



# Biotechnik und Umwelt

**EINHEIT** 16

European Initiative for Biotechnology Education

---

**Verfasser dieser Einheit**

John Grainger (Koordinator dieser Einheit)

Fred Brinkman, Ute Harms, Eckhard R. Lucius, Marleen van Strydonck



**Die Europäische Initiative für den Unterricht (EIBE) hat sich die Aufgabe gestellt, durch einen neuartigen Unterricht in Schule und Lehrerbildung das Verständnis der Biotechnik zu fördern sowie Beiträge zu einer fundierten öffentlichen Debatte über dieses Gebiet zu liefern.**

## EIBE



### BELGIË/BELGIQUE

**Prof. Dr. Vic DAMEN/ Marleen van STRYDONCK**, Universitaire Instelling Antwerpen (U.I.A.), Department Didactiek en Kritiek, Universiteitsplein 1, 2610 Antwerpen, email vdamen@uia.ua.ac.be, mvstryd@uia.ua.ac.be

**Dr. Maurice LEX**, EC, GD XII E-1, SDME 9/38, Rue de la Loi 200, 1049 Bruxelles, Fax 0032/2/299-1860



### BULGARIA

**Prof. Raytcho DIMKOV**, University of Sofia "St. Kliment Ohridski", Faculty of Biology, Dr. Tzankov blvd. No. 8, 1421 Sofia, email ray@biofac.uni-sofia.bg.



### CZESKÁ REPUBLIKA

**Dr. Hana NOVÁKOVÁ**, Pedagogprogram co-op Pedagogická Fakulta UK, Konevova 241, 13000 Praha 3. Fax +420/2/829028



### DANMARK

**Dr. Dorte HAMMELEV**, Association of Danish Biologists, Sønderjyllands Alle 2, 2000 Frederiksberg, email dorte@centrum.dk  
**Mrs Lisbet MARCUSSEN**, Association of Danish Biologists, Skolebakken 13, 5800 Nyborg, email lisbetma@post2.tele.dk



### DEUTSCHLAND

**Prof. Dr. Horst BAYRHUBER/ Dr. Ute HARMS/ Dr. Eckhard R. LUCIUS/ Mrs Renate GLAWE**, Institut für die Pädagogik der Naturwissenschaften (IPN) an der Universität Kiel, Olshausenstr. 62, 24098 Kiel, email csec@ipn.uni-kiel.de, harms@ipn.uni-kiel.de, lucius@ipn.uni-kiel.de; glawe@ipn.uni-kiel.de

**Dr. Ognian SERAFIMOV**, INCS-Centre of UNESCO, c/o Jörg-Zürn-Gewerbeschule, Rauensteinstr. 17, 88662 Überlingen, email joergzuern.os@t-online.de, ognian.serafimov@t-online.de  
**Prof. Dr. Eberhardt TODT**, Universität Giessen, FB Psychologie, Otto-Behagel Str. 10, 35394 Giessen, email Eberhardt.Todt@psychol.uni-giessen.de

**Prof. Dr. Michael SCHALLIES**, Pädagogische Hochschule, Heidelberg, FB Chemie, Im Neuenheimer Feld 561, 69120 Heidelberg, email schallie@ph-heidelberg.de



### EIRE

**Dr. Catherine ADLEY**, University of Limerick, Biotechnology Awareness Centre, Dept. of Chemical and Environmental Sciences, Limerick, email Catherine.Adley@ul.ie

**Mrs. Cecily LEONARD**, University of Limerick, Dept. of Life Sciences, Limerick, email cecily.leonard@ul.ie



### ESPAÑA

**Dr. María J. SÁEZ, Dr. Angela GÓMEZ-NIÑO/ Rosa VILLAMANAN**, Universidad de Valladolid, Dept. de Biología Celular y Farmacología, Geologo Hernandez Pacheco 1, Valladolid 47014, email mariaj@redestb.es, Angela@bioce.l.uva.es, rvillama@dce.uva.es



### EESTI

**Prof. Dr. Tago SARAPUU**, Loodusteaduste didaktika lektoraat, Molekulaar- ja rakubioloogia instituut, Tartu Ülikool, Vanemuise tn. 46-211, Tartu, email tago@ut.ee.



### FRANCE

**Prof. Gérard COUTOULY**, LEGPT Jean Rostand, 18, Boulevard de la Victoire, 67084 Strasbourg Cedex, email coutouly@cybercable.tm.fr

**Prof. Laurence SIMONNEAUX**, ENFA, Toulouse, Boîte Postale 87, 31326 Castanet-Tolosan Cedex, email laurence.simonneaux@educagri.fr



### HELLADA

**Prof. Vasilis KOULAIIDIS/ Ass. Prof. Vasiliki ZOGZA-DIMITRIADI**, University of Patras, Dept. of Education, Rion, 26500 Patras, email zogza@upatras.gr, Koulaiddi@upatras.gr



### ITALIA

**Prof. A. BARGELLESI-SEVERI/ Dr. Stefania UCCELLI/ Dr. ssa. A. CORDA-MANNINO**, Centro di Biotecnologie Avanzate, Largo Rosanna Benzi 10, 16132 Genova., email dcs@ist.unige.it



### LUXEMBOURG

**Mr. John WATSON/ Mr. Laurent KIEFFER**, European School, 23 BLVD Konrad Adenauer, 1115 Luxembourg, email laurent.kieffer@euroschool.lu, john.watson@ci.educ.lu



### NEDERLAND

**Dr. David J. BENNETT**, European Federation of Biotechnology Working Party on Education, Cambridge Biomedical Consultants, Schuystraat 12, 2517 XE The Hague, email efb.cbc@stm.tudelft.nl  
**Dr. Fred BRINKMAN**, Hogeschool Holland, Communication Project, P.O. Box 261, 1110 AG Diemen, email f.brinkman@hsholland.nl

**Drs. Liesbeth van de GRINT**, Hogeschool van Utrecht, Coördinatiecentrum van het Landelijk Network voor Educatiecentra voor Biotechnologie, Postbus 14007, 3508 SB Utrecht, email Liesbeth.vd.Grint@feo.hvu.nl

**Dr. Jan F.J. FRINGS**, Pr. Marijkelaan 10, 7204 AA Zutphen, email j.frings@hccnet.nl

**Dr. Ana-Maria BRAVO-ANGEL**, Secretariat of the Task Group on Public Perceptions of Biotechnology, Schuystraat 12, 2517 XE The Hague, email efb.cbc@stm.tudelft.nl



### RZECZPOSPOLITA POLSKA

**Dr. Anna STERNICKA**, University of Gdansk, Dept. of Biology, AL. Legionow 9, 80952 Gdansk, Fax +48/58/341 20 16



### SVERIGE

**Mrs. Margareta JOHANSSON**, Föreningen Gensyn, P.O. Box 37, 26821 Svalöv, email margareta.johansson@gensyn.svalov.se

**Dr. Elisabeth STRÖMBERG**, Östrabogymnasiet, Kämpepatan 36, 45117 Uddevalla, email es@ostrabo.uddevalla.se



### SWITZERLAND

**Dr. Kirsten SCHLÜTER**, ETH, Institut für Verhaltenswissenschaften, ETH Zentrum TUR, Turnerstr. 1, 8092 Zürich, email schluter@ifv.huwi.ethz.ch



### THE UNITED KINGDOM

**Dr. John GRAINGER/ Mr. John SCHOLLAR/ Dr. Caroline SHEARER**, National Centre for Biotechnology Education, The University of Reading, Whiteknights, P.O. Box 228, Reading RG6 6AJ., email j.m.grainger@rdg.ac.uk, j.w.schollar@rdg.ac.uk, c.shearer@rdg.ac.uk

**Mr. Wilbert GARVIN**, The Queen's University of Belfast, School of Education, 69 University Street, Belfast BT7 1HL, email w.garvin@qub.ac.uk

**Dr. Jill TURNER**, The Queen's University of Belfast, School of Nursing and Midwifery, 1-3 College Park East, Belfast BT7 1LQ, email Jill.Turner@Queens-Belfast.ac.uk

**Dr. Paul WYMER**, 6 Park Way, Whetstone London N20 0XP, email paul.wymer@virgin.net

**Dr. Jenny LEWIS**, University of Leeds, Research Fellow, Learning in Science Research Group, Centre for Studies in Science and Mathematics Education, Leeds LS2 9JT, email j.m.lewis@education.leeds.ac.uk

**Mr. Adam HEDGECOE**, University College London, Dept. of Science and Technology Studies, Gower Street, London WC1E 6BT, email a.hedgecoe@ucl.ac.uk.

## E.I.B.E. co-ordinator

**Prof. Dr. Horst BAYRHUBER**, Institut für die Pädagogik der Naturwissenschaften (IPN) an der Universität Kiel, Olshausenstr. 62, 24098 Kiel, Deutschland. Tel.: +49-431-880-3129, Fax: +49-431-880-3132 email: csec@ipn.uni-kiel.de.

## E.I.B.E. secretariat

**Renate GLAWE**, IPN an der Universität Kiel, Deutschland. Tel.: +49-431-880 3151 and +49-431-880 3132, Fax +49-431-880 3132, email: glawe@ipn.uni-kiel.de.



## Inhalt

★ ★ ★ ★ ★ ★ ★ ★ ★ ★ ★ ★ ★ ★ ★ ★

<b>I</b>	<b>Entwicklungsteam und Urheberrechte</b>	4
<b>I</b>	<b>Sicherheit</b>	5
<b>I</b>	<b>Einleitung</b>	6
<b>I</b>	<b>Richtlinien für den Unterricht</b>	8
<b>I</b>	<b>A. Aufspüren: Umweltschäden feststellen</b>	
	Der Londoner Smog	11
	Schwefel in der Umwelt	12
	<b>Praktische Übung 1:</b>	
	Luftverschmutzung messen	14
<b>I</b>	<b>B. Umweltschäden vorbeugen</b>	
	Der Stickstoffkreislauf	16
	Die molekulare Grundlage der Stickstoff-Fixierung	18
	<b>Praktische Übung 2:</b> Ein stickstoffbindendes Bakterium:	
	<i>Azotobacter</i> kultivieren	21
	<b>Praktische Übung 3:</b> Stickstoff-Fixierung in Wurzelknollen:	
	<i>Rhizobium</i> isolieren	22
<b>I</b>	<b>C. Sanieren: Die Umwelt entlasten</b>	
	Bioremediation	23
	Der Kohlenstoffkreislauf	25
	Umweltverschmutzung durch Kohlenwasserstoffe	26
	Fallbeispiel: das Exxon-Valdez-Unglück	29

## World Wide Web

★ ★ ★ ★ ★ ★ ★ ★ ★ ★ ★ ★ ★ ★ ★ ★

Es gibt nur wenig Bereiche, in denen so schnelle Fortschritte verzeichnet werden wie in der Biotechnik. Um die Informationen in diesen EIBE-Einheit bei möglichst geringen Kosten auf einen guten Stand zu halten, werden sie in elektronischer Form veröffentlicht.

Diese Seiten (wie die anderen EIBE-Einheiten) sind weltweit über das World-Wide-Web zugänglich, zu finden unter

**[www.eibe.org](http://www.eibe.org)**

Alle EIBE-Einheiten im World-Wide-Web sind in Form von PDF-Dateien (PDF = Portable Document Format). PDF-Dateien ermöglichen bei jedem Computersystem (Macintosh einschließlich Power PC, Windows, DOS oder Unix-Plattformen) die Übertragung qualitativ hochwertiger Illustrationen, sowie die Erhaltung der Farben, der Schriftarten und des Layouts des ursprünglichen Dokuments.

PDF-Dateien sind auch weniger umfangreich als die ursprünglichen Dateien und sind somit schneller herunterzuladen. Um die EIBE-Einheiten lesen zu können, muss allerdings ein *Adobe Acrobat Reader* © als Programm in Ihrem System installiert sein. Das neuste *Acrobat Reader* © kann kostenlos bezogen werden. Es kann von der EIBE-Website oder von

**<http://www.adobe.com/>**

heruntergeladen werden.

Mit dieser Software können Sie die EIBE-Einheiten lesen oder drucken. Sie können sich auch in den Dokumenten bequem bewegen und sie durchsuchen.

HINWEIS: *Adobe* und *Acrobat* sind Markenzeichen von Adobe Systems Incorporated. *Macintosh* ist ein eingetragenes Markenzeichen von Apple Computer Incorporated.

# Autorinnen und Autoren dieser Einheit

- **John Grainger** (Koordinator dieser Einheit)  
The University of Reading  
Reading RG6 6AJ
- **Fred Brinkman**  
Hogeschool Holland  
1110 AG Diemen
- **Ute Harms**  
Universität München  
Institut für Didaktik der Biologie  
Winzererstr. 45  
80797 München
- **Eckhard R. Lucius**  
IPN an der Universität Kiel  
24098 Kiel
- **Marleen van Strydonck**  
Universitaire Instelling Antwerpen,  
2610 Antwerpen

Konzept, Illustrationen und Satz:  
**Caroline Shearer**, NCBE, The University of Reading, RG6 6AJ und **Jan Frings**, BAC, NL-7204 AA, Zutphen.

## © Urheberrechte

Diese EIBE-Einheit ist urheberrechtlich geschützt. Alle Rechte vorbehalten.

**Zum Schulgebrauch.** Elektronische und gedruckte Kopien dieser EIBE-Einheit oder einzelner Seiten dürfen im Unterricht eingesetzt werden, vorausgesetzt, dass die Kopien kostenlos oder zum Vervielfältigungspreis zur Verfügung gestellt werden, und dass die Autorinnen und Autoren der Einheit als solche genannt und gekennzeichnet werden.

**Zum anderweitigen Gebrauch.** Die Einheit darf von Einzelpersonen an Einzelpersonen zu nicht-kommerziellen Zwecken weitergegeben werden. Untersagt ist die Verbreitung über elektronische Verteilerlisten, Mail-(Listserv)-Listen, Nachrichtengruppen, Schwarzes-Brett- oder nicht autorisierte World-Wide-Web-Postings, oder über andere Mechanismen der Massenvervielfältigung, des Zugangs oder der Reproduktion, die ein Abonnement oder den autorisierten Zugang ersetzen, oder auf eine Weise, die nicht als gutgläubiger Versuch der Einhaltung dieser Einschränkungen anzusehen ist.

**Kommerzielle Nutzung.** Im Fall, dass Sie diese Einheit ganz oder auszugsweise zu kommerziellen Zwecken nutzen oder sie in jeder Form neu veröffentlichen möchten, wenden Sie sich an das

EIBE Secretariat  
c/o Institut für die Pädagogik  
der Naturwissenschaften (IPN)  
an der Universität Kiel  
Olshausenstraße 62  
D-24098 Kiel  
Germany

Telefon: + 49 431 880 3132  
Fax: + 49 431 880 3132  
E-Mail: glawe@ipn.uni-kiel.de

# Zu dieser Einheit



Diese Materialien sind von Lehrerinnen und Lehrern im aktiven Schuldienst und von Erziehungswissenschaftlern aus mehreren europäischen Ländern entwickelt worden. Ermöglicht wurde diese Zusammenarbeit durch die finanzielle Unterstützung wie auch die Ermutigung des DGXII der Europäischen Kommission unter der Schirmherrschaft von EIBE, der Europäischen Initiative für Biotechnologie im Unterricht.

Die EIBE-Materialien sind im Rahmen von Workshops, an denen Lehrkräfte aus mehreren europäischen Ländern teilnahmen, ausführlich erprobt.

Die Ansichten, die in dieser Einheit Ausdruck finden, sowie die hier vorgeschlagenen Aktivitäten sind die der Autorinnen und Autoren und nicht die der Europäischen Kommission.

# Sicherheit

In allen EIBE-Einheiten wurde versucht, alle bekannten Risiken zu identifizieren und entsprechende Sicherheitsvorkehrungen vorzuschlagen.

Nach Möglichkeit entsprechen die vorgeschlagenen Verfahrensweisen allgemein anerkannten Risikoanalysen. Falls eine gesonderte Risikoanalyse notwendig erscheint, wurde eine entsprechende Empfehlung vermerkt.

Nutzer der Einheit sollten trotzdem bedenken, dass Fehler und Unterlassungen möglich sind und dass in der Industrie und im Bildungsbereich unterschiedliche Standards gelten. Folglich sollte vor jeder praktischen Arbeit eine eigene Risikoanalyse durchgeführt werden. Insbesondere müssen lokale Regeln, die von Arbeitgeber- oder Behördenseite stammen, ungeachtet der Empfehlungen in dieser EIBE-Einheit, befolgt werden.

Soweit nicht anders angeordnet wird angenommen,

- dass die praktischen Arbeiten in einem richtig ausgestatteten und instand gehaltenen Labor durchgeführt werden;
- dass sämtliche Geräte mit Netzanschluss richtig instand gehalten werden;
- dass bei üblichen Laborvorgängen wie der Erhitzung von Substanzen sorgfältig vorgegangen wird;
- dass eine gute Laborpraxis geübt wird, wenn Chemikalien oder lebende Organismen verwendet werden;
- dass bei bekanntem Risiko für die Augen stets Augenschutz getragen wird;
- dass Schülerinnen und Schülern/Studentinnen und Studenten für alle Aktivitäten wie zum Beispiel den Umgang mit Chemikalien und Mikroorganismen sichere Vorgehensweisen vermittelt werden.

# Biotechnik und Umwelt

## Einleitung

*Biotechnologie ist die Verzahnung von Naturwissenschaft und Technik zum Zwecke der Anwendung von Organismen, Zellen und deren Teile, sowie molekulare Analoge für Produkte und Dienstleistungen zur Nutzung durch den Menschen* (EFB General Assembly, 1989)

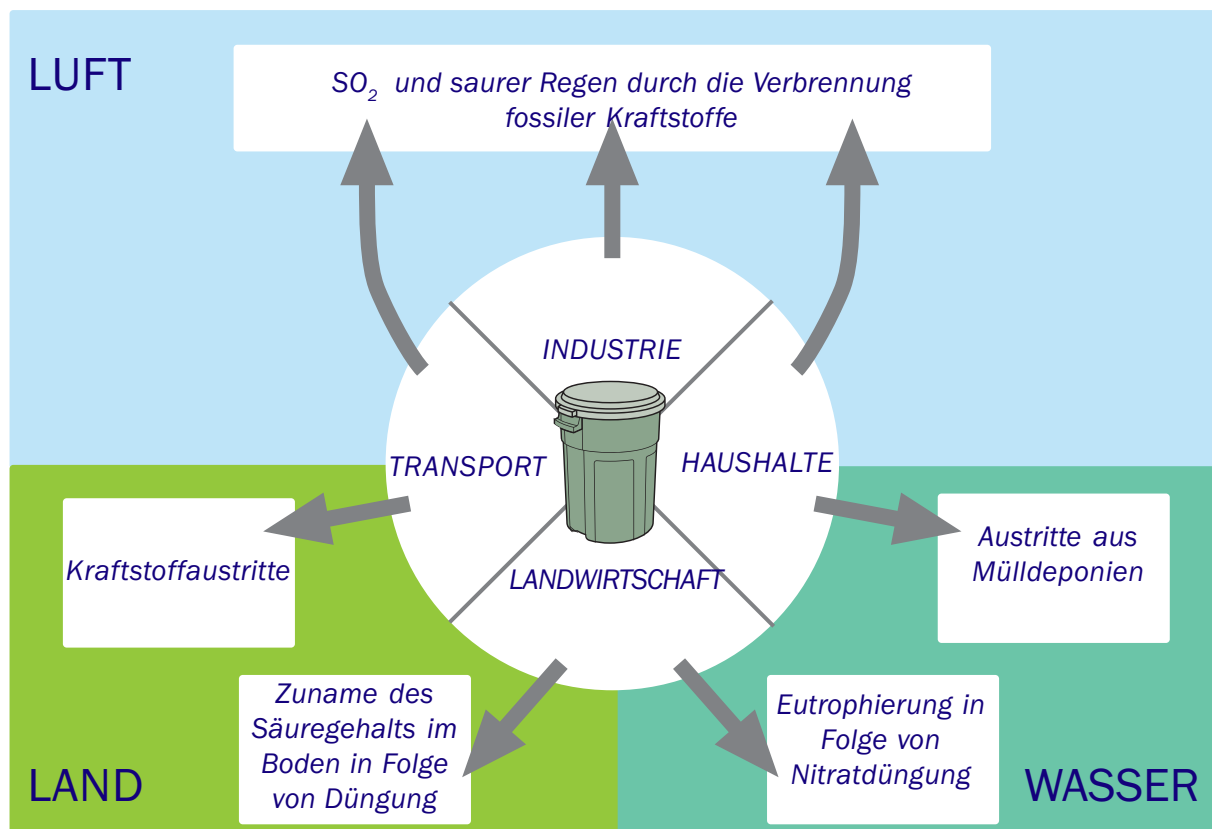
**Umweltbiotechnik** nutzt eine Kombination biologischer Abläufe und Verfahren, um die Umwelt (in ihrer Qualität) zu schützen, zu erhalten und zu reinigen. Zum Beispiel werden die Verfahren des biologischen Abbaus genutzt, um Abwässer und Abfälle aus Industrie und Haushalt aufzubereiten und sicher zu entsorgen, sowie um die Rückgewinnung wertvoller Ressourcen wie Wasser und Energie zu ermöglichen. Das Verständnis der Prozesse des biologischen Abbaus und der damit verbundenen Technologien ist in den letzten 15-20 Jahren so weit fort-

geschritten, dass die Bioremediation, die Wiederherstellung des biologischen Gleichgewichts in verschmutzten Böden und Gewässern, heute einen separaten Spezialzweig der Industrie bildet.

Umweltfragen berühren aber auch andere Bereiche der Biotechnik:

- **Agrarbiotechnik:** Pflanzenarten, die entweder niedrigere Mengen Kunstdünger benötigen oder eine gesteigerte Resistenz gegen Mikroorganismen und Pestizide aufweisen, werden entwickelt.
- **Biotechnik der Tierzucht:** höhere Produktionsmengen können durch weniger Tiere erreicht werden, damit weniger Abfall anfällt und somit die Wasser- und Bodenbelastung reduziert werden kann.
- **Mikrobielle Biotechnik:** der Stoffwechsel natürlicher vorkommender Organismen kann modifiziert werden, um die Erträge der Produktion zu steigern und neue Produkte zu entwickeln.

**Abbildung 1: Umweltschäden durch menschliche Einwirkung**



## Umweltprobleme

Die moderne Industriegesellschaft produziert immer mehr Abfälle. Zu den Gründen gehören

- der wachsende Lebensstandard und die gesteigerte Konsumnachfrage;
- der Gebrauch von Einweg-Produkten;
- der Gebrauch von nicht abbaubaren Stoffen;
- der Mangel an effektiven Anlagen zur Wiederverwertung von Abfällen.

Vier Abfallbereiche sind auszumachen: Haushaltsabfälle, Städte-/Industrieabfälle, Großabfälle und radioaktive Abfälle. Der Abfall aus jedem dieser Bereiche kann potentiell die natürliche Umwelt, d.h. den Boden, das Wasser und die Luft, verändern oder beeinträchtigen.

Einige Beispiele zur Verdeutlichung:

- Die Verbrennung fossiler Kraftstoffe (durch die Industrie, durch Haushalte und durch Kraftfahrzeuge) produziert Schwefeldioxid. Aus der Reaktion des Schwefeldioxids mit Wasser resultiert der saure Regen, der umweltschädlich wirken kann (z.B. indem er Bäume und Gebäude angreift).
- Mülldeponien zur Lagerung von festen Abfällen können in ihrer Umgebung zu Beeinträchtigungen und Beschwerden wegen der Entwicklung schlechter Gerüche führen. Noch bedeutsamer ist die dortige Entstehung von Methan, bei Entweichen ein schädliches Treibhausgas, das allerdings gesammelt und dann als Energiequelle genutzt werden kann. Eventuell können auch instabile Fettsäuren in den Boden versickern und das Grundwasser belasten.
- Landwirte verändern die Säureverhältnisse des Bodens, indem sie Dünger in großen Mengen auf ihre Feldern bringen. So gelangen natürliche und künstliche stickstoffhaltige Verbindungen in natürliche Gewässer, was zur Eutrophierung von Seen, Bächen und Flüssen führen kann.
- Die Versickerung von Kohlenwasserstoffen aus Brennmaterialien zerstört die Fruchtbarkeit des Bodens und verschmutzt die Gewässer. Das Verbleiben von giftigen Restbeständen im Boden bei ehemaligen Industrieanlagen (z.B. Kohlenteer bei stillgelegten Gaswerken) stören die Wiederverwertbarkeit der Flächen als Bauland.

Noch beklagenswerter ist die Wirkung großer Mengen Brennstoff oder Öl auf die Ökosysteme in Gewässern (sowohl Salzwasser als auch Süßwasser). Das Sterben von Fischen und Vögeln ist das sichtbarste Zeichen dieses Problems, aber es ist nur eine von vielen schädlichen Auswirkungen der Ölaustritte.

- In den meisten Supermärkten und Kaufhäusern werden Lebensmittel und andere Waren in abgepackter Form verkauft. Dieser Tatbestand steigert das Volumen des Haushaltsmülls und somit wird die Abfallwirtschaft noch mehr gefordert. Die Alternative, dass nämlich ein größerer Anteil des Abfalls wiederverwertet werden kann, bei Verbrennung des Restbestands, ist erklärtes Ziel der EU-Politik.
- Der größeren Nachfrage nach sauberem Trinkwasser kann man nur dadurch gerecht werden, indem Haushalts- und Industrieabwässer aufbereitet werden, um daraus wieder Wasser in Trinkqualität zu erzeugen (siehe EIBE-Einheit 17, Fallbeispiel B: *Bereitstellung von Trinkwasser*).

Diese Auflistung zeigt lediglich einige Beispiele der Folgen für die Umwelt. Weitere Beispiele können täglich den Nachrichten entnommen werden.

Theoretisch die beste Methode, um Schäden durch Abfall zu vermeiden, wäre den Abfall selbst gar nicht erst zu produzieren! Da das aber schwierig ist, müssen Wege gefunden werden, um das Abfallproblem zu mindern. Traditionell liegt die Antwort in der Wiederverwendung, Wiederverwertung und Kompostierung möglichst vieler Abfälle. Solche, eher konventionelle Lösungen sind nach wie vor von großer Bedeutung. Die Biotechnik kann allerdings darüber hinaus auch einen Beitrag leisten, indem sie möglicherweise umweltschädliche Prozesse aufspürt und sie verhindert oder neutralisiert.

Auf den folgenden Seiten werden Beispiele aufgeführt, wie biotechnische Verfahren eingesetzt werden, um die Umwelt zu schützen, zu erhalten und wiederherzustellen.

# Richtlinien für den Unterricht



## Ziele

Die Schülerinnen und Schüler sollen verstehen,

- dass die Gesellschaft den Bedarf, eine “sichere” Umwelt zu erhalten, bei ihren Aktivitäten berücksichtigen sollte;
- was die Konsequenzen einer Störung eines natürlichen Kreislaufs sind;
- dass die Biotechnik eingesetzt werden kann, um Umweltprobleme aufzuspüren, zu verhindern und zu beseitigen;
- dass die Biotechnik selbst Umweltprobleme verursachen kann;
- dass in der Diskussion umweltrelevanter Themen die naturwissenschaftlichen Tatsachen zusammen mit ethischen, gesellschaftlichen, rechtlichen und wirtschaftlichen Aspekten Berücksichtigung finden müssen.

## Inhalte und Methoden

Drei ausgewählte Themen werden behandelt. Zu den Methoden gehören u.A. praktische Übungen, Diskussionen und Feldstudien.

### **Aufspüren: Umweltschäden feststellen**

Wenn Umweltschäden auftreten, ist es wahrscheinlich, dass gewisse abiotische Faktoren im betreffenden Ökosystem verändert worden sind. Zur Feststellung der Schäden können physikalische oder chemische Messgeräte einerseits oder Biosensoren andererseits eingesetzt werden. Biosensoren stützen sich auf lebende Organismen, die gegenüber einer Veränderung eines spezifischen, abiotischen Faktors höchst empfindlich sind.

### **Schützen: Umweltschäden vorbeugen**

Einige Industrieverfahren mit einem hohen Energieverbrauch oder mit Produkten, die eine potentiell umweltschädigende Wirkung haben, können durch Enzymsysteme ersetzt werden, die entweder aus natürlichen, lebenden Organismen oder eventuell sogar aus gentechnisch veränderten Organismen (GVO) gewonnen werden. Enzyme sind biologische Katalysatoren. Sie sind hoch effizient und bieten viele Vorteile gegenüber nicht-biologischen Katalysatoren.

Die Entwicklung der GVO in der Landwirtschaft nimmt ebenfalls an Bedeutung zu. Zum Beispiel kann die Entwicklung “neuer” Pflanzen, die gegen Krankheiten oder Ungeziefer resistenter sind, zu einer Minderung der Umweltverschmutzung führen, die aus den Sprühmitteln gegen solche Krankheiten oder gegen Ungeziefer resultiert.

### **Sanieren: Die Umwelt entlasten**

Der Abbau umweltschädigender Stoffe durch Mikroorganismen bildet die Grundlage der Bioremediation. Die dazu benötigten Prozesse werden entweder von natürlich dort vorkommenden oder von geeigneten zugefügten Organismen geliefert.

### **Der Kreislaufbegriff**

Alle biologischen Systeme benötigen Stoffe für ihre Struktur sowie Energie für ihre Aktivitäten. Dies gilt nicht nur für einzelne Organismen, sondern auch für die Gemeinschaften, die sie in der Natur bilden. Dieser Fluss von Energie und Stoffen durch Systeme impliziert eine Wechselwirkung von Organismen, die üblicherweise als Modelle wie die Nährstoffketten dargestellt werden, z.B. der Kreislauf von C-, N- und S-Verbindungen durch Pflanzen über Tiere, Menschen und Mikroben, um dann wieder in die Pflanzen zu gelangen.

Lernende stellen die Kreisläufe der Natur oft unvollständig dar. Beispielsweise lassen sie die Abbau- und Mineralisierungsphasen weg, die im Boden stattfinden. Auch bedenken sie nicht, wie die Kreisläufe verkettet sind.

Ein weiteres Problem, das sich weltweit als hartnäckig erweist, ist die Vorstellung, dass Pflanzen organische Nährstoffe wie Kohlenhydrate und Proteine zum Wachstum brauchen. Diese Vorstellung sieht über folgende Tatsache hinweg: Die Grünpflanzen im Nährstoffkreislauf können Photosynthese treiben und Stickstoff verwerten. Somit können sie ausschließlich anorganisches Substrat nutzen.

Der traditionelle Unterrichtsansatz zum Kreislaufbegriff trägt nur zum Teil zur Beseitigung dieser falschen Vorstellung bei. Bei der Behandlung der Inhalte dieser Einheit im Unterricht ist es wichtig, die Relevanz der Schülervorstellungen nicht zu verleugnen, sondern die Vorstellungen zu identifizieren und sie diskursiv zu den wissenschaftlichen Erkenntnissen in Bezug zu setzen.



## Organisation

Die drei Themen dieser Einheit behandeln unterschiedliche Anwendungsbereiche der Bio-Umwelttechnik. Im Abschnitt "Feststellen" liegt der Schwerpunkt bei Gesundheitsfragen. Der Abschnitt "Schützen" setzt sich mit der Genmodifizierung auseinander, während "Sanieren" biologische Aspekte der Sanierung belasteter Flächen aufgreift.

Je nach Unterrichtsbedingungen, Klassenstufe und verfügbarer Zeit kann entweder einer der Ansätze oder zwei oder drei zum Einsatz kommen. Wenn nur ein Ansatz (d.h. entweder Feststellen, Schützen oder Sanieren) oder zwei vertieft behandelt werden, wird empfohlen, dass die verbleibenden Ansätze (oder der verbleibende Ansatz) kurz angeschnitten werden sollten.

Selbstverständlich muss betont werden: der beste Weg zu einer "sicheren" Umwelt heißt die Umwelt von vorn herein NICHT zu verschmutzen, NICHT zu beschädigen und NICHT zu verändern.

## Aufspüren: Umweltschäden feststellen

Dieser Abschnitt der Einheit setzt sich mit der biologischen Bedeutung von Schwefelverbindungen auseinander. Zuerst werden die Auswirkungen der von Schwefelverbindungen verursachten Luftverschmutzung besprochen, anschließend wird die praktische Übung umrissen, die eine Anleitung gibt, wie diese Art der Luftverschmutzung durch die Verwendung von Flechten als biologische Indikatoren festgestellt werden kann.

### Ziele

Die Schülerinnen und Schüler sollen

- die Beziehungen zwischen fossilen Brennstoffen,  $\text{SO}_2$ , saurem Regen und Atemproblemen verstehen;
- verstehen, dass die Empfindlichkeit von Flechten gegenüber hohen Konzentrationen von  $\text{SO}_2$  als Indikator der jeweiligen Konzentration genutzt werden kann;
- die Flechten im Untersuchungsgebiet klar beobachten und erfassen können und daraus auf die "Qualität" der Luft bezogen auf die  $\text{SO}_2$ -Konzentration schließen;

## Praktische Übung

Die umrissenen Vorgehensweisen sollen die Erfassung der Flechtendichte in einem Gebiet standardisieren, damit die Ergebnisse aus verschiedenen Gebieten miteinander verglichen werden können.

Diese Untersuchung könnte auf weitere abiotische Faktoren ausgedehnt werden, wie z.B. die vorherrschende Windrichtung, das Vorhandensein von Industrie in der näheren oder ferneren Umgebung.

Im Idealfall würden mehrere verschiedene Gebiete untersucht und verglichen werden. Die Suche nach einer Erklärung für die Unterschiede zwischen Gebieten ist hierbei von größerem Interesse als die Datensammlung für ein einzelnes Gebiet.

Die Erkennung von Flechten ist für unerfahrene Schülerinnen und Schüler ziemlich schwierig. Es empfiehlt sich daher, Fotos oder Bilder zusammen mit einem lokalen Bestimmungsbuch zu verwenden. Es ist zu betonen, dass der Wassergehalt die Farbe einer Flechte beeinflussen kann. Diese Untersuchung kann sich auch durchaus auf eine begrenzte (leichter zu identifizierende) Auswahl örtlich vorkommender Flechten beschränken.

## Schützen: Umweltschäden vorbeugen

Dieser Abschnitt der Einheit befasst sich ausschließlich mit Stickstoff: Überdüngung, Stickstoffbindung durch Rhizobium und - angesichts der wachsenden Erkenntnis der molekularen Mechanismen in der Stickstoffbindung - die mögliche Rolle der Biotechnik in der Prävention von Umweltschäden.

### Ziele

Die Schülerinnen und Schüler sollen verstehen, dass

- Kunstdünger aus der chemischen Bindung molekularen Stickstoffs gewonnen werden;
- die Optimierung biologischer Prozesse im Stickstoffkreislauf bei der Verminderung der Umweltverschmutzung eine Rolle spielt;
- Umweltprobleme wie Überdüngung allein durch die Biotechnik nicht leicht zu lösen sind.

Die Schülerinnen und Schüler sollen wissen, dass

- ein Mangel an Stickstoff in fixierter Form ein Hemmfaktor bei Pflanzenwachstum und Ertrag darstellt;
- der ständige Einsatz von stickstoffhaltigen Kunstdüngern in der Landwirtschaft das natürliche Ökosystem des Bodens und der Gewässer beeinflusst;
- der Stickstoff von spezialisierten Prokaryoten (Bakterien) fixiert wird, unter Verwendung eines Nitrogenase-Enzym-Komplexes, das den Stickstoff zu Ammoniak reduziert;
- Rhizobium in den Wurzeln der Hülsenfrüchter Knöllchen bildet, die durch die symbiotische Interaktion mit der Wirtspflanze Stickstoff binden können; andere freilebende Bodenbakterien einen kleineren Beitrag leisten;
- es zu den Zielen der biotechnischen Forschungsarbeit gehört, Rhizobium gentechnisch zu verändern, um höhere Erträge ohne Düngemittel zu erzielen.

### Was ist mit den Risiken?

Diese Einheit bietet eine hervorragende Möglichkeit, über die Risikoabschätzung bei Freisetzung von GVO zu sprechen. Dieser Abschnitt sollte daher mit der Einleitung in die zwei Methoden der Risikoabschätzung schließen, die üblicherweise in der öffentlichen Diskussion herangezogen werden: das additive Modell und das synergische Modell.

Das additive Modell bezieht sich auf Versuchsergebnisse, die auf die möglichen Risiken deuten. Analog dazu wird auf die Risiken einer Freisetzung bestimmter GVO geschlossen.

Das synergische Modell bezweifelt, dass die Daten aus einem geschlossenen System (wie das Labor) auf komplexe Systeme (wie die Umwelt) zuverlässig übertragen werden können. Bei diesem Modell der Risikoanalyse sind alle relevanten Aspekte zu berücksichtigen.

Im Laufe des Unterrichts sollten die Schülerinnen und Schüler gefragt werden, ob sie im Zusammenhang mit der Freisetzung genmodifizierter, stickstoffbindender Bakterien Risiken sehen. Die Argumente werden aufgelistet, und die Ergebnisse werden anhand der zwei Modelle der Risikoanalyse kategorisiert.

Siehe auch: *Die Entwicklung der Risikoanalyse für die vorsätzliche Freisetzung genmodifizierter Organismen: ein Umriss der öffentlichen Diskussion*. Wiedergegeben als Anhang 6 (Seiten 27-29) in der EIBE-Einheit 10: *Transgene Pflanzen II: Ethische Debatte*.

## Sanieren:

### Die Umwelt entlasten

Dieser Abschnitt der Einheit behandelt die Rolle der Biotechnik bei der Beseitigung oder Minderung von Umweltschäden.

#### Ziele

Die Schülerinnen und Schüler sollen verstehen

- was die Bioemediation bezweckt und welche Vorteile sie der Gesellschaft bietet;
- dass die Bioremediation in Verbindung mit konventionelleren physikalisch-chemischen Ansätzen eingesetzt werden kann und dass sie nicht bei allen Umweltschäden den geeigneten Ansatz bietet;
- wie die Technologien der Bioremediation als Optimierung mikrobiologischer Vorgänge konzipiert sind;
- wie Boden- und Wasserverschmutzung zustande kommt und wie sie bekämpft werden kann: das Beispiel der Verschmutzung durch Kohlenwasserstoffe;
- was für eine Rolle biologische Vorgänge in den Kreisläufen von Kohlenstoff, Stickstoff und Schwefel spielen, sowie die Relevanz dieser Kreisläufe in der Aufspürung, Verhinderung und Remediation von Umweltschäden

# Feststellen von Umweltschäden



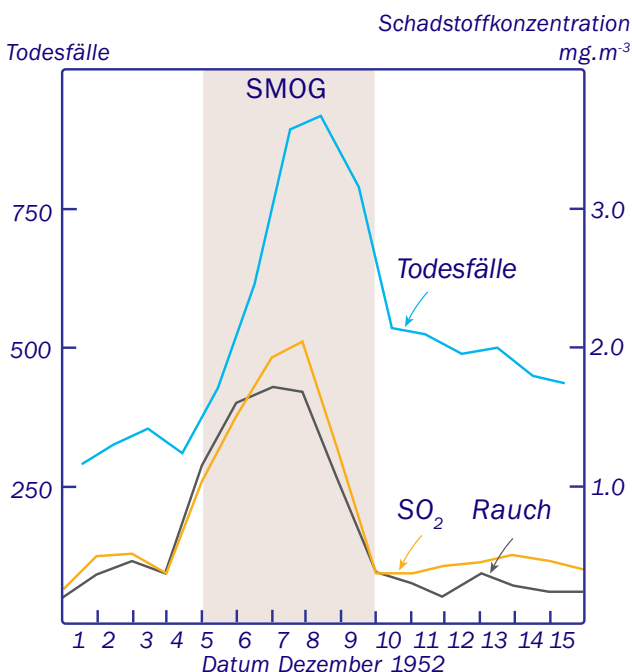
## Der Londoner Smog

Vor nicht allzu langer Zeit war die Großstadt London oft von Smog bedeckt. Die Bezeichnung "Smog" leitet sich aus den englischen Wörtern für Rauch und Nebel ab (smoke und fog), denn damals war der Nebel mit hohen Konzentrationen Rauch aus der Kohleverbrennung durchsetzt, was eine sehr eingeschränkte Sichtweite zur Folge hatte. In einem solchen Smog konnte man die eigene ausgestreckte Hand nicht mehr sehen, und wer ihn einatmete musste husten und keuchen.

Im Herbst 1952 lag fünf Tage lang ein dichter Smog auf London, der in dieser Zeit zu vermehrten Todesfällen führte. Circa 1000 Personen mehr als der Durchschnitt starben in den fünf Tagen. Die Todesursachen waren Bronchitis, Lungenentzündung, Asthma und andere chronische Erkrankungen der Atemwege.

Abbildung 2 zeigt, dass während der kritischen Phase sowohl der Schwefeldioxid- wie auch der Rußgehalt der Luft hoch war. Da die Verbrennung von Kohle und Holz Rußpartikel und Schwefeldioxid freisetzt, wird die Konzentration von Schwefeldioxid seit dieser Zeit als ein Indikator der Umweltqualität

**Abbildung 2: Todesfälle und Luftverschmutzung während des Londoner Smogs von 1952**



gemessen. Diese Überwachung der Luftqualität wird dadurch ermöglicht, dass Flechten gegenüber Schwefeldioxid in der Atmosphäre sehr empfindlich sind (siehe S. 13).

## Luftverschmutzung und Gesundheit

Wie wirkt sich verschmutzte Luft auf den Körper aus? In Städten mit verschmutzter Luft treten folgende, verwandte Gesundheitsprobleme vermehrt auf: Reizung der Atemwege, Keuchen, Husten, Atemnot, Übelkeit und Kopfschmerzen. Die Stärke der Symptome hängt davon ab, wie lange eine Person der verschmutzten Luft ausgesetzt ist, sowie von der Konzentration, der Ursache der Verschmutzung, dem Alter und der Gesundheit der Person. Viele der gesundheitlichen Probleme, die mit Schwefeldioxid zusammenhängen, können auch durch hohe Konzentrationen anderer Stoffe in der Luft hervorgerufen werden.

Weltweit werden Schwefelverbindungen zu den Hauptursachen der Luftverschmutzung gezählt. Schwefeldioxid ist ein farbloses Gas, das sich in Wasser leicht auflöst, woraus schweflige Säure entsteht. In der Atmosphäre wird die schwefelige Säure leicht in Schwefelsäure verwandelt, den Hauptbestandteil des "sauren Regens".

Schwefelsäurehaltige Aerosole sowie Sulfatverbindungen sind nachweislich korrosiv/ätzend und potentiell karzinogen. Der Kontakt mit 400 ppm SO<sub>2</sub> verursacht Lungenödem und Entzündungen der Bronchien; niedrigere Konzentrationen rufen Halsreizungen und Atembeschwerden hervor. Schwefeldioxid spielt eventuell auch in der Verstärkung chronischer Erkrankungen wie Asthma eine Rolle. Die Häufigkeit und die Intensität von asthmatischen Anfällen sind nachweislich höher, wenn Personen, die an Asthma leiden, höheren Sulfatkonzentrationen ausgesetzt sind, die sich aus den Reaktionen des Schwefeldioxids in der Atmosphäre ergeben.

## Schwefel in der Umwelt

Abbildung 3 zeigt den relativen Beitrag verschiedener Vorgänge zum globalen Schwefelhaushalt, während Abbildung 4 einen Überblick über die Rolle von Mikroben im Schwefelkreislauf gibt.

Zu den künstlichen (vom Menschen verursachten) Quellen gehören u.A. das Verbrennen fossiler Kraftstoffe (Kohle, Mineralöl) in stationären Anlagen wie Kraftwerken und Raffinerien und in kleinerem Maße in Haushalten. Dazu gehört auch die Materialgewinnung aus schwefelhaltigen Stoffen, z.B. Kupferverhüttung. Auch Dieselkraftstoffe und in geringerem Maße Benzin enthalten Schwefel und tragen ebenfalls zum Schwefeldioxid aufkommen in der Luft bei.

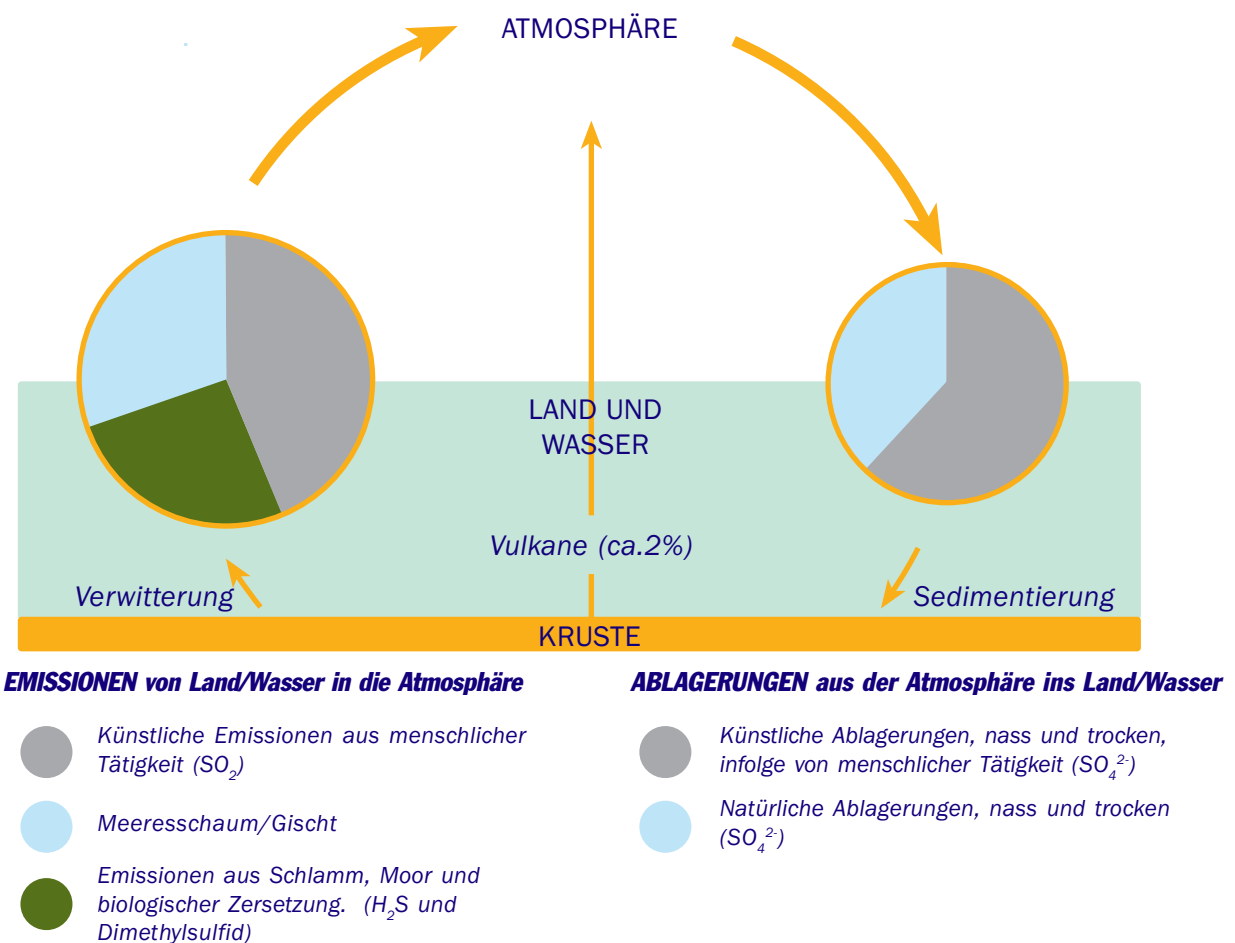
Schwefeldioxid wird auch in bedeutenden Mengen von natürlichen Quellen wie Meereschaum und vulkanischen Ausbrüchen freigesetzt. Die natürlichen Quellen spielen allerdings selten bei der Schwefeldioxidproblematik der Großstädte eine größere Rolle.

## Voraussetzung für das Leben

Das Element Schwefel kommt in den zwei Aminosäuren Cystein und Methionin vor und gehört daher zur Grundlage vieler Proteine. Schwefelatome können zwischen den sie enthaltenden Aminosäuren Querverbindungen schaffen. Diese Querverbindungen können einerseits zwischen zwei Aminosäuren derselben Kette entstehen, wie Oxytocin, das Hormon, das bei der Geburt eines Kindes die Kontraktionen der Gebärmutter bewirkt, oder Vasopressin, das Hormon, das die Urinproduktion reduziert, oft in Kombination mit Emotionen oder körperlicher Anstrengung. Die Verbindungen können auch zwischen zwei unterschiedlichen Ketten auftreten, wie es bei Antikörpern und dem blutzuckerregulierenden Hormon Insulin der Fall ist.

Zwei Vitamine, Thiamin und Biotin, enthalten ebenfalls Schwefel. Beide sind, wie auch Methionin, wichtige Nährstoffe für den Menschen. Alle sind in Lebensmitteln verbreitet vorhanden.

**Abbildung 3: Der globale Schwefelhaushalt**



## Messung der Luftverschmutzung

Der Schwefeldioxidgehalt der Luft kann mittels chemischer Analyse überwacht werden. Da Flechten ihr Wasser und notwendige Nährstoffe größtenteils aus der Luft beziehen, werden auch sie von der Luftqualität beeinflusst und können als Bioindikatoren der Luftverschmutzung und der  $\text{SO}_2$ -Konzentration dienen. Ein Rückgang in den Flechtenbeständen um Fabrikanlagen herum wurde schon im 19. Jahrhundert beobachtet.

## Flechten

Flechten sind klein und farbig, jedoch unscheinbar und leicht zu übersehen. Eine Flechte besteht eigentlich aus zwei Organismen, entweder aus einer Grünalge oder einem Cyanobakterium und einem Pilz, die in einem symbiotischen Verhältnis leben (Mutualismus). Die Alge betreibt Photosynthese und versorgt sich und den Pilz mit Kohlenhydraten und einigen Vitaminen. Der Pilz bietet der Alge Schutz; er zieht Wasserdunst aus der Luft und hält die Alge somit feucht.

Flechten sind auch zweckmäßig adaptiert, um extremen Feuchtigkeits- und Temperaturbedingungen standzuhalten. Wenn Feuchtigkeit vorhanden ist, wird sie vom Pilz aufgenommen. So kann mehr Licht eindringen, das die Photosynthese auslöst. Unter trockenen Bedingungen ruht die Flechte und wächst nicht.

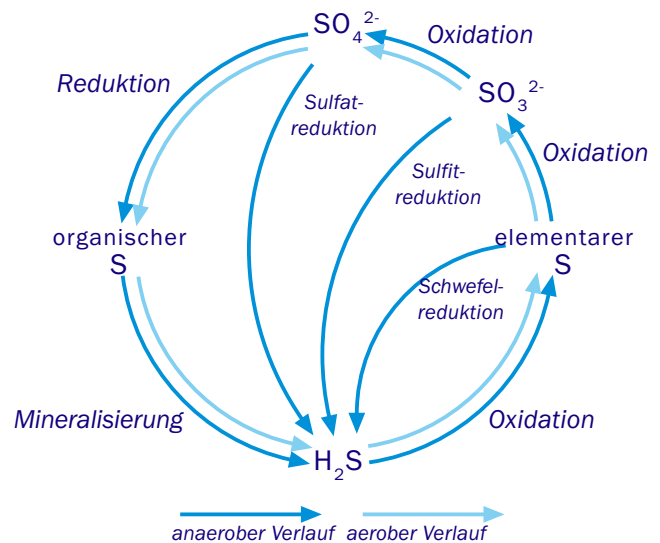
## $\text{SO}_2$ -Empfindlichkeit

Flechten treten an vielen verschiedenen Standorten auf, da sie in der Lage sind, unter schwierigen Umweltbedingungen zu überleben oder vielmehr sogar zu gedeihen. Sie sind oft als Pioniergewächse auf Sand zu finden, sind aber offensichtlicher als trocken aussehende grüne oder gelbe Flächen auf Felsen, Beton, Steingebilden und Baumstämmen anzutreffen.

Flechten sind hochgradig empfindlich gegenüber Luftverschmutzung, insbesondere in Form von Schwefeldioxid. Sie nehmen  $\text{SO}_2$  aus der Luft auf, haben aber keine Möglichkeit, es wieder auszuscheiden, was zu Konzentrationen führt, die die symbiotische Beziehung stören. Einige Flechtenarten sind  $\text{SO}_2$ -tolanter als andere.

Die Empfindlichkeit gegenüber der Luftverschmutzung ist je nach Flechtenart und pH-

## Abbildung 4: Mikrobiell verursachte Transformationen im Schwefelkreislauf



Wert des Standortes unterschiedlich. Flechten sind nicht an Standorten zu finden, die einen extrem niedrigen pH-Wert haben, d.h. die einen zu sauren Untergrund bieten. Die Chlorophyll-Moleküle der Algen werden durch den niedrigen pH geschädigt: Die Flechte verliert ihre übliche graue oder grüne Farbe und wird braun, gelb, rosa oder weiß, ungewöhnliche Farbgebungen, die aus dem Verlust des Chlorophylls resultieren. Der Organismus verliert seine photosynthetische Eigenschaft und stirbt.

Es ist festzustellen, dass bei zunehmendem  $\text{SO}_2$ -Vorkommen in einem Gebiet der Flechtenverlust phasenweise geschieht:

- Der erste Rückgang beschränkt sich auf Birken und Nadelbäume (saure Rinde und niedrige Puffereigenschaft)
- Die zweite Phase betrifft Eichen und Platanen/Ahorn (mittelsaure Rinde und mittlere Puffereigenschaft)
- Die dritte Phase betrifft Bäume wie die Ulme (alkalische Rinde und hohe Puffereigenschaft).

Alkalische Substrate wie basische Baumrinde oder Kalkstein wirken zu einem gewissen Grad der Säure entgegen, aber bei zunehmender Belastung durch  $\text{SO}_2$  werden lediglich die toleranteren Arten noch gefunden. Anhand von Untersuchungen der Flechtenvielfalt können Karten erstellt werden, die den Grad der Luftverschmutzung (als  $\text{SO}_2$ -Konzentration) darstellen.

# Luftverschmutzung messen



## Materialien

Karte  
 Metermaß oder Band (Mindestlänge: 1 Meter; Unterteilungen: 0,1 Meter)  
 Raster\*  
 Flechtenbestimmungsbuch (lokal)  
 Bilder oder Fotos von Flechten  
 Lupe, Pinzette  
 Datenerfassungsbogen (S. 15)  
 Papier, Bleistift und Klemmbrett  
 kleine Plastikbeutel

*\*RASTER: 0,5 m x 0,5 m, der Breite nach in zwei Abschnitte (je 0,25 m), der Länge nach in fünf Abschnitte (je 0,1 m) unterteilt.*

## Vorgehensweise

### *In Dreier- oder Vierergruppen*

1. Die Hinweise zur Stichprobe (unten) lesen. Die aufgeführten Materialien sammeln. 10 Stichprobenstandorte in einem Umkreis von einem Kilometer von der Schule aussuchen.

### *An jedem Stichprobenstandort*

2. Den Standort auf einer Karte feststellen oder in einem Plan skizzieren; mit ‚x‘ und Erkennungsziffer markieren.
3. Die Fläche des Standortes aussuchen, die die meisten Flechten aufweist (wahrscheinlich SW bis SO). Das Raster gegen die Fläche halten (bei Bäumen soll die untere Kante des Papiers 1 m oberhalb des Bodens sein).
4. Jede Flechte (womöglich dem Artnamen nach) erfassen. Es soll auch eingetragen werden, in welchen Rasterbereichen die jeweiligen Arten vorkommen (in einem Rasterfeld wird jede Flechtenart maximal 10mal vorkommen).
5. Falls Flechten vorhanden sind, die nicht identifiziert werden können, sollten Proben gesammelt und mit dem jeweiligen Standort sowie dem Rasterbereich gekennzeichnet werden.

## Hinweise zur Stichprobe

Es sollten 10 ähnliche Stichprobengebiete ausgesucht werden, d.h. nur Bäume, nur Fels/Stein oder nur Beton. Jedes Gebiet muss groß genug sein, damit der Rasterbogen gegen eine Seite angelegt werden kann.

### *Bei Bäumen.*

Wenn möglich soll jede Gruppe in jedem Stichprobengebiet gleichartige Bäume heranziehen. Es sollten vorzugsweise Bäume mit alkalischer Rinde ausgesucht werden (Esche, Ulme, Platane/Ahorn). Sollten diese Arten nicht vorhanden sein, können sie bei der Stichprobe durch Eiche, Buche oder Birke (in dieser Reihenfolge) ersetzt werden.

Es sollten große Bäume ausgesucht werden, deren Umfang zwischen 0,9 und 2,80 m liegt und deren Stämme unten freiliegen.

## Datenverarbeitung

6. Die Bestimmung der Flechtenproben vergleichen und bestätigen (mittels Nachschlagen sowie Befragung anderer Gruppen)
7. Die Summe sowie den Mittelwert (Summe/Anzahl Standorte) der Daten für jede aufgezeichnete Flechtenart berechnen.
8. Unter Berücksichtigung der vorhandenen Arten sowie deren Häufigkeit und der Beschaffenheit des Untergrunds, die Ergebnisse mit veröffentlichten Daten vergleichen und auf SO<sub>2</sub>-Konzentrationen schließen.

# Datenerhebungsbogen



Name .....

Datum .....

Gruppe .....

Untersuchungsgebiet .....

**Standorttyp** *(alle 10 sollten in einer Kategorie sein)*

- Garten
- Park
- Straßenrand
- Anderer und zwar .....

**Stichprobentyp** *(alle 10 sollten in einer Kategorie sein)*

- Baum Art .....
- Holz
- Stein
- Beton
- Felsen

## Ergebnistabelle

Trage jede Flechtenart ein, die festgestellt wurde, sowie die Anzahl der Rasterbereiche, in denen die Flechte am jeweiligen Standort vorkommt.

FLECHTENART	Anzahl der RASTERFELDER, in denen jede Flechte vorkommt										INSGESAMT	MITTELWERT
	Erkennungszahl des Standortes											

# Schützen: Umweltschäden vorbeugen



## Der Stickstoffkreislauf

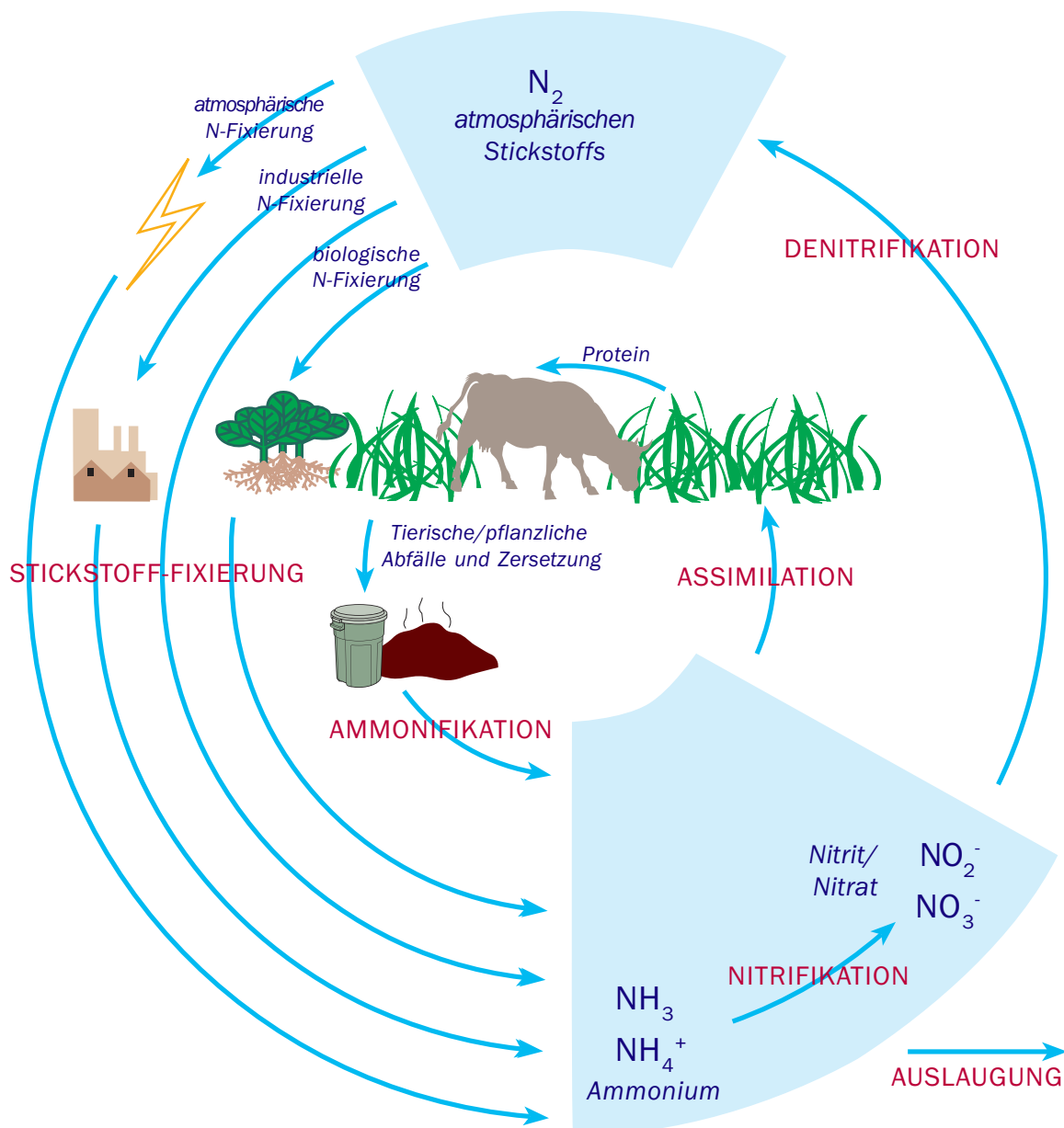
- Die atmosphärische Luft besteht zu 80% aus  $N_2$ .
- Stickstoff ist für jeden Organismus lebensnotwendig. Er wird zur Synthese von Proteinen, Nukleinsäuren und anderen wichtigen organischen Molekülen eingesetzt.
- Tiere können den  $N_2$  nicht aus der Luft beziehen und sind auf die Zufuhr durch tierische oder pflanzliche Nahrungsmittel angewiesen.
- Pflanzen können Luftstickstoff nicht verwerten.

Pflanzen und Tiere sind deswegen auf die Stickstoffverbindungen angewiesen, welche hauptsächlich vier Entstehungswege haben:

- biologische Stickstoff-Fixierung (durch Bakterien);
- chemische/industrielle Verfahren zur Herstellung von "Kunstdüngern"
- natürliche Entstehung in der Atmosphäre;
- Abbau organischer Stoffe durch Mikroorganismen.

Abbildung 5: Der Stickstoffkreislauf

Bahn der Stickstoffatome





**Tabelle 1: Weltbevölkerung und Nahrungsmittelproduktion**

Jahr	Weltbevölkerung (x10 <sup>9</sup> )	Anzahl der Menschen pro Quadrathektar Ertrag
1960	2.6	1.9
1970	3.7	2.6
1980	4.6	3.3
1990	5.5	3.9
2000	6.4*	4.6*
2010	7.6*	5.4*
2020	8.8*	6.3*
2030	10.5*	7.5*

\* Projektionen

### Die Abhängigkeit des Menschen vom Stickstoffkreislauf

Das Wachstum der Weltbevölkerung (Tabelle 1) und der technologische Fortschritt führen dazu, dass der Mensch immer stärker in die Ökosysteme der Welt eingreift.

Die landwirtschaftliche Praxis hat sich so verändert, so dass die Auswirkungen intensiver Bodenbewirtschaftung sowohl lokale wie auch geographisch weitreichende Folgen haben können. Betrachten wir zum Beispiel ein fruchtbares Feld in Italien. Eine gute Brokkoli-Ernte zieht einige Nährstoffe aus dem Boden. Der Brokkoli wird nach London geflogen und gegessen. Nach der Verdauung werden einige der Nährstoffe wieder ausgeschieden und finden über die Abwasseraufbereitung ihren Weg in die Nordsee. Um die Fruchtbarkeit des italienischen Feldes für eine weitere Ernte zu erhalten, müssen Dünger eingesetzt werden, während der Überschuss an Nährstoffen in Flüssen und Seen zu exzessivem Algenwachstum führen kann, was wiederum auf weitere Ökosysteme Auswirkungen hat.

Aus der Tabelle 1 ist ersichtlich, dass in Folge des zu erwartenden Zuwachses in den globalen Bevölkerungszahlen produktivere Anbaumethoden notwendig sind.

### Die biologische Stickstoff-Fixierung

Stickstoff, eines der wichtigsten Elemente, die im Boden zum Wachstum der Anbaupflanzen beitragen, wird aus dem Stickstoffgas gewonnen, das circa 80% der Luft ausmacht. Da die Pflanzen den gasförmigen Stickstoff nicht verwerten können, muss er fixiert (*gebunden/reduziert*) werden. Es entsteht dabei Ammoniak, eine verwertbare stickstoffhaltige Verbindung. Obwohl es ein industrielles Verfahren gibt, das zur kommerziellen Herstellung von "Kunstdünger" eingesetzt wird, findet global circa 80% der Stickstoff-Fixierung auf biologischer Basis statt, davon etwa 60% auf Land und 40% in Seen und Ozeanen. Pflanzen verwerten das Ammoniak, das durch die Stickstoffbindung entsteht, sowie andere gebundene Erscheinungsformen, die bei der Zersetzung von Pflanzen und anderem organischem Material entstehen.

**Tabelle 2: Stickstoff im Boden**

Art der Stickstoff-Fixierung	Geschätzter Beitrag zum Stickstoffgehalt des Bodens	
	t <sup>1</sup> jährlich (global)	kg ha <sup>-1</sup> Jahr <sup>1</sup>
Natürlich (in der atmosphärische Luft)	45 x 10 <sup>6</sup>	
Industriell (Haber-Bosch-Verfahren)	40 x 10 <sup>6</sup>	
Biologisch (Nitrogenase, Enzym)	175 x 10 <sup>5</sup>	
<i>freilebende Cyanobakterien in Reisfeldern,</i>		30 - 50
<i>andere freilebende Bakterien wie Azotobacter,</i>		0,4 - 0,8
<i>Rhizobium-Symbiose mit Hülsenfrüchtlern,</i>		100 - 300
<i>Symbiose der Cyanobakterien mit Azolla</i>		300

## Die biochemische und molekulare Grundlage der Stickstoff-Fixierung

Die biologische Stickstoff-Fixierung, wobei  $N_2$  zu Ammoniak reduziert und sofort in eine organische Form umgesetzt wird, ist wegen der N-N-Dreifachbindung ein außerordentlich energieaufwendiger Vorgang. Der Katalysator für den Reduktionsprozess, der mehrfach reguliert wird, ist der Enzymkomplex Nitrogenase. Die Gene für die Produktion und Regulierung des Nitrogenasekomplexes gehören zu einer Gengruppe, dem sogenannten Nif-Regulon (vgl. Abb. 6).

### Stickstoffbindende Organismen

Der lebensnotwendige Vorgang der Stickstoff-Fixierung findet ausschließlich bei Mikroorganismen statt und zwar bei einigen wenigen stickstoffbindenden Bakterien.

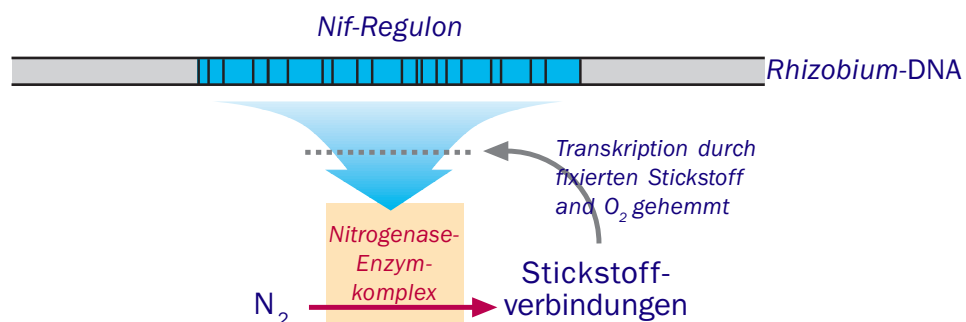
Die Nitrogenase-Enzymkomplexe aller stickstoffbindenden Organismen weisen bemerkenswerte Ähnlichkeiten auf und benötigen alle einen komplexen Eisen-Molybdän (oder manchmal -Vanadium)-Kofaktor. Die Nitrogenase ist hoch sauerstoffempfindlich (vgl. Abb. 6). In den aeroben Bakterien wird auf verschiedene Art und Weise verhindert, dass der Sauerstoff deaktivierend wirkt: der Sauerstoff wird über die Atmung schnell entfernt (*Azotobacter* hat die schnellste Atmung aller Organismen); schützende Schleimschichten werden hergestellt; in den Heterocysten der Cyanobakterien wird der

Vorgang physisch ausgesiedelt; bei *Rhizobium* wird einen "Sauerstoffpuffer", Leghämoglobin, eingesetzt. *Rhizobium* bildet stickstoffbindende Knöllchen (Nodule) an den Wurzeln von Leguminosen und kann nur in der Symbiose mit der Wirtspflanze stickstoffbindend wirken. Das Schlüsselprotein Leghämoglobin wird teils vom Bakterium, teils von der Pflanze codiert.

Es gibt außerdem noch anaerobe stickstoffbindende Bakterien (z.B. bestimmte Arten von *Clostridia*), die in sauerstofflosen Umgebungen leben und deren Nitrogenase daher nicht dem hemmenden Einfluss von Sauerstoff ausgesetzt ist.

Wenn *Rhizobium*-Stämme miteinander verglichen werden, stellt man fest, dass einige eine höhere stickstoffbindende Fähigkeit (Nif-Regulon) haben, während andere in der Nodulation bessere Werte aufweisen (Nod-Regulon). Einige der Stämme, die in den kommerziellen Impfkulturen Verwendung finden, haben zwar eine gute stickstoffbindende Eigenschaft, können sich aber in der Knöllchenbildung gegenüber den im Boden natürlich vorkommenden Stämmen nicht so gut behaupten. Die genetischen Eigenschaften des Nod-Regulons werden zur Zeit untersucht. Man hofft, zukünftig Gene übertragen zu können, um die Wettbewerbsfähigkeit derjenigen Stämme zu steigern, die in der Stickstoff-Fixierung leistungsfähiger sind.

**Abbildung 6: Regulierung der Stickstoff-Fixierung**



## Abb. 7: Isolierung der Gene für die Knöllchenbildung (*nod*<sup>+</sup>) aus *Sinorhizobium meliloti*

Ein Klonvektor (in diesem Fall ein künstliches Phagen-Plasmid-Hybrid: Cosmid) wird mit dem Restriktionsenzym *EcoRI* verdaut.

*EcoRI*-Restriktionsfragmente (30-40 Kilobasenpaare) der DNA aus *Sinorhizobium meliloti* (*nod*<sup>+</sup>) werden gewonnen.

Die *Sinorhizobium*-DNA-Fragmente werden, zusammen mit der Vektoren-DNA, mittels DNA-Ligase in längere DNA-Stücke eingebaut.

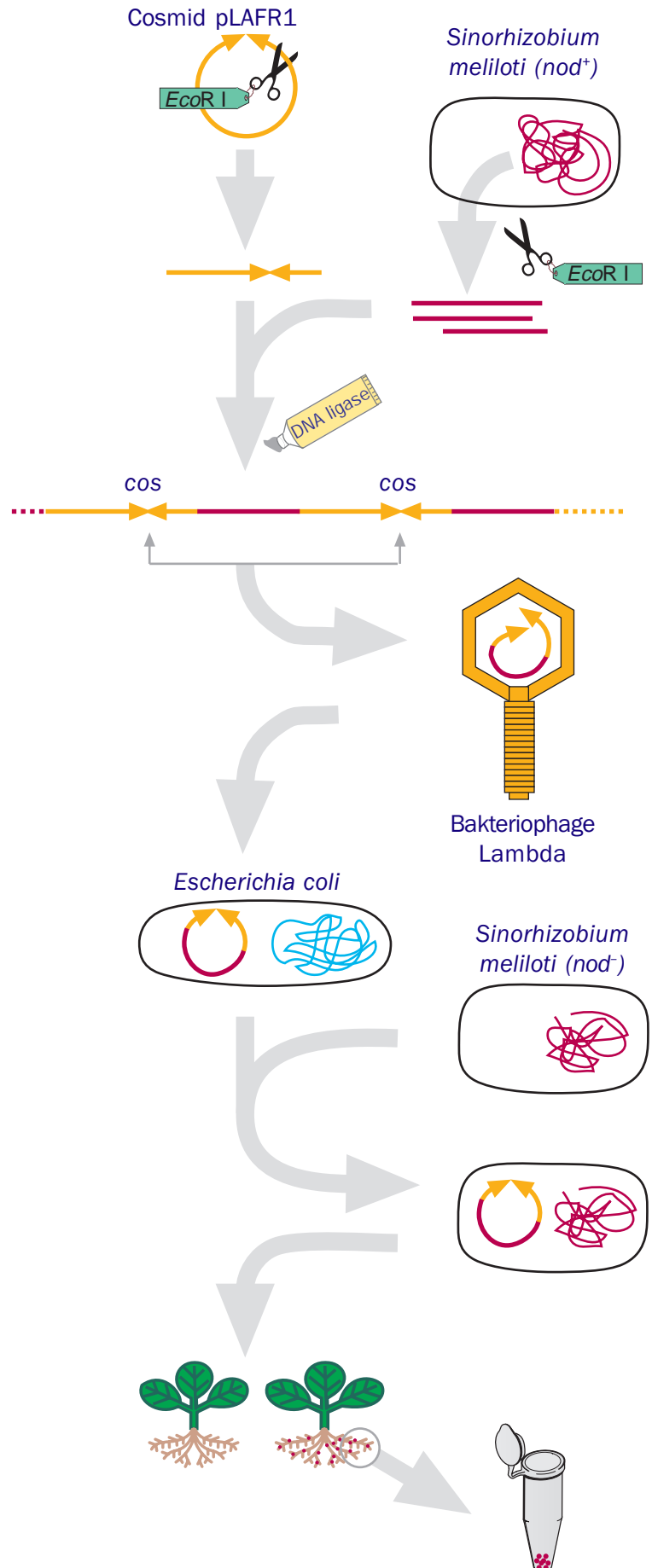
Kopf- und Schwanzproteine des Bakteriophagen Lambda werden hinzugefügt, die die *Cos*-Stellen auf den DNA-Längen erkennen und, wenn die DNA zwischen diesen Stellen von geeigneter Länge ist, diese schneiden und als brauchbare Phagenpartikel verpacken.

Die Phagenpartikel werden benutzt, um die *E.coli*-Bakterien zu transduzieren. (Der Phage injiziert seine DNA in die Bakterienzelle, wo sie ein neues Cosmid bildet.)

Die Cosmide werden per Konjugation auf die Zellen eines mutierten Stammes von *Sinorhizobium meliloti*, der selber keine Knöllchen bilden kann (*nod*<sup>-</sup>) übertragen.

Leguminosen werden mit dem transformierten *Sinorhizobium* inokuliert. Wenn das Cosmid *Nod*<sup>+</sup>-Gene enthält, bilden sich Knöllchen an den Pflanzenwurzeln.

Knöllchen werden aus selektierten Pflanzen isoliert; die DNA wird extrahiert, um die an der Nodulation beteiligten Gene zu identifizieren.



Das Ziel dieser Forschung ist der Abbau der Abhängigkeit der Landwirtschaft von "Kunstdüngern" und somit die Milderung der damit verbundenen Umweltprobleme. Aber zuerst müssen die Nodulationsgene aus dem Bakterium gewonnen werden. Die Abbildung 7 (S.19) zeigt, wie ein solcher Vorgang aussehen kann.

Viele Untersuchungen wurden schon durchgeführt, um die biochemischen und genetischen Grundlagen der Nodulation zu ergründen, aber wegen der komplexen Natur der Symbiose zwischen den höheren Pflanzen und *Rhizobium* ist weiterhin noch viel zu erforschen.

## Praktische Übungen 2 und 3

Die folgenden zwei Untersuchungen (Seiten 21 und 22) befassen sich mit der Kultivierung zweier stickstoffbindenden Bodenbakterien: das eine, *Azotobacter*, ist ein freilebendes Bodenbakterium; das andere, *Rhizobium*, lebt in Symbiose in Knöllchen an Pflanzenwurzeln. Trotz ihrer Bedeutung kommen sie im Vergleich zu anderen Bodenbakterien nur in geringer Zahl vor. Daher müssen selektive Methoden, die das Wachstum anderer Organismen verhindern oder hemmen, Verwendung finden, wenn sie aus natürlichen Quellen kultiviert werden sollen.

### 2. *Azotobacter*

Das Vorhandensein von *Azotobacter* im Boden kann mittels eines Nährmediums aufgezeigt werden, dem kein Stickstoff zugefügt wird. Es ist daher "stickstofffrei" und somit ein Beispiel eines selektiven Mediums.

### 3. *Rhizobium*

*Rhizobium* kommt in zwei Varianten vor: die im Boden freilebende Form sowie die symbiotische Form in Nodulen an Hülsenfrüchtlern wie Erbsen und Klee. *Rhizobium* kann jedoch nur im Knöllchen Stickstoff fixieren und kann somit nicht in einem selektiven, stickstofffreien Medium kultiviert werden. Um das Vorhandensein des Bakteriums in einem Nodul aufzuzeigen, wird zuerst die Außenseite des Knöllchens chemisch sterilisiert. Anschließend wird das Knöllchen zerdrückt und in ein Medium inokuliert, das bereits "fixierten" Stickstoff enthält.

# Ein freilebendes Bakterium, das Stickstoff fixiert: *Azotobacter*



## Material

Bodenprobe  
Wasserfester Filzstift  
Klebeband  
Inkubator, 25°

### *Steril:*

Petrischale mit Nähragarmedium  
Petrischale mit stickstofffreiem,  
mineralsalzhaltigem Agarmedium\*

### \* Stickstofffreies Agarmedium mit Mineralsalzen

Für 500m<sup>3</sup> :

0,05g FeCl<sub>3</sub>·6H<sub>2</sub>O  
2g K<sub>2</sub>HPO<sub>4</sub>  
0,25g MgSO<sub>4</sub>·7H<sub>2</sub>O  
10g Traubenzucker

Zuerst FeCl<sub>3</sub>, dann die weiteren Bestandteile in 500m<sup>3</sup> dest. Wasser auflösen. Den pH-Wert feststellen und bei Bedarf auf 8,3 einstellen. In eine Flasche füllen, in der schon

1,0g CaCO<sub>3</sub>  
7,5g Agar

bereitgestellt wurden. Autoklavieren (121°C, 21 Minuten). Vor dem Gießen die Flasche schütteln, um das CaCO<sub>3</sub> aufzulösen. Pro Petrischale 20cm<sup>3</sup> Agarmedium gießen.

## Vorgehensweise ERSTE WOCHE

1. 10-20 Erdreichkrümel auf die Oberfläche eines schon vorbereiteten, stickstofffreien, mineralsalzhaltigen Agarmediums in einer Petrischale verteilen. Die Schale schließen und auszeichnen.
2. Schritt 1 wiederholen, aber mit einer Petrischale, die ein nicht-selektives Nährmedium enthält.
3. Ohne die Platten auf den Kopf zu stellen (da sonst die Erdreichkrümel aus dem Medium fallen), die Kulturen bis zu einer Woche bei 25° inkubieren.

## ZWEITE WOCHE

4. Die Platten auf mikrobielles Wachstum untersuchen. Kolonien von *Azotobacter* sehen mukoid (schleimig) aus und sind oft farblos. Sie sind um die Erdreichpartikel herum zu erwarten.
5. Die Kultur auf dem stickstofffreien Medium mit derjenigen auf dem Nährmedium vergleichen und eventuelle Unterschiede erklären.
6. Die Kulturen per Mikroskop untersuchen.

---

## Fragen:

1. Was ist in diesem Versuch die Stickstoffquelle für *Azotobacter*?
2. Warum wachsen andere Mikroorganismen nicht, oder zumindest nur schlecht, in diesem Medium?
3. Wie würden Sie untersuchen, ob *Azotobacter* auch dann wachsen kann, wenn eine Quelle fixierten Stickstoffs vorhanden ist?

# Stickstoff-Fixierung in Wurzelnodulen: Isolierung von *Rhizobium*



## Material

- Pflanze mit Knöllchen (z.B. Klee)
- Schere
- kleiner Becher oder Schale mit vergälltem Alkohol
- Bunsenbrenner mit Unterlage
- Wasserfester Filzstift
- Inkubator, auf 25° eingestellt
- Pinzette
- Glasstäbchen
- Impföse
- kleiner Becher oder kleine Schale mit vergälltem Alkohol, mit einer Folie abgedeckt  
*(Achtung: brennbar, sollte in sicherer Entfernung von offenen Flammen zugedeckt gehalten werden)*
- Steril:*
- Wasser, 100 cm<sup>3</sup>
- Becher oder Schalen zum Waschen, 3
- Petrischale oder Objektträger, 1
- Tropfpipette, 1
- Hefeextrakt-Mannitol-Agarplatte\*, 1
- Stickstofffreie, mineralisalzhaltige Agarplatte (siehe S. 24), 1

### \* Hefeextrakt-Mannitol-Agarmedium

Zur Herstellung von 500m<sup>3</sup>

- 0,25g K<sub>2</sub>HPO<sub>4</sub>
- 0,1g MgSO<sub>4</sub>·7H<sub>2</sub>O
- 0,05g NaCl
- 0,5g Hefe-Extrakt
- 5g Mannitol

Die aufgeführten Bestandteile in 500m<sup>3</sup> dest. Wasser auflösen. Den pH-Wert kontrollieren und gegebenenfalls auf 7,0 einstellen. In eine Flasche mit

- 0,15g CaCO<sub>3</sub>
- 7,5g Agar

umfüllen. Autoklavieren (20 Minuten bei 121°). Vor dem Gießen die Flasche schütteln, um das CaCO<sub>3</sub> zu verteilen. Pro Petrischale 20 cm<sup>2</sup> Agarmedium gießen.

## Vorgehensweise

### ERSTE WOCHE

1. Ein kleines Stück (ca. 1 cm) des Wurzelwerkes einer Kleepflanze (mit Knöllchen) abschneiden.
2. Das Wurzelstück unter fließendem Wasser gründlich reinigen, um es von Erdreichtresten zu befreien.
3. In vergälltem Alkohol 1 Minute eintauchen.

### Ab diesem Zeitpunkt ist aseptisch zu arbeiten

4. Mit einer sterilen Pinzette aus Metall (die mit Alkohol abgeflammt und abgekühlt wurde) die Probe dreimal in steriles Wasser eintauchen, um den Alkohol gänzlich abzuspülen.
5. Mit sterilen Geräten einen Tropfen steriles Wasser auf eine Petrischale oder in die Mulde eines Objektträgers pipettieren, das Wurzelstück darauf legen und mit einem Glasstäbchen oder einer Pinzette zerdrücken.
6. Eine Impföse abflammen; mit Hilfe der Öse etwas von der milchigen Flüssigkeit aus dem zerdrückten Knöllchen entnehmen und auf die Agarplatte mit Hefeextrakt-Mannitol-Medium einen Ausstrich machen. Die Platte kennzeichnen.
7. Die Impföse erneut sterilisieren und auf einer Agarplatte mit stickstofffreiem Mineralsalz-Medium einen zweiten Ausstrich machen. Die Platte kennzeichnen.
8. Die Platten bis zu einer Woche bei 25° C inkubieren.

## ZWEITE WOCHE

9. Die Platten auf mikrobielles Wachstum untersuchen. *Rhizobium*-Kolonien sind glänzend, mukoid (schleimig) und fast weiß; andere Kolonien stammen von anderen Mikroorganismen, die im Erdreich vorhanden waren.
10. Das Wachstum auf beiden Medien vergleichen und die Unterschiede erklären.

## Fragen:

1. Was bewirkt der vergällte Alkohol?
2. Warum werden zwei unterschiedliche Medien verwendet?
3. Was sind die Stickstoffquellen in den beiden Medien?
4. Die Bakterien benötigen auch eine Kohlenstoff- und eine Energiequelle. Welche Bestandteile der Medien liefern Kohlenstoff und Energie?
5. Wie erfolgreich war die Sterilisation des Noduls

# Sanieren: Die Umwelt entlasten



Unter Sanierung (*Remediation*) versteht man die Minderung oder Eliminierung von Umweltrisiken, die aus der Akkumulation von giftigen Chemikalien und anderem Sondermüll resultieren. Zu diesem Zweck finden physikalisch-chemische Vorgänge verbreitet Verwendung, aber inzwischen werden auch biologische Systeme entwickelt. Die Bioremediation bedient sich der Prozesse lebender Organismen und deren Enzyme. Meist werden physikalische, chemische und biologische Verfahrensweisen kombiniert eingesetzt, um Sanierungslösungen zu finden.

Die Bioremediation kann dort zum Einsatz kommen, wo Böden, Grundwasser oder See- und Ozeangebiete kontaminiert sind, und dort wo Industrie- und Wirtschaftsunternehmen Schadstoffe emittieren. Die Verfahren der Bioremediation haben viel Ähnlichkeit mit den Verfahren der Biosanierung von Abfällen/Abwässern, und die Ansätze haben in ihrer Auseinandersetzung mit der Umweltverschmutzung vieles gemeinsam. Als Beispiele der Bereiche, wo Lösungen über die Bioremediation gesucht werden, seien folgende größere Problemfelder genannt:

- Sanierung von industriellen Altlasten in innerstädtischen und Stadtrandgebieten (*“brownfield sites”*): Durch Neuentwicklung der Areale soll die Lebensqualität in den Gebieten gesteigert werden, damit sie für andere Zwecke genutzt werden können (wie Wohnungsbau, Gewerbe, Freizeitangebote) damit solche Projekte sich nicht “auf die grüne Wiese” verlagern (*“greenfield sites”*).
- Sanierung von schwermetallbelasteten Böden: Dazu gehören Areale, auf denen sich nach der Schließung der dort angesiedelten Metall-, Gas- und Kraftwerke große Menge metallhaltiger Asche befinden. Bei alten Gaswerken sind auch noch Kohlen- teer und Schweröle vorhanden.
- Renaturierung von verfüllten Mülldeponien, um die Flächen anschließend für neue Zwecke (Wohnungsbau, Gewerbe, usw.) zu nutzen.
- Dekontaminierung des Grundwassers und des Bodens bei Verunreinigung durch entweichende Kohlenwasserstoffe (aus

korrodierten Kraftstoffbehältern, von Eisenbahnstrecken und Autobahnen; dazu Chlorkohlenwasserstoffe aus industriellen Reinigungsmitteln).

- Behandlung von Grund- und Oberflächenwasserbeständen, die durch die Versickerung sauren Abwassers aus Kohle- und Abraumphalden oder stillgelegten Bergbauzechen kontaminiert wurden.
- Behebung von Ölverschmutzung, die in Folge von Tankerunfällen oder kriegerischen Auseinandersetzungen in Meeresgebieten auftritt.
- Verschiebung des Schwerpunktes: Von der Philosophie der Abfallbeseitigung hin zu einer Philosophie der Vermeidung oder Minimierung von Umweltverschmutzung.

Die lebenden Systeme, die in der Bioremediation zum Zuge kommen, sind typischerweise Mikroorganismen, aber es wird auch über den Einsatz von Pflanzen nachgedacht, die Metallrückstände aus belasteten Böden ziehen (die sogenannte Bioakkumulation), sowie über die Verflüchtigung dieser Metalle in die Atmosphäre. Die Attraktion der Mikroorganismen liegt in ihrer Fähigkeit, ein sehr breites Spektrum natürlicher und synthetischer Substanzen in ihren Stoffwechsel einzubeziehen, da sie eine große Stoffwechselvielfalt aufweisen.

Die Technologien der Bioremediation haben viele Vorzüge, aber diese müssen gegen ihre Nachteile und gegen die Vorzüge der konkurrierenden Verfahren, der physikalisch-chemischen Technologien, abgewogen werden (vgl. Tabelle 3, S. 24). Diese relativ neue Techniken müssen in manchen Bereichen weiterentwickelt werden, damit die Bioremediation ihr volles Potential entfalten kann. Dazu gehören zum Beispiel die Zusammenarbeit mit anderen Disziplinen und Technologien, die Methoden, Kriterien und Techniken der Begutachtung, die Modellierung der Freilandübertragung, die Projizierung der Feldergebnisse und die Erstellung von Datenbanken aus der Dokumentation der Freilandversuche.

**Tabelle 3: Vor- und Nachteile der Technologien der Bioremediation**

**VORTEILE**

Einsparungen in den Betriebskosten gegenüber anderen Technologien

minimale Störung des Standortes

niedrige Kapitalkosten

Vernichtung von Schadstoffen, d.h. keine geographische Verlagerung des Problems

Nutzung der Interaktionen mit anderen Technologien

**NACHTEILE**

Anwendbarkeit hängt von der Schadstoffart und von den örtlichen Bedingungen ab

eventuell lange Zeiträume

Feststellung der Machbarkeit ist zeitaufwendig und teuer

öffentliche Bedenken über die Sicherheit großangelegter Behandlung vor Ort

benötigt Input aus anderen Technologien

**Der Markt für die Bioremediation**

Da die Industrie zunehmend glaubt, dass sauberere Produktionsmethoden zu Einsparungen in den Kosten für Energie und Rohstoffe führen, wächst die Nachfrage nach der Bioremediation. Organisationen wie die OECD (*Organisation for Economic Co-operation and Development*), die in Brüssel ihren Hauptsitz hat, berichten über diese Entwicklungen und über zukünftige Trends und Bedürfnisse. Genaue Schätzungen des Weltmarktwertes von Umwelttechnologien sind schwierig, aber vieles deutet darauf hin, dass seit 1990 ein Gesamtwachstum von 5 bis 10% stattgefunden hat. Ein Wachstum dieser Größenordnung lässt auf ein starkes Steigerungspotential schließen. Demnach könnte der globale Markt für diese Technologien auf die Hälfte des Marktes für die etablierte chemische Industrie wachsen.

Für Europa, das etwa ein Fünftel des projizierten Weltmarktes ausmacht, liegen die Schwerpunkte bei Luftverschmutzung, Sanierung kontaminierter Böden und Abfallbehandlung. Die beiden letztgenannten Bereiche sind die am schnellsten wachsenden Sektoren, da es einerseits Zehntausende sanierungsbedürftige Areale gibt und andererseits die Zahl der Mülldeponien immer knapper wird, da ihre Nutzung immer strengeren Kontrollen unterworfen wird, um die Emissionen des Treibhausgases Methan zu reduzieren.

Die Bedürfnisse sind von Land zu Land unterschiedlich und hängen vom jeweiligen Ausmaß der Umweltbelastung, von der Infrastruktur

und von den Märkten ab. Beispielsweise wächst der Sektor verstärkt, besonders im Bereich der Abwasserbehandlung, in Ländern wie Griechenland, Süditalien, Portugal und einigen Regionen Spaniens, wo die EU finanzielle Unterstützung gibt, während in Ländern, in denen strengere Umweltkontrollen schon existieren, wie Dänemark, Finnland, Deutschland und den Niederlanden, ein langsames Wachstum zu beobachten ist. In den Ländern, die in manchen Sektoren noch Leistungen erbringen müssen, um EU-Bestimmungen zu erfüllen, wie zum Beispiel Belgien, Irland, Norditalien und Großbritannien, liegen die Wachstumszahlen im mittleren Bereich.

**Die Technologien der Bioremediation**

Die Bioremediation nutzt Verfahren, die entweder direkt vor Ort (*in-situ*-Verfahren) oder nach Überführung des Materials in Verarbeitungszentren (*ex-situ*-Verfahren) eingesetzt werden können. Die *in-situ*-Sanierung kann auf zweierlei Weise erfolgen.

*Bioenhancement* ist ein Ansatz, der die Bedingungen des belasteten Gebietes – wie Nährstoffgehalt, Bewässerung und Belüftung – zu verbessern versucht, um die Wirkung der dort natürlich vorkommenden Organismen zu unterstützen, die in der Lage sind, Schadstoffe in ungefährliche Substanzen umzusetzen. Bei der *Bioaugmentation* werden dem belasteten Areal gezielt Kulturen der Mikroorganismen zugesetzt, die nachweislich die gewünschten Abbauvorgänge einleiten. Verschmutzte Boden- oder Wassermengen, die zur *ex-situ*-Behandlung entfernt werden, werden konventionell



aufbereitet. Zu diesen konventionellen Verfahren gehören die Kompostierung und die Abwasserreinigung in Bioreaktoren. Das belastete Material kann auch *Land-Farming* unterzogen werden, wobei es abgedichteten Biobeeten hinzugefügt wird, damit die Schadstoffe durch natürliche biologische Vorgänge abgebaut werden können, eventuell mit Hilfe des Bioenhancement oder der Bioaugmentation.

Obwohl die Bioaugmentation u.U. als der naheliegende Ansatz erscheint – und in der Tat auch schon kommerziell eingesetzt wird – sollte man einsehen, dass diese Strategie nicht leicht gelingt. Bei der Zubereitung einer geeigneten mikrobiellen Kultur, die die natürlichen mikrobiellen Vorgänge in einem Areal beschleunigen soll, darf nicht außer Acht gelassen werden, dass in der freien Natur ein Mikroorganismus selten allein funktionieren kann. Daher ist es meist notwendig, die Impfkultur als eine Mischung mehrerer Mikroorganismen herzustellen. Schließlich ist der einzelne Organismus in der Natur Teil einer komplexen ökologischen Gemeinschaft, in der viele Wechselwirkungen stattfinden, die das Wachstum, den Stoffwechsel und das Überleben beeinflussen. Die Wechselbeziehungen können als Kommensalismus, Synergismus und Mutualismus an sich vorteilhaft sein, aber das Resultat kann wegen Konkurrenz, Amensalismus, Parasitismus und Feindschaft negativ sein – Faktoren, die gegen den Erfolg von zugesetzten “Fremdkulturen” wirken.

Die erfolgreiche Impfung eines verschmutzten Areals mit einer geeigneten Mischung mehrerer Mikroorganismen hängt von den passenden Bedingungen bezüglich pH-Wert, Sauerstoff, Nährstoffe und Wasser ab. Diese Bedingungen alleine reichen allerdings nicht aus, um den Erfolg zu garantieren. Um die Erfolgchancen zu steigern, muss beispielsweise darauf geachtet werden, dass die Startkultur in ausreichenden Mengen und in geeigneter Form (d.h. als Flüssigkeit oder mit einem festen Trägerstoff, um das Ausspülen zu verhindern) geimpft wird und eine ökologische Nische mittels Zugabe gewisser Nährstoffe geschaffen werden kann.

Es wird oft vorgeschlagen, dass gentechnisch veränderte Organismen (GVO) potentiell einen großen Beitrag zur Umweltsanierung leisten könnten, aber auch hier ist Vorsicht

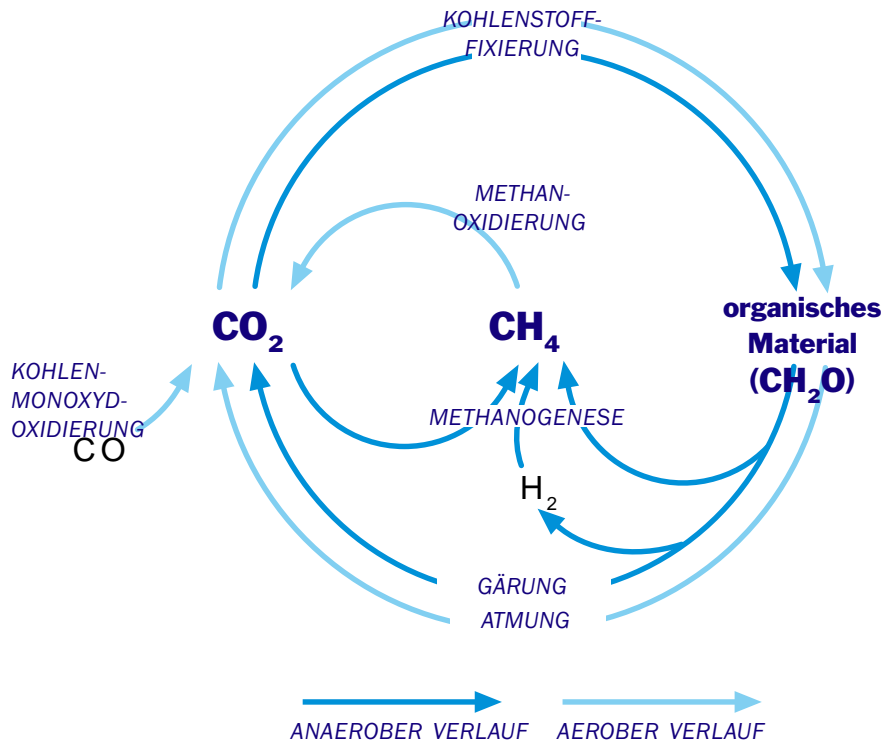
geboten. Bei GVO gelten zwei Haupteinschränkungen, die es zu überwinden gilt, wenn sie bei *in-situ*- und *ex-situ*-Verfahren der Bioremediation eingesetzt werden sollen. Verglichen mit natürlich vorkommenden Zusammensetzungen von Mikroorganismen müssen sie ähnlich gute Fähigkeiten aufweisen, und sie müssen physiologisch ähnlich robust sein. Ferner stellen die Gesetzgebung und die öffentliche Meinung weitere Hürden dar.

## **Der Kohlenstoffkreislauf und die globale Erwärmung**

Die Erkenntnis des Kohlenstoffkreislaufs liegt dem internationalen Abkommen von Kyoto (1997) zugrunde. Dieses Abkommen sollte zur Bekämpfung der globalen Erwärmung beitragen, indem auf eine Reduzierung des Kohlenstoffdioxidausstoßes um zumindest 5% bis 2012 gezielt wird. Anhand der Abbildung 8 (Seite 26) wird sichtbar, dass Biobehandlung und Bioremediation bei diesen Diskussionen von gewisser Relevanz sind. Zum Beispiel funktioniert ein Methan gas in der Luft wie ein Treibhausgas und ist in dieser Eigenschaft um das 27fache wirkungsvoller als Kohlenstoffdioxid. Die anaerobische Produktion von Methan durch Mikroorganismen trägt zum Methangehalt der Atmosphäre bei, ein Grund für die restriktiven EU-Bestimmungen in Bezug auf Mülldeponien, die als Methanquellen gelten. Kohlenstoffdioxid ist ein Produkt der Aktivität von den Mikroorganismen, die an der Bioremediation und anderen natürlichen Vorgängen (wie Kompostierung, Atmung bei Pflanzen und Tieren) beteiligt sind. Die Produktion von CO<sub>2</sub> bei der Verbrennung von Holz und fossilen Brennstoffen kann als Zurückführung jenes Gases an die Atmosphäre angesehen werden, das ihr vor langer Zeit durch Photosynthese entzogen wurde.

Andererseits, da Pflanzen einen hohen Bedarf an Kohlenstoffdioxid haben (und sich jährlich ca. 15% des Kohlenstoffdioxids aus der Atmosphäre ziehen), wird mancherorts über die Erweiterung der Waldbestände nachgedacht, um der Luft schädliches Kohlenstoffdioxid zu entziehen, was auch als eine Art Bioremediation angesehen werden könnte. Die Funktion der Wälder als “Kohlenfresser” ist allerdings nicht in allen Einzelheiten geklärt, und der Wert

**Abbildung 8: Der Kohlenstoffkreislauf**



dieses Lösungsvorschlags kann erst dann ausgelotet werden, wenn die naturwissenschaftlichen und quantitativen Grundlagen besser erforscht sind. Zu den noch zu klärenden Fragen gehören die möglichen Konsequenzen größerer Waldflächen, wenn sie zum Beispiel zu einer gesteigerten Sonnenlichtaufnahme und zu Veränderungen in der Artenverteilung und in der Pflanzenphysiologie führen, wobei die Bäume (und das Phytoplankton der Ozeane) anfangen würden, mehr Kohlenstoffdioxid auszustößen als zu absorbieren. Emissionen würden auch entstehen, wenn die Bäume später einer Nutzung zugeführt werden.

### Kohlenwasserstoffe als Schadstoffe

Kohlenwasserstoffe gelten als wichtiges Beispiel der Umweltverschmutzung, weil sie zu den häufigsten Ursachen der Verunreinigung von Grundwasser gehören und sich auch im Erdöl befinden, das bei Tankerunglücken für so viel Aufsehen in den Medien sorgt. Kohlenwasserstoffe bestehen ausschließlich aus Kohlenstoff und Wasserstoff. Sie sind Bestandteile von Kraftstoffen wie Benzin, Diesel, Kerosin und Heizöl, sowie Lösungsmitteln und Holzschutzmitteln. Es gibt eine Vielzahl unterschiedlicher Kohlen-

wasserstoffe in Rohöl und in raffiniertem Erdöl. Einige sind in der Tabelle 9 (Seite 27) aufgeführt. Auch Schwefelverbindungen können vorhanden sein.

Unterschiedliche Kohlenwasserstoffe haben unterschiedliche physikalisch-chemische Eigenschaften, die ihre Lebensdauer und Abbaufähigkeit beeinflussen. Sie können in nicht-wässriger Phase oder wasserlöslich sein; sie können sich in ihrem Siedepunkt unterscheiden, was den Grad der Verflüchtigung beeinflusst: Benzin enthält vorwiegend leichtere, leichter siedende Verbindungen wie Pentane und Benzol, während Kreosot und Kohlenteer schwer siedende Verbindungen beinhalten.

### Der biologischer Abbau von Kohlenwasserstoffen

Obwohl ziemlich alle Kohlenwasserstoffe des Petroleums vorwiegend zu Kohlenstoffdioxid und Wasser oxidiert werden können, variiert die Geschwindigkeit des Vorgangs und hängt von Faktoren ab wie die Art und Menge der Kohlenwasserstoffe, den herrschenden Umweltbedingungen oder Art, Menge und Fähigkeiten der vorhandenen Mikroorganismen. Dies wird wiederum von der Art und Menge anderer vorhandener Substanzen beeinflusst, die

entweder natürlich an der gleichen Stelle vorkommen oder eingeführt werden und die Nährstoffe und Sauerstoff für die Reaktionen des biologischen Abbaus liefern. Zu den anderen physikalischen Einschränkungen, die für Öl typisch sind, gehören die wasserabweisenden Eigenschaften und die Schwerlöslichkeit. Der Kontakt zwischen Mikroorganismen und Öl muss also unterstützt werden. Dazu verhelfen die speziell ausgesuchten Eigenschaften der Organismen sowie die Zusätze, die die oleophilen (“öliebende”) Eigenschaften des Milieus steigern.

### Kohlenwasserstoffverschmutzung im Boden

Die “Kohlenwasserstoffspur”, die sich unter einem undichten Benzintank in den Boden und ins darunter befindliche Grundwasser ausbreiten würde, wird in der Abbildung 10 schematisch dargestellt. Die meisten Mikroorganismen, die Kohlenwasserstoffe nutzen, sind aerob. Die Bedeutung der dargestellten aeroben und anaeroben Zonen liegt daher auf der Hand. Die Aktivitäten der aeroben Mikroorganismen werden bei großen Mengen Benzins einge-

**Abb. 10: Profil einer Grundwasserspür bei Anwendung moderner Remediations-Technik**



schränkt, da die beschränkte Menge verfügbaren Sauerstoffs an den Rändern der Spür schnell verbraucht wird.

Es existieren einige gut dokumentierte Beispiele für den Abbau von Spuren gelöster Kohlenwasserstoffe, u.a. auch Kreosot und Petroleum, durch natürlich vorkommende Mikroorganismen ohne menschliche Intervention. Indirekte Beweise liefern auch Beobachtungen wie zum Beispiel in den USA. Obwohl dort 90% aller in den Boden eingelassener Tanks zur Speicherung von Benzin genutzt werden, sind die am häufigsten festgestellten Verschmutzungen des Grundwassers eher auf chlorhaltige Lösungsmittel zurückzuführen, was darauf hindeutet, dass der natürliche biologische Abbau die Petroleum-Kontamination auf ein nicht aufspürbares Maß reduziert hat. Die Erkenntnisse sind jedoch noch nicht weit genug fortgeschritten, um eine sichere Prognose zur Leistungsfähigkeit des biologischen Abbaus in verschiedenen Situationen abzugeben. Ebenfalls kann nicht gesagt werden, wie weit sich eine Spür ausbreiten kann, bevor sie abgebaut wird.

### Abbildung 9: Einige Kohlenwasserstoffgruppen, die im Mineralöl vorhanden sind

#### Aliphate und Cycloaliphate

Alkane, z.B. Hexadecan,  $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{14}\text{CH}_3$



Alkene, z.B. 1-Octen,  $\text{CH}_2=\text{CH}(\text{CH}_2)_5\text{CH}_3$



Cycloalkane, z.B. Cyclopentan,  $\text{C}_5\text{H}_{10}$

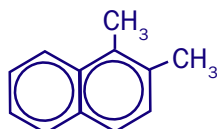


#### Aromate

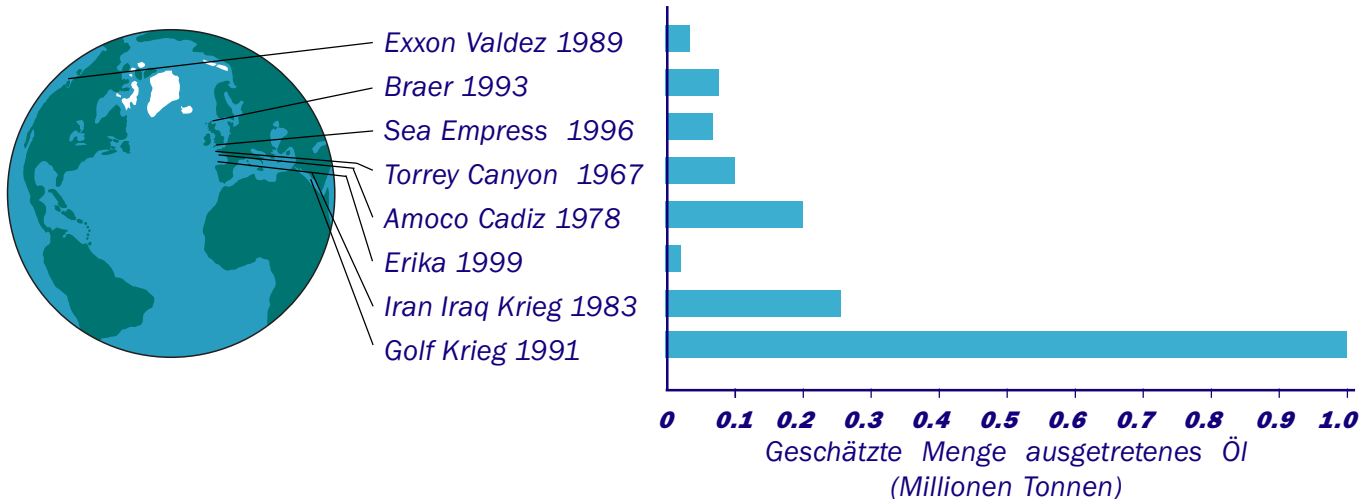
Arene, z.B. Benzen (Benzol),  $\text{C}_6\text{H}_6$



z.B. 1,2-Dimethylnaphthalin



## Abbildung 11: Größere Fälle von Ölverschmutzung des Meeres



Zusätzlich zum natürlichen Abbau wird über eine erfolgreiche Beseitigung von Kohlenwasserstoffbelastungen des Bodens und des Grundwassers durch Bioaugmentation berichtet. Ein Beispiel dafür ist die Einfuhr von Mikroorganismen bei Spuren, die aus Tanks (Benzen, Toluol, Ethylbenzen, Xylene) ausgelaufen sind. Bohrlöcher und Gräben müssen geschaffen werden, damit die Mikroorganismen in geeigneter Mischung sich gut ausbreiten können, denn die Spur kann sich 10 Meter unter der Oberfläche befinden. Die Kulturen müssen auch in großen Mengen zugeführt werden, z.B. 3 Liter Kultur pro Kubikmeter. Dokumentiert sind Rückgänge in den Kohlenwasserstoffen - bei einem Anfangsvolumen von beispielsweise 2500 ppm - von ca. 50% nach einem Monat und von ca. 95% nach vier Monaten, was lokalen Bestimmungen gerecht wird.

Zusätzlich zum Bedarf an leistungsfähiger Technik ist allerdings zu unterstreichen, dass die Akzeptanz von Aufsichtsbehörden, Interessengruppen und der allgemeinen Öffentlichkeit einen wichtigen Aspekt in der Kostenrechnung von Bioremediation darstellt. Wenn die Bioremediation auf starken Widerstand stößt und somit eine Kostensteigerung erfährt, ist die Realisierung eventuell sogar teurer als der konventionelle Ansatz, der das verschmutzte Material per Aushub oder Auspumpen entfernt.

### Kohlenwasserstoffverschmutzung des Meeres

Wahrscheinlich gelangen mehr als 2 Millionen Tonnen Rohöl jedes Jahr ins Meer, wobei unter 20% von der Erdölindustrie selbst – Raffinerien, Bohrinseln und Tankern – stammt. Vom Rest entstammen etwa 50% industrieller Abwässer, sonstiger Abwässer und Flüssen. Ca. 25% stammen aus der sonstigen Seefahrt und aus natürlichem Austritt. Obwohl Tankerunglücke nur sehr selten vorkommen, sind sie sehr sichtbar und - wegen der weitreichenden Probleme, die sie bei Flora und Fauna, der Fischerei und dem Tourismus hervorrufen können – auch mit Emotionen verbunden. Mehrere solche Vorfälle haben die Küsten und Meere Europas schon betroffen.

Erdöl wird durch Photo-Oxidierung und andere chemische Vorgänge abgebaut, die im Meer vom Wind und vom Wellengang, sowie von biologischen Prozessen unterstützt werden. Der Salzgehalt des Wassers ist ein zusätzlicher Umweltfaktor. Ansonsten bestimmen die üblichen Faktoren den biologischen Abbau: Sauerstoff, anorganische Nährstoffe, Temperatur, Wasser, pH-Wert, weitere Kohlequellen.

Normalerweise, so scheint es, sind diese verschiedenen abiotischen und biotischen Abbauprozesse effektiv, denn sonst würden die Folgen des natürlichen Austritts und der kleineren Ausläufe viel sichtbarer sein. Die Verdunstung und die anderen oben erwähnten Vorgänge können 20 bis 40% eines Ölteppichs entfernen. Auch bei Ölaustritten

in den Ausmaßen der in Tabelle 11 aufgeführten Fälle, verschwindet das verschmutzende Material schließlich nach längeren, natürlichen Prozessen, obwohl am Anfang der Krise Notlösungen notwendig sind, um das Öl in seiner Ausbreitung zu begrenzen. Ein Beispiel einer Situation, in der solche Nothilfemaßnahmen nicht möglich waren, war im Krieg zwischen Iran und Irak. Im Jahre 1983 flossen fast einen Monat lang Schätzungen zufolge 300.000 Liter Rohöl täglich in den Persischen Golf. Die erwarteten katastrophischen Folgen blieben jedoch aus. Das Phytoplankton, das die Grundlage der Nahrungskette im Meer bildet, wurde keineswegs ausgelöscht, da die Kombination natürlicher Vorgänge schon viel bewirkt hatte: die Verdunstung, die Windbewegung, der Wellengang und die Wirkung der Meeresbakterien.

### **Fallbeispiel: Der Fall Exxon Valdez**

Im Fall Exxon Valdez ergossen sich 1989 etwa 40 Millionen Liter Rohöl ins Wasser und kontaminierten die Küste vom Prince-William-Sound, Alaska, in einer Länge von 1750 km. Es war die erste Gelegenheit, die Bioremediation in einem größeren Projekt einzusetzen. Das Öl wurde mit konventionellen Mitteln von den Küstengebieten entfernt. Das Öl aber, das nicht zu den Stränden vorgedrungen war, wurde von dieser Wäsche nicht betroffen. Daraufhin führte das US-amerikanische Umweltschutzamt (EPA: *Environment Protection Agency*) Labor- und Felduntersuchungen durch, um die Möglichkeiten zu erörtern, wie die Bioremediation zusätzlich zu den anderen Reinigungsmaßnahmen sinnvoll eingesetzt werden könnte.

Es war schon bekannt, dass Bakterien, die in der Lage sind, Kohlenwasserstoffe zu oxidieren, weitverbreitet vorkommen, und dass bei Einschränkung ihrer Wirkung wegen nicht ausreichender Versorgung mit Stickstoff (N) und Phosphor (P), die Wirkung durch Zufuhr genannter Nährstoffe verbessert werden könnte. Dieses Szenario wurde am Ort des Exxon-Valdez-Unfalls bestätigt. Im Ökosystem des Strandes befanden sich viele Bakterien, und in Laborstudien wurden mittels einer anorganischen Zubereitung mit N und P fast alle Alkane aus Proben des Alaska-Öls und zu einem großen Teil auch die polyzyklischen

aromatischen Kohlenwasserstoffe innerhalb von sechs Wochen abgebaut.

Die Zufuhrmethode musste genau bedacht werden, damit die Zubereitung mit dem Öl verbunden blieb, anstatt durch Gezeiten und Sturm weggespült zu werden. Deswegen wurden N und P in Form von oleophilen "Düngern" auf die Strände verteilt, zuerst in flüssiger Form. Als N-Quelle wurde Harnstoff in Ölsäure gewählt. P wurde als Tri(Laureth-4)-Phosphat zugesetzt. Die oleophile Flüssigkeit drang allerdings nicht gut unter die Oberfläche des Strandes, da sie mit dem Öl verbunden blieb, und der Einbau in Briketts, die in Netzen gehalten wurden, war auch wenig tauglich. Diese Schwierigkeiten wurden schließlich überwunden, indem ein Granulat gestreut wurde, das über einen längeren Zeitraum verteilt N und P abgab. Das Ergebnis war eine sichtbare Besserung der Lage des Strandes in den behandelten Strandbereichen. Innerhalb von 16 Monaten war das Öl zu 60-70% abgebaut. Keine nachteiligen Auswirkungen auf das Ökosystem des Meeres wurden beobachtet.

Dass der jeweilige Einfluss von abiotischen und biotischen Faktoren auf das Ergebnis diskutiert wurde, ist nicht überraschend. Bezüglich der Kosten wurden mehr als \$10 Millionen am Tag aufgewendet, um die felsige Küste des Prince-William-Sounds zu reinigen, während die Bioremediationsmaßnahmen bei einem Küstenabschnitt von mehreren hundert Metern schätzungsweise insgesamt unter \$1 Million gekostet hat. Bei dieser Summe sind allerdings die Testarbeiten im Vorfeld nicht berücksichtigt. Sie lagen wahrscheinlich um das 10fache höher.

Bei dieser bisher größten *in-situ*-Übung in der Bioremediation konnte viel gelernt werden: Über die Grundsätze des mikrobiellen Wachstums, der mikrobiellen Artenvielfalt und der mikrobiellen Ökologie, sowie über die organische Chemie, den Wert von gemeinsamen Feld- und Laboruntersuchungen, und die Bedeutung der interdisziplinären Wechselbeziehungen, die ja die Grundlage der Biotechnik bilden.