

Optiska mätmetoder baserade på molekylspektroskopi lämpar sig väl för att övervaka och kartlägga olika gaser, inklusive luftföroreningar, i atmosfären. Till skillnad från fasta eller flytande ämnen har gaser skarpa absorptionslinjer. Utrustning för att optiskt mäta gaser i atmosfären måste därför i allmänhet ha en mycket högre spektral upplösning ("skärpa") - alltså skarpare kunna urskilja olika absorptionsvåglängder - än vad som erfordras för att karakterisera markytor eller havsytor. Den snabba utvecklingen av bl a lasrar och avancerade detektionssystem har gjort det möjligt att få fram kraftfulla fjärranalyssystem för övervakning av lufthavet.

Atmosfären tvingas härberga en ökande mängd avfallsprodukter från mänskliga aktiviteter. Att få till stånd drastiska minskningar av utsläppen genom att införa ny produktionsteknik respektive reningsteknik är visserligen den enda verkliga lösningen på luftföroreningsproblemen, men en fortsatt utveckling av mätteknik är också en viktig del i hela problemkomplexet. Objektiv kunskap om tillståndet i miljön, och möjligheten att kontrollera utsläpp och studera effekten av insatta åtgärder, kan vara en utgångspunkt för ett konstruktivt tänkande i miljöfrågorna.

Laser kartlägger luftföroreningar och nyttigt ozon

Av Hans Edner och Sune Swanberg

Luftföroreningar av olika slag påverkar hälsan hos människor och djur, och leder även till att material skadas genom korrosion. Ett flertal andra stora problemkomplex, orsakade av luftföroreningar, tränger sig på oss med allt större eftertryck:

- Försurningen av mark och vatten, orsakad av svavel- och kväveoxider.
- Skogsskadorna, kopplade till en ökande halt av bl a troposfäriskt (marknära) ozon.
- Växthuseffekten, orsakad av bl a koldioxid från förbränning av fossila bränslen.
- Uttuning av det stratosfäriska ozonskiktet, kopplad till en ökande halt av halogenerade kolväten (däribland s k freoner).

Fjärranalysteknik är mycket värdefull både för regional och global övervakning och kartläggning (monitorering) av dessa och andra luftföroreningar. Tredimensionell kartläggning av lufthavet kan åstadkommas med hög upplösning i små områden, t ex kring särskilda industrier, och mer översiktligt i stor skala.

Den vanligaste metoden att mäta gasformiga luftföroreningar är att utnyttja det faktum att molekylerna dämpar den optiska strålningen vid deras skarpa och karakteristiska absorptionsvåglängder. Vid absorptionsmätningen kan man använda ljus som mätutrustningen producerar - t ex laserljus - eller naturlig strålning såsom direkt solstrålning eller strålning från det diffusa himmelsljuset. Man måste undvika de våglängdsområden där ymnigt förekommande atmosfärgaser (vattenånga, koldioxid m fl) helt blockerar genomlysningen. Absorptionsmätningarna förutsätter laboratorieundersökningar av de olika gasernas absorptionsband i fråga om våglängder och styrka.

Två olika mätprinciper för fjärranalys brukar användas för att kartlägga förekomst av luftföroreningar:

- Sträckvis absorptionsmätning
- Optisk radar (lidar = *light detection and ranging*).

Principen för sträckvis absorptionsmätning framgår av bild 1. Ljus sänds ut från en källa, får passera en given vägsträcka genom atmosfären och registreras sedan av en detektor. Föroreningsmolekylerna dämpar ljuset vid sina respektive absorptionsfrekvenser, men eftersom graden av dämpning beror på ämnets koncentration och färdad vägsträcka i kombination, kan endast medelkoncentrationen av föroreningar längs den givna vägsträckan bestämmas.

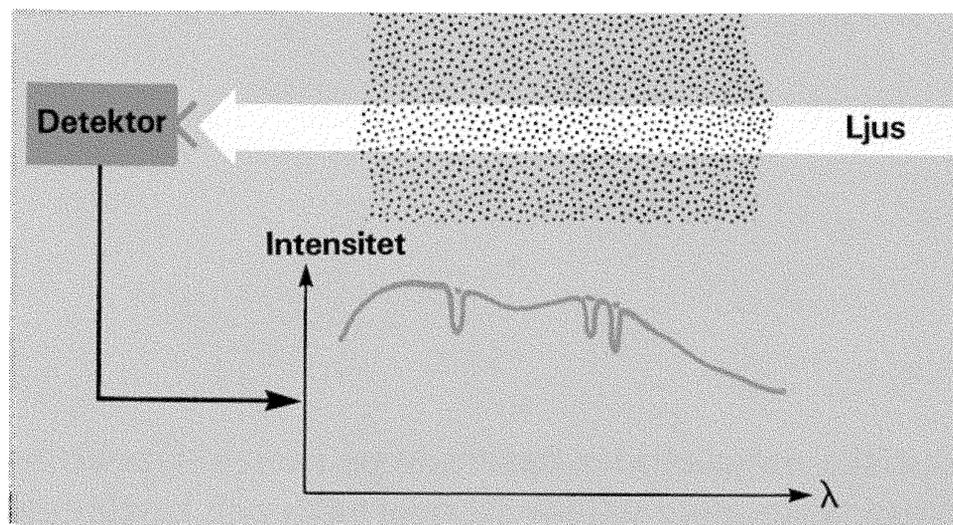


Bild 1. Principen för den fjärranalytiska metoden som kallas sträckvis absorptionsmätning. Ljus, t ex från en laser, sänds ut från en källa, får passera en given vägsträcka genom atmosfären och registreras av en detektor. Molekylerna i föroreningsgaserna i atmosfären absorberar detta ljus i särskilda våglängdsband, karakteristiska för ämnet i fråga, varigenom ämnet kan identifieras och kvantifieras.

Tecknare: Anne-Marie Bergstrand.

Vid noggranna mätningar av olika molekylers ljusabsorption i atmosfären är luftrörelserna den största begränsningen för tekniken. Turbulensen orsakar snabba variationer i luftens brytningsindex, varför det blir starka naturliga variationer i intensiteten (jämför stjärnornas tindrande!). Ett sätt att komma runt detta problem är att registrera alla aktuella våglängder samtidigt eller åtminstone under ett så kort tidsintervall (mindre än en hundra sekunders) att atmosfären effektivt kan anses vara "frusen".

Med metoden sträckvis absorptionsmätning kan en så stor känslighet uppnås (bl a i ett så kallat doas-system; *differentiell optisk absorptionspektrometri*), att inte bara "vanliga" luftföroreningar som svaveldioxid (SO_2), kväveoxid (NO), kvävedioxid (NO_2) och ozon (O_3) kan mätas, utan även sådana kortlivade radikaler som NO_3 , HNO_2 och OH . Dessa

radikaler är mycket reaktionsbenägna och spelar därför en viktig roll i den kemiska omvandling som ständigt äger rum i atmosfären.

Förutom producerad strålning kan alltså även en naturlig strålningskälla som solen användas för att mäta luftföroreningar. En sedan länge använd metod att registrera det livsviktiga stratosfäriska ozonskiktet är att mäta hur solljuset dämpas vid några våglängder i UV-området. Ett globalt nätverk av sk Dobson-instrument har byggts upp för att försöka registrera förändringar i ozonskiktet. I atmosfären absorberar ozonmolekylerna främst den intensiva och för människor, djur och växter skadliga UV-B-strålningen. Därigenom hindras denna strålning från att nå jordytan. Eftersom ozonets absorption ovanligtvis, men också lyckligtvis, är bredbandig, kan förhållandevis enkel spektroskopisk utrustning användas för att mäta mängden ozonmolekyler. Det var med denna typ av utrustning som forskare inom British Antarctic Survey först observerade det antarktiska "ozonhålet", det fenomen som nu bekräftats och belagts i ett flertal undersökningar.

Med hjälp av satellitmätningar kan man få en bild av hur ozon och andra gaser fördelas globalt i jordatmosfären. För sådana mätningar (sk "randabsorption") utnyttjas att solen, månen och fixstjärnorna regelbundet går upp och ned på himlavalvet. Strax innan t ex solen börjar "sjunka ner" i jordatmosfären, mäts ett referensspektrum. Allteftersom solen sjunker djupare ner passerar dess ljusstrålar en allt längre sträcka genom atmosfärlagren tills slutligen tangenten till jordytan (eller molnskiktet) nås. Om man anser att den gas man studerar är lokalt konstant fördelad i höjddled inom ett avkänt geografiskt område, inser man att den aktuella höjdfördelningen av gasen kan räknas fram ur den registrerade absorptionssignalens tidsberoende.

En speciell typ av fjärranalys kan göras genom att man utnyttjar optiska fibrer. Genom dessa överförs ljus från en central ljuskälla till ett område där koncentrationen av en luftföroreningssgas skall mätas. Man kanske t ex vill mäta hur mycket kolväten som läcker inom en petrokemisk industri. Ljuset får då passera en vägsträcka i fria luften, eventuellt genom en flerreflektionscell för att förlänga vägsträckan. Det överförda ljuset samlas sedan upp av en mottagarfiber och återförs till mätcentralen, där en dator används för att beräkna koncentrationen av den gas man mäter.

LIDAR MÄTER KVICKSILVER, OZON, OLJA OCH ALGER

Optisk radar, eller laserradar (lidar), är en metod som gör det möjligt att tredimensionellt kartlägga en luftvolym med avseende på fördelningen av vissa luftföroreningar i denna volym. Pulsat laserljus sänds ut i atmosfären och sprids både mot luftens vanliga molekyler av syre, kväve etc, och mot stoftpartiklar. En liten del av det spridda ljuset når ett mottagande teleskop som står placerat i anslutning till lasern. Absorberande luftföroreningssmolekyler dämpar det återspridda ljuset.

Vilka gaser i atmosfären kan då mätas med lidarteknik? Eftersom tekniken bygger på att man lägger sig på en våglängd där ett visst ämne i luften absorberar ljuset, måste lasern kunna generera avstämbart ljus inom just det området. Som nämnts absorberar t ex vattenånga och koldioxid helt strålningen i vissa IR-områden. Det synliga och det långvågiga UV-området är däremot relativt fritt från starkare absorptionsband och en viss laser - Nd:YAG-pumpad färgämneslaser - har därför fått stor användning i lidarsammanhang. Ett stort våglängdsområde kan täckas in och viktiga föroreningar med absorptionsband inom detta område kan därigenom mätas: kvävemoxid, kvävedioxid, svaveldioxid, ozon och kvicksilver.

Ett mobilt lidarsystem har med stöd av Naturvårdsverket och Statens delegation för rymdverksamhet byggts upp vid vår institution vid Lunds tekniska högskola (*bild 2*). Den rörliga utrustningen innehåller lasersändare, sändar- och mottagarteleoskop samt elektronik- och datorsystem.

Lidarsystemet används både för forskningsprojekt och för att genomföra konkreta uppdrag från myndigheter och industrier. Man kan exempelvis mäta hur en plym av utsläppt föroreningssgas, t ex svaveldioxid, sprids med ökande avstånd från själva utsläppskällan. Räckvidden för en svaveldioxidmätning är 3-4 kilometer vid normala siktförhållanden, varför ett stort område kan kontrolleras från en uppställningsplats.

Kvicksilver och dess föreningar tilldrar sig ett allt större intresse. Utsläpp görs i dag från exempelvis klor-alkaliindustrin, anläggningar för avfallsförbränning (hushållssopor), krematorier m m. En ökad användning av kol skulle ge ytterligare förhöjda utsläpp, speciellt som det är svårt att använda rökgasavskiljning vid sådan förbränning. Lidartek-

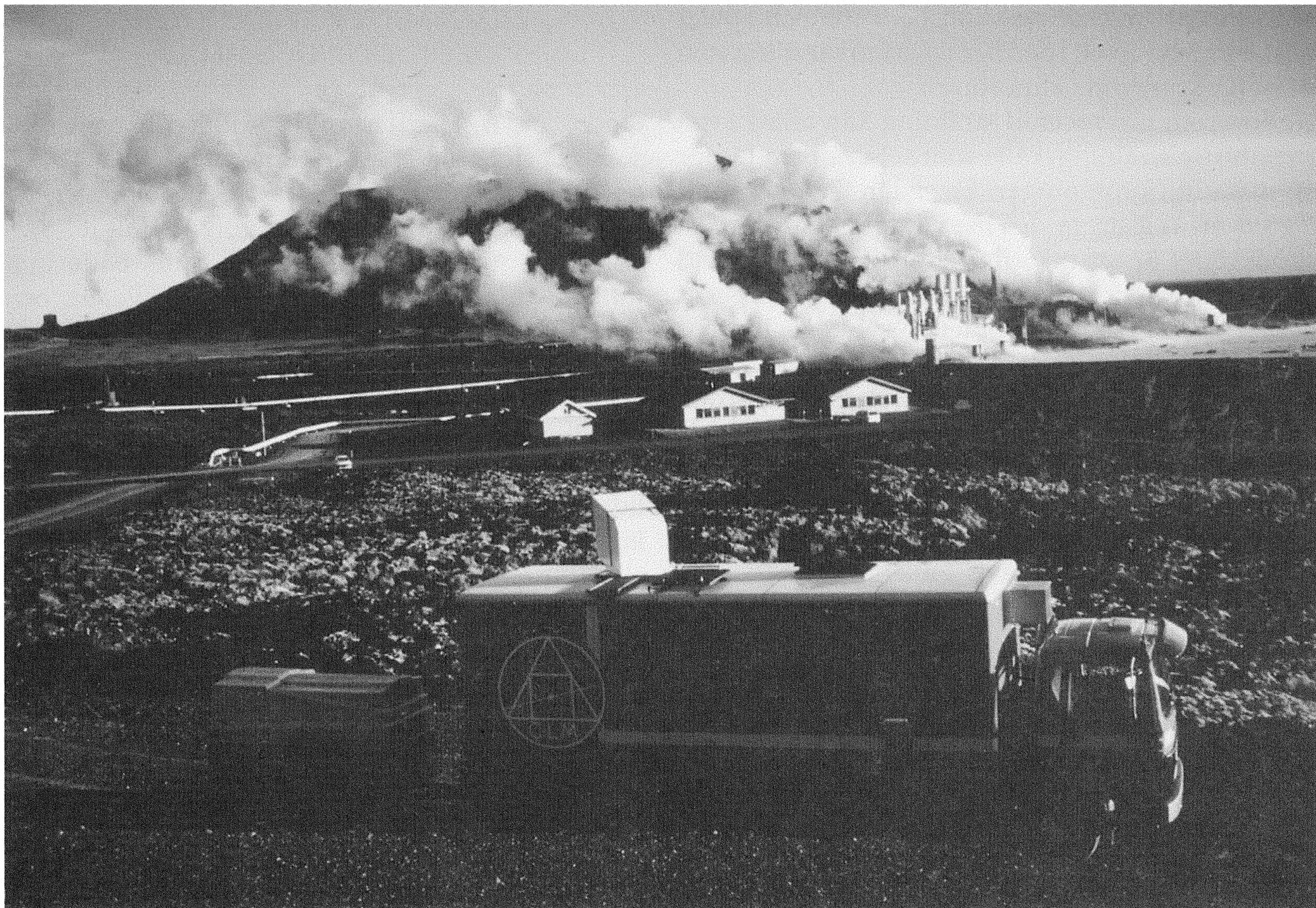


Bild 2. Med lidarmetoden - laserradar (optisk radar; light detection and ranging) - kan en luftvolym kartläggas tredimensionellt med avseende på fördelningen av vissa luftföroreningar. Tekniken bygger på att man sänder ut ljuset, t ex laser, på en våglängd där ett visst ämne absorberar det.

Bilden visar ett mobilt lidarsystem placerat vid ett geotermisk verk utanför Reykjavik på Island. Systemet har byggts upp vid Institutionen för fysik, Lunds Tekniska Högskola, med stöd av Naturvårdsverket och Statens delegation för rymdverksamhet. Det innehåller lasersändare, sändarteleoskop och mottagar-teleskop samt elektronik- och datorsystem. Laserstrålen sänds

ut i atmosfären via en vridbar planspegel, som också vinklar ner det bakåtspridda ljuset i ett vertikalt monterat teleskop. Datorn styr våglängdsskiftning, strålrättning och datalagring under mätningens gång, samt bearbetar och utvärderar mätdata för presentation av resultaten. Den enda kalibrering av mätsystemet som krävs är att bestämma våglängderna på laserljuset. Genom denna teknik undviks således alla felkällor som vid konventionell mätning är förknippad med provtagning och senare analys eller med kalibrering av testgaser.

Foto: Hans Edner.

niken är särskilt känslig för mätning av atomärt kvicksilver och kan mäta koncentrationer ner till den låga bakgrundshalten på några nanogram per kubikmeter luft. Ett exempel på lidarmätning av kvicksilver vid en klor-alkaliindustri ses i bild 3.

I ett pågående forskningsprojekt undersöks nu möjligheten att använda lidarteknik för att studera kvicksilvercykeln i naturen. Det är känt att atomärt kvicksilver oxideras i atmosfären till lösliga former, vilka sedan kan tvättas ut av nederbörd eller torrdeponeras på markytan. Oxidationsprocessen är inte helt känd, men troligen spelar ozon en viktig roll.

Uppehållstiden i atmosfären kan emellertid vara tillräckligt lång för att kvicksilver skall hinna förflyttas långa sträckor. Det förklarar varför man finner höga halter av kvicksilver i fisk även i sjöar som ligger långt från industriområden. I kvicksilvercykeln ingår även en återemission från sjö- och havsytor till atmosfären. Små mängder av atomärt kvicksilver avges också naturligt från berggrunden. Känsliga mätmetoder har potential för att kunna lokalisera vissa malmkroppar. Även geotermiska fält och områden med vulkanisk aktivitet märks genom att kvicksilverhalter ökar.

Både troposfäriskt ozon - det skadliga ozonet - och stratosfäriskt ozon - det livsviktiga ozonet - kan med fördel studeras med lidarteknik. Vertikala ozonprofiler upp till en höjd i atmosfären av 40 ki-

lometer har tagits upp genom att kraftfulla excimerlasrar i UV-området använts tillsammans med känslig fotonräkningsteknik. Både markbundna och flygburna lidarsystem har använts för att studera

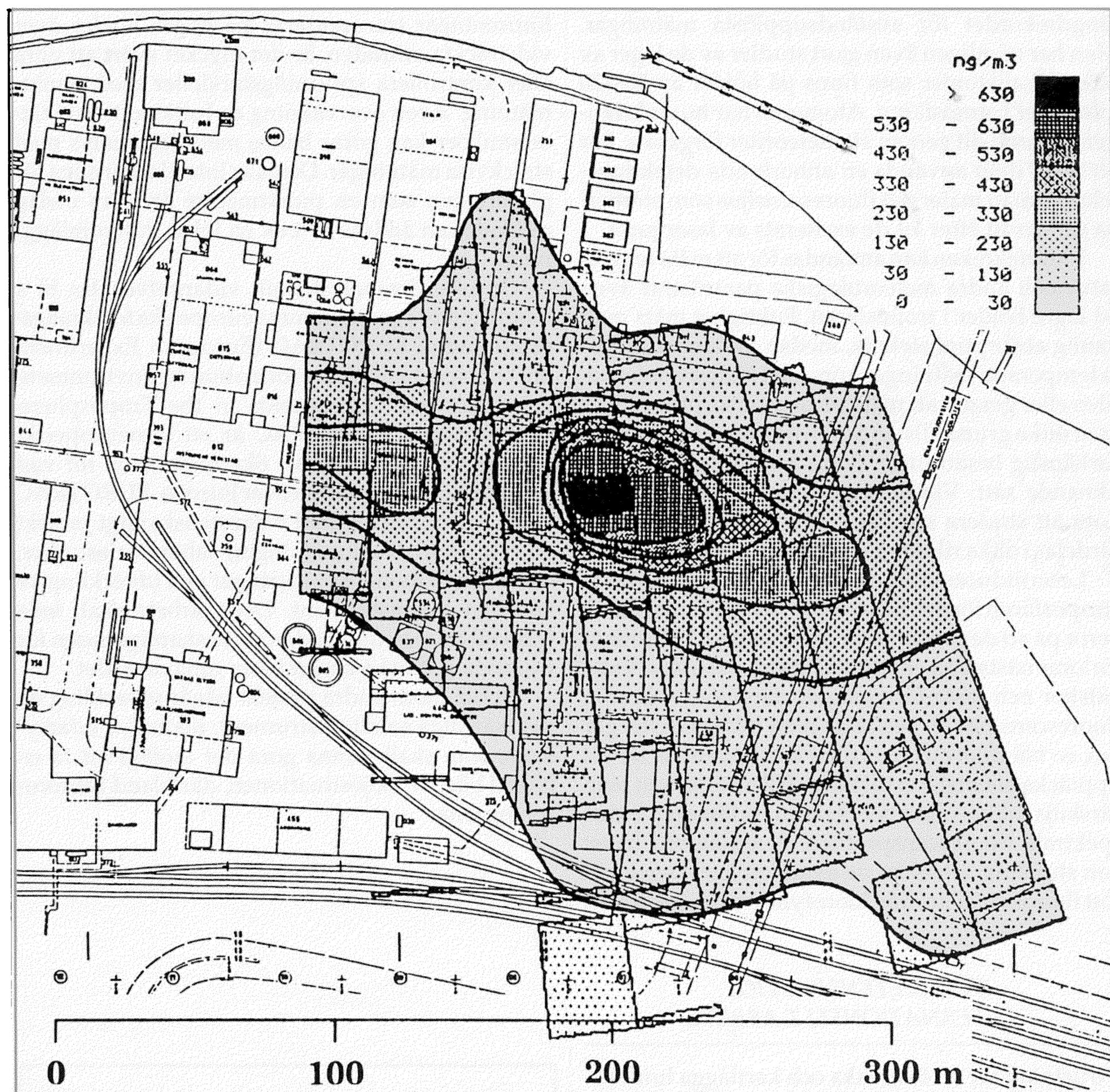


Bild 3. Lidartekniken - att med laserljus mäta luftföroreningar i tre dimensioner i lufthavet - är speciellt känslig för mätning av atomärt kvicksilver. Bilden visar hur halterna av sådant kvicksilver kartlagts med lidarteknik över en klor-alkaliindustri. Den horisontella kartläggningen av kvicksilverkoncentrationen på låg höjd har kopierats på ett kartblad över fabriksområdet för att

man lättare skall kunna identifiera de olika källorna.

Det mörkaste området visar en halt kvicksilver överstigande 630 nanogram per kubikmeter. Naturlig bakgrundshalt av kvicksilver är endast några få ng/m³.

Bilden är gjord vid Institutionen för Fysik, Lunds Tekniska Högskola.

kortsiktiga och långsiktiga förändringar i ozonhalten på olika höjder. Speciellt intresserar sig flera forskargrupper för trender i ozonkoncentrationen över de arktiska områdena. Ett fast mätsystem har redan tagits i bruk i Antarktis och ett liknande system planeras i Arktisområdet.

Dessa kraftfulla ozonlidarsystem har ändå inte längdrekordet för avståndsupplösta mätningar. Man har nämligen även gjort studier av de lager av olika alkaliatomer som finns på höjder av 80-120 kilometer i atmosfären. Atomerna har huvudsakligen kommit dit genom att meteoriter förgasats. För att mäta dem används en annorlunda detektionsteknik - man mäter det fluorescensljus som atomerna sänder ut efter att de exciterats av laserljuset.

Lidartekniken kan användas för att mäta temperatur och andra meteorologiska parametrar även på lägre höjder i troposfären. Fuktighet mäts med vanlig absorptionsteknik, medan avståndsupplösta temperaturmätningar görs med hjälp av linjeprofilen eller genom att mäta på flera absorptionslinjer med olika grundtillstånd (och tillhörande temperaturkänslig besättning). Tryck kan också mätas på liknande sätt. Vindhastighet kan bestämmas genom att studera sambandet mellan hur aerosoler fördelas i olika riktningar med viss tidsfördröjning.

Laserinducerad fluorescens är svår att använda i troposfären för att mäta gaskoncentrationer, vilket beror på att de exciterade atomerna p g a kollisioner förlorar nästan all energi vid atmosfärstryck. Vissa vätskor och fasta föremål ger däremot en kraftig fluorescens när de bestrålas med UV-ljus. Olja ger t ex en blå fluorescens, vilket kan användas för att upptäcka oljeutsläpp till havs. Till viss del kan man särskilja olika oljetyper genom skillnader i den spektrala fluorescensprofilen. Även alger i havet kan studeras, eftersom de avger ett karakteristiskt rött fluorescensljus från klorofyllet när de bestrålas.

TVÄRVETENSKAPLIGT, INTERNATIONELLT ARBETE

Utrustning för att övervaka och kartlägga luftföroreningar med fjärranalys baserad på spektroskopi kan förväntas få allt större användning i framtiden. Mätningar av luftföroreningar har hittills vanligen gjorts med punktmätande instrument, ofta med våtkemiska metoder. För att studera spridning och transport av föroreningar krävs då att en mängd

punktmätare placeras ut över ett stort område. En sådan metod har flera begränsningar, däribland att det tar lång tid att samla in tillräckliga data, att rumsupplösningen är dålig, att systemkostnaden är hög och framför allt att höjdupplösning saknas, d v s att man inte kan mäta föroreningshalterna på olika och höga höjder. Eftersom de flesta viktigare föroreningar transporteras på högre höjder över vidsträckta områden, är det mycket svårt att göra eller kontrollera spridningsmodeller med punktmätning. Även övervakning av luftkvaliteten i tätortsmiljöer kan göras bättre med fjärranalys med sträckvisa mätningar. Dessa är inte lika känsliga för placeringen som en punktmätare är, vars utslag radikalt kan ändras av t ex en lokal trafikomläggning.

Optisk fjärranalysteknik vidareutvecklas bl a inom det stora gemensamma europeiska forskningsprogrammet EUROTRAC (European Experiment on Transport and Transformation of Environmentally Relevant Constituents in the Troposphere over Europe). EUROTRAC är ett sameuropeiskt projekt som syftar till att öka förståelsen för vad som händer i troposfären över Europa. EUROTRAC är ett i allra högsta grad tvärvetenskapligt projekt som innefattar fältmätningar, laboriestudier, omfattande modellsimuleringar och utveckling av känsliga mätinstrument. Detta arbete skall leda fram till att man utökar den vetenskapliga basen för framtida politiska beslut inom miljöområdet.

Också inom andra projekt pågår utveckling av nya känsliga satellitinstrument, inklusive lidarsystem, som skall kunna göra det möjligt att få en global bild av miljösituationen, däribland luftföroreningarna.

*Hans Edner är tekn dr och
Sune Swanberg är professor vid
Institutionen för fysik,
Lunds Tekniska Högskola*