

## KRETSLOPP

### Kol, Kväve, Syre, Mineralämnena, Vatten Övergödning, Mark, Sjöar, Hav Lantbruk, Transporter

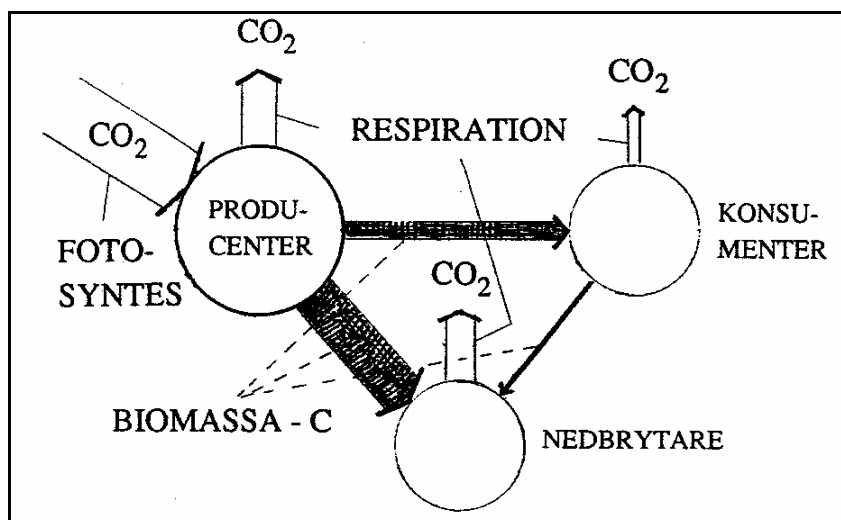
De biogeokemiska kretsloppen för kol, kväve och andra grundämnen är centrala för förståelsen av miljöproblem som kopplar till olika störningar av kretsloppen. Detta avsnitt ger basfakta som sedan belyses med eutrofiering som exempel.

Dokumentet svarar mot kapitlen 2 (7 s) och 4 (5 s) i kursboken Kemisk Miljövetenskap. Boken publiceras under 2008 på nätet i tolv delar som alla nås via denna översiktslänk.

<http://publications.lib.chalmers.se/records/fulltext/72639.pdf>

Göran Petersson, Professor i Kemisk Miljövetenskap  
Kemi- och Bioteknik, Chalmers, 2008

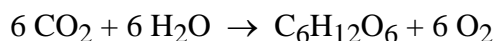
## BIOGEOKEMISKA KRETSLOPP



### Kolets kretslopp (biotisk del)

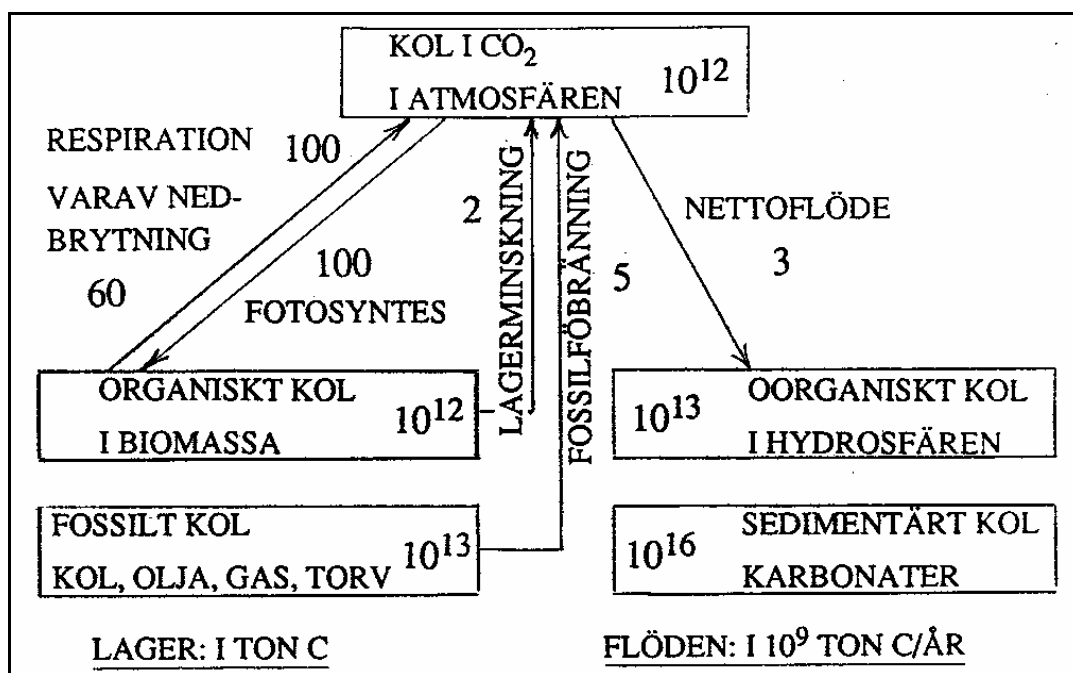
**Biomassafloeden:** Kol utgör ungefär halva vikten av torr biomassa. Viktiga beståndsdelar i biomassan med en hög andel kol är cellulosa, hemicellulosa, stärkelse, lignin, proteiner och lipider. Huvuddelen av producenternas biomassa går till nedbrytning, men andelen varierar starkt mellan olika ekosystem.

**Fotosyntes:** Fotosyntesen överför koldioxid från atmosfären (och från hydrosfären för växter under vatten) till organiskt bundet kol i biomassa. Primärt bildas sockerarten *glukos*.



Organismernas metabolism överför kol från glukos till andra kolinnehållande komponenter i biomassan. Fotosyntesen sker i växternas gröna delar i membranrika cellorganeller som kallas *kloroplaster*. Fotosyntesen är beroende av kväverika molekyler av *klorofyll* som har *magnesium* som en centralatom. För högre växter diffunderar koldioxid in från luften och syre ut genom *klyvöppningar*.

**Respiration (andning):** Aeroba organismer frigör energi för kontinuerliga livsprocesser via metaboliska reaktioner i *citronsyracykeln* (CO<sub>2</sub> frigörs) och *andningskedjan* (O<sub>2</sub> förbrukas). Bruttoreaktionen blir omvändningen till fotosyntesen. Biomassaökningen från växternas fotosyntes balanseras av den totala biomassaförbrukningen från respiration för producenter, konsumenter och nedbrytare.



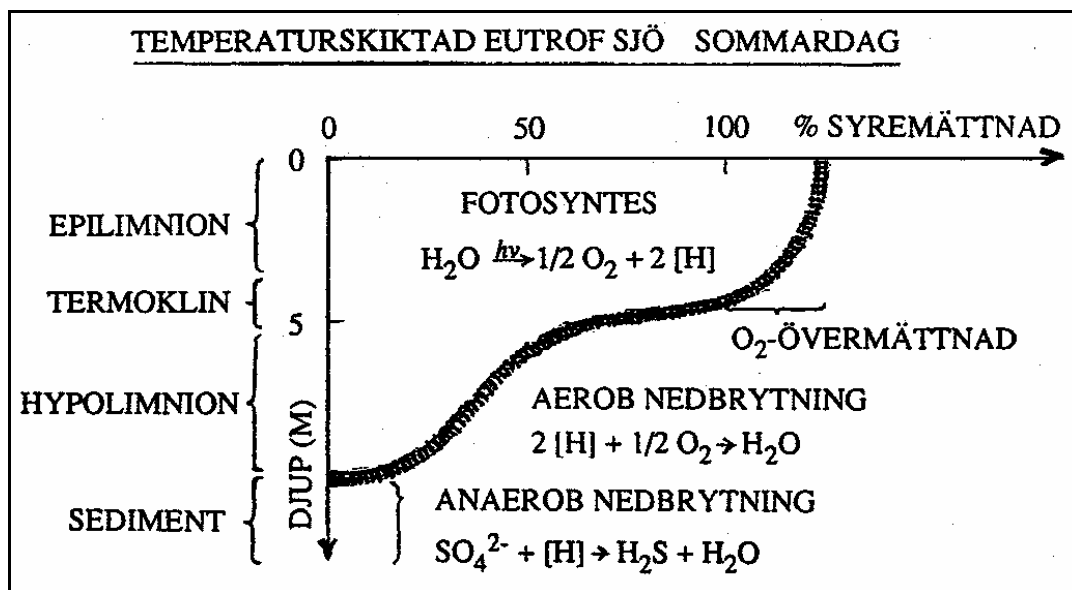
### Kolets kretslopp (abiotisk del)

**Kolets förekomst:** Jordens dominerande kolförekomst utgörs av karbonater i sedimentära bergarter. Betydande kolmängder finns också långtidslagrade som lösta karbonater i haven och som fossilt organiskt kol. Summamängden organiskt kol i organismer är av samma storleksordning som mängden kol i atmosfärens koldioxid. Fotosyntesen omsätter årligen mer än 10% av atmosfärens koldioxidinnehåll. Den begränsade mängden koldioxid gör atmosfärens koldioxidbalans känslig för störningar.

**Fossila bränslen:** Förbränning av kol, olja, fossil gas (naturgas) och i viss mån torv innebär att människan tillför atmosfären koldioxid från geologiskt lagrat kol.

**Lagerminskning av biomassa och humus:** Skövling av regnskogar och annan vegetation som inte kan återhämta sig innebär en nettoöverföring av kol från biomassa till koldioxid i atmosfären (via förbränning eller nedbrytning). Moderna jordbruksmetoder som minskar humusmängden i jorden innebär en liknande överföring av organiskt kol till koldioxid.

**Nettoupptag av koldioxid i haven:** Nettotillförseln av koldioxid till atmosfären upptas till ungefär hälften av haven som ett nettotillskott från utbytet av koldioxid mellan atmosfär och hydrosfär. Återstoden leder till en ökning av atmosfärens koldioxidhalt.



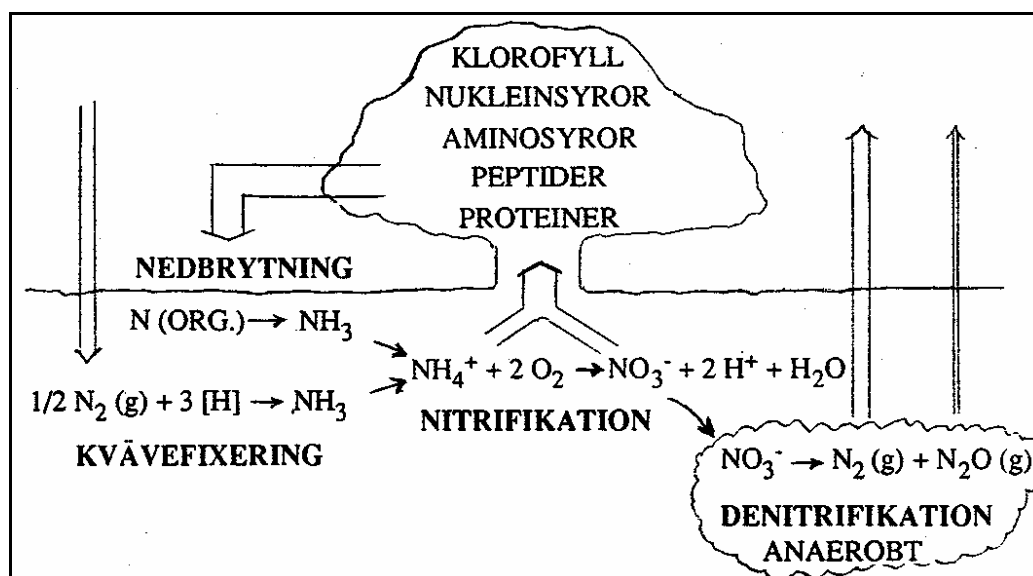
### Syrets kretslopp

Luft innehåller 21% O<sub>2</sub>, medan O<sub>2</sub>-rikt vatten innehåller 0,001% O<sub>2</sub> (10 mg O<sub>2</sub>/l). Tillgång på syre är därför ofta en kritisk och begränsande faktor för organismerna i vatten, men inte för organismer som omges av luft.

**Fotosyntes och respiration:** Fotosyntesens ljuskrävande basreaktion är spjälkningen av vatten till O<sub>2</sub> och biologiskt aktiverade väteatomer. Stilla och ljusa vår- och sommardagar kan fotosyntesen medföra syreövermättnad i högproduktiva ytvatten. Respirationen innebär att aktiverade väteatomer reagerar med O<sub>2</sub> till vatten under effektiv utvinning av energi i den enzymatiska andningskedjan.

**Syrefattiga bottenar:** Då nedbrytning i en vattenmiljö förbrukar mer syre än vad som tillförs från luften via syrerika ytvattenskiikt uppstår syrebrist. Efterhand som syrehalten sjunker i bottenvattnet dör allt fler aeroba organismer och anaeroba nedbrytare tar över. Man talar då om döda bottenar som förekommer i eutrofierade sjöar. Sediment är ofta naturligt anaeroba på grund av anhopning av syreförbrukande dött material.

**Anaerob nedbrytning:** De anaeroba nedbrytarna reducerar i stället för syre ofta sulfatjoner varvid *svavelväte* (H<sub>2</sub>S) bildas. Svavelvätelukt är därför en indikation på en anaerob miljö. Den anaeroba nedbrytningen går långsammare och ofullständigare och utvecklar mycket mindre energi än den starkt exoterma aeroba oxidationen med O<sub>2</sub>.



### Kvävets kretslopp (biotisk del)

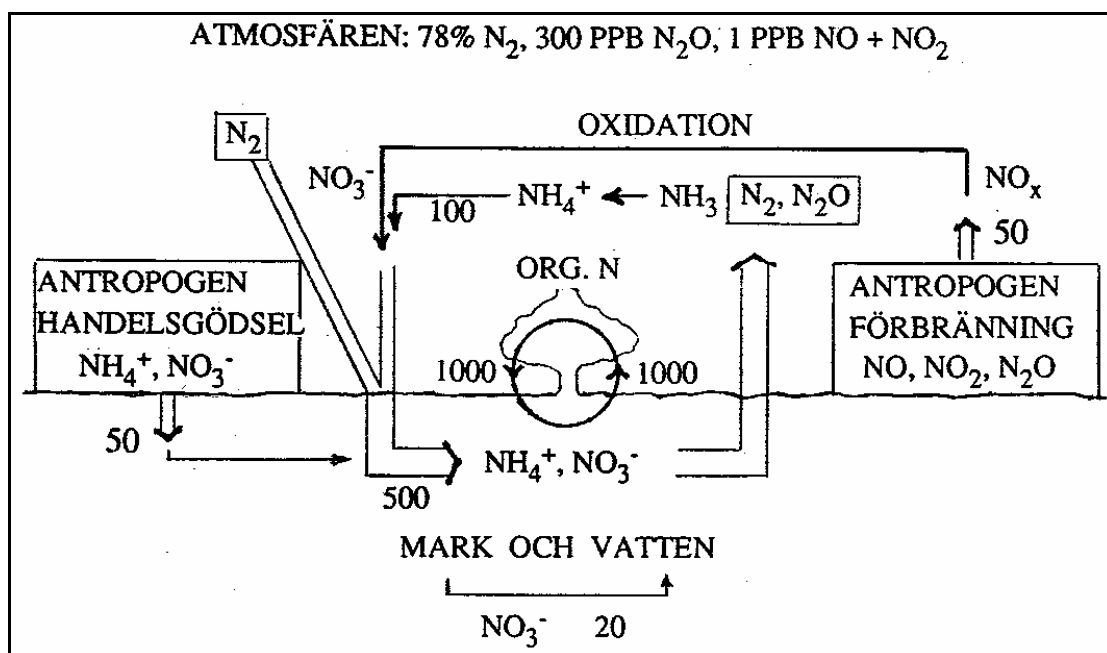
**Producenternas kväveupptag:** Växter tar upp både *ammonium* och *nitrat* som kvävenäring. I metaboliska reaktioner bildas aminosyror som polymeriseras till peptider och proteiner i form av bl a viktiga enzymer. Tillgången på kvävenäring är normalt produktionsbegränsande i landekosystem och i marina ekosystem.

**Nedbrytning:** Destruenterna överför successivt den döda biomassans kväve till ammoniak som vid normala pH-värden i humusskikt och sediment direkt övergår till ammoniumjoner. En stor del av kvävet långtidsbinds dock i svårnedbrytbara organiska humuskomponenter.

**Nitrifikation:** Ammonium oxideras i aeroba miljöer mikrobiellt av *nitrifikationsbakterier* till nitrat via nitrit. Reaktionen är försurande.

**Denitrifikation:** I anaeroba miljöer reduceras nitrat till *kvävgas* och en del *dikväveoxid* av *denitrifikationsbakterier*. Detta motverkar kväveeutrofiering (kväveövergödning) och kan antas ha räddat Östersjön och våra övriga kusthav från att bli ännu värre drabbade än vad som nu är fallet.

**Kvävefixering:** Arter inom ärtväxtfamiljen kan genom *rotsymbios* med kvävefixerande bakterier klara sin egen och jordens försörjning med växttillgänglig kvävenäring. Ekologisk odling utnyttjar växelbruk med *klövervallar* och andra ärtväxter i stället för kväve från handelsgödsel. Vissa arter av bakterier och blågröna alger utför *asymbiotisk kvävefixering*, men med mycket lägre kvävetillskott per arealenhet.



### Kvävets kretslopp (abiotisk del)

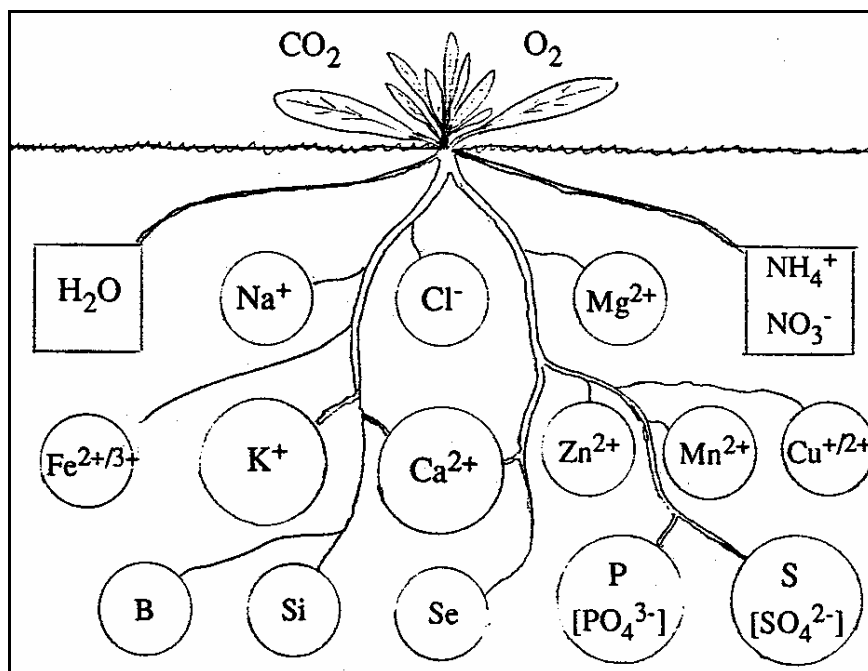
Figuren anger storleksordningen för globala kväveflöden räknade i 10<sup>6</sup> ton kväve per år.

**Det centrala kretsloppet:** Producenternas omsättning av ammonium och nitrat till organiskt kväve är ett centralt stort kväveflöde. Det motsvaras av nedbrytarens överföring av organiskt kväve till ammonium, som genom nitrifikation delvis överförs till nitrat.

**Antropogena kväveflöden:** Människan ingriper i kvävet kretslopp på två viktiga och helt olika sätt. Genom *förbränning* av fossila bränslen och biobränslen överförs luftkväve (N<sub>2</sub>) och bränslekväve till atmosfären som kväveoxider. Genom framställning av *handelsgödsel* överförs ammonium och nitrat till landekosystemens jordbruksmarker.

**Kväveflöden till och från atmosfären:** Denitrifikation och ammoniakavdunstning överför kväve till atmosfären. Kväveoxiderna NO och NO<sub>2</sub> oxideras atmosfärkemiskt till nitrat. Nedfall av nitrat och ammonium samt kvävefixering till ammonium överför kväve från atmosfären till land och vatten. Landekosystem och marina ekosystem bidrar ungefär lika mycket till såväl det centrala kretsloppet som till denitrifikation och kvävefixering.

**Nitratläckage:** Kväveläckage från landområden till vatten sker nästan enbart i form av nitrat eftersom ammonium binds till markpartiklar.

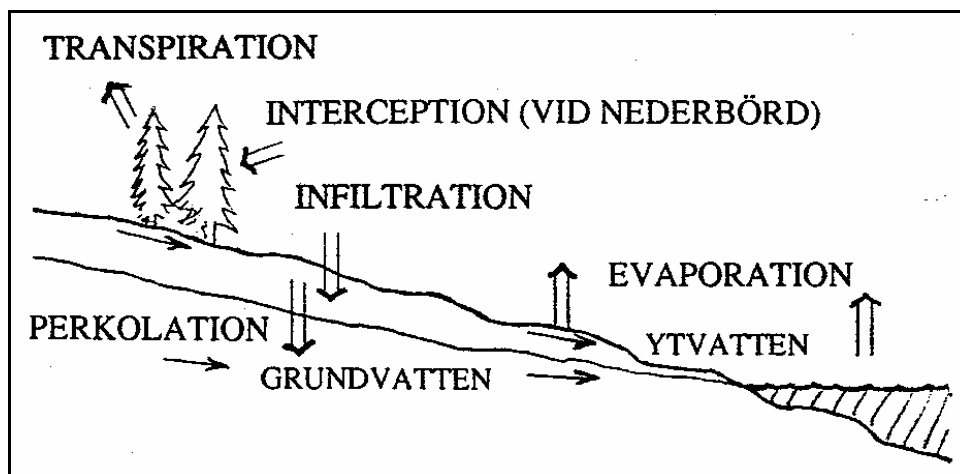


### Mineralämnenas kretslopp

Figuren visar de viktigaste för organismerna *essentiella* (livsnödvändiga) grundämnena. Stor tillgång krävs för *makronäringsämnen* (N, P, K, S, Ca) till vilka även C, O och H kan föras. Behovet är betydande även för Mg, Na och Cl. *Mikronäringsämnen* (Se, B, Si, Zn, Fe, Mn, Cu m fl) erfordras i små mängder. Varje art har sina egna *optimumkurvor* med avseende på tillgången för vart och ett av de essentiella mineralämnena. För mycket eller för litet av ett eller flera ämnen minskar populationens livskraft.

**Abiotisk förekomst:** Metaller är växttillgängliga främst i form av figurens joner. Järn och koppar redoxpendlar mellan joner med olika laddning. Försurningen ökar urlakningen av metalljoner från mark vilket kan ge brist på bl a magnesium. Skandinaviens jordar är fattiga på selen och i vissa områden på bor.

**Biotisk förekomst:** I *cytoplasma* (cellvätska) har kaliumjoner en viktig roll. Fosfatgrupper ingår bl a i de biologiska molekyler som svarar för cellens energitransport. Svavel ingår i vissa essentiella aminosyror. Kalcium och fosfat bygger upp djurens skelett. Magnesium utgör centralatom i klorofyll och järn i blodets hemoglobin. Spårämnesmetaller som zink och koppar är centralatomer i viktiga enzymer. De olika grundämnenas biologiska funktioner är totalt sett mycket komplexa.



## Vattnets kretslopp

**Evaporation och transpiration:** Vattenavdunstning från mark och vattensystem kallas evaporation. Avdunstning från vegetation och andra levande organismer kallas transpiration.

**Nederbörd:** Den del av nederbörden som direkt tas emot av vegetation kallas interception. En del tas upp av växterna och en del inte (krondropp från träd). Nederbörd som når marken rinner av som ytvatten, infiltrerar ytliga markskikt eller perkolerar ned till grundvatten.

**Humitt och aritt klimat:** Om nederbörden är större än evaporation plus transpiration sägs klimatet vara humitt. I motsatt fall sägs det vara aritt.

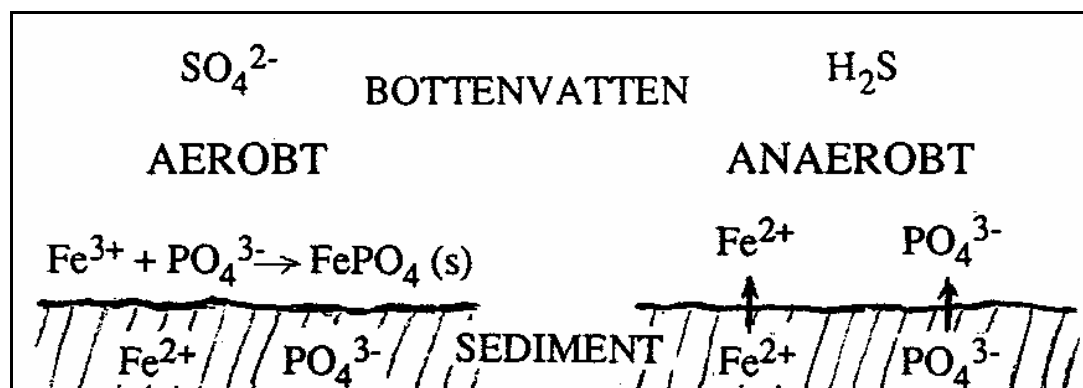
**Grundvatten:** Upp till en viss med tiden varierande nivå (grundvattennivå) är alla porer i marken fyllda med vatten.

**Vatten som transportör:** De flesta mineralämnen och många organiska ämnen transporteras med vatten i ekosystem och organismer i löst eller suspenderad form. I ett träd transporteras vatten med mineralämnen upp genom stammens ved, medan organisk näring transporteras ned från krona till rötter genom innerbarken. I däggdjuren fungerar vattnet som transportör i blodomloppet. Vatten är också själva livets medium i cellernas cytoplasma.

**Vätets kretslopp:** Vätets kretslopp är betydelsefullt för alla levande organismer och följer till stora delar vattnets. I fotosyntesens första ljusberoende steg överförs väte från vatten till organiska molekyler. I andningskedjans slutsteg kopplas organiskt väte återigen till syre ( $O_2$ ) under bildning av vatten.



## EUTROFIERING



### Limnisk fosforeutrofiering

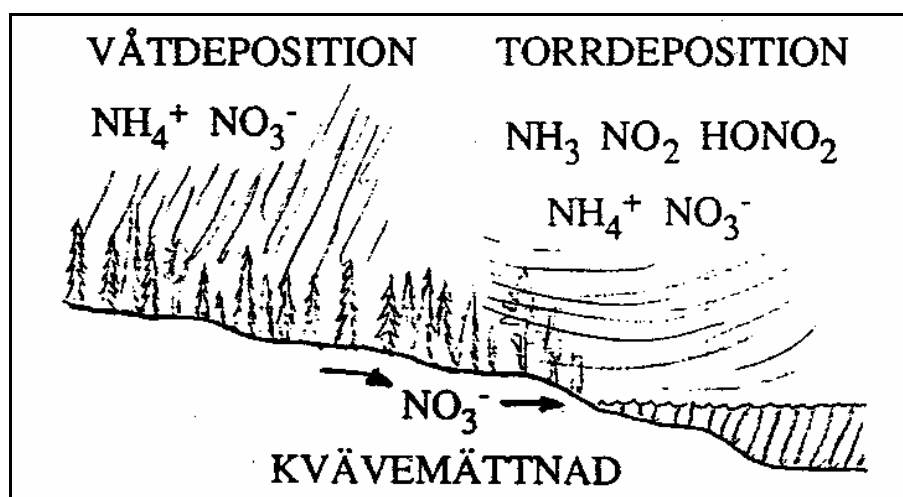
Övergödning av sjöar och vattendrag på grund av fosfatutsläpp med hushållsavlopp var ett av de miljöproblem som tidigast identifierades. Det är också ett av de svenska miljöproblem som har åtgärdats.

**Fosfor produktionsbegränsande:** I de limniska ekosystemen (till skillnad från de marina och terrestra) är oftast tillgången på tillgängligt *fosfat* produktionsbegränsande. Antropogena fosfattillskott ökar därför produktion och igenväxning kraftigt, och den ökade nedbrytningen gör att syrebrist och bottendöd blir vanligare. Fosfat tas upp av fytoplankton och strandväxter och frigörs när växterna dör åter av nedbrytare.

**Järnfosfatbarriären:** I en sjö med aerobt bottenvatten blir utfällning av svårlösligt  $\text{FePO}_4$  en barriär mot utlösning av fosfat från det anaeroba sedimentet till vattnet. När bottenvattnet blir anaerobt reduceras  $\text{Fe}^{3+}$  till  $\text{Fe}^{2+}$  som inte faller ut fosfat. Utläcket av växttillgängligt fosfat till vattnet ökar kraftigt, och ekosystemet råkar in i en ond cirkel som är svår att bryta.

**Sjörestaurering:** En metod för att restaurera fosforeutrofierade sjöar är att ta bort fosfor genom att ta bort växtbiomassa och/eller sediment.

**Reningsverk:** Antropogena fosfatutsläpp kommer från toaletter och tvättmedelsanvändning. Satsning på reningsverk med mekanisk och biologisk rening samt kemisk utfällning av fosfat är ekonomiskt sett en av Sveriges största miljöinvesteringar.



### Markeutrofiering och kvävemättnad

Landekosystem är naturligt anpassade till att fungera med växttillgängligt kväve (ammonium och nitrat) som produktionsbegränsande faktor. Kvävebristen leder då till att producenterna tar upp kvävenäringen mycket effektivt.

**Markrörlighet:** Ammonium binds till markens negativt laddade kolloidpartiklar. Nitrat är däremot lätt rörligt i marken. Ammonium överförs till nitrat genom nitrifikation.

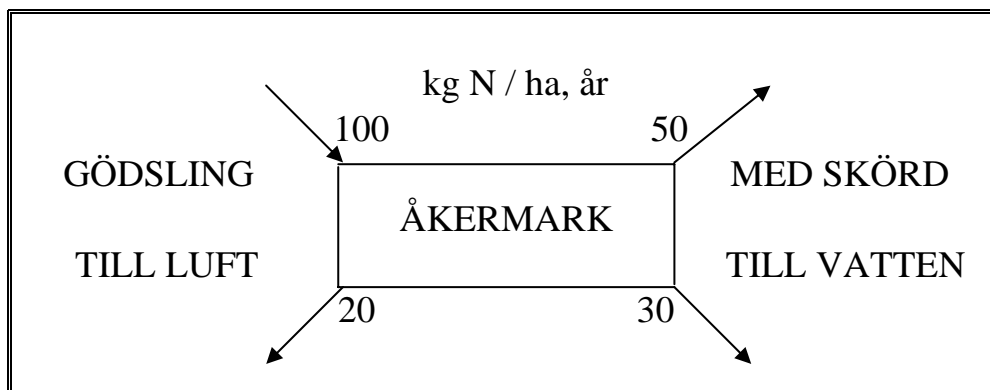
**Kvävemättnad:** När kvävetillskottet till marken är så stort att växterna inte kan ta upp allt börjar nitrat läcka ut med markvattnet. Man talar då om att marken har blivit kvävemättad eller kväveövermättad. I Sydvästsveriges skogar överskrider kvävedepositionen allmänt 10 kg per hektar och år, vilket på en del håll lett till kvävemättnad.

**Biotiska förändringar:** Ett ökat kvävenedfall påverkar ekosystemets artsammansättning. Hallon är en kväveälskande art som ökat starkt i svenska skogar. Grönalgs påväxt på barr är ett annat exempel. Vid kvävemättnad uppstår särskilt allvarliga obalanser i ekosystemet.

**Reducerat kväve:** I jordbruksregioner kan mer än hälften av kvävenedfallet utgöras av  $\text{NH}_3$  och ammonium. Orsaken är *ammoniakavdunstning* från kvävegödning och från stallgödsel.

**Oxiderat kväve:** I Sverige dominerar nedfall av oxiderat kväve. Detta härrör från utsläpp av NO och  $\text{NO}_2$  från trafik och förbränning i fasta anläggningar.

**Belastningsgränser:** Man arbetar nu alltmer med att fastlägga belastningsgränser för vad naturen långsiktigt tål. För sydvästra Sverige visar resultaten att kvävedepositionen behöver minska till nedmot 20 % av den nuvarande.



### Jordbrukets kväveläckage

**Kvävegödning:** Kvävegödningen tillförs främst som *handelsgödsel* (mest ammonium och mindre nitrat), men på gårdar med kreatursskötsel även som *stallgödsel*. Kvävegödningen har mängdmässigt mer än femdubblats i Sverige sedan 1950-talet. Ökad kvävegödning medför normalt att kväveutbytet med skörden minskar och att kväveförlusterna till luft och vatten ökar. Figuren visar i grova tal den starkt varierande kvävebalansen för tillförd kvävegödning i Sveriges jordbruksområden.

**Kväveförluster:** Kväve förloras från åkermark till vatten genom utläckage ( $\text{NO}_3^-$ ), och till luft vid nedbrytning ( $\text{NH}_3$ ) och anaerob denitrifikation ( $\text{N}_2$ ,  $\text{N}_2\text{O}$ ).

**Markkväve:** Åkermarkens humusskikt fungerar som en kvävebuffert. Läckaget av nitrat till vatten kommer därför till stor del från tidigare års kväveupplagring och inte alls bara från det senaste årets kvävegödning.

#### Åtgärder och motiv:

- ✓ Kvävegödning minskas. Detta är särskilt angeläget på sandiga marker som läcker mest (ca 50 kg N per hektar och år för Hallands potatis- och stråsådsodlingar).
- ✓ Bevuxen åkermark eftersträvas. Trädor med öppen jord läcker starkt. Vall eller fångstgrödor mellan säsonger med stråsåd binder kväve.
- ✓ Gödselspridning anpassas till vegetationens upptag. Kvävegödning på hösten för kommande vårsådda grödor ger stora läckage.

**Nitrat i grundvatten och dricksvatten:** Halterna av nitrat i grundvatten har ökat markant i många jordbruksområden. I dricksvatten överskrider de där ofta 50 mg/l vilket anges som en från hälsosynpunkt oacceptabel nivå.

KVÄVE OCH FOSFOR TILL ÖSTERSJÖN (TON/ÅR)		
	<i>före 1900</i>	<i>1990-talet</i>
N (vattendrag)	150 000	600 000
N (från luft)	80 000	300 000
P (vattendrag)	10 000	50 000

## Havseutrofiering

I de flesta marina miljöer är kväve produktionsbegränsande, men även fosfortillskott kan bidra till ekologiska störningar.

**Östersjön:** Tabellens siffror visar på den kraftiga utsläppsökningen under 1900-talet. Det största kvävetillskottet kommer från *jordbrukets nitratläckage* och förs ut med floderna. Den näst största posten är deposition från luft. Från de stora städernas orenade avlopp kommer relativt stora utsläpp av både kväve och fosfor. Kvävetillskottet balanseras till en del av ökad denitrifikation. Eutrofieringen har möjliggjort ett starkt ökat fiske under 1900-talet, men hotar samtidigt att slå ut fisket (bl a torskens reproduktion) genom syrebrist i eutrofieringens spår. Sedan 1990-talet hotar dessutom utfiskning allvarligt torsken och andra fiskarter.

**Västerhavet:** I Kattegatt och Skagerack är kvävenedfall från luft av samma storleksordning som tillförseln med vattendrag. Nitratutsläppen från åar och i viss mån reningsverk betyder troligen mest i de känsliga kustnära grunda vattnen.

**Giftalger:** Upprepade *algbloomingar* med massförekomst av bl a vissa giftiga algar har förekommit och hotar såväl det marina ekosystemet som fiske och musselodlingar. För de kvävefixerande cyanobakterierna ("blågröna alger") är fosfattillgången tillväxtbegränsande.

**Nitratreduktion:** Reningsverken, särskilt i Västkustens städer, inför successivt biologisk nitratreduktion (denitrifikation) för att minska sina nitratutsläpp.

### Huvudmål och radikala åtgärdsalternativ:

- ✓ Minskat nitratläckage från jordbruket. Övergång till ekologisk odling som inte använder kvävehandels gödsel.
- ✓ Minskade kväveoxidutsläpp från trafiken. Övergång till avgasfria transporter i stället för bensin- och dieselfordon.

Utsläppskälla	Bränsle	10 <sup>3</sup> ton NO <sub>2</sub> /år
Personbilar	Bensin	100
Tunga vägfordon	Dieseloilja	80
Arbetsfordon	Dieseloilja	80
Kustsjöfart	Tunga oljor	40
Flygtrafik	Flygfoto-gen	20
Fastförbränning	Olja, gas, kol, ved	50
Industriprocesser		20

### Kväveoxidutsläpp i Sverige

Emissioner av NO<sub>x</sub> (NO, NO<sub>2</sub>) har stor betydelse för markeutrofiering, havseutrofiering, försurning och vegetationsskador. Höga kvävedioxidhalter är dessutom hälsofarliga och korrosiva. Emissioner anges vanligen räknade som NO<sub>2</sub>. De är relativt svårbestämda och siffrorna i ovanstående tabell är osäkra. Officiella siffror som tas fram i samråd med starka intressenter blir ofta lågt räknade, och vissa utsläppsposter kan vara avsevärt större än vad tabellen anger. Ett generellt problem är att effektivare förbränning vid högre temperatur normalt ökar NO<sub>x</sub>-utsläppen.

**Vägtrafik:** Införandet av trevägs katalytisk avgasrening på nya bensindrivna personbilar från 1989 har minskat utsläppen från dessa till mindre än hälften. Ett ökat trafikarbete motverkar minskningen. Nya tekniska krav på dieselfordon ger vissa minskningar av utsläppen.

**Motorbelastning:** Kväveoxidutsläppen ökar vid snabba accelerationer, höga hastigheter och tung last i form av husvagnar och hästvagnar. En orsak är sämre fungerande avgasrening vid hög belastning av bensinmotorn.

**Sjöfart:** För färjor och andra stora fartyg finns tekniska möjligheter att minska utsläppen, men sjöfarten har varit sent ute med att utnyttja dessa.

**Flygtrafik:** Flyg är ett miljömässigt ifrågasatt transportalternativ. Flyget orsakar utsläpp på hög höjd, stora utsläpp per personkilometer och extremt stora utsläpp per restid. Det senare möjliggör stora livstidsutsläpp för varje människa.

**Fastförbränning och industri:** Rökgasdenitrifiering kan avsevärt minska NO<sub>x</sub>-utsläppen från stora anläggningar.