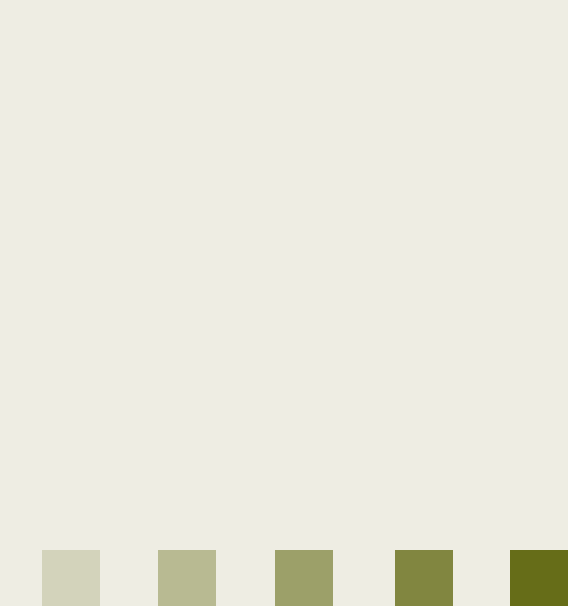




Varför den starka växthusgasen LUSTGAS bildas vid odling i jord- och skogsbruk

ER 2009:34



Böcker och rapporter utgivna av Statens
energimyndighet kan beställas via
www.energimyndigheten.se
Orderfax: 08-505 933 99
e-post: energimyndigheten@cm.se

© Statens energimyndighet

ER 2009:34

ISSN 1403-1892

Förord

EU:s hållbarhetskriterier för biobränslen kräver att bränslet ger en viss minsta klimatnytta jämfört med fossila bränslen, när alla emissioner från produktionen av biobränslet har räknats med. För närvarande (2009) gäller detta för gasformiga och flytande bränslen, men en utvidgning till även fasta bränslen är sannolikt aktuell. Bland annat betyder det att man måste känna till de flöden av växthusgaser som uppkommer vid själva produktionen av biobränslen.

Denna rapport förklarar de processer som leder till att den kraftfulla växthusgasen lustgas bildas. Många av processerna är biologiska. De sker naturligt, men ökar vanligen vid mänsklig påverkan så som kvävegödsling och andra odlingsåtgärder. Eftersom lustgas dels bildas naturligt, dels bildas i högre eller mindre grad vid all odling, oavsett vad den producerade biomassan ska användas till, kan man inte tillskriva enbart bioenergin den lustgas som härrör från jord- och skogsbruk. Men för en helhetsbedömning av olika biobränslen är det ändå nödvändigt att man räknar med den specifika ändring i lustgasproduktion som produktionen av biobränsle faktiskt orsakar.

Rapporten förklarar orsaker till att lustgas bildas och beskriver översiktligt olika metoder att mäta och beräkna lustgasemissioner från skogs- och jordbruk. Energimyndigheten anser att biobränslen kan och bör tillskrivas den lustgasproduktion som orsakas av

- Odlingsåtgärder (gödsling, markbearbetning, dikning med mera) som hör samman med produktion av energigrödor
- Konsekvenser av om ytterligare mark odlas upp som följd av ökad biobränsleproduktion
- Åtgärder som specifikt har att göra med uttag av skogsavverkningsrester och stubbar (exempelvis markpåverkan pga fler körningar, förändrad kvävestatus, eventuell näringskompensation)

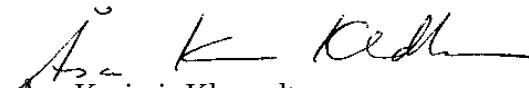
Däremot ska inte bioenergin belastas med lustgas som uppkommer rent allmänt i skogs- och jordbruk, när syftet med verksamheten inte är att producera biobränslen. Biprodukter från skogs- och jordbruk som avverkningsrester, bark och halm uppkommer ändå, oavsett om de används som bränsle eller inte. Endast förändringar i gasflöden som har att göra med tillvaratagande av dessa bioproduktbränslen ska tillskrivas bioenergin.

Det är rimligt att dra ifrån den bakgrundsemission av lustgas som ”skulle skett ändå”, från den mark där biobränslen odlas. Svårigheten är att bedöma vad som ska betraktas som bakgrundsemission. Är det motsvarande marktyp i totalt orört skick? Eller kanske tidigare brukad och gödslad mark som under en tid inte använts? Valet av referensfall är kritiskt och får stor betydelse för beräkningen av hur mycket lustgas som faktiskt beror av bioenergin.

Det finns gråzoner när bibränslen varken kan betraktas som biprodukt eller huvudprodukt, eller ens likvärdig samprodukt med verksamhetens andra produkter. Ett exempel är när skogsbränsle tas ut som inte bara är avverkningsrester, utan även klenare dimensioner av stamveden blir bränsle. Då kan det vara rimligt att fördela hela skogsbrukets påverkan på flöden av växthusgaser över de olika sortimenten. Hur sådan allokering ska göras är inte självklart. Några exempel diskuteras i rapporten.



Birgitta Palmberger
Avdelningschef
Energiteknikavdelningen
Energimyndigheten



Åsa Kasimir Klemedtsson
Projektledare
Institutionen för Geovetenskaper
Göteborgs universitet

Innehåll

1	Sammanfattning	7
2	Summary	9
3	Inledning	11
4	Klimatet och växthusgaserna	13
5	Fotosyntes kräver kväve	15
6	Klimatfrågan handlar om mer än koldioxid och energi	16
7	Varifrån kommer kvävet?	17
8	Kvävekaskaden	21
9	Biologiska processer som producerar lustgas	23
10	Att mäta lustgasavgång från mark	27
11	Hur N₂O-avgång kan beräknas	29
12	Markanvändning avgör lustgasavgången	31
12.1	Skog	31
12.2	Jordbruk	35
12.3	Gödsling.....	38
13	Diskussion	39
13.1	Lustgasavgång vid produktion av biobränslen	40
13.2	Inledande systemanalys	41
14	Referenser	45

1 Sammanfattning

Även så "naturliga" verksamheter som jord- och skogsbruk påverkar halten av växthusgaser i atmosfären. Här ges en orientering kring varför lustgas (N_2O) bildas i mark, och hur mycket som kan avgå vid olika odlingar. Oftast avgår små mängder men ibland riktigt mycket lustgas vilken produceras av svamp och bakterier i marken vid omvandling av kväveföreningar. Denitrifikation är den process som oftast producerar mest lustgas, men nitrifikation som kräver syre kan vara avgörande eftersom den processen producerar det nitrat som behövs i denitrifikationen. Det är vid syrebrist som lustgas bildas och syrebrist kan uppstå i jordklumpar med hög biologisk aktivitet vilken konsumerar syret, eller när syre inte kommer ner i marken för att marken är genomvåt eller när markens porer har tryckts ihop av exempelvis traktorhjul. Några tekniker för att mäta hur mycket lustgas som avges från marken till luften beskrivs. För att slippa arbetsamma fältmätningar vill man gärna enkelt kunna beräkna lustgasavgången. Några metoder har utvecklats, men det finns ingen enkel metod som samtidigt är tillförlitlig.

Ökningen av lustgas i atmosfären kan kopplas till att mer av luftens kvävgas (N_2) nu fixeras till reaktivt kväve som då kan användas för uppbyggnad av levande celler. Kväve kan fixeras biologiskt t ex i ärtväxter eller vid tillverkning av handelsgödsel. Reaktivt kväve är avgörande för att växternas fotosyntes ska fungera. I de flesta naturliga ekosystem råder brist på kväve varför fotosyntes och produktion av växtmaterial ofta ökar vid tillförsel av reaktivt kväve. En ökad produktion av bioenergiogrödor kommer att kräva mer kväve utöver befintlig matproduktion. Det mesta av markens kväve är uppbundet i dött och levande organiskt material och blir åtkomligt först när detta bryts ner och kvävet frigörs. Hur växtsamhället ser ut på platsen och konkurrensen mellan olika organismer om tillgängligt kväve kan avgöra storleken på lustgasavgång från mark. Därför är lustgasavgång från skogsmark ofta lägre än från åkermark. En ytterligare förklaring till lägre avgång från skog är att i Sverige och övriga världen används de bördigare jordarna till jordbruk, och skog växer ofta på svårbrukad mark med lågt näringsvärde där kväve ofta finns i underskott. Så länge som skogen växer och tar upp kväve är risken för lustgasavgång liten, men efter avverkning ökar risken för lustgasavgång. Men det finns även skog där lustgasavgången ofta är hög, som på mycket näringsrik mark, till exempel dränerad kärrtorvmark med björk, hallon och nässlor.

Biomassa anges ibland vara koldioxidneutral, då lika mycket koldioxid tas upp i fotosyntesen som avges i förbränningen. Men skörd och bearbetning kräver energi, oftast fossil, vilket avger koldioxid. Dessutom medför all odling utsläpp av lustgas som är en stark växthusgas och långlivad i atmosfären. Det har i debatten hävdats att utsläppen av lustgas gör att det av klimatskäl inte är meningsfullt att byta olja mot bioenergi. Biobränsle "kostar" nästan alltid lustgas och det finns inget helt klimatneutralt biobränsle. Men det finns bättre och sämre.

Lustgasproduktionen påverkas av jord- och skogsbrukets olika skötselåtgärder både på kort och lång sikt. Exempelvis har tillförsel av stora mängder N-gödsel ökat N₂O-emissionen när mängden tillgängligt kväve överskridit grödans förmåga att ta upp kvävet. Det finns också odlingssystem där det uppmätts en låg lustgasavgång trots att man kan förvänta en hög.

För att få minimalt med lustgas krävs ett "tight" förhållande mellan kvävefrigörande och kväveupptag i växter så att bara lite kväve blir över till nitrifikation och denitrifikation. Att låta marken ligga naken, trädad, ger mer lustgas än att odla marken, och ju mer näringsrik marken är ju större är risken att lustgas bildas. Det är en utmaning för både forskningen och jordbruksnäringen att utveckla jordbruksmetoder som effektivt fångar kvävet i markens organiska material samtidigt som växterna kan ta upp det för en stor skörd och bara lite lustgas bildas. Om lustgasavgången relateras till produktionen av biomassa innebär det att även skogsprodukter "kostar" lustgas trots en låg avgång vilket beror på att tillväxten är lägre än i jordbruket. Varje produktionsförändring i lantbruket eller skogsbruket kan ge effekter på lustgasavgång på platsen, i omgivande ekosystem eller i andra länder, vilket kräver att systemanalytiska studier görs. EU-kommissionen har angett ett hållbarhetskriterium som kräver att produktion av biobränsle ska orsaka mindre växthusgasutsläpp jämfört med produktion och användning av fossilt bränsle för att det ska få klassas som förnybart. Lustgasavgång i fält har här en stor betydelse eftersom utsläppen utgör cirka hälften av den tillåtna mängd som ska adderas till utsläpp från energianvändning i själva produktionen.

2 Summary

Natural activities such as agriculture and forestry, influence the concentration of greenhouse gases in the atmosphere. This is a survey of why nitrous oxide (N_2O) is produced in soil and how much is leaving the soil in different plantations. Mostly small amounts but sometimes high emissions of nitrous oxide occur, which is produced by soil fungi and bacteria converting nitrogen compounds. Denitrification is the process most often producing the greatest amounts of nitrous oxide but nitrification having a need for oxygen can be decisive since this process produces the nitrate needed in denitrification. Nitrous oxide is formed at occasions with oxygen shortage which can arise inside soil clods with high biological activity consuming the oxygen, or if the oxygen diffusion into the soil is slow since it is soaking wet or the soil pores have been compacted by for example tractor driving. Some techniques for measuring nitrous oxide leaving the soil to the air are described. To escape the tough work of measuring simple estimation methods are desired, and there are a few developed, but no one is reliable.

The atmospheric nitrous oxide increase can be connected to the increased fixation of the air dinitrogen gas (N_2) into reactive nitrogen which is possible to use for living cells. Most nitrogen is fixed biologically in leguminous plants or in the manufacturing of fertilisers. Reactive nitrogen is decisive for plant photosynthesis function, but in most natural ecosystems available nitrogen is scarce so photosynthesis and plant production often increase when nitrogen is added. An increased production of bioenergy crops will increase the demand of more reactive nitrogen in addition to the nitrogen used in existing food production. Most of the soil nitrogen is tied to dead and living organic material and will not be available until the organic material is decomposed and the nitrogen is liberated. The plant community and competition between organisms of the available nitrogen can determine the nitrous oxide emission. This is one explanation why forest soils often present lower emissions than agricultural land. Another explanation of the lower emission from forests is that in Sweden and the rest of the world the most fertile soils are cultivated, while remaining forests in stony and less fertile areas suffer from nitrogen deficits. As long as the forest is growing, absorbing the nitrogen, the risk for nitrous oxide emission is low, but after clear cutting the risk increases. But there are forests where the nitrous oxide emission is high most of the time, such as fertile soils like drained fens with, typically, birch, raspberry and nettles.

Biomass for energy use is sometimes specified as carbon dioxide neutral, since equal amounts of carbon dioxide is taken up by the photosynthesis as is released in the combustion or decomposition. But harvesting and manufacturing needs energy, often fossil, which adds carbon dioxide. Moreover, the cropping results in emission of nitrous oxide, which is a strong greenhouse gas with a long lifetime in the atmosphere. In the debate it has been claimed that, for climate reasons, the

emission of nitrous oxide makes the exchange of oil for bioenergy meaningless. It can be concluded that biofuels almost always have a “cost” of nitrous oxide and there is no climate neutral biofuel, but there are better and worse. In agriculture and forestry alike, the nitrous oxide production is influenced by management both in the short and the long run. As an example, addition of large amounts of nitrogen-fertilisers or manure increases the N₂O-emission when the available nitrogen exceeds the crop uptake capacity. But there are cropping systems as well where a low nitrous oxide emission has been measured in spite of an expected high emission.

To get a minimum of nitrous oxide there is need for a tight connection between nitrogen liberation and plant uptake where minimal amounts are left to nitrification and denitrification. A naked soil, fallow, causes more nitrous oxide than having a crop on the land, and the more fertile the soil the higher the risk for the production of nitrous oxide. It is a challenge for both science and agricultural industry to develop agricultural methods that effectively catch the nitrogen in soil organic matter while enabling plants to yield a good harvest and yet minimize nitrous oxide production. Relating nitrous oxide to production of biomass this implies that forest products too, carry a “cost” of nitrous oxide in spite of a low soil emission since the growth is smaller than in agriculture. Every change in agriculture and forestry production performed can have effects on the size of nitrous oxide emission, at the spot or in the surroundings or even in other countries. System analyses are needed to study the effects obtained. The EU-commission has stated sustainability criterions that must be met if the biofuel is to be included in the class of renewable energy. Soil nitrous oxide emission has a substantial impact since the emission can amount to half the allowed greenhouse gas emissions, which have to be added to emissions caused by energy use in the production.

3 Inledning

Även ”naturliga” verksamheter som jord- och skogsbruk påverkar halten av växthusgaser i atmosfären. Här ges en orientering kring varför lustgas (N_2O) bildas i mark, och hur mycket som kan avgå vid olika odlingar. Oftast avgår små mängder men ibland riktigt mycket lustgas, vilken produceras av svamp och bakterier i marken vid omvandling av kväveföreningar. Denitrifikation är den process som oftast producerar mest lustgas men nitrifikation som kräver syre kan vara avgörande eftersom den processen producerar det nitrat som behövs i denitrifikationen. Det är vid syrebrist som lustgas bildas och syrebrist kan uppstå i jordklumpar med hög biologisk aktivitet vilken konsumerar syret eller att syre inte kommer ner i marken för att marken är genomvåt eller att markens porer har tryckts ihop av t.ex. traktorhjul. Några tekniker för att mäta hur mycket lustgas som avges från marken till luften beskrivs. För att slippa arbetsamma fältmätningar vill man gärna enkelt kunna beräkna lustgasavgången, och några metoder har utvecklats, men det finns ingen enkel metod som samtidigt är tillförlitlig.

Ökningen av lustgas i atmosfären kan kopplas till att det nu fixeras mer av luftens kvävgas (N_2) till reaktivt kväve som då blir möjligt att använda för levande celler. Kväve kan fixeras biologiskt t ex i ärtväxter eller vid tillverkning av handelsgödsel. Reaktivt kväve är avgörande för att växternas fotosyntes ska fungera. I de flesta naturliga ekosystem råder brist på kväve varför fotosyntes och produktion av växtmaterial ofta ökar vid tillförsel av reaktivt kväve. En ökad produktion av bioenergigrödor kommer att kräva mer kväve utöver befintlig matproduktion. Det mesta av markens kväve är uppbundet i dött och levande organiskt material, och blir åtkomligt först när det bryts ner och kvävet frigörs. Hur växtsamhället ser ut på platsen och konkurrensen mellan olika organismer om tillgängligt kväve kan avgöra storleken på lustgasavgång från mark. Därför är lustgasavgång från skogsmark ofta lägre än från åkermark. En ytterligare förklaring till lägre avgång från skog är att i Sverige och övriga världen används de bördigare jordarna till jordbruk, och skog växer ofta på svårbrukad mark med lågt näringsvärde där kväve ofta finns i underskott. Så länge som skogen växer och tar upp kväve är risken för lustgasavgång liten, men efter avverkning ökar risken för lustgasavgång. Men det finns även skog där lustgasavgången ofta är hög, som på mycket näringsrik mark till exempel dränerad kärrtorvmark med björk, hallon och nässlor.

Biomassa anges ibland vara koldioxidneutral, då lika mycket koldioxid tas upp i fotosyntesen som avges i förbränningen. Men skörd och bearbetning kräver energi, oftast fossil vilket avger koldioxid. Dessutom medför all odling utsläpp av lustgas vilken är en stark växthusgas och långlivad i atmosfären. Det har i debatten hävdats att utsläppen av lustgas gör att det av klimatskäl inte är meningsfullt att byta olja mot bioenergi. Biobränsle ”kostar” nästan alltid lustgas

och det finns inget helt klimatneutralt biobränsle, men det finns bättre och sämre. Lustgasproduktionen påverkas av jord- och skogsbrukets olika skötselåtgärder både på kort och lång sikt. Exempelvis har tillförsel av stora mängder N-gödsel ökat N_2O -emissionen när mängden tillgängligt kväve överskrider grödans förmåga att ta upp kvävet så att nitrifikations- och denitrifikationsbakterier kan ta det istället. Men det finns också odlingssystem där det uppmätts en låg lustgasavgång trots att man kan förvänta en hög.

För att få minimalt med lustgas krävs ett ”tight” förhållande mellan kvävefrigörande och upptag i växter där bara lite kväve blir över till nitrifikation och denitrifikation. Att låta marken ligga naken, trädad, ger mer lustgas än att odla marken, och ju mer näringsrik marken är ju större är risken att lustgas bildas. Det är en utmaning för både forskningen och jordbruksnäringen att utveckla jordbruksmetoder som effektivt fångar kvävet i markens organiska material samtidigt som växterna kan ta upp det för en stor skörd och bara lite lustgas bildas. Om lustgasavgången relateras till produktionen av biomassa innebär det att även skogsprodukter ”kostar” lustgas trots en låg avgång vilket beror på att tillväxten är lägre än i jordbruket. Varje förändring i produktion som görs i lantbruket eller skogsbruket kan ge effekter på lustgasavgång, på platsen, i omgivande ekosystem eller i andra länder vilket kräver att systemanalytiska studier görs. EU-kommissionen har angett ett hållbarhetskriterium som kräver att produktion av biobränsle orsakar mindre växthusgasutsläpp jämfört med produktion och användning av fossilt bränsle för att det ska få klassas som förnybart. Lustgasavgång i fält har här en stor betydelse, då utsläppen kan utgöra hälften av tillåten mängd som ska läggas till den energiåtgång som också behövs vid produktionen

4 Klimatet och växthusgaserna

Att förhållandena är så bra som de är här på jorden beror på ett lagom avstånd till solen, vars strålar tillför livet energi, där fotosyntesen fångar en del av energin men det mesta blir till värme som är långvågig strålning som strålar tillbaka ut i rymden. Som tur är försvinner inte all värmestrålning på en gång utan en liten del fångas upp och hålls kvar en kort tid av växthusgaserna. Deras vibration kan hålla kvar värmestrålningens energi så att jordens medeltemperatur är behagliga $+14^{\circ}\text{C}$ och möjlig för de flesta livsformer istället för -19°C och istäckt som annars skulle ha varit fallet (Le Treut et al. IPCC 2007). De flesta växthusgaser har en relativt lång uppehållstid i atmosfären och är därför jämnt fördelade i lufthavet, det gäller dock inte för vattenånga vilken också fungerar som växthusgas men påverkas inte direkt av mänsklig verksamhet.

Det mesta av luftens gas - kvävgas N_2 (78%), syrgas O_2 (21%) och ädelgasen argon Ar (<1%) - fångar inte upp någon värmestrålning. De så kallade växthusgaserna i atmosfären förekommer i mycket låg halt men har ändå stor effekt. Halten av koldioxid (CO_2) var innan industrialiseringen 280 ppm (=parts per million) och är nu (2005) 379 ppm eller annorlunda uttryckt 4 koldioxidmolekyler på 10 000 andra luftmolekyler. Luftens koncentration av metan (CH_4) är ännu mindre, 2 ppm och lustgas (N_2O) lite mer än 0,3 ppm (IPCC syntesrapport 2007).

Eftersom mänsklig verksamhet nu tillför mer växthusgaser än vad som kan bindas in eller brytas ner är atmosfärens halt av CO_2 35 %, CH_4 140 % och N_2O 15 % högre än innan industrialiseringen (IPCC syntesrapport 2007). Dessutom har vi människor bidragit med fler växthusgaser som tidigare inte fanns, som de industriellt tillverkade freonerna, vilka är mycket starka växthusgaser som kan hålla kvar mycket värme samtidigt som de är kemiskt stabila och därför är kvar lång tid i atmosfären.

Den tredje största växthusgasen är lustgas (N_2O) som är en naturlig gas. Sen sista istiden har koncentration legat runt 270 ppb men var 2005 uppe i 319 ppb (IPCC syntesrapport 2007). Lustgas är en stark växthusgas där 1 kg lustgas ger lika stor klimateffekt som nästan 300 kg koldioxid (Forster et al. 2007). Dessutom är den långlivad; den lustgas som tillkommer idag kommer att vara kvar i cirka 114 år. Negativt är också att den ökade mängden lustgas i atmosfären gjort den till den dominerande gasen som bryter ner stratosfäriskt ozon, vilket skyddar jordens organismer mot farlig UV-strålning (Ravishankara et al. 2009). Av nuvarande mänskligt orsakade växthusgasutsläpp till atmosfären utgör lustgastillförseln 8 % (IPCC syntesrapport 2007).

Den förstärkta växthuseffekten förändrar det klimat som naturen och vi människor är vana vid, och det går så fort att naturen inte hänger med och vi har svårt att

ställa om samhället. Eller det kanske vi inte har?! Det finns en vilja till omställning vilket vi kan se genom att antalet ”miljöbilar” ökar, och många vill spara energi eller övergå till förnybara energikällor. För att vidta rätt åtgärder i omställningen till ett hållbart samhälle behöver vi bredda klimatskussionen från enbart trafik- eller energifrågor till en förståelse av att även naturliga verksamheter som jord- och skogsbruk påverkar halten av växthusgaser i atmosfären.

Klimatförändringarna beror av ökade utsläpp av växthusgaser (IPCC syntesrapport 2007) och globalt tillförs atmosfären mer än 70 % mer växthusgaser varje år jämfört med 1970. Koldioxid (CO_2) är den dominerande gasen där ökningen till stor del beror av eldning av fossila bränslen som kol, olja och naturgas men också avskogning. Även utsläpp av andra växthusgaser ökar. Metan och lustgas bildas av bakterier i jord och gödsel. Atmosfärens koncentration av dessa naturliga gaser är nu högre än på tusentals år. Dessutom finns ”onaturliga” växthusgaser som t.ex. freoner. Uppvärmningen av vår planet riskerar nu att slå ut stora ekosystem, vilket är ett hot mot växter och djur. Men det är också ett hot mot mänskliga samhällen. För att inte överskrida 2 graders uppvärmning av vårt klot måste utsläppen globalt skäras ner med 50 % vilket innebär att rika länder som Sverige måste minska sina utsläpp med minst 80 % för att det ska gå att genomföra. Minskningen bör ske snarast för att få en god effekt. EU har satt som mål att minska utsläppen med 20 % till år 2020 jämfört med år 1990, men om fler länder ställer upp på reducering av utsläppen kan EU sätta målet till 30 %. Inte bara CO_2 -utsläppen ska minskas utan alla växthusgaser och från alla samhällssektorer.

Det går att minska koldioxidutsläppen med minskad och effektivare energianvändning samt genom att byta fossila bränslen mot förnybar energi som bioenergi och energi från vatten, vind och sol. Biobränslen produceras av solenergi som fångas av de gröna bladen i fotosyntesen, då koldioxid tas från luften och bildar socker och andra kolhydrater. Under sommaren minskar därför luftens koncentration av koldioxid något. Under vintern när bladen multnar frigör markens djur, bakterier och svampar det mesta av koldioxiden igen så att luftens koldioxidhalt återställs. Om vi eldar biomassan frigörs koldioxiden snabbare men på några års sikt får detta ingen betydelse.

5 Fotosyntes kräver kväve

Växternas fotosyntes är den primära producenten av biologiskt/kemiskt bunden energi som så gott som alla levande organismer på jorden är beroende av. För att växternas fotosyntes ska fungera krävs förutom gröna blad också ljus, vatten och koldioxid. Med hjälp av ljusets energi och byggmaterialet koldioxid bygger cellerna energirika molekyler som socker och cellulosa. Dessutom behövs mineralnäring för cellernas funktion, och den näringen tar växterna från jorden och transporterar i vattenströmmen upp till växtens alla celler. Kväve är ett av de viktigaste, vilket krävs för att bygga proteiner, DNA, klorofyll mm. När det är kvävebrist växer det sämre, vilket syns som gulaktiga blad eller barr. Merparten av växternas kväve är bundet till organ som är ansvariga för fotosyntesen, och kvävehalten i en växt avgör dess kapacitet att fixera kol, det vill säga producera biomassa. Det går att mäta grönhet/gulhet i ett fält för att avgöra hur mycket man måste kvävegödsla för att få önskad skörd.

Till skillnad mot jordbruk råder det normalt kvävebrist i de flesta naturliga ekosystem, varför fotosyntesen inte producerar så mycket biomassa som annars skulle vara möjligt under rådande klimatförhållande. Svensk skog skulle kunna växa mycket bättre om den gödglas med kväve i den takt som växterna konsumerar det, upp till 300 % snabbare i Norrland och 20 % i södra Sverige (Fiberskog). Man menar att det skulle vara positivt att öka produktionen av biomassa som då bland annat kan ersätta en del fossil energi. Man skulle kunna tro att en sådan kvävegödsling kan medföra ökad lustgasavgång, och forskargruppen vid Göteborgs Universitet har nyligen påbörjat mätningar av lustgasavgång från försöksytor med ungskogsgödslad gran i norra och södra Sverige. Men om skogen effektivt tar hand om det tillförda kvävet kanske lustgasbildningen knappt ökar alls.

6 Klimatfrågan handlar om mer än koldioxid och energi

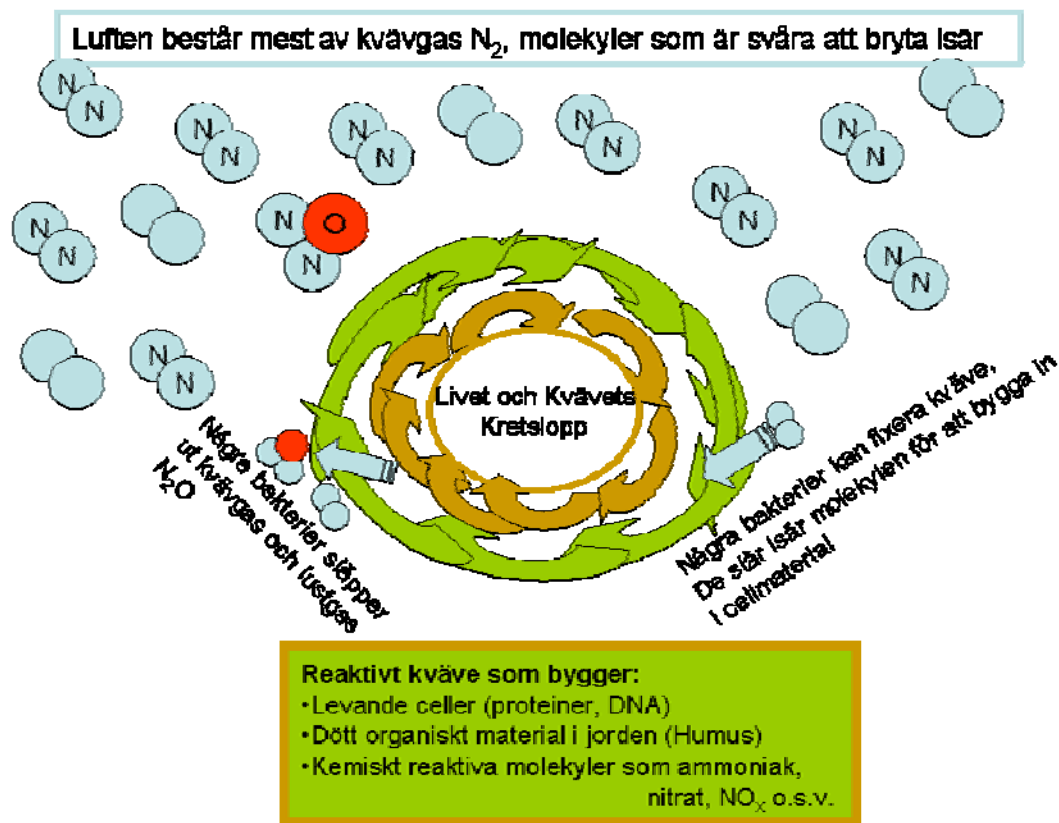
Biomassa anses vara koldioxidneutral då lika mycket koldioxid tas upp i fotosyntesen som avges i förbränningen. Det åtgår dock en del energi för att skörda åker eller skog, transportera, sönderdela och processa biomassan till nyttiga bränslen. Vid odling av grödor på åkermark motsvarar åtgången av energi vid odlingen (traktorer, gödselmedel och torkning) 7-20 % av energiinnehållet i den skördade grödan (Börjesson 2007), och oftast är det fossila bränslen som avger koldioxid som används. Energivinsten kan uttryckas som energibalans vilket är kvoten mellan erhållen bioenergi och åtgång vid produktion. Ettåriga energigrödor ger 3 gånger lägre energibalans än t.ex. energiskog och skogsbränsle (Berndes et al. 2007). Möjligheten att producera biobränsle i både skog och på åker varierar på vår jord men i Sverige finns det en stor potential (Börjesson 2007). Dessutom medför all odling ökade utsläpp av lustgas (N_2O) vilket innebär att även om ingen fossil energi åtgår tillförs ändå atmosfären växthusgas. Därför räcker det inte att bara se på energivinsten, eftersom motivet för att byta ut fossilt bränsle mot förnybart är att betydligt minska tillförseln av växthusgaser till atmosfären. Då måste alla växthusgaser medräknas, även metan och lustgas. Eftersom lustgas är en stark växthusgas gäller det att hålla utsläppen låga för att inte stora delar av, eller till och med hela koldioxidvinsten ska ätas upp. När vi byter ut fossila bränslen mot biobränslen behöver vi veta vilka som är bäst ur klimatsynpunkt.

Den mesta lustgasen bildas naturligt i mark av bakterier som omvandlar kväve. Processen är naturlig och har "alltid" funnits, så då kan man kanske tycka att vi människor inte har med det att göra. Men vi människor påverkar och påskyndar processerna när vi tillför mer kväve för att öka produktionen av mat för oss själva, foder till djur, fibrer till kläder, papper och byggmaterial samt förnybar bioenergi. Vi människor har alltid ätit mat, det kan väl sägas vara "naturligt" men vi är nu mer än 6 miljarder människor här på jorden och alla måste äta (även om många inte får tillräckligt). Med modern odlingsteknik producerar nu jordens åkermark mat som skulle räcka till för alla, om vi bara valde resurssnåla livsmedel och fördelade dem rättvist. Nu är det jordbruksproduktionen som ger upphov till den största delen av mänskligt orsakade lustgasutsläpp. Och när vi i en nära framtid vill odla ännu mer växter för mat, fibrer och bioenergi kommer det att kräva ännu mer kväve, vilket ger upphov till ännu mer lustgas (IPCC Guidelines 2006). Det finns studier som pekar på en risk att utsläppen av lustgas kan bli så stora att det av klimatskäl inte är meningsfullt att byta olja mot bioenergi (Crutzen et al. 2008). Eller hur är det med det?

7 Varifrån kommer kvävet?

Eftersom kväve verkar vara boven till lustgasen ska vi först undersöka hur det kommer sig att det finns mer kväve nu än tidigare.

Och nej, det finns inte mer kväve nu än tidigare men det finns mer kväve som är tillgängligt att använda för levande organismer. Det mesta kvävet finns i luften som kvävgas (N_2) men detta kväve kan inte byggas in i cellernas proteiner och nukleinsyror utan att först fixeras. Kvävgasens två kväveatomer sitter hårt ihop genom en mycket stabil trippelbindning och kan inte fås isär utan mycket energi. Det finns några organismer i naturen som kan få isär kvävgasens två kväveatomer och omvandla N_2 -molekylen till en form som vi kallar för reaktivt kväve (N_r), och det är några speciella bakterier som antingen lever för sig själva eller i symbios med växter. Processen kallas för biologisk kvävefixering. Exempel på växter med kvävefixerande bakterier i rötterna är klöver, bönor och trädet *Al* (*Alnus sp.*). Att bryta upp den stabila trippelbindningen kräver mycket energi, och den får bakterierna från växternas energirika fotosyntesprodukter, det vill säga organiska kolföreningar av olika slag. Naturligt sker kvävefixering till en mindre del också utanför biologin, som vid åskans blixurladdning och förbränning vid hög temperatur, då kväveoxider bildas. Reactivt kväve som ansamlats globalt under geologisk tid har huvudsakligen fixerats biologiskt (Galloway et al. 1995). Det reaktiva kvävet ackumuleras sedan i levande celler i mer reducerad form, bundet i t.ex. proteiner och DNA eller i jorden som humus. Endast en liten del finns som lösligt och lättillgängligt ammonium (NH_4^+) och nitrat (NO_3^-). Reactivt kväve finns i många kemiska former, det kan frigöras, omvandlas och bindas upp om och om igen i kvävetets kretslopp, Figur 1.

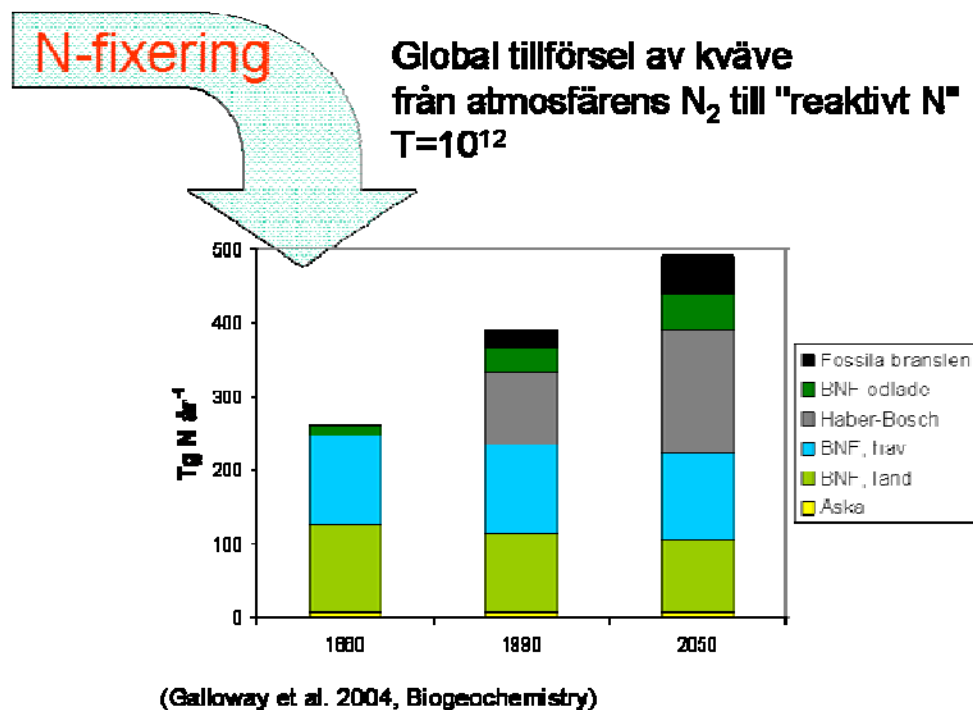


Figur 1 Reaktivt kväve cirkulerar i kvävet kretslopp. Kvävet frigörs från dött organiskt material och binds upp i växterna, transporteras genom näringskedjorna där det frigörs igen. För att det ska bli mer kväve i kretsloppet måste luftens N_2 fixeras. En del kväve återgår till atmosfären som N_2 genom bakterieprocesser, och då kan en liten mängd lustgas bildas.

I naturen begränsas växternas tillväxt av många faktorer, som klimat (vatten, temperatur och ljus) och tillgång till växnäring. Näringsämnen som finns i mindre mängd än vad växterna behöver begränsar tillväxten. I jordbruket tillförs de som gödsel för att nå en god skörd, vanligast är det behov av kväve, fosfor och kalium. Innan man hade kunskap om olika atomer och vad en växt behöver fick bönder i det tidiga jordbruket mer kväve till åkerjorden genom insamling av djurfoder från omgivande arealer som blev till stallgödsel och spreds på åkern. I Sverige har vi uttrycket "äng är åkers moder" för att ängens näring på detta vis tillförs åkern; därigenom utarmades ängen men åkern blev rikare på näring, vilket bara är en omflyttning av kvävet.

Under 1800-talet fanns en oro för att jordbruket inte skulle kunna försörja den växande befolkningen med mat. Thomas Malthus menade att svält hotade eftersom befolkningstillväxten var snabbare än produktivitetssökningen i jordbruket. Uppodling av mark tillsammans med satsningar på bättre jordbruksteknik och odling av kvävefixerande grödor varvat med andra grödor i en växtföljd möjliggjorde ökade skördar. Men det verkliga genombrottet för att öka matproduktionen kom med tillverkning av handelsgödsel. För cirka hundra år sedan lyckades de tyska kemisterna Haber och Bosch fixera kväve i en kemisk

process (egentligen var det krigsindustrins efterfrågan på sprängmedel som drev på forskningen - men sidoprodukten handelsgödsel blev den stora produkten). Tillverkningen av handelsgödsel och dess användning i jordbruket tog dock fart först under 1950-talet och har därefter ökat. Dessutom har odling av kvävefixerande växter ökat, vilket tillsammans med handelsgödselanvändningen medfört att biosfären nu tillförs dubbelt så mycket reaktivt kväve som före den industriella revolutionen (Galloway et al. 2004). Hälften av världens mat odlas nu med tillsats av handelsgödsel (Galloway & Cowling 2002). Därigenom kan mer mat produceras och matproduktionen borde vara tillräcklig för att mätta jordens 6 miljarder människor.



Figur 2 Olika processer som bidrar till N-fixering. Stapeln för 1860 visar huvudsakligen naturens fixering av kväve genom biologisk kvävefixering (BNF). Idag har vi människor ökat kvävefixeringen genom tillverkning av handelsgödsel (Haber-Bosch), förbränning av fossila bränslen och odling av klöver, ärtor och bönor (BNF odlade). Ökat behov till år 2050 har beräknats, (baserad på Galloway et al. 2004)

I Haber-Boschprocessen produceras ammoniak/ammonium från luftens kvävgas med hjälp av naturgas (fossilgas), vilket medför CO_2 avgång till atmosfären. En del lustgas bildas vid omvandling av ammoniak till salpetersyra (HNO_3). Eftersom det avgår stora mängder koldioxid och lustgas vid själva tillverkningen blir klimatpåverkan stor. För varje kg kväve i ammoniumnitrat (NH_4NO_3) avgår sammanlagt ca 7 kg CO_2 -ekvivalenter (Jensen och Kongshaug 2003 citerad i Växtpressen nr 1 2008). Gödselindustrin arbetar på att få ner dessa emissioner, och säger sig kunna producera mer ammoniumnitrat med mindre energiåtgång och med mindre lustgasutsläpp om några år.

Sammanfattningsvis kan nytt reaktivt kväve öka förutsättningen för mer fotosyntes och producera mer biomassa. En stor del av det nya kvävet blir kvar i ekosystemet. En del hamnar till exempel i organiskt material som på nytt kan spridas på åkern som stallgödsel och flytgödsel. Organiska gödselmedel återcirkulerar redan befintligt reaktivt kväve N_r , vilket tillför kväve till enskilda fält men inte till ekosystemet i stort.

8 Kvävekaskaden

Det bästa vore om allt handelsgödselkväve som sprids på åkern hamnade i skörden och att man därefter kunde hålla ordning på kvävet så att det fullt ut går att återanvända som gödsel igen! Då skulle vi inte behöva tillverka och sprida så mycket handelsgödsel och många miljöproblem skulle säkert inte vara problem längre. Men tyvärr hamnar bara en liten del av gödsel-kvävet i foder och mat, resten förskingras till omgivande mark och vatten och där orsakar det bland annat förurning och övergödning. Galloway och Cowling (2002) har sammanfattat effektiviteten i jordbrukets matproduktion med att endast 14% av kvävet som fixeras genom Haber-Boschprocessen återfinns i matens protein om man äter vegetarisk kost, medan kött endast innehåller 4% av tillfört kväve. Resten sprids ut i jordbrukets omgivningar, förloras och omvandlas i kvävecykeln olika faser, där en del lagras upp under lång tid och annat har snabb omsättning i kemiska och biologiska processer. En liten del av det ackumulerade N_r återförs till atmosfären som kvävgas huvudsakligen genom denitrifikation men även vid förbränning med NO_x -rening. Om kvävefixering är ingångsdörren till cykeln så kan denitrifikation betraktas som utgångsdörren. Ju mer kväve som cirkulerar i ekosystemen desto mer kväve antas nitrifieras och denitrifieras, och det är en förklaring till att lustgaskoncentrationen i atmosfären stiger. Dessutom finns det en eftersläpning från fixering till denitrifikation, varför lustgas kommer att fortsätta tillföras atmosfären från poolen av reaktivt kväve under lång tid framöver (Bakken och Bleken 1998).

Mänskligheten kommer inte att sluta med kvävefixering, det kan vi inte, eftersom vi är beroende av mat, och mat får vi genom fotosyntesen som kräver kväve. Kol och kväve hänger ihop. För att producera den mat som 6 miljarder människor behöver är nu den antropogena kvävefixeringen mer än 10 gånger så stor jämfört med 1800-talet. Bara en liten del av detta N_r fångas i skörden eller animalieprodukter, resten sprids ut i omgivningarna. Kvävet i djurens foder, till exempel, går till största delen rakt igenom djuret och ut med urinen. Vår matproduktion orsakar en kvävekaskad med ökande kvävemängder i många ekosystem. Ett sätt att minska behovet av nytt handelsgödsel samtidigt som maten skulle räcka till för alla människor är att äta mer vegetabiliskt och mindre animaliskt protein. Även om jordbruket helt ställs om till ekologisk odling och vi äter en vegetarisk kost cirkulerar nu mycket kväve i systemen som kommer att medföra lustgasavgång på samma nivå ett tag till. Att sluta använda fossila bränslen ger ett direkt stopp för koldioxidtillförseln, men för att minska lustgasavgången behöver vi göra allt vi kan för att hejda tillförseln. Här har jag inte värderat svårigheten för samhället att avstå från fossila bränslen och ställa om infrastruktur med mera, vilket är en annan fråga.

Vanligen betraktas biobränslen som klimatneutrala och som ett sätt att rädda klimatet, eftersom fotosyntesen helt nyligen tog upp CO_2 från atmosfären och det

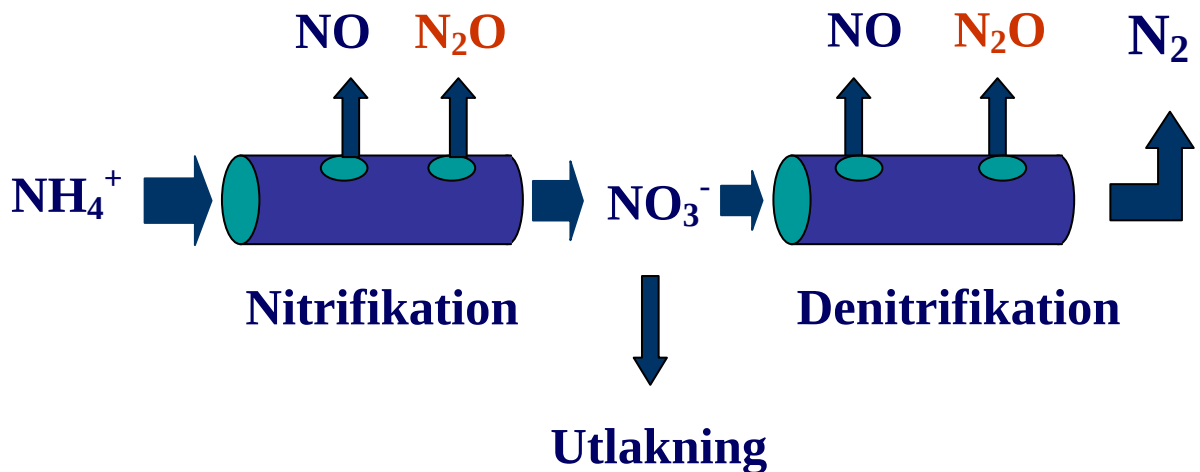
bara är kol som är i kretslopp. Men man får aldrig glömma att *produktion av växter kräver kväve* och en ökande växtproduktion utöver matproduktionen kommer att behöva ännu mer kväve i omlopp. När nu odling av mat medför ca 8% av totala antropogena växthusgasutsläpp kan man fundera på konsekvenserna av en kraftigt ökad biobränsleproduktion (inte som ersätter matproduktion utan därutöver) kan medföra? Mer kväve kommer att behöva fixeras som kaskaderar iväg och orsakar lustgasavgång inte bara här och nu även där och framöver. Är biobränslen då ett alternativ för att minska tillförseln av växthusgaser till atmosfären? Finns det möjlighet att hantera ekosystemen på ett sätt som minimerar risken att det N_r som redan finns blir till lustgas? Ja genom ökad kväveeffektivitet i odlingar och med kvävet mer permanent uppbundet i levande och dött material kan vi motverka bildning av lustgas. Kvoten mellan utvunnen och insatt energi vid produktion och användning bör dessutom vara så hög som möjligt.

9 Biologiska processer som producerar lustgas

Små mängder men ibland riktigt mycket lustgas produceras biologiskt av svamp och bakterier i marken vid omvandling av kväveföreningar. Det handlar om två processer. Den ena är nitrifikation som omvandlar/oxiderar ammonium (NH_4^+) till nitrat (NO_3^-) och den andra är denitrifikation som omvandlar/reducerar nitrat först till lustgas och sen till kvävgas.

Det mesta av markens kväve är uppbundet i dött och levande organiskt material och blir åtkomligt först när det organiska material bryts ner och kvävet frigörs som ammonium. Nitrifikation oxiderar ammonium till nitrat och processen kan utföras av svamp eller bakterier. Svampar utför så kallad heterotrof nitrifikation eftersom de behöver organiskt material för att få energi och byggmaterial till celler. Om heterotrof nitrifikation har någon funktion är osäkert eftersom man inte funnit att energin i processen kommer svampen till godo (Robertson & Groffman 2007). Heterotrof nitrifikation är inte vanlig, men till skillnad mot autotrof nitrifikation kan förutom ammonium även aminer och amider oxideras. Den uppträder framförallt och kan dominera när det finns mycket lättillgängligt organiskt material i marken, som efter tillförsel av stallgödsel till gräsmarker (Laughlin et al. 2009). Mest nitrifikation utförs av autotrofa bakterier som till skillnad mot svamparnas heterotrofa nitrifikation kan utvinna energi ur oxidationen och därför klarar sin energiförsörjning utan att bryta ner organiskt material. Autotrof nitrifikation sker i två steg av olika sorters bakterier där det första steget oxiderar ammonium till nitrit (NO_2^-) och det andra vidare från nitrit till nitrat (NO_3^-). Bakterierna tillgodogör sig i båda fallen den energi som frigörs, men för att få tillräckligt med energi och kunna växa måste de oxidera många molekyler ammonium och nitrit. Byggstenar till sitt cellmaterial tar de från luftens koldioxid, på liknande vis som växter gör. Båda sortens bakterier finns närvarande samtidigt i de flesta jordar, men för att processen ska fungera måste bakterierna ha tillgång till ammonium samtidigt som det också måste finnas syre i marken, eftersom oxidationen kräver syre. Syrebrist kan uppstå om marken är mycket blöt (eftersom syre diffunderar långsamt i vatten) eller i områden där markens organismer förbrukar syre vid hög aktivitet. Vid mycket ammonium och lite syre bromsas nitrifikationen så att det istället för nitrit och nitrat kan bildas lustgas och kväveoxid. Det har liknats vid ett ”stopp” i röret vilket ökar trycket så att lustgas kan pysa ut, se figur 3 (Firestone & Davidson 1989).

”Hole in the Pipe”



(Firestone & Davidson, 1989)

Figur 3 Baserad på Firestone & Davidson 1989. Har liknas proseccerna med rör, och när trycket blir högt pyser NO och N_2O ut

Den andra processen där lustgas kan bildas är denitrifikation. Vanliga jordbakterier och svamp som lever på att bryta ner organiskt material kan vid tillfällen av syrebrist använda nitrat att andas med, eftersom det är syrerikt och kan fungera som elektronacceptor i cellandningen, samma funktion som syre annars har. Detta kallas denitrifikation, varvid nitratet först omvandlas/reduceras till N_2O och sen vidare till vanlig kvävgas (N_2). Bildning av kvävgas är en förlust av reaktivt kväve från marken. De flesta svampar saknar enzymet N_2O -reduktas, varför svampars denitrifikation ger mycket N_2O (Shoun et al. 1992). Denitrifikation är möjlig först om nitrifikation har bildat nitrat och det finns nedbrytbart organiskt material som förser organismerna med energi. Syrebrist kan uppstå antingen i jordklumpar med hög biologisk aktivitet som konsumerar syret eller att syre inte kommer ner i marken för att marken är genomvåt eller att markens porer har tryckts ihop av t.ex. traktorhjul (Sitaula et al. 2000., Ruser et al. 2006, Beare et al. 2009). När det är brist på syre men inte helt syrefritt kan även bakteriers denitrifikation stanna halvvägs vid lustgas och inte gå hela vägen till kvävgas. Det kan då avgå stora mängder lustgas till luften under en kort tidsperiod. Denitrifikation är den process som producerar mest lustgas, men nitrifikationen kan vara avgörande eftersom det producerade nitratet behövs i

denitrifikationen. Permanent översvämmande marker har ofta brist på syre varför denitrifikation är en process man kan förvänta sig, men syrebristen hindrar nitrifikation så bristen på nitrat gör att denitrifikation också blir hämmad, vilket kan förklara en låg lustgasavgång från våtmarker. I brist på nitrat kan denitrifikationsbakterier här använda luftens lustgas och omvandla den till N_2 , en sänka för lustgas (försumbar?).

Det är även många andra organismer som vill komma åt markens fria kväve (ammonium och nitrat) för att bygga cellmaterial. Växternas rötter (och dess symbios med svampar, mykorrhiza) genomväver jorden och har ofta en stor konkurrensförmåga och är effektiva på att ta hand om ammonium och nitrat för att transportera det vidare till bladen. Hur växtsamhället ser ut på platsen och konkurrensen mellan olika organismer kan avgöra storleken på lustgasavgång från mark.

- För att få så lite lustgas som möjligt måste man undvika förhållanden med mycket fritt kväve när marken är våt och det finns färskt nedbrytbart organiskt material tillgängligt!

Men processerna går inte att undvika helt, nitrifikation och denitrifikation kommer alltid att tillföra atmosfären lustgas.

10 Att mäta lustgasavgång från mark

Det är bara vid särskilda omständigheter som processerna nitrifikation och denitrifikation tillverkar lustgas, som t.ex. när det finns mycket kväve och begränsat med syre. Just när omständigheterna är de rätta (eller om man så vill "fel") blir lustgasavgången hög, vilket kan ske lite här och där och då och då. "Här och där" kallar vi för en variation över ytan, och det kan skilja stort mellan korta avstånd. "Då och då" är att stora mängder lustgas avgår under en kort tid för att snart vara nere på en vanligen låg nivå, vilket är en variation i tiden. Det här medför en mycket ojämn produktion, från en låg till en plötsligt hög avgång från marken, vilket gör det extra svårt att fånga gasen och få bra mätvärden.

Det vanligaste och enklaste sättet att mäta lustgas är med fältkammare, det vill säga ramar i markytan, lådor som är öppna både nedåt och uppåt. Man lägger på ett tätt lock under en halvtimme och fångar gasen som kommer upp ur marken i lådan. Under tiden pumpas lite av den fångade luften över till små glasflaskor som tas in på laboratoriet där de analyseras i en gaskromatograf (Klemedtsson et al. 1997). Problemet med den stora variationen över ytan gör att många sådana ramar måste placeras ut över fältet, så att mätningen blir representativ för hela ytan. Det räcker inte heller att mäta några få gånger, nej, mätningar måste göras ofta och under hela året och helst över flera år för att man ska få mätvärden som tillsammans ger en bild av avgångens storlek. Tekniken är enkel och kan tillämpas i de flesta system, men den har brister. Sådana mätningar har gjorts och görs alltför ofta och har trots allt tillfört mycket data till kunskapsbanken om lustgasavgång.

Bättre mätningar kan göras med mikro-meteorologisk teknik vilken kräver avancerad utrustning i en mast. Luftens lustgaskoncentration mäts då på olika höjd över marken och samtidigt mäts vindens hastighet. Det blir mycket data från vilken lustgasavgången räknas fram. Här kan man täcka in ett större område och få kontinuerliga data för hela året. Nackdelar är den avancerade tekniken som är känslig för elavbrott, att fältet som mäts måste vara alldeles jämnt utan störande buskar och träd och att bara ett fält eller högst två fält kan mätas av en utrustning. Fältförsök med små parcellrutor, kontrollrutor plus några varierande faktorer kan inte göras med mikrometeorologi utan kräver fortfarande fältkammare.



Figur 5 Uppsamlinf av gas från fältkammare på en åker.



Figur 6 Utrustning för mikrometeorologisk teknik

11 Hur N₂O-avgång kan beräknas

Grunden för alla beräkningsmetoder är mätningar i fält med bra genomförande och teknik för att ge data av god kvalitet. IPCC:s beräkningsmetod är den som är mest välkänd, och här uppskattas emission från åkermark som en funktion direkt av kvävegivan. I verkligheten finns dock inget statistiskt samband mellan en låg kvävegiva och lustgasemission, utan först vid mycket höga givor ökar lustgasbildningen (Snyder et al. 2009). Men eftersom metoden är enkel har många livscykelanalyser använt IPCC:s emissionsfaktor på 1,25 eller den nya faktorn 1% av kvävegivan som mått på lustgasemission, och sällan redovisas det osäkerhetsspann som IPCC anger, som att emissionen kan vara någonstans mellan 0,3 och 3% av kvävegivan. Metoden underskattar ofta emissionens storlek samt speglar inte hur stor emissionen är från enskilda fält. Men metoden pekar på att mer kväve i systemet ökar sannolikheten för lustgasbildning. Globalt finns det en koppling mellan ökningen av reaktivt kväve (ökad kvävefixering) och ökningen av lustgas i atmosfären och det är grunden för en metod föreslagen av Crutzen et al. (2008). Här anges lustgasemission relaterad till kvävefixering, både biologisk kvävefixering samt handelsgödseltillverkning, där den globalt är 3-5% av fixeringen. Här är det tillförsel av nytt reaktivt kväve till ekosystemet i stort som är metodens bas, inte gödsling till enskilda fält, varför den inte kan ange var och när emission sker.

Eftersom lustgasbildningen är komplex har försök gjorts att inkludera andra påverkansfaktorer än kvävetillförsel i beräkningar. Som exempel har två statistiska metoder samt modellberäkning med PnET-N-DNDC-modellen beskrivits (Freibauer & Kaltschmitt 2003, Stehfest & Bouwman 2006, Li et al. 2000). Dessa modeller har utvecklats och kalibrerats med fältdata från Tyskland. Svenska ekosystem är vanligen betydligt kvävefattigare än dessa system, Modellerna beräknar stor lustgasemission för att det finns mycket fritt kväve i jorden och vid förekomst av tjällossning. Om vi jämför beräkning av lustgasemission med dessa metoder med mätningar på svensk lerjord ger de tyska modellerna mycket högre lustgasemission än vad som har uppmätts i fält trots att marken fryser och tinar. Det är därför tveksamt om dessa metoder anger en realistisk storlek för lustgasemission från svenskt jord- och skogsbruk. På många håll pågår arbete för att utveckla mer processbaserade modeller. I Sverige pågår mätningar samt utveckling av en modell kallad *Coup* (Norman et al. 2008). *Coup* beräknar processer i mark-växt-systemet och har hittills mest använts i forskningssyfte för att förstå processerna, men kan nu bli till ett verktyg för uppskattning av lustgasavgång i olika system, både skogsmark och jordbruksmark. För en mer detaljerad genomgång av metoderna hänvisas till rapporten: Åsa Kasimir Klemetsson, Energimyndigheten rapport från projekt P32120-1 2009.

12 Markanvändning avgör lustgasavgången

Det är många faktorer som påverkar bildandet av lustgas i mark. Några sådana faktorer är växtligheten, markens struktur, bördighet och vattenhalt m.m. Här beskrivs olika ekosystem med antingen stor eller liten avgång av lustgas, där kunskapen kommer dels från mätningar i olika svenska ekosystem samt från andra forskares publicerade resultat. Som vi ska se skiftar förhållandena och det gör också avgången av lustgas.

12.1 Skog

Lustgasavgången från skogsmark är ofta lägre än från åkermark. Mätningar med fältkammare i en 100-årig barrskog i Bohuslän visade en lustgasavgång i storleksområdet $0,02\text{--}0,2 \text{ kg N}_2\text{O-N ha}^{-1} \text{ år}^{-1}$ (Klemedtsson et al 1997). Nyare mätningar och modellering av lustgasflöden från olika skogsekosystem finns sammanställda i Kesik et al. (2005), där den lägsta uppmätta avgången var $0,04 \text{ kg N}_2\text{O-N ha}^{-1} \text{ år}^{-1}$ i finländska Hyytiälä och den högsta $3,1 \text{ kg N}_2\text{O-N ha}^{-1} \text{ år}^{-1}$ i tyska Höglwald. Det var barrskog i båda fallen men i den senare är kvävenedfallet ca $20 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ år}^{-1}$ vilket ansågs förklara den höga lustgasavgången. En annan studie från Tyskland rapporterar att från granskog på väl-dränerad brunjord var avgången till luften mindre än $1 \text{ kg N}_2\text{O-N ha}^{-1} \text{ år}^{-1}$ (Lamers et al. 2007). På bördigare marker växer det ofta lövskog vilket kan förklara att det i sådan skog blir en lite högre lustgasavgång, $1,3 \text{ kg N}_2\text{O-N ha}^{-1} \text{ år}^{-1}$ (Schulte-Bisping et al. 2003) och som mest $6,6 \text{ kg N}_2\text{O-N ha}^{-1} \text{ år}^{-1}$ bokskog i Höglwald (Kesik et al. (2005). I tropisk regnskog har liknande storlek på avgången uppmätts $0,1\text{--}1,7 \text{ kg N}_2\text{O-N ha}^{-1} \text{ år}^{-1}$ (Yashiro et al. 2008). I Sverige och övriga världen är de bördigare jordarna oftast uppodlade och används till jordbruk, och skog växer ofta på svårbrukad och kvävefattig mark vilket förklarar en låg lustgasavgång. Men det finns även skog på mycket näringsrik mark som till exempel dränerad kärrtorvmark med björk, hallon och nässlor och här har en hög lustgasavgång uppmätts, medelvärdet blev $19,4 \pm 6,7 \text{ kg N}_2\text{O-N ha}^{-1} \text{ år}^{-1}$ (Weslien et al. 2009). På liknande skogbevuxen mark i Finland har uppmätts $4,2 \text{ kg N}_2\text{O-N ha}^{-1} \text{ år}^{-1}$ och i Tyskland $11,0 \pm 2,8 \text{ kg N}_2\text{O-N ha}^{-1} \text{ år}^{-1}$ (Maljanen et al. 2003 och Brumme et al 1999). Marken har här dikats för att det ska kunna växa bättre, med påföljd att lustgasavgången blir stor och bör jämföras med en försumbar lustgasavgång från naturlig våtmark men också den ökade tillväxten som dikningen ledde till. Vad nettoeffekten blir skiljer sig mellan olika marker och det är svårt att generellt säga att dikning och

¹ Eftersom kväve finns i många former så anger man ofta bara mängden kväve (N) i uppmätta molekyler. $\text{N}_2\text{O-N}$ anger därför vikten av kväveatomerna i lustgasmolekylen.

beskogning ger ökning eller minskning av totala växthusgasemissioner (Weslien et al. 2009, Minkkinen et al. 2002)

Lustgas som avgår från ”vanlig” skogsmark skulle man kunna se som en naturlig källa opåverkad av människan, eftersom gasen skulle producerats även utan mänsklig påverkan. Lustgasavgången varierar säkert även i naturlig skog med högre avgång efter en störning i skogen som till exempel en storm eller brand då rötternas kväve-upptag avbryts samtidigt som kväve frigörs från nedbrytning av död biomassa. Mycket lite naturskog finns kvar i Sverige och världen och skogsbruket påverkar med säkerhet lustgasavgången så att den i många fall blir högre än i ursprunglig skog. Ökningen av lustgasavgången är då orsakad av människan och kan inte betraktas som naturlig.

Om vi lämnar skogen ifred kan den växa sig gammal och ackumulera kol (och kväve) i både biomassa och mark i upp till 300 år (Luyssaert et al. 2008). Men så gammal tillåts inte produktiv skog i Sverige bli eftersom den slutavverkas när den är 60-90 år gammal beroende på trädslag och region. Svensk skog i hela landet har på produktiv skogsmark exklusive fridlyst mark nu en medelålder på 58 år (64 år i norra Norrland, 51 i Götaland) (Per Nilsson, Riksskogstaxeringen SLU, pers. com.). Så länge som skogen växer är den en sänka för koldioxid från atmosfären genom ackumulering av kol i virke och mark, men eftersom skogsbruket bidragit till en låg medelålder i skogen har brukad skog ett lägre kolförråd än naturskog varför skogsbruket historiskt medfört frigörande av kol. En del menar att skogen skulle kunna växa lite bättre och vara en större sänka för kol om mer kväve tillfördes (Janssens & Luyssaert 2009), och genom att ersätta fossila bränslen med biomassa kan tillförsel av koldioxid till atmosfären minska. Ung skog ackumulerar per år mer koldioxid än en gammal skog gör, men å andra sidan innehåller en gammal skog mer uppbundet kol. Andra menar att det är osäkert om biomassan verkligen ersätter fossila bränslen och att det därför är bättre att skydda skogen mot avverkning och låta den bli gammal så att kol (och kväve) inte frigörs. Men att utreda denna fråga är inte fokus för denna rapport.

Så länge skogen växer och tar upp kväve är risken för lustgasavgång liten. Men när den avverkas ökar risken för lustgasavgång. Till exempel ökade avgången nästan 10 gånger året efter avverkning i en tropisk regnskog (Yashiro et al. 2008). Avverkning av en tysk granskog ökade lustgasavgången från 1-2 till 5 kg N₂O-N ha⁻¹ år⁻¹ (Butterbach-Bahl & Papen 2001). Ökningen kan dels förklaras av att trädens rötter inte längre kan ta hand om frigjort kväve vilket blir tillgängligt för nitrifikation och denitrifikation. Dessutom innebär körning med tunga skogsmaskiner att marken både rivs upp och kompakteras vilket frigör kväve och medför syrebrist i marken. Det betyder att mer frekvent avverkning än i ”naturlig” skog ökar lustgasavgången.

Det blir allt vanligare vid skogsavverkning att skörda och bortföra inte bara stamvirket utan också grenar och toppar (GROT) för att flisa till energiändamål. Med GROT'en avlägsnas barr och bark från skogen vilket innehåller mer kväve än veden. Förutom att ta hand om GROT finns det funderingar på att även ta hand

om stubbarna för energiändamål. Vid stubb-brytning följer jorden med upp och blandas om, vilket medför en snabbare nedbrytning av organiskt material, frigörande av kväve och därmed ökad risk för lustgasbildning. Eftersom det också behövs tunga skogsmaskiner för att dra upp stubbarna och transportera dem ur skogen är risken stor att marken kompakteras vilket ytterligare ökar risken för denitrifikation och lustgasproduktion (Sitaula et al. 2000., Ruser et al. 2006, Beare et al. 2009). Uttag av biomassa kan med tiden innebära att tillgången på växtnäring i skogens minskar. Det kan motverkas med tillförsel av olika tillsatser av kväve eller aska med syfte att hålla en bra skogsproduktion. Teoretiskt skulle skörd av GROT kunna minska förutsättningarna för lustgasbildning, medan kvävetillförsel kan verka i andra riktningen. Hur lustgasavgången påverkas totalt sett av ett ökat biomasseuttag, stubbrytning och kompensationsåtgärder kan vi ännu inte göra en totalbedömning av.

I Sverige finns det lag på att hygget måste återplanteras. För att de små skogsplantorna ska etablera sig bra var det tidigare vanligt att plöja hygget, vilket nu är förbjudet. Men trots allt behövs ofta någon slags markberedning för att den lilla skogsplantan ska ta sig bra och en sådan metod är inversmarkberedning då torvan vänds med mineraljorden uppåt (Nordborg et al 2002). Plantan växer ofta bra i den uppochnedvända jorden där mer kväve frigörs, och här finns en risk för högre lustgasavgång. När sen skogen sluter sig igen efter avverkningen kan lustgasavgången förväntas minska med tiden. Hur planteringen går till påverkar säkert lustgasavgången men en snabb återbeskogning kan förmodas ge mindre lustgas.

I Sverige finns stora områden med myrar och kärr där blötan gör att skogen växer dåligt. Blöt mark innehåller ytterst lite syre, nödvändigt för nedbrytning av organiskt material, och det är därför som torv ackumuleras i våtmarken. Det innebär också att kvävet binds upp och våtmarker har därmed en låg avgång av lustgas (Martikainen et al. 1993). När marken dikas kommer luft ner i jorden och markens organiska material börjar brytas ner och kväve frigörs. Följden blir både att skogen växer bra och att lustgasavgången blir större än på ”normal” mark, se ovan. I Sverige växer ca 7% av skogen på dikad före detta våtmark (Kolet, klimatet och skogen 2008). För att öka skogsproduktionen lyfter regeringen i senaste skogspolitiska propositionen återigen fram dikning som ett sätt att öka skogstillväxten (En skogspolitik i takt med tiden 2008).

När skogen skördas försvinner de näringsämnen som är uppbundna i veden. Dessa näringsämnen kan återföras till skog då man efter förbränning återfinner en del av näringen i askan, men däremot inte kvävet som försvinner till luften med rökgaserna. För dikad torvmark kan återförseln innebära en ökad skogstillväxt eftersom det på sådan mark är ont om den näring som finns i askan. Mätningar pågår som undersöker hur asktillförsel påverkar lustgasavgång i skog på dikad torvmark (U. Sikström & L. Klemetsson pers.com.). Preliminära data visar att asktillförsel minskar lustgasavgången vilket troligen kan förklaras med att markens pH ökar, något som kan minska lustgasproduktionen (Weslien et al.

2009). En annan förklaring kan vara att mineralerna som tillförts i askan varit begränsande för skogstillväxten och den ökade tillväxten medför ett högre upptag av kväve vilket i sin tur kan minska lustgasavgången.

Lustgasavgång är en naturlig del av ett ekosystem. Men skogsmarkens låga naturliga emission höjs troligen med ett skogsbruk inriktat på hög produktion. Hur stor höjning det rör sig om vet vi inte i nuläget. I en helhetsbedömning av bioenergiproduktion är det viktigt att också räkna med lustgasen. Man kan fråga sig hur stor betydelse en liten lustgasavgång på $0,8 \text{ kg N}_2\text{O-N ha}^{-1} \text{ år}^{-1}$ har eftersom skogen varje år tar upp koldioxid från luften som ackumuleras i ved och mark? Veden blir till byggnadsmaterial, papper m.m. varav den största delen används till kortlivade produkter som förbränns. Då frigörs uppbundet kol i form av CO_2 och veden är då varken en sänka för kol eller en källa. Denna "kortlivade" biomassa (papper, trä med kort användningstid m.m.) kan betraktas som neutral med avseende på kolet. Därför är det huvudsakligen i markens humusämnen som kol kan ackumuleras. Tillförseln av växthusgaser till luften kan också undvikas om kol, olja och betong ersätts med skogsprodukter. Att undvika tillförsel av koldioxid till luften är positivt men lustgastillförseln är negativ för klimatet, och dessa storheter behöver jämföras med varandra för att se den totala effekten vid införande av ett nytt biobränsle.

Men innan man kan jämföra med fossila bränslen kan man fundera på om skogen i sig tar upp eller avger kol. Kol som binds till biomassan har varken positiv eller negativ påverkan eftersom trädens kolinnehåll inom 100 år säkert återförs till luften. I markens humusmaterial finns det kol som kan frigöras vid nedbrytning eller upplagras vid nybildning av humus. Hur stor betydelse har det jämfört med lustgasbildningen? Klimatpåverkan från $0,8 \text{ kg N}_2\text{O-N ha}^{-1} \text{ år}^{-1}$ motsvarar $366 \text{ kg CO}_2\text{-eqv. ha}^{-1} \text{ år}^{-1}$, vilket är den mängd koldioxid som varje år behöver bindas in för att kompensera lustgasavgången. Omvandlat till kolatomer innebär det att 100 kg kol per hektar behöver ackumuleras varje år och Lustra-projektet uppskattade att ej torvtäckt mark i södra Sverige binder in just så mycket kol varje år i markens humusämnen, varför lustgasavgång och markens kolupptag här går jämnt ut. Exemplet visar att markens kolupptag balanserar lustgasavgången vid en rimlig men något stor lustgasavgång på $0,8 \text{ kg N}_2\text{O-N ha}^{-1} \text{ år}^{-1}$. Men det finns även skogsmark där humusen sakta bryts ner. En stor del av svensk produktiv skogsmark finns på dikade torvmarker där nedbrytning av torven är särskilt snabb (von Arnold et al. 2005), varför det blir svårt att nå en klimatneutralitet eftersom både lustgas och koldioxid avges i stora mängder från marken. Den ökade skogstillväxten bör på sådan mark inräknas som kompenserande, eftersom den var mycket sämre innan dikningen. Det är dock tveksamt om den ökade skogstillväxten räcker till för att kompensera den lustgas och koldioxid som avgår från marken. Men skogsbruk i sig har inga hållbarhetskriterier (t.ex. mängd utsläpp av växthusgaser) som inte får överskridas, vilket nya biobränslen kommer att få. Man bör dock vara medveten om att nydikning av mark medför ökade CO_2 och N_2O -emissioner.

12.2 Jordbruk

Av Sveriges rapporterade lustgasavgång kommer 70% från jordbruket och resten är från industri, energianvändning och trafik. Det *agroekologiska* systemet är skapat av människan och lustgas som avgår från jordbruksmark är följaktligen antropogen (=av människan orsakad). Hur stor skulle lustgasavgången varit om det inte varit jordbruk på platsen? Svaret är att det troligen då skulle ha varit skog med en låg lustgasavgång på mindre än $1 \text{ kg N}_2\text{O-N ha}^{-1} \text{ år}^{-1}$, se ovan. Odlad jord har oftast en högre lustgasavgång. Vad är det som orsakar det?

Utmärkande för jordbruksmark är att det är den bördigaste marken och möjlig att bearbeta med plog. Marken är bevuxen omväxlande med en ettårig eller flerårig gröda och däremellan bearbetad så att jorden ligger naken. I modernt jordbruk finns ofta en uppdelning så att en del gårdar är växtodlingsgårdar och andra har djur. I många fall odlas spannmål varje år vilket ger en ensidig växtföljd. I andra fall ingår ett flertal olika grödor i växtföljden vilket är det normala i ekologisk odling. Man önskar få en hög skörd varför marken gödslas de flesta åren med stallgödsel och/eller handelsgödsel (konstgödsel). Traktorkörning ger markpackning. Många skötselåtgärder påverkar lustgasavgången på både kort och lång sikt. Varför det blir mer lustgas i vissa fall och i andra bara lite ska här belysas.

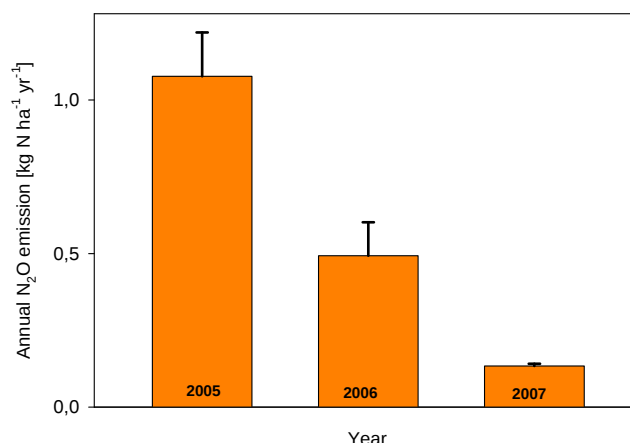
Jordens egna egenskaper påverkar lustgasavgången. Strukturen kan vara lerig, sandig eller mittemellan, vilket har betydelse för hur stora porer som finns och markens vattenhållande förmåga. När porerna är många och små som i lerjordar ökar risken för syrefria fickor där lustgas kan bildas. Jordens organiska material kan binda kväve i humus som då inte blir tillgängligt för nitrifikation eller, tvärtom, att det organiska materialet bryts ner varvid frigjort kväve medför ökad nitrifikation. En del jordar har ett litet innehåll av organiskt material, andra kan ha betydligt mer. Jordar med över 20% kallas för mull eller torvjordar. Andra egenskaper hos marken som kan påverka lustgasproduktionen är t.ex. tillgång till andra växtnäringsämnen och markens pH-värde (vätejonkoncentration).

Det levande ekosystemet har stor inverkan på lustgasproduktion. Genom växternas fotosyntes tillförs den energi som nästan alla andra organismer lever på. Växternas rötter tillför nytt organiskt material, mat för alla andra organismer i jorden, från mykorrhizasvampar som lever i symbios med rötterna till markdjur och bakterier. Hela tiden pågår en omsättning av organiskt material, det tillförs nytt och döda rester bryts ner vilket frigör koldioxid och den näring som varit uppbunden. När kväve frigörs kan det bli tillgängligt för antingen upptag för att bygga nytt cellmaterial eller så kan nitrifierande och denitrifierande organismer ta det och orsaka bildning av lustgas. I jordbruket är detta en risk efter skörd, då skörderester lämnas kvar eller då marken gödslas. Växternas rötter påverkar också oorganiska förhållanden som vatten och näringstillgång i jorden samt markluftens sammansättning. Om marken ligger bar eller plantorna är alldeles för små för att rotsystemet har hunnit genomväva jorden blir mer av frigjort kväve tillgängligt för nitrifikation.

I bördig åkermark finns tonvis med kväve per hektar vilket har ackumulerats efter många års gödslingar, vilket kan frigöras beroende på odlingsåtgärder. Markens bördighet är på så vis en viktig faktor som påverkar lustgasemissionen. Den lustgas som avgår i år beror därför av gödslingar och odlingsåtgärder långt tillbaks i tiden som överlagras varandra (Bakken & Bleken, 1998). Vid tillförsel av stora mängder N-gödsel ökar sannolikheten för att mängden tillgängligt kväve överskrider grödans förmåga att ta upp det så att det blir tillgängligt fört nitrifikations- och denitrifikationsbakterier och N_2O -bildning. Icke-organogen gödslad åkermark i Europa avger $3 \text{ kg N}_2\text{O-N ha}^{-1} \text{ år}^{-1}$ vid odling av spannmål, med en stor osäkerhet, men håller sig oftast under $10 \text{ kg N}_2\text{O-N ha}^{-1} \text{ år}^{-1}$ (Åsa Kasimir Klemedtsson, Energimyndigheten rapport från projekt P32120-1 2009).

I Sverige har det gjorts mätningar i några olika jordbrukssystem. På en sandjord i Halland uppmättes en avgång i storleksordningen $2 \text{ kg N}_2\text{O-N ha}^{-1} \text{ år}^{-1}$ vid odling av stråsäd (Kasimir Klemedtsson et al. opublicerade data). Lika mycket lustgas avgick oavsett om $120 \text{ kg handelsgödsel-N}$ tillfördes eller ej, vilket innebär att det inte var gödslingen som orsakade emissionen, vilket är det som oftast annars anges som orsak till lustgasavgång. Men i det fallet måste kvävet som hamnar i lustgasmolekylen ha haft sitt ursprung i markens uppbundna kväve från tidigare års kvävetillförsel.

Under de senaste tre åren har mätningar av lustgasavgång och nitratutlakning utförts på Hushållningssällskapets försöksgård Logården söder om Väner i ett samarbete med Göteborgs Universitet. På gården odlas grödor i en återkommande växtföljd i tre odlingssystem; konventionell, integrerad odling (en slags miljövänlig konventionell odling) och ekologisk odling. Data från mätningar i de två senare odlingssystemen finns, och nyligen avslutades mätningarna som har haft stöd av Formas och EU (Nitro-Europe) (Kasimir Klemedtsson et al. manuskript). Gården har lerjord vilket utpekas som risk för en hög emission beroende på jordens små markporer och därmed en hög vattenhållande förmåga vilket i sin tur ökar risken för syrefria miljöer och denitrifikation. Trots att kväve tillfördes i mängderna 117 , 128 och $65 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ år}^{-1}$ var emissionen låg från vårvetet i ”integrerad” odling, medeltal $0,6 \text{ kg N}_2\text{O-N ha}^{-1} \text{ år}^{-1}$, och figur 7 visar hur emissionen varierar mellan åren. Skördarna de tre åren var 5800 , 3100 och $3400 \text{ kg TS kärnskörd}$ och vi kan inte se ett mönster mellan gödsling eller skörd och lustgas. Att emissionen var låg på Logården, trots lerjorden, kanske kan förklaras av att den är en växtodlingsgård utan djur och att man målmedvetet arbetar för att minska näringsförluster genom att låta marken vara beväxt så långt möjligt. Vår hypotes är att *kväveeffektiviteten i systemet är avgörande för lustgasavgångens storlek*.



Figur 7 Lustgasavgång uppmätt olika år i vårvete odlat i växtföljd efter åkerböna (integrerad odling²² på Logården (söder om Vänern) gödslat med handelsgödsel 117, 128, och 65 kg N för respektive år. Mätning med fältkammare och gaskromatografi utfördes från april 2005 - mars 2006, april 2006 - mars 2007 samt april 2007 - november 2007 (medel över året för 6 kammare och standard error). Mätning under året med vårvete.

Mulljord, också kallad organogen jord, har utpekats att ge särskilt hög lustgasavgång. Sådan jord är en parallell till dikad skogsmark. Mulljordar var från början våtmarker, där det i blötan samlats organiskt material (torv eller gytta) som förmultnar dåligt i brist på syre. Det var under 1800-talets brist på åkermark i Sverige som dikningar påbörjades i stor skala, särskilt stora utdikningar gjordes runt slättsjöar som t.ex. Hornborgasjön i Västergötland och Tåkern i Östergötland. Dikningarna resulterade i ny, ofta bördig åkermark, och av Sveriges åkermark klassas nästan 10 % som organogen. Bördigheten beror på att torven innehåller växnäring som kväve vilket frigörs när dikningen gör att vattnet kan rinna bort och luft kommer ner i jorden och organismer bryter ner det organiska materialet. Tidigare har vi arbetat med mätningar också på en sådan jord. Om marken var permanent gräsbevuxen avgick ca 1 kg N₂O-N ha⁻¹ år⁻¹ men om marken plöjs och stråsäd (korn) odlas ökade avgången till 10 kg N₂O-N ha⁻¹ år⁻¹ (Kasimir Klemetsson et al. 2009). Ännu mycket högre lustgasavgång har vi uppmätt då morötter odlades på marken (ca 26 kg N₂O-N ha⁻¹ avgick från juni till november). Orsaken till att det då blir särskilt hög lustgasavgång är att morötter kräver mycket jordbearbetning vilket frigör kväve. När vi inledde mätningarna trodde vi att återbeskogning skulle innebära låg lustgasavgång eftersom marken lämnats ifred, men den närliggande björkskogen som tidigare varit åker avgav mer lustgas än den odlade jorden, $19,4 \pm 6,7$ kg N₂O-N ha⁻¹ år⁻¹. Träden suger mycket vatten vilket gör att marken inte är så vattenmättad som den annars skulle varit. Syre

²² Integrerad odling är en metod för växtodling där handelsgödsel och bekämpningsmedel används men där miljöpåverkan minimeras i största rimliga utsträckning genom förebyggande metoder.

kommer ner i jorden vilket påskyndar nedbrytning av torven och kvävet kan bli till lustgas. Dessutom kan man iaktta att när det blåser och träden vajar i vinden att den lösa torvjorden höjs och sänks med att träden vajar i vinden vilket också innebär att marken syresätts. En annan orsak till hög lustgasavgång kan ha varit att markens pH-värde var lågt, mellan 5,9 och 3,6 där området med lägst pH-värde avgav 4 gånger mer lustgas än där det var som högst (Weslien et al. 2009). Mätningar på mulljord i Finland visade också en hög lustgasavgång från gräsbevuxen mark eller åker med korn (8 och 11 kg N₂O-N ha⁻¹ år⁻¹) däremot hade skogen en lägre lustgasavgång (4 kg N₂O-N ha⁻¹ år⁻¹) där marken hade ett pH på 4,5 (Maljanen et al. 2003). Men vi kan notera att lustgasavgång från skog i den finska undersökningen bara var något lägre än vad vi uppmätte från området med högt pH i den svenska björkskogen.

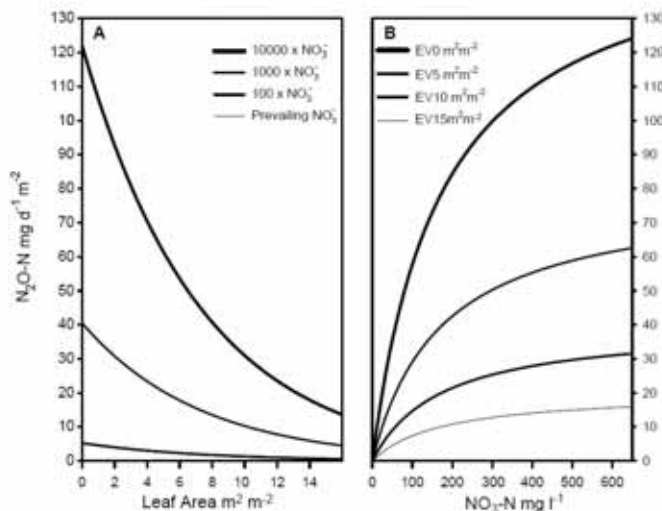
12.3 Gödsling

När de första fältmätningarna gjordes på 1980-talet av lustgasavgång från åkermark var det för att studera effekter av gödsling, eftersom lättillgängligt kväve antogs vara det som ger upphov till lustgas. Och resultaten visade också att avgången ökade strax efter gödselspridningen för att sen avta med tiden. Mätningarna pågick ofta så länge som lustgasavgången var någorlunda hög, några veckor eller månader, och man ansåg sedan att gödslingseffekten avtagit. Bouwman visade att mätningar bör pågå längre tid än så, minst ett år, för att data ska kunna användas för att ta fram emissionsfaktorer (Bouwman 1996). Sammanställningen visade att lustgasavgången ökar linjärt med givan av gödselkväve till åkern där 1,25% av gödselkvävet hamnar i lustgas-molekylen. Men data visade också att åker som inte gödslas har en lustgasavgång i storleksordningen 1 kg N₂O-N ha⁻¹ år⁻¹, vilket Bouwman ansåg vara en bakgrundsemission. Det var den ökning som berodde av gödsling man var intresserad av. I mitten på 1990-talet var datamängden för liten för att dela upp den i oorganisk konstgödsel och organisk stallgödsel. Men nu finns många fler mätningar att tillgå och vi kan konstatera att gödsling med organiska gödningsmedel ger högre lustgasavgång jämfört med oorganiska (handelsgödsel) (Kasimir Klemetsson 2001).

När blöt stallgödsel tillförs blir det de bästa förhållandena för denitrifikation. Rötning av stallgödsel minskar mängden lättillgängliga kolföreningar och kan därför vara en åtgärd för att minska avgången av lustgas (Laughlin et al. 2009). Lantbrukaren kan vara osäker på värdet av gödseln som växtnäringsskälla så därför tillförs både stallgödsel och dessutom handelsgödsel till samma fält. Arbete pågår för att hålla nere gödselnivåerna på grund av EU:s nitratdirektiv där olika regler anger hur spridning av stallgödsel får ske och när. Det finns även tekniska åtgärder för att dosera optimalt giva till olika delar av fältet så att överskotten kan minskas, som till exempel användning av GPS-teknik.

13 Diskussion

Som sagts ovan finns det en konkurrens i marken mellan växter och markorganismer om det tillgängliga kvävet. Ett tight förhållande mellan kvävefrigörande och upptag i växter kan ge mindre lustgas än om kväve blir över och tas om hand av nitrifikation och denitrifikation. Ju mer näringsrik marken är ju större är risken att det blir kväve över för nitrifikation och denitrifikation och därmed bildning av lustgas. Silvan et al. (2005) visade elegant att växterna tar hand om kvävet mer effektivt än lustgasproducerande bakterier, vilket betyder att marken ska vara bevuxen för att begränsa mängden lustgas som avgår till atmosfären.



Figur 8 Från Silvan et al (2005). Modell baserad på uppmätt lustgasavgång i fältförsök med Tuvull där nitrat tillsatts i mängderna 100, 1000, 10 000 gånger kontrollytans koncentration samt en tillsats av acetylen (acetylen hindrar fullständig denitrifikation till N_2). Lustgasen mäter här denitrifikationen (N_2+N_2O). A visar att en stor tillsats av nitrat ger mest denitrifikation men minskar ju mer blad som finns på ytan. B visar att ytan utan växter (EV0) ger högst men ytan med mycket växter (EV15) minst denitrifikation. I samtliga fall ökar denitrifikationen med ökad nitratmängd, och risken för lustgasemission.

Att odla marken och låta växter ta upp kvävet (istället för nitrifikations- och denitrifikationsbakterier) ger mindre lustgas än att låta marken ligga naken, trädad (Duxbury et al. 1982; Wagner-Riddle et al. 1996; Simojoki & Jaakola 2000). Tidigare gavs EU-bidrag för att trädgårdsmarkerna och låta dem ligga nakna vilket troligen ökade lustgasavgången. De trädgårdar som finns nu har växtlighet, oftast gräs. Man kan fråga sig vilka marker som finns tillgängliga för odling av biobränslen i Sverige. Och hur kommer lustgasavgången att påverkas av den förändrade markanvändningen?

Hypotes: Att det på varje mark finns en sammansättning av växtsamhället där tillväxt och slutenhet medför stort kolupptag och minimal N₂O emission

Det är spännande att tänka sig ett växtsamhälle som samtidigt har en stor koldioxidfixering och en liten lustgasavgång. Hur kan det se ut?

En ökad biomassaproduktion kan kompensera för en ökad lustgasavgång om biomassan verkligen ersätter fossila bränslen och/eller att marken binder in kol i stabila humusföreningar som inte snabbt bryts ner igen. Grödans kolatomer kommer med stor sannolikhet att frigöras till luften ganska snart efter skörden, så grödan i sig är varken en sänka (se också avsnittet om skogen) eller en källa för kol, och därför kallas biobränslen för klimatneutrala. Men då har inte lustgasen räknats in. Hur stor ökad lustgasavgång kan accepteras? Politiska beslut avgör, och EU har satt en gräns på att produktion av flytande och gasformiga biobränslen totalt måste spara 35% växthusgaser (CO₂, CH₄ och N₂O) jämfört med fossilbränsle för att klassas som hållbar biobränsleproduktion. Dessutom skärps gränsen så att biobränslen måste spara 50% växthusgaser jämfört med fossilbränslen från 2017.

13.1 Lustgasavgång vid produktion av biobränslen

Att beräkna hur mycket lustgas som olika typer av biobränsleproduktion på olika marker och förhållanden ger upphov till är inte helt lätt. Det första problemet är att vi inte har ett tillförlitligt sätt att beräkna hur mycket lustgas som verkligen blir följden av odlingen, det vill säga ökningen jämfört med en naturlig lustgasproduktion. Vi vet inte heller hur lång tid framöver som avgången påverkas. Och inte heller hur stor del av den på platsen uppmätta eller beräknade avgången som beror av historiska odlingsåtgärder och gödslingar. Om dessutom flera produkter blir följden av odlingen, t.ex. timmer och pappersmassa eller vetekärnor och halm, till vilken produkt ska lustgasavgången belastas eller hur ska den fördelas? Och hur uttrycker man bäst lustgasavgången, per areal eller per produkt? Om man bestämmer sig för produkt, kan man fördela lustgasen antingen per kilo produkt eller till ett ekonomiskt värde som Holmgren et al. (2007) föreslår. Allt detta är intressant, men frågorna är inte helt lätt att besvara, och forskare från olika discipliner skulle nog ge olika svar. Syftet med studien blir avgörande för vad man väljer.

Att ange mängd växthusgaser per areal är det enklaste sättet. Men ofta är det mer aktuellt att kunna jämföra olika sätt att framställa produkten och då är det per produkt som man vill veta emissionens storlek. För skogsproduktion kan det vara en svårighet att skogen producerar många olika produkter - massaved, timmer och Grot - så hur bör skogens emission fördelas? Ur ett naturvetenskapligt perspektiv är ekonomiskt värde inte det bästa, eftersom värdet varierar beroende på många omvärldsfaktorer. Men eftersom det är vanligt att basera på ekonomiskt värde kanske det kan kombineras med "per kilo produkt". Torrvikten eller mängden

kolatomer i produkten är proportionellt till energivärdet, vilket är intressant att allokeras efter när det gäller både energi- och matproduktion.

Eftersom de flesta marker i nuläget är bevuxna och producerar någon slags produkt finns det flera sätt att allokeras emissionen, förslagsvis:

1. Vid byte av energisystem, från fossilbränsle till förnybart, kan emissionerna i biobränslealternativet *jämföras med den vinst som utebliven användning av fossila bränslen ger* (CO₂ som inte tillförs atmosfären). Både produktion i skog och på åker ger ofta flera olika produkter vilka innehåller olika mycket kol och har olika stort ekonomiskt värde. Utsläppen av klimatgaser vid produktionen kan fördelas antingen över produkternas kolinnehåll eller ekonomiska värde, se ovan.

2. Vid odling av biobränsle på åkermark kan emissionerna i biobränslealternativet *jämföras med avgång av klimatgaser i nuvarande matproduktion på den ianspråktaga arealen*. Men om marken i nuläget används för mat/foderproduktion innebär det troligen att denna odling måste ske någon annanstans med troligen lika hög lustgasavgång. Att beräkna avgången på biobränsle odlat i Sverige och glömma bort att mat sedan importeras från Brasilien eller Thailand ger ingen bra analys. Här måste vi nog tänka en runda till. Global matodling bidrar starkt till ökningen av klimatgaser i atmosfären. Man kan också fråga sig vad världens växtproduktion ska användas till och hur vi kan odla resurssmartare.

13.2 Inledande systemanalys

Vete till bränsleetanol

I EU:s RES-direktiv har angetts ett hållbarhetskriterium för flytande och gasformiga biobränslen som inte får övertrasseras om bränslet ska kallas förnybart. Nu får inte produktion av sådant biobränsle avge mer än 65% (100-35) växthusgaser jämfört med diesel och bensin som avger 77-79 g CO₂-ekvivalenter per MJ, vilket innebär utsläpp < ca 50 g CO₂-ekvivalenter per MJ. Hur många gram CO₂-ekvivalenter per MJ etanol orsakar odling av vete till bränsleetanol på grund av lustgasavgång från marken? Jag kan inte här göra en fullständig LCA-analys men vill ändå skissa mycket grovt på vad lustgasen ger. Vetefältet producerar både kärna (60% av energivärdet) från vilken etanol kan produceras och halm (40% av energivärdet) och halmen kan användas på olika vis (Börjesson 2007). Om man antar att halmen inte används för energiändamål, och man därför allokerar odlingens växthusgaser fullt ut till vetekärnan får man följande analys: av energivärdet i vetekärnan går 60.8 % till etanol och resten till drank (restprodukten efter etanoljäsningen) (Bernesson et al. 2006). Varje kg vete ger då etanol med energivärdet 7,93 MJ (Bernesson et al. 2006, Ahlgren et al. 2009). Med en emission på 3 kg N₂O-N ha⁻¹ år⁻¹ måste skörden vara större än 8000 kg kärna per hektar för att komma under EU:s referensvärde för lustgas på 21 g CO₂-ekvivalenter per MJ etanol. Några exempel på vad olika skördar och lustgasemissioner ger omräknat till g CO₂-ekv. MJ⁻¹ ges i tabell 3. Om man vill allokeras energivärdet även till halmen ger det naturligtvis lägre siffror, ca 60% av

de redovisade siffrorna i tabell 3. Här har jag inte tagit med att odlingen också innebär att kväve avgår till vatten och till luft som NH_3 och NO_x , vilket kommer att innebära lustgasavgång i omgivningarna som borde räknas in. Här finns heller inte med växthusgasemissioner vid tillverkning av handelsgödsel, körning med traktor på åker etc. som i så fall skulle adderas.

Tabell 1 Exempel på hur mycket CO₂-ekvivalenter per MJ etanol som lustgasemission i fält orsakar

Skörd Kg kärna ha ⁻¹ , S	kg N ₂ O-N ha ⁻¹ år ⁻¹ , N	g CO ₂ -ekv. MJ ⁻¹
7500	3	23
6000	2	20
5000	1	12
3500	0,2	3

$$\text{g CO}_2\text{-ekv. MJ}^{-1} = 1000 \cdot \text{N} \cdot 44 / 28 \cdot 296 / 7,93 \cdot \text{S}$$

Med IPCC:s metod beräknas emissionen på en enda faktor, kvävegivan, vilket kan vara orättvist för effektiva odlingssystem som gödglas för en hög skörd men ändå har låg emission vilket kan vara möjligt om kvävet är uppbundet i gröda och organiskt material. Det kommer i framtiden att bli viktigt att odla mycket mat, foder och energi på våra åkrar, men med en liten lustgasavgång. Det kräver att marken gödglas, och det är en utmaning för både forskningen och jordbruksnäringen att utveckla jordbruksmetoder som effektivt fångar kvävet i markens organiska material samtidigt som växterna kan ta upp det och lite lustgas bildas. Man kan då inte fortsätta att tänka kvävegivan som enda orsak till lustgasproduktion, utan vi måste identifiera hur odling ser ut som ger stor skörd och lite lustgas. Eftersom flera faktorer än kväve påverkar emissionen, som klimat, jordar och odlingsteknik räcker det oftast inte med mycket enkla funktioner för att beräkna lustgas. I fortsättningen måste därför processbaserad modell användas för beräkningar.

Salix till förbränning

Salix, säl, är ett snabbväxande flerårigt biobränsle som odlas på åkermark. Skörden är mekaniserad och sker med 3 till 5 års mellanrum. När Salix är etablerad är den effektiv på att ta upp näring ur marken och därför har ett tiotal reningsverk i Sverige salixodlingar som tillsammans med denitrifikation kan rena avloppsvatten från kväve (Aronson et al. 2007). Men det finns risk för stor lustgasavgång. En studie av lustgasavgång gjordes för några år sedan vid Enköpings reningsverk där 25% av det inkommande kvävet till reningsverket är kvar efter reningen. Detta kväverika vatten användes till bevattning av salixodlingar och årligen tillfördes 150 kg N ha⁻¹ till odlingarna, vilket är i samma storleksordning som kvävegödsling i jordbruket. Tillväxten av salix var mellan 6,3 och 17,0 ton torrsbstans per hektar och år beroende på årsmån och ålder på skotten. Lustgas mättes med mikro-meteorologisk teknik med en mast över salixodlingen. Under ett år, juni 2003 till juni 2004 avgick 8,9 kg N₂O-N ha⁻¹ år⁻¹, omvandlat till koldioxidekvivalenter innebär det att ca 20 g CO₂ ekvivalenter avgår per MJ skördad salix (pers.com. Leif Klemedtsson).

Energibalans och lustgas

Energibalansanalys av olika bränslen har visat att högst energiskörd per insatt energimängd i produktionen erhålls för skogsbränslen, följt av halm och energiskog på åkermark (Berndes et al. 2007). Avgörande är att skörden blir stor och att lite hjälpen energi behöver användas. Mer energi åtgår om bränslet måste förädlas till bilbränsle där nettoutbytet energi i drivmedel som etanol från vete är mellan 1-2 ggr insatsenergin, alltså bara lite mer energi erhålls i etanolen än vad som åtgått vid produktionen. Om också lustgas adderas till analysen blir det en utmaning att komma under EU:s gräns för hållbarhet då det gäller etanol från vete. Däremot odling av Salix för produktion av dimetyleter och metanol ger 12 gånger mer energi än vad som åtgått vid produktionen (Berndes et al. 2007). Eftersom salixodling är ett system som också kan ge lägre lustgasavgång kan utsläpp av klimatgaser här totalt sett bli lågt.

Varje produktionsändring i lantbruk eller skogsbruk kan få effekter på lustgasavgången, på plats eller i omgivande ekosystem. I en systemanalys bör även inräknas den påverkan på lustgasavgången som förflyttning av den tidigare produktionen till annan plats i Sverige eller utomlands ger. Påverkan kan också ligga kvar flera decennier, varför även tidsfaktorn bör inräknas. Produktion av mat, skogsråvara och bioenergi kommer alltid att avge en del lustgas men vi kan lära oss odla bättre. Systemanalytiska studier av olika scenarier behöver göras, men för att sådana ska bli bra krävs att vi också kan beräkna lustgas beroende på grödor, faktorer i fält samt andra omgivningsfaktorer. För en genomgång av olika beräkningsmetoder hänvisas till rapport från energimyndigheten (Åsa Kasimir Klemedtsson, Energimyndigheten rapport från projekt P32120-1 2009).

14 Referenser

- Ahlgren S., Hansson P.-A., Kimming M., Aronsson P. & H. Lundqvist (2009) Utsläpp av växthusgaser vid odling av grödor för biodrivmedel samt produktion av biogas från gödsel. Sveriges Lantbruksuniversitet, Uppsala. Dnr ua 12-4067/08
- Aronsson P., Weih M. & I. Åhman (2007) Salixodling ger mervärden – förutom energi. i *Bioenergi – till vad och hur mycket?* Formas Fokuserar. s. 247-260
- Bakken L.R. & M. A. Bleken (1998) Temporal aspects of N-enrichment and emission of N₂O to the atmosphere. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* **52**: 107-121.
- Beare M.H., Gregorich E.G. & P. St-Georges (2009) Compaction effects on CO₂ and N₂O production during drying and rewetting of soil. *Soil Biology and Biochemistry* **41**: 611-621.
- Berndes G., Börjesson P., Rosenqvist H. & S. Karlsson. (2007) Bioenergi: resurseffektivitet och bidrag till energi- och klimatpolitiska mål. Uppdrag av Energimyndigheten.
- Berndes G. & L. Magnusson (2006) The future of bioenergy in Sweden – Background and summary of outstanding issues. Statens Energimyndighets förlag forlaget@stem.se
- Bernesson S., Nilsson D. & P.A. Hansson (2006) A limited LCA comparing large- and smallscale production of ethanol for heavy engines under Swedish conditions. *Biomass & Bioenergy* **30**: 46-57
- Bouwman A.F. (1996) Direct emissions of nitrous oxide from agricultural soils. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* **46**: 53-70.
- Brumme R., Borker W. & S. Finke (1999) Hierarchical control on nitrous oxide emissions in forest ecosystems. *Global Biogeochemical Cycles* **13**: 1137-1148.
- Butterbach-Bahl K. & H. Papen (2001) Do N₂O-emissions from N-saturated forest soils partly/fully compensate for CO₂-sequestration? American Geophysical Union, Fall meeting 2001, abstract #B42E-03. <http://adsabs.harvard.edu/abs/2001AGUFM.B42E..03B>
- Börjesson P. (2007) Produktionsförutsättningar för biobränslen inom svenskt jordbruk. Rapport nr 61, Lund Tekniska Högskola.
- Crutzen P.J., Mosier A.R., Smith K.A. & W. Winiwarter (2008) N₂O release from agro-biofuel production negates global warming reduction by replacing fossil fuels. *Atmospheric Chemistry and Physics* **8**: 389-395.

- Duxbury J.M., Bouldin D.R., Terry R.E. & R.L. Tate (1982) Emission of nitrous oxide from soils. *Nature* **298**: 462-464.
- Fiberskog <http://www-fiberskog.slu.se/Dokumentation/Omgodsling/omgodsling.htm>
- Firestone M.K. & E.A. Davidson (1989) Microbial basis of NO and N₂O production and consumption in soil. pp 7-21 in M.O. Andreae & D.S. Schimel (Eds) Exchange of trace gases between terrestrial ecosystems and the atmosphere. John Wiley & Sons Ltd., Chichester.
- Forster P., Ramaswamy V., Artaxo P., Bernsten T., Betts R., Fahey D.W., Haywood J., Lean J., Lowe D.C., Myhre G., Nganga J., Prinn R., Raga G., Schultz M. & R. Van Dorland (2007) Changes in Atmospheric Constituents and Radiative Forcing. *In: Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Solomon S., Qin D., Manning M., Chen Z., Marquis M., Averyt K.B., Tignor M. & H.L. Miller (eds)] Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Freibauer A. & M. Kaltschmitt (2003) Controls and models for estimating direct nitrous oxide emissions from temperate and sub-boreal agricultural mineral soils in Europe. *Biogeochemistry* **63**: 93-115.
- Galloway J.N. & E.B. Cowling (2002) Reactive nitrogen and the world: 200 years of change. *Ambio* **31**: 64-71.
- Galloway J.N., Dentener F.J., Capone D.G. Boyer E.W., Howarth R.W, Seitzinger S.P., Asner G.P., Cleveland C.C., Green P.A., Holland E.A., Karl D.M., Michaels A.F., Porter J.H., Townsend A.R. & C.J. Vörösmarty (2004) Nitrogen cycles: past, present, and future. *Biogeochemistry* **70**: 153-226.
- Galloway J.N., Schlesinger W.H., Levy H., Michaels A. & J.L. Schnoor (1995) Nitrogen fixation: anthropogenic enhancement-environmental response. *Global Biogeochem. Cycles* **9**:235-252
- Holmgren K., Eriksson E., Olsson O., Olsson M., Hillring B. & M. Parikka (2007) Biofuels and climate neutrality – system analysis of production and utilisation. Elforsk rapport 07:35
- IPCC, 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Vol. 4 Agricultural, Forestry and Other Land Use. Tillgänglig: <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/vol4.html>
- IPCC, (2007) Climate Change 2007: Synthesis Report. http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/syr/ar4_syr.pdf
- Janssens I.A. & S. Luyssaert (2009) Nitrogen's carbon bonus. *Nature Geoscience* **2**: 318-319.

- Kasimir Klemedtsson Å., Klemedtsson L., Berglund K., Martikainen P., Silvola J. & O. Oenema (1997) Greenhouse gas emissions from farmed organic soils: a review. *Soil Use and Management* **13**: 245-250.
- Kasimir Klemedtsson Å. (2001) Metodik för skattning av jordbrukets emissioner av lustgas – Underlag för Sveriges nationalrapport till Klimatkonventionen. Naturvårdsverkets förlag, rapport 5170
- Kasimir Klemedtsson Å., Weslien P. & L. Klemedtsson (2009) Methane and nitrous oxide fluxes from a farmed Swedish Histosol. *European Journal of Soil Science* **60**: 321-331.
- Kesik M., Ambus P., Baritz R., Brüggemann N., Butterbach-Bahl K., Damm M., Duyzer J., Horváth L., Kiese R., Kitzler B., Leip A., Li C., Pihlatie M., Pilegaard K., Seufert G., Simpson D., Skiba U., Smiatek G., Vesala T. & S. Zechmaeister-Bolternstern (2005) Inventories of N₂O and NO emissions from European forest soils. *Biogeosciences* **2**: 353-375.
- Klemedtsson L. Kasimir Klemedtsson Å. Moldan F. & P. Weslien (1997) Nitrous oxide emission in Swedish forest soils in relation to liming and simulated increased N-deposition. *Biology and Fertility of Soils*. **25**: 290-295.
- Klemedtsson L., von Arnold K., Weslien P. & P. Gundersen (2005) Global Change Biology **11**: 1142-1147.
- Kolet, klimatet och skogen – så kan skogsbruket påverka. (2008) Lustra, Mistrafinansierat forskningsprogram
<http://www.mistra.org/lustraweb>
- Lamers M., Ingwersen J. & T. Streck (2007) Nitrous oxide emissions from mineral and organic soils of a Norway spruce stand in South-West Germany. *Atmospheric Environment* **41**: 1681-1688
- Laughlin R.J., Rütting T., Müller C., Watson C.J. & R.J. Stevens (2009) Effect of acetate on soil respiration, N₂O emissions and gross N transformations related to fungi and bacteria in grassland soil. *Applied soil ecology* **42**: 25-30.
- Le Treut H.R. et al. (2007) Historical overview of climate change, in *Climate Change 2007: The Physical Basis*. Contribution of working group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel of Climate Change. (Solomon S.D. et al. eds.) Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Li C., Aber J.D., Stange F., Butterbach-Bahl K. & H. Papen (2000) A process-oriented model of N₂O and NO emissions from forest soils. 1. Model development. *Journal of Geophysical Research* **105**: 4369-4387.
- Luyssaert S., Schulze E.-D., Börner A., Knohl A., Hessenmöller D., Law B.E., Ciais P. & J. Grace (2008) Old-growth forests as global carbon sinks. *Nature* **455**: 213-215.

- Maljanen M., Liikanen A., Silvola J. & P.J. Martikainen (2003) Nitrous oxide emissions from boreal organic soil under different land-use. *Soil Biology and Biochemistry* **35**: 689-700.
- Martikainen P.J., Nykänen H., Crill P. & J. Silvola (1993) Effect of a lowered water table on nitrous oxide fluxes from northern peatlands. *Nature* **366**: 51-53.
- Minkinen K., Korhonen R., Savolainen I. & J. Laine (2002) Carbon balance and radiative forcing of Finnish peatlands 1900-2100 – the impact of forestry drainage. *Global Change Biology* **8**: 785-799.
- Nordborg F., Nilsson U. & G. Örlander (2002) Inversmarkberedning – snabbare plantetablering och mer näring till plantan. Fakta Skog Nr.9 Sveriges Lantbruksuniversitet, www.slu.se/forskning/fakta/
- Norman J., Jansson P.-E., Farahbakhshazad N., Butterbach-Bahl K., Li C. & L. Klemedtsson (2008) Simulation of NO and N₂O emissions from a spruce forest during a freeze/thaw event using an N-flux submodel from the PnET-N-DNDC model integrated to CoupModel. *Ecological Modelling* **216**: 18-30.
- Robertson G.P. & P.M. Groffman (2007) Nitrogen transformations in Soil Microbiology, Ecology, and Biochemistry. 3rd ed. Paul E.A. (editor) Academic Press, Amsterdam.
- Prather M., Ehhl D. et al. (2001) Atmospheric chemistry and greenhouse gases. In: *Climate Change 2001: The Scientific Basis*. Eds. Houghton J.T., Ding Y., Griggs D.J. et al. Cambridge University Press, Cambridge UK. 239-287.
- Proposition från den svenska regeringen ”En skogspolitik i takt med tiden” (2008), Regeringens proposition 2007/08:108.
- Ravishankara A.R., Daniel J.S. & R.W. Portmann (2009) Nitrous oxide (N₂O): The dominant ozone-depleting substance emitted in the 21st century. *Science* 31 August 2009 (DOI: 10.1126/science.1176985)
- Reay D.S., Dentener F., Smith P., Grace J. & R.A. Feely (2008) Global nitrogen deposition and carbon sinks. *Nature geoscience online publication* www.nature.com/naturegeoscience
- Rochette P., Angers D.A., Bélanger G., Chantigny M.H., Prévost D. & G. Lévesque (2004) Emissions of N₂O from Alfalfa and Soybean Crops in Eastern Canada. *Soil Science Society of America Journal* **68**: 493-506.
- Ruser R., Flessa H., Russow R., Schmidt G., Buegger F. & J.C. Munch (2006) Emission of N₂O, N₂ and CO₂ from soil fertilized with nitrate: effect of compaction, soil moisture and rewetting. *Soil Biology and Biochemistry* **38**: 263-274.
- Schulte-Bisping H., Brumme R. & E. Priesack (2003) Nitrous oxide emission inventory of German forest soils. *J. Geophys. Res.* 108 (D4) 4132.

- Shoun H., Kim D.H., Uchiyama H. & J. Sugiyama (1992) Denitrification by fungi. *FEMS Microbial letters*. **94**: 277-281.
- Silvan N., Tuittila E-S., Kitunen V., Vasander H. & J. Laine (2005) Nitrate uptake by *Eriophorum vaginatum* controls N₂O production in a restored peatland. *Soil Biology & Biochemistry* **37**: 1519-1526.
- Simojoki A. & A. Jaakola (2000) Effect of nitrogen fertilisation, cropping and irrigation on soil composition and nitrous oxide emission in a loamy clay. *European Journal of Soil Sciences* **51**: 413-424.
- Sitaula B.K., Hansen S., Sitaula J.I.B. & L.R. Bakken (2000) *Chemosphere – Global Change Science* **2**: 367-371.
- Snyder C.S., Bruulsema T.W., Jensen T.L. & P.E. Fixen (2009) Review of greenhouse gas emissions from crop production systems and fertilizer management effects. *Agriculture, Ecosystems and Environment* **133**: 247-266.
- Stehfest E. & L. Bouwman (2006) N₂O and NO emission from agricultural fields and soils under natural vegetation: summarizing available measurement data and modelling of global emissions. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* **74**: 207-228.
- Sweden's National Inventory Report (2007) Swedish Environmental Protection Agency. Stockholm, Sweden www.naturvardsverket.se/bokhandeln
- Wagner-Riddle C., Thurtell G.W., King K.M., Kidd G.E. & E.G. Beauchamp (1996) Nitrous oxide and carbon dioxide fluxes from a bare soil using a micrometeorological approach. *Journal of Environmental Quality* **25**: 898-907.
- Weslien P., Kasimir Klemetsson Å., Börjesson G. & L. Klemetsson (2009) Strong pH influence on N₂O and CH₄ fluxes from forested organic soils. *European Journal of Soil Science* **60**: 311-320.
- Von Arnold K., Hånell B., Stendahl J. & L. Klemetsson (2005) Greenhouse gas fluxes from drained organic forestland in Sweden. *Scandinavian Journal of Forest Research* **20**: 400-411.
- Växtpressen nr 1 2008
http://fert.yara.se/library/attachments/media_room/publications/VP08_1ny.pdf
- Yashiro Y., Kadir W.R., Okuda T. & H. Koizumi (2008) The effects of logging on soil greenhouse gas (CO₂, CH₄, N₂O) flux in a tropical rain forest, Peninsular Malaysia. *Agricultural and Forest Meteorology* **148**: 799-806.
- Coup-modellen kan laddas ner från denna internetsida:
<http://www.lwr.kth.se/vara%20datorprogram/CoupModel/index.htm>
- IPCC emissionsfaktorer databas:
<http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/EFDB/main.php>



Vårt mål – en smartare energianvändning

Energimyndigheten är en statlig myndighet som arbetar för ett tryggt, miljövänligt och effektivt energisystem. Genom internationellt samarbete och engagemang kan vi bidra till att nå klimatmålen.

Myndigheten finansierar forskning och utveckling av ny energiteknik. Vi går aktivt in med stöd till affärsidéer och innovationer som kan leda till nya företag.

Vi visar också svenska hushåll och företag vägen till en smartare energianvändning.

Alla rapporter från Energimyndigheten finns tillgängliga på myndighetens webbplats www.energimyndigheten.se

