTA:s hemsida <http://asta.ivl.se> eller beställas via ASTA:s sekretariat.

De nationella delarna av programmet har drivits i nära samarbete med flera sektorsmyndigheter och branschorgan, främst Energimyndigheten, Skogstyrelsen, Naturvårdsverket och Elforsk. Dessa organ har också på olika sätt direkt medverkat i programmen och genom deras insatser har de internationella frågorna på ett fruktbart sätt kunnat länkas med de nationella. Vår förhoppning är att årsrapporten skall ge en aktuell bild av några av de miljöfrågor som på olika sätt hänger samman med storskaligt spridda luftföroreningar och också skapa en bättre förståelse för problemens storlek, utveckling och behov av fortsatta åtgärder.



# Skadliga halter av luftföroreningar

Foto: Photodisc, Bruce Heimemann

HANS CHRISTEN HANSSON

## Mindre grus på gatorna – bra för hälsan?

*Höga halter av små partiklar i luften är förknippade med risk för främst luftvägs-sjukdomar. Uppvirvlat vägdamm har visat sig vara en av de stora källorna till partiklar i stadsmiljön, men det är dock osäkert om dessa partiklar direkt kopplar till hälsoeffekter.*

### **Partiklar påverkar hälsan**

Det har konstaterats ett klart samband mellan förhöjda halter av partiklar i luft och luftvägsrelaterade sjukdomar och dödlighet. Sambandet är mera entydigt för små partiklar, uttryckt som  $PM_{2.5}$  (den sammanlagda massan av partiklar med en diameter mindre än 2,5 mikrometer). Den vanligaste förekommande mätningen som görs av partiklar i utomhusmiljö är  $PM_{10}$ . Därför har även de flesta hälsostudier som genomförts relaterats till  $PM_{10}$ . De effekter på hälsa som förknippas med partiklar antas ge betydligt större kostnader för samhället beräknat utifrån överdödlighet och sjukdomsfall jämfört med andra luftföroreningar. Regeringen har i miljö-målspropositionen 2001 angivit att ett delmål för  $PM_{2.5}$  ska fastställas senast år 2005.

### **Vilka är de största partikelkällorna?**

Långdistanstransporterade luftföroreningar inverkar kraftigt på partikelhalten i Sverige. Dessa partiklar återfinns till stor del i intervallet 0,2–0,5 mikrometer. Lokala källor, som påverkar mängden partiklar, är uppvirvlat vägdamm, utsläpp från motorer och lokala eldstäder. I genomsnitt under året utgör lokala direktutsläpp från motorer och eldstäder endast ett tiotal procent av den totala partikelhalten i stadsmiljö i Sverige. Merparten av dessa partiklar är mindre än 0,2 mikrometer. Endast vid lokala inversioner utgör dessa källor en betydande del av  $PM_{2.5}$  eller  $PM_{10}$ . Uppvirvlat damm dominerar för partiklar större än 1 mikrometer. I allmänhet domineras således partikelhalterna, både  $PM_{2.5}$  och  $PM_{10}$ , av långdistanstransporterade

partiklar och uppvirvlat damm (speciellt under våren). Lokala direktutsläpp av partiklar från motorer och lokala eldstäder utgör ingen avgörande källa till partikelhalten mätt som  $PM_{10}$  och  $PM_{2.5}$ . Om däremot antal partiklar används som mått, dominerar de lokala direktutsläppen.

Figur 1 visar hur små partiklar från lokala källor helt dominerar partikelantalet. På samma sätt dominerar lokala källor volymen (partikelmassan) med partiklar större än 1 mikrometer. Det är dock helt olika partikeltyper som dominerar antal respektive massa. Utsläpp från förbränningsmotorer dominerar antalet partiklar medan uppvirvlat damm dominerar massan.

### Är vägdamm en hälsofara?

Det samband som konstaterats för partiklar och ohälsa i tätortsmiljö kan bero på att partikelmassan (som domineras av stora partiklar) samvarierar med den eller de komponenter som faktiskt påverkar hälsan (små partiklar). Detta innebär att åtgärder som minskar partikelmassan, som att sopa gatorna, inte nödvändigtvis begränsar de komponenter som påverkar hälsan.

Om den kemiska sammansättningen av vägdamm jämförs med till exempel dieselavgaser är det mindre troligt att vägdamm utgör den största hälsorisen, åtminstone när det gäller cancer och luftvägssjukdomar relaterade till giftigheten hos partiklarna. Dieselavgaser består av betydligt mindre partiklar än vägdamm och dessa ultrafina partiklar, med en diameter mindre än 0,1 mikrometer, beskrivs som de mest hälsofarliga. Utöver lokala utsläpp av små partiklar från trafik och eldstäder finns det indikationer på att sekundära partiklar som bildats i atmosfären har inverkan på hälsan. De domineras av långdistanstransporterade partiklar i Sverige. Det kan ifrågasättas om uppvirvlat damm egentligen har några större hälsoeffekter. Det innebär att de lokala åtgärder som kan ge störst effekt på  $PM_{2.5}$  och  $PM_{10}$ , som att minska mängden uppvirvlat damm, inte är den viktigaste åtgärden.

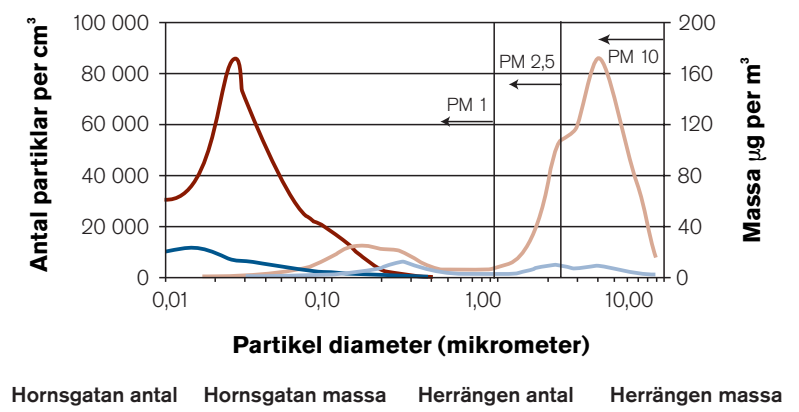
### Att minska gruset på gatorna - en åtgärd utan effekt?

Mot bakgrund av bristande underlag när det gäller hälsoeffekter kan gränsvärdet för  $PM_{10}$ , och ett kommande gränsvärde för  $PM_{2.5}$ , i nordiska städer ifrågasättas eftersom överskridande med stor sannolikhet beror på förekomsten av vägdamm.  $PM_{10}$  inbegriper partiklar av mycket varierande storlek och kemisk sammansättning. Syftet med  $PM_{2.5}$  är att använda ett partikelmått som utesluter inverkan av uppvirvlat damm. Flera studier har dock visat att i högbelastade miljöer, som starkt trafikerade gator i Stockholm, domineras  $PM_{2.5}$  av uppvirvlade partiklar i storleksområdet 1 till 2,5 mikrometer.  $PM_{1}$ , partikelmassan för partiklar mindre än 1 mikrometer, kan då vara ett bättre mått som kan beskriva bidraget från utsläpp från motorer, annan förbränning och partiklar som bildas sekundärt i atmosfären, utan att mätningen störs av uppvirvlade partiklar. För att tydligare beskriva de olika källornas inverkan på luftkvaliteten, och då speciellt partikelhalterna, bör både  $PM_{1}$  och  $PM_{10}$  användas som partikelmått för omgivningsluft. De båda måtten bör användas samtidigt för att kunna beskriva halterna av såväl fina som grova partiklar.

### Kunskapen måste förbättras

Nu när det finns en stor osäkerhet i vilka åtgärder som är mest effektiva är det viktigt att klarlägga vilka typer av föroreningar, inklusive partiklar, som ger olika hälsoeffekter. För att kunna studera samband mellan luftföroreningar och ohälsa måste tillgången på mätvärden förbättras. ASTA-programmet bidrar med att utföra kontinuerliga undersökningar av partiklar i luft vid mätstationen i Aspveten öster om Nyköping. Dessutom bygger ASTA upp en databas som skall inkludera samtliga mätningar av partiklar vid såväl de svenska stationerna som i övriga Norden.

FIGUR 1. De olika kurvorna visar hur antalet partiklar och partikelmassan varierar med storleken (diametern). Mätningarna är gjorda i en förort till Stockholm (Herrängen) och i en starkt trafikerad del av innerstaden (Hornsgatan). Antalet domineras av partiklar mindre än 0,1 mikrometer, samtidigt som partikelmassan domineras av partiklar större än 1 mikrometer. Genom att jämföra innerstad och förort framgår det att lokala källor i innerstaden dominerar både antal och massa. Storleken på partiklarna avslöjar att det är helt olika källor som bidrar till antal respektive massa. Motoremissioner är källan till det stora antalet små partiklar, medan uppvirvlat damm är den dominerande källan till partikelmassan.



# Svenskt sommarklimat ökar risken för skördeförlust hos vete och potatis

*Svensk sommar, med långa ljusa nätter och fuktigt klimat, gör att växters upptag av ozon kan vara lika stort som i sydligare delar av Europa, trots lägre halter av marknära ozon i luften.*

## Upptag via klyvöppningarna förklarar skördeförlust

Marknära ozon kan dels orsaka synliga skador på växter, men även orsaka minskad tillväxt och skörd. De mått för ozonets påverkan som fram till idag använts baseras huvudsakligen på halterna av ozon i luften och avspeglar inte direkt hur mycket



ozon som tas upp i växten. Risken för att ozonskador på växter ska uppstå har därför ofta underskattats för regioner med fuktigt sommarväder och dygn med många ljusa timmar, som i Sverige. Samtidigt har risken överskattats för de delar av Europa där vädret under växtsäsongen ofta är torrt och hett.

För att skador skall uppstå måste ozonmolekylerna komma in i växten via klyvöppningarna. Klyvöppningar är de mikroskopiskt små porer där växtens in- och uttransport av koldioxid, vattenånga och syre sker. Klyvöppningarnas grad av genomsläpplighet för gaser bestäms till stor del av ljusinstrålningen och temperaturen, samt av mark- och luftfuktigheten. Växtens utvecklingsstadium har också betydelse. Växters gasutbyte med omgivande luft kan mätas med känsliga och exakta instrument och gasutbytetts storlek kan ställas i relation till de klimatförhållanden som råder vid mätfällena.

## Upptag av ozon beräknas i modell

Utgående från mätningar av gasutbytet hos vete och potatis har modeller för upptag av ozon utvecklats i vilka såväl klimatfaktorer som biologiska faktorer ingår. Under många år har forskare verksamma inom ASTA-programmet bedrivit forskning om ozons effekter på växter vid IVL:s fältstation på Östad Säteri utanför Alingsås. I nämnda modell för vete har två års data från Östad-stationen använts. För potatis har däremot två års resultat från det EU-finansierade forskningsprojektet CHIP utnyttjats. Modellerna används för att beräkna ozonupptagets storlek och gör det möjligt att beskriva förhållandet mellan ozonexponering och skördeförlust hos vete



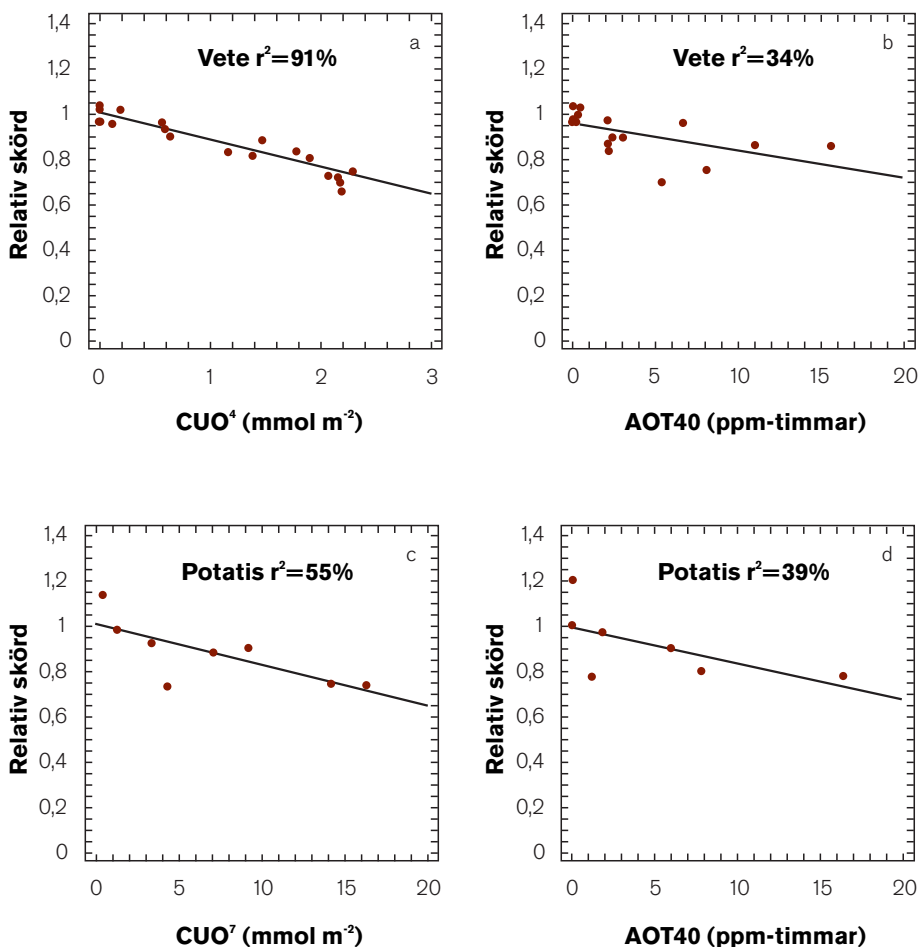
och potatis. Det nya modellbaserade sättet att beskriva belastning av marknära ozon har lett till avsevärt starkare statistiska samband mellan ozonexponering och skördeförlost för vete (figur 1 a, b) och potatis (figur 1 c, d).

### Kritiska nivåer för ozon varierar i Europa

Det pågående utvecklingsarbetet väntas leda till kritiska nivåer för ozon som i viss mån liknar de kritiska belastningsgränser som används för svavel och kväve. Känsligheten varierar då som en följd av naturförutsättningarna och avgörs av klimatförhållanden, av eventuell bevattning och av vilka växter som odlas. Den kritiska nivån eller belastningen varierar alltså mellan olika delar av Europa.

### Underlag för politiska beslut

Forskningsresultat från ozonforskargruppen i Göteborg har haft stor betydelse som underlag för såväl nationella som internationella beslut om minskade utsläpp av luftföroreningar. Internationellt har UN/ECE:s (FN:s ekonomiska kommission för Europa) luftkonvention varit viktigast som avnämning för forskningsresultat. Inom UN/ECE-konventionen om gränsöverskridande luftföroreningar (CLRTAP) har flera internationella protokoll om åtgärder mot olika föroreningar undertecknats, det senaste i Göteborg i december 1999. Även det nu pågående forskningsarbetet har en nära koppling till det europeiska luftvårdssamarbetet inom UN/ECE:s luftkonvention. Inom detta samarbete finns en stor efterfrågan på ett upptagsbaserat exponeringsindex för ozon som kan användas för att uppskatta skördebortfall och andra effekter på grödor i olika delar av Europa.



FIGUR 1. Relativ skörd hos vete (a, b) och potatis (c, d) i förhållande till upptags- (CUO) respektive haltbaserat (AOT40) exponeringsmått. Resultat från fem års studier av vete vid Östad, Sverige. Resultaten för potatis kommer från två års studier vid Östad, Sverige samt från Jokioinen, Finland. (Förklaringar till CUO och AOT40 finns på s. 13.)

# Marknära ozon kan minska tillväxten hos vuxna granar

*Pågående studier indikerar att marknära ozon kan minska tillväxten hos gran. Fördjupade undersökningar ska försöka klarlägga hur stor denna minskning kan vara.*



## Ozon minskar tillväxten

Höga halter av marknära ozon kan i Sverige orsaka direkta effekter på växter främst under sommarhalvåret. Experiment med trädplantor i fältkammare har visat att ozon minskar tillväxten. Men frågan är om ozon kan påverka vuxna träd ute i skogen? Det är svårt och kostbart att utsätta vuxna skogsträd för olika ozonbehandlingar i försök. En billigare möjlighet är istället att med statistiska metoder analysera ett skogsbestånds tillväxt i förhållande till ozonexponering som förekommer naturligt. Tidigare studier har visat på ett statistiskt samband mellan ozonexponering och minskad stamtillväxt för en tallart, Loblolly pine, i USA samt för bok i Schweiz.

En sådan studie förutsätter att det finns kontinuerliga mätningar som gör att effekten på enskilda träd kan beräknas. ASTA-programmet har tillgång till mätresultat från SLUS försökspark i Asa, strax norr om Växjö. Stamomkretsen på 50 vuxna granar, fördelade på 10 provytor, mäts varje vecka under vegetationsperioden sedan 1993. Även tillgången på vatten i marken vid granarna ingår i mätningarna. En meteorologisk station vid Asa försökspark mäter regelbundet klimat, nederbörd och ozonhalter.

## Minskad tillväxt även hos vuxna granar

En preliminär bearbetning av mätvärdena under perioden 1993 till 1999 har utförts inom ett annat forskningsprogram finansierat via MISTRA, SUFOR-programmet. Stamtillväxten, mätt som grundytetillväxt, korrelerades till ett antal oberoende parametrar med hjälp av stegvis multipel linjär regressionsanalys. Det är en statistisk metod som beskriver samvariationen mellan en beroende parameter (i detta fall stamtillväxt) och ett antal uppmätta oberoende parametrar. Den preliminära analysen av mätvärdena visar att nederbörd, temperatur och dag på året samvarierade tydligt med stamtillväxten. Mätningarna indikerade även att exponering av marknära

ozon minskade stamtillväxten. Minskningen observerades både om ozonexponeringen uttrycktes som dagsmedelvärde och som AOT40. Det senare måttet kombinerar halten över en viss nivå med tiden som detta överskridande förekommer. Det intressanta med den statistiska beräkningen är att ozon kommer med som en faktor som påverkar tillväxten negativt (koefficienten är negativ). Beräkningen ger även vissa indikationer på hur stor inverkan är av ozon, jämfört med andra parametrar. Standardfelet var relativt litet för flertalet parametrar, vilket gör att sannolikheten är hög att samvariationen var signifikant.

Parameter	Koefficient	F-värde
Nederbörd	29.03	280.1
Temperatur	1.159	249.6
Dag på året	-0.109	221.8
Ozon	-0.21	61.6
Markfuktighet	2.002	36.8
Solinstrålning	-0.0083	4.08

### Sambanden klarläggs

ASTA-programmet arbetar vidare med att förbättra den statistiska modellen för att bekräfta resultaten och beräkna hur mycket tillväxten minskas i förhållande till ozonexponeringen. Underlaget ska förbättras genom att inkludera flera provtytor i Asa, samt att även mätvärden från åren 2000 och 2001 utnyttjas. Förekomsten av enkla linjära samband som studerats hittills kommer att kompletteras med en studie av mer komplexa samband. En eventuell samvariation mellan ozon och övriga faktorer skall granskas. Bland annat påverkas ökningen av stamomkretsen, som mäts veckovis, även av trädets vattenmängd i veden. Därför är det viktigt att analysera samvariation mellan ozon och luftens fuktighet för att komma fram till vad som är den troligaste orsaken till att stamomkretsen påverkas. Den högsta ozonexponeringen förekommer ofta under soliga dagar då den torra väderleken kan leda till att trädstammens vatteninnehåll minskar och stammen krymper. Denna effekt måste skiljas från påverkan av ozon. En statistisk modell som på ett bra sätt förklarar variationer av stamtillväxten ger en möjlighet att kvantifiera inverkan av marknära ozon på tillväxten hos vuxna granar. Detta medför i sin tur att de ekonomiska förlusterna kan uppskattas på samma sätt som gjorts för jordbruksgrödor.

*TABELL 1. Resultat från en preliminär analys med stegvis multipel regressionsanalys av korrelationerna mellan stamtillväxt och ett antal oberoende parametrar. Som mått på ozonexponering användes medelhalten dagtid. Koefficienten anger sambandets riktning och den första parametern i tabellen, nederbörd, var den som påverkade stamtillväxten mest av alla uppmätta parametrar. Detta kan utläsas i att F-värdet är högst. Ozon hade en signifikant negativ inverkan på stamtillväxten.*



## ASTA tar fram underlag för miljömålsarbetet

*ASTA-programmets olika aktiviteter bidrar med underlag för det kommande arbetet med att utveckla de svenska miljömålen. Det rör frågor kring försurning, övergödning, marknära ozon och partiklar i luft.*

I november 2001 antog Sveriges riksdag 15 miljö kvalitetsmål. Det är det viktigaste resultatet av en miljöpolitisk process som pågått under flera år. Målen ska fortlöpande följas upp och revideras. Underlag för nästa revision skall finnas färdigt under 2004. Flera artiklar i denna årsrapport beskriver forskning som bidrar till att stärka underlaget för revideringarna.



### Marknära ozon exempel på underlag

Ett av de 15 målen kallas *Frisk luft*. Här finns preciserade delmål för olika luftföroreningar. Arbetet med frågor kring marknära ozon inom ASTA är ett bra exempel på hur ett vetenskapligt underlag kan användas för att utveckla ett miljömål. Det nuvarande delmålet för ozon säger att: »Halten av marknära ozon ska inte överskrida 120 mikrogram/m<sup>3</sup> som åtta timmars medelvärde år 2010«.

Ifråga om hälsoeffekter råder en relativt god samklang mellan det svenska miljömålsarbetet och det europeiska. Det europeiska arbetet har även ägnat stort intresse åt ozons effekter på växter. Såväl inom Konventionen om långväga gränsöverskridande luftföroreningar i Europa (CLRTAP), WHO liksom inom EU har det satts upp ett långsiktigt mål: »AOT<sub>40</sub> ska under tre sommarmånader inte överskrida 3 000 ppb-timmar«

Begreppet AOT<sub>40</sub> förklaras i faktarutan. Eftersom det skulle krävas mycket betydande nedskärningar av utsläppen av kväveoxider och kolväten för att nå ner till en AOT<sub>40</sub>-nivå under 3 000 ppb-timmar, valde EU att inom sitt ozondirektiv sätta upp ett mera realistiskt delmål till 2010, sett i ett kortare tidsperspektiv: »AOT<sub>40</sub> ska under tre sommarmånader inte överskrida 9 000 ppb-timmar«

### Det svenska miljömålet kan utvecklas

De europeiska målen för ozoneffekter på växter har ännu inte fogats in i det svenska arbetet med miljömål. De svenska miljökvalitetsmålen ska utvecklas och revideras första gången år 2004. Då finns det en möjlighet att de miljömål som EU och andra europeiska aktörer formulerar ingår i underlaget för revideringen. I den nuvarande beskrivningen av målen för *Frisk luft* nämns också växter som ett skyddsobjekt. Konkret kan det innebära att de AOT40-värden som EU tillämpar för att skydda vegetation, såväl det långsiktiga på 3 000 ppb-timmar som det kortsiktiga på 9 000 ppb-timmar, utvärderas som mål i det framtida svenska miljöarbetet. Det är även viktigt att utnyttja det pågående arbetet med målformuleringar som bygger på upptag av ozon i växter. Den typen av mål har möjlighet att ta hänsyn till svenska förhållanden, i form av klimat och dygnslängd, som påverkar ozoneffekterna. Kunskapen om svenska grödors upptag av ozon beskrivs i en annan artikel i denna rapport, »Svenskt sommarklimat ökar risken för skördeförlust hos vete och potatis«.

### Upptag av ozon - tredje generationens mått

Första generationen kritiska nivåer för ozon i Europa baserades på halter uttryckta som medelvärden över olika tidsperioder. Den andra generationen var helt baserad på AOT40. Den tredje, där svenska forskare inte minst inom ASTA-programmet varit mycket aktiva, handlar om att finna exponeringsmått som drar lärdom av andra generationens framsteg. Den erfarenheten kompletteras nu med kvantitativa uppskattningar av olika växters upptag av ozon i olika klimat. Den samlade kunskapen inom ASTA om ozons effekter på växter är därför ett viktigt underlag för framtida revidering i ett av de svenska miljökvalitetsmålen. ❀

#### Vad är AOT40 och CUO?

AOT40 är det ackumulerade överskridandet av halten 40 ppb - »Accumulated exposure Over Threshold 40 ppb« - ozon (1 ppb = 2 mikrogram per kubikmeter luft för ozon). Att räkna ut AOT40 går till på följande sätt. Antag att timmedelvärden för ozon för sex timmar är enligt följande: 35, 38, 40, 41, 42 och 50 ppb. De tre första värdena bidrar inte till exponeringsindex AOT40 eftersom de inte överstiger 40 ppb med åtminstone 1 ppb. De tre sista värdena däremot bidrar. AOT40 för de sex timmarna blir:  $(41-40) + (42-40) + (50-40) = 1 + 2 + 10 = 13$  ppb timmar. Det mest använda AOT40-värdet är det för effekter på jordbruksgrödor. Det summeras över en tremånadersperiod.

CUO - »Cumulative Uptake of Ozone« - representerar tredje generationens exponeringsindex för ozon. Det beräknas utifrån timvärden för ozonhalt i kombination med de klimatfaktorer, främst ljus, fuktighet och temperatur, som styr växternas gasutbyte. Liksom för AOT40 används trösklar även för detta exponeringsmått. Till exempel betecknar CUO<sup>+</sup> det summerade ozonupptaget över ett tröskelvärde på 4 nanomol per kvadratmeter bladyta och sekund.

# Kväveproblemet

OLLE WESTLING

## Kväveupplagringen ökar i skogsmark

*I Götaland har markens förråd av kväve ökat med flera hundra kilo per hektar under de senaste 50 åren, men risken för ökad utlakning av kväve från skogsmarken är trots det liten i växande skog.*

### **Ökat nedfall av kväve från 1950-talet**

Kväve är normalt ett bristämne för träd och andra växter i skogen. Utsläpp i hela Europa av kväveoxider från förbränning och ammoniakavgång från jordbruket har gjort att det atmosfäriska kvävenedfallet är förhöjt i stora delar av landet. Nedfallet till skog varierar mellan närmare 20 kg kväve per hektar och år i sydvästra Sverige till något enstaka kg i Norrlands inland. Skog på höjder och i skogsbyn kan ha väsentligt högre belastning än genomsnittet. Kvävenedfallet ökade främst efter 1950-talet och kulminerade runt 1990. Efter det har åtgärder internationellt och nationellt minskat utsläppen något och figur 1 visar utvecklingen från 1950 till den förväntade nivån 2010 beräknat utifrån det så kallade Göteborgsavtalet från 1999. Avtalet träffades inom ramen för Konventionen om gränsöverskridande luftföroreningar i Europa (CLRTAP).

### **Låg utlakning av kväve från skog**

Kväve som deponeras från luften tas upp av växterna och en viss del lagras i marken. Förluster av kväve sker huvudsakligen genom utlakning till grund- och ytvatten, samt då biomassa som innehåller kväve förs bort via avverkningsprodukter. Andra processer som gasformig avgång och kvävefixering har relativt liten betydelse på de flesta typer av fastmarker i skogen. Trots högt nedfall i vissa delar av landet är normalt utlakningen liten på grund av skogsmarkens förmåga att hålla kvar kväve. Förlusten av den totala mängden kväve genom utlakning är oftast mellan 1 och 3 kg per hektar och år. Men det finns en gräns för hur mycket kväve som kan lagras i träd och mark, och om den gränsen överskrids ökar utlakningen. Förhöjd utlakning i stora områden kan allvarligt öka belastningen på vattendragen som i sin tur transporterar kväve till kustområdena. I havet orsakar kväve en gödningseffekt som kan

leda till svåra miljöproblem. Risken för onormal upplagring och kraftig utlakning av kväve från skogsmark med högt nedfall har uppmärksammats mycket i både Europa och USA.

### Kväveförråden har ökat i Götaland

ASTA har utfört en studie inriktad på upplagringen av kväve i svensk skogsmark de senaste decennierna för att bedöma risken för det som kallas kvävemättnad i marken. Det ackumulerade nedfallet under de senaste 50 åren jämfördes med beräknade förluster i form av utlakning och inbindning i en ökande mängd trädbiomassa, samt avverkningar under samma tidsperiod från olika skogstyper i de län som ingår i Götaland. Mellanskillnaden utgör den mängd kväve som har lagrats upp i marken och som på sikt utgör en risk för ökad utlakning om upplagringen fortsätter. Beräkningarna visar på en ökning av markens förråd i Götaland på mellan 180 och 450 kg kväve per hektar (figur 2). Den största ökningen noterades i Skåne och Halland med det högsta nedfallet i landet. Den relativt kraftiga upplagringen i Götaland beror på att bortförseln kraftigt understiger tillförseln i form av nedfall, som i genomsnitt uppgick till drygt 10 kg kväve per hektar och år. Detta skall jämföras med genomsnittliga förluster från skogsmarken på mindre än 2 kg i form av avrinning och 3 kg från avverkningar av huvudsakligen stamved.

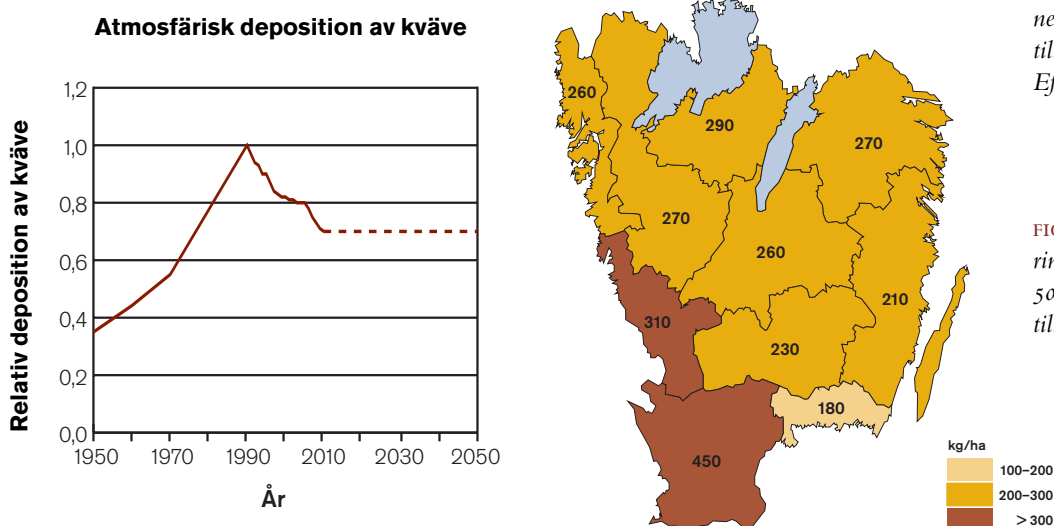
Upplagringen av kväve under de senaste decennierna kan jämföras med det förråd som långsamt byggts upp under tusentals år i marken, cirka 1 till 10 ton kväve per hektar i södra Sverige, med en årlig naturlig tillförsel av 1–2 kg kväve per hektar och år. Variationen beror sannolikt på många faktorer, inte minst den historiska markanvändningen. De senaste decenniernas upplagring av kväve i södra Sverige på grund av nedfall har sannolikt medfört en hastighet i upplagringen som aldrig funnits tidigare.

### Risken för kväveutlakning liten i växande skog

Gödslingsförsök i skog med relativt höga givor har visat att det troligen är en bra bit kvar innan utlakningen ökar från växande skog i Sverige. Däremot kan utlakningen öka från kalavverkningar i kväverika områden. Den framtida risken för att upplagringen kommer att vara så stor att utlakningen av kväve ökar från alla typer av skog styrs främst av hur stort nedfallet kommer att vara och hur mycket kväve som kommer att föras bort genom avverkningar.

Sambandet mellan upplagring av kväve i skogsmarken och utlakning efter avverkningar beskrivs i artikeln »Hyggen läcker kväve« i denna rapport. Ett scenario för framtida upplagring av kväve om skogen brukas mer intensivt de kommande 50 åren beskrivs i artikeln »Ökat uttag av skog – ett sätt att minska kväveupplagringen«.

**Upplagrat kvävenedfall i skogsmark 1950–2000**

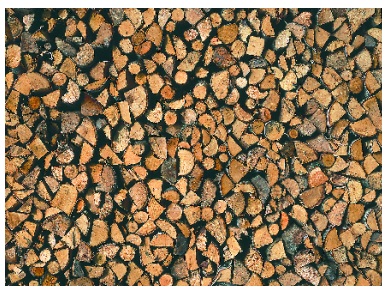


FIGUR 1. (vänster). Relativ nedfall av kväve i södra Sverige 1950 till år 2010, med 1990 som referensår. Efter 2010 är utvecklingen osäker.

FIGUR 2. (höger). Beräknad upplagring av kväve i skogsmark under en 50-årsperiod i Götaland, från 1950 till år 2000.

# Ökat uttag av skog – ett sätt att minska kväveupplagringen

*Inom ASTA utförs beräkningar som visar att risken för framtida kvävemättnad och utlakning i skogsmark minskar betydligt med ett skogsbruk som utöver stamved även utnyttjar skogsbränslen i form av avverkningsrester.*



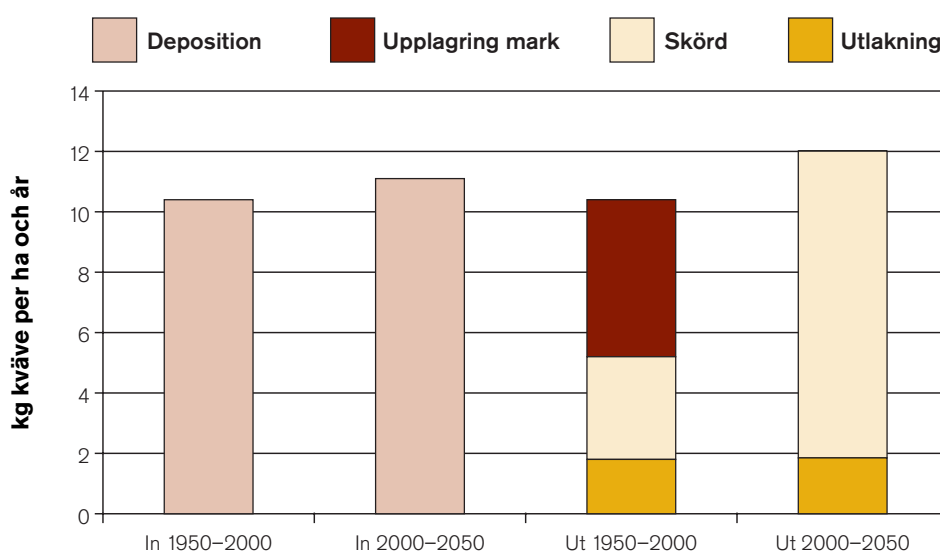
## Nedfall av kväve ökar skogens produktionsförmåga

Den ökade kväveupplagringen i skogsmark har gjort att produktionsförmågan, som är beroende av tillgången på kväve, sakta ökat i skogen. Under 1900-talet har upplagringen varit onormalt snabb, vilket medför risker på sikt för bland annat ökad utlakning. Den relativt långsamma minskningen av utsläppen av kväve gör att det finns en risk för en fortsatt snabb upplagring under flera decennier framåt.

## Intensivt skogsbruk minskar upplagring

Upplagringen av kväve i skogsmarken styrs inte enbart av nedfallet utan även av mängden kväve som förs bort genom avverkningar. I det konventionella skogsbruket tillvaratas stamved som blir till massaved och timmer. Stammens innehåll av kväve är relativt litet, jämfört med alla grenar, kvistar och barr som trädet producerat under sin livstid. Det finns mycket som talar för att kväveförlusterna genom avverkningar kommer att öka i framtiden. Tillväxten ökar stadigt, beroende på förbättrad skogsskötsel och gödslings effekter av kvävenedfallet. Men den största förändringen sker om avverkningsrester i form av toppar, grenar och barr (kallat GROT) utnyttjas mer konsekvent som biobränsle. Dessa träddelar har betydligt högre halter av kväve än stamveden, i synnerhet gäller det barr som utgör en relativt liten del av mängden biobränsle i skogen. Det gör att avbarrad GROT minskar uttaget av kväve ganska mycket. Uttag av GROT är vanligt redan i dag i södra Sverige, men det måste öka ytterligare om biobränslen ska stå för en stor del av tillförseln i framtida energisystem.

Massbalans för kväve i skog



**FIGUR 1** Genomsnittlig massbalans för kväve i Götaland under två 50-årsperioder. Den senare perioden baseras på ett scenario med intensivt skogsbruk.



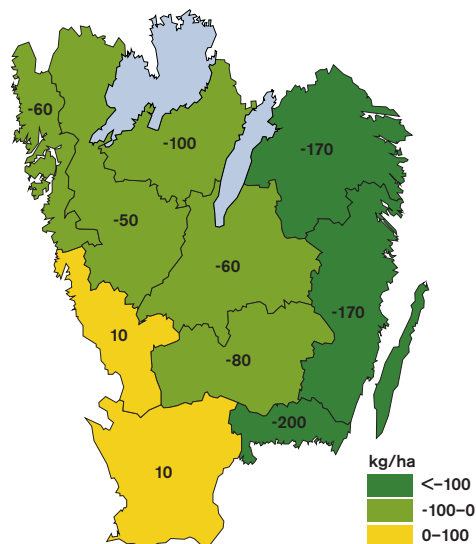
## Framtida upplagring endast i Skåne och Halland

ASTA har tillämpat en metod för att göra balansberäkningar för skogsmark där tillförseln av kväve i form av nedfall jämförs med bortförseln, som består av utlakning och avverkningar. Skogsbrukets bortförsel av kväve genom avverkningar har beräknats för den senaste 50-årsperioden i Götaland. Resultaten kan jämföras med ett scenario 50 år framåt med minskat nedfall och konsekvent utnyttjande av skogsbränslen utöver avverkningar av stamved. Avverkningsnivåerna är hämtade från Skogsstyrelsens prognos för framtida tillväxt och avverkning (SKA 99). Nedfallet 50 år framåt är beräknat som om det kommer att ligga på den nivå som skall uppnås år 2010 enligt internationella avtal. Under de gångna 50 åren var den genomsnittliga bortförseln i form av avverkningar mindre än 30% av nedfallet (figur 1). Huvuddelen av nedfallet lagrades upp i marken. Scenariot för de kommande 50 åren gör antagandet att nedfallet kommer att vara i samma storleksordning som den tidigare perioden. Trots det sker ingen upplagring av kväve i genomsnitt i Götaland enligt beräkningarna, eftersom bortförseln genom avverkningar ökat kraftigt (figur 1). Det är framför allt avverkningsresterna som står för ökningen. Den länsvisa upplagringen eller förlusterna av kväve från skogsmark i Götaland visas i figur 2. Endast Skåne och Halland kommer att ha en fortsatt upplagring enligt beräkningarna i det använda scenariot. Beräkningar för 50 år tillbaka i tiden visar på en relativt snabb upplagring i alla Götalands län, i synnerhet i sydväst (se artikeln »Kväveupplagringen ökar i skogsmark«).

## Långsiktiga kväveförluster från skogsmark inte önskvärt

Scenariot med intensivt skogsbruk har naturligtvis osäkerheter som omfattar både beräkningsmetoden och den framtida utvecklingen av nedfall och avverkningar. Men resultaten visar att intensiteten i skogsbruket har en stor betydelse för den framtida tillgången på kväve i skogsmark. Nettoförluster av kväve under en tid, orsakat av intensivt skogsbruk, kan vara motiverat med tanke på att den upplagring som skett under senare decennier har ökat risken för negativa miljöeffekter. Det förutsätter dock att uttaget av andra näringsämnen via skörden, främst baskatjoner, kompenseras med gödsling för att undvika markförsurning. På lång sikt kommer nettoförlust av kväve att vara svårt att förena med en uthålligt hög produktion som är nödvändig för att uppnå flera olika miljömål, på grund av möjligheterna till skogsbränsleuttag och tillgång till förnyelsebara råvaror. ASTA-programmet kommer att arbeta vidare med beräkningar av den framtida omsättningen av kväve i skogsmark under olika förutsättningar med hjälp av bland annat dynamiska modeller som tar hänsyn till både kväve och kol i skogsekosystemet.

Upplagrat kvävenedfall i skogsmark 2000–2050



FIGUR 2. Beräknad upplagring eller nettoförlust av kväve i skogsmark med ett scenario som innebär ett intensivare skogsbruk under en kommande 50-årsperiod, från 2000 till år 2050, i Götalands olika län.

# Hyggen läcker kväve

*På skogshyggen ger ett högt kvävenedfall en kraftigt ökad utlakning av kväve. I sydvästra Sverige kan den extra utlakningen utgöra 40% av den totala utlakningen under en skogsgeneration.*

## **Kvävenedfall ökar utlakning från hyggen**

I Sverige förekommer förhöjd utlakning från växande skog endast i undantagsfall, och då från små arealer kustnära skog som gränsar till jordbruksmark i sydvästra Sverige. På hyggen däremot förekommer naturligt en ökad utlakning av kväve under de första åren, eftersom upptaget av kväve stryps samtidigt som nedbrytningen av organiskt material och bildningen av oorganiskt kväve genom nitrifikation fortsätter som innan. Normalt är denna ökning bara 10% av den totala utlakningen av kväve under en hel skogsgeneration (70–90 år), men studier har visat att utlakningen från kalhyggen kan vara mer förhöjd än så i områden med högt nedfall av kväve. Jämförelser mellan kvävenedfall och uppmätt halt av oorganiskt kväve i markvatten har visat på ett linjärt samband mellan kvävenedfall och utlakning från hygge då nedfallet överskrider 8 kg per hektar och år (figur 1). Kväve i markvatten på 50 cm djup kan utlakas till grund- och ytvatten. Som jämförelse visas genomsnittliga kvävehalter i markvatten i växande skog i figur 1. Dessa halter är med få undantag mycket låga i skogsytor över hela Götaland.

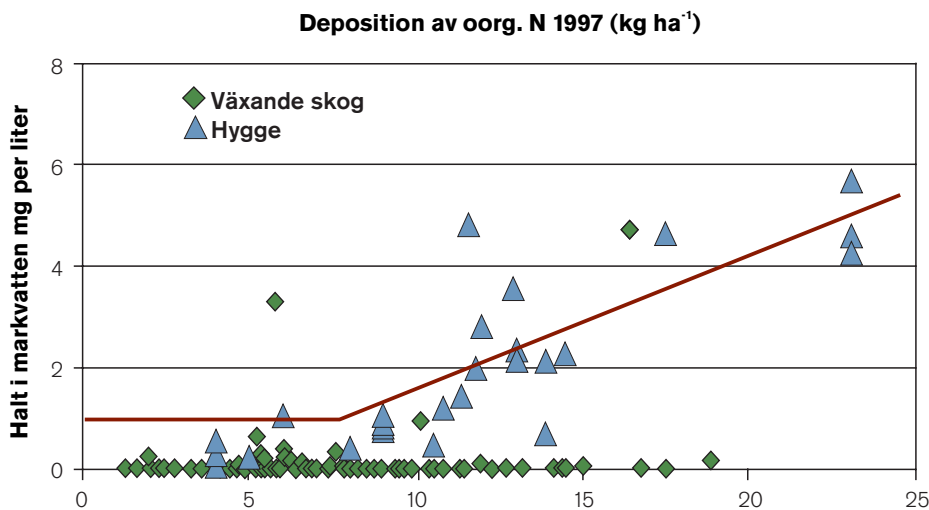


## Stor regional skillnad i utlakning

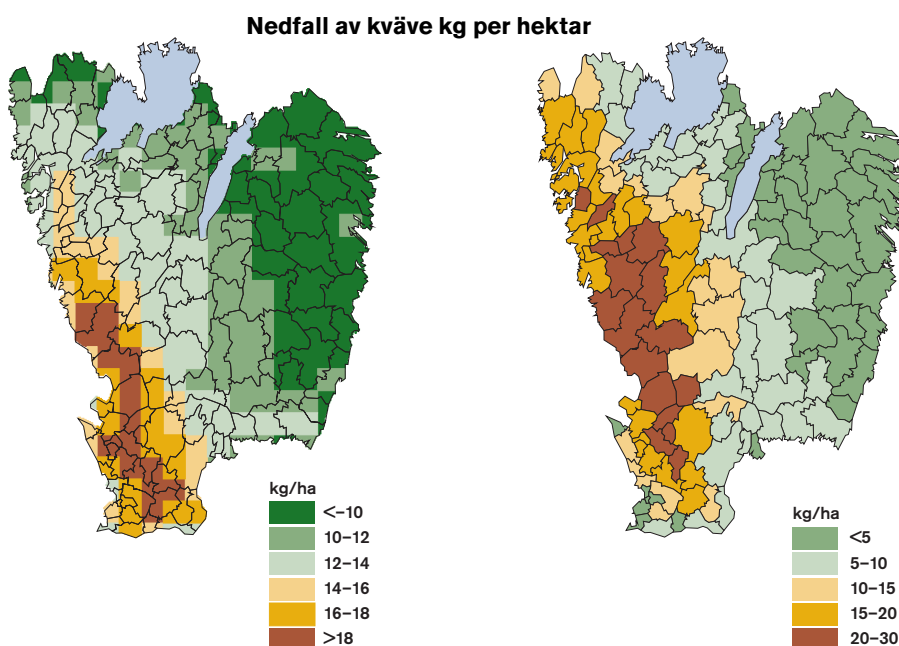
Sambandet mellan nedfall och utlakning från hygge kan användas för att kartlägga utlakning från hygge på regional nivå. Utlakningen varierar från nära 30 kg per ha i väster till bara några kg i öster (figur 2). Gradienten beror på skillnader i kvävenedfall (figur 2), att avrinningen är större i de västra delarna samt att andelen hygge är högre i söder eftersom skogsgenerationerna är kortare där på grund av högre tillväxthastighet. I sydväst uppgår den extra utlakningen från hygge till över 40% av den totala utlakningen från skogsmark under en hel omloppstid.

## Fortsatta studier av samband

Sambandet mellan nuvarande kvävenedfall (1997) och utlakning från hygge bygger på mätningar i olika försök. Den huvudsakliga anledningen till att utlakningen är högst i sydvästra Sverige är troligen att upplagringen i marken varit störst där under senare decennier. Nedfallet 1997 är en indikator på denna upplagring. Ett mer allmängiltigt samband som kan användas om nedfallet förändras i framtiden är ackumulerat kväve, eller kvoten mellan kol och kväve i marken. Fortsatta studier kommer att göras för att undersöka sambandet mellan dessa parametrar och utlakning från hygge.



FIGUR 1. Samband mellan nedfall (1997) och halten oorganiskt kväve i markvatten på 50 cm djup i mineraljorden.



FIGUR 2 (vänster). Kvävenedfall 1997 i granskog enligt MATCH-modellen (SMHI).

FIGUR 2 (höger). Kväveutlakning per år från hygge baserat på regressionslinjen i figur 1. Hyggesfasen är beräknad att vara i genomsnitt fem år.

# Fältskiktet viktigt för att förhindra nitratutlakning

*Kväveutlakningen är högre på våren. Studier i lövskog visar att ett svagt utvecklat fältskikt ökar risken för förhöjd utlakning.*

## Markförsurning kan slå ut vegetation

I sydsvenska lövskogar finns det ett mer eller mindre välutvecklat fältskikt av gräs och örter men endast en liten del lavar och mossor. Vilka arter som förekommer och i vilken mängd beror på markens surhet (pH), näringsstillstånd och hur mycket ljus som når marken. Genom nedfall av försurande ämnen och kväve har marken försurats kraftigt i sydligaste Sverige med avtagande effekt norrut. Kombinationen av sjunkande pH i marken och nedfall av kväve innebär att arter kan slås ut av giftiga halter av väte- och aluminiumjoner i marken och att arter som gynnas av kväve ökar.



## Mer kväve bildas i mark när kvävebelastningen ökar

Kväveomsättningen i marken påverkas också starkt av markens surhetsgrad, i synnerhet nitratbildningen som helt kan saknas på mycket sura marker. Det ackumulerade kvävenedfallet har dock medfört att mer ammonium och nitrat bildas i marken. I sura jordar i Skåne och Halland är nitrat- och ammoniumbildningen (netto-mineraliseringen) i markens översta skikt 80–90% högre än i jordar med samma surhetsgrad i Småland och Mälardalen. Det beror troligen på att kvävenedfallet i de sydligaste landskapen är ca 10 kg högre per hektar och år. Detta påverkar naturligtvis risken för kväveutlakning i sydliga skogar.

## Kväveutlakningen störst på våren

Den mikrobiella aktiviteten i marken sätter igång redan tidigt på våren, vilket kan orsaka en avsevärd kvävebildning under en period då träden ännu inte börjat växa. Risken är då stor att nitrat, som är mycket lättlösligt i marken, lakas ut till angränsande ytvatten eller till grundvattnet. Undersökningar av hur nitrat tas upp av fältskiktet och trädskiktet i tre skånska ekskogar under våren, försommaren och sensommaren visar att mängden nitrat som bildades på våren var lika stor eller större än den som bildades på försommaren, och betydligt större än på sensommaren (upp-

skattad som nitratreduktasaktivitet i växterna). Jämfört med sensommaren var nitratbildningen två gånger större under våren. Utlakningen var tre till fyra gånger högre på våren än sommaren. Fältskiktet, som täckte 50–100% av marken (något mer på våren än sommaren) kunde dock inte förhindra att nitrat lakades ut ur marken, men utlakningen hade troligen varit betydligt högre om dessa växter inte funnits.

### Fältskiktet fångar upp kväve

Av det nitrat som omhändertogs av växterna på våren togs 90% upp av fältskiktet och 10% av de avlödade träden. Även i absoluta mått var nitratupptaget mycket högt i fältskiktet, men trots det utlakades nitrat. På en lokal som hade en mycket stor förekomst av ramslök var nitratupptaget hela 99% i fältskiktet. Träden ökade sedan sin andel av nitratupptaget till 60–70% under för- och sensommaren. Att fältskiktet även under sommaren hade en så stor andel som 30–40% av nitratupptaget är betydligt mer än vad som tidigare antagits.

### Fältskiktet minskar utlakning från hyggen

Resultaten visar att skogen bör skötas så att fältskiktet är så ymnigt som möjligt på våren. Näringsämnen tas upp i vårväxterna och förhindrar därmed utlakning. När vårväxterna vissnar ner återcirkuleras näringsämnen till träden och sommarvegetationen. Det är också värdefullt att ha ett väl utvecklat fältskikt på sommaren, eftersom det bidrar till att behålla kväve i cirkulation i ekosystemet. Det befintliga fältskiktet är också viktigt vid större avverkningar, eftersom det snabbt kan breda ut sig. Avverkningen frigör stora mängder näring som behöver bindas upp av andra växter för att hindra utlakning. Fältskiktet bidrar också till att öka den biologiska mångfalden, vilket har stora positiva värden utöver att minska risken för utlakning.

*Almdunge på Kullaberg i Skåne med en riklig vårflora bestående av ramslök och fläckar av skogsbingel.*

*Foto: Ursula Falkengren-Grerup*

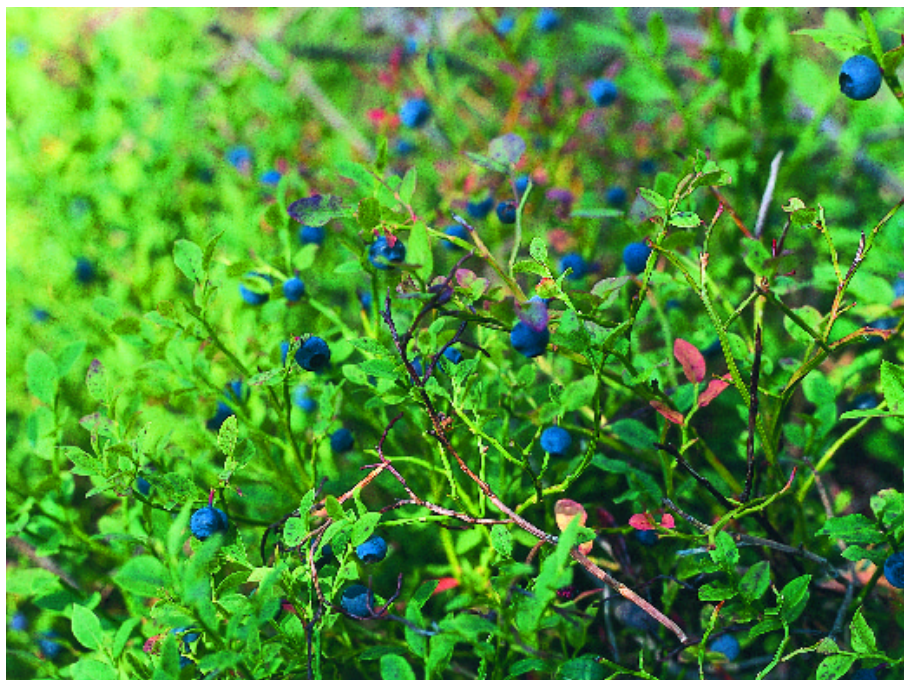


# Stort nedfall av kväve ger mindre med blåbär och lingon i skogen

*Förekomsten av blåbär och lingon är lägre i områden med högt kvävenedfall än i områden med lågt nedfall.*

## **Kvävenedfallet större i söder än i norr**

Många växtarter i Sveriges barrskogar, som blåbär och lingon, har under lång tid anpassat sig till låg tillgång på kväve. Långsam tillväxt, eller att ha fleråriga blad, är exempel på sådan anpassning. Ett ökat kvävenedfall kan tänkas leda till att arter av detta slag minskar i förekomst medan andra arter i stället ökar. I Sverige följer kvävenedfallet en gradient från sydväst mot nordost, med det högsta nedfallet i sydvästra Sverige på 20 kg och endast 1–2 kg kväve per hektar i nordost. Det är troligt att detta också skapar en gradient i påverkan på vegetationen. Det kan då förväntas att de största effekterna på vegetationen skall finnas i de sydvästra delarna av landet.



## **Blåbärris angrips av kvävegynnad parasitsvamp**

Inom ASTA-programmet har en studie genomförts där förekomsten av blåbärris- och lingonris i svensk barrskog jämfördes mellan områden med högt respektive lågt kvävenedfall. Resultaten var att båda risväxterna var ovanligare i områden med högt kvävenedfall än i områden med lågt (figur 1). Dessutom förekom blåbärriset i glesare bestånd och var i högre grad angripet av en parasitsvamp i områden med högt nedfall av kväve (figur 1b). Denna parasitsvamp har i tidigare studier visat sig vara starkt gynnad av kvävegödsling, och svampangreppen gör att blåbärrisbusken faller sina blad redan i mitten av sommaren. Möjligen kan parasitsvampen vara en av anledningarna till den glesa och låga förekomsten av blåbärris i områden med högt kvävenedfall. För att säkert kunna fastställa om så är fallet behövs fler och mer detaljerade studier.

### Tät skog ger mindre med blåbär och lingon

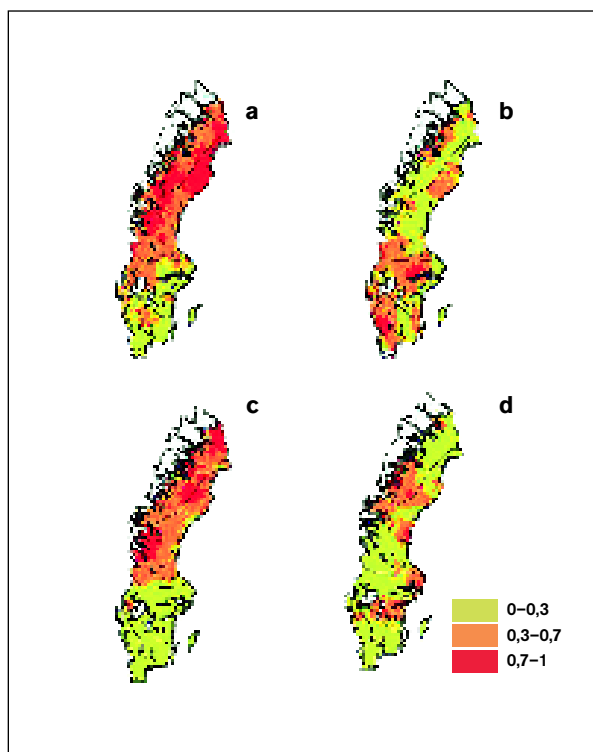
Gradienten i kvävenedfallet sammanfaller med många andra gradienter, till exempel nederbörd och temperatur. Därför kan det inte säkert sägas vad skillnaderna mellan områdena beror på, och om de orsakas av andra faktorer än skillnader i kvävenedfall. Mönstret i blåbärs- och lingonrisets förekomst stämmer dock väl överens med resultat från gödslingsförsök. Det tyder på att kväve kan ha bidragit till den låga förekomsten i områden med höga nedfallsnivåer. Moderna skogsbruksmetoder resulterar ofta i täta och mörka skogar, som kan minska undervegetationens utbredning. Detta är mest påtagligt i sydvästra delen av Sverige och har förmodligen också bidragit till den låga förekomsten av blåbärs- och lingonris i den delen av landet.

### Blåbärsris i tallskog mindre känsligt

Hur ett område påverkas av ökat kvävenedfall beror till viss del på hur de ursprungliga näringsförhållandena var. Den genomförda studien visade att i områden med högt kvävenedfall var förekomsten av blåbär mer knuten till talldominerad mark, vilket inte var fallet i områden med lägre nedfall. Detta indikerar att negativa effekter av kvävenedfall kan vara mindre på talldominerade marker, som generellt är mer näringsfattiga än grandominerade marker. Bedömning av känsligheten hos barrskogsvegetation bör således inte utgå från talldominerade marker då effekter av kvävenedfall då lätt kan underskattas.

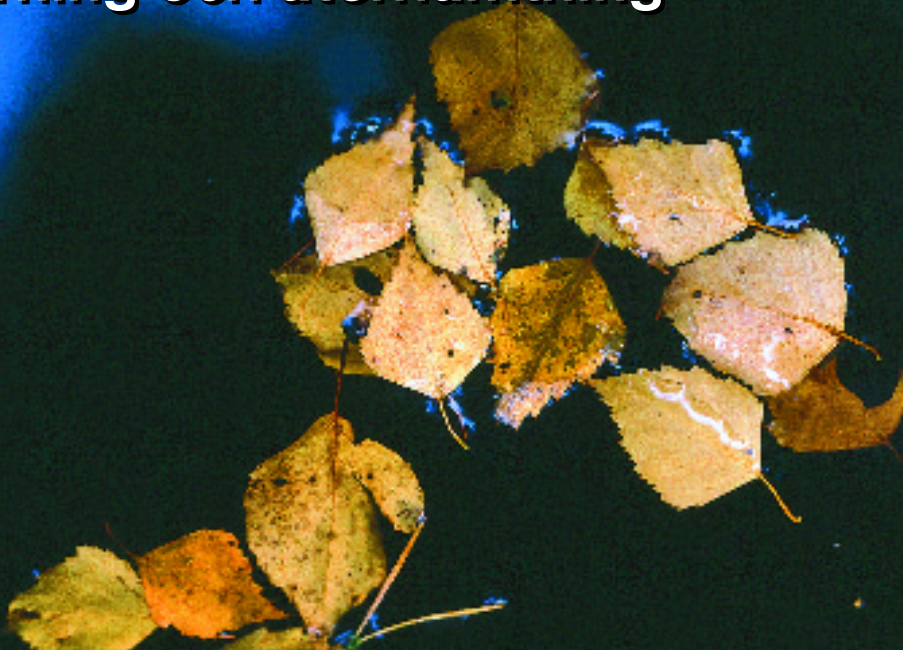
### Minskad bärtillgång kan påverka hela ekosystemet

En minskad förekomst av vanliga växtarter som blåbär och lingon kan få stora konsekvenser även för många andra arter. Många djur är direkt eller indirekt beroende av blåbärs- och lingonris, då många insekter lever av och på dessa risväxter. En minskad förekomst av sådana risväxter kan därför få negativa effekter inte bara på insektsarter utan även på till exempel skogsfåglar som är beroende av insekterna för sin överlevnad. ❀



FIGUR 1. Förekomst av: (a) Blåbär, med de olika nedfallsgränserna på 3, 6, 9 och 12 kg kväve per hektar och år; (c) lingon; (d) kruståtel. Figur (b) visar förekomsten av blåbärsris som var infekterat av parasitsvampen *Valdensia heterodoxa*.

# Försurning och återhämtning



HARALD SVERDRUP OCH  
PERINGE GRENNFELT

## Varför dynamisk modellering?

*Dynamiska modeller är viktiga verktyg för att förstå konsekvenserna av att föroreningsbelastningen överskrider vad naturen tål. Det gäller både beskrivningen av effekterna i miljön och hur snabbt olika åtgärder ger resultat.*

### **Belastning och effekter skilda åt i tiden**

Med en dynamisk modell kan man beskriva fördröjningen mellan orsak och verkan i skogsmark som påverkas av försurande luftföroreningar. Mer förenklade studier utan tidsupplösning och dynamiskt beskrivna förlopp kan göra att viktiga samband mellan påverkan och effekt inte upptäcks. När den kritiska belastningsgränsen för till exempel försurning är överskriden tar det avsevärd tid innan tydliga effekter kan observeras på grund av markens buffertsystem. Även återhämtningen efter att belastningen av föroreningar har minskat kan vara kraftigt fördröjd på grund av olika markkemiska processer (figur 1). Både försurning och återhämtning av skogsmark varierar kraftigt mellan olika marktyper och regioner i landet. Skogens tillväxt och skörd i brukade områden har också en stor effekt på förloppen som dynamiska modeller kan beskriva. Regionala och yttäckande beräkningar av återhämtning kan utgöra en grund för att optimera åtgärder i form av utsläppsbegränsningar och anpassning av skogsbruket.

### **Kväveproblemet beskrivs med dynamiska modeller**

Bedömningar av det långsiktiga åtgärdsbehovet när det gäller övergödning med kväve i skogsmark är ett exempel på en fråga som är mycket svår att belysa utan dynamiska modeller. Kväve är normalt det näringsämne som begränsar tillväxten i skogen vilket gör att under- och överskott får dynamiska effekter. Förutom övergödning kan kväve bidra till försurning på olika sätt. Effekter av nedfall på den långsiktiga omsättningen av kväve kan inte heller beskrivas utan att samtidigt ta hänsyn till kolcykeln, som också är en viktig del av dynamiken i skogsekosystemet. ASTA arbetar tillsammans med MISTRA-programmet SUFOR (Sustainable Forestry in



Southern Sweden) med att utveckla verktyg för en samlad bedömning av både svavel och kvävenedfall i relation till skogens känslighet och produktionsförmåga.

### Modeller används i åtgärdsarbete

Dynamiska modeller för att belysa nationella frågor kring försurning och övergödning är viktiga som underlag för arbetet med att nå de svenska miljökvalitetsmålen som Riksdagen nyligen beslutat om. Speciellt viktigt är att klarlägga konflikter mellan olika mål som hög produktion och skörd av skogsbränslen i framtida energisystem, och snabb återhämtning från försurning i mark och vatten. Det framtida över- eller underskottet på kväve i skogsmark i olika delar av landet är också viktigt att bedöma. Kvävetvets gödnings effekter och utlakning kan i framtiden bli ett allvarligt miljöproblem om upplagringen i skogsmark fortsätter. Det nationella arbetet har också kopplingar till de europeiska frågorna eftersom åtgärder i form av utsläppsbegränsningar berör alla de länder som påverkar Sverige inklusive våra egna utsläpp.

Det internationella arbetet med att använda dynamiska modeller för att utveckla konceptet för kritiska belastningsgränser kräver samförstånd och ett vetenskapligt underlag för att fungera som beslutsstöd för kostnadseffektiva åtgärder. Konventionen om gränsoverskridande luftföroreningar (CLRTAP) har format en process för att utveckla och förankra nya metoder för att kartlägga kritisk belastning och överskridande för svavel och kväve. I processen ingår olika grupper som är knutna till förhandlingsarbetet samt vetenskapliga arbetsgrupper som utvecklar manualer för beräkningar och kartläggning. ASTA-programmet har arrangerat två internationella workshops kring dynamisk modellering i Ystad, i oktober 2000 och november 2001. Resultaten från dessa har rapporterats till CLRTAP. Det vetenskapliga utvecklingsarbetet är dock helt beroende av att de enskilda länderna gör nationella studier och bedriver forskning för att öka kunskapen om luftföroreningarnas effekter.

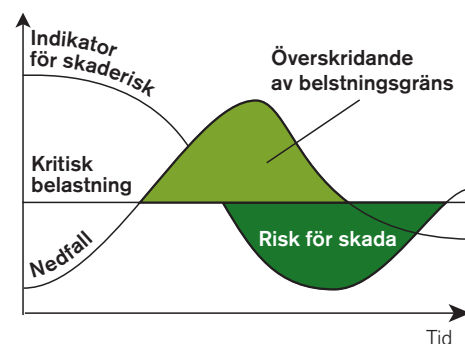
### ASTA utvecklar dynamiska modellverktyg

ASTA-programmet står för huvuddelen av det nationella och internationella utvecklingsarbetet i Sverige. Flera tillämpningar beskrivs i denna rapport. Dynamiska modeller används inte bara i Sverige för att beskriva behov och konsekvenser i miljön av åtgärder. För närvarande har Sverige, Schweiz, Tyskland och Holland gjort regionala beräkningar. ASTA arbetar nu vidare med flera olika modellverktyg i samarbete med SUFOR. ASTA använder främst modellen SAFE för skogsmark samt MAGIC för avrinnande vatten och sjöar. Modellerna beskriver det historiska försurningsförloppet med kemiska termer samt den framtida utvecklingen där scenarior för nedfall och skogsskötsel påverkar miljötillståndet.

#### Dynamisk modellering

En dynamisk modell som används för att beskriva utvecklingen av försurning räknar på materialbalanser i olika ekosystem. Tillförsel och bortförsel av syror och basiska ämnen beräknas normalt årsvis med hänsyn till att flöden och förråd ändras med tiden. Dynamiska försurningsmodeller som SAFE (Simulating Acidification in Forested Ecosystems) och MAGIC (Model of Acidification of Groundwater in Catchments) beskriver förändringar av syra- och basförhållandena i skogsmarken och det avrinnande vattnet när faktorer som nedfall av försurnande ämnen och skogsbrukets inriktning förändras. Förändringarna beskrivs genom indikatorvärden som till exempel pH, markens basmättnadsgrad, och halter av oorganiskt aluminium i ytvatten. ASTA arbetar även med dynamiska modeller för kväve som på liknande sätt som försurningsmodellerna beräknar materialbalanser för kväve och kol. Syftet är främst att beskriva produktionen av biomassa, upplagring av kväve i marken samt utlakning som följd av förhöjt nedfall i olika delar av landet.

FIGUR 1. Dynamiska modeller kan beskriva betydelsen av fördröjningar i olika processer för sambandet mellan belastning av föroreningar, åtgärder och naturens återhämtning. Risken för skador i miljön kan ha ett förskjutet förlopp i förhållande till föroreningsbelastningen i form av nedfall.



## Försurningen – snart ett minne blott?

*Avrinnande vatten i skogslandskapet är mindre surt nu när nedfallet minskat. Men i områden med stark markförsurning kommer en förbättring av markens tillstånd att ta mycket lång tid. Det gör att det även i framtiden finns risk för försurningskador.*

### Försurning och återhämtning styrs av samma faktorer

Kombinationen av belastning av syror och naturens känslighet avgör hur försurningen drabbar ett visst område. Den största arealen i Sverige som kan sägas vara försurad av mänskliga aktiviteter är produktiv skogsmark. Försurade sjöar och rinnande vatten påträffas också i skogslandskapet. Försurningsbelastningen beror huvudsakligen på försurande nedfall och påverkan på marken genom skogens tillväxt och skörd. Känsligheten beror på flera faktorer där de viktigaste är marktäckets tjocklek och vittringskapacitet. Samma faktorer styr också återhämtningen nu när nedfallet har minskat väsentligt. Återhämtningens förlopp beror också på hur mycket området har försurats tidigare, hur mycket nedfallet har minskat och hur skogsbruket är utformat.



### Möjligheterna till återhämtning varierar

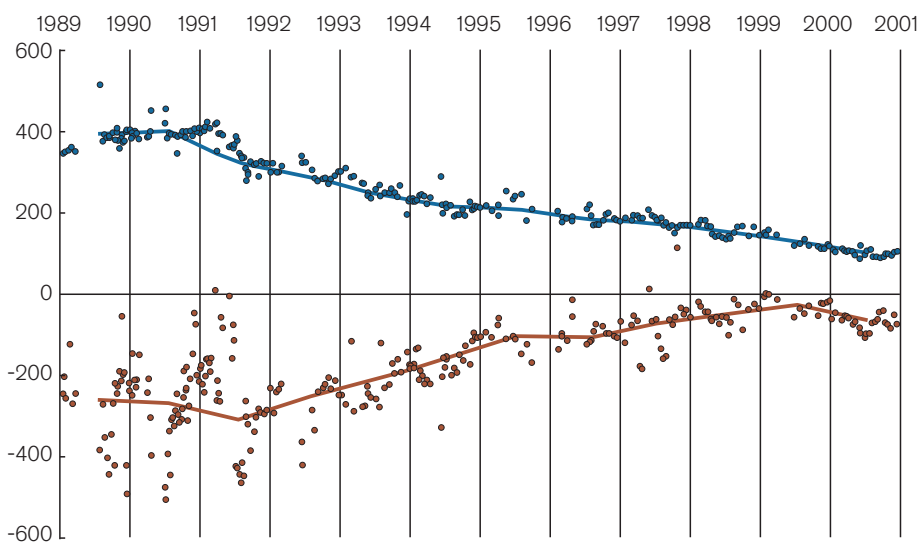
Försurningen har pågått under många decennier. Det finns idag stora arealer försurad skogsmark, särskilt i de södra och sydvästra delarna av landet. Luftföroreningar och skogsbruk har i genomsnitt bidragit till markförsurningen med ungefär lika stora delar enligt uppskattningar som gjorts. Det finns idag inget generellt svar på hur återhämtningsförloppet kommer att se ut i ett område när försurningsbelastningen minskar, hur fort det kommer att gå och hur bra miljötillståndet kan bli. ASTA-programmet arbetar med frågan genom att analysera data från miljöövervakningen, experimentellt utestänga nedfall av luftföroreningar (det så kallade takprojektet vid Gårdsjön), och genom utveckling och tillämpning av dynamiska försurningsmodeller. Slutmålet är att kunna göra regionala bedömningar av hur återhämtningsförloppen kommer att se ut i olika tidsperspektiv och med olika åtgärdsalternativ. Omvänt kan man även beräkna det nedfall som inte får överskridas för att en återhämtning till en viss nivå vid en viss tidpunkt skall vara möjlig.

### Takförsöket visar på snabb men inte tillräcklig förbättring

Takprojektet, även om det bara är ett experiment genomfört på ett ställe, fyller en viktig funktion i arbetet med att beskriva hur återhämtning sker. Mark, vatten och skog har kunnat studeras i detalj under en relativt lång period, där nedfallsminskningen på grund av taket har skett tidigare och varit större än vad den varit i området i övrigt. Försöket visar att även ett mycket kraftigt försurat område kan reagera snabbt och kraftigt på minskningen av försurande nedfall. Avrinningsvattnets kvalitet har förbättrats väsentligt. Vattnets syraneutraliserande förmåga, med måttet ANC (på engelska Acid Neutralising Capacity), har börjat öka och halterna av giftigt organiskt aluminium har börjat minska. Det skedde så fort som sulfat började minska i avrinningen bara ett par veckor efter att taket byggdes 1991 (figur 1). Samtidigt visar experimentet att nio år av utestängt nedfall inte räckte för att nå en önskvärd vattenkvalitet. Erfarenheterna och modellverktyg från takprojektet kommer att utnyttjas som grund för en regional studie av sjöar under 2002. Syftet är att beskriva några möjliga framtidsscenarioer med avseende på återhämtning från försurning. En regionalt kalibrerad modell är ett effektivt verktyg som kan användas till att beskriva återhämtningsförlopp med olika scenarier för nedfall.

### Havssaltepisoder och kraftiga regn ett hot

En förbättring av avrinningen har skett utan att marken under taket blivit mindre sur. Resultatet av modellberäkningar som beskriver den framtida utvecklingen indikerar generellt att det i starkt försurade områden inte är realistiskt att förvänta sig att marken kommer återhämta sig inom loppet av de närmaste decennierna, även om nedfallet skulle upphöra helt. Samtidigt hindrar inte detta att en viss förbättring av både grund- och ytvattenkvaliteten har skett, eller kan komma att ske när nedfallet är lågt. En annan viktig slutsats är att även om vattenkvaliteten förbättras, förblir systemet mark, markvatten och ytvatten känsligt för surstötar. För lång tid framöver kommer försurad mark i Gårdsjön och andra försurade skogsområden att ha dålig motståndskraft mot naturliga episoder med stora havssaltsnedfall eller häftiga regn och snösmältperioder. Naturliga variationer i väderlek som får konsekvenser för nedfall och hydrologi har alltid funnits i sydvästra Sverige, men inte i kombination med kraftigt försurad skogsmark över stora arealer. Detta kan leda till en situation där den genomsnittliga kvaliteten på avrinningen är acceptabel för vattenlevande organismer, men i praktiken riskeras stora störningar och utslagning på grund av frekvent återkommande surstötar.



FIGUR 1. ANC och sulfat i avrinningen från takområdet vid Gårdsjön. Taket byggdes 1991 och därefter ökade ANC (röda markeringar) samtidigt som sulfat minskade (blå markeringar).

# Skogsbrukets roll för försurningstrycket

*Nya beräkningar visar att skogsbrukets intensitet och metoder har stor betydelse för de framtida möjligheterna till återhämtning från markförsurning i södra Sverige.*

## **Nedfallet minskar och en återhämtning är möjlig**

Det kraftiga nedfallet av försurande luftföroreningar, svavel och kväve, har haft en avgörande betydelse för den snabba försurningsutvecklingen under 1900-talet, framför allt i sydvästra delen av landet. Både mark och vatten har drabbats. Nedfall av svavelsyra har en direkt försurningseffekt på marken, medan kvävetts effekt är mer indirekt. Kväve gödslar skogen och den ökade tillväxten leder till ökad markförsurning. Nu när nedfallet av försurande svavel minskar finns förutsättningar för en förbättring av miljötillståndet genom en återhämtning, innebärande att markens surhetsgrad minskar och den syraneutraliserande förmågan ökar.

## **Skogsbruket bidrar till markförsurningen**

Samtidigt som nedfallet av luftföroreningar ökade under 1900-talet så förändrades även markanvändningen, framför allt i södra Sverige. Skogsarealen och tillväxten i skogen ökade genom beskogning och förbättrade skötselmetoder. Tillväxt och skörd av skog har en markförsurande effekt som i många fall kan rymmas inom vad som brukar kallas en naturlig produktionsförmåga. Om tillväxten är hög och skörden även omfattar avverkningsrester så är risken stor att en återhämtning från försurning försenas eller uteblir även om luftföroreningarna minskar. Olika former av kompensationsgödslning, framför allt återföring av aska från skogsbränslen, har nämnts som åtgärd att motverka den risken.

Att skogsmark försuras innebär att tillgången på basiska ämnen i form av kalcium-, magnesium- och kaliumföreningar minskar i förhållande till sura ämnen. Detta kan bland annat ske genom att förlusten av basiska ämnen i jonform (baskatjoner) överstiger den naturliga tillförseln genom nedfall från luften och markens naturliga vittring. Baskatjoner är viktiga näringsämnen som skogen tar upp och halterna är högst i bark, grenar och barr. Förlusten från marken består därför av skogens tillväxt och skörd, men även utlakning till grund- och ytvatten. Nettoförluster av baskatjoner och markförsurning får många följd effekter, bland annat låga pH-värden och höga halter av skadligt aluminium i avrinningen från skogsmark.



## Baskatjonerna i marken har minskat

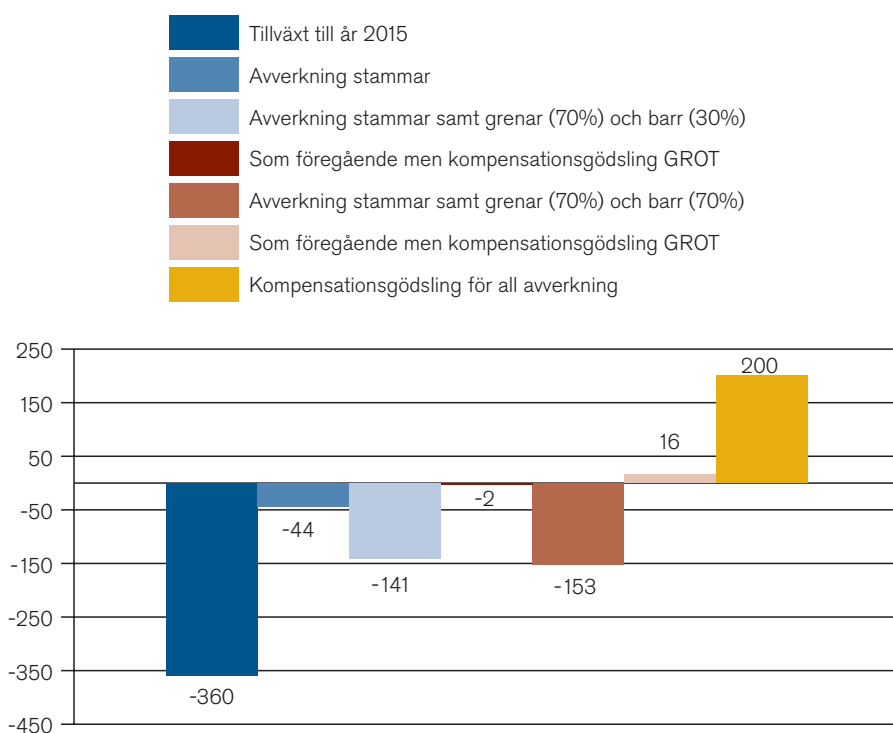
ASTA har utfört en studie av olika scenarios för avverkningar med och utan kompensationsgödning i form av aska i ett välstuderat skogsbestånd, Västra Torup i norra Skåne, med försurad mark och bördig granskog som är mycket vanligt i sydvästra Sverige. Den historiska och den framtida försurningsutvecklingen beräknades med hjälp av en dynamisk modell (MAGIC) som bland annat används för att studera återhämtning från försurning. Modellberäkningarna visar att kombinationen av nedfall av luftföroreningar och växande skog har resulterat i ett underskott av baskatjoner från mitten av 1800-talet till nutid, med cirka 360 ekv. per hektar och år. Framtiden med lägre nedfall, men med ett scenario med skogsbruk som innebär uttag av stamved och avverkningsrester inklusive barr samt ingen kompensationsgödning, medför visserligen ett mindre underskott än tidigare, men det finns inte något utrymme för en återhämtning till ett en acceptabel nivå.

## Skogsbruket kan påverka återhämtningen

Mängden kvarlämnade avverkningsrester har stor betydelse för den långsiktiga balansen av baskatjoner (summan av kalcium, magnesium och kalium) i skogsmarken enligt beräkningarna. Skillnaden i genomsnittliga nettoförluster i nästa skogsgeneration, från år 2015, beräknades till mellan 40 och 150 ekv. per ha och år beroende på olika avverkningsalternativ utan kompensationsgödning. Genomsnittliga årliga balanser visas i figur 1. Det indikerar att skogsbruk med uttag av avverkningsrester, men även enbart uttag av stamved, kan motverka en återhämtning från försurning. Kompensationsgödning kan minska denna påverkan och sannolikt ytterligare motverka försurning om dosen ökas så att den även motsvarar uttaget av stamved.

Resultaten från modellberäkningarna visar en metod för att skapa underlag för bedömningar av möjligheterna att underlätta återhämtning från försurning med anpassat skogsbruk. Beräkningarna belyser även behovet av ytterligare minskning av utsläppen av luftföroreningar utöver de nuvarande internationella avtalen. Metoden behöver dock utvecklas och tillämpas vidare för att resultaten ska kunna generaliseras.

Läs mer om modellberäkningarna i: Moldan, F., Manngård, B. & Westling, O. 2001. Återhämtning av försurad skogsmark med olika uttag av biomassa. IVL B 1424. ✱



FIGUR 1. Genomsnittligt årligt underskott eller överskott av baskatjoner under en framtida skogsgeneration (70–80 år) med olika avverkningsalternativ i ett bördigt granbestånd på försurad mark. Som jämförelse visas även det tidigare genomsnittliga underskottet sedan mitten av 1800-talet (tillväxt till år 2015). Beräkningarna uttrycks i ekvivalenter som gör det möjligt att summera olika basiska ämnen. Det beräknade årliga underskottet per hektar fram till år 2015 på 360 ekvivalenter består av ca 5 kg kalcium, 1 kg magnesium och 2 kg kalium. Markförsurningen under 1900-talet uttryckt som kalksten motsvarar då ca 2 ton per hektar.

# ASTAs styrelse och styrgrupp för det nationella programmet 2001

## **Styrelse**

Lars Lindau, Naturvårdsverket, Stockholm (ordförande)  
Anton Eliassen, Det norske meteorologiske institutt (DNMI), Oslo  
Gunnar Hovsenius, Elforsk, Stockholm  
Sven A. Svensson, Skogsstyrelsen, Jönköping  
Anna Lundborg, Energimyndigheten, Eskilstuna (adjungerad)  
Kerstin Lövgren, Forskningsstiftelsen MISTRA, Stockholm (adjungerad till oktober 2001)  
Jan Nilsson, Forskningsstiftelsen MISTRA, Stockholm (adjungerad från oktober 2001)  
Peringe Grennfelt, IVL Svenska Miljöinstitutet, Göteborg (programchef)  
John Munthe, IVL Svenska Miljöinstitutet, Göteborg (vice programchef)

## **Styrgrupp för det nationella programmet**

Gunnar Hovsenius, Elforsk, Stockholm  
Göran Örlander, Skogsstyrelsen, Jönköping  
Anna Lundborg, Energimyndigheten, Eskilstuna  
Håkan Staaf, Naturvårdsverket, Stockholm  
Olle Westling, IVL Svenska Miljöinstitutet (delprogramansvarig)

## Kontakt med årsrapportens författare

Peringe Grennfelt	grennfelt@ivl.se
Hans Christen Hansson	hc.hansson@itm.su.se
Helena Danielsson	helena.danielsson@ivl.se
Per Erik Karlsson	pererik.karlsson@ivl.se
Håkan Pleijel	hakan.pleijel@miljo.gu.se
Joachim Strengbom	joachim.strengbom@eg.umu.se
Ursula Falkengren-Grerup	ursula.falkengren-grerup@planteco.lu.se
Magnus Olsson	magnus.olsson@planteco.lu.se
Cecilia Akselsson	cecilia.akselsson@chemeng.lth.se
Olle Westling	olle.westling@ivl.se
Harald Sverdrup	harald.sverdrup@chemeng.lth.se
Filip Moldan	filip.moldan@ivl.se





## **ASTA-programmet IVL Svenska Miljöinstitutet**

Box 470 86, 402 58 Göteborg  
Tel: 031 725 62 00 Fax: 031 725 62 90  
E-post: [grennfelt@ivl.se](mailto:grennfelt@ivl.se)

**Hemsida: <http://asta.ivl.se>**

### **Deltagande institutioner**

Ekologi och geovetenskap  
Umeå universitet  
90 187 Umeå,  
Tel. 090-786 50 00

Genetik och växtfysiologi  
Sveriges Lantbruksuniversitet  
901 83 Umeå,  
Tel. 090-786 58 00

Institutionen för miljöanalys  
Sveriges Lantbruksuniversitet  
Box 7050  
750 07 Uppsala  
Tel. 018-67 10 00

Kemiska institutionen  
Lunds universitet  
Box 124  
221 00 Lund  
Tel. 046-222 70 10

Avdelningen för humanteknologi  
och vetenskapsstudier  
Göteborgs universitet  
Box 700  
405 30 Göteborg  
Tel. 031-773 10 00

Institutionen för kärnfysik  
Lunds universitet  
Box 117  
221 00 Lund  
Tel. 046-222 70 10

IVL Svenska Miljöinstitutet AB  
Box 470  
86 402 58 Göteborg  
Tel. 031-725 62 00

IVL Svenska Miljöinstitutet AB  
Aneboda  
360 30 Lamnhult  
Tel. 0472-26 20 75

Avdelningen för tillämpad  
miljövetenskap  
Göteborgs universitet  
Box 461  
405 30 Göteborg  
Tel. 031-773 10 00

Institutet för tillämpad  
miljövetenskap (ITM)  
Stockholms universitet  
106 91 Stockholm  
Tel. 08-674 70 00