

Vad kan vi göra åt den globala klimatförändringen?

Plan B och C på klimatområdet

Inledning

Plan A på klimatområdet innebär att det internationella samfundet, trots bakslaget vid klimatmötet i Köpenhamn 2009, når fram till en bindande överenskommelse om att reducera utsläppen av växthusgaser så att den globala temperaturökningen håller sig under eller nära två grader Celsius. Målet är att undvika en skenande och självförstärkande ökning av temperaturen.

Denna skrift handlar egentligen inte om Plan A. Den tar i stället sikte på vad som här kallas Plan B och C.

Plan B är vad som kan göras av enskilda länder, mindre grupper av länder och privata företag i konsortier om det internationella förhandlingsmaskineriet för Plan A misslyckas. Element ur Plan B kan mycket väl ingå i Plan A eller finnas vid sidan av den, men min poäng är att de också kan göra nytta som fristående aktiviteter.

Plan C handlar om vad som kan göras om alla försök att begränsa utsläppen misslyckas och vi står inför en katastrofal och accelererande utveckling som hotar mänsklighetens existens.

Plan A

När allt annat i denna skrift skrevs hade miljömötet i mexikanska Cancun i december 2010 inte ägt rum. Det magra resultatet i Köpenhamn hade förhandlats fram av USA och Kina med Indien, Sydafrika och Brasilien som bisittare och EU som åskådare – en förödmjukelse för världens största ekonomi, med de största ambitionerna på klimatområdet.

Cancun-mötets stora stridsfråga var om Kyotoprotokollet skulle få en fortsättning. Japan, Kanada och Ryssland sade tydligt nej med argumentet att protokollet bara innebar åtaganden för länder som stod för en fjärdedel av koldioxidutsläppen. U-länderna, som inte omfattas av några åtaganden under protokollet, insisterade på att det skulle förlängas. USA och Kina, som svarar för över 40 procent av de globala utsläppen, ville bara deklarera sina nationella mål och Kina motsatte sig internationell övervakning av hur målen uppfylls.

Efter Cancun har debattörer och tankesmedjor presenterat förslag om alternativa vägar, där ett litet antal länder med en stor del av de samlade utsläppen gör upp om hur begränsningar ska ske. Man vill alltså överge FN-spåret men fortfarande vara en del i Plan A.

Dock tvingas man konstatera att mötet i Cancun och dess efterspel inte minskat skälen att tänka igenom Plan B och Plan C.

Plan B

Samtliga projekt som presenteras i det följande är sådana som planeras eller är pågående. De kan få relevans på global nivå, men är inte resultatet av en global överenskommelse. Förhoppningsvis kan de uppmuntra nationella och kommersiella aktörer att tänka stort, att satsa på åtgärder som begränsar klimatförändringen.

En liknande ambition men med fokus på mer småskaliga projekt har FN:s miljöprogram UNEP haft med sina "30 ways in 30 days": exempel på klimatsmarta åtgärder som publicerades, en om dagen, under månaden före mötet i Cancun.

Solenergi från Sahara

Solinstrålningen är mycket hög i jordens öknar. Man brukar säga att sex timmars solljus där innehåller lika mycket energi som mänskligheten förbrukar under ett år. Utifrån detta är det självklart att ställa frågan om denna energi kan ersätta fossil energi och minska emissionerna av koldioxid. Ett problem är överföringen av all el som genereras, då öknarna vanligtvis finns rätt långt från befolkningscentra och energiintensiva industrier.

Inom ramen för Desertec har en grupp europeiska storindustrier – som ABB, Siemens, Eon, Munich Re och, Deutsche Bank – och andra intressenter skissat på ett solenergiprojekt som kan tillgodose 15 procent av Europas behov av el. Investeringskostnaden uppskattas till 400 miljarder euro och elpriset beräknas bli mellan 6,5 och 16 cent per kilowattimme.

Konceptet bygger på soltermiska kraftverk med stora fokuserande speglar som fungerar som jättelika brännglas. Spegelarna koncentrerar solljuset och värmer saltbaserade energilagringstankar där temperaturen kan bli 400 grader. Från tankarna kan värme sedan tas också nattetid eller vid dåligt väder för att driva ångturbinerna som genererar elströmmen.

Genom ett storskaligt nätverk av överföringskablar för högspänd likström binds länderna i ökenområdet i Nordafrika och på Arabiska halvön samman med de soltermiska kraftverken utplacerade längs vägen. Detta nät länkas sedan till det europeiska nätet på minst sex punkter.

Systemet ska alltså leverera elektricitet såväl till producentländerna som till Europa. Tack vare den ursprungligen svenska tekniken med överföring av högspänd likström kan strömförlusterna i de upp till 200 mil långa ledningarna hållas på måttliga 10–15

procent. Projektets gigantiska proportioner framgår av den yta som solfångarna tar i anspråk: 2 500 km². Det motsvarar nästan Blekinge, men är bara 0,02 procent av landarealen i de berörda länderna i Mellanöstern och Nordafrika.

Givetvis finns svårigheter att övervinna först. Tekniskt är kylning den kanske största frågan. Vanligtvis används vatten som kylmedium i ångkraftverk. Vatten är inte lättillgängligt i öknar, utom i form av havsvatten vid kustnära installationer. En långt mer effektiv luftkylningsteknik än dagens kan behövas. Om havsvatten i anpassade kyltorn används, skulle man på köpet få stora mängder avsaltat vatten (och en massa korrosiv koncentrerad saltlösning eller indunstat havssalt). Problemet hur man skyddar speglarna och andra installationer vid sandstormar anses vara löst.

Projektet fordrar samarbete mellan länder som ofta haft stora samarbetsproblem på andra områden. En del av dem är dessutom stora oljeexportörer och kan se solenergielektricitet som en oönskad konkurrent. Ekonomiskt är det en jättesatsning. Fyrahundra miljarder euro är mer än Sveriges BNP, och lönsamheten är inte garanterad.

Garanterat pris på grön el i u-länder

Inför miljökonferensen i Köpenhamn 2009 presenterade FN:s chefsförhandlare och representanter för nationella miljöorganisationer (i Sverige Naturskyddsföreningen) ett förslag om hur klimatinsatser i u-länderna kan utformas. Det väckte ingen större uppmärksamhet. Då förslaget emellertid går att genomföra i mindre skala, utan bindande global överenskommelse, i samarbete mellan ett fattigt land och ett miljösinnt givarland, kan det platsa som en komponent i Plan B.

Grundtanken är att ett givarland, eller en annan givarinstitution, garanterar ett ganska högt pris för lång tid framåt på grön el som produceras i det utvalda landet. Detta möjliggör för offentliga och privata operatörer att investera i grön el med såväl avsättningsgaranti som prisgaranti. Operatörerna kan då räkna hem en vinst, som vore högst osäker om de hade behövt konkurrera med fossil el på marknaden.

När elektriciteten så småningom börjar levereras, säljer garanten (givaren) den vidare till subventionerat pris till ett nationellt nät eller till prioriterade konsumenter i det fattiga landet: människor i byar, i slumområden i storstäder eller småindustrier som ger arbetstillfällen.

Om förslaget tillämpas i stor omfattning leder det till teknikutveckling för produktion av grön el i u-landsmiljö, sjunkande komponentpriser och på sikt lägre investeringskostnader, vilket innebär att de framtida prissubventionerna inte behöver bli lika stora. Kostnaderna för givarna sprids över flera decennier. Investeringarna leder också till affärsschanser och jobb eftersom utrustningen till stor del produceras i givarländerna. Att pengarna betalas ut först när elströmmen levereras bör minska möjligheten för korrupta politiker och administratörer att ta för sig.

Förslaget kan realiseras även i liten skala, till exempel om en vänort i ett i-land ger en begränsad garanti till en vänort i ett fattigt land. Även företag, ideella organisationer och enskilda skulle kunna ställa upp som garanter.

Förslagsställarna tänkte sig en jättelik FN-fond, men man kan också samla in medel från allmänheten eller företag. Myndigheter i enskilda länder kan dessutom ge skattelättnader för sådana donationer.

Elledning i havet längs USA:s östkust

En av stötestenarna för havsbaserad vindkraft är kostnaden för långa anslutningsledningar till nationella nät. Lokalisering ute till havs har annars betydande fördelar framför landbaserad vindkraft: det blåser mer, större enheter kan byggas, estetiska och andra invändningar från kringboende försvårar inte tillståndsgivning för anläggningar långt ute till havs eller vid kuster med lågt rekreativt värde.

Nyligen tillkännagavs att Google och Good Energies, en New York-baserad investmentfirma specialiserad på förnybar energi, beslutat ta vardera 37,5 procent av ägandet i – och kostnaden för – en stamledning för elöverföring längs amerikanska östkusten. Totalt beräknas projektet kosta fem miljarder dollar. För detta får man en drygt 600 kilometer lång basledning under vatten, från norra New Jersey till Norfolk, Virginia, med kapaciteten 6 gigawatt.

Ledningen ska ligga tre till fyra mil från kusten, och kunna ta upp el "på vägen". Därmed kan vindkraftverk ute i havet anslutas, och förläggas där de knappt är synliga från kusten och där vinden är stark.

Systemet Atlantic Wind Connection förbilligar avsevärt anslutningen av havsbaserade vindkraftverk till nationella elnät och väntas leda till en mycket snabb utbyggnad av vindkraften. Elledningssystemet får fyra anslutningspunkter till nationella och regionala elnät, i södra Virginia, Delaware samt södra och norra New Jersey. Kabelnedläggning samt konstruktion av transformatorstationer och anslutningspunkter beräknas starta 2013 och de första delarna ska kunna tas i bruk 2016.

I dag är det stor prisskillnad på el mellan olika delar av USA:s östkust på grund av otillräcklig överföringskapacitet. Delstatspolitiker i bland annat Virginia har motsatt sig byggandet av nya högkapacitetsstamledningar, då utjämnade elpriser anses vara till nackdel för invånarna i områden där elen nu är billigast. Med en ledning på federalt vatten undviker man att delstatspolitiker blockerar byggnadsbeslut. Atlantic Wind Connection får alltså redan från början en god basal lönsamhet – även utan vind – genom att transportera kolgenererad el från låg- till högprisområden.

Liknande förutsättningar för havsbaserad vindkraft och för att via kabel överföra el till högprisområden finns i Nordsjön, Medelhavet och i havet mellan Kina, Japan och Korea.

Skogsplantering i Kina

Kina har haft betydande skogsplanteringsprogram sedan 1970-talet och har de överlägset största arealerna planterad skog i världen. På 1990-talet påbörjades plantering av skyddsskogar, främst för att begränsa sandstormar som hotade såväl jordbruksområden som människors hälsa även i jättestäder som Beijing. För

närvarande pågår intensiv storskalig skogsplantering i sex områden. Vid sidan av skyddsfunktionen är tillgång till skogsråvara ett viktigt motiv för satsningen.

I genomsnitt har enligt den kinesiska vetenskapsakademien 4 miljoner hektar planterats årligen, med högre tempo det senaste decenniet, och totalt har Kina 620 000 km² planterad skog. Kritiker har påpekat att totalarealen skulle varit klart högre om all plantering varit framgångsrik. Särskilt har frösådd från flyg, som inräknas i de planterade arealerna, varit ineffektiv.

Även så är det sammanlagda resultatet utan motstycke. Genom att man dessutom starkt begränsat avverkningen av naturskog bygger landet stadigt upp sina skogsresurser. Å andra sidan importeras hundra miljoner kubikmeter skogsprodukter, vilket starkt bidrar till skogsskövlingen på andra håll i Asien.

Kinas skogsplanteringsprojekt innebär att nästan åtta miljarder ton kol byggts in i biomassa enligt beräkningar av landets vetenskapsakademi. Det motsvarar ungefär de globala utsläppen av koldioxid under ett år.

Försäkringar för att underlätta anpassning (MCII)

Klimatförändringar leder med stor sannolikhet till att frekvensen extrema vädersituationer ökar. Torka, översvämningar, orkaner – kanske också frost på oväntade platser och tider – blir vanligare. Ju fattigare individer och samhällen är, desto svårare har de att hantera extrema väderhändelser och desto större risk att de alternativ som står till buds på sikt förvärrar situationen. I värsta fall kan återkommande katastrofalt väder utlösa massutvandring.

I de internationella klimatförhandlingarna har försäkringslösningar för att hantera den ökade risken för fattiga i utsatta områden varit ett vanligt tema. I Köpenhamn 2009 tillkom The Copenhagen Accord – en serie icke-bindande avsiktsförklaringar – där det talas om försäkringslösningar. För snabba åtgärder ställs hela 30 miljarder dollar i utsikt till 2012 och 100 miljarder till 2020.

I april 2005 lanserades *Munich Climate Insurance Initiative* eller MCII.

Målsättningen är ett system där utsatta individer och grupper försäkras mot allvarliga klimatavhängiga skador, samtidigt som de får incitament att själva reducera risker och skador. Detta kan tyckas trivalt och självklart, men goda försäkringar medför ofta att försäkringstagaren tar större risker därför att han eller hon känner sig ekonomiskt trygg i skydd av sin försäkring. När risken är kollektiv kan ett sådant risktagande få katastrofala resultat.

På ett sätt innebär även försäkringar av MCII-typ en uppmuntran till ökat risktagande. En bonde i en torr region kan ha två grödor att välja mellan. Den ena ger mycket högre skördar under goda år men inga alls under dåliga. Den andra ger låga skördar under goda år och mycket låga dåliga år, men alltid något. Genomsnittligt är den första bättre, men bonden kan inte ta risken av utebliven skörd – då svälter familjen ihjäl. Alltså planterar han den säkra grödan som ger dåliga skördar. En försäkring kan få honom att i stället plantera den bättre grödan, eftersom familjens överlevnad är säkrad även vid missväxt.

Visst kan försäkringar mycket väl leda till att bonden ökar risken för missväxt på såväl de egna åkerlapparna som på grannarnas genom att till exempel installera en bevattningspump som sänker grundvattennivån. MCII har därför inriktats på försäkringslösningar som uppmuntrar riskreducerande åtgärder, samtidigt som de ger skydd mot katastrofer. Det går att koppla utbetalningen av försäkringspengar till objektiva mått utanför försäkringstagarens kontroll – till exempel nederbördsmängder, temperaturer, massförekomst av gräshoppor och andra skadeinsekter. Bonden kan då få ut fulla försäkringspengar trots att han med tur eller skicklighet undvikit total missväxt. Det kan också hända att han inte får några pengar trots att han lidit betydande skada.

Betalningsförmåga är en annan central fråga. Fattiga bönder har kanske inga pengar till försäkringspremien. MCII utgår från att biståndsgivare står för en stor del av kostnaden i början. Dock vill man inte skänka bort försäkringarna och kräver därför att bonden i exemplet arbetar några dagar vid ett dammbygge, en bevattningskanal eller annat som reducerar risken eller ökar anpassningsförmågan för en större grupp. Försäkringen blir hans ersättning för arbetet.

I grunden ska länderna själva identifiera sina behov och prioriteringar. För många u-länder är det en svår avvägning mellan satsningar på utveckling och riskreducerande åtgärder, och inte sällan får de senare stryka på foten.

Ett antal projekt där försäkringar kombineras med riskreducering är faktiskt igång. Horn of Afrika Risk Transfer for Adaptation (HARITA) ska skydda bönder som odlar teff – ett lokalt sädesslag – från effekterna av svår torka samt ge bättre skördar. Försäkringen skyddar mot låg nederbörd och bönderna kan betala premien med eget arbete. Projektet vill lära bönderna att kompostera och använda komposten för att bättra på jordarnas fuktbehållande förmåga; att bygga små daggsamlade strukturer på jordlotterna; att plantera träd och gräs som fixerar kväve; och att rengöra utsädet så att grobarheten ökar.

HARITA drivs i samarbete mellan bland andra Oxfam America, Swiss Re, Relief Society of Tigray (REST), etiopiska myndighetsorganisationer, International Research Institute for Climate and Society (IRI), Rockefeller Foundation och Dedit Credit & Saving Institution.

Sådana projekt kan drivas också utan en bindande global klimatöverenskommelse – som delar av Plan B – men de skulle fungera ännu bättre inom ramen för Plan A.

Plan C

Plan C består av tänkbara geotekniska projekt – endera inriktade på att minska halten av koldioxid och andra växthusgaser i atmosfären eller att minska solinstrålningen till jorden och ljusreflexionen från jorden.

Atmosfärens halt av koldioxid kan minskas till exempel genom skogsplantering eller gödsling av världshaven som ökar växternas upptag. En viktig fråga är hur länge kolet kan förbli bundet i de nya depåerna.

Bindning av koldioxid kan också ske på oorganisk väg, till exempel genom att kalk eller kiselhaltiga mineraler exponeras för luft (som innehåller koldioxid) och där koldioxiden fångas upp i små "bubbelkammare" när luften passerar en absorberande lösning. Sedan måste den infångade koldioxiden deponeras på något beständigt sätt.

Ökad inbindning av koldioxid från atmosfären

Biologiska alternativ: terrestra

Storskalig skogsplantering och kolbindande skogsskötsel

Skogar och skogsmarker är centrala för den globala kolomsättningen. I levande och död växtbiomassa samt i markbundet kol finns över 2 000 gigaton kol – nästan tre gånger så mycket som i atmosfären. Tropiska och subtropiska skogar innehåller mellan fem- och sexhundra gigaton kol och de boreala (det nordliga barrskogsbältet) nästan lika mycket. I tropikerna finns kolet mest i själva träden, i nordliga skogsområden ligger det inbäddat i marken.

De boreala och tempererade skogsområdena tar upp cirka 4,5 gigaton kol per år. En betydande del av detta binds i de boreala skogarna i torv: i tjocka lager i mossar och myrar men också som undervegetation bland träden. På minuskontot står att avverkning av tropiska skogar frigör 1,5 gigaton kol. Nettoeffekten blir att 3 gigaton binds årligen. Världens skogar tar därmed hand om nära 30 procent av människans utsläpp av koldioxid.

Skogar i tempererade områden har en mycket hög upptagspotential, och gamla skogar förmår lagra stora mängder kol per ytenhet. För närvarande innehåller de dock mindre kol än de tropiska, subtropiska och boreala skogarna. Den ryska taigan och Kanadas barrskog är ännu föremål för ganska lite skogsskötsel. Det finns en betydande risk att de förvandlas från en fälla (som binder atmosfärisk koldioxid) till en källa, om utdikningar ökar markkolets nedbrytningshastighet eller om skogs- och torvbränder får ännu större omfattning än nu.

Världens skogar och deras skötsel är med andra ord nyckelelement, vid sidan av förbränning av fossila kolväten, för atmosfärens halt av koldioxid.

En given fråga är om skogsavverkningen i tropikerna kan stoppas eller åtminstone minskas. Det handlar inte om teknik utan om ekonomi, politik och samhällelig styrning. Vid klimatmötet i Köpenhamn togs faktiskt steg mot en reell samsyn om hur de tropiska och subtropiska skogarna ska skyddas.

Vad är realistiskt att förvänta sig? Kanske kan avverkningstakten mätt som frigjort kol minska till 1 gigaton per år 2010–2020, vidare till 0,5 gigaton 2020–2030 och därefter ligga runt 0. Ännu längre fram kan man tänka sig en nettouppbindning av kol genom plantering av bland annat oljepalmer. Sådana åtgärder har givetvis ingen effekt på biologisk mångfald och andra miljöskyddsmål, men kan temporärt binda in kanske 0,5 gigaton koldioxid per år från 2040 och några decennier framåt.

Skogarna i tempererade områden innehåller de minsta mängderna organiskt bundet kol av världens tre stora skogsregioner, och är minst till ytan av de tre, men har den största potentialen för ökat upptag. En medveten satsning på skogsplanteringar kan kanske bygga in 1 gigaton kol om året under femtio år framåt. Det ger råvara till skogsindustrin och dessutom minskad erosion och mindre extrema lokala temperaturer.

De boreala skogarna bjuder på speciella problem. Vill man öka skogsproduktionen är en av de viktigaste åtgärderna att dika, så som skett med till exempel flertalet svenska "sumpskogar". Trädmassans tillväxt kan därmed ökas väsentligt. Det beror på att näringsämnen frigörs snabbare från luftad mark än från vattendränkt genom att den mikrobiella nedbrytningen av organiskt material går fortare. Både närsalter och koldioxid frigörs snabbare – och eftersom en stor del av kolet i boreala skogar ligger nere i och på marken handlar det om stora mängder koldioxid.

Kommer då trädens snabbare tillväxt att binda mer kol än vad som frigörs vid snabbare nedbrytning? Vad blir effekten av ett varmare klimat på de boreala skogarnas kolbalans? Det vet vi ännu inte.

En annan fråga är om de boreala skogarnas klimatpåverkan främst rör metan och kväveoxider. Dessa produceras mestadels i syrefattig miljö, och mer när det är varmare. Minskar avgången av metan och kväveoxider från skogsmark så mycket efter dikning att det kompenserar för den ökade avgången av (den svagare) växthusgasen koldioxid?

Det finns så många frågor om nettoeffekten av skötsel i de boreala skogarna att det ter sig alltför osäkert att räkna med någon viss potential för ökad inbindning av kol. Till detta kommer problemet med skogsbränder. En del forskare menar att vid en given temperatur och sommarnederbörd bestäms frekvensen skogsbränder av den totala mängden organiskt material i skogen. Ju mer, desto mer omfattande bränder. I så fall skulle skogarnas kolinnehåll inte kunna öka över en viss nivå med mindre än att man samtidigt satsar på effektiva åtgärder mot brandrisken.

Om de skisserade åtgärderna ovan ger resultat, skulle skogarnas upptag av koldioxid från atmosfären kunna öka från dagens 3 gigaton per år till det dubbla 2040, och ligga kvar där några decennier. Detta kan för en tid reducera problemet med ökande atmosfärshalter, men är ingen långsiktig lösning.

För att åstadkomma något mer varaktigt måste kolet som skogarna tar upp och binder in i biomassa lagras på sådant sätt att det inte bryts ner. Torvmossar och öknar är några tänkbara lagringsplatser eftersom nedbrytningshastigheten där är mycket låg. I torvmossar, där vedbiomassan måste grävas ner, finns dock risk att grävningarna påskyndar nedbrytning av torven. Det skulle motverka åtgärdens syfte. Ett annat förslag är att biomassan omvandlas till träkol och lagras i finfördelad form i marken – det kan ha positiva sidoeffekter genom att påverka markstrukturen och omsättningen av näringsämnen och tungmetaller.

Men det är nog billigare att bränna biomassan och låta den ersätta fossila bränslen. Om man dessutom samlar in och lagrar koldioxiden som frigjorts vid förbränning, får man en koldioxidneutral energi som samtidigt bidrar till att sänka atmosfärens

koldioxidinnehåll. De råder dock stor osäkerhet om åtgärdernas storlekspotential och kostnader.

Gödsling av torvmossar

Torv är ofullständigt nedbrutna växtrester, ofta från mossa och gräs, som ligger i en våt, sur och syrefattig miljö. Torv utgör en av världens stora deponier av kol med sina uppskattningsvis minst 400 miljarder ton. Två tredjedelar finns i skogsområdena i främst Ryssland och Kanada och resten i tropikerna – främst Indonesien. I norr täcker torvmarkerna 4 miljoner km², varav i Sverige runt hundratusen km².

Den gängse bilden är att de nordliga torvmarkernas tillväxt startade på allvar efter den senaste istiden för 8 000–16 000 år sedan, och att tillväxten var betydligt snabbare i början än i dag. I många så kallade högmossar ligger mossens tillväxtskikt på en liten kulle av underliggande dött material. Där har skiktet ringa tillgång till annat genomströmmande vatten än regnvatten och lider därmed stor brist på närsalter och mineraler. Hur ser torvens tillväxt ut under olika perioder? Hur stor har nedbrytningen varit, och hur mycket har blivit till metan respektive koldioxid? Det är obesvarade frågor till stor del.

Vi vet att dränering ökar nedbrytningen av torv avsevärt och ökar risken för bränder som frigör koldioxid. Uppdämning ökar å andra sidan tillväxten av den viktigaste torvbildande mosstypen, *Sphagnum*, och minskar nedbrytningen. Högre temperatur ökar både torvens tillväxt och nedbrytning, med oklar nettoeffekt.

Kvävegödsling är alltid positivt för tillväxten, men har obetydlig effekt på nedbrytningen enligt de flesta studier. Det kan därför finnas en potential för ökad inbindning av kol i torv genom att öka vattennivån och tillföra kväve. I högmossar ökar tillväxten också markant om det övre skiktet avlägsnas. Den erhållna torven kan användas som förbättringsmedel som ökar humushalten i magra jordar. Där bryts den visserligen ner på sikt, men har positiv effekt på markernas avkastningsförmåga. Alternativt kan torven eldas och ersätta fossila bränslen.

Genmanipulerade saltvattentåliga växter

Tillgång på sötvatten är en av de viktigaste faktorerna som begränsar växtligheten i främst varma öknar och halvöknar. Ansträngningar har gjorts, inte minst i Israel, för att med konventionell växtförädling öka jordbruksgrödors tolerans för brackvatten. Resultaten är positiva men inte sensationella. Växter som kan utnyttja relativt salt vatten finns det dock ganska gott om, exempelvis strandråg och mangrove.

Högst sannolikt skulle modern genteknik kunna överföra gener för saltvattentolerans till andra arter, och få fram gräs och träd med ännu större tolerans och bättre tillväxt vid bevattning med havsvatten än vad dagens mangrovearter har.

I en spekulativ framtid kan genmanipulerade saltvattentåliga växter bilda ett fjärde globalt skogsområde i varma öknar och halvöknar, och kanske binda in ett par hundra gigaton kol i biomassa. Det tar några hundra år att genomföra, men upptaget blir så stort att den pågående ökningen i atmosfären kan hejdas.

Biologiska alternativ: marina

Järngödsling av världshaven

En av de mest diskuterade metoderna för att reducera atmosfärens halt av koldioxid är gödsling av oceanerna med järn. John Martin, dåvarande chef för Moss Landing Marine Laboratory, använde vid ett seminarium 1988 följande dramatiska ord:

– Ge mig en supertanker med järnklorid och jag ska ge er en ny istid.

Utgångspunkten för hans resonemang är att i delar av världshavens ytvatten förefaller just järn vara det spårämne som främst begränsar produktionen av växtplankton. Detta gäller framför allt runt ekvatorn i Stilla havet samt i Södra oceanen runt Antarktis.

Relationerna mellan olika grundämnen som finns i växtplankton brukar anges som 106 C: 6 N: 1 P: 0,001 Fe. Om fosfor (P) är den begränsande faktorn för planktonproduktion, och en fosforatom tillsätts, binds hundra kolatomer (C) upp. Om det är järn som är begränsande och en atom järn (Fe) tillsätts, blir det hundratusen atomer kol som binds. Eftersom kols atomvikt är ungefär 12 och järns nästan 56, skulle ett ton järn i löslig form kunna binda in drygt tjugo tusen ton kol i växtplankton.

Uttryckt på annat sätt kan människans utsläpp av koldioxid – 8,5 gigaton årligen räknat som kol – balanseras genom att oceanerna gödslas med 400 000 ton järn per år. Eftersom det årligen bryts 2,3 gigaton järn i världen, framstår detta som hanterligt.

Vari ligger knuten? Vi får backa lite och titta på oceanernas och atmosfärens roll i kolets kretslopp. Oceanerna innehåller stora mängder kol – runt 35 000 gigaton – som lätt kan vandra upp i atmosfären. Det kan jämföras med atmosfärens 750 gigaton.

Det allra mesta kolet i oceanerna finns dock i djupvattnet och kommer bara i kontakt med atmosfären när det cirkulerat upp och nått ytan. Det är en process som tar tusentals år.

Ytvattnet befinner sig i ett slags koldioxidjämvikt med atmosfären. Alger tar upp koldioxid ur vattnet, som i sin tur tar upp koldioxid från atmosfären. En del av algerna äts av djurplankton som i sin tur blir fiskföda. Delar av det organiska materialet blir koldioxid på nytt och blir kvar som sådant i ytvattnet, medan andra delar sjunker ner – som alger, fekalier eller döda djur. Förr eller senare bryts också nästan allt detta ner, men den bildade koldioxiden hamnar i djupvattnet och blir kvar där under lång tid.

Att kol i organisk form förs ner från ytvattnet, och "pacificeras" i djupare vattenlager, kallas ibland den biologiska pumpen. Årligen sänker pumpen 10 gigaton kol. Det är alltså pumpens kapacitet som nästan kan fördubblas med järngödsling.

Ett problem har att göra med hur långt ner det organiska material som lämnar ytvattnet sjunker innan koldioxid frigörs. Nästan inget når botten av oceanerna. En ringa del når flera tusen meters djup. En relativt stor del stannar upp i *språngskiktet*, gränsområdet mellan varmare, mindre salt ytvatten och kallare, mer salt djupvatten. Hur lång tid tar det innan detta vatten når ytan och koldioxiden "aktiveras"? Troligtvis

mycket kortare tid än tusentals år. Hur mycket av den extraproducerade algmassan skulle hamna i språngskiktet?

Nästa problem har att göra med begränsande faktorer. Traditionellt har kväve ansetts som den viktigaste begränsningen för produktionen av alger och andra växter i havet. På senare tid har detta alltmer ifrågasatts, men mer därom senare.

Om man nu tillsätter järn och ökar produktionen i havsområden där järn är begränsande, når man till slut en gräns där något annat ämne blir den produktionsbegränsande bristvaran. Låt oss anta att detta är just kväve! Mer kväve tas alltså upp där järn tillsätts, och kväveinnehållet i oceanernas ytvatten minskar.

Vad händer på sikt utan järngödsling? Vattnet blandas om och förr eller senare kommer detta kväve till ett område där just kväve är begränsande för planktonproduktionen. Om nu kvävet tagits upp sedan haven gödslats med järn där järnet var begränsande, kommer mindre kväve att finnas tillgängligt "nedströms" senare. Produktionen minskar då nedströms. Nettovinsten av gödsling blir därmed mindre än den först verkade bli. Hur mycket mindre? Det är en obesvarad fråga.

Forskarnas försök med järngödsling i Stilla havet, Södra oceanen och Indiska oceanen har visat att järntillsatser kan stimulera algproduktionen kraftigt. Ofta har resultatet blivit algblomningar. Men ibland har populationerna av djurplankton kunnat växa till nästan lika snabbt som algerna, varvid blomningarna uteblivit. Nettoresultatet är högre biomassa per volymenhet vatten.

Även när tydliga blomningar (massutveckling av planktonalger) ägt rum, har transporten neråt av organiskt material inte varit så stor som forskarna trott. Betande djurplankton har hunnit äta upp mer av den nybildade biomassan än beräknat. Resultaten kan bero på att forskarna doserat för lite järn över för små områden.

Men sammantaget pekar experimenten på att potentialen för järngödsling i klimatsyfte i oceanerna är mycket mindre än enligt teorin.

Borrkärnor i isen i Antarktis visar att det funnits höga halter av luftburet järn (från vulkanutbrott) regelbundet de senaste femhundratusen åren som sammanfallit med perioder av låga koldioxidhalter i atmosfären. Koldioxidhalten har varierat med cirka 100 ppm (miljondelar), vilket ungefär motsvarar människans bidrag till atmosfärens halt hittills. Samvariationen kan dock vara resultatet av en tredje faktor. Vidare skulle en så omfattande kolbindning i planktonproducerat organiskt material förutsätta att världshaven nästan tömdes på närsalter som fosfor, kväve och kisel.

Studier av ett område mellan Sydafrika och Australien nära ön Kerguelen, där uppvällande djupvatten med höga halter av järn och andra näringsämnen ger nästan oavbruten algblomning, visar genomgående låga koldioxidvärden i ytvattnet och en omfattande nedåtriktad transport av organiskt bundet kol.

Men studier efter ett vulkanutbrott 2008 på ön Kasatochi i Aleuterna utanför Alaska visar nästan motsatt resultat. Ett 250 miljoner kubikmeter stort moln av järnhaltig aska sprutade ut och blåste iväg över havet. Det blev en intensiv algblomning, som

dock enligt forskare vid Victoria University, Kanada, "bara" innebar att 10 miljoner ton kol avlägsnades ur atmosfären.

Kanske kan skillnaderna mellan dessa resultat förklaras av modellstudier som pekar på att det är Södra oceanen som har de allra bästa förutsättningarna på jorden att ta upp och föra undan stora mängder koldioxid efter järngödsling.

Vilka sidoeffekter kan uppstå om man genomför omfattande järngödsling av Södra oceanen och tropiska Stilla havet?

Till att börja med blir det inte nödvändigtvis samma alger som stimuleras till massutveckling genom järngödsling som de annars dominerande algerna. Detta kan ge följd effekter: andra arter av djurplankton som betar av algerna och andra fiskar och andra predatorer i senare led som massutvecklas. Det kan vara både positivt och negativt från människans synpunkt, men kalkylerna är osäkra.

Mer organiskt material som förs ner i djupare vattenlager och bryts ner medför större syreåtgång där. Resultatet kan bli stora områden med syrebrist som skadar fiskar och andra organismer.

Nedbrytning av organiskt material i syrefattig miljö kan också betyda att det bildas kväveoxider och metan som är starkare växthusgaser än koldioxid. Om och när dessa gaser slipper ut i atmosfären, motverkas effekten av koldioxidupptaget.

Å andra sidan vet forskarna att det i samband med nedbrytning av organiskt material i havet bildas ganska stora mängder dimetylsulfid, som är en svavelförening. Dimetylsulfid bidrar till molnbildning som i sin tur reflekterar ut inkommande solljus och bidrar till att kyla jorden.

Gödsling av kustområden med kväve och fosfor

Gödsling av kustområden med fosfor och kväve sker redan i stor omfattning. Huvudsakligen är det floder som för ut näringsämnen i havet. En del är naturligt, det skulle inträffa även människan förutan. En stor del av världens oljeförekomster är resultatet av riklig växtplanktonproduktion i grunda havsområden som skapat tjocka organiska sediment, som sedan genom geologiska omlagringar isolerats och petrifierats. En annan, större del av dagens närsaltsutflöde är människans verk: avrinning från gödslad jordbruksmark och utsläpp av avloppsvatten.

I mer eller mindre inneslutna kustområden och innanhav, som Östersjön, Chesapeake Bay (sydöstra USA) och Japanska inlandshavet, ger utsläppen upphov till återkommande stora algblomningar. Forskare har länge diskuterat om det är kväve eller fosfor som utgör den främsta begränsande faktorn. Limnologerna har fokuserat på fosfor. Marinbiologerna håller på kväve, eftersom halterna av de vattenlösliga kväveföreningarna oftast varit mindre än sex gånger så höga som fosfalthalterna. Relationerna mellan kväve och fosfor i växtplankton är annars 6:1.

Mycket tyder dock på att limnologerna haft mest rätt. Om fosforhalten är hög, gynnas blågröna alger och vissa fotosyntetiska bakterier som förmår fixera luftkväve och således kan skapa sin egen kvävegödsling. Vid nedbrytning hamnar de frigjorda

kväveföreningarna nitrat, nitrit och ammonium på nytt i vattnet och blir tillgängliga för andra alggrupper.

I de nämnda kusthaven blommar alger som regel vid två eller tre tillfällen. På våren blommar kiselalger, sedan blommar grönalger ofta på försommaren, och slutligen blågröna (kvävefixerande) alger på sensommaren. De senare upplevs som de värsta av badare och båtmänniskor.

Men vad betyder dessa kustnära algbloomningar för upptaget av koldioxid och för atmosfärens halt av koldioxid? Östersjön kan här tas som exempel. Med ytan 415 000 km² och en årlig fixering av cirka 150 gram kol per kvadratcentimeter binds ungefär 60 miljoner ton kol årligen in i planktonbiomassa.

En stor del av biomassan bryts snabbt ner och återgår till atmosfären som koldioxid. En annan del sjunker under språngskiktet och ner i det saltare, kallare bottenvattnet, där nedbrytningen går långsammare. En ständigt pågående minskning av syrehalten i bottenvattnet visar dock att nedbrytningsprocessen fortgår även där. Närvaron av sulfat (SO₄²⁻) som kan reduceras till sulfid (S²⁻) gör att nedbrytningen av organiskt material kan fortgå även när syrehalten i vattnet är mycket låg.

Hur mycket kol som varaktigt inlagras i sedimenten, är en omdebatterad fråga. Tillförseln av organiskt bunden fosfor till sedimenten beräknas uppgå till runt 80 000 ton per år. Det skulle innebära att 8 miljoner ton kol tillförs sedimenten (eftersom kvoten kol/fosfor är 100:1), vilket motsvarar 13 procent av primärproduktionen. Men nedbrytningen fortsätter även i sedimenten, och såväl koldioxid som metan bildas som nedbrytningsprodukter.

Kan man öka primärproduktionen i kustnära havsområden och därmed reducera atmosfärens koldioxidhalt? I princip ja – men det finns praktiska invändningar. Den första är att stora ansträngningar i dag görs, inte minst av länderna runt Östersjön, att minska närsaltsutsläppen och därmed eutrofieringen som beror på algbloomningar, syrebrist och annat. Att plötsligt byta policy vore varken enkelt eller okontroversiellt.

Närsaltsutsläppen minskar även därför att sötvatten på många håll anses så värdefullt att man inte vill låta det rinna ut i havet. När sötvatten i ökande utsträckning används för bevattning blir det mindre flöden till haven.

Nilen och Medelhavet kan tjäna som exempel. Sedan dammen vid Assuan byggdes på 1960-talet och Egyptens konstbevattnade åkerareal ökat dramatiskt, är Nilen en rännil när den når fram till Medelhavet. En konsekvens är att inträngande saltvatten i deltaområdet minskat odlingsmarken där. En annan är att ansjovisfisket i västra Medelhavet kollapsat därför att tillförseln av närsalter från Nilen nästan upphört.

Ett viktigt argument mot gödsling med fosfat och nitrat är den nyckelroll som fosfor har. Just fosfor är en verklig bristvara på sikt och det finns inget substitut. Om fosforgödsling används för att binda upp den koldioxid som människan tillför atmosfären (8,5 gigaton kol) behövs 85 miljoner ton. Det motsvarar världens samlade fosforproduktion. Om sedan nettoeffekten är 10 procent eller mindre, blir detta helt ogörligt. Dessutom får det katastrofala följder för livsmedelsproduktionen i världen.

Kan man öka effekten genom att gödsla i havsområden där en större andel av kolet som binds av algerna hålls borta från atmosfären för längre tid?

Det kan man göra i djupare hav där det tar tusentals år för djupvattnet att komma upp till ytan. Man skulle också kunna gödsla ytvattnet i ett permanent skiktat innanhav som Svarta havet. Även här skulle kolet som binds in vid planktonproduktion undandras atmosfären för lång tid. Men sådana havsområden är ovanliga.

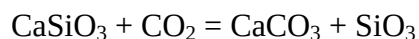
Sammantaget synes närsaltsgödning av kustvatten och innanhav som ett sämre alternativ än järngödsling av världshaven.

Oorganiska alternativ

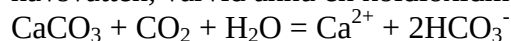
Påskynda vittringen av kalk och kisel

Kiselhaltiga mineral bygger upp merparten av berggrunden på vår planet, och när mineralerna naturligt vittrar reagerar de med koldioxid och bildar karbonater.

Processen involverar kalcium och/eller magnesium och kan skrivas:



Som framgår av formeln byggs en molekyl koldioxid in för varje molekyl kisel. Den bildade kalciumkarbonaten är ett fast och stabilt mineral, men kan lösas upp i havsvatten, varvid ännu en koldioxidmolekyl binds in som vätekarbonatjon:



Sådana vittringsprocesser stabiliserar atmosfärens och havsvattnets halt av koldioxid och kan med tiden återställa förindustriella värden om människans koldioxidutsläpp upphör. Men det går mycket långsamt: i runda tal är det en enda procent av den årligen frigjorda koldioxidmängden via mänsklig påverkan som binds upp genom vittring.

Hur kan denna naturliga vittring påskyndas? Många förslag utgår från kalksten i stället för kiselhaltiga mineral, då kalksten är lättare att krossa och lösa upp i vatten. Dock finns det globalt inte lika mycket kalksten.

Tanken är att mala ner kalksten som sedan dumpas i havet. Väl där skulle ytterligare koldioxid bindas när kalken lösts upp, i enlighet med formeln ovan. Processen påverkar dock atmosfären främst på lång sikt, då inbindningen av koldioxid främst sker i oceanernas djupvatten och eftersom upptaget ökar först när detta djupvatten åter kommit upp till ytan.

En snabbare process vore att kalka havet ungefär på samma sätt som man kalkar försurade vattendrag. Kalksten (CaCO_3) upphettas så att koldioxiden drivs ut och det bildas "bränd" eller "släckt" kalk, som vid cementtillverkning. Den frigjorda koldioxiden måste fångas upp och lagras. Kalken, som har hög upptagsförmåga för koldioxid, dumpas sedan i havet där den också kan motverka havsförurning.

En kombinerad variant av havskalkning och snabbvittring vore att elektrolysera havssalt för att bilda starkt alkalisk natriumhydroxid och starkt sur saltsyra. Alkalin dumpas i havet och då ökar havsvattnets förmåga att ta upp koldioxid. Saltsyran används för att snabbvittra kiselhaltiga mineral, varvid syran själv neutraliseras.

Ett sätt att ta upp koldioxid direkt ur atmosfären är att bryta och mala ner ett vanligt förekommande kiselhaltigt mineral som olivin och sprida ut det i stor skala på jordbruksmark.

Mycket stora mängder mineral måste brytas, processas och transporteras, om ett sådant förslag realiserar. Olivin på jordbruksmark skulle kräva sju kubikkilometer kiselmineral som sprids årligen. Det är ungefär dubbelt så stor volym som världens kolgruvor i dag producerar.

En fördel med snabbvittring är att slutprodukterna som innehåller den bundna koldioxiden är både naturliga och stabila. Dessutom kan det något höjda pH-värdet i jordar och havsvatten vara en god sak. Nackdelarna är de stora mängder som måste hanteras, energin som går åt, kostnaderna, och de lokala miljöeffekterna av dessa aktiviteter.

Tekniska alternativ

Bubbelkammare för atmosfärstvätt

Kolsyrade läskedrycker är resultatet av en väl etablerad teknik där koldioxid tas ur atmosfären för användning i industriella processer. Men dagens metoder för adsorption av koldioxid kan inte enkelt skalas upp en miljon gånger. Adsorption innebär att ett ämne fastnar på ytan av ett fast material eller en vätska. Metoderna ger hög renhet i koldioxiden, men också ett högt pris. I klimatsyfte är renhet inte ett viktigt kriterium och högt pris är avskräckande.

Det finns tänkbara tekniska storskaliga lösningar som kan avlägsna denna växthusgas ur atmosfären, men det är oklart om de kan bli kostnadsmässigt rimliga. Fördelen är att "atmosfärstvättarna" kan placeras var som helst, till exempel nära en annars svårutnyttjad energikälla som sol i Sahara eller geotermisk energi på vulkanisk mark. Det ger en betydande potential för kostnadsbesparingar.

Den tekniskt enklaste och sannolikt mest robusta tekniken innebär att koldioxiden absorberas i en starkt alkalisk lösning. Vid riktigt hög alkalikoncentration (högt pH-värde) kan kapaciteten bli så hög att den går att applicera i en sorts bubbelkammare. Den absorberade koldioxiden måste sedan frigöras på nytt, i koncentrerad form, och den absorberande alkaliska lösningen regenereras. Här finns sannolikt processens flaskhals.

En variant är en mycket mer utspädd alkalisk lösning. För att då få en acceptabel absorptionshastighet kan man tillföra en katalysator. Levande celler har ett enzym, kolanhydras, som underlättar cellandningen. Enzymet driver processen $\text{NaHCO}_3 = \text{Na}^+ + \text{OH}^- + \text{CO}_2$ som får reaktionshastigheten att öka cirka hundra gånger.

Det finns emellertid svårigheter. Enzymet är biologiskt nedbrytbart, så processen måste ske i steril miljö; det är beroende av zink; och det fungerar bara i ett relativt snävt temperatur- och pH-intervall.

För att komma runt begränsningarna finns förslag om syntetiska enzym som är mindre känsliga och som fungerar i ett bredare intervall.

Ett alternativ är adsorption på fasta material. Koldioxid som frigörs från adsorbenter eller absorbenter måste lagras i en långlivad geologisk struktur eller i världshavens bottenvatten.

Sannolikt kan tekniken för absorption eller adsorption av koldioxid ur atmosfären fås att fungera. Men hur mycket kostar det att ta hand om de 4 gigaton koldioxid vi människor frigör och som jordens biologiska system inte tar upp? Och förbrukar metoderna mer eller mindre än 25 procent av dagens energiproduktion?

Förstärk det vertikala vattenutbytet i oceanerna

Det finns två processer som reglerar det vertikala vattenutbytet i världshaven. Den ena är den ovan diskuterade biologiska pumpen som ser till att sedimenterande organiskt material förs ned till djupare vattenlager. Transporten ökar när närsalter tillförs det solbelysta ytvattnet. Den andra processen är när ytvatten, som tagit upp koldioxid från atmosfären, sjunker ner. Det sker främst i polarområden med kallt ytvatten, som öster om Grönland. Den senare processen anses sänka väl så mycket koldioxid som den biologiska pumpen.

Sjunkande ytvatten öster om Grönland anses vara en viktig motor i hela det oceana cirkulationssystemet och processen driver även stora havsströmmar som Golfströmmen. De sjunkande vattenmassorna motsvaras av uppvällande djupvatten någon annanstans, till exempel utanför Peru i Stilla havet. Uppvällande djupvatten är rikt på mineraler och närsalter som gödslar ytvattnet. Det leder bland annat till hög fiskproduktion i sådana områden.

Sjunkande ytvatten har således två positiva effekter: det tar med sig koldioxid ner i djupet och det för upp uppvällande djupvatten (någon annanstans) som gödslar ytvattnet, ökar algproduktionen och inbindningen av koldioxid. En mindre del av koldioxiden sjunker ner som organiskt material i djupet.

Det finns en oro för att varmare klimat ska medföra att det blir mindre mängder kallt polarvatten som sjunker ner i djupet, vilket skulle försvaga havsströmmarna och minska nedföringen av koldioxid. Tanken har därför uppkommit att med tekniska åtgärder öka den vertikala cirkulationen i haven – både nedåt och uppåt.

Djupvattnets volym i världshaven uppgår till en miljard kubikkilometer. Med en beräknad ålder av tusen år innebär detta att det vertikala vattenutbytet uppgår till en miljon kubikkilometer per år. Det blir trettio miljoner kubikmeter i sekunden, eller trettio sverdrup som enheten kallas, som sjunker ner respektive väller upp.

Vad krävs för att öka denna volym med en sverdrup, och hur ökar därmed nedföringen av koldioxid i djupvattnet? Beräkningarna är högst osäkra, men pekar entydigt på att energiåtgången för att åstadkomma denna gigantiska vattenström, som motsvarar åtta Amazonfloder, frigör mer koldioxid än vad som undandras atmosfären.

Dock finns en hake i denna kalkyl. Bottenvatten är kallt, ytvatten varmt, relativt sett. Gradienten (temperaturskillnaden) innehåller energi som potentiellt kan utnyttjas. På 1980-talet fanns stora förhoppningar om OTEC (Ocean Thermal Energy Conversion) som en viktig framtida energikälla – och basen för en omfattande akvakultur via gödsling med närsalter. Dessutom kan OTEC ge sötvatten. Förhoppningarna har inte infriats, men det kanske finns en ny chans nu när koldioxideffekten är högaktuell.

Med tjugo graders temperaturskillnad mellan ytvattnet och bottenvattnet och med en treprocentig verkningsgrad kan man, med ett flöde av 2 kubikmeter kallt bottenvatten och 4 kubikmeter varmt ytvatten per sekund producera 1 megawatt elektricitet netto. På köpet får man dagligen 2 000 kubikmeter avsaltat vatten, som dricksvatten eller för bevattning.

Teoretiskt går det alltså att ur en sverdrup uppumpat djupvatten få 500 gigawatt el netto. Det motsvarar ungefär hälften av USA:s nuvarande elproduktionskapacitet, dessutom en sötvattensflod av Mississippis storlek med ett flöde av 12 000 kubikmeter i sekunden.

Plan C: Minskad ljusinstrålning till jorden och ökad utstrålning

Det inkommande solljuset mot jorden motsvarar 342 watt per kvadratmeter, och 107 watt reflekteras tillbaka ut i rymden. Det ger jorden som planet ett albedo på 0,31. Albedo är just ett mått på reflexionsförmåga, eller den andel av inkommande strålning som kastas tillbaka av en belyst yta. Om albedot ökar till 0,32, eller 111 watt per kvadratmeter, neutraliseras uppvärmningseffekten av en fördubblad koldioxidhalt i atmosfären.

Atmosfären reflekterar ut ljus motsvarande 77 watt per kvadratmeter. Själva jordytan nås av 198 watt per kvadratmeter, varav 30 reflekteras ut. En ökning av jordytans albedo från 0,15 till 0,17 i medeltal får ungefär samma nedkylande effekt som om instrålningen till planeten minskar med 2 procent.

Åtgärderna nedan syftar till att balansera växthusgasernas uppvärmande effekt med en motriktad ungefär lika stor nedkylande. Precis som de regionala effekterna av uppvärmning kan bli mycket olika, kan motsvarande hända med nedkylande åtgärder. Även om jordens medeltemperatur med sådan ljusbalansering hålls konstant i en atmosfär med fördubblad koldioxidhalt, kan klimatet ändras på i princip varje enskild plats. För jorden som helhet tar de regionala förändringarna dock ut varandra.

Minskad ljusinstrålning

Rymdbaserat solskydd

Solinstrålningen måste alltså minska med cirka 2 procent. För att klara uppgiften med hjälp av rymdbaserade objekt finns två huvudalternativ: det ena är att placera objekten

i omloppsbana på en höjd av 200 till 450 mil, det andra är nära den så kallade L1-punkten 150 000 mil i riktning mot solen. Vid L1-punkten balanserar solens och jordens dragningskrafter varandra, och därmed kan solvindens kraft neutraliseras.

I det första alternativet, en jordnära omloppsbana, måste en avvägning göras mellan de solskyddande objektens vikt och livslängd. Om de är tunga ökar kostnaden dramatiskt för att få dem på plats. Om de är lätta blåser solvinden ganska snabbt dem ur position och sveper på sikt ut objekten i rymden.

Ett äldre förslag handlade om 55 000 satellitburna rymdspeglar i icke-styrda omloppsbana, var och en med hundra kvadratmeter stor spegelyta av aluminiumfolie. Ett annat "jordnära" förslag är att skapa en Saturnus-liknande ring av småpartiklar runt vår planet med lättviktiga satelliter som länkas ihop på elektrodynamisk väg. Två miljarder ton material behövs antagligen för att nå eftersträvad skuggeffekt och ljusspridningseffekt. Som biprodukt får man en upplyst natthimmel. Alla nära-jorden-lösningar kommer att störa alla andra satelliter och sannolikt bädda för rymdkrockar.

Det finns fördelar med att placera solskydd nära L1-punkten. Man kan använda lätt material, då solvindens kraft balanseras mot jordens och solens dragningskrafter. Dessutom behöver ljuset bara avlänkas lite grand för att missa jorden. En nackdel är att solskyddens yta måste vara tre miljoner kvadratkilometer enligt beräkningar. Det beror på att solens diameter är så mycket större än jordens.

Det finns en uppsjö av förslag på L1-baserade solskydd, och tankar om att utnyttja material från månen och jordnära asteroider för att minska kostnaderna och energiåtgången för uppskjutningen. Samtliga förslag innebär utomordentliga ingenjörstekniska utmaningar, eller vad sägs om följande:

- En svärm av extremt tunna specialgjorda reflekterande skivor med diametern 60 centimeter som tillverkas på jorden och skjuts upp, en miljon i taget, med en minuts mellanrum. Efter trettio år finns de nödvändiga tio tusen miljarder skivorna på plats.
- Några tusen miljarder glänsande diskusliknande objekt tillverkade av robotar på en asteroid, med material från platsen.
- Ett supertunt nät av aluminiumtrådar där varje tråd är en miljondels millimeter tjock.
- En spegel tillverkad på månen av hundra miljoner ton månglas.

Ökad ljusutstrålning

Ökad reflexion från atmosfären

Sulfatpartiklar

Vid oceangödsling bildas dimetylsulfid i stora mängder när organiskt material bryts ner i havsvattnet. Ämnet avgår till atmosfären, och oxideras där tillsammans med andra gasformiga svavelföreningar som svavelväte och svaveldioxid till sulfatpartiklar. En stor del av detta svavel tvättas sedan ur atmosfären på färden upp

genom troposfären och resulterar i surt regn. En mindre del når emellertid stratosfären, där det tar lång tid innan det tvättas ur eller klumpar ihop sig till partiklar som är stora och tunga nog att åter sjunka mot lägre luftlager.

Den lägre stratosfären får på detta sätt att ett naturligt lager av sulfataerosoler som sprider ljuset och därmed återreflekterar en del ut i rymden. Mest effektiva är partiklar med upp till en mikrometer i diameter. Större partiklar har mindre yta i relation till sin vikt (sin svavelmängd). Mycket större partiklar sprider också den utgående långa värmestrålningen från jordytan och bidrar därmed i viss mån till att värma upp den lägre stratosfären. Svavel i atmosfären interagerar dessutom med ozon och bidrar till att minska ozonhalten.

Vulkanutbrott skapar storskalig naturlig svaveltillförsel till atmosfären. Några stora utbrott har lett till regional nedkylning, till exempel 1816 – som kallats året utan sommar– när vulkanen Tambora i nuvarande Indonesien hade fört upp stora mängder svavel och annat stoft. Även Krakataus utbrott 1883 (mellan Sumatra och Java) gav upphov till en betydande nedkylning och hade säkerligen globalt genomslag, även om inga sådana mätningar kunde göras. Efter Pinatubos utbrott 1991 på ön Luzon i Filippinerna mätte forskarna upp en global temperatursänkning om en halv grad Celsius.

Klimateffekterna av stora vulkanutbrott varar typiskt några år. De utslungade svavelpartiklarna är dock i genomsnitt betydligt större än partiklarna som konstituerar det normala sulfatskiktet i nedre stratosfären. I förhållande till sin mängd är partiklar från vulkanutbrott därför mindre effektiva för nedkylning och dessutom är effekten av kortare varaktighet.

Sulfatpartiklarna i atmosfären fyller två funktioner vad gäller instrålning. Den ena är att sprida solljus. En illustration av fenomenet var det som kallades arktiskt dis som var särskilt utbrett från början av 1960-talet till mitten av 1990-talet. Stora svaveldioxidutsläpp från industrier och kraftverk på norra halvklotet, och alldeles särskilt från kanadensiska Sudbury som en tid svarade för nästan tio procent av de globala svaveldioxidutsläppen, orsakade diset.

Den andra funktionen är som kondensationskärnor för vattendroppar och därmed som molnbildare. Molnen reflekterar tillbaka solljuset ut i rymden och höjer jordens albedo. Mörka moln med stora vattendroppar är mindre effektiva reflektorer än ljusa moln med små droppar. Moln med stora droppar har dessutom kortare uppehållstid i atmosfären; de regnar snart ner. Särskilt över oceaner är kondensationskärnor en bristvara. Detta gäller inte minst längs den amerikanska kontinentens och Afrikas västkuster.

Att kyla jorden genom att avsiktligt öka atmosfärens, och helst stratosfärens, halt av sulfatpartiklar är ett av de vanligaste geoingenjörskoncepten. För att motverka den fördubblade halten av koldioxid i atmosfären behövs 3 miljoner ton svavel per år, visar beräkningar. Hur kan man föra upp sådana mängder – helst i gasform så att sulfatpartiklarna som bildas åtminstone inledningsvis är små – till 20 kilometers höjd? Specialbyggda flygplan, raketer, ballonger och artilleri är några alternativ. Kostnaderna hamnar antagligen i intervallet 10–100 miljarder dollar om året, vilket i sammanhanget är ganska lågt.

Ett möjligt problem är att svavlet på sin väg upp genom atmosfären inte bildar den önskade mängden små partiklar. Det kanske blir betydligt färre stora partiklar i stället, vilket radikalt minskar deras ljusspridningseffekt. För att komma runt problemet finns utvägen att direktspida svavelsyra på 20–25 kilometers höjd, där det efterhand bildar just små partiklar. Det skulle fordra uppskattningsvis en miljon ton svavelsyra om året till den blygsamma kostnaden ett par miljarder dollar.

Saltkristaller

Enligt modellstudier går det att öka antalet kondensationskärnor med artificiella metoder, och därmed antalet vattendroppar, längs den amerikanska kontinentens och Afrikas västkuster. En fördubbling av antalet kärnor och därmed en halvering av dropparnas storlek beräknas öka molnens reflexivitet tillräckligt för att motverka temperatureffekterna av fördubblade koldioxidhalter i atmosfären.

Störst intresse har här ägnats saltkristaller från havsvatten. Sprejmaskiner på obemannade fartyg kan enligt ett sådant koncept skicka upp gigantiska moln av mikrodroppar av havsvatten i luften. Där avdunstar vattnet snabbt och en liten fraktion av saltkristallerna förs upp till molnbildningsnivå. Ett annat förslag är att sprida ut saltkristaller från flygplan.

Kostnaderna för att skicka upp saltkristaller kan ligga på blygsamma 2–20 miljarder dollar. En annan fördel är att verksamheten kan stängas av snabbt – effekten är borta inom någon vecka om någon allvarlig oförutsedd konsekvens skulle visa sig. Slutligen kan verksamheten lätt flyttas om effekten visar sig vara bättre (eller sidoeffekterna mindre) någon annanstans.

Sulfat och havssalt är naturligt förekommande ämnen i dessa miljöer. Projekten handlar alltså om att öka deras mängder för att kraftigt förstärka en redan existerande effekt. Det är dock möjligt att det finns andra och bättre ämnen i sammanhanget. Diskussionen går vidare.

Öka jordytans albedo

Jordytan tar emot inkommande solstrålning motsvarande knappt 200 watt per kvadratmeter. Av detta reflekteras 30 watt, vilket ger ett ytalbedo av 0,15. För att motverka effekten av dubblad koldioxidhalt i atmosfären bör ytterligare 4 watt per kvadratmeter reflekteras ut i rymden, och i så fall ökar albedot till 0,17.

Havsytan

Nära tre fjärdedelar av jordens yta består av hav som har ett lågt albedo: cirka 0,1. Det betyder att 90 procent av energin i det inkommande solljuset omvandlas till värme. Om albedot kan höjas till 0,13 är uppgiften löst.

De flesta bedömare håller det för ogörligt eller opraktiskt att påverka oceanernas albedo. Andra ryggar inför de svårbedömda följderna. Det finns emellertid ett antal allmänt hållna idéer:

- produktion av konstgjorda isberg eller "flytande skärgårdar" av vit skumplast
- utsläpp av ytaktiva ämnen som gör havsskum mer stabilt, så att betydande delar av haven på sikt blir täckta med skum
- utsläpp av ämnen som ger en skimrande yta, som särskilt vid snett infallande ljus (lågstående sol) reflekterar bort en större del av ljuset.

Landytor

Låt oss lämna havsytan därhän och i stället koncentrera oss på landytans albedo. Det behöver öka med 0,07 till 0,34 för att höja det globala medelvärdet (land och hav) till 0,17. Markytans albedo varierar från ungefär 0,7 för snö och is till oftast 0,2–0,4 för barmark och vegetationsklädda marker.

Ett sätt att påverka landytan handlar om heta öknar som tar emot stark solinstrålning. Om öknar täcks av reflekterande film gjord av polyetylen–aluminium, kan det påverka den globala ljusutstrålningen starkt – kanske med 2,75 watt per kvadratmeter. Mycket höga kostnader och stora negativa följd effekter lokalt och regionalt är emellertid avskräckande.

Det är även möjligt att förvandla heta öknar till saltöknar genom att pumpa ut stora mängder saltvatten, och låta vattnet avdunsta tills man får en gnistrande vit yta. Det är betydligt billigare, men får också stora regionala konsekvenser.

Den andra grundmetoden inriktar sig på vegetation och odlade ytor i synnerhet. Jordbruksmark upptar 39 procent av jordens landareal, gräsmark 25 procent och skogsmark 26 procent. Observera också att olika växter har olika albedo.

Om odlade grödor och gräs med högt albedo väljs på savanner och prärier, blir det en beräknad höjning på dessa ytor från 0,17 till 0,21. Det är knappt hälften av vad som behövs för jordens landyta.

Vitmenade ytor på byggnader

Bebyggelse täcker endast en liten del av jordens markyta – drygt två procent enligt den högsta beräkningen. En ganska stor del av bebyggelsen i vid mening, till exempel asfalterade vägar, är mörk. Storstädernas centrala delar är varmare än den omgivande landsbygden, delvis beroende på värmeförluster från uppvärmda (eller kyllda) byggnader, delvis därför att bebyggda ytor oftast är mörkare än omgivningen.

Ett förslag är att systematiskt "vitmåla" dessa strukturer och därmed öka albedot från kanske 0,15 i dag till omkring 0,75. Det sparar energi och kostnader för luftkonditionering, det minskar samtidigt uppvärmningseffekten av instrålade solljus.

Tekniskt är detta fullt görligt och de negativa följderna torde vara små. Men det är dyrt och ger liten direktpåverkan på den globala medeltemperaturen.

Georingenjörsteknik som mildrar konsekvenserna

Under rubriken georingenjörsteknik ryms en mängd åtgärder. Det är till exempel tänkbart att kanalisera vatten från områden som redan har riklig nederbörd, och väntas få mer som följd av klimatförändringar, till sådana som har lite och prognostiseras få ännu mindre.

Här ska dock bara ett förslag nämnas mer explicit: att förhindra islossning från glaciärer på Grönland och Antarktis som leder till snabba ökningar av havsytan.

Avsmältning av glaciärer på plats tar lång tid även i ett betydligt mildare polarklimat än dagens. Möjligheten finns dock att avsmältningen och havshöjningen går avsevärt snabbare om smältvatten under inlandsisarna eliminerar "fastklistringen" av isen vid underliggande berg och "oljar" underlaget. Det kan få stora inlandsglaciärer att glida ut i havet.

För att förhindra detta kan isarna "kedjas" eller "ankras" på plats. Men det mest kostnadseffektiva verkar vara att hålla ner flytande kväve till glaciärernas botten. Om detta görs på tre platser på Grönland och cirka tio på Antarktis är faran överstånden för höjd havsnivå "i vår livstid". Beräknad årskostnad: mindre än en miljard dollar.

Slutord

Den här skriften handlar inte om den framtid vi helst vill se och vad vi skulle vilja göra. Den rör metoder vi kan tvingas ta till om vi inte i tid lyckas komma överens om gemensamma åtgärder för att hejda klimatförändringen.

Alla metoder som behandlas i avsnittet Plan B är positiva och ger väsentliga bidrag till gemensamma mål, utan att vara internationellt framförhandlade. Kanske lyckas tillräckligt många och stora sådana initiativ hålla temperaturökningen inom hanterbara gränser – även om Plan A, den stora överenskommelsen, uteblir.

Plan C handlar om alternativ som vi i desperation kan tillgripa om varken Plan A eller B räcker till. De har alla oönskade sidoeffekter, också på klimat och miljö, som till stor del är okända och möjligen katastrofala. Självklart behövs grundligt med forskning och utredande innan man går vidare.

I denna skrift har sidoeffekterna bara flyktigt berörts: dels eftersom kunskapsunderlaget är nästan obefintligt, dels därför att mitt syfte är att ge en fingervisning om vilka alternativ som står till buds.

Vilka alternativ förefaller mest intressanta eller minst avskräckande? Jag skulle själv vilja titta närmare på åtgärder som ökar atmosfärens albedo, som ser till att mer av det inkommande solljuset reflekteras ut i rymden innan det träffar jordytan. I valet mellan

sulfatpartiklar och saltkristaller förefaller salt mindre osmakligt – kanske för att jag ägnat en tidigare del av mitt liv åt att forska om försurning och dess effekter.

Forskare får också gärna granska möjligheten att öka oceanernas vertikala vattenutbyte i kombination med storskalig utveckling av OTEC (Ocean Thermal Energy Conversion). Fördelen här är att vi både drar undan koldioxid från atmosfären och formar ett nytt koldioxidfritt sätt att generera el, och varför inte också biodiesel från algodlingar.

Slutligen vill jag uppmärksamma något som en stor del av miljörörelsen blundar för: genmanipulerade saltvattentåliga växter med stor potential för koldioxidupptag och mycket annat gott.

Professor Arne Jerne Löv