

Systemøkologi

Systemøkologi fokuserer på, hvordan økosystemer fungerer, og er derfor et vigtigt værktøj i miljøforvaltningen.

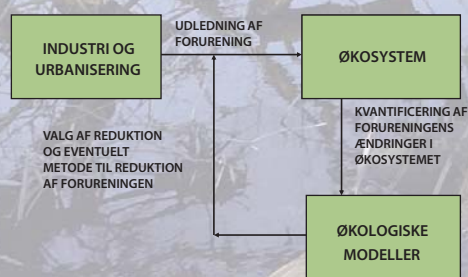
Den første grønne bølge startede i 1962 med Rachel Carsons bog *Det tavse Forår*. Forurening blev et centralt problem, som vi skulle løse på linje med en række andre samfundsproblemer. I 1970 var jeg til en miljøkonference i USA, hvor sloganet var "zero discharge 1985". Man troede naivt, at man ved hjælp af miljøteknologi kunne løse alle forureningsproblemerne i løbet af 15 år. Sådan gik det som bekendt ikke. Konfronteret med virkelighedens forureningsproblemer blev man hurtigt klar over, at det ville være alt for dyrt for samfundet at rense alt røg, skrald og spildevand 100 %. Men hvor meget skulle man så rense for at sikre, at naturen (omgivelserne) ikke tog skade, men blev bevaret nogenlunde intakt? Spørgsmålet krævede viden om, hvad der sker med de forurenende stoffer i naturen, og hvordan de influerer på økosystemets komponenter og processer. Økosystemer er imidlertid meget komplekse, så det var nødvendigt at se helheden, dvs. se på systemet, gennem de mange detaljer. Det er fx nødvendigt at se skoven som et system, der indeholder mange træer, buske, planter og dyr. Det gav starten til en hel ny økologisk disciplin, *systemøkologi*, der fokuserer på hvorledes økosystemerne fungerer. Den blev hurtigt og intensivt anvendt ved opbygning af de første økologiske modeller, der blev anvendt til miljøforvaltning. Med en økologisk model som værktøj kan man

finde, hvor meget man skal reducere forureningen for at opnå en given miljøkvalitet.

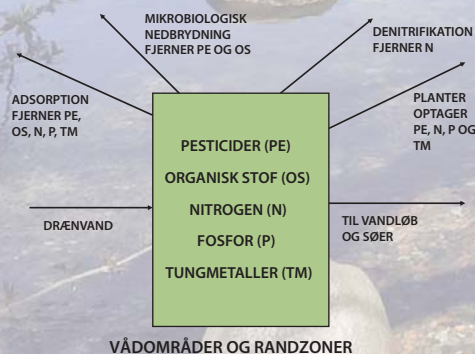
Landbrugets forurening udfordrer systemøkologien

Alle økosystemer er åbne systemer, og derfor er de sårbare over for forurening. Landbruget anvender store mængder af gødning og pesticider, som uundgåeligt vil påvirke økosystemerne. Udledningen fra landbruget er tillige diffus – den kommer ikke koncentreret et sted, men er spredt over store arealer. Hvordan kan man løse diffuse forureningsproblemer? Man kan fx give påbud om at anvende mindre mængder pesticider eller forbyde de mest miljøfarlige pesticider. Man kan også anvende naturens egne metoder. Økosystemer kan nemlig håndtere en vis mængde gødningsstoffer og pesticider, ja selv tungmetaller.

Især vådområder er gode til at håndtere forurenende stoffer: Ved hjælp af mikroorganismer laves nitrat om til frit kvælstof, der findes i stor mængde i atmosfæren i forvejen (nitrat + organisk stof → dinitrogen + kuldioxid + vand). Fosfater kan adsorberes af planter og jord, og organisk forurening inklusive pesticider nedbrydes mikrobielt. Ved at lade landbrugets drænvand gå igennem naturlige eller konstruerede vådområder kan man således løse



Figur 1: Emission (udledning) fra industri og bebyggelse forårsager uønskede ændringer i økosystemerne. Økologiske modeller udvikler en kvantitativ sammenhæng mellem emissionen og de (uønskede) virkninger på økosystemerne ved anvendelse af systemøkologi. Med økologiske modeller kan man derfor finde størrelsen på den emission, der giver acceptable ændringer i økosystemerne.



Figur 2: Vådområder og overgangszoner (såkaldte økotoner) kan fjerne pesticider, tungmetaller, fosforforbindelser, organisk stof og kvælstofforbindelser fra landbrugets drænvand. 1 ha vådområde kan fjerne i størrelsesorden 10-40 kg kvælstof og 1-4 kg fosfor.

Figur 3: Grafen viser eutrofieringen (målt fx ved koncentrationen af klorofyl, der stammer fra alger/fytoplankton) mod koncentra-

Forfatter



Sven Erik Jørgensen, professor emeritus ved Københavns Universitet
msjapan@hotmail.com

- en ny økologisk disciplin

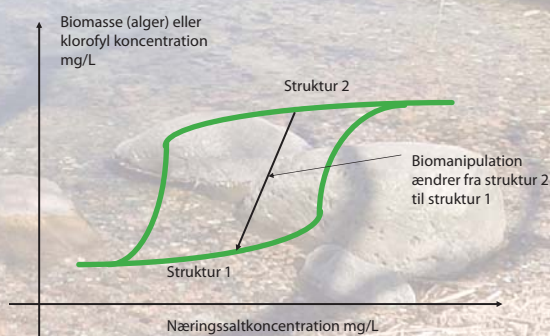
mange af landbrugets forureningsproblemer.

Det kræver imidlertid, at vi kender vådområders systemøkologi, for at vi kan beregne, hvor store arealer vi skal reservere til denne rensning. Ligeledes må vi forstå vådområderne som økosystemer, der har begrænset kapacitet og en vis sårbarhed. Det har vist sig muligt ved hjælp af, hvad man kalder økoteknologi og økologiske modeller, der begge bygger på systemøkologisk viden, at finde frem til hvilke arealstørrelser af naturlige eller konstruerede vådområder, der skal anvendes for at løse de diffuse miljøproblemer.

Restaurering af økosystemer

Mange økosystemer er i større eller mindre grad blevet ødelagt af forurening. Takket være økoteknologi og systemøkologi er det i mange tilfælde blevet muligt at reparere på skaderne – fx ved at rense giftgrunde med planter eller mikroorganismer. Især i forbindelse med restaurering af søer har man anvendt systemøkologi.

Kraftig algevækst på grund af overgødskning (eutrofiering) er et meget alvorligt forureningsproblem for mange af vore søer. Dynamikken i eutrofiering er, at koncentrationen af alger kun vokser langsomt i begyndelsen i takt med at koncentrationen



tionen af det næringssalt, der begrænser algevæksten (fx fosfor). Grafen viser, at der i et bestemt interval af næringsstofkoncentration er to mulige strukturer. Den nederste del svarer til, at zooplankton og rovfisk dominerer søen, mens det øverste niveau svarer til, at fytoplankton og små fisk dominerer søen. I dette interval kan man markant reducere eutrofieringen ved at opfiske de små fisk og udsætte rovfisk (biomanipulation),

Furesøen, hvor en kombination af biomanipulation og iltning af bundvandet blev anvendt til at restaurere søen i 2004-2008. Restaureringen har øget sigtedybden fra godt 2 meter til godt 3 meter og blomstringen af blågrønalger i august måned er næsten forsvundet.

nen af gødning øges (se figur 3). På et tidspunkt når man en koncentration af alger, hvor zooplankton, som lever af algerne, ikke kan følge med længere. Og så stiger eutrofieringen kraftigt. Hvis udviklingen derefter vender, og koncentrationen af gødning begynder at falde igen, vil man opdage, at udviklingen ikke følger den samme kurve tilbage igen. I stedet forbliver eutrofieringen på et højt niveau, og koncentrationen af alger falder først betydeligt, når koncentrationen af gødning har nået et markant lavere niveau. Årsagen til dette forløb er, at det lave eutrofieringsniveau svarer til én struktur i søen, mens den høje eutrofiering svarer til en anden struktur. Fødekæden har fire led: alger (fytoplankton), zooplankton, små fisk og rovfisk. Ved det lave eutrofieringsniveau dominerer zooplankton og rovfisk, mens alger og små fisk dominerer ved det høje niveau.

Hvis fosfor er det gødningsstof, som begrænser algevæksten, findes de to strukturer mellem cirka 60 og 120 µg P/L – men værdierne er selvfølgelig også afhængige af andre forhold i søen. Der er i dette interval derfor to mulige strukturer til at videreføre søens udvikling. Udgangspunktet eller søens historie afgør, hvilken af de to (nogenlunde lige gode) muligheder, der vinder. I dette interval – fra ca. 60 til ca. 120 µg P/L – kan man restaurere søen ved at fremtvinge en situation, hvor zooplankton og rovfisk dominerer (se figur 3). Denne metode kaldes biomaniplulation. Man fjerner de små fisk ved intensivt fiskeri og der udsættes eventuelt rovfisk (gedder). Metoden har været anvendt med held på Furesøen i perioden 2004-2008 sammen med iltning af bundsedimentet, som bevirker, at fosfor bindes bedre til bundsedimentet. Algevæksten blev godt

og vel halveret ved denne restaurering og blågrøn-alger, som er giftige for badegæsterne, optræder nu kun i en langt mindre koncentration og i betydeligt kortere tid. Sørestaurering kræver som det tydeligt ses af dette eksempel et godt systemøkologisk kendskab.

Systemøkologi hviler på fire søjler

Der er gennem de seneste fyrre år udviklet en god teoretisk basis for systemøkologi, som danner et solidt fundament for anvendelse af økologi til løsning af miljøproblemer. Teorien hviler på fire søjler: termodynamik, biokemi og økologisk støkiometri, hierarkiteori og netværksteori. Den første søjle anvender dels klassisk termodynamik (termodynamikkens første, anden og tredje lov) og dels termodynamik for "langt fra ligevægt systemer" inden for rammerne af systemøkologi. Således anvender man en "oversættelse" af Darwins lov om "survival of the fittest" til termodynamik. Denne oversættelse siger, at et økosystem forsøger at bevæge sig længst muligt væk fra termodynamisk ligevægt, hvor stof-ferne er uorganiske og uden kemisk energi. Det betyder, at økosystemet forsøger at opnå mest mulig arbejdsenergi, som udtrykker biomassen og dennes information (svarer til "survival") og dermed afstanden til termodynamisk ligevægt. Økosystemerne anvender i den forbindelse tre vækstformer: vækst af biomasse, vækst af information (flekt mulig forskellige arter med flekt mulige reguleringsmekanismer) og vækst af det økologiske netværk. De to strukturer af søer, som vi kan observere mellem ca. 60 og ca. 120 µg P/L indeholder netop ca. den samme mængde arbejdsenergi og er derfor i overensstemmelse med oversættelsen af Darwins teori til termodynamik.

Tabel 1

Reaktion	kJ/mol e-	ATP's/mol e-
$\text{CH}_2\text{O} + \text{O}_2 \leftrightarrow \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$	125	2,98
$\text{CH}_2\text{O} + 0,8\text{NO}_3^- + 0,8\text{H}^+ \leftrightarrow \text{CO}_2 + 0,4\text{N}_2 + 1,4\text{H}_2$	119	2,83
$\text{CH}_2\text{O} + 2\text{MnO}_2 + \text{H}^+ \leftrightarrow \text{CO}_2 + 2\text{Mn}^{2+} + 3\text{H}_2\text{O}$	85	2,02
$\text{CH}_2\text{O} + 4\text{FeOOH} + 8\text{H}^+ \leftrightarrow \text{CO}_2 + 7\text{H}_2\text{O} + \text{Fe}^{2+}$	27	0,64
$\text{CH}_2\text{O} + 0,5\text{SO}_4^{2-} + 0,5\text{H}^+ \leftrightarrow \text{CO}_2 + 0,5\text{HS}^- + \text{H}_2\text{O}$	26	0,62
$\text{CH}_2\text{O} + 0,5\text{CO}_2 \leftrightarrow \text{CO}_2 + 0,5\text{CH}_4 \quad \rightleftharpoons$	23	0,55

Forskellige mikroorganismer, der nedbryder organisk stof, kan anvende forskellige oxidationsmidler – men der vindes ikke meget energi. Tabellen viser udbyttet i arbejdsenergi – dels i kJ og dels i ATP pr. mol elektroner (svarer til 0,25 mol CH_2O) ved forskellige reaktioner.

Af tabellen fremgår, at de mikroorganismer, der anvender oxygen altid vinder over dem, der anvender nitrat, som vinder over dem, som anvender mangan-dioxid, som vinder over dem der anvender jern (III), osv. Eksemplet viser, hvordan man inden for systemøkologien kan "oversætte" Darwins evolutionsteori til termodynamik.

Tallene i tabellen opnås ved en pH-værdi på 7,0 og en temperatur på 25 °C.

Tabel 2

Hierarkisk niveau	Åbenhed (A/V, m ⁻¹)	Variation (%)	Størrelse (m)	Dynamik g/m ³ s
Molekyler	10 ⁹	100%	10 ⁻⁹	10 ⁵
Celler	10 ⁵	0,01%	10 ⁻⁵	10 ¹
Organer	10 ²	10 ⁻⁵ %	10 ⁻²	10 ⁻²
Organismer	1	10 ⁻⁷ %	1	10 ⁻⁴
Populationer	10 ⁻²	10 ⁻⁹ %	10 ²	10 ⁻⁶
Økosystemer	10 ⁻⁴	10 ⁻¹¹ %	10 ⁴	10 ⁻⁸
Økosfære	10 ⁻⁸	5×10 ⁻¹⁵ %	2×10 ⁷	10 ⁻¹²

Egenskaber for de forskellige niveauer i den hierarkiske orden fra molekyler til økosfæren. Niveauets åbenhed (dvs. overfladeareal i forhold til volumen) er naturligvis den reciprokke værdi af den lineære størrelse (fjerde kolonne). Jo større åbenhed niveauet har, desto nemmere kan niveauet forstyrres af udefrakommende kræfter. Den tredje kolonne viser, hvorledes en forstyrrelse på 100 %'s ændring på det nederste niveau – molekylerne – vil blive dæmpet op igennem niveauerne. Den sidste kolonne viser dynamikken i de enkelte niveauer, forstået som ændring i g pr. m³ pr. sekund.

Miljøforvaltning



Læs mere:

Jordan, F. & Jørgensen, S. E. (2012): Models of the Ecological Hierarchy. From molecules to the Ecosphere. Elsevier. Amsterdam, Oxford. 562 pp.

Jørgensen, S.E. (2012): Introduction to Systems Ecology. CRC Boca Raton. 320 pp.

Jørgensen, S.E. et al (2007): A New Ecology. Systems Perspectives. Elsevier, Amsterdam. 275pp

Jørgensen, S.E. & B. Fath (2011): Fundamentals of Ecological Modelling. 4th edition. Elsevier, Amsterdam, Oxford. 380 pp.

Et andet eksempel, der understøtter oversættelsen af Darwins teori til termodynamik ved hjælp af arbejdsenergi, er, at de mikroorganismer, der vinder ved nedbrydning af organisk stof, er dem med mest arbejdsenergi – målt ved hjælp af mængden af ATP (se tabel 1).

Den biokemiske søjle gør det muligt at opstille næsten støkiometriske ligninger for de biokemiske processer i økosystemerne. Hierarkisøjlen bygger på den hierarkiske orden: molekyler – celler – organer – organismer – populationer (af forskellige arter) – økosystemer – landskaber – regioner – økosfæren = den del af jorden, der bærer liv. Det kan vises i systemøkologisk sammenhæng, at denne opbygning har en række fordele. Byggesten i de lavere niveauer af hierarkiet kan nemt udskiftes, de enkelte niveauers dynamik er afpasset til komponenternes størrelse, åbenhed til omgivelserne og dermed sårbarhed (se tabel 2). Den hierarkiske opbygning betyder endvidere, kan det vises, at udefrakommende forstyrrelser dæmpes, og dæmpningen er større, jo større biodiversiteten er. Dette sidste er et vigtigt systemøkologisk resultat, fordi det tidligere blev diskuteret, om biodiversitet overhovedet er en vigtig egenskab for et økosystem. I dag er det fastslået,

at biodiversitet er overordentlig vigtigt for, hvordan økosystemer kan klare en forurening.

Endelig har netværksteorien vist, at økosystemernes opbygning i netværk er vigtig, fordi netværkene betyder, at

- 1) alle de biologisk vigtige grundstoffer kan recirkuleres,
- 2) stoffer og arbejdsenergi udnyttes lang bedre
- 3) konkurrencen mellem arterne svækkes, og samarbejdet styrkes

Fremtiden for systemøkologi

Vi har i dag en rimelig solid systemøkologi, som kan anvendes til miljøforvaltning og til at forklare økologiske observationer. Men teorien vil og skal naturligvis udvikles yderligere i de kommende år, hvorved dens anvendelighed kun vil blive styrket. Jo mere, vi anvender den eksisterende teori, desto mere vil vi opdage dens mangler og finde veje til at rette dem – sådan som det er sket med teorier inden for alle videnskabelige felter. Mit håb er, at vi får så stærk en teori om ti, tyve eller tredive år, at vi kan beregne konsekvenserne af en mulig forurening, før den bliver virkelighed og på den måde forhindre mange miljøulykker. ■