

GEOSCHULE PAYERBACH

# BARBARA - GESPRÄCHE

## Payerbach 1998

ABFALLENTSORGUNG AUS ERDWISSENSCHAFTLICHER SICHT  
Alte Deponien - Verbrennung - Ablagerung mit Vorbehandlung

KLIMA - ENTWICKLUNG  
Geogener Ablauf und menschlicher Einfluß



*Payerbach, 17. bis 18. September 1998*

*veranstaltet von: Geoschule Payerbach, Geologischer Dienst des Landes NÖ, Geologische Bundesanstalt Wien*

## FACHBEIRAT DER GEOSCHULE PAYERBACH

- Dir. Edith BEDNARIK* ○ *Wr. Neustadt*
- Dr. Wolfgang DEMMER* ○ *Konsulent f. Baugeologie, Bisamberg*
- Univ.Prof. Dr. Wolfgang FRANK* ○ *Universität Wien, Geozentrum*
- Univ.Prof. Dr. Heinz-Detlef GREGOR* ○ *Umweltbundesamt Berlin*
- Univ.Prof. Dr. William W. HAY* ○ *Geomar Kiel; Boulder, Colorado, USA*
- Dr. Michael JAUMANN* ○ *Klinik am Eichert, Göppingen*
- em. Univ.Prof. Dr. Heinrich KALLENBACH* ○ *Technische Universität Berlin*
- Univ.Prof. Dr. German MÜLLER* ○ *Universität Heidelberg*
- Prof. Dipl.Ing. Walter MÜLLER* ○ *HTL Krems*
- Dir. Univ.Prof. Dr. Jörg W. NEGENDANK* ○ *Geoforschungszentrum Potsdam - Berlin*
- Dr. Julian PISTOTNIK* ○ *Geologische Bundesanstalt, Wien*
- Dir. Mag. Georg POHLER* ○ *HLA Wr. Neustadt*
- Univ.Prof. Hofr. Dr. Dieter RANK* ○ *OFPZ Arsenal*
- Univ.Prof. Dr. Eduardo SEMENZA* ○ *Università degli studi di Ferrara*
- Dir. Univ.Prof. Dr. Erich SCHROLL* ○ *Universität Wien, BVFA Arsenal (i.R.)*
- Dir. Univ.Prof. Dr. Peter SCHÖNLAUB* ○ *Geologische Bundesanstalt, Wien*
- Univ.Prof. Dr. Werner TUFAR* ○ *Philipps-Universität Marburg/Lahn*
- Dipl.Ing. Dr. Georg M. VAVROVSKY* ○ *Eisenbahn-Hochleistungsstrecken AG Wien*
- Univ.Prof. Dr. Walter VORTISCH* ○ *Montanuniversität Leoben*
- Min.Rat. Doz. Dr. Leopold WEBER* ○ *Montanbehörde, BMWA*
- Dr. Godfried WESSELY* ○ *ÖMV Geologie (i.R.), Wien*
- Univ.Prof. Dr. Heinrich ZANKL* ○ *Philipps-Universität Marburg/Lahn*

*Alle Rechte vorbehalten  
Für den Inhalt sind die Verfasser verantwortlich  
Herausgeber, Eigentümer und Verleger:  
Geoschule Payerbach*

*Redaktion:  
Dr. G. RIEHL-HERWIRSCH  
Bearbeitung:  
P. CARNIEL, M. HACKENBERG*

*Lektorat:  
Th. RIEHL-HERWIRSCH*



ΘΕΟΩΣ  
ΧΥΘΟΥΩΣ

*Den unterirdischen Mächten geweiht*

*Diese Weiheformel in griechischer Schrift aus keltisch römischer Zeit stammt von einer Inschrift, die im Zuge der Ausgrabungen am Magdalensberg in Kärnten entdeckt wurde.*

*Auf dieser Basis steht die heilige Barbara als christliches Symbol,  
als Schutzheilige für Bergleute  
und Vertreter der Erdwissenschaftler.*

## VORWORT

Mit dieser Veröffentlichung werden die Vorträge der **Barbara-Gespräche 1998** als fünfter Band der gleichnamigen Reihe übergeben.

Erstmals fanden die **Barbara-Gespräche 1993** statt. In den Jahren danach wurden immer wieder Themenpaare mit aktuellen und kritischen Inhalten (siehe pg. 259) aufgegriffen.

Der vorliegende Band mit seinem Themenpaar „KLIMA - ENTWICKLUNG - geogener Ablauf und menschlicher Einfluß“ sowie "ABFALLENTSORGUNG AUS ERDWISSENSCHAFTLICHER SICHT - Alte Deponien - Verbrennung - Ablagerung mit Vorbehandlung“ nimmt wieder zwei sehr aktuelle Probleme der Umweltgeologie auf.

Im Gegensatz zu anderen Fachtagungen mit zahlreichen Referenten, die ihr Thema in Kurzbeiträgen (call for papers) behandeln, bleiben wir bei den **Barbara-Gesprächen** dem bisherigen Veranstaltungsstil treu: Eine eher begrenzte Zahl von eingeladenen Vortragenden nimmt zu einem vorgegebenen Thema Stellung; nach den Referaten wird im Kreise der Teilnehmer umfassend und offen diskutiert. Auch "heiße Eisen" werden angefaßt.

Die Diskussionen zu den einzelnen Vorträgen werden auf Tonträger aufgezeichnet und zur Unterscheidung auf grünem Papier gedruckt. Diese Beiträge stehen mit dieser Veröffentlichung auch der Allgemeinheit zur Verfügung.

Zu unserem Bedauern sind trotz Zusagen ein Teil der Langfassungen der Vorträge bis zur „death line“ nicht eingetroffen und wir haben statt dessen die Kurzfassungen zur Publikation herangezogen.. Die ausführlichen Arbeiten sollen zum Teil in den Folgebänden zum Abdruck kommen.

Wie in Band 4 haben wir auch heuer Arbeiten in den Band aufgenommen, zu denen keine Vorträge gehalten worden sind (im Inhaltsverzeichnis mit \* bezeichnet). Zwei dieser Arbeiten (M. JAUMANN) beschäftigen sich mit umweltmedizinischen Aspekten, die disziplinübergreifend gut mit dem Thema "Abfallentsorgung" harmonieren. In "Die nachsorge - freie Deponie" stellen W. ENTENMANN & G. RIEHL nicht nur umfassend Versuchsergebnisse und praktische Anwendung der "DIAGENETISCHEN INERTISIERUNG" vor, sondern bieten auch eine Übersicht und einen Qualitätsvergleich mit verschiedenen aktuellen Abfallbehandlungsmethoden.

Bei den **Barbara-Gesprächen 2000** wurde erstmals der "**Prof. Dr. Karl KRÖPFL Preis**" vergeben. Mit dieser Auszeichnung sollen Personen gewürdigt werden, die sich um die Verbreitung erdwissenschaftlichen Gedankengutes besonders verdient gemacht haben. Insbesondere ist hier an Pädagogen höherer Schulen, aber auch an Nichtfachleute mit entsprechender Wirkung in der Öffentlichkeit gedacht. Die Idee zu diesem Preis haben Dr.med. H. J. WEGHOFER und G. RIEHL - H. im Gedenken an ihren ehemaligen Lehrer in Wr. Neustadt entwickelt. Die Idee des Preises, die Würdigung Prof. Dr. Karl KRÖPFLs und die Preisverleihung sind diesem Band vorangestellt.

Payerbach, im Juli 2001

Dr. P. Gottschling

Dr. G. Riehl-Herwirsch

**INHALT**

Vorwort der Herausgeber	4
Bisher erschienen / Inserate und Unterstützungen	6
<b>Prof. Dr. Karl KRÖPFL Preis</b>	7

**ABFALLENTSORGUNG****AUS ERDWISSENSCHAFTLICHER SICHT***Alte Deponien-Verbrennung-Ablagerung mit Vorbehandlung***Vorträge:**

W. ENTENMANN	25
Untersuchungen zur Wirksamkeit von Deponiebasisabdichtungssystemen im Hinblick auf den Grundwasserschutz	
S. MELCHIOR	57
In-situ-Untersuchungen zur Wirksamkeit von Oberflächenabdichtungen (Mineral. Dichtung, Kunststoffdichtungsbahn, Bentonitmatte, Kapillarsperre)	
K. SCHEIDL	79
Die thermische Abfallverwertung im Umweltvergleich (Kurzfassung)	
H. HUBER & M. JAROS & P. LECHNER	83
Langfristiges Deponieverhalten von Müllverbrennungsschlacken	
M. HUMER & D. GRASSINGER & P. LECHNER	93
Deponiebürtige Methanemissionen und deren Vermeidung	
W. VORTISCH	107
Die endgültige Abfall-Lagerung nach dem Vorbild der Natur (Kurzfassung)	
W. ENTENMANN & G. RIEHL - H. *	113
Die nachsorge - freie Deponie. DIAGENETISCHE INERTISIERUNG - eine nahezu emissionsfreie Alternative für die Altlastensanierung und Müllentsorgung	
M. JAUMANN *	159
Zunahme umweltbedingter Erkrankungen: Umweltmedizinische Erkenntnisse von heute sind die Prävention von morgen	
M. JAUMANN *	169
Stäube und Fremdstoffe als Verursacher von Nerven- und Immunsystem - Schädigungen, Neuro-/Immunotoxizität von Xenobiotika	

\*) siehe Vorwort

**Posterpräsentation:**

S. GRUBER	Maßnahmen zur Reduktion der Abfallmengen	175
-----------	--	-----

**KLIMA - ENTWICKLUNG***Geogener Ablauf und menschlicher Einfluß***Vorträge:**

W.W. HAY	189
The Development of Climate during Earth History (Die Klimaentwicklung im Verlauf der Erdgeschichte)	
F. BÖHM	217
Meerestemperaturen und CO <sub>2</sub> -Geschichte der letzten Jahrhunderte - Rekonstruktion mit Riffforallen und corallinen Schwämmen	
J. NEGENDANK	233
Maare und Eiskerne als Zeugen des Klimawandels (Kurzfassung)	
D. RANK & W. PAPESCH	241
Isotopenverhältnisse im natürlichen Wasserkreislauf -Indikatoren für Klimaänderungen	
W. VORTISCH	259
Menschliche Bodennutzung und Klima (Kurzfassung)	
J. NEGENDANK	267
Die Möglichkeiten von Altersbestimmungen in den Erdwissenschaften (Kurzfassung)	

***Bisher erschienene bzw. in Vorbereitung befindliche Bände und deren Inhalt***

*BARBARA-GESPRÄCHE 1993 - 2000* 277

***Inserate und Unterstützungen zum vorliegenden Band***

- |  |     |
|--|-----|
| ● Raiffeisenbank Payerbach-Reichenau-Schwarzau | 283 |
| ● GEOINERT / IGB Hamburg / ÖKOTECHNA           | 284 |
| ● BAMBERGER Steinmetzbetrieb                   | 286 |

Die Herausgabe dieses Bandes wurde durch Inseratschaltungen und Druckkostenbeiträge möglich.  
Wir danken unseren Förderern.

Barbara-Gespräche Payerbach 1998	Band 5	"Abfallentsorgung aus erdwissenschaftlicher Sicht" "Klima - Entwicklung"	Seite 7- 22 7 Abb.	Payerbach 2001
-------------------------------------	--------	---	-----------------------	-------------------

# BARBARA-GESPRÄCHE

## Payerbach

Prof. Dr. Karl KRÖPFL Preis  
2000



Payerbach,  
24. November 2000

**INHALT**

Die Idee des Preises	9
pagrus cinctus AGASSIZ	11
Zum Namensgeber des Preises	
Dr. K. KRÖPFL - die Stationen seines Lebens	13
Grußworte und Erinnerungen eines Kollegen an Dr. KRÖPFL	14
Memoriae honorem - Prof. Dr. K. KRÖPFL zum Gedenken	16
Die Preisträger 2000	19

*Anschrift der Autoren:**Prof. Dr. Hans FEICHTINGER**Erlengasse 2  
A-2700 Wr. Neustadt**Eva PICHER**Greith 54  
A-8442 Kitzeck i. Sausal**Prof. Dr. Raimund FISCHER,**Kühweg 6  
A-2743 Markt Piesting**Dr. G. RIEHL - HERWIRSCH**Hauptstraße 70  
A-2801 Katzelsdorf*

## Die Idee des Dr. Karl KRÖPFL Preises

### Vorstand der GEOSCHULE PAYERBACH - NÖ

Wir Menschen leben auf der Erde, mit der Erde und von der Erde. Wir benötigen ihre schnell erneuerbaren Ressourcen für Nahrung, Kleidung, Heizung, wir nutzen ihre bedingt oder nicht erneuerbaren Ressourcen, die Bodenschätze und Gesteine, für Bauwerke, zum Energiegewinn, als Rohstoffe für die Gegenstände des täglichen Lebens.

Wenn wir uns dessen bewußt sind, muß es uns auch klar sein, daß Wissen um die Erde -Γραα-, um die Vorgänge auf und in ihr zu den wichtigsten Dingen überhaupt zählt. Wir müssen uns aber auch dessen bewußt sein, daß unser Wissen immer noch unvollständig ist - und es auch bleiben wird.

Die Beschäftigung mit der Geologie ist uralte; da der Mensch zur Befriedigung zivilisatorischer (vom Steinkeil über Zigguraths bis zum Computer) und ästhetisch - religiöser Bedürfnisse (von Lehmfarben über die Venus von Willendorf bis zum Cullinan) der Bodenschätze bedurfte, war er immer schon bemüht, jene Strukturen erfolgreich zu erfassen, die ihm diese liefern können.

Freilich war dieses „Erfassen“ nicht Naturwissenschaft im heutigen Sinn, es war oft in religiöse und philosophische Lehren eingebettet und aus zahlreiche Sackgassen mußte mühsam wieder umgekehrt werden.

Es läßt sich eine lange schriftliche geologisch - mineralogische Tradition von den Hieroglyphen über die griechischen Naturphilosophen, über Plinius, Ibn Sina, Alfons den Weisen, Hildegard v. Bingen, Leonardo da Vinci, die Alchimisten bis in unsere Zeit nachweisen. Den Beginn der Geologie als Wissenschaft kann man erst vor nicht ganz dreihundert Jahren festsetzen. Daß Gott den Wissenschaftler schuf, und der Teufel den Kollegen, der wissenschaftliche Entgegnungen verfaßt, hat T. CERNAJSEK in seiner Arbeit über den Streit der Neptunisten mit den Plutonisten (Barbara-

Gespräche Bd. 4) schon sehr schön dargelegt. Aber das gehört seit HEGEL auch zur Wissenschaftstheorie: These und Antithese führen zur Synthese.

Wäre der Mensch wie manche seiner Vorläufer in klimatisch begünstigteren Zonen geblieben und hätte sich von herabfallenden Kokosnüssen und Ananas nähren können, wäre es entwicklungs geschichtlich nicht notwendig gewesen, daß sich ein Organ, das Gehirn, so dominierend ausbildet. Das konnte nur durch Widrigkeiten geschehen, die „Adam“ überwinden mußte. Diese Widrigkeiten waren in erster Linie nicht Raubtiere - die konnten schon andere Primaten abwehren - sondern das Klima. Die Entwicklung des Menschen fällt in eine Zeit des Wechsels von kurzen Warm- und langen Kaltzeiten und diesen Unbilden der Witterung mußte er standhalten, um überleben zu können, ebenso unregelmäßig hereinbrechenden Großkatastrophen wie Meteoritenimpakte und Megavulkane. Und überleben konnte er als Art nur, weil er in der Lage war zu lernen und seine Erfahrungen an die nächste Generation weiterzuvermitteln.

Zur Vermehrung und der Erhaltung des Wissens benötigt man zu allererst die Gabe der Neugierde, die Gabe der Beobachtung und die Fähigkeit des selbständigen Denkens.

Hier einzugreifen ist eine der wertvollsten Pflichten eines Pädagogen. Denn alles, Neugierde, Beobachtungsvermögen und selbständiges Denken sind dem Menschen eigen, aber viele lassen diese Gaben brach liegen. Um dem entgegenzutreten, um diese Fähigkeiten zu fördern und zu entwickeln braucht der Lehrer die Gabe, Kinder und Jugendliche motivieren zu können.

In den heutigen Lehrplänen der AHS ist den Geowissenschaften nur eine höchst untergeordnete Rolle zugewiesen; die Lehrpläne sind heute eher „marktwirtschaftlich“ orientiert. Leider geht diese Orientierung sehr oft zu La-

sten des Grundsätzlichen. Zwar wissen die Schüler, was Kasachstan exportiert, aber sie wissen nicht, wo Alma-Ata liegt. Auf der Landkarte finden sie es auch nicht, denn die können sie nicht mehr lesen. Und wenn sie von den äußeren Verhältnissen der Erde nichts wissen, wie sollen sie sich dann für deren innere Mechanismen und die Vorgänge der Entstehung interessieren und begeistern?

Sicher läßt der Lehrplan auch Freiräume dafür. Werden sie aber genutzt? Von den meisten Lehrern leider nicht. Daran ist sicher auch zum Teil die universitäre Ausbildung schuld, bei der Lehramtskandidaten zum Teil als fünftes Rad am Wagen behandelt werden. Abschließende „Laden-Spiele“ nehmen ihnen dann den letzten Rest von Interesse für einen Wissensbereich, den sie ohnedies von vorne herein nur als peripher betrachtet haben. Wie soll ein so ausgebildeter Lehrer Schüler für die Geowissenschaften begeistern können? Dennoch - es gibt auch diese Pädagogen.

Dr. Karl KRÖPFL war bereits zu seiner Zeit einer von ihnen. Unabhängig vom Lehrplan motivierte er seine Schüler dazu, sich mit dem zu beschäftigen, was ihm wichtig schien, mit den Natur- und Geowissenschaften, und so hat er durch seine Arbeit eine "breite Spur" geowis-

senschaftlichen Wirkens durch den Raum Wr. Neustadt - Neunkirchen gezogen. Ihm zum Gedenken wurde von ehemaligen Schülern die Stiftung des **Prof. Dr. Karl KRÖPFL Preises** angeregt.

Die Verbreitung und Förderung des geowissenschaftlichen Denkens ist auch eines der Hauptanliegen der GEOSCHULE PAYERBACH. Unter Berücksichtigung des oben kurz angeführten soll dieser Preis auf grundlegende Anregung von Dr. H. J. WEGHOFER in mehreren Kategorien vergeben werden:

- **Förderungspreis**

An Personen - vor allem junge Lehrer -, die über ihre beruflichen Richtlinien und Verpflichtungen hinaus für die Vermehrung, Erweiterung und Weitergabe geowissenschaftlicher Erkenntnisse Sorge tragen und darüber hinaus auch andere dafür begeistern können.

- **Anerkennungspreis**

An Personen, die sich durch ihren Arbeitseinsatz oder durch Überlassung materieller Güter die Erdwissenschaften oder die GEOSCHULE PAYERBACH in besonderem Maße gefördert haben.



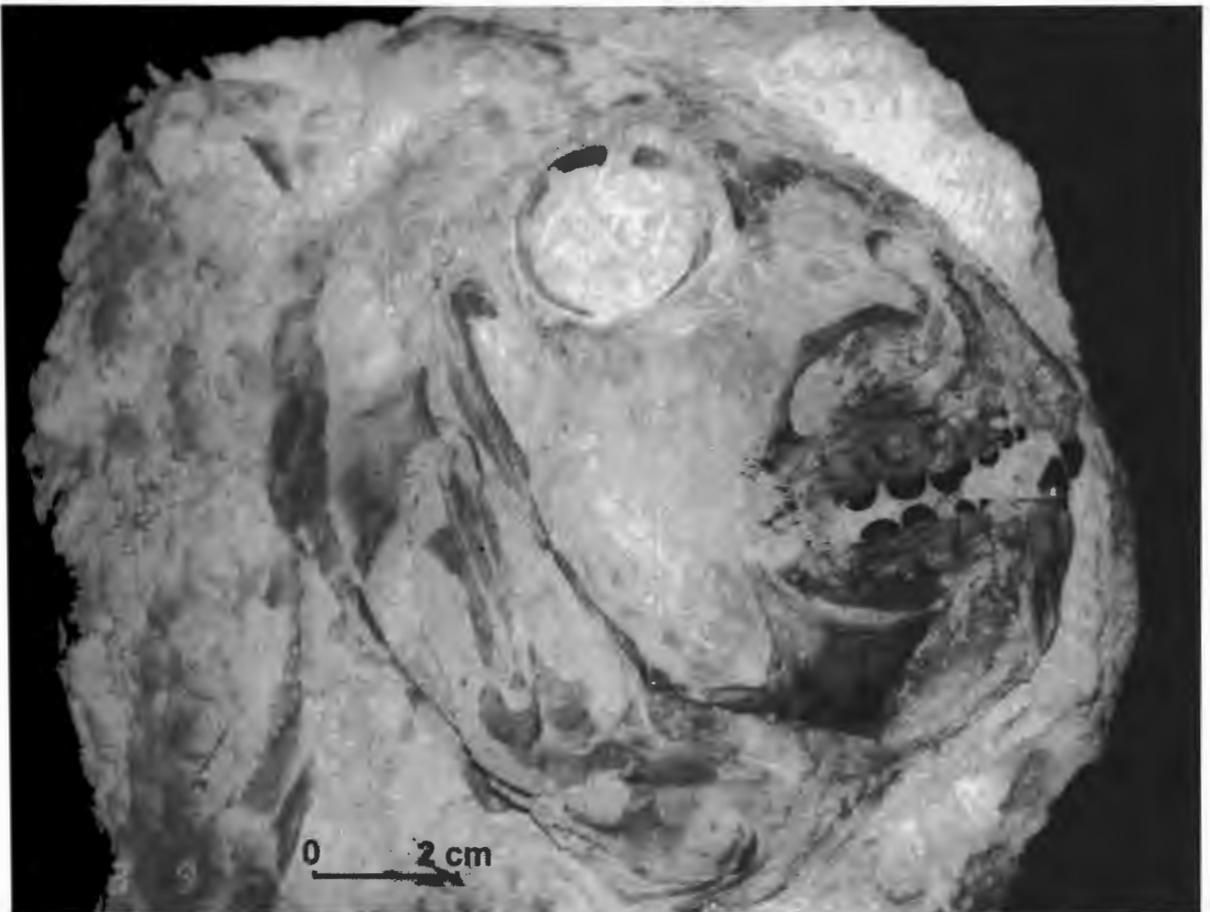
***Karikatur Prof Dr. K. Kröpfl: Selbstbildnis mit Wünschelrute***

## *pagrus cinctus* AGASSIZ

Diese fossile Brasse (Abb. unten) wurde im Kreidesteinbruch Mühlendorf, Bgld., vor einigen Jahren von einem deutschen Sammler gefunden. Nach dem Tod des Sammlers konnte dieses Prachtexemplar, das einst im Baden (Torton) der Paratethys im Wr. Becken heimisch war, von den Mühlendorfer Kreidefabriken erworben werden.

Dr. P. HOFFMANN - OSTENHOF von der Margit Ostenhof KG und Ing. M. LANG von den Mühlendorfer Kreidefabriken haben uns gestattet von diesem Fossil „Kopien“ anzufertigen. Das Original wird in der Mühlendorfer Kreidefabrik verwahrt.

Die GEOSCHULE PAYERBACH überreicht den Preisträgern je eine Kopie des *Pagrus cinctus* (AGASSIZ).



*Pagrus cinctus* (AGASSIZ), coll. Mühlendorfer Kreidefabriken, Burgenland,  
bisher bekannt Karpat und Baden, Bestimmung O. SCHULTZ, Nat. Hist. Mus. Wien

# NATURHISTORISCHES MUSEUM WIEN



GEOLOGISCH-PALÄONTOLOGISCHE ABTEILUNG

Herrn  
Dr. Georg RIEHL-HERWIRSCH  
Hauptstraße 70  
2801 Katzelsdorf

BURGRING 7, A-1014 WIEN  
POSTFACH 417  
ÖSTERREICH

TELEFON (0222) 521 77 07  
TELEFAX (0222) 521 77 459

Wien, am 24. Nov. 2000

### *Pagrus cinctus* (AGASSIZ, 1836)

AGASSIZ beschrieb diese Art als *Sphaerodus cinctus* auf Grund isolierter Zähne aus dem Leithakalk der Steiermark. Nur ganz wenige Kieferteile sind bis heute zum Vorschein gekommen. Solche sind aber für eine Gattungsbestimmung Voraussetzung, weil die Anzahl der Zahnreihen entscheidend ist. Da die Zähne bei *cinctus* in zwei oder drei Reihen angeordnet sind, ist die Zuordnung zur Gattung *Pagrus* gegeben.

Besonders typisch sind die Zähne der hinteren Kieferhälfte: sie sind kreisrund und erreichen einen Durchmesser von 15 mm. Die Zähne der vorderen Kieferhälfte sind ebenfalls kreisrund, sind aber kegelförmig hochgezogen und weisen eine zentrale, meist abgerundete Spitze auf. Besonders die Zähne adulter Individuen können sicher bestimmt werden.

Der Fund im Kreidesteinbruch von Müllendorf im Burgenland kann als besondere Rarität ezeichnet werden, ist doch der ganze Schädel erhalten. Laut den Berichten des Finders dürfte aber sogar der ganze Fisch vorgelegen haben, den er wegen seiner Größe und aus Zeitgründen nicht bergen konnte. Auf Grund der Größe der Zähne und des Schädels dürfte es sich um ein Individuum mit einer Gesamtlänge von ca. 70 – 80 cm gehandelt haben.

*Pagrus cinctus* ist im Badenium der gesamten Paratethys zu erwarten, definitiv nachgewiesen ist er aus dem Wiener Becken: Wien-Nußdorf, Müllendorf, Hainburg, Devinska Nova Ves (= Neudorf a.d. March), und im Steirischen Becken. Der zur Zeit älteste Nachweis stammt aus dem Karpatium von Niederkreuzstätten des Korneuburger Beckens. Auch aus dem Pliozän der Toskana, Italien, und der Bretagne, Frankreich, konnte *Pagrus cinctus* nachgewiesen werden.

Ein rezenter Vertreter der Gattung, *Pagrus pagrus* LINNAEUS, 1758, ist im Mittelmeer verbreitet. Er bevorzugt sandige und schlammige Böden zwischen 20 und 80 m Tiefe und erreicht eine Länge von 70 cm. Der deutsche Name für *Pagrus* ist Sackbrasse. Diese Gattung zählt zur Familie Sparidae bzw. zu den Meerbrassen.

Dr. Ortwin SCHULTZ

Mineralogie mit Petrographie, Lithologie und Sedimentologie, Kristalle - Erste Zoonologie, Paläogeographie, Ökologie, Klima und Hydroklima, Wasserbau



Logik (Vorbereitung), Tierwelt Zoologie (Anatomie), Umwelt Zoologie (Waldtiere), Zoologie und Ökologie (Kontrollen), Staatliche Züchtungsanstalt, Archiv - Verwaltung

**Schreiben von Dr. O. SCHULTZ zum vorseitig abgebildeten Fossilfund**

# Prof. Dr. Karl KRÖPFL

## Die Stationen seines Lebens

Eva-Maria PICHER<sup>1</sup>

Dr. Karl KRÖPFL wurde am 1.12.1899 in Gröbming, Steiermark, als Sohn eines Gendarmeriebeamten und späteren Steueroberverwalters geboren.

Er besuchte die Volksschule in Knittelfeld, das Realgymnasium in Graz und legte dort am 11.7.1919 die Reifeprüfung mit Auszeichnung ab.

Im Wintersemester 1919 inskribierte er an der philosophischen Fakultät der Universität Graz und hörte in sieben Semestern Vorlesungen über Mineralogie, Biologie, Botanik, Geographie und Philosophie.

Am 29.3.1923 legte er seine Dissertation über Höhengrenzen und Alpenwirtschaft im Koralmbereich vor und bat um Zulassung zu den schweren Prüfungen aus Geographie als erstem und systematischer Botanik als zweitem Fach nebst Philosophie.

Die Promotion fand am 12.5.1923 statt.

Da Prof. A. WEGENER in diesen Jahren nicht als Hochschullehrer an der Karl-Franzens-Universität aufscheint (lt. Universitätsarchiv), muss angenommen werden, dass Dr. Karl KRÖPFL A. WEGENERS Vorlesungen, u. a. über die Kontinentalverschiebung, erst nach Beendigung seines Studiums besucht hat. In dieser Zeit war er in Graz als Referendar tätig.

Seine Anstellungen als Mittelschullehrer waren:

**Freistadt, OÖ**

**Knittelfeld, Stmk**

1933 in **Wr. Neustadt** an der Realschule. Die Versetzung nach Wr. Neustadt erfolgte auf seinen ausdrücklichen Wunsch. Ihn faszinierte die geographische Lage Wr. Neustadts, die Nähe Wiens mit seinen Museen, die ihn sehr

interessierende Flora und Fauna des Neusiedlersee-Gebiets, sowie die Möglichkeit zu Exkursionen in die Randgebiete der auslaufenden Alpen.

1940 erfolgte seine vierte Anstellung in **Neunkirchen**; er wurde beauftragt, das neue Gymnasium einzurichten. Als provisorischer Leiter bekam er politische Schwierigkeiten und wurde darum vom Dienst suspendiert. Der damalige Kreisleiter BRAUN befand, Dr. KRÖPFL sei nicht fähig, Jugendliche zu erziehen und empfahl dem Ministerium in Wien, ihn an die Front abzukommandieren.

Dieser Sache war allerdings ein Disput zwischen dem Kreisleiter und Dr. KRÖPFL vorausgegangen. Der Kreisleiter reklamierte, daß Dr. KRÖPFL seine Schüler nicht zu der von ihm angesetzten Morgenfeier habe gehen lassen, worauf dieser erwiderte, daß er auf dem Standpunkt stehe, Schüler mögen zuerst studieren und dann erst politisieren.

Kreisleiter BRAUN wurde wegen der Erschießung Jugendlicher bei Kriegsende hingerichtet.

Bis knapp vor Kriegsschluß war dann Dr. KRÖPFL als Lehrer in **Eckerförde** bei Kiel an einer Kriegsschule für Offiziersanwärter tätig; man hatte ihn - als Gefreiten - wegen seiner Bildung und seiner pädagogischen Fähigkeiten dort eingesetzt.

Zu Kriegsende geriet er in englische Kriegsgefangenschaft und verbrachte vier Monate im Munsterlager in Deutschland.

Nach seiner Rückkehr allerdings mußte er eine böse Überraschung erleben: Der Akt, der ans Ministerium geschickt worden war und seine Zwangsrekrutierung zur Folge hatte, „verschwand“ in einer Schublade. Dem war ein

<sup>1</sup> Frau E. PICHER ist die Tochter Dr. K. KRÖPFLs

Kommentar eines ehemaligen Kollegen und Religionslehrers vorangegangen: „Den KRÖPFL lassen wir jetzt dunsten, der hat seine Kollegen in Neunkirchen immer so sekkiert!“ Dieses Sekkieren war, daß er eben jene Kollegen darauf hingewiesen hatte, daß ein Vortrag in der Klasse nicht langweiliges Vorlesen aus Büchern bedeutet; auch Schüler müssen ihr Wissen bei Prüfungen auswendig unter Beweis stellen.

Es dauerte vier Jahre, bis er rehabilitiert war und bis man sich in **Wr. Neustadt** daran erinnerte, was er in den Jahren vorher für die

Schüler dieser Stadt geleistet hatte; vier Jahre, in denen er Lügen und Widerwärtigkeiten ertragen mußte.

1949 wurde er am Humanistischen Gymnasium in **Wr. Neustadt** angestellt.

1959 wechselte er ein letztesmal: nach **Graz** an das Lichtenfelsgymnasium.

Seine Pensionszeit verbrachte Dr. KRÖPFL in **Graz** und in **Kitzeck im Sausal**.

Am 18.1.1973 ist Dr. KRÖPFL in **Graz** verstorben.

## Grußworte und Erinnerungen eines Kollegen an Prof. Dr. K. KRÖPFL

Hans FEICHTINGER<sup>2</sup>

Entschuldigen Sie bitte, daß ich niemanden persönlich begrüße, aber ich bin hier in geologischen Kreisen ein Außenseiter. Ich bin vom Direktor des ehemaligen humanistischen Gymnasiums **Wr. Neustadt**, **Babenbergerring** gebeten worden, Grüße zu überbringen. **Dir. HAGENHOFER** wäre gerne selbst gekommen, aber früher als die Einladung kam eine Dienstweisung, so daß er heute in **Hollabrunn** sein muß. Leider haben auch die Kollegen von den naturwissenschaftlichen Fächern, die er als Vertreter senden wollte, genau heute als Klassenvorstände den Elternabend zu betreuen.

Ich habe Herrn Dr. KRÖPFL kennengelernt, als ich sein junger Kollege war. Es war überraschend und bewundernswert, wie er die Jugend zu naturwissenschaftlichen Tätigkeiten motivieren konnte. Eine negative Bemerkung von einem Nichtnaturwissenschaftler dazu: für die anderen Gegenstände haben die Schüler dann überhaupt keine Zeit mehr gehabt.

Er hat es fertiggebracht, mit beiden Händen gleichzeitig an der Tafel zu zeichnen. Wenn er

dann die Tafel gefüllt hat - heute können wir ja „aus der Schule“ plaudern - hat er die Schüler veranlaßt, dies zu verarbeiten, ist ins **Naturalienkabinett** weiterarbeiten gegangen und hat die Klasse alleine gelassen. Das kann man sich in der heutigen Generation gar nicht mehr vorstellen, daß man eine Klasse eine ganze Stunde alleine läßt, nicht nur wegen des Lärms und der disziplinären Folgen, sondern auch wegen der **Attacken der Medien**.

Ich war mit Dr. KRÖPFL vorwiegend auf dem **botanischen Sektor** verknüpft, aber ich bin mit ihm auch sehr viel auf andere **Exkursionen** gegangen, bin mit ihm in den **Kreidebrüchen** von **Mühlendorf** gewesen zu einer Zeit, da man **Fossilien** wirklich nur von der **Oberfläche** zusammen klaben konnte, ohne suchen und graben zu müssen. Ihm verdanke ich nicht nur die Kenntnis von **Standorten seltener Pflanzen**, sondern ich kenne auch die „**Entstehungsgeschichte**“ vieler seiner „**Handstücke**“. Ein **Großteil** der **Sammlung** steht derzeit in **Vitrinen** auf dem **Dachboden** des **Gymnasiums**. Der

<sup>2</sup> Prof. Dr. H. FEICHTINGER lernte als junger Lehrer Prof. Dr. K. KRÖPFL am **Bundesgymnasium Wr. Neustadt** kennen. Die **Grußworte** wurden nach einer **Bandaufzeichnung** während der **Preisverleihung** geschrieben.

Grund für die Verlagerung der Sammlung KRÖPFL war der umfangreiche Umbau der Schule. Nach dem Umbau war im neuen naturhistorischen Kabinett nicht mehr ausreichend Platz, um alles wieder rückzuführen. Zwei ehemalige Schüler bemühen sich derzeit diesen Exponaten wieder einen würdigen Platz zu verschaffen.

Herr Hofrat HAGENHOFER ist sehr interessiert an dieser Aktion und will sich insbesondere für die Rettung der KRÖPFL-Sammlung einsetzen.

Ich muß hier eine Pseudo - Entschuldigung anbringen: Wenn man früher beispielsweise auf Schikurs gefahren ist, war der erste Abend selbstverständlich ein Geographieabend nach dem Motte: „Wie sind wir hergekommen, wo sind wir da, was gibt es da?“ Die Schüler haben gerne mitgemacht und auch alles gewußt. Bei den letzten Kursen hat es am Abend geheißen: „Gehen wir immer noch nicht in die Diskothek?“ Und zu den obigen Fragen hat es einfach geheißen: „Ja, wir sind weggefahren und jetzt sind wir da!“

Das war der Grund, warum ich es dann abgelehnt habe, dort mit zu tun. Als ich zu Mittag an einem sonnigen Tag die Frage aufgeworfen

habe, wo jetzt eigentlich Süden sei, konnte keiner antworten. Denn es wird heute in Geographie alles mögliche unterrichtet, aber keine Topographie. Ich will hier nicht streiten, ob das sinnvoll ist oder nicht.

Wie Dr. KRÖPFL es fertig gebracht hat, Geologie und Mineralogie den Schülern nahe zu bringen, hat zwei Ursachen gehabt. Zum einen war das seine persönliche extreme Fähigkeit, die Schüler zu motivieren und die Lerndisziplin aufrecht zu erhalten, zum anderen ist aber auch der damalige Lehrplan den Erdwissenschaften gegenüber viel aufgeschlossener gewesen. Im heutigen Lehrplan, den ich hier wiederum nicht kritisieren will, ist fast kein Platz dafür. Darum haben wir aber auch keinen Platz für zehn große Steinvitrinen, sondern reichen nur ein Tableau herum, und wenn das durchgenommen ist, geht man zu anderen Punkten über.

Wahrscheinlich wird die Zeit, in der Prof. Dr. KRÖPFL am Wr. Neustädter Gymnasium gewirkt hat, die „geologiereichste“ Zeit der Schule bleiben. Tempora mutantur et nos mutamur in illis. Nicht verändern aber soll sich die Erinnerung an den herausragenden Pädagogen und Naturwissenschaftler Dr. Karl KRÖPFL.



*Prof. Dr. Hans FEICHTINGER bei der Preisverleihung*

## MEMORIAE HONOREM

### Prof. Dr. Karl KRÖPFL zum Gedenken

Raimund FISCHER<sup>3</sup>

Die Geoschule Payerbach, ein Zentrum für naturwissenschaftliche Feldforschung, Lehre und Umweltpflege, hielt ihre diesjährige Tagung unter dem Titel „BARBARA - GESPRÄCHE 2000“ am 23. und 24. November 2000 in Payerbach ab. Die Initiatoren der Geoschule versuchen, die Geologie und ihre verwandten Wissenschaften der interessierten Allgemeinheit nahezubringen, wozu auch Schule und Lehrerschaft aller Schulgattungen einen den Schülern angemessenen Beitrag leisten sollten. Schließlich ist die Geschichte der NATUR, der geologische Werdegang Österreichs, die Entstehung der Landschaft und des Bodens, auf dem wir unser ganzes Leben verbringen, ebenso bedeutungsvoll wie das Werden der von Menschen verursachten Geschichtsabläufe. Die Erdwissenschaften haben in unserer Zeit in vieler Hinsicht an Bedeutung zugenommen, weil sie der Menschheit notwendige Einsichten für lebenswichtige Fragen der Weltwirtschaft und für einen wirkungsvollen Umweltschutz vermitteln können. Die Geologie vermag uns ebenso wie die Biologie zu lehren, wie sorgsam wir mit der uns anvertrauten Natur um des Überlebens willen umzugehen hätten.

In der Schlußphase dieser Payerbacher Veranstaltung wurde von Herrn Dr. G. RIEHL - H., dem Obmann der Geoschule, an vier verdiente Mitglieder und Wissenschaftler der neu gestiftete Dr. Karl KRÖPFL Preis verliehen. Bei der Nennung dieses Namens wurde ich hellhörig, Dr. KRÖPFL war in der Bundesrealschule Wr. Neustadt vom Jahr 1933 bis 1940 mein Lehrer aus Naturgeschichte. Er war ein Lehrer gewesen, den man ein Leben lang nicht vergißt. Er vermochte seinen Schülern die Geheimnisse der Botanik und Zoologie, der Mineralogie,

Geologie und Paläontologie so anschaulich und eindringlich zu vermitteln, daß dieses Wissen kein dem Vergessen anheimfallendes Schulwissen blieb, sondern zu einem lebendigen Wissensschatz für das ganze Leben wurde, auf das man jederzeit zurückgreifen und aufbauen konnte. Seine Breitenwirkung und sein Vermächtnis haben die Veranstalter der Barbara - Gespräche veranlaßt, diesem verdienten Schulmann durch Stiftung eines Preises diese späte Ehrung zuteil werden zu lassen.

Dr. KRÖPFL war eine Lehrerpersönlichkeit, die erfüllt war von einem unbändigen Willen zur Vermittlung von naturgeschichtlichem Wissen. Er wurde von Kollegen anderer Fachrichtungen gefürchtet, weil sein Unterricht, seine Anforderungen den Schülern soviel Zeit und Mühe abverlangten, so daß für das Studium anderer Fächer weniger Zeit verblieb. Ich trat 1933 in die 1. Klasse der Realschule in Wr. Neustadt ein, mein Klassenvorstand war Dr. KRÖPFL. Es war sein erstes Dienstjahr an dieser Schule, er selbst hatte sich den Standort gewählt, weil er sich vom Steinfeld und seinen Randlandschaften - man denke nur an das Gebiet der Hohen Wand, an den Schneeberg und die Semmeringlandschaft, an die Spuren der Meeresbedeckung im Wr. Becken - neue Impulse für seine persönlichen Forschungen in Paläontologie und Mineralogie erhoffte. Natürlich galt sein Interesse im besonderen Maße auch der pannonischen Flora im Umkreis der von Schottersteppen und Feuchtbiotopen umgebenen Stadt. Die Vorgaben des naturgeschichtlichen Lehrplanes erfüllte er durch eine lebendige Praxisnähe. Wenn das Wetter es zuließ, unterrichtete er uns im Freien. Oft nur für eine Stunde eilte er mit uns in den Stadtpark von Wr. Neustadt, um jeden Baum oder Strauch, jedes Kraut uns vorzustellen. Er

<sup>3</sup> Prof. Dr. R. FISCHER war einer der ersten Schüler von Prof. Dr. K. Kröpfl in Wr. Neustadt

entwarf schon in seinem ersten Dienstjahr in Wr. Neustadt einen umfassenden Plan von den einheimischen und exotischen Gewächsen dieses Parks, fügte ausführliche Beschreibungen hinzu und veröffentlichte ihn im Jahresbericht 1933/34 der Realschule, dem ersten nach dem Kriegsende von 1918.

Es war unmöglich, von seinem Enthusiasmus nicht angesteckt zu werden. Wenn es dennoch einen unter uns Schülern gab, der zu wenig Neigung oder Interesse für den Gegenstand zeigte und vielleicht gar gleichgültig blieb, wenn der Professor gerade zu seiner Höchstform auflief, ging es ihm in den nächsten Klassenstunden nicht gut: Er mußte ungemein gut vorbereitet sein und den gesamten Stoff der letzten Wochen intus haben, wenn er bei den überraschend angesetzten Prüfungen auf Herz und Nieren nicht unangenehm auffallen wollte. Wer einmal einen „Pinsch“ aus Ignoranz und Spekulation beim KRÖPFL eingefangen hatte, kam in den nächsten Naturgeschichtsstunden so lange nicht zur Ruhe, bis er sein Fehlverhalten eingesehen und reuig sein Lernpensum wieder erfüllt hatte. Die Disziplin während seiner Unterrichtsstunden war phänomenal. Alle Augen hingen an seinen Lippen, niemand wollte einen wichtigen Satz, eine bedeutende Aussage oder auch einen schnell hingeworfenen Witz versäumen. Ein Mitschreiben seines raschen Vortrages war nahezu unmöglich. Nach oder teils auch schon während seines fesselnden Vortrages zeichnete Dr. KRÖPFL ein- oder beidhändig an der Tafel, darin lag seine brillante Meisterschaft und er wußte dies auch ganz genau. Er triumphierte förmlich, wenn er filmgemäß seine Kunst vor unseren Augen demonstrierte und wir seine Darbietungen mit offenem Mund verfolgten. Wir wußten schon damals, daß es weit und breit keinen Lehrer gab, der derart fesselnd unterrichten konnte. Wir Schüler hatten unsere liebe Mühe, das Gebotene nachzuzeichnen, das rasch hingeworfene Wort uns einzuprägen.

Schon in der nächsten Stunde bekam eine Handvoll Schüler den Auftrag, mit Tafelzeichnung und entsprechenden Erklärungen Proben ihres apperzeptiv verarbeiteten Lehrstoffes abzuliefern. Eine 50 Minuten dauernde Stunde wurde mit dem Überprüfen des zuletzt gebote-

nen Lehrstoffes eingeleitet. Der erste Prüfling bekam ein Kreidestück schon vom gerade ins Klassenzimmer hereingekommenen Prüfer zugeworfen. Als die Mineralogie an der Reihe war, war es ein Stein oder ein Fossil, das man fangen mußte, um es gleich an Ort und Stelle zu erkennen und zu analysieren. Unvergeßlich sind die Ausflüge per Fahrrad, die er an freien Nachmittagen oder Samstag - Nachmittagen mit uns machte. Es waren nicht alle 30 Schüler einer Klasse, die da mithalten konnten, aber ein Duzend war es allemal gewesen. Dr. KRÖPFL fuhr mit uns in die Lichtenwörther Au, hinaus ins Steinfeld, zu den Steinbrüchen und Aufschlüssen rundum und sogar bis zu den Abraumhalden des Steinkohlenbergwerkes in Grünbach. Im Piestingtal suchten wir nach Hippuriten, in Wöllersdorf nach versteinerten Jakobsmuscheln und in einer Schottergrube bei Leobersdorf fanden wir Melanopsis-Schnecken und Congerien-Muscheln. Der Unterricht mit KRÖPFL wurde in den höheren Klassen, als er uns nicht mehr per „Sie“ ansprach und er für uns zu „Der Mü“ wurde, zum Abenteuer (Anmerkung: Sein Spitzname „Mü“ leitet sich vom griechischen Buchstaben her, der zugleich das Zeichen für „Mikron“ ist). Wir hatten ihn zwar nur 2 Wochenstunden und doch war er die dominierende Lehrerpersönlichkeit, das große Vorbild. Wir freuten uns auf die nächste Unterrichtsstunde mit ihm, er war in den höheren Klassen so etwas wie der größere Bruder. Je älter wir wurden, um so vertrauter wurde sein Umgang mit uns Schülern, jedoch ohne von seiner Autorität etwas einzubüßen.

Sein Abgang von der Realschule im Jahre 1940 war für uns schmerzlich, sein Nachfolger hatte mit uns seine liebe Not. Er errichte nicht annähernd das Bildungsniveau seines Vorgängers. Nach dem Krieg hatte ich das große Glück, Dr. Karl KRÖPFL abermals als Lehrer und Vortragenden in Kursen der Hauptschullehrerausbildung vorgesetzt zu bekommen. Was an stofflichem Wissen durch seinen Abgang nach Neunkirchen in meiner 7. und 8. Klasse Realschule verloren gegangen war, wurde in den Jahren 1950 bis 1954 gründlich nachgeholt. Der Wiedereinstieg in dieses Studium war für mich persönlich ein Vergnügen, es war trotz der schlimmen Erlebnisse im vergangenen Krieg eine Wiederkehr einstiger schöner Schulstunden auf

höherem Niveau. Dr. Karl KRÖPFL war für mich persönlich der Gleiche geblieben, er hatte nichts von seinem Elan, mit dem er die Probleme anpackte, verloren. Ich kannte seine Art der Stoffbewältigung, seine hohen Anforderungen an die Konzentration der Zuhörer und seine Art des Zugehens auf die Menschen, die in dieser schweren Zeit manchmal nicht ganz frei von Resignation war. Die bereits berufstätigen Lehrer brachten in die wöchentlichen Kursstunden ihre Probleme mit, die mit dem Vortragenden erörtert und auf kollegialer Ebene gelöst wurden. Während der Kursjahre kam es abermals zu Wanderungen und Exkursionen, die meinen persönlichen Unterricht an der Hauptschule und später in der Lehrerbildung zutiefst mitbestimmten und bereicherten. Auch außerhalb der vorgesehenen Arbeitszeit war er in seiner Stammschule, dem humanistischen Gymnasium, stets für Auskünfte und Ratschläge bereit, was besonders für die Abfassung der schriftlichen Hausarbeiten im Rahmen der fachlichen Ausbildung der HS-Lehrer nützlich war.

Um die Einstellung des Naturgeschichtslehrers Dr. Karl KRÖPFL ganz und gar zu verstehen, sei ein Zitat aus seinem Einleitungsaufsatz des Jahresberichtes 1933/34 der Bundesrealschule

Wr. Neustadt angeführt: „Die schöne Wissenschaft vom grünen Kleid der Erde darf nicht allein von lehrreichen Wandbildern, aber auch nicht von schon halb vertrockneten Pflanzenbündeln herab gebracht werden. Diese Art des Unterrichtens ist kaum geeignet, LIEBE zur Natur zu wecken, durchaus ungeeignet aber Geist und Gemüt zu bilden....“

Ich wage im Geist von Dr. Karl KRÖPFL im Jahr 2000 fortzusetzen: „Auch die modernen Medien einschließlich Internet werden nicht imstande sein, die persönliche Begegnung des Menschen mit der Natur zu ersetzen, Liebe und Ehrfurcht vor der Erde und ihren Geschöpfen wachzurufen.“ Hierfür kommen immer nur Menschen in Frage, die das Vermächtnis eines Dr. Karl KRÖPFLs weiterzugeben vermögen.

Nachsatz: Dr. Karl KRÖPFL verbrachte nach dem Abgang vom Gymnasium in Wr. Neustadt seine letzten Dienstjahre im Lichtenfelsgymnasium in Graz, wo er auch sein Hochschulstudium absolviert hatte (Prof. A. WEGENER war einer seiner Lehrer) und 1923 zum Doktor phil. promoviert worden war. Er starb am 18. Jänner 1973 im 73. Lebensjahr in Graz.

#### MEMORIAE HONOREM



**Prof. Dr. Karl KRÖPFL: Selbstkarrikatur**

# **P R E I S T R Ä G E R 2 0 0 0**

*Die GEOSCHULE PAYERBACH überreicht den*  
**Prof. Dr. Karl KRÖPFL Preis**  
*für besondere Verdienste und Leistungen*  
*zur Verbreitung erdwissenschaftlichen Denkens*

---

## **Dir. Edith BEDNARIK**

Für ihre umfangreichen Arbeiten  
bei der Neuerschließung und Vermessung  
des Eisenbergbaues Grillenberg und des Bergbaues Schendlegg sowie als  
Würdigung ihrer Aktivitäten bei der Erdstallforschung

## **Michael HACKENBERG**

Für die Gestaltung und Einführung des Schaubergwerkes Grillenberg,  
Ausgestaltung und Betreuung der geowissenschaftlichen Abteilung  
des Bergbaumuseums Enzenreith  
und den damit verbundenen Aktivitäten bei der Erwachsenenbildung

## **Dir. Prof. Mag. Georg POHLER**

Für seinen aktiven Einsatz und Aufbau  
der geologischen Wanderausstellung in Schulen  
und zur Entwicklung von „Geo-Tagen“,  
als praktischem Zugang zu den erdwissenschaftlichen Fächern

## **Dipl. Ing. Edith SCHWAIGER**

Für die mühevollen und erfolgreichen Suche  
nach einer wirtschaftlichen Basis der Geoschule Payerbach,  
deren Betreuung und Repräsentation vor Ort

**Dir. Edith BEDNARIK**

geb. 1935-04-30

- 1949-1954 Bundes Lehrer- und Lehrerinnen-  
bildungsanstalt Wr. Neustadt
- 1954-1955 Abiturientenkurs an der Handels-  
akademie der Wr. Kaufmannschaft
- 1955 Lehrer an der Gewerblichen Berufs-  
schule Wr. Neustadt
- 1956 Lehrer an der Landesberufsschule für  
kfm. Lehrlinge in Theresienfeld
- 1959 Zusatzprüfungen für Schaufenster-  
gestaltung, Geschäftsschrift und Lei-  
besübungen an Berufsschulen
- 1966 Höhlenführerprüfung
- 1967 Alpenvereins-Jugendführer
- 1969 Sprengbefugtenprüfung
- 1979 Ernennung zur Korrespondentin des  
Naturhistorischen Museums Wien

- 1979-1985 Bundesleiterin der Österr. Höhlen-  
rettung
- 1985 Betreuung des Zentralnotrufes der  
Österr. Höhlenrettung
- 1987 Ernennung zum Schulrat
- 1988 Stellvertretender Berufsschuldirektor
- 1991 Gemeinderat in Wr. Neustadt mit beo-  
ndertem Engagement für Soziales, Um-  
welt und Kultur
- 1993 bedingt durch schwere Erkrankung kei-  
ne Möglichkeit der Ausübung von Ex-  
tremisportarten
- 1994 Pensionierung
- Sport: Wettkampfschwimmen  
Klettern (extrem)  
Schifahren
- Interessen: Speläologie  
Urgeschichte  
Erdstallforschung (seit 1990)

**Michael HACKENBERG**

geb. 1948-08-14 in Salzburg

- 1948 übersiedelt nach Wien
- 1966 Matura am BG XVIII in Wien
- 1970 Übersiedlung in den Bezirk Neun-  
kirchen
- 1977 Buchhalterprüfung  
langjährige autodidaktische nebenberu-  
fliche Beschäftigung mit Geologie,  
Mineralogie und Montangeschichte
- 1984-1986 Aufbau der geowissenschaftlichen  
Abteilung des Bergbau- und Heimat-  
museums Enzenreith

- 1986-dato Betreuung, Kustodiat und Führungs-  
dienst im o.a. Museum
- 1988-dato techn. Ang. in der Abfallforschung
- 1989 Gründungsmitglied der Geoschule  
Payerbach
- 1995-dato Betreuung Schaubergwerk  
Grillenbergr
- Sport: Klettern (nicht extrem)  
Schach (2x NÖ Landesmeister)  
Skat (Intern. Schiedsrichter)
- Interessen: Geologie, Mineralogie, Montange-  
schichte, Speläologie

**Dir. Prof. Mag. Georg POHLER**

geb. 1947-10-01 in Wien

- 1966 Reifeprüfung an der Realschule Wr.  
Neustadt  
Studium Universität Wien, Mag. rer.  
nat. Lehramt Biologie und Umwelt-  
kunde sowie Geographie. Eintritt in  
den Schuldienst (LS Rat für NÖ)  
Militärrealgymnasium Wr. Neustadt  
HLA Wr. Neustadt  
(Unterricht in Biologie und Umwelt-

kunde/ Physik/Chemie/Geographie  
später EDV/Wirtschaftsinformatik)

- 1988 Direktor der Städtischen HLA  
Wr. Neustadt
- Sport: Handball (bis 1980), Eisschnellauf  
(intern. ISU Schiedsrichter; Teamma-  
nager Österr. Short track team 1978 -  
1990), Tennis
- Interessen: Geologie



*Preisverleihung Prof. Dr. Karl KRÖPFL Preis 2000-11-24: vorne Dr. G. RIEHL - H. hinten v.l.n.r.: M. HACKENBERG, Dipl.Ing. E. SCHWAIGER, Dir. Mag. G. POHLER, Univ.Prof. Dr. German MÜLLER, Dr. St. MAKK, E. PICHER, Dir. E. BEDNARIK,*

## **Dipl. Ing. Edith SCHWAIGER**

geb. 1926-08-30,

Eltern Ermelinde u. Med.Rat Dr. Richard SCHWAIGER (Gemeindefeuerwehrarzt und Ehrenbürger v. Payerbach)

1944 Reifeprüfung am Realgymnasium Wr. Neustadt

1944-1945 Arbeits- und Kriegsdienst

1945-1946 Universität Innsbruck

1946-1952 Universität f. Bodenkultur Wien

1952 Graduierung zum Dipl.Ing. Agrar

1952-1960 tätig im eigenen landw. Betrieb Payerbach - Kreuzberg

1965-1974 Steuerberatungskanzlei Dr. FRANKL, Reichenau

1974 Bestellung zum öffentlichen Steuerberater

1974 - dato selbständiger Wirtschaftstreuhänder - Steuerberater

1975 Eintritt in den Gemeinderat Payerbach

1985-2000 Geschäftsführender Gemeinderat, Vorstandsmitglied im Ressort Wirtschaft und Fremdenverkehr

1986 und früher: Idee der Wiedergewältigung des alten Eisenbergbaues am Grillen-

- berg und Ausgestaltung zu einem Schaubergwerk.
- 1987 Über Vermittlung von Univ.Prof. Dr. W. KLAUS (Paläontologie) Kontaktnahme mit HR Dr. SCHENK (NÖ Landesreg.)
- 1988 Kontaktaufnahme über Vermittlung der Landesgeologie Dr. P. GOTTSCHLING mit Dr. G. RIEHL - HERWIRSCH (TU Wien)
- 1989 Gründung der GEOSCHULE PAYERBACH
- 1989-1991 Lange und zähe Überzeugungsarbeit beim Land Niederösterreich der Wiedergewältigung des Bergbaues wegen (Landeshauptmann Mag. Siegfried LUDWIG, Finanzlandesrat LHSt. Dr. Erwin PRÖLL, Wirtschaftslandesrat Dkfm. Vinzenz HÖFINGER)
- 1991 Beginn der Wiedergewältigungsarbeiten, Stollenpatin Frau Herlinde LUDWIG
- 1992 Einweihung des Schaustollens durch Landeshauptmann Mag. Siegfried LUDWIG
- 1992-1993 Finanzierung eines Hauses für die GEOSCHULE PAYERBACH, Adaptierung für Schmuckstein-Schleifkurse und Fassungskurse, Einrichtung eines Vortrags- und Seminarraumes



*Volkstümliche kolorierte Zeichnung von Prof. Dr. Karl KRÖPFL*

# ABFALLENTSORGUNG AUS ERDWISSENSCHAFTLICHER SICHT

Alte Deponien - Verbrennung - Ablagerung mit Vorbehandlung



*Payerbach,  
18. September 1998*



Barbara-Gespräche Payerbach 1998	Band 5	"Abfallentsorgung aus erdwissenschaftlicher Sicht" "Klima - Entwicklung"	Seite 25 - 56 Abb. 1 - 16	Payerbach 2001
-------------------------------------	--------	---	------------------------------	-------------------

# BARBARA-GESPRÄCHE

## Payerbach 1998

Untersuchungen zur Wirksamkeit von  
Deponiebasisabdichtungssystemen im Hinblick auf den  
Grundwasserschutz

W. ENTENMANN



Payerbach,  
18. September 1998

**INHALT**

Zusammenfassung	27
1 Einleitung	28
2 Derzeitiger Stand der Deponietechnik	31
2.1 Sicherungseinrichtungen	31
2.2 Deponien mit Basisdichtungen	32
3 Gefährdungspotential für das Grundwasser	32
4 Erfahrungen aus dem Betrieb und der Überwachung gedichteter Deponien	34
5 Abschätzung der Langzeitsicherheit betriebener Deponien	34
5.1 Untersuchungsmethoden	34
5.2 Regionalgeologischer Rahmen	35
5.3 Fallbeispiel Deponie Neu Wulmstorf	35
5.3.1 Deponiebasisdichtung	36
5.3.2 Entwässerungsschicht	37
5.4 Fallbeispiel Deponie Varel-Hohenberge	38
5.5 Fallbeispiel Deponie Wesermarsch-Mitte	40
5.6 Fallbeispiel Deponie Hahn-Lehmden	42
5.7 Fallbeispiel Altablagerung Lübeck	42
6 Retentions- und Retardationsvermögen bindiger Schichten	42
7 Zusammenfassende Bewertung	48
7.1 Erforderliche Zeitdauer der Funktionsfähigkeit des Basisdichtungssystems	48
7.2 Basisdichtung und Technische Barriere	50
7.3 Entwässerung und Müllkörper	52
7.4 Oberflächenabdichtung	53
7.5 Diskussion der Gesamt-Langzeitsicherheit von Deponien	53
Literatur	54

*Anschrift des Verfassers:*

*Dr. W. ENTENMANN*

*IGB Ingenieurbüro für Grundbau, Bodenmechanik und Umwelttechnik*

*Heinrich Hertz Straße 116*

*D-22083 Hamburg*

# Untersuchungen zur Wirksamkeit von Deponiebasisabdichtungssystemen im Hinblick auf den Grundwasserschutz

W. ENTENMANN

## Zusammenfassung

*Zum Schutz des Grundwassers vor Schadstoffeinträgen aus Deponien sind Basisabdichtungssysteme, bestehend aus Dichtungsschichten und Entwässerungsschicht vorgesehen. Erfahrungen mit einfachen Basisdichtungen liegen seit etwa 25 Jahren, mit Kombidichtungen seit über 15 Jahren vor. Anhand von Fallbeispielen aus der Praxis wird untersucht, ob diese Basisabdichtungssysteme ihrem Anspruch an den Grundwasserschutz genügen. Dabei werden Ergebnisse von Untersuchungen an einer nachträglich freigelegten Basisdichtung einer Hausmülldeponie sowie Ergebnisse von Untersuchungen des Verhaltens natürlicher Schichten unterhalb von Deponien aus der hydrogeologischen Überwachung ausgewertet.*

*Entscheidend bei der Frage nach der Langzeitsicherheit ist die Art der Deponie: Über das Verhalten der Reaktordeponie mit und ohne Basisdichtung liegen mittlerweile Ergebnisse aus einem ausreichend langen Beobachtungszeitraum vor; das zukünftige Verhalten von Reststoffdeponien kann mangels Daten bislang nur unzureichend abgeschätzt werden.*

*Die Untersuchungsergebnisse der Praxisbeispiele ergaben unter Berücksichtigung der publizierten Ergebnisse von ähnlichen Standorten sowie von Laboruntersuchungen zusammengefaßt:*

*Die Basisdichtung wird sehr aufwendig hergestellt und konnte der Fremdüberwachung zufolge vor Ort durchgängig als qualitativ hochwertig festgestellt werden. Hinsichtlich des Grundwasserschutzes kommt der Dichtungs-*

*schicht jedoch bei weitem nicht der Stellenwert zu, den die aufwendige Herstellung vermuten läßt. Das schwächste Glied ist die Basisdrainage, nach deren Versagen auch die Dichtungsschicht unwirksam ist.*

*Mit einer Verockerung der Basisdrainage ist - trotz inzwischen sehr großzügiger Dimensionierung - innerhalb des Zeitraums, in dem kontaminiertes Sickerwasser anfällt, zu rechnen.*

*Hinzu kommt, daß die Sickerwasserklärung anfällig ist und daß im hier beschriebenen regionalen Umfeld, der Norddeutschen Tiefebene, die Deponien überwiegend nicht im Freispiegelfälle entwässern.*

*Dem Anspruch der TA Siedlungsabfall nach einer Endlagerung von Abfällen mit geringem Nachsorgeaufwand wird bei dem bis zum Jahre 2005 zugelassenen Deponiekonzept, einer Reaktordeponie mit Basisdichtung, nicht entsprochen; sie stellt eine Sicherungsmaßnahme auf Zeit dar.*

*Positiv auf das Emissionsverhalten wird sich die zunehmende Schadstoffentfrachtung der abgelagerten Abfälle auswirken. Ein vielversprechender Ansatz ist ferner die Vermeidung der Entstehung von Sickerwasser durch Anlage eines sehr gering durchlässigen Müllkörpers, nicht durch Oberflächenabdichtung, denn auch dieses technische Sicherungssystem ist nur auf Zeit wirksam. Inwiefern die für die Zeit nach 2005 vorgesehenen Reststoffdeponien den erwünschten Erfolg erbringen, ist noch durch intensive Untersuchungen der Langzeitbeständigkeit der Reststoffe zu prüfen.*

# 1 Einleitung

Zum Schutz des Grundwassers vor Kontamination durch schädliche Inhaltsstoffe des Deponiesickerwassers werden moderne Deponien mit einem Deponiebasisabdichtungssystem versehen, das aus Dichtungsschichten und einer darüber liegenden Flächendränage besteht. Mit

vorliegendem Aufsatz werden Erfahrungen mit Dichtungssystemen aus der Praxis vorgestellt. Dabei wird vorrangig auf Hausmülldeponien eingegangen und es werden ausschließlich Standorte auf pleistozänen Lockergesteinen Nordwestdeutschlands beschrieben, deren Lage in Abb. 1 dargestellt ist.

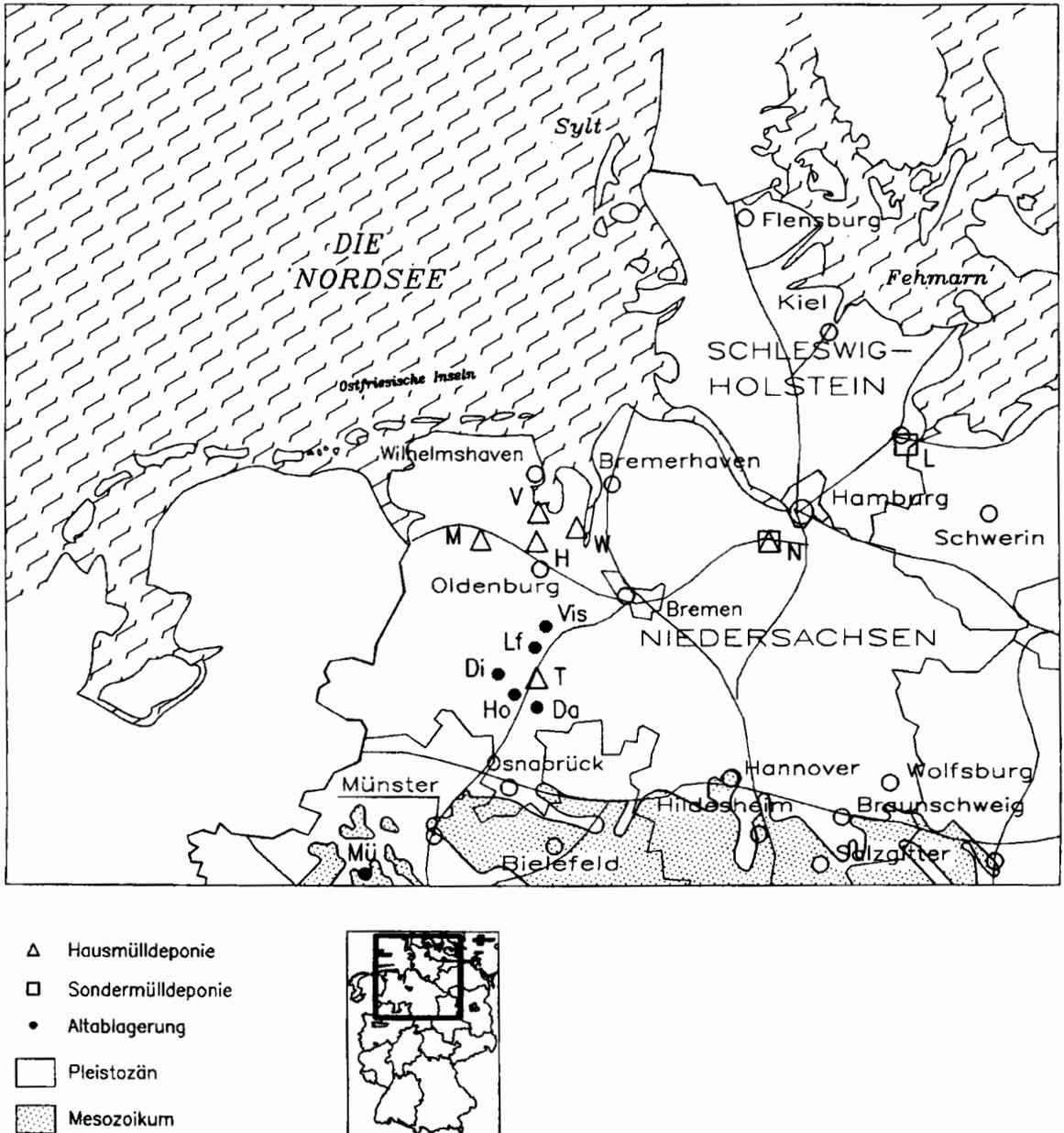


Abb. 1: Lage untersuchter Deponien und Altablagerungen in Nordwestdeutschland

Während in den 50er und 60er Jahren sowohl Hausmüll als auch gewerbliche Abfälle und Sonderabfälle in kleineren ungedichteten Deponien dezentral eingelagert wurden, erfolgte in den 70er Jahren eine Deponierung des Hausmülls in ebenfalls ungedichteten, jedoch sehr viel größeren Zentraldeponien. In dieser Zeit wurden die ersten Deponien mit Basisdichtungen versehen, jedoch nur sehr vereinzelt oder bei einem erheblichen Gefährdungspotential, resultierend aus Sonderabfällen. In den 80er Jahren waren diese Dichtungssysteme dann ausgereift und wurden standardmäßig eingesetzt. Erst in den 90er Jahren wurde das Dich-

tungssystem dann in der TA ABFALL (1991) für Sonderabfalldeponien und in der TA SIEDLUNGSABFALL (1993) für Hausmülldeponien behördlich festgelegt.

Wesentliche Aussage der TA SIEDLUNGSABFALL ist jedoch die Forderung nach einer Deponierung vorbehandelter Abfälle. Die bislang gepflegte Praxis der Deponierung un behandelter Abfälle und der damit verbundene Betrieb einer Reaktordeponie mit erheblicher Gasproduktion wird in einer Ausnahmeregelung lediglich bis zum Jahre 2005 zugelassen.

**Tabelle 1: Zusammenstellung untersuchter Deponien und Altablagerungen mit kennzeichnenden Eigenschaften**

Zuordnung	Hausmüll Zentraldeponie					Altablagerung Hausmüll			
	We	Va	Ma	Ton	H	Da 03	Ho 01	Ho 02	Vis
Deponie									
Betriebsbeginn [ vor a ]	24	23	24	23	25	27	38	38	33
Einlagerungsende [ vor a ]	2	5	6	12	15	19	19	19	21
Fläche [ ha ]	10	10	9	8	5	1,4	1,2	0,8	1,3
Kubatur [ 1000 m <sup>3</sup> ]	900	900	1000	1100	300	185	40	8	38
Rekultivierung (Stand 1998)	Abdi	Mb	Abdi	Abde	Abde	Abde	Abde	Abde	Abde
Sickerwasserbelastung - Trend	↑→	↑	→	↑	↓	→	?	?	?
Gasemission - Trend	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓
N <sub>2</sub> [ Vol.-% ]		14,8			74,9	80,1	78,2	77,0	72,1
O <sub>2</sub> [ Vol.-% ]		3,1			8,2	3,4	16,5	20,7	2,3
CH <sub>4</sub> [ Vol.-% ]		49,3			2,3	6,1	n.n.	n.n.	8,2
CO <sub>2</sub> [ Vol.-% ]		35,4			14,6	10,4	5,3	2,3	17,4

Mb - Mutterboden, Abdi - Oberflächenabdichtung, Abde - Oberflächenabdeckung

Im folgenden ist daher bei Hausmüllablagerungen zu unterscheiden zwischen

- Altablagerungen ohne Basisdichtungen mit geringer Abfallkubatur. Aufgrund ihrer frühen Entstehung enthalten sie noch überwiegend nur wenig toxische Stoffe. Ihr organischer Inhalt ist schon in einem fortgeschrittenen Stadium der Zersetzung, die Gasbildung nach nunmehr über 30 Jahren seit Ablagerungsende in der Schlußphase.
- Zentraldeponien mit erheblichem Schadstoffinventar ohne Basisdichtung.
- heutigen Zentraldeponien mit erheblichem Schadstoffinventar, jedoch mit Basisdichtungen, teilweise in jüngster Zeit schon partienweise durch Mülltrennung schadstoffentfrachtet.
- zukünftigen, durch Mülltrennung schadstoffentfrachteten und durch Vorbehandlung im organischen Gehalt erheblich reduzierten Deponien.

Eine Auswahl eingehend untersuchter Deponien und Altablagerungen ist in Tabelle 1, ihre Lage in Abb. 1 dargestellt. Die dort aufgeführten Untersuchungsergebnisse zum Deponi-

einhalten und zur Gasbildung belegen die oben gemachten Aussagen.

Die TA SIEDLUNGSABFALL legt sehr weitgehende Ziele fest, die es hinsichtlich der dauerhaften Sicherung des Müllkörpers zu erreichen gilt:

Ausgehend von der Erfahrung, daß die bisher gepflegte Abfallentsorgung ohne ausreichende Sicherungseinrichtungen zu erheblichen Aufwendungen bei der später notwendigen Untersuchung ihres Emissionsverhaltens und in einigen Fällen zu erheblichen Grundwasserschäden geführt hat, wird nunmehr angestrebt, daß Entsorgungsprobleme zum Zeitpunkt ihrer Entstehung und nicht in späteren Zeiten zu lösen sind. Dabei wird jedoch nach wie vor zumindest als eine Teilkomponente des Entsorgungskonzeptes auf die Deponierung gesetzt.

Deponien als Ingenieurbauwerke sollen dabei „Bauwerke für die Ewigkeit“ sein.

Da dies ein Widerspruch in sich ist, wird auf die Erfordernis einer nur kurzen Nachsorgezeit gesetzt, in der die Reaktionen im Deponiekörper so weit abgelaufen sind, daß die Alterung des Bauwerks Deponie keine Auswirkung mehr auf mögliche Emissionen haben soll.

Dieses Konzept gilt es kritisch zu hinterfragen. Einen wesentlichen Untersuchungsgegenstand müssen daher zusätzlich zu den in großer Zahl vorliegenden Laborversuchsergebnissen Praxiserfahrungen und Untersuchungen in-situ darstellen, die - ohne Maßstabsproblem - eine Abschätzung und Extrapolation in die Zukunft zulassen. Dabei ist jedoch anhand des Zeitrahmens, innerhalb dem die TA SIEDLUNGSABFALL umgesetzt wird, zu differenzieren:

Für den Zeitraum bis 2005 werden weiterhin (STEGMANN & EHRIG 1980) basisgedichtete Reaktordeponien betrieben, deren kennzeichnendes Element eine langandauernde Umsetzung organischer Substanz ist.

Erfahrungen aus dem Betrieb solcher Deponien liegen seit etwa 15 Jahren vor. Grundsätzlich sind sie langfristig dahingehend zu beurteilen, ob die aktiven technischen Sicherungseinrichtungen, die Technische Barriere, die Basisdichtung, die Basisdrainage und die Oberflächenabdichtung, in der Lage sind, langfristig

eine Sickerwasseremission zu verhindern oder auf ein akzeptables Maß zu begrenzen. Wesentlich dabei ist jedoch die Frage, ob die diesem Konzept zugrundeliegende Annahme eines Rückgangs der Schadstoffgehalte im Sickerwasser innerhalb weniger Jahrzehnte zutreffend ist.

Für die Zeit nach 2005 sind ausschließlich Deponien vorgesehen, deren Inhalt einer Vorbehandlung unterzogen wurde, mit der eine erhebliche Abnahme der Reaktivität der abzulagernden Stoffe angestrebt wird, um geringe Schadstofffrachten im Sickerwasser und eine reduzierte Gasbildung zu erreichen. Nach Ansicht des Gesetzgebers muß dies nach derzeitigem Stand der Technik eine Verbrennung sein (ANONYMUS 1998). Wesentliches Kriterium zur Prüfung ist der organische Gehalt, der auf 5 Masseprozent begrenzt wurde. Dieser Grenzwert ist umstritten, vgl. z. B. BRÖKER et al. (1998), da mit ihm keineswegs die Reaktivität der abgelagerten Stoffe beschrieben werden kann. Eine Änderung der TA SIEDLUNGSABFALL in diesem Punkt ist zu erwarten, (vgl. BILITEWSKI 1998).

Wesentliches Kriterium für die Langzeitbewertung derartiger Deponien ist die Fragestellung, wie sich die abgelagerten "inertisierten" Stoffe langfristig verhalten. Dabei spielt nach Ansicht des Verfassers nicht so sehr die chemische Beständigkeit eine Rolle, die derzeit überwiegend durch Eluat-Versuche (BILITEWSKI 1998) abgeschätzt wird, sondern insbesondere die mineralogische Stabilität der entstehenden Aschen und Schlacken, vgl. auch ZEVENBERGEN et al. (1995) und JOHNSON (1993).

Die Ziele der TA SIEDLUNGSABFALL sollen durch ein Mehrbarrierensystem (STIEF 1986) gewährleistet werden, bestehend aus einem günstigen Standort, einer Abdichtung, einer günstigen Einbautechnik und durch Ablagerung gering belasteten Abfalls. Obwohl Deponien mit einfachen Basisdichtungen nunmehr schon seit über 25 Jahren und mit Kombidichtungen seit über 15 Jahren in Betrieb stehen, sind wissenschaftlich fundierte Aussagen über die erreichte Wirksamkeit dieser Basisdichtungen im Hinblick auf den angestrebten Grundwasserschutz noch nicht verfügbar. Dies resultiert aus

der Schwierigkeit, die Basisdichtung in-situ effektiv zu überwachen.

Mit vorliegender Untersuchung soll ein Beitrag zu dieser Fragestellung aus unserer Praxis geleistet werden. Sie soll einer Abschätzung dienen, ob die unter anderem in der TA SIEDLUNGSABFALL formulierten Ziele eines langfristigen Grundwasserschutzes erreicht und die Sicherheit der nach dem derzeitigen Stand der Technik ausgeführten Deponien auch langfristig gewährleistet werden können. Dazu werden Erfahrungen aus dem Betrieb moderner Deponien und die Ergebnisse von Untersuchungen an älteren Deponien mitgeteilt.

## 2 Derzeitiger Stand der Deponietechnik

Die TA SIEDLUNGSABFALL sieht sowohl für den Zeitraum bis 2005 als auch für den danach eine Deponierung von Hausmüll vor, wobei jedoch nach dem Jahre 2005 eine Vorbehandlung zwingend erforderlich ist.

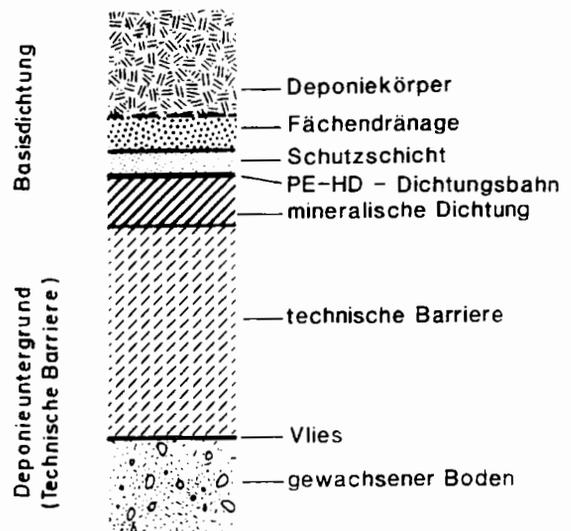
Soweit es derzeit am Markt ablesbar ist, wird dies auf eine überwiegende Verbrennung des Mülls und eine anschließende Deponierung der Verbrennungaschen und -schlacken hinauslaufen, sofern der Widerstand des Gesetzgebers gegen die mechanisch-biologische Vorbehandlung aufrecht erhalten bleibt, ANONYMUS (1998).

Schon derzeit wird durch Sortierung beim Müllerzeuger eine erhebliche Schadstoffentfrachtung gegenüber der früher gängigen Praxis der Deponierung gänzlich unsortierten Mülls gewährleistet. Weiterhin haben die entsorgungspflichtigen Gebietskörperschaften die gewerblichen Kunden weitgehend verloren, so daß nunmehr auf Siedlungsabfalldeponien weitgehend einheitlicher Hausmüll abgelagert wird.

### 2.1 Sicherungseinrichtungen

Unabhängig von einer derzeit noch nicht zwingend notwendigen Vorbehandlung sieht die TA SIEDLUNGSABFALL mehrere Sicherungssysteme vor, von denen das wichtigste das Basisabdichtungssystem ist.

Abb. 2 zeigt einen Systemschnitt durch das Basisabdichtungssystem der schon vor der Verabschiedung der TA SIEDLUNGSABFALL, jedoch in Anlehnung an die zu erwartenden Regelungen gebauten Erweiterungsfläche der Deponie Varel-Hohenberge. Danach besteht das Basisabdichtungssystem aus mineralischer Dichtungsschicht mit aufliegender Kunststoffdichtungsbahn und der Entwässerungsschicht, die nur zusammen eine funktionsfähige Einheit bilden.



**Abb. 2: Systemschnitt durch das 1989 ausgeführte Basisabdichtungssystem des Erweiterungsabschnittes der Deponie Varel-Hohenberge**

Bei den im vorliegenden Aufsatz dargestellten Deponien ist es die Regel, daß der eigentlich geforderte geologisch günstige Untergrund (MU 1991, Standorterlaß Niedersachsen) nicht vorhanden ist und daher durch eine „Technische Barriere“ ersetzt werden muß. Es kann davon ausgegangen werden, daß auch zukünftige Deponieerweiterungen, sofern sie nach Verfüllung der derzeit bestehenden erheblichen Überkapazitäten wieder notwendig werden sollten, auch dann vorrangig an von der Bevölkerung „akzeptierten“ und nicht an geologisch

günstigen Standorten eingerichtet werden. Das muß schon allein deshalb so sein, weil insgesamt nur eine sehr geringe Fläche der Bundesländer überhaupt das Prädikat "günstiger Standort für eine Deponie" verdient. DÖRHÖFER (1997) gibt für Niedersachsen 1 % an. Daß dort jeweils ausgerechnet alle anderen Standortfaktoren passen, ist sehr unwahrscheinlich.

Von Bedeutung für die Beurteilung der in der Norddeutschen Tiefebene eingerichteten Deponien ist ferner, daß üblicher Weise mangels Gefälle - nicht wie gefordert die Deponien im Freispiegelgefälle entwässern - sondern das Sickerwasser dauerhaft mit Pumpen gehoben werden muß. Damit ist die zentrale Fragestellung, wie lange schadstoffhaltiges Sickerwasser anfällt.

## 2.2 Deponien mit Basisdichtungen

Aussagen über die langfristige Funktionsfähigkeit von Basisabdichtungssystemen lassen sich aus einigen unserer Praxis-beispiele ableiten, die im Abschnitt 5 beschrieben sind.

Unsere Erfahrungen stützen sich auf Untersuchungen einer Vielzahl von Haus- und Sondermülldeponien, jeweils entsprechend ihres Alters sehr unterschiedlichen technischen Entwicklungsstandes. Die Zuverlässigkeit der Herstellung des technischen Systems steht außer Frage: Im Rahmen unserer Tätigkeit in der Eigen- und Fremdüberwachung an Erweiterungsabschnitten der hier vorgestellten und einer Vielzahl weiterer Deponien im Regierungsbezirk Weser-Ems konnte ein sehr hoher Qualitätsstandard stets nachgewiesen werden.

Die direkte Untersuchung eines Basisabdichtungssystemes im Betrieb ist nicht möglich, da es der direkten Beobachtung nicht zugänglich ist und alle Meßeinrichtungen zu dessen Überwachung, wie Grundwassermeßstellen, nur indirekt und mit sehr geringer Signifikanz auf die dauerhafte Funktionsfähigkeit schließen lassen.

Weiterhin gibt es nur wenige Beispiele, bei denen eine nachträgliche Aufgrabung nach einer gewissen Betriebszeit durchgeführt wurde

(DÜLLMANN et al. 1989, SCHNEIDER 1992, ENTENMANN 1996). Bei den hier beschriebenen Untersuchungsergebnissen von der Deponie Neu Wulmstorf war dies der Fall. Dort bestand die seltene Gelegenheit eine Deponiebasisdichtung nach 10jährigem Betrieb im Anschluß an eine Aufgrabung zu untersuchen.

Daneben stehen lediglich Untersuchungsergebnisse aus der langjährigen Deponieüberwachung älterer Deponien zur Verfügung. Deren Auswertung liefert gegebenenfalls eine Abschätzung der Wirksamkeit natürlicher Dichtungs- und Dränageschichten und kann damit indirekt Rückschlüsse auf künstlich hergestellte Basisabdichtungssysteme zulassen.

## 3 Gefährdungspotential für das Grundwasser

Hausmülldeponien stellen aufgrund der im Deponiesickerwasser vorhandenen grundwassergefährdenden Bestandteile ein Gefährdungspotential für das Grundwasser dar (ENTENMANN 1993). Inwiefern diese mögliche Gefährdung des Grundwassers in eine tatsächliche Gefährdung mündet oder einen Schaden verursacht, ist von vielen Einflußfaktoren abhängig, vorwiegend vom hydrogeologischen Untergrundaufbau, die es in der Gefährdungsabschätzung abzuklären gilt. In Niedersachsen wurden Ende der 80er bis Anfang der 90er Jahre die meisten betriebenen, bzw. noch nicht stillgelegten Deponien einer intensiven Gefährdungsabschätzung unterzogen (vgl. Tabelle 2). Eine ausführliche Darstellung erfährt dieses Thema bei ENTENMANN (1998). Diese Untersuchungen haben dazu geführt, daß die tatsächliche Gefährdung, die von Hausmülldeponien ausgeht, sehr viel besser beurteilt werden kann, als es früher der Fall war.

Grundsätzlich muß die Grundfläche der Deponie als Ausschlußfläche für jegliche Folgenutzung des Deponieuntergrundes und insbesondere der darin befindlichen Aquifere gelten. Inwiefern jedoch der Abstrombereich beeinträchtigt wird, hängt maßgeblich von der hydrogeologischen Gesamtsituation ab. Der dort beeinflusste Bereich beträgt überwiegend nur

**Tabelle 2: Gefährdungspotential ausgewählter Deponien und Altablagerungen**

Zuordnung	Zentraldeponie							Altablagerung Hausmüll			
	Hausmüll					Sondermüll					
Deponie	We	Va	Ma	Ton	H	N	L	Da 03	Ho 01	Ho 02	Vis
Zeitraum nach Betriebsbeginn [ a ]	24	23	24	23	25	16	50	27	38	38	33
Kontaminierte Gesamtfläche [ ha ]	10	10	9	8	5	-	0,8	1,4	1,2	0,8	1,3
Abstrombereich [ ha ]	1,2	2,5	0,3	10	0,25	-	1,0	> 2	< 0,1	< 0,01	< 0,1
Länge der Schadstoffahne [ m ]	20	75	15	400	10	> 100	50	> 100	< 20	< 5	< 20
Begrenzung V: Vorfluter k: keine t: teilweise	t	t	V	k	t	k	V	k	k	k	k
Sickerwasseremission [ % von Versickerung ]	20	50	50	100	< 30	-	100	100	100	100	100
Gefährdetes Schutzgut GW: Grundwasser OFW: Oberflächenwasser	GW	GW OFW	OFW	GW	GW OFW	GW OFW	OFW	GW	GW	GW	GW

einen Bruchteil der Fläche der Deponie, kann jedoch in Einzelfällen nach einigen Jahrzehnten der Existenz der Deponie auch die Fläche des Deponieuntergrundes überschreiten (ENTENMANN 1999).

Hinsichtlich der Schadstoffbelastung des Grundwassers im Abstrombereich gilt für die hier untersuchten Deponien auf pleistozänen Böden mit überwiegend gutem und selbst in den sandigen Schichten mit mittlerem Retardationsvermögen: Die Hauptbelastung bilden Salzfrachten und die organischen Abbaustoffe sowie das Ammonium. Schwermetalle treten sehr unregelmäßig auf. Lediglich die geringer

retardierbaren Metalle können bei geringen Ton- und Schluffgehalten der Grundwasserleiter auch in größerem Abstand als 50 m von der Deponie festgestellt werden. Vorrangig Arsen, Nickel und Zink werden in signifikanten Konzentrationen festgestellt. Organochlorverbindungen werden zwar mit dem Sickerwasser in erheblicher Konzentration ins Grundwasser überführt, was die hohen AOX-Werte belegen, eine Identifikation der Einzelstoffe ist jedoch häufig sehr schwierig. Chlorierte Kohlenwasserstoffe als Einzelstoffe werden im Grundwasserabstrom meist nur in sehr geringen Konzentrationen und nur im Nahfeld gemessen.

## 4 Erfahrungen aus dem Betrieb und der Überwachung gedichteter Deponien

Mittlerweile steht ein Zeitraum von über 15 Jahren zur Verfügung, in dem moderne basisgedichtete Deponien betrieben werden. Grundsätzlich kann aufgrund von eigenen Erfahrungswerten ausgesagt werden, daß die Basisdichtung bei guter bautechnischer Ausführung ein sehr robustes Bauelement darstellt und bislang bei den vorgestellten Fällen noch keinerlei Grund zur Beanstandung geliefert hat.

Probleme im Betrieb traten dagegen bei folgenden Einrichtungen auf:

- Baubedingte Deformationen von Dränrohren im Flächenfilter
- undichte Durchdringungsbauwerke
- zeitweiliger Sickerwassereinstau wegen Pumpenausfalls
- längerfristiger Sickerwassereinstau wegen Versagens der Kläranlage
- Sickerwasserverlust an defekten Transportleitungen außerhalb des basisgedichteten Bereiches
- Sickerwasserverluste im Bereich der Kläranlage.

## 5 Abschätzungen zur Langzeitsicherheit betriebener Deponien

Ziel der Untersuchungen war die Abschätzung, ob von einer langfristigen Wirksamkeit des Deponiebasisabdichtungssystems, bestehend aus Dichtungsschichten und Entwässerungsschicht, ausgegangen werden kann. Untersuchungsgegenstand ist daher die zeitliche Entwicklung der Durchlässigkeit der Dichtungsschicht, hier der mineralischen Dichtung. Ein weiterer Gesichtspunkt ist die Beständigkeit der mineralischen Dichtung, beschrieben durch bodenmechanische und mineralogische Parameter. Für den Fall, daß eine, wenn auch geringe Durchströmung der mineralischen Dichtungsschicht stattfindet, z. B. im Falle

einer Schadstelle in der Kunststoffdichtungsbahn, ist zusätzlich von Bedeutung, welches Retentionspotential die mineralische Dichtungsschicht und die Technische Barriere aufweisen.

Entscheidend für die Langzeitsicherheit der Deponie ist jedoch die Gewährleistung eines freien Durchflusses im Flächenfilter, so daß vorrangiges Untersuchungsziel der Nachweis der Verockerungsfreiheit ist.

### 5.1 Untersuchungsmethoden

An der Deponie Neu Wulmstorf konnten Untersuchungen nach einer Aufgrabung durchgeführt werden. An den anderen, hier untersuchten Deponien konnten aus der hydrogeologischen Erkundung und außerdem der geotechnischen Untersuchung indirekt Rückschlüsse von natürlichen zu künstlich hergestellten Schichten gezogen werden:

- Die Durchströmung bindiger Schichten läßt sich aus der hydraulischen Analyse im Rahmen der hydrogeologischen Untersuchungen, unterstützt durch Wasserbilanzen, abschätzen (Varel-Hohenberge, Wesermarsch-Mitte).
- Die mechanische Qualität der mineralischen Dichtung läßt sich nur anhand von bodenmechanischen Laboruntersuchungen zu verschiedenen Betriebsstadien im Vergleich zu den Ausgangswerten vor der Inbetriebnahme der Deponie bestimmen (Neu Wulmstorf).
- Das Retentionspotential von Dichtungsschichten läßt sich sowohl im Analogieschluß aus der dauerhaften Durchströmung und Messung von Sicker- und Grundwasserchemismus vor und nach der Passage, wie auch an Analysen von Bodenproben aus natürlichen durchströmten Schichten feststellen (Wesermarsch-Mitte, Lübeck, Hahn-Lehmden).
- Die Qualität der Entwässerungsschicht läßt sich durch direkte Messungen des Abflusses in Bezug zur Infiltration aus den Niederschlägen feststellen (Hahn-Lehmden).
- Generelle Aussagen über die Dränageigenschaften von Entwässerungsschichten lassen Untersuchungen an natürlichen dün-

nen Schichten unterhalb von Altdeponien zu (Wesermarsch-Mitte).

- Schäden an der Basisentwässerung (Verockerung) lassen sich nur durch Inaugenscheinnahme und Beprobung ermitteln (Neu Wulmstorf).

### 5.2 Regionalgeologischer Rahmen

Alle untersuchten Deponien und Abtlagerungen liegen auf pleistozänen Lockergesteinen der Norddeutschen Tiefebene (vgl. Abb. 1). Die einzelnen Standorte werden nachfolgend kurz skizziert:

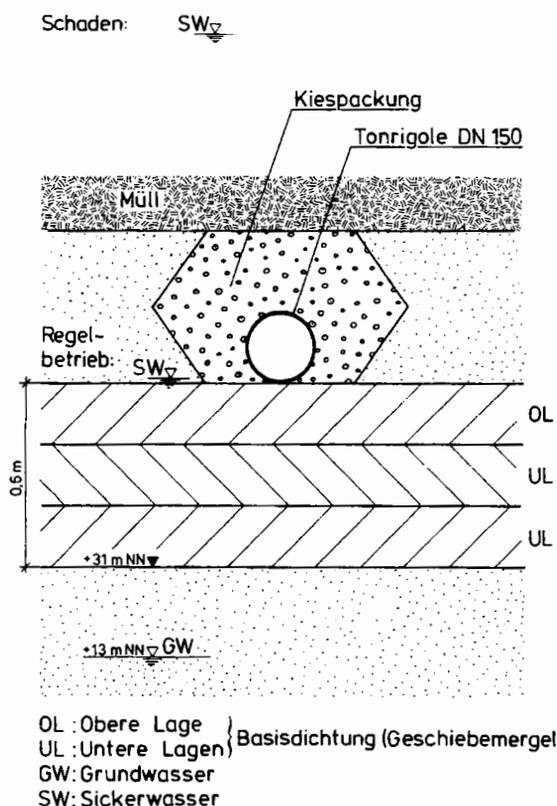
- ausgedehnte glazifluviale Ablagerungen: Holdorf
- ausgedehnte glazifluviale Ablagerungen, abgedeckt durch eine partiell erodierte Geschiebelehmdecke: Neu Wulmstorf, Visbek
- geschuppte und aufgebeulte Sandersedimente mit Geschiebemergeln und eingeschuppten Tertiärtonen: Tonnenmoor, Damme
- Beckenablagerungen (Lauenburger Ton) und glazifluviale Sande: Mansie, Hahn-Lehmden
- Weichschichten des Küstenholozäns über glazifluviatilen Sanden und Beckenablagerungen: Wesermarsch-Mitte, Varel-Hohenberge, Lübeck.

### 5.3 Fallbeispiel Neu Wulmstorf

Im Rahmen einer umfangreichen Reparaturmaßnahme am Entwässerungssystem der Deponie, bei der 4 über 10 m tiefe Schächte im Müllkörper angelegt wurden, ergab sich die Möglichkeit, nachträglich die Qualität einer seit 10 Jahren betriebenen und mit Deponiesickerwasser eingestauten mineralischen Deponiebasisdichtung und der darüber liegenden Flächendränage geotechnisch zu untersuchen. An den gewonnenen ungestörten Bodenproben wurden bodenmechanische, mineralogische und geochemische Untersuchungen durchgeführt. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen sind detailliert bei ENTENMANN (1996) beschrieben und werden hier nur kurz zusammengefaßt

wiedergegeben mit Bezug auf die hier beschriebene Fragestellung des Langzeit-Grundwasserschutzes.

Der Erweiterungsabschnitt der Deponie Neu Wulmstorf wurde 1982 mit einer einfachen mineralischen Basisdichtung, bestehend aus drei Lagen mageren Geschiebemergels à 20cm und einer darüber liegenden Flächendränage aus Sand mit in einer Kiespackung verlegten Rigo- len versehen, Abb. 3.



**Abb. 3: Schematische Darstellung des Basisabdichtungssystems der Deponie Neu Wulmstorf**

Infolge im Betrieb der Deponie aufgetretener Schäden am Entwässerungssystem im Erweiterungsabschnitt wurde dauerhaft ein Sickerwassereinstau von ca. 2 m über OK Basisdichtung festgestellt. Dieser Einstau führte zu einer erhöhten Durchflußrate an Sickerwasser. Ziel der Untersuchungen war festzustellen, ob dadurch negative Veränderungen am Deponiebasisabdichtungssystem stattgefunden haben.

### 5.3.1 Deponiebasisdichtung

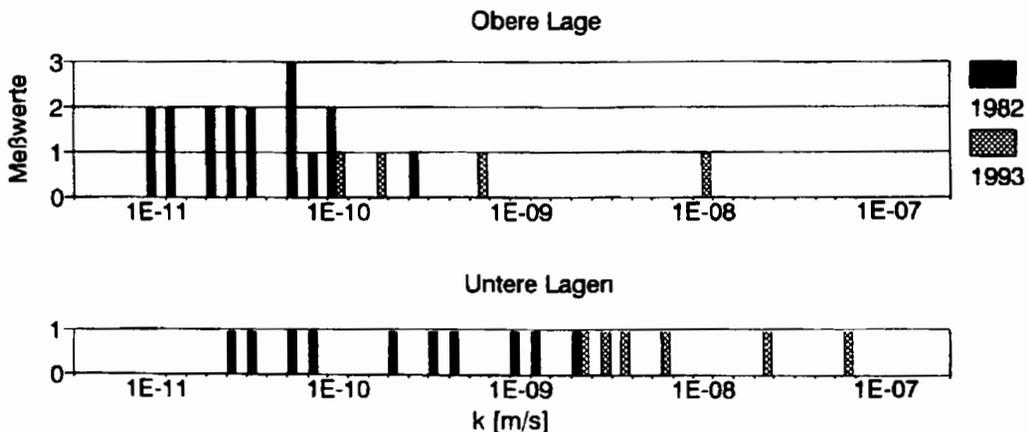
Die zehnjährige Durchströmung der Deponiebasisdichtung mit einer anfänglichen Durchströmungsgeschwindigkeit ( $v_a$ ) von  $3,4 \cdot 10^{-9}$  m/s und einer zuletzt festgestellten von  $2,3 \cdot 10^{-7}$  m/s hinterließ keine makroskopisch erkennbaren Schäden an der Basisdichtung. Die Ergebnisse der bodenmechanischen Laborversuche sind in Tabelle 3 dargestellt. Im Betriebszeitraum der Deponie hat demzufolge eine Abnahme der Trockenwichte um etwa 3 % bis 5 % stattgefunden. Diese Reduktion ist auf eine Entkalkung zurückzuführen. Sie ging einher mit einer Vergrößerung des Porenvolumens, sicher nachgewiesen in den unteren Lagen der Basisdichtung in der Größenordnung von 4%.

Die Vergrößerung der Porosität hat auch zu einer Vergrößerung der Permeabilität geführt (Abb. 4). Diese Durchlässigkeitserhöhung infolge Entkalkung ist so erheblich, daß die Wirksamkeit der Basisdichtung

$$\eta = \frac{1 - \text{Durchströmungsrate}}{\text{Sickerwasserneubildungsrate}}$$

auf 8 % zurückging, die Basisdichtung daher nunmehr nahezu wirkungslos ist. Eine Änderung der Tonmineralzusammensetzung wurde nicht festgestellt.

Hinsichtlich der umfangreichen durchgeführten geochemischen Analysen wird auf ENTENMANN (1996) verwiesen.



**Abb. 4: Deponie Neu Wulmstorf: Erhöhung der Durchlässigkeit der Basisdichtung nach langjähriger Durchströmung**

Zusammengefaßt ergaben sich infolge der Durchströmung folgende Veränderungen:

- Es deutet sich eine Verringerung der Kationenaustauschkapazität von im Mittel 8,7 meq/100 g auf 6,8 meq/100 g an.
- $\text{Ca}^{++}$  - Ionen wurden durch  $\text{K}^{+}$  - Ionen, in geringerem Maße durch  $\text{Na}^{+}$  - Ionen ausgetauscht.
- Es erfolgte eine signifikante Sorption von Zn, Cd, Pb, eine geringere durch Ni aus dem Sickerwasser.

- An der Oberkante der Basisdichtung traten erhebliche Sulfidanreicherungen auf.

**Tabelle 3: Deponie Neu Wulmstorf: Ergebnisse der bodenmechanischen Laborversuche.****1982: Fremdüberwachung beim Bau der Basisdichtung****1993: Untersuchung im Rahmen der Sanierungsmaßnahme nach über 10-jährigem Betrieb**

			1982 nach der Herstellung			1993 nach Schaden an der Entwässerung		
			min.	Mittel	max.	min.	Mittel	max.
Trocken- wichte	OL	kN/m <sup>3</sup>	18,6	19,5	20,2	19,1	19,0	20,3
	UL	kN/m <sup>3</sup>	18,7	19,7	21,0	18,2	18,6	18,9
Poren- volumen	OL	Vol.-%	24,0	27,0	30,0	24,0	26,6	28,0
	UL	Vol.-%	22,0	26,3	30,0	29,0	30,2	32,0
Luftporen- volumen	OL	Vol.-%	0,0	3,8	11,0	1,0 *)	3,8 *)	6,0 *)
	UL	Vol.-%	0,0	3,9	11,0	4,0 *)	6,7 *)	10,0 *)
Kalk- gehalt	OL	Gew.-%	1,4	4,0	8,4	0,1	0,3	0,6
	UL	Gew.-%		≥ 3,0		0,7	0,8	0,9
Durch- lässigkeit	OL	m/s	3 · 10 <sup>-11</sup>		3 · 10 <sup>-9</sup>	8 · 10 <sup>-10</sup>		1 · 10 <sup>-8</sup>
	UL	m/s	5 · 10 <sup>-11</sup>		4 · 10 <sup>-9</sup>	4 · 10 <sup>-9</sup>		8 · 10 <sup>-8</sup>

OL: obere Lage    UL: untere Lage

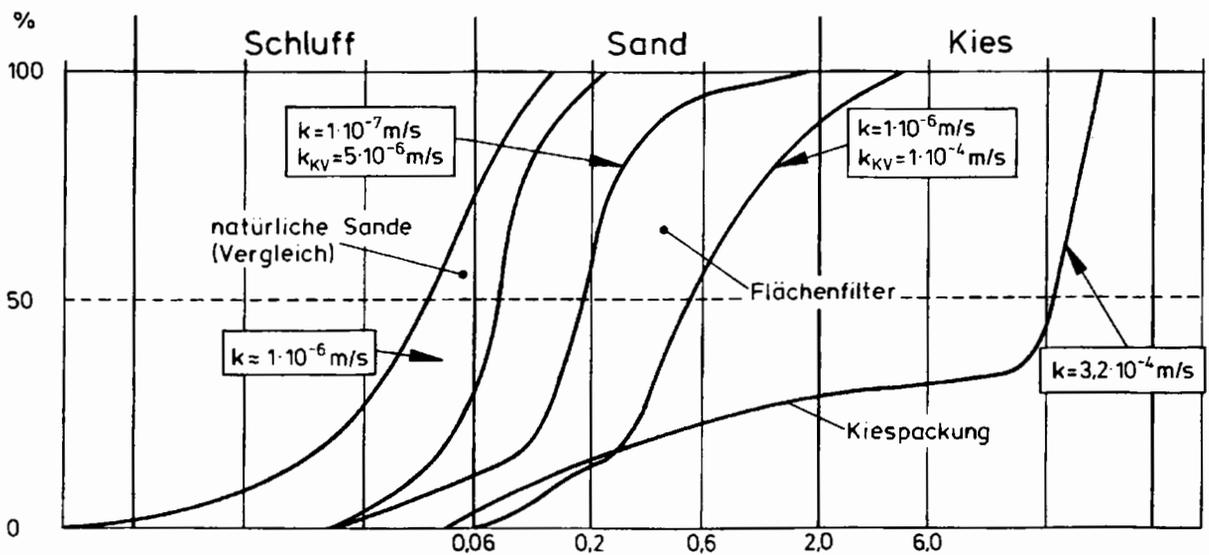
\*) nach mehrmonatiger Entwässerung  
des Probenkörpers in-situ

### 5.3.2 Entwässerungsschicht

Die im Bereich der Entwässerungsschicht durchgeführten bodenmechanischen und mineralogischen Untersuchungen belegen, daß die Durchlässigkeit dieser Schicht durch Kalkfällung im Porenraum stark reduziert ist. Deren Wirksamkeit ist deshalb erheblich eingeschränkt. Den Kornverteilungskurven zufolge müßten die Sande des Flächenfilters k-Werte in der Größenordnung von  $1 \cdot 10^{-4}$  m/s bis  $5 \cdot 10^{-6}$  m/s aufweisen. Tatsächlich wurden jedoch an den Proben im direkten Durchlässigkeitsversuch Werte in der Größenordnung von  $k = 5 \cdot 10^{-6}$  m/s und  $1 \cdot 10^{-7}$  m/s bestimmt (Abb. 5).

Die Durchlässigkeitsverringering ist auf eine Verockerung zurückzuführen. Die Sande weisen ungewöhnlich hohe Karbonatgehalte auf. Den Röntgendiffraktogrammen zufolge handelt es sich jedoch um keinen natürlich vorkom-

menden Kalk, sondern um künstlich gebildete Mischkristalle. Wie die Auswertung von Dünnschliffen (Abb. 6) zeigt, fand durch Abscheidung von Karbonat aus dem Deponiesickerwasser im Porenraum ein Kristallwachstum statt. Ein Teil der neu gebildete Kristallite wuchs mit seiner Längsachse senkrecht auf die Sandkörner auf. Diese ragen dann in den Porenraum und bewirken eine geringfügige Verringerung des Porenvolumens (Abb. 6, oben). Entscheidend ist jedoch der zweites Typus von Kristalliten, der zu Kornbindungen in den Porenhälsen führte (Abb. 6a, unten) und dadurch die Permeabilität des Filters verringerte. Dies führte zu einer erheblichen Zementation, d. h. auch einer mechanischen Verfestigung. Dieser Vorgang war jedoch nicht nur auf die Sandschicht beschränkt; auch die Kiespackung war partiellweise durch Karbonatfällung so weit verbakken, daß ganze Blöcke im Zusammenhang aus der Packung gehoben werden konnten.



**Abb. 5: Deponie Neu Wulmstorf: Durchlässigkeitsverringern der Basisdrainage durch Karbonatzementation**

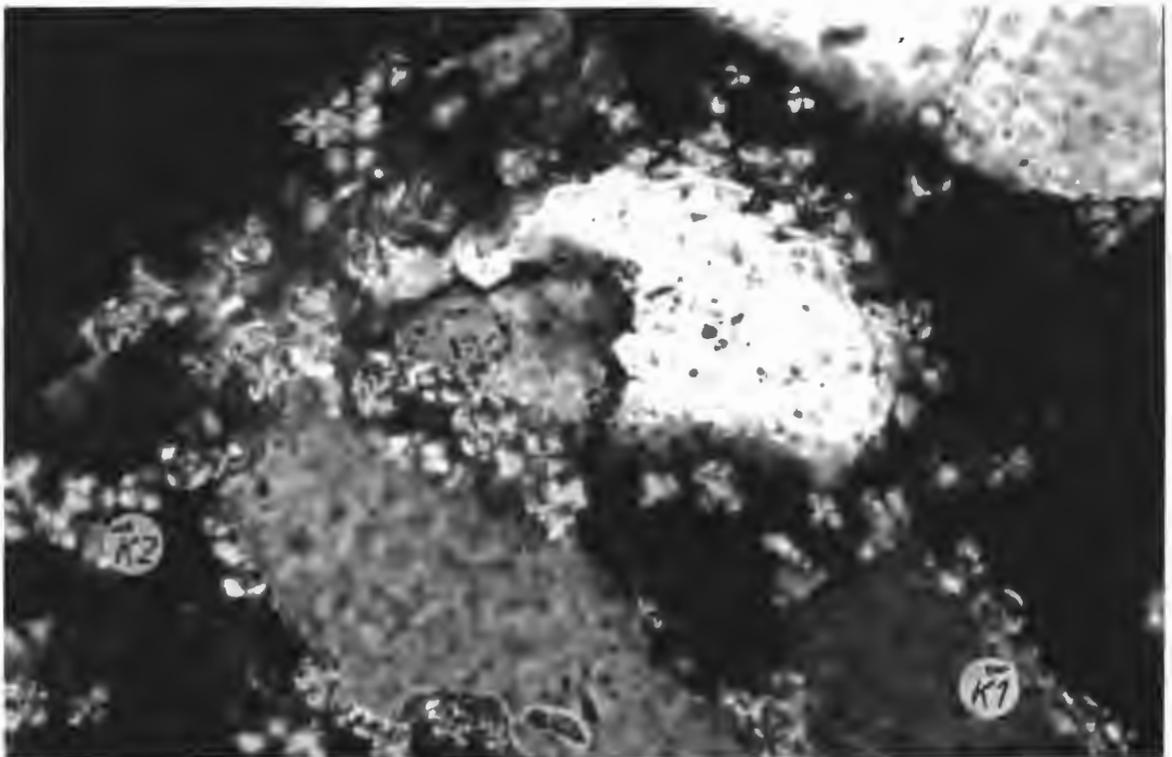
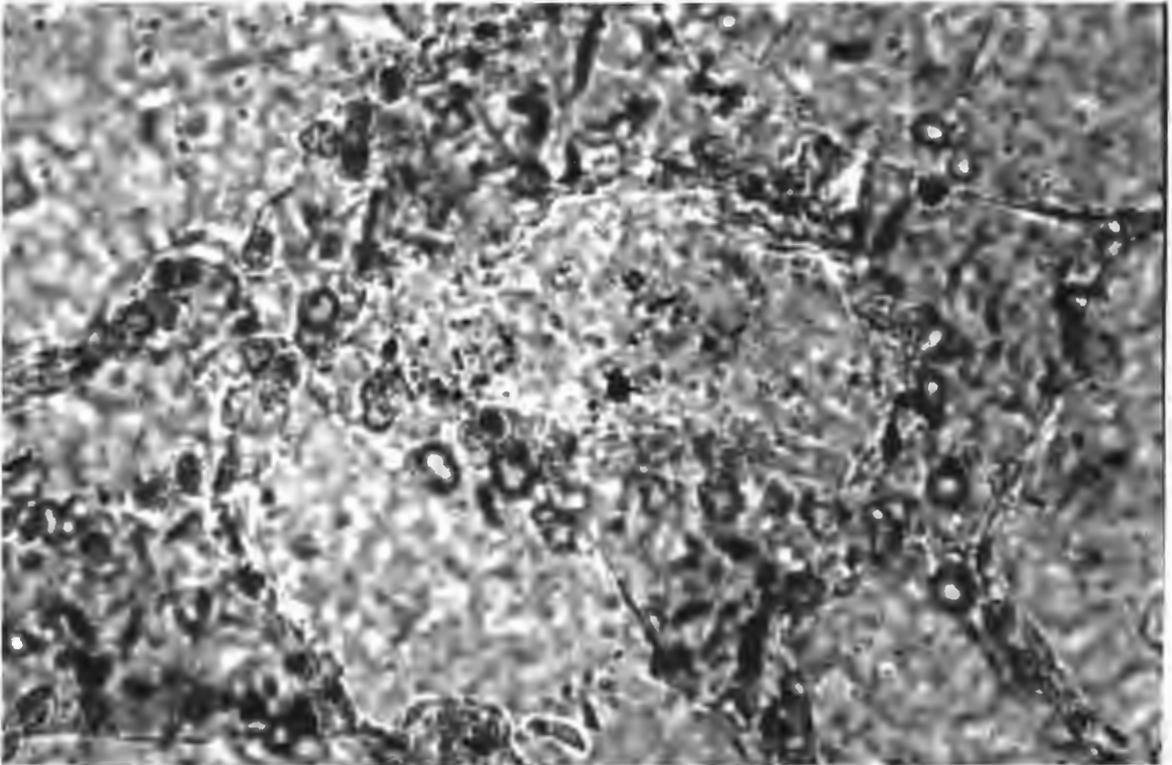
#### 5.4 Fallbeispiel Varel-Hohenberge

Die Deponie Varel-Hohenberge liegt auf geringmächtigen holozänen bindigen Ablagerungen (Klei), die überwiegend glazifluviale Sande überlagern. Detailliert dargestellt ist die hydrogeologische Situation bei ENTENMANN (1998). Die Deponie zeichnet sich durch einen überaus hohen Sickerwassereinstau aus (Abb. 7), der eine Ursache in den geringdurchlässigen Schichten an der Basis hat. Der Aufstau von örtlich über 6 m Sickerwasser lässt sich jedoch nicht allein mit dieser basalen Weichschicht begründen, wie ein Vergleich mit anderen Deponien zeigt. Bei der Deponie Varel-Hohenberge werden die hohen Sickerwasserstände von einer Vielzahl im Müllkörper eingelagerter geringdurchlässiger Abfallschichten aus der Zellstoffindustrie bedingt.

Die hier vorgestellte basale Schicht eignet sich besonders zur Beurteilung langfristig mit Sickerwasser durchströmter Schichten, weil auf ihr seit vielen Jahren ein hydraulischer Gradient bis zu  $i = 4$  lastet. Derartig große Gradienten sind nach ENTENMANN (1998, S. 237) entsprechend der gemessenen geringen Sickerwasserneubildungsrate abzüglich der im Randgraben zurückgewonnenen Wassermengen, ausgedrückt in einer Wassersäule von 140 mm/Jahr bei einer mittleren Mächtigkeit

der durchströmten Schicht von etwa 2 m nur bei  $k$ -Werten unter  $1 \cdot 10^{-9}$  m/s möglich.

Außerhalb der Deponie werden jedoch Werte deutlich darüber festgestellt, die zu einer Angabe eines Bemessungswertes von  $1 \cdot 10^{-8}$  m/s führen. Die erheblich geringere Durchlässigkeit der Weichschicht unterhalb der Deponie muß daher auf die Kompaktion infolge der Auflast zurückgeführt werden und liefert ein Argument für den Einsatz von Klei als Basisdichtungsmaterial, z. B. in den Erweiterungsabschnitten der Deponien Wesermarsch-Mitte und Varel-Hohenberge. Dennoch ist die Schutzwirkung der basalen Schicht aus Sicht des heutzutage geforderten Grundwasserschutzes trotz geringer Durchlässigkeit erheblich zu gering: Es verbleibt eine Durchströmungsrate in der Größenordnung von ca. 14 %, die gut mit den Werten aus der Wasserbilanz der Gesamtdeponie von 16 % (ENTENMANN 1999) übereinstimmt. Diese Restdurchströmung ließe sich nur durch eine Verbesserung der Entwässerung der Deponie verringern bis auf einen minimal möglichen Wert von etwa 4 % bei einem hydraulischen Gradienten von  $i = 1$ .



**Abb. 6, 6a:** Deponie Neu Wulmstorf: Dünnschliffaufnahmen im Durchlicht und mit gekreuzten Polarisatoren von Dränsanden aus dem Flächenfilter, vor dem Schliff mit Kunstharz. Mikritischer Karbonatzement (K1) angereichert als Saum um detritische Quarzkörner. Daneben findet sich jedoch dieses authigene Karbonat (K2) dispers verteilt im Porenraum (Bildmaßstab 0,26mm x 0,18mm)

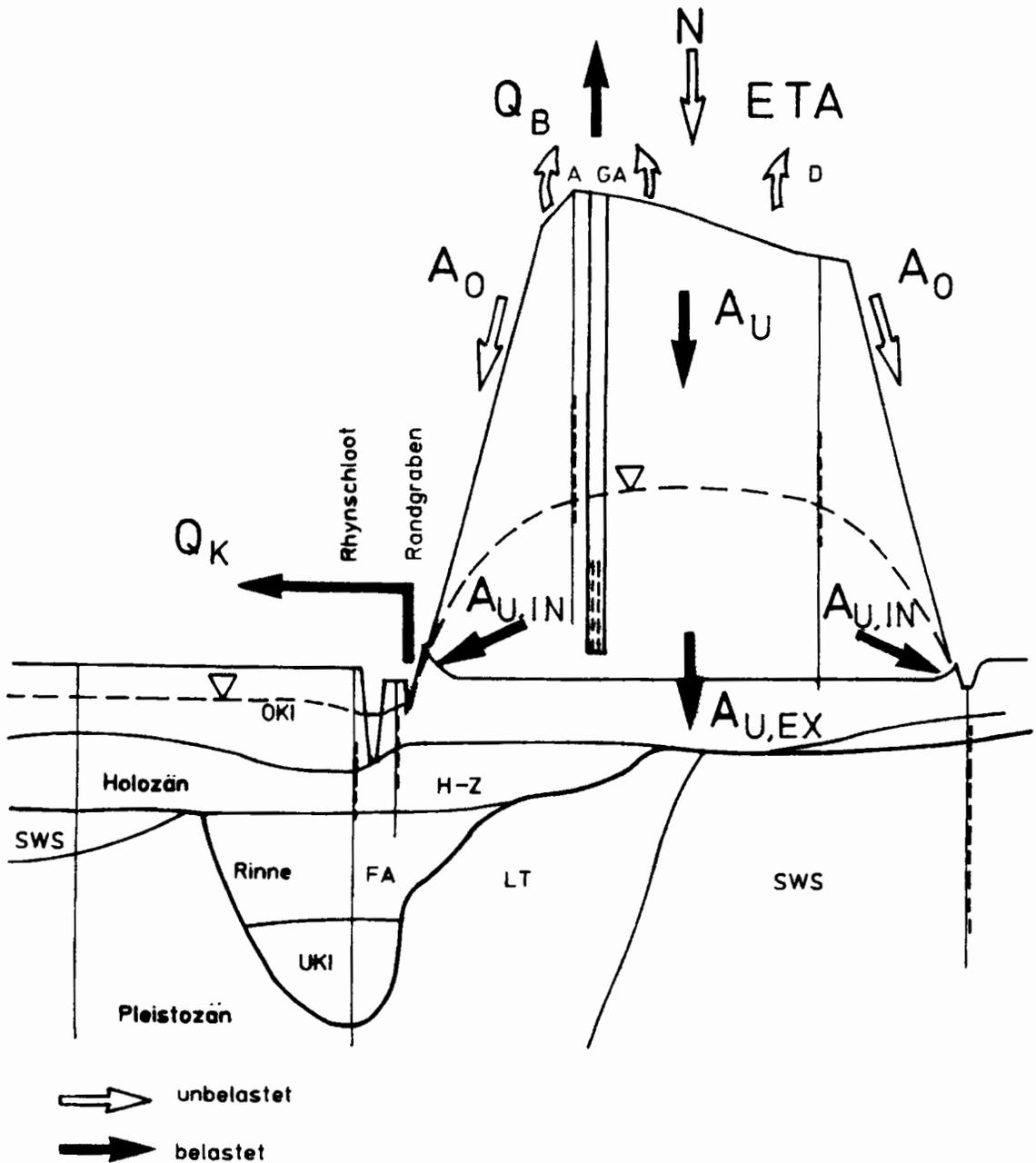


Abb. 7: Deponie Varel-Hohenberge: Hydrogeologischer N-S-Schnitt

OKI: Oberer Klei,

FA: Fluviatile Ablagerungen,

LT: Lauenburger Ton,

H-Z: Torf-Zwischenschichten,

UKI: Unterer Klei,

SWS: Schmelzwassersande

### 5.5 Fallbeispiel Wesermarsch-Mitte

Eine ähnliche Situation wie an der Deponie Varel-Hohenberge liegt an der Deponie Wesermarsch-Mitte vor, (Abb. 8). Der dort anstehende, die Deponie unterlagernde Obere Klei ist jedoch wegen Schilfdurchwurzelungen mit

$k = 1 \cdot 10^{-8}$  m/s deutlich durchlässiger, dagegen der hydraulische Gradient wesentlich geringer. Unter diesen Randbedingungen wird nahezu das gesamte neugebildete Sickerwasser durchgelassen, der Obere Klei ist als Dichtungsschicht unwirksam.

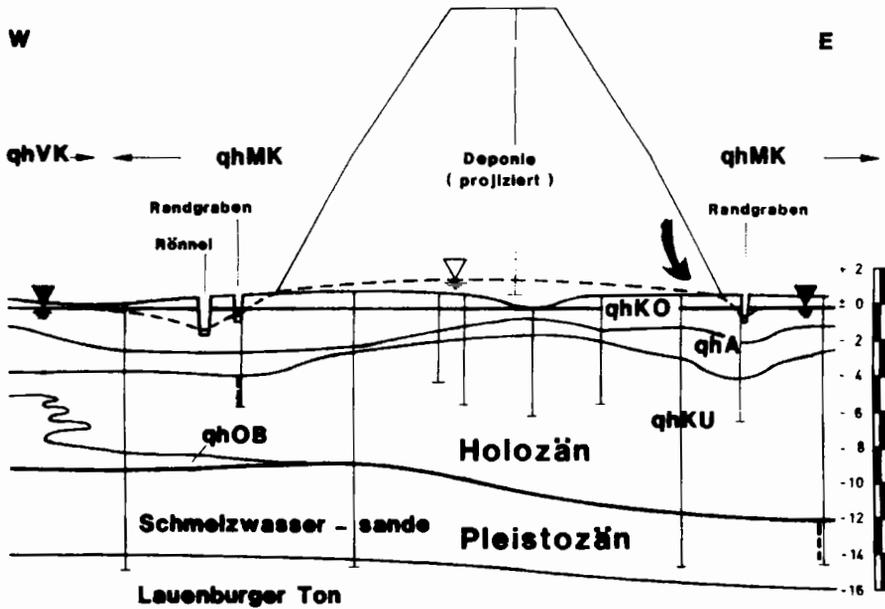


Abb. 8: Deponie Wesermarsch-Mitte: Hydrogeologischer W-E-Schnitt

<i>qh:</i>	<i>Holozän</i>	<i>qhMK:</i>	<i>Mineralischer Komplex</i>
<i>qhVK:</i>	<i>Verzahnungskomplex (mit Torf)</i>	<i>qhKO:</i>	<i>Oberer Klei</i>
<i>qhA:</i>	<i>Torf</i>	<i>qhKU:</i>	<i>Unterer Klei</i>
<i>qhOB:</i>	<i>Basaler Torf</i>		

Übrige Bezeichnungen: Bilanzglieder des Wasserhaushalts. Die Örtlichkeit, die zur Bestimmung der Retardation in-situ verwendet wurde, ist mit einem gebogenen Pfeil markiert (vgl. Abb. 11).

Dagegen eignet er sich aufgrund seiner vollflächigen Durchströmung seit über 25 Jahren zur Abschätzung des Retentionspotentials, denn das durchströmende Sickerwasser wird nach dessen Passage in der unterlagernden Torfschicht dem Deponierandgraben zugeführt. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen sind zusammen mit anderen Fallbeispielen im Abschnitt 6 beschrieben.

Unterhalb des Oberen Kleis befindet sich eine durchgängige Torfschicht, die, der Wasserbilanz über die Gesamtdeponie (ENTENMANN 1999) zufolge, zusammen mit einem einzigen alten, aber immer noch funktionsfähigen Dränagestrang in der Lage ist, das gesamte, den oberen Klei durchströmende Sickerwasser zu fassen und zum Deponierandgraben zu befördern. Angesichts der erheblichen Probleme andernorts, z. B. in Neu Wulmstorf mit zur Verockerung neigenden Flächendränagen unter der Deponie ist dieses Ergebnis erstaunlich und bedarf einer Diskussion:

- Die untersuchte Torfschicht ist im Mittel nur 0,75 m mächtig. Vom Zentrum der Deponie zu den Rändern hin wirkt ein hydraulischer Gradient, der von 0 auf 0,8 ansteigt. Die horizontale Komponente des Durchlässigkeitsbeiwertes beträgt infolge Kompaktion durch Auflast mittlerweile  $k_i = 5 \cdot 10^{-8}$  m/s im Zentrum gegenüber  $k_a = 5 \cdot 10^{-7}$  m/s außerhalb der Deponie.
- Die Torfschicht kann zusammen mit dem Dränstrang unter diesen Randbedingungen gerade eben die jährliche Sickerwasserneubildung von etwa 20.000 m<sup>3</sup> abführen. Damit war für den Zeitraum der offenen Deponie noch eine 100 %-ige hydraulische Wirksamkeit gegeben. Bei weiterer Verringerung der Durchlässigkeit infolge der Langzeitsetzungen nach inzwischen abgeschlossener Beschickung der Deponie wäre jedoch ohne die mittlerweile abgeschlossene Oberflächenabdichtung von einer Erhöhung der Sickerwasserstände im Deponiekörper auszugehen.

- Es wurden - anders als in Kiesdränagen unterhalb von Deponien - keine Karbonatablagerungen in der Torfschicht festgestellt. Gegenüber dem hochalkalischen primären Deponiesickerwasser in der Deponie ist das Sickerwasser in der Torfschicht neutral bis schwach sauer. Dies kann mit den humosen Bestandteilen sowohl des Oberen Kleis als auch der Torfschicht begründet werden.

## 5.6 Fallbeispiel

### Deponie Hahn-Lehmden

Die Deponie Hahn-Lehmden wird durch über 50 m mächtige Tone der Lauenburger Schichten des Pleistozäns unterlagert. Im vorderen Bereich schiebt sich zwischen Deponiekörper und Tone ein flacher, oberflächennaher Grundwasserleiter (Abb. 9). Die seit über 25 Jahren betriebene und mittlerweile rekultivierte Deponie hat als Besonderheit eine Basisdränage. Nach heutigen Begriffen ist diese, bestehend aus drei in Kies verlegten Rigolen ohne Flächenfilter, erheblich unterdimensioniert. Daraus resultiert ein permanenter Sickerwassereinstau in der Deponie von über 2 m, der wiederum beständig hohe Fließgeschwindigkeiten in den Dränagen und aufgrund reduzierender Bedingungen im Sickerwasser Sauerstofffreiheit garantiert. Diese günstige Konstellation hat dazu geführt, daß die Dränage noch in vollem Umfange funktionsfähig ist und keinerlei Inkrustationen beobachtet werden können, ENTENMANN & RAPPERT (1998).

## 5.7 Fallbeispiel Altablagerung Lübeck

Einen ähnlichen Untergroundaufbau wie die Deponie Varel-Hohenberge weist auch die Altablagerung Lübeck auf, ENTENMANN & IHLE (1995). Dort liegen schwermetallhaltige Rückstände auf einer im Mittel 0,75 m mächtigen Auelehmschicht, die wiederum von einem Grundwasserleiter unterlagert wird. Dieser Grundwasserleiter besitzt eine gering durchlässige Basis in geringer Teufe, so daß der geringe Fließquerschnitt zuverlässige Abschätzungen des Durchflusses zuläßt, (Abb. 10).

Trotz geringer Durchlässigkeit der Auelehmschicht mit  $k = 1 \cdot 10^{-8}$  m/s kommt es auch hier

zu einer fast vollständigen Durchströmung, seit ca. 50 Jahren mit belastetem Sickerwasser. Die dabei stattfindenden Retentionsvorgänge sind im Abschnitt 6 beschrieben.

## 6 Ergänzende Untersuchungen zum Retentions- und Retardationsvermögen bindiger Schichten

Von einer Vielzahl von Autoren wird bei der Langzeitbeurteilung der Basisdichtung besonders auf das Schadstoffrückhaltevermögen der Tonmineralbestandteile hingewiesen (z. B. ONNICH et al. 1991), die bis zur Forderung nach einem mehrlagigen Aufbau mit „Dichtungs“- und „Sorptionschichten“ gehen (CZURDA 1994). Daher wird das Retentions- und Retardationsvermögen der mineralischen Dichtungsschichten hier zusammenfassend beurteilt.

Die bestehende hydrogeologische und bautechnische Situation der Deponien Wesermarsch-Mitte und Neu Wulmstorf und der Altablagerung Lübeck, wo natürliche bzw. künstliche mineralische Schichten langjährig von belastetem Sickerwasser durchströmt wurden und Aufzeichnungen über den Wasserchemismus vor und nach der Durchströmung bzw. über adsorptiv gebundene Stoffe in der Schicht selbst vorliegen, läßt eine Bestimmung des Retardationskoeffizienten (R) oder eine Abschätzung des Verteilungskoeffizienten (Kd) in-situ zu, ENTENMANN (1995). Abb. 11 zeigt schematisch die Situation der „Feldversuche“:

An der Deponie Wesermarsch-Mitte wurde der Chemismus des Sickerwassers (co) in der Deponie und nach Durchströmung des Oberen Kleis im Randgraben (c1(t)) gemessen. Nach Rückrechnung der Verdünnung über den Chloridgehalt konnten in Anlehnung an OGATA & BANKS (1961) und LENDA & ZUBER (1970) für die einzelnen Ionen und Metalle näherungsweise - iterativ abgeschätzt und extrapoliert - Retardationskoeffizienten berechnet werden, die in Tabelle 4 dargestellt sind. Damit ergeben sich für die 2 m dicke Schicht aus

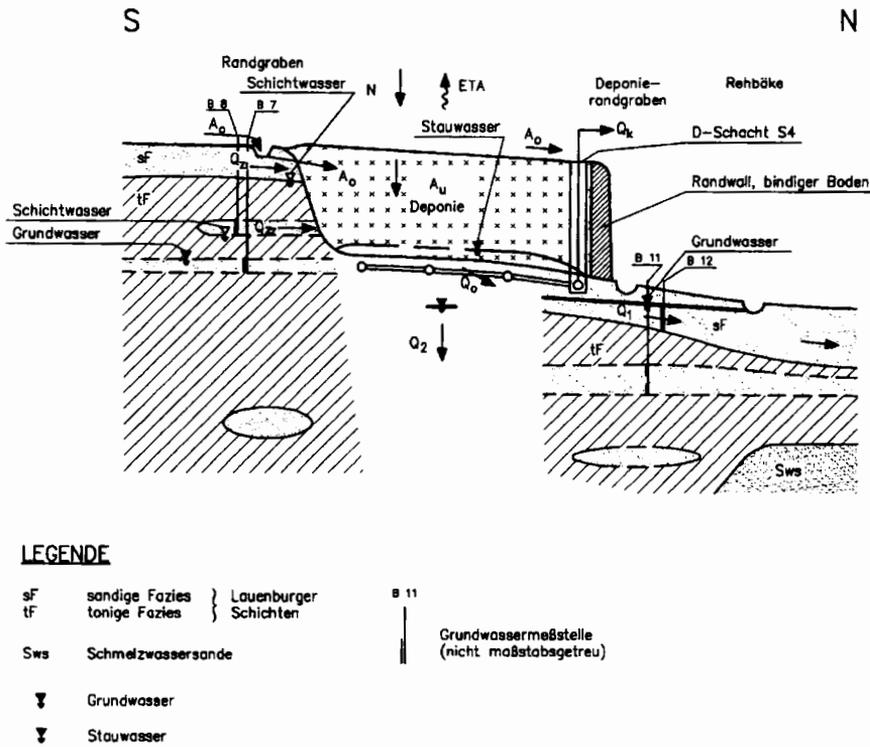


Abb. 9: Deponie Hahn-Lehmden: Hydrogeologischer N-S-Schnitt

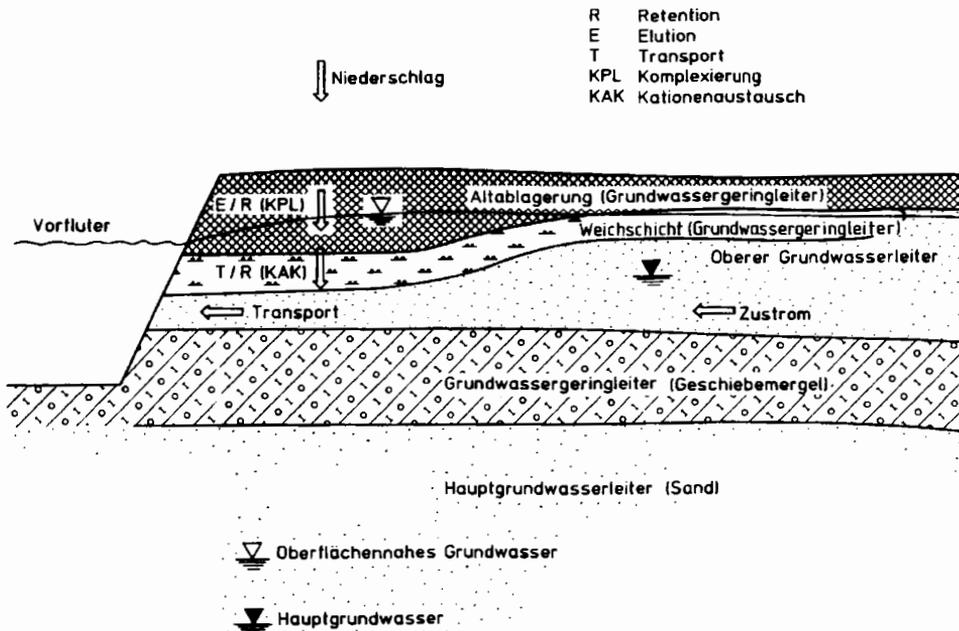
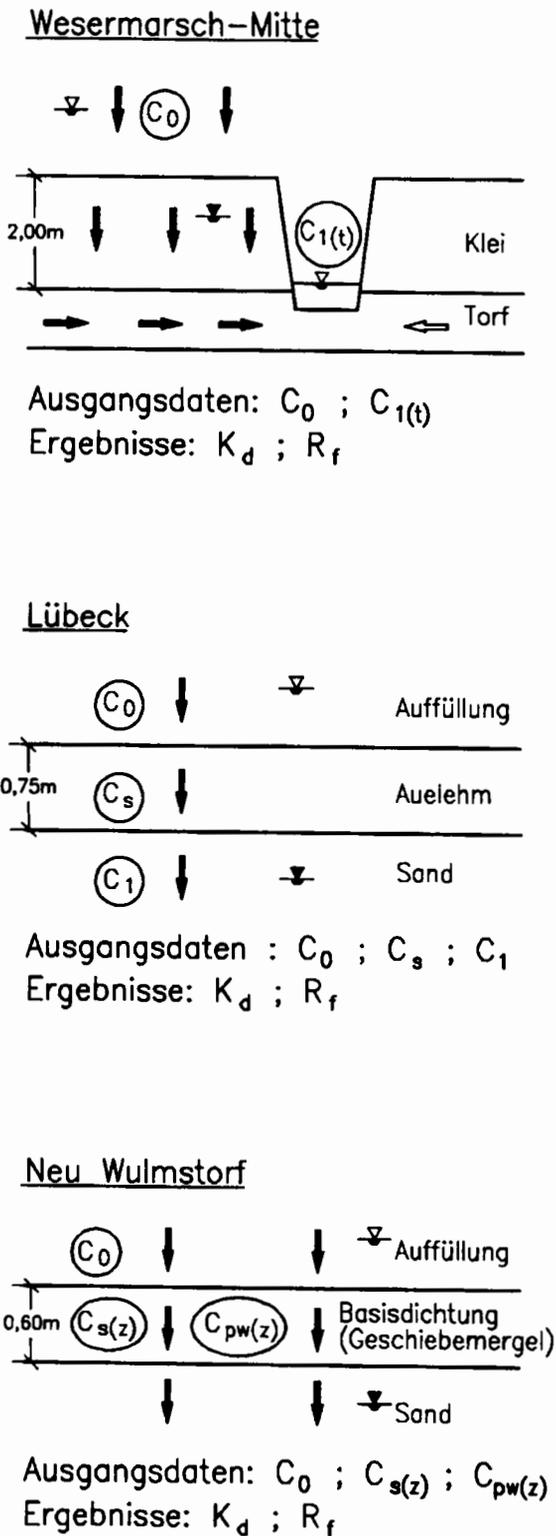


Abb. 10: Altablagerung Lübeck: Hydrogeologischer N-S-Schnitt



organischem Ton Durchbruchzeiten zwischen 3,8 Jahren für das Chlorid bis 480 Jahren für das Kupfer. Diese Werte sind plausibel, betrachtet man die Schadstoffverteilung in der Umgebung der Deponie. Größenordnungsmäßig passen sie zu den Ergebnissen von Säulendurchlaufversuchen, vgl. z. B. WAGNER (1992).

Sehr viel höhere Werte für die Retardationskoeffizienten bei vergleichbaren Eigenschaften der durchströmten Schicht erhält man dagegen an der Altablagerung Lübeck, (Tabelle 5). Eine Auswertung wie an der Deponie Wesermarsch-Mitte als „Quasi-Säulenversuch“ war hier aufgrund der Verdünnung, die das Sickerwasser nach Passage durch die Weichschicht im Grundwasserleiter erfährt, nicht möglich. Damit ist  $c_1(t)$  nicht mit der erforderlichen Genauigkeit zu ermitteln.

In diesem Fall konnte jedoch aufgrund der sehr hohen Schwermetallkonzentrationen im Sickerwasser und der langen Durchströmungszeit von über 40 Jahren nachgewiesen werden, daß sich in der Weichschicht ein Gleichgewichtszustand zwischen Sorption und Desorption von Schwermetallen eingestellt hat. Daher konnten die Ergebnisse der Sickerwasseranalysen ( $c_0$ ) und Bodenanalysen ( $c_s$ ) aus der Weichschicht entsprechend dem Batch-Versuch ausgewertet werden. Es ergeben sich  $k_d$ -Werte für die Schwermetalle von 20,7 ml/g für das Zink bis 3.835 ml/g für das Quecksilber. Diese Werte passen wiederum mit Literaturwerten aus Batch-Versuchen zusammen, vgl. z. B. MICHENFELDER (1993).

Es kann davon ausgegangen werden, daß im Batch-Versuch bei denselben Gehalten im Sickerwasser höhere Gehalte an der Matrix resultieren würden als im In-situ-Versuch. Zwar kann im In-situ-Versuch nach 40 Jahren Durchströmung ebenso wie im Batch-Versuch von einem Überangebot an Schwermetallen im Sickerwasser ( $c_0$ ) ausgegangen werden, aber es findet keine Zerstörung der Bodenstruktur und Durchbewegung statt. In der Durchbruchkurve äußert sich dieses Verhalten in einem sehr viel früheren Durchbruch und darin, daß nach erfolgtem Durchbruch der Wert  $c / c_0 = 1$  nicht erreicht wird (schematische Abb. 13).

Abb. 11: Schematische Darstellung der Situation in-situ an 3 Standorten, die zur Auswertung als „Feldversuche“ zur Bestimmung der Retardationsfaktoren dienen

**Tabelle 4: Deponie Wesermarsch-Mitte:  
In-situ bestimmte Retardationsfaktoren für den holozänen Oberen Klei (T, u, o)**

Parameter	Retardationsfaktor	Durchbruchzeit berechnet	Durchbruch beobachtet nach 20 Jahren
	[ ]	[ a ]	
Cl <sup>-</sup>	1,00 <sup>*)</sup>	3,8	x
K <sup>+</sup>	1,65	6,3	x
As	1,70	6,5	x
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	2,20 <sup>**)</sup>	8,4	x
B	4,15	16,0	x
Cr	8,55	33,0	-
Pb	13,90	54,0	-
Cd	17,40	66,0	-
Ni	19,00	72,0	-
Zn	42,00	155,0	***)
Cu	119,00	480,0	-

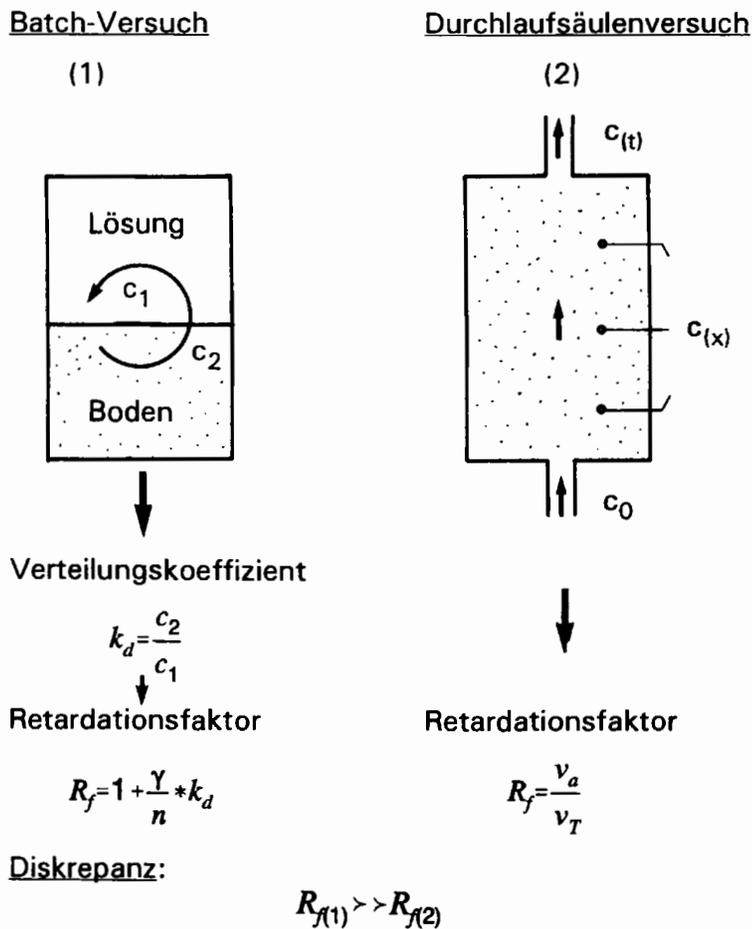
<sup>\*)</sup> Als Referenzwert auf 1,00 gesetzt

<sup>\*\*)</sup> Nachweislich auf Oxidation zurückzuführen

<sup>\*\*\*)</sup> Zahlreiche Meßfehler wegen verzinkter Rohre

**Tabelle 5: Altablagerung Lübeck:  
In-situ bestimmte Retardationsfaktoren für den Auelehm (T, u, o)**

Parameter	K <sub>d</sub> (max)	K <sub>d</sub> (mittel)	R (mittel)	Durchbruch	
	[ ml/g ]	[ ml/g ]	[ ]	berechnet [ a ]	beobachtet [ a ]
Cl <sup>-</sup>	0,1	0,1	1,2	0,14	< 40
F <sup>-</sup>	1,1	0,8	3,4	0,4	< 40
K <sup>+</sup>	1,1	1,1	4,4	0,52	< 40
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	4,3	3,2	11,3	1,3	< 40
Zn	20,7	20,7	67,2	8,0	< 40
B	28,6	28,6	92,4	11,0	< 40
Co	55,7	55,7	175,2	21,3	< 40
Ni	85,7	85,7	275,3	32,8	< 40
Cu	1169,6	126,8	406,8	48,4	< 40
Cd	222,2	222,2	712,1	49,0	< 40
As	1038,9	249,6	799,8	95,2	< 40
Pb	2893,9	434,6	1351,8	165,6	< 40
Cr	11417,7	965,6	3090,9	367,7	< 40
Hg	16365,9	3835,4	12274,2	1460,6	< 40



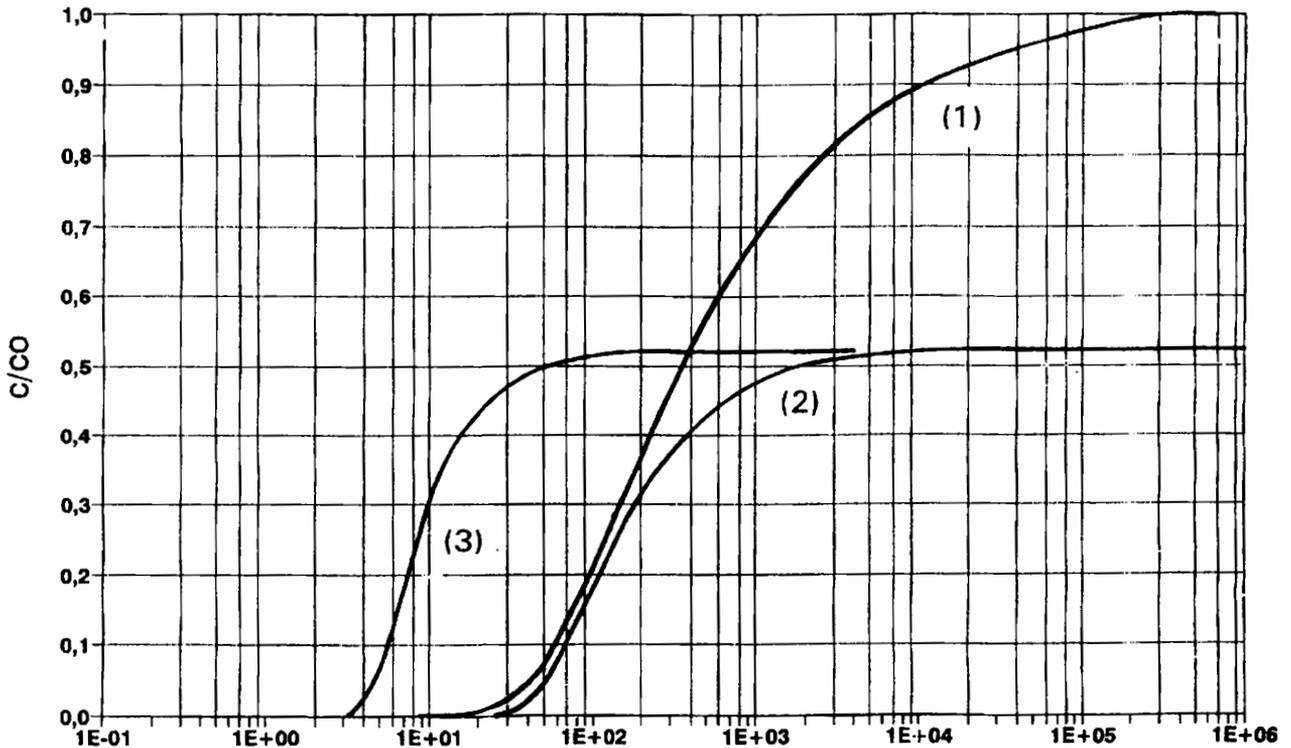
**Abb. 12: Vergleich des Batch-Versuchs mit dem Säulendurchlaufversuch zur Bestimmung der Retentions- und Retardationseigenschaften bindiger Schichten**

Berechnet man jedoch, wie in Abb.12 dargestellt, aus den  $k_d$ -Werten die Retardationsfaktoren, so resultieren sehr hohe Werte bis in Größenordnungen, wie sie von WAGNER (1990) für einen Lias-Ton beschrieben wurden. Es ergibt sich eine erhebliche Diskrepanz, die von ISENBECK et al. (1985) auch anhand von Laborversuchen festgestellt wurde und dort zu der eindeutigen Aussage führte, daß sich aus  $k_d$ -Werten berechnete Retardationsfaktoren nicht für eine Beschreibung des Schwermetalltransports in oberflächennahen Grundwasserleitern eignen.

Wesentliches Ergebnis war, daß die dezimeterweise untersuchte Basisdichtung der Deponie Neu Wulmstorf nach zehnjähriger Durchströmung an einer 1 m dicken Stelle über den gesamten Querschnitt im Porenwasser vergleichbare Konzentrationen an Sickerwasserinhaltsstoffen aufwies. Dies galt sowohl für

die An- und Kationen, als auch für die stark retardierbaren Schwermetalle. Insbesondere war bei keinem Stoff ein Konzentrationsgradient von oben nach unten feststellbar. Auch die austauschbar gebundenen Kationen waren im gesamten Profil in etwa gleich verteilt. Es konnten erhebliche Austauschvorgänge, ausgelöst durch das durchströmende Sickerwasser, nachgewiesen werden. Die Kationenaustauschkapazität war jedoch nach 10 Jahren Durchströmung bei weitem nicht erschöpft.

Die obige Aussage ISENBECKs kann daher durch die hier ausgewerteten Feldversuche gestützt werden, verlangt jedoch nach einer Erklärung. Dazu sind die Ergebnisse der geochemischen Untersuchungen an der Deponie Neu Wulmstorf hilfreich, die hier aufgrund der Vielzahl von gemessenen Daten nicht eingehend erläutert werden, sondern auf ENTENMANN (1996) verwiesen wird.



**Abb. 13: Vergleich der schematisch dargestellten Ergebnisse von Säulenversuchen im Labor bei geringem Retardationspotential (1) und großem Retardationspotential (2) der durchströmten Schicht mit schematisch dargestellten Durchbruchkurven der hier vorgestellten Feldversuche (3)**

Grundsätzlich kann somit davon ausgegangen werden, daß die über Batch-Versuche gewonnenen Angaben zum Retentionsvermögen einer bindigen Schicht insgesamt auch für die Situation in-situ gut angenäherte Werte darstellen. Die Ergebnisse von der Altablagerung Lübeck bestätigen dies, wo die bindige Schicht bis zur Erschöpfung ihrer Retentionskapazität mit Schwermetallen belegt wurde. Die abgeleiteten  $kd$ -Werte sind plausibel. Die weiter daraus abgeleiteten Retardationsfaktoren beschreiben jedoch die festgestellten Verhältnisse nicht richtig: Der Durchbruch aller Schwermetalle - auch des Quecksilbers - hat längst stattgefunden und ist im Grundwasserleiter meßbar, obwohl er bei einigen Schwermetallen nach der Auswertung der Durchbruchzeiten aufgrund der Retardation erst in vielen Jahrhunderten erwartet würde. Die Tonminerale in der 0,75 m dicken Schicht hätten gar nicht in der zur Verfügung stehenden Zeit vollständig mit Schwermetallen beladen werden können. Dasselbe gilt für die Deponie Neu Wulmstorf. Auch dort hätten die aus dem Sickerwasser stammenden Inhaltsstoffe nur in den obersten Zentimetern der Basisdichtung aufzufinden sein dürfen,

dagegen treten sie gleichmäßig über das gesamte Profil auf.

Ein Erklärungsversuch ist in Abb. 14 dargestellt: Ausgehend von einer homogen eingebauten Dichtungsschicht kommt es bei der konvektiven Durchströmung zur Bildung von Makroporen. Diese resultieren aus einem hydraulischen Gradienten, sind schon in der Dichtungsschicht vorhanden oder latent angelegt und erweitern sich dann durch rückschreitende Erosion.

Dieses Modell beschreibt die beobachteten Phänomene zuverlässig, wie in Abb. 15 dargestellt: Der Durchbruch erfolgt durch konvektiven Transport sehr schnell entlang der Makroporen. Aus den Makroporen werden Stoffe jedoch diffusiv in die Mikroporen eingetragen. Dadurch verringert sich die Konzentration der Stoffe in dem auf den Makroporen durchströmenden Wasser. Die Verzögerung, die die einzelnen Stoffe aufgrund von Sorptions- und Desorptionsvorgängen an den Wandungen der Makroporen erleiden, wird durch den aus dem Säulenversuch bestimmten Retardationskoeffizienten beschrieben.

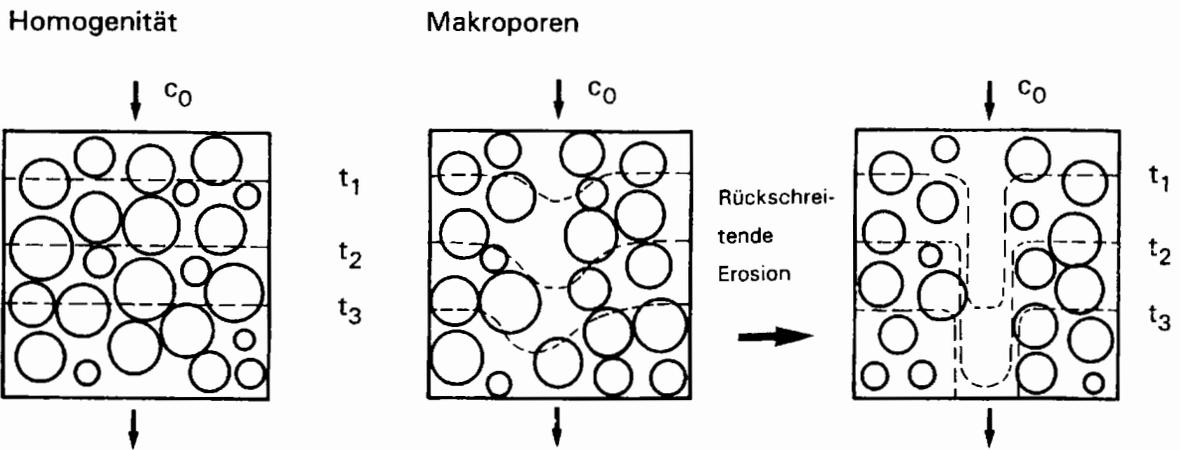


Abb. 14: Schematische Erklärung des Stofftransports in-situ: Einfluß der Inhomogenität

Der Vorgang des konvektiven Transportes auf Makroporen und Diffusion in die Mikroporen geht sehr lange vonstatten, bis in den Tonmineralen, die erst über die Mikroporen erreicht werden, ein Gleichgewicht zwischen Sorption und Desorption erreicht ist. Dieser Endzustand wird durch den  $kd$ -Wert aus dem Batch-Versuch beschrieben. Erst zu diesem Zeitpunkt wird in der Durchbruchkurve  $c/c_0 = 1$  erreicht. Damit wäre das Nicht-Erreichen des Wertes von  $c/c_0 = 1$  in der Durchbruchkurve, das insbesondere bei gering durchlässigen Böden beobachtet wird, damit zu deuten, daß sich die Durchbruchkurve erst nach einer sehr langen Zeit asymptotisch der 1 nähert, während der Durchbruch schon nach kurzer Zeit auftritt.

SCHWEICH & SARDIN (1981) erklären ähnlich verlaufende Kurven mit Ionenaustausch unter konkurrierenden Stoffen, was jedoch hier aufgrund des einheitlichen Auftretens der verschiedenen Stoffe nicht der Fall sein kann. Für einen gemischtkörnigen Boden, wie den Geschiebemergel, sind die Annahmen hinsichtlich der Formierung von Fließwegen aus Abb. 14 jedoch gar nicht notwendig. Das Quarzkorngerüst bildet eine Matrix, in der die Tonminerale als Aggregate liegen, die ein Mikrogefüge aufweisen. Makro- und Mikroporen sind also überall in der Dichtung schon vorgezeichnet. Ähnliche Makro- und Mikrostrukturen sind jedoch auch aufgrund von Aggregatbildungen in Böden ohne Grobkorn denkbar.

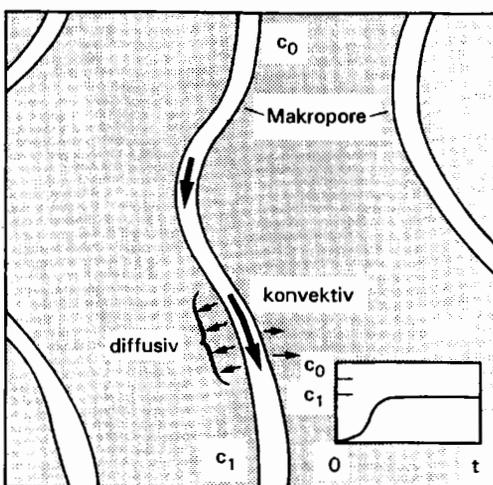


Abb. 15: Zusammenfassende Modellvorstellung des Stofftransports in-situ durch bindige Dichtungsschichten.

## 7 Zusammenfassende Bewertung

Die beschriebenen Untersuchungsergebnisse werden nachfolgend im Hinblick auf die Langzeit-Funktionsfähigkeit einzelner Deponie-Sicherungseinrichtungen bewertet.

### 7.1 Erforderliche Zeitdauer der Funktionsfähigkeit des Basisabdichtungssystems

Da es sich beim Basisabdichtungssystem um ein nicht (Dichtung) oder nur sehr eingeschränkt (Entwässerungsschicht) reparaturfähiges Element handelt, ist es grundsätzlich so auszulegen, daß seine Lebensdauer größer ist als seine Erfordernis zum Schutz des Grund-

wassers. Diese Dauer ist mit dem Zeitraum der Entstehung von signifikant belastetem Sickerwasser anzugeben.

Bei der Beurteilung der erforderlichen Standzeit der Basisdichtung muß grundsätzlich unterschieden werden zwischen der Reaktordeponie und der Rückstandsdeponie. Über die Langzeitliertbarkeit der Rückstände von Verbrennungsanlagen liegen noch keine auch nur annähernd gesicherten Erkenntnisse vor. Sicher ist lediglich, daß dem Anspruch der TA Siedlungsabfall an inertisiert abzulagernde Abfälle nur sehr eingeschränkt begegnet wird. Während STEGMANN (1994) noch aussagt, daß mit den Verbrennungsaschen zum damaligen Zeitpunkt die Anforderungen der TA Siedlungsabfall noch bei weitem nicht erreicht wurden, scheint sich inzwischen das Problem der Bildung erheblich belasteten Sickerwassers durch kontrollierte Alterung erheblich entschärft zu haben (MARZI et al. 1998). Dennoch kann aufgrund noch ausstehender, eingehender mineralogischer Untersuchungen derzeit keine Prognose gemacht werden, mit welchen Sickerwässern zukünftige Basisabdichtungen von Reststoffdeponien beaufschlagt werden.

Anders sieht es bei den Reaktordeponien aus. Eine Vielzahl von Autoren macht Prognosen über die zukünftige Entwicklung des Sickerwasserchemismus nach Schließung der Deponien. Im wesentlichen übereinstimmend äußern sich diese dahingehend, daß in der Phase der sauren Gärung eine überproportional ansteigende Schadstofffracht auftritt, die dann in der Methanphase kontinuierlich zurückgeht. Prognosen über die langfristige Sickerwasseremission erfolgen auf verschiedenem Wege:

- Übertragung und Extrapolation der Ergebnisse von Lysimeterversuchen (z. B. EHRIG 1989), KRUSE (1994, 1995), HEYER et al. (1996)
- Vergleich verschiedener unterschiedlich alter Deponien und Extrapolation, z. B. EHRIG (1989), ANDREOTTOLA (1992), BELEVI & BACCINI (1992)
- Massenflußabschätzungen BELEVI & BACCINI (1992).

All diesen Untersuchungen gemeinsam ist, daß eine längerfristige Beobachtung der Deponien in-situ fehlt. Der Vergleich verschieden alter Deponien - auch wenn er mit einer großen Zahl von Daten (ANDREOTTOLA 1992) durchgeführt wird - ist m. E. unzulässig, weil er die ansteigenden Gehalte an Schadstoffen im angelieferten Abfall von den 50er Jahren bis in die 80er Jahre nicht berücksichtigt und in der Auswertung als scheinbaren Rückgang in den Sickerwassergehalten mit zunehmenden Alter der Deponien verzeichnet.

Von den hier beschriebenen Deponien und Altablagerungen liegen z. T. Messungen des Grundwasserchemismus in Zeitreihen über einen Zeitraum von bis zu 30 Jahren vor. Diese Daten sind vollständig erfaßt und erfahren derzeit eine detaillierte Auswertung durch den Verfasser. Dabei wird aus der Grundwasserbelastung naher Grundwassermeßstellen der Sickerwasserchemismus unter genauer Berücksichtigung der zeitlich unter Umständen unterschiedlichen Verdünnung, adsorptiver Vorgänge (BOCK 1998) und von angelieferten Abbaumechanismen (CHRISTENSEN et al. 1993), zurückgerechnet, denn direkte Sickerwassermessungen liegen häufig erst seit den letzten Jahren oder nur unvollständig vor.

Vorläufig können hinsichtlich von Prognosen im Vergleich mit den oben zitierten Literaturstellen folgende Aussagen gemacht werden:

- Bei allen beschriebenen Deponien spielt die Phase der sauren Gärung keine Rolle: Während der Neuanlage von Deponiekörpern, z. B. von Erweiterungsabschnitten mit vorgerottetem Hausmüll, jedoch auch in der Vergangenheit ohne Vorrottung ist das Wasserdefizit im Hausmüll so groß, daß zumindest in den ersten beiden Jahren fast kein Sickerwasser anfällt (ENTENMANN 1998). Sobald in signifikanter Menge Sickerwasser festgestellt und dann analysiert wird, befindet sich die Deponie schon in der Methanphase. Dennoch nehmen die Schadstoffgehalte, insbesondere die organische Fracht, noch zu.
- Hinsichtlich der zeitlichen Entwicklung des Sickerwasserchemismus verhalten sich die Hausmülldeponien unterschiedlich. Alle

untersuchten Deponien zeigten in den ersten Jahren nach Einlagerungsbeginn einen steilen Anstieg der organischen Parameter und der Salze. Die Salzgehalte stiegen danach entweder kontinuierlich leicht an oder gingen kontinuierlich leicht zurück. Dagegen blieb die organische Fracht entweder auf hohem Niveau stabil oder stieg, wie z. B. im Fall der Deponie Tonnenmoor (Abb. 16) noch nach 15 Jahren nach Schließung überproportional an. Eine ähnliche Situation wird von GOLWER (1995) vom Monte Scherbelino bei Frankfurt angedeutet.

- Nur die Deponie Hahn-Lehmden zeigte in den letzten Jahren kontinuierlich zurückgehende Gehalte an Salzen und organischen Parametern im Sickerwasser. Diese Deponie unterscheidet sich von den anderen durch einen sehr hohen Bauschuttanteil und eine vergleichsweise geringe Hausmüllkubatur. Daneben war der Hausmüll an der Basis über etwa 30 Jahre fast vollständig wassergesättigt und wurde beständig mit großen Wassermengen durchströmt (vgl. Abschnitt 5.6).
- Bei den hier untersuchten Altablagerungen und Deponien konnte ein echtes stoffunabhängiges Maßstabsproblem festgestellt werden: Während sich die kleineren Altablagerungen mit Kubaturen zwischen 10.000 m<sup>3</sup> und 50.000 m<sup>3</sup> teilweise nach etwa 20 Jahren am Ende der Methanphase befinden, z. T. jedoch auch schon erheblich große aerobe Teilbereiche aufweisen, sind die etwa 20 bis 25 Jahre alten Zentraldeponien mit Ablagevolumina um 1 Mio m<sup>3</sup> noch vollständig anaerob, haben jedoch den Gipfel der Gasproduktion schon lange überschritten, während die Sickerwasserbelastung zum Teil noch zunimmt. Wenn aber schon in diesen Dimensionen so erhebliche Maßstabsprobleme auftreten, kann die Extrapolation von Lysimeterversuchen keine belastbaren Ergebnisse liefern, was auch die bei allen Autoren beschriebenen, in der Metanphase beständig zurückgehenden Gehalte im Percolat bestätigen.
- Mit zunehmendem Deponiealter steigt die Emissionsrate von gering retardierbaren toxischen Stoffen an, insbesondere des Arsen.

Daneben erhöht sich die Anzahl der lokalen und zeitlich beschränkten Emissionen (events) von toxischen Stoffen, z. B. auch der stärker retardierbaren Metalle, insbesondere des Nickels und des Kupfers. Das bedeutet, es müssen örtlich hochkonzentrierte Schadstoffmengen freigesetzt werden, denn die von SPILLMANN (1990) nach Laborbefunden postulierte zunehmende Adsorption von Stoffen an den zunehmend zersetzten Müllkörper kann hier anhand der gemessenen Verhältniswerte der Konzentrationen beim zeitlichen Auftreten dieser Stoffe im Sickerwasserkörper im Vergleich zur Emission ins Grundwasser in-situ belegt werden.

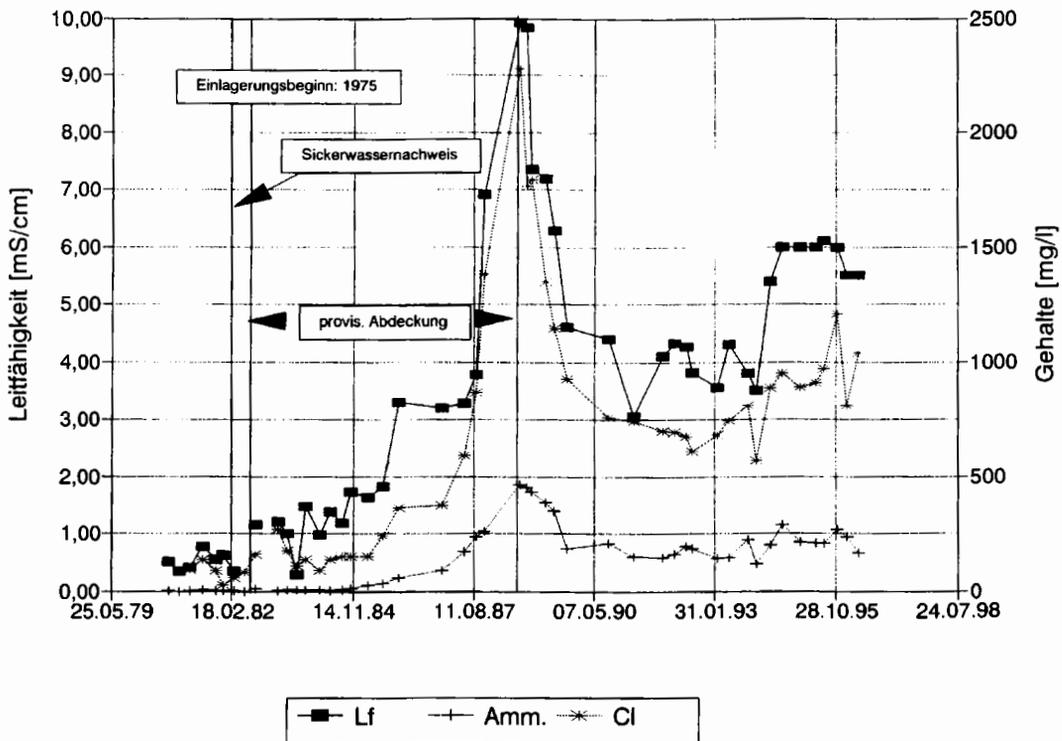
Wertet man all diese Überlegungen zusammen, so muß davon ausgegangen werden, daß die relevante Emissionszeit aus großen Zentral-Hausmülldeponien herkömmlicher Art eher zu den in der Literatur beschriebenen großen Zeiträumen in der Größenordnung von vielen Jahrhunderten (KRUSE 1995) als zu den von einigen Dekaden (EHRIG 1989) tendiert und insbesondere in der Zukunft mit einem Ansteigen der toxikologisch relevanten Parameter zu rechnen ist.

Diese Zahl paßt nicht zu der üblicherweise angegebenen Lebensdauer von Basisdichtungen, die nach Dekaden zählt (BACCINI & LICHTENSTEIGER 1989) und zeigt, daß die Reaktordeponie mit Basisdichtung lediglich eine Sicherungsmaßnahme auf Zeit darstellt.

## 7.2 Basisdichtung und Technische Barriere

Die Kombidichtung als basales Sicherungselement hat sich, wie die Beobachtungen zeigen, bislang bewährt. Über die Langzeitbeständigkeit der Kunststoffdichtungsbahn können mangels Daten keine Aussagen gemacht werden, jedoch für die mineralische Komponente für sich alleine, d. h. nach dem eventuellen Versagen der Kunststoffdichtungsbahn.

Von den bei den Fallbeispielen ausschließlich eingesetzten natürlichen, bindigen Böden kann angenommen werden, daß sie auf Dauer



**Abb. 16: Zeitlicher Anstieg ausgewählter Parameter Leitfähigkeit (Lf), Ammonium (Amm) und Chlorid (Cl) im Grundwasser unmittelbar im Abstrombereich der Deponie Tonnenmoor (Vechta)**

mechanisch stabil sind, eine negative Beeinflussung der Tonminerale wurde hier, anders als z. B. bei ECHLE et al. (1988) nicht festgestellt.

Allerdings sind lösliche Komponenten in der mineralischen Dichtungsschicht problematisch: Die in den einschlägigen Richtlinien vorgeschlagene Höchstbegrenzung von Karbonaten ist jedoch nicht sinnvoll, denn gerade geringe Karbonatgehalte sind schädlich für die Erhaltung geringer Durchlässigkeiten (TAUBALD 1995, ENTENMANN 1996), während höhere Gehalte zu einer „Reaktionsfront“ führen, die nur langsam zur Teufe hin fortschreitet.

Unabhängig davon ist das Basisdichtungselement in einer Sicherheitsbetrachtung als zweitrangiges Sicherungselement zu bewerten, das vorrangige Sicherungselement ist die Entwässerungsschicht, denn ein vollständiges Versagen der Entwässerungsschicht führt unweigerlich zu einer Emission (7.3) und ein teilweises zu einer erheblich höheren hydraulischen

Beanspruchung des Basisabdichtungssystems durch ein Ansteigen des hydraulischen Gradienten.

Obwohl die mineralische Dichtungsschicht mit moderner Einbautechnik so hergestellt wird, daß eine möglichst homogene Dichtungsschicht entsteht, hat diese noch eine Vielzahl von Inhomogenitäten, die dazu führen, daß nach einem Versagen der Kunststoffdichtungsbahn der Stofftransport - wie auch in natürlichen bindigen Schichten - auf bevorzugten Wegsamkeiten stattfindet. Die Schadstoffrückhaltekapazität kann in einer Sicherheitsbetrachtung nicht angesetzt werden, da der Stofftransport nur wenig gebremst wird (Retardation) und die Retention sich nur auf die je Zeiteinheit durchströmende Schadstoffmenge auswirkt.

Die Technische Barriere unterscheidet sich prinzipiell nur wenig von der mineralischen Komponente der Basisdichtung. Zwar sind geringere Anforderungen an sich zugelassen, in der Praxis hat sich in dem hier beschriebenen

Raum jedoch überwiegend die Verwendung ein und desselben Materials durchgesetzt, da es keinen Sinn macht, verschiedene Materialentnahmen zu erschließen. Somit bedeutet die Technische Barriere in der Praxis, daß eine 3,75 m mächtige mineralische Dichtungsschicht unterhalb von Hausmülldeponien eingebaut wird.

Wesentlicher Unterschied zur eigentlichen mineralischen Komponente der Basisdichtung ist jedoch, daß die Technische Barriere unterhalb des maximal zu erwartenden Grundwasserstandes eingebaut werden darf. Dies hat einen positiven Effekt: Bei hohen Grundwasserständen wirkt ein deutlich geringerer hydraulischer Gradient als  $i = 1$ , der minimal bei Grundwasserständen unterhalb der Dichtungsschicht wirken kann. Damit wirkt die Technische Barriere zum einen durch die Fließwegverringerung, zum anderen durch die Verringerung der Durchströmungsrate.

Ob bei der Technischen Barriere die Retardation anzusetzen ist, wäre noch eingehend durch Untersuchungen in-situ zu prüfen, die Untersuchungen an der Deponien Neu-Wulmstorf, Wesermarsch-Mitte und Lübeck sprechen vorerst dagegen.

### 7.3 Entwässerungssystem und Müllkörper

Der Entwässerungsschicht kommt von allen Sicherungseinrichtungen beim derzeitigen Deponiekonzept die entscheidende Sicherungsfunktion zu, sofern nicht der Müllkörper so gering durchlässig angelegt wird, daß die Sickerwasserbildung schon an der Oberkante der Deponie wesentlich eingeschränkt wird. Die in-situ Untersuchungen an 4 gewöhnlichen Reaktordeponien (ENTENMANN 1998) haben gezeigt, daß auch bei sehr guter Verdichtung lediglich Durchlässigkeiten zwischen  $k = 3 \cdot 10^{-6}$  m/s und  $k = 1 \cdot 10^{-5}$  m/s erzielbar sind und nur beim Einbau von Schlämmen ein Wert von  $k = 8 \cdot 10^{-7}$  m/s.

Damit stellt der Müllkörper an sich keine Barriere dar: Die gesamte Sickerwasserneubildung ist mit der Basisdrainage zu sammeln. Im Gegenteil wirkt sich eine gute Verdichtung des Müllkörpers eher schädlich aus: Abbauprozesse

werden länger und die Zeitdauer der Durchströmung des Müllkörpers steigt an; das durchströmende Wasser kann mehr Schadstoffe eluieren. Erst wenn die Durchlässigkeit des Müllkörpers so gering ist, daß Sickerwasser erst gar nicht in entscheidendem Maße eindringen und durchströmen kann, d. h. wenn die Wasserhaushaltsglieder Abfluß und Evapotranspiration erheblich ansteigen, stellt der Müllkörper ein hydraulisch wirksames Dichtungselement neben seiner unbestreitbaren Sicherung als Adsorbens für Schadstoffe dar (7.1). Diese Wirksamkeit ist in Abhängigkeit von der Oberflächengestaltung, der Niederschlagsmenge und dem geforderten Wirkungsgrad erst ab einem Übergangsbereich von etwa  $1 \cdot 10^{-10}$  m/s  $\leq k \leq 5 \cdot 10^{-9}$  m/s gegeben und ist, wie vorab dargestellt, mit gewöhnlichen Reaktordeponien nicht erzielbar. Im Lysimeterversuch werden solche Werte lediglich durch die von BINNER et al. (1996) beschriebenen diagenetisch inertisierten Abfälle erreicht und bei der Versuchsdeponie Hehenberg nachgewiesen (frdl. mündl. Mitteilung RIEHL-HERWIRSCH). Wesentlich ist jedoch der Hinweis dort auf langfristig noch abnehmende Durchlässigkeiten.

STEGMANN & HUPE (1997) vermuten ähnlich geringe Durchlässigkeit bei Abfällen, die mechanisch-biologisch vorbehandelt sind und im Dünnschichteinbau auf Deponien verbracht werden, belegen dies jedoch nicht durch Versuche.

Grundsätzlich muß das neugebildete Sickerwasser in der Basisdrainage gefaßt und der Kläranlage zugeführt werden. An allen Fallbeispielen wurde Sickerwasser festgestellt, durch das die Drainage erheblich zur Verockerung neigt. Dabei ist es unerheblich, daß die Dränstränge mit der Fernsehkamera befahrbar sind und gespült werden können, denn die Verockerung setzt - wie an der Deponie Neu Wulmstorf gezeigt - im Flächenfilter an, dort wo die geringsten Fließgeschwindigkeiten auftreten. Auf lange Sicht gesehen ist auch die nach heutigem Stand der Technik gewählte erhebliche Überdimensionierung der Basisdrainage zum Schutz des Grundwassers ausgeschöpft, insbesondere deshalb, weil sie auch negative Auswirkungen hat: Es werden im Flächenfilter schwankende Wasserstände gemäß

der unterschiedlichen Zusickerungsrate erzeugt, die eine Verockerung befördern. Dagegen wirkt sich - wie im Abschnitt 5.6 beschrieben - unter Umständen eine erheblich unter dimensionierte Dränage positiv auf deren Langzeitwirksamkeit aus.

#### 7.4 Oberflächenabdichtung

Das Aufbringen einer Oberflächenabdichtung auf die Reaktordeponie bringt unmittelbar einen positiven Beitrag zur Emissionsbegrenzung. Die Schadstofffracht geht - sofort anhand der Wasserbilanz nachweisbar (ENTENMANN 1999) - stark zurück. Diese Aussage gilt jedoch nicht nur für echte Oberflächenabdichtungen, sondern für jegliche Oberflächenabdeckung, die den Wasserhaushalt der Deponie günstig beeinflusst. Abb. 16 zeigt die Auswirkungen einer einfachen Mutterbodenabdeckung der Deponie Tonnenmoor, die - nach einer Reaktionszeit von etwa 3 Jahren - zu einem erheblichen Rückgang der Schadstofffracht im unmittelbaren Grundwasserabstrombereich führte.

Wie die später wieder im selben Maße ansteigenden Gehalte zeigen, wirkt sich die Oberflächenabdeckung ausschließlich auf die Menge, nicht jedoch auf die Qualität des emittierten Sickerwassers aus. Es handelt sich daher lediglich um eine Sicherung auf Zeit, die Gesamtbilanz der emittierten Stoffe wird nicht beeinflusst.

#### 7.5 Diskussion der Gesamt-Langzeitsicherheit von Deponien

Die Langzeitsicherheit der Gesamtdeponie im Hinblick auf den Grundwasserschutz wird nachfolgend anhand der Reaktordeponie diskutiert. Die durch die Technische Barriere verstärkte Kombidichtung an der Basis der Deponie hat einen sehr hohen Standard erreicht. Solange die darüberliegende Dränschicht intakt ist, kann von einer hydraulischen Funktionsfähigkeit der Dichtung ausgegangen werden. Im Falle eines kompletten Versagens der Dränage ist die Funktionsfähigkeit der Basisdichtung ohnehin unerheblich, da sich das Sickerwasser dann einen anderen Weg sucht, über die Ober-

kante der Deponieverwallung hinweg entweder ins Oberflächenwasser oder ins Grundwasser. Doch selbst bei voll funktionsfähiger Basisdränage besteht ein Sicherheitsrisiko in Form der Sickerwasserkläranlage. Selbst bei Entwässerung der Deponie im Freispiegelgefälle - wie eigentlich von der TA Siedlungsabfall gefordert - bleibt das Problem der Verschmutzung von Oberflächenwasser im Falle des Versagens der Sickerwasserkläranlage, da redundante Systeme, wie z. B. eine zusätzliche Druckrohrleitung zu einer anderen Kläranlage, meist fehlen. Emissionsbegrenzend ist nach Versagen der Basisdränage zum Schutz des Grundwassers dann allein die Oberflächenabdichtung, die allerdings ebenso nur zeitlich begrenzt funktionsfähig ist und die Emission nur zeitlich verlagert. Im Fall eines partiellen Versagens der Basisdränage - wie beim Fallbeispiel Neu Wulmstorf - wirkt zuerst die Kunststoffdichtungsbahn, nach deren Versagen die 3,75 m mächtige mineralische Dichtungsschicht. Die dadurch bewirkte hydraulische Verhinderung des Schadstofftransports ist sehr wirkungsvoll. Demgegenüber ist die Wahrscheinlichkeit des anschließenden vollständigen Versagens der Dränage jedoch sehr groß.

Ein erheblicher Sicherheitsgewinn würde jedoch - zumindest kurzfristig gesehen - aus der vollständigen Integration der Pumpwerke, der Sickerwassertransportleitungen und der Sickerwasserkläranlage in das Basisabdichtungssystem resultieren.

Langfristig gesehen ist eine möglichst dichte Oberflächenabdichtung eher schädlich für das Gesamtemissionsverhalten der Deponie, geht man von einem „Liegenlassen“ nach Beendigung der Nachsorge aus. Dann nämlich erfährt das Basisabdichtungssystem seine eigentliche Beanspruchung lange nach dem Bau der Deponie, erst nach Versagen der Oberflächenabdichtung. Es kann davon ausgegangen werden, daß dann die Dränage auch nicht mehr funktioniert, insbesondere weil sie nicht reparierbar ist und die Pumpwerke bis dahin wohl abgeschaltet sind. Die Untersuchungen an der Deponie Hahn-Lehmden haben sogar gezeigt, daß unter Umständen lediglich eine Rekultivierung durch Boden und Pflanzensukzession im Hinblick auf die Gesamtemission positiv zu bewerten ist.

Hinsichtlich der Langzeitsicherheit sind daher die beiden wirkungsvollsten Maßnahmen, den Inhalt des Müllkörpers so schadstoffarm wie möglich anzulegen und Sickerwasser erst gar

nicht entstehen zu lassen, d. h. den Müllkörper möglichst dauerhaft dicht anzulegen und dafür zu sorgen, daß das Niederschlagswasser zu Abfluß wird oder verdunstet.

## LITERATUR

- G. ANDREOTTOLA, (1992): Chemical and biological characteristics of landfill leachate. - T CHRISTENSEN, R. COSSU, R. STEGMANN, Landfilling of waste: Leachate: 65 - 88; London.
- ANONYMUS (1998): Die Pflichten der Länder zur Umsetzung der TA Siedlungsabfall.- Umwelt 7- 8: 382-384; Bonn.
- P. BACCINI & T. LICHTENBERGER, (1989): The landfill reactor and final storage, conclusions and outlook. - Lecture notes in Earth Sciences 20: 427 - 431.
- H. BELEVI & P. BACCINI, (1992): Long-term leachate emissions from municipal solid waste landfills. - T. CHRISTENSEN, R. COSSU, & R. STEGMANN, Landfilling of waste: Leachate: 431 - 440; London.
- B. BILITEWSKI, (1998): Neufassung TAsi - Inertisierung durch andere Verfahren als durch Verbrennung. - Korrespondenz Abwasser 45 (2): 282 - 288.
- E. BINNER, M. HACKENBERG, P. LECHNER, (1996): Verwendbarkeit von Rückständen aus der Kieswäsche im Deponiebau - Diagenetische Inertisierung. In: Alternative Dichtungsmaterialien im Deponiebau und in der Altlastensanierung. - Schr. Angew. Geol. 41: 10 - 2 bis 10 - 26; Karlsruhe.
- W. BOCK, (1998): Grundwasserbelastung und Ionenaustausch im Unterstrom einer Abfalldeponie. - Z. Angew. Geol. 43 (3): 159 - 165.
- F. BRÖKER, K. KETELSEN, H. RINGE & E. TEGTMEYER, (1998): Mechanisch-biologische Restabfallvorbehandlungsanlagen in Niedersachsen. - Korrespondenz Abwasser 45 (2): 264 - 271.
- T. CHRISTENSEN, P. BERG, J. LYNGKILDE, H. ALBRECHTSEN, G. HERON & K. RÜGGE, (1993): Verringerung von organischen Schadstoffen in Redoxzonen von Deponiesickerwasserfahnen. - ARENDT, G., ANNOKKÈE, G., BOSMAN, R. & VAN DEN BRINK, W. [Hrsg.]: Altlastensanierung '93: 147 - 158; Dordrecht (Kluwer).
- K. CZURDA, (1994): Multimineralische Abdichtung. - Schr. Angew. Geol. 30: 1 - 22; Karlsruhe.
- G. DÖRHÖFER, (1997): The search for landfill sites - requirements and implementation in Lower Saxony, Germany. - Environmental Geology 35(1): 55-61; Heidelberg.
- H. DÜLLMANN, W. ECHLE & M. CEVRIM, (1989): Geotechnische und mineralogische Veränderungen in einer Tondichtung nach mehrjährigem Sickerwasserkontakt. - Ber. 7. Nat. Tag. Ing.-Geol.: 107-114; Bensheim.
- W. ECHLE, M. CEVRIM & H. DÜLLMANN, (1988): Tonmineralogische, chemische und bodenphysikalische Veränderungen in einer Ton-Versuchsfläche an der Deponie Geldern-Pont. - Schr. Angew. Geol. 4: 99 - 119; Karlsruhe.
- H. EHRIG, (1989): Sickerwasser aus Hausmülldeponien, Menge und Zusammensetzung. - W. KUMPF, K. MAAS & H. STRAUB, Müll-Handbuch: 4587, 39 S., Lfg. 1/89.
- W. ENTENMANN, (1993): Emissions from older household waste landfills without artificial underlying sealing. Comparison of four landfill sites in Northern German Lowland. - F. ARENDT, R. ANNOKKÈE & W. J. VAN DEN BRINK, [eds]: Contaminated Soil '93: 277 - 286; Dordrecht (Kluwer).

- W. ENTENMANN (1995): In-situ determination of retention processes in artificial and natural mineral layers under landfills and contaminated sites. - F.; ARENDT, R. ANNOKKÉE & W. J. VAN DEN BRINK, [eds]: Contaminated Soil '95: 375 - 376; Dordrecht (Kluwer).
- W. ENTENMANN. (1996): Schädigung einer Deponiebasisdichtung und Stofftransport infolge von Sickerwassereinstau. - Von den Ressourcen zum Recycling - Geowissenschaften und Geotechnik im Spannungsfeld von Ökologie und Ökonomie: 61 - 82; Berlin (Ernst).
- W. ENTENMANN. (1998): Hydrogeologische Untersuchungsmethoden von Altlasten. - 373 S.; Heidelberg (Springer).
- W. ENTENMANN. (1999): Wasser- und Stoffbilanzen bei der Gefährdungsabschätzung von Altlasten und Deponien. - Geowissenschaften & Umwelt 4, ca. 15 S.; Berlin [im Druck].
- W. ENTENMANN. & F. IHLE, (1995): Aspekte bei der Anwendung der LAWA-Empfehlungen zur Gefährdungsabschätzung und Sanierung von Altlasten und Deponien. - 34. Fortbildungslehrgang BWK: Umgang mit wassergefährdenden Stoffen, Grundwasserschadensfälle, Sonderheft BWK-Schriften, 28 S.; Hannover.
- W. ENTENMANN & J. RAPPERT, (1998): Estimation of seepage discharge from polluted sites and landfills. - Proc. 8th. Int. IAEG Congress: 2299 - 2305; Rotterdam (Balkema).
- W. ENTENMANN & K. H. SCHWINN, (1997): Emission of pollutants from different contaminated sites into groundwater - a comparative study from Northern German quarternary sediments. - Proc. Int. Conf. IAEG Athen: 1817 - 1822; Rotterdam (Balkema).
- A. GOLWER, (1995): Langzeitwirkung örtlicher, anthropogener Stoffanreicherungen auf das Grundwasser. - Z. dt. geol. Ges. 146: 191 - 200; Hannover.
- K. HEYER, A. PACKERT & R. STEGMANN, (1996): Untersuchungen zum langfristigen Emissionsverhalten von Abfällen im Deponiekörper. - Müll und Abfall 4/1996: 230 - 241.
- M. ISENBECK, J. SCHRÖTER, W. KRETSCHMER, G. MATTHESS, A. PEKDEGER & H. SCHULZ, (1985): Die Problematik des Retardationskonzeptes - dargestellt am Beispiel ausgewählter Schwermetalle. - Meyniana 37: 47 - 64; Kiel.
- L. JOHNSON, (1993): Chemische Eigenschaften der Müllschlacke. - In: BACCINI & GAMPER: Deponierung fester Rückstände aus der Abfallwirtschaft: 35 - 51; Zürich.
- K. KRUSE, (1994): Langfristiges Emissionsgeschehen von Siedlungsabfalldeponien. - Veröff. Inst. Siedlungswasserwirtschaft 54, 228 S.; Braunschweig.
- K. KRUSE, (1995): Sickerwasseremissionen bei alten Deponien - wie lange problematisch? - UTECH 43. Seminar: 31 - 51; Berlin.
- A. LENDA, & A. ZUBER, (1970): Tracer dispersion in groundwater experiments. - Isotope Hydrology IAEA-SM-129/37: 619 - 641; Wien.
- T. MARZI, S. PALITZSCH, R. BECKMANN, R. KÜMMEL, A. BEARD & K. KELDENICH, (1998): Wirkungsmechanismen bei der Alterung von Müllverbrennungaschen. - Müll und Abfall 1990 (5): 316 - 322.
- A. MICHENFELDER, (1993): Labor- und Geländeuntersuchungen zum Transportverhalten und Rückhaltevermögen landwirtschaftlich genutzter Böden gegenüber Schwermetallen und Pflanzenschutzmitteln. - Schr. Angew. Geol. 27, 203 S.; Karlsruhe.
- MU (1991): Der Niedersächsische Umweltminister (MU): Anforderungen an Deponiestandorte für Siedlungsabfälle. Standorterlaß vom 27.11.1991 - 504-62812 / 21 B; Hannover.

- A. OGATA & R. BANKS, (1961): A solution of the differential equation of longitudinal dispersion in porous media. - USGS Prof. Paper 411-A, 7 S.; Washington.
- K. ONNICH, U. MANN, H. JESSBERGER, & K. FINSTERWALDER, (1991): Versuche und Berechnungen zum Schadstofftransport durch mineralische Abdichtungen und daraus resultierende Materialentwicklungen. - BAM Verbundvorhaben Deponieabdichtungssysteme 1. Arbeitstagung 23.09. - 25.09.1991: 125 - 139; Berlin.
- G. SCHNEIDER, (1992): Untersuchungen an einer 10 Jahre alten feinkornmineralischen Dichtungsschicht einer Hausmülldeponie. - Veröffentlichungen Grundbauinstitut LGA Bayern: 117-155; Nürnberg.
- D. SCHWEICH & M. SARDIN, (1981): Adsorption, partition, ion exchange and chemical reaction in batch reactors or in columns - a review. - Journal of Hydrology 50: 1 - 33; Amsterdam.
- P. SPILLMANN, (1990): Mobilisierung von Schadstoffen durch Abbauvorgänge. - F. ARENDT, M. HINSEVELD, W. VAN DEN BRINK, [Hrsg.]: Altlastensanierung '90: 463 - 478; Dordrecht (Kluwer).
- R. STEGMANN & H.-J. EHRIG, (1980): Entstehung von Gas und Sickerwasser in geordneten Deponien. - Müll und Abfall 12: 41 - 51.
- R. STEGMANN, & K. HUPE, (1997): Anpassung der Deponietechnik an die MBV-Reststoffe. STEGMANN / RETTENBERGER [Hrsg.]: Entwicklungstendenzen in der Deponietechnik. - Hamburger Berichte 12: 345 - 359, Hamburg.
- K. STIEF, (1986): Das Multibarrierenkonzept als Grundlage von Bau, Betrieb und Nutzung von Deponien, Müll und Abfall 18 (1):15-20; Berlin.
- H. TAUBALD, (1995): Neue geochemische, und isotope-geochemische Untersuchungen zur Karbonatlösung in mineralischen Deponieabdichtungen. - Müll und Abfall 5/1995: 299 - 308.
- J. WAGNER, (1990): Retention von Blei und Zink aus einer Gichtstaubdeponie durch einen tonigen Untergrund. - F. ARENDT, M. HINSEVELD, W. VAN DEN BRINK, [Hrsg.]: Altlastensanierung '90: 457 - 461; Dordrecht (Kluwer).
- J. WAGNER, (1992): Verlagerung und Festlegung von Schwermetallen in tonigen Deponieabdichtungen. - Schr. Angew. Geol. 22, 245 S.; Karlsruhe.
- C. ZEVENBERGEN, L. VAN REEUWIJK, J. BRADLEY, J. KEIJZER, & KROES, R. (1995): Leaching of heavy metals from MSUD-Incineration bottom ash in a disposal environment. - Proc. Sardinia '95: 369 - 377; Cagliari.

Barbara-Gespräche Payerbach 1998	Band 5	"Abfallentsorgung aus erdwissenschaftlicher Sicht" "Klima - Entwicklung"	Seite 57 - 78 Abb 1 - 5	Payerbach 2001
-------------------------------------	--------	---	----------------------------	-------------------

# BARBARA-GESPRÄCHE

## Payerbach 1998

### In-situ-Untersuchungen zur Wirksamkeit von Oberflächenabdichtungen

(Mineralische Dichtung, Kunststoffdichtungsbahn, Bentonitmatte,  
Kapillarsperre)

S. MELCHIOR



Payerbach,  
18. September 1998

**INHALT**

Zusammenfassung	59
1 Einleitung	59
2 Untersuchungskonzept	60
3 Wasserbilanzen	61
4 Wirksamkeit der Dichtungen	62
4.1 Bindige mineralische Dichtung	62
4.2 Bentonitmatte	65
4.3 Kapillarsperre	66
4.4 Kombinationsdichtung	68
5 Schlussfolgerungen	69
Dank	70
Literatur	70
Diskussion	71

*Anschrift des Verfassers:*

*Dr. Stefan MELCHIOR*

*IGB Ingenieurbüro für Grundbau, Bodenmechanik und Umwelttechnik*

*Heinrich Hertz Straße 116*

*D-22083 Hamburg*

# In-situ-Untersuchungen zur Wirksamkeit von Oberflächenabdichtungen

(Mineralische Dichtung, Kunststoffdichtungsbahn, Bentonitmatte,  
Kapillarsperre)

S. MELCHIOR

## Zusammenfassung

Seit 1986 werden unterschiedliche Abdecksysteme in situ auf der gesicherten Altlast Hamburg-Georgswerder untersucht. Die Wasserbilanzen von acht Jahren sind verfügbar. Die Wirksamkeit der unterschiedlichen Dichtungen wurde in Testfeldern durch direkten Auffang der Dichtungsdurchsickerung auf Flächen von 100 m<sup>2</sup> bis 500 m<sup>2</sup> gemessen. Kombinationsdichtungen mit Kunststoffdichtungsbahnen über mineralischen Dichtungen haben sich am besten bewährt. Eine erweiterte Kapillarsperre funktioniert ebenfalls zufriedenstellend. Die Wirksamkeit der untersuchten bindigen mineralischen Dichtungen (ohne bedeckende Kunststoffdichtungsbahnen) hat demgegenüber innerhalb von fünf Jahren infolge Austrocknung, Schrumpfung und Durchwurzelung sehr stark abgenommen. Die jährliche Durchsickerung schwankt seither zwischen 150 mm/a und 200 mm/a. Rund 50 % des Wassers, das die Entwässerungsschicht oberhalb der mineralischen Dichtungen erreicht, sickern durch die Dichtungen. Die max. Durchlässigkeit hat von  $2 \cdot 10^{10} \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$  auf rund  $4 \cdot 10^8 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$  zugenommen. Seit 1994 werden auch zwei Bentonitmattentypen unter Feldbedingungen getestet. Die Ergebnisse sind enttäuschend. Die Bentonitmatten sind im ersten Sommer nach ihrer Quellung stark ausgetrocknet und rissig geworden. An den Bentoniten wurde ein Austausch der Natriumionen gegen Calciumionen festgestellt. Die Wiederbefeuchtung der Matten hat nicht zu einer Schließung der Risse geführt. Seither sickern jährlich selbst in niederschlagsarmen Jahren 130 mm/a bis 160 mm/a durch die Matten.

## 1 Einleitung

Oberflächenabdichtungen für Deponien und Altlasten haben vielfältige Aufgaben. Üblicherweise sollen sie die direkte Aufnahme von Schadstoffen durch Menschen, Tiere oder Pflanzen verhindern und sowohl die unkontrollierte Gasmigration als auch die Infiltration von Niederschlagswasser minimieren. Der Aufbau von Abdecksystemen hängt von verschiedenen Faktoren ab. Beim Entwurf zu berücksichtigen sind die Witterungsbedingungen am Standort, die geomechanischen Verhältnisse, die von der belasteten Fläche ausgehende Umweltgefährdung, die am Standort geplante Nachnutzung und auch die Kosten der Maßnahme. Entsprechend vielseitig sind die jeweiligen technischen Lösungen. Standorte, die gewerblich oder industriell genutzt

werden sollen, können beispielsweise an der Oberfläche durch Asphaltbeton versiegelt werden. Meist wird jedoch auf Altlasten und Altdeponien eine Begrünung gefordert.

Eine begrünbare Abdeckung hat üblicherweise einen mehrschichtigen Aufbau. Ein erosionsbeständiger Oberboden, die sogenannte Re-kultivierungsschicht, soll die Vegetation mit Nährstoffen und Wasser versorgen. Darunter folgen mehrere Schichten, die entweder Wasser oder Gas seitlich abführen sollen (Entwässerungsschicht, Gasdrainage), oder eine vertikale Barriere gegen den Transport von Wasser und Gas bilden (Dichtungen).

Der Funktionszeitraum einer Oberflächenabdichtung ist im Vergleich zu anderen Ingenieurbauwerken lang. Die Anforderungen

variieren von einigen Dekaden bis zu Hunderten von Jahren. Obwohl es umfangreiche praktische Erfahrungen mit dem Entwurf und mit der Herstellung von Oberflächenabdichtungen gibt, ist wenig über ihre Langzeitbeständigkeit bekannt. Abdecksysteme sind, anders als Basisabdichtungen von Deponien, einer Vielfalt von Umwelteinflüssen ausgesetzt (z. B. Erosion, Frost, Erwärmung, Austrocknung, Durchwurzelung und Durchwühlung, Einwirkung und Fällung von Kolloiden, Hydroxyden, Karbonaten). Hinzu kommen Einwirkungen, die aus dem Abfallkörper resultieren (Deponiegas und Gaskondensat, belastete Staufflüssigkeit, Setzungsdifferenzen). Das Langzeitverhalten eines Abdecksystems kann daher nicht allein auf der Grundlage von theoretischen Überlegungen oder von Laboraten vorhergesagt werden. Aus diesem Grunde wurde auf der Altlast Hamburg Georgswerder eine Versuchsanlage konzipiert, hergestellt und über zehn Jahre lang betrieben, um unterschiedliche mehrschichtige Abdecksysteme in situ untersuchen zu können. Unter jeweils einer Rekultivierungsschicht und einer Entwässerungsschicht wurden die folgenden Dichtungen getestet:

Bindige mineralische Dichtung,

Betonitmatte,

Verbunddichtung aus bindiger mineralischer Dichtung über Kapillarsperre („erweiterte Kapillarsperre“) und

Kombinationsdichtung aus Kunststoffdichtungsbahn über bindiger mineralischer Dichtung.

## 2 Untersuchungskonzept

Die Deponie Hamburg-Georgswerder wurde 1979 geschlossen und von 1986 bis 1995 mit einem mehrschichtigen Abdecksystem gesichert (Aufbau der Abdeckung von oben nach unten: Rekultivierungsschicht / Entwässerungsschicht / Kombinationsdichtung / Ausgleichsschicht und Gasdränage). Die wichtigsten Daten der nunmehr gesicherten Altlast (nach Umweltbehörde Hamburg 1995): Grundfläche 44 ha, Höhe 40 m, mittlere Setzungen

1992 10 cm/a, Deponieinhalt 7 Mio. m<sup>3</sup> Haus- und Sperrmüll sowie rund 3 % hochtoxische, flüssige Industrieabfälle. Die Gasfassung nahm von 600 m<sup>3</sup>/h (1986) auf 300 m<sup>3</sup>/h (1995) ab. Die Temperatur innerhalb des Deponiekörpers beträgt rund 35° C. Die Gras- und Krautvegetation der Abdeckung wird zweimal jährlich geschnitten. 1995 wurden Sträucher, Büsche und Bäume in ausgewählten Abschnitten der Abdeckung gepflanzt. Das Klima Hamburgs ist humid und gemäßigt. Der Niederschlags-eintrag betrug zwischen 1988 und 1995 durchschnittlich 865 mm/a. Die Niederschläge waren gleichmäßig über das Jahr verteilt. Die Niederschlagsintensität ist üblicherweise gering (maximal 3 mm in 10 Minuten, selten über 10 mm/h). Das langjährige Mittel der Lufttemperatur beträgt 8,7° C mit durchschnittlichen Werten von 0,1° C im Januar und 17,5° C im Juli. Im Mittel liegt das Tagesmaximum der Temperatur an 23 Tagen des Jahres oberhalb von 25° C, und 25 Tage pro Jahr haben eine maximale Lufttemperatur unter 0° C. Die durchschnittliche potentielle Evapotranspiration nach HAUDE beträgt 540 mm/a.

1987 wurden sechs Testfelder mit einer Größe von 10 m x 50 m in den Nordhang der Deponieabdeckung integriert, um den Wasserhaushalt und die Wirksamkeit unterschiedlicher Abdecksysteme zu untersuchen. Der Schichtaufbau dieser Testfelder ist in Abb. 1 dargestellt. Die Felder mit der Bezeichnung F haben eine Hangneigung von 4 %, die „steilen“ Felder S sind 20 % geneigt. Alle Felder wurden nach dem Stand der Technik hergestellt. Es wurden die gleichen Materialien und Qualitätssicherungsprogramme eingesetzt wie bei der Herstellung der Abdeckung der Gesamtdeponie. Die Dichtungen wurden großflächig eingebaut. An den Testfeldgrenzen gibt es keine die Dichtung durchdringenden Fremdstoffe. Auf diese Weise wurde die Bildung von künstlich geschaffenen Fließwegen für Wasser verhindert (näheres zur Herstellung der Testfelder in Melchior 1993). Das Meßprogramm der Testfelder umfaßt meteorologische und bodenhydrologische Parameter und die direkte Messung folgender Abflüsse: Oberflächenabfluß, seitlicher Abfluß im Oberboden, seitlicher Abfluß in der Entwässerungsschicht auf der Dichtung, Durchsickerung der

Dichtsicht. Letztere wird in kiesgefüllten Auffangwannen unter den Dichtungen gefaßt. Die Rekultivierungsschicht und die Entwässerungsschicht sind auf diesen sechs Testfeldern gleichartig aufgebaut. Die Rekultivierungsschicht (0,75 m) besteht aus sandigem Lehm (25 % < 0,063 mm, 1,1 % organischer Kohlenstoff). Die Entwässerungsschicht (0,25 m) besteht aus einer Sand-/Kiesmischung (9 % < 0,63 mm, 47 % zwischen 0,63 mm und 2 mm, 38 % zwischen 2 mm und 6,3 mm, 6 % > 6,3 mm) mit 8,8 % CaCO<sub>3</sub>. Die Speicherkapazität für pflanzenverfügbares Wasser beträgt in der Rekultivierungsschicht und der Entwässerungsschicht zusammen 105 mm. Die einzelnen Felder unterscheiden sich in der Art der Dichtung, die jeweils untersucht wird (bindige

mineralische Dichtung, Kombinationsdichtung und erweiterter Kapillarsperre).

1994 wurden zwei weitere Testfelder mit den Bezeichnungen B 1 und B 2 installiert. Sie haben eine Größe von jeweils 100 m<sup>2</sup> und ein Gefälle von rund 8 %. Auf ihnen wird die Wirksamkeit der beiden Bentonitmatten Bentofix D 3000 und NaBento unter einer geringmächtigen Abdeckung von 0,3 m Rekultivierungsschicht und 0,15 m Entwässerungsschicht untersucht. Die Bentonitmatten Gundseal, Bentomat und Claymax SP 500 wurden zusätzlich in drei kleinen Beobachtungsfeldern unter einer gleichartigen Abdeckung, jedoch ohne Auffangmöglichkeit für die Durchsickerung der Matten installiert.

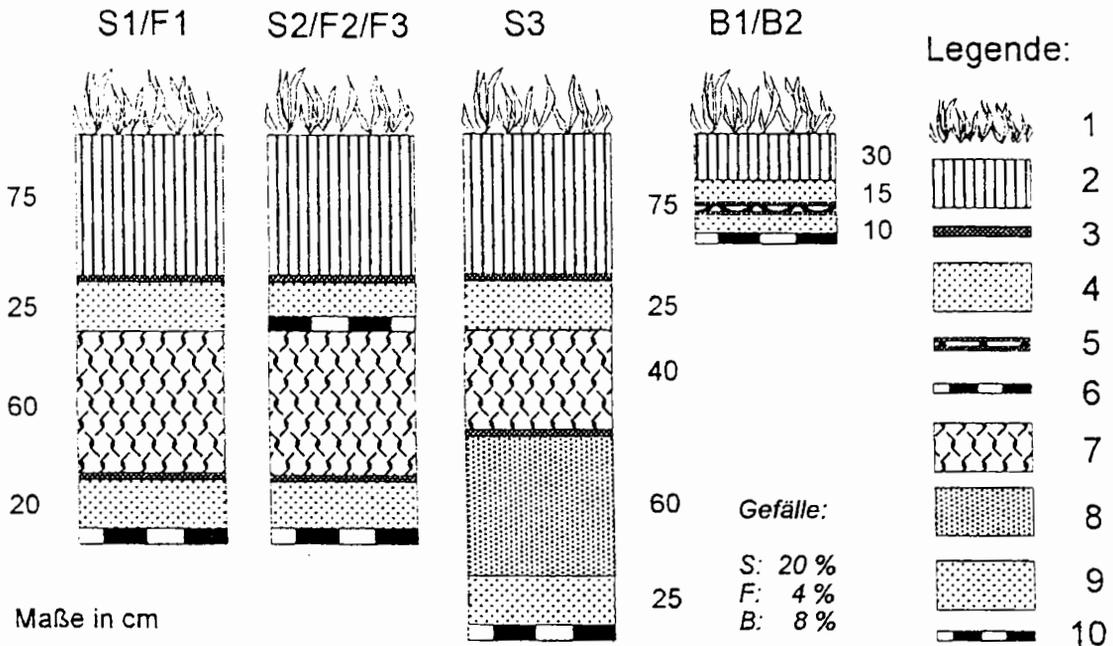


Abb. 1: Schichtaufbau der Testfelder

(Legende: 1: Vegetation, 2: Rekultivierungsschicht, 3: Geotextil, 4: Entwässerungsschicht, 5: Bentonitmatten, 6: Kunststoffdichtungsbahn (PEHD, 1,5 mm), 7: Bindige mineralische Dichtung, 8: Kapillarschicht, 9: Kapillarblock (nur auf S3), 10: Kunststoffdichtungsbahn des Auffangdräns)

### 3 Wasserbilanzen

Die Wasserhaushaltsdaten der Testfelder sind in Tabelle 1 aufgelistet. Die Verdunstung (Evapotranspiration) und der seitliche Abfluß in der Entwässerungsschicht oberhalb der Dichtungen sind die dominierenden Parameter der Wasserbilanz. Nennenswerter Oberflächenabfluß fand lediglich im ersten Jahr

nach der Herstellung der Testfelder bei einer noch schütterten Vegetationsbedeckung statt. In den Folgejahren war der Oberflächenabfluß äußerst gering und von der Hangneigung unabhängig. Allerdings traten in den acht Jahren des Meßzeitraumes ungewöhnlich wenige Ereignisse mit intensiven Starkregen oder Schneeschmelzen auf.

Seitlicher Abfluß in der Rekultivierungsschicht wurde lediglich bei steiler Hangneigung beobachtet und beschränkte sich auch dort auf nur wenige Millimeter pro Jahr (maximale Flußraten von rund 0,4 mm/d oder 0,1 mm/h). Der Entwässerungsschichtabfluß und die Verdunstung variieren von Jahr zu Jahr und zwischen den einzelnen Testfeldern. Im allgemeinen ist die Höhe des jährlichen Drainageabflusses von der Hangneigung unabhängig (Maxima 40 mm pro Woche und 39 mm pro Woche auf den Feldern S bzw. F). Die kurzfristigen Flußraten sind jedoch auf den steilen Feldern deutlich höher als auf den flachen Feldern (Maxima rund 23 mm/d oder 3,7 mm/h bei den Feldern S und 15 mm/d und 0,9 mm/h bei F). Die jährliche Verdunstung ist auf den flachen Feldern höher als auf den steilen Feldern, da die Einstrahlung im Winter, Frühjahr und Herbst dort höher ist. Entsprechend sind die jährlichen Abflußraten in der Entwässerungsschicht auf den flachen Feldern etwas geringer als bei den steilen Feldern.

## 4 Wirksamkeit der Dichtungen

### 4.1 Bindige mineralische Dichtung

Bindige mineralische Dichtungen wurden auf drei Testfeldern untersucht. Auf den Feldern F1 und S1 wurden drei Lagen, auf S3 zwei Lagen à 0,2 m Geschiebemergel eingebaut und verdichtet, so daß sich eine Gesamtmächtigkeit von 0,6 m (S1, F1) bzw. 0,4 m (S3) ergibt. Die mineralische Dichtung hat die folgenden Eigenschaften (Mittelwerte): 17 % Ton, 26 % Schluff, 52 % Sand und 5 % Kies; kein organischer Kohlenstoff; 9,8 % CO<sub>3</sub>; 50 % der Tonminerale sind Illit, 30 % Smektit, 20 % Chlorit und Kaolinit; Fließgrenze 20,4 %; Plastizitätszahl 9,8; Konsistenzzahl 0,8; Trockendichte 1,950 g/cm<sup>3</sup>, Wassergehalt 12,1 % der Trockenmasse oder 23,6 Vol.-%; Proctordichte 2,039 g/cm<sup>3</sup>; optimaler Wassergehalt 9,6 %; Verdichtung > 95 % Proctordichte auf der nassen Seite des optimalen Wassergehaltes; Porenvolumen 27,0 %; Sättigungszahl 0,87; geometrisches Mittel des Labordurchlässigkeitswertes  $2,4 \cdot 10^{-10}$  m/s. Aufgrund seines gestuften Kornaufbaues, seines geringen Ton-

gehaltes und der Dominanz relativ inaktiver Tonminerale ist der Geschiebemergel im Vergleich zu anderen „Tondichtungen“ wenig schrumpfanfällig.

Abb. 2 zeigt die Abflüsse in der Entwässerungsschicht oberhalb der Geschiebemergeldichtung und die Dichtungsdurchsickerung (der Maßstab der beiden Y-Achsen unterscheidet sich um den Faktor 10). Der Drainageabfluß oberhalb der Dichtung ist im Frühjahr und Winter hoch, im Sommer gering bis ausbleibend. In den ersten 20 Monaten nach der Herstellung der Dichtung war die Dichtungsdurchsickerung sehr gering. Im August 1989 nahm sie jedoch sprunghaft zu, nachdem ein ergiebiges Niederschlagsereignis zu einem schwachen Abfluß in der Entwässerungsschicht oberhalb der Dichtung geführt hatte. Von diesem Zeitpunkt an hatten die beiden Abflüsse oberhalb und unterhalb der Dichtung einen sehr ähnlichen Verlauf.

---

Erläuterungen zu Tabelle 1 (rechts):

S1, S2, S3, F1, F2, F3: Testfeldbezeichnung (Schichtaufbau siehe Abb. 1);

Oberflächenabfluß nur auf S1 und F1 gemessen (Daten auf S2, S3 bzw. F2, F3 extrapoliert);

II: Lateraler Abfluß in der Rekultivierungsschicht (auf allen Feldern gemessen kein Abfluß auf F1, F2, F3);

III: Lateraler Abfluß in der Entwässerungsschicht oberhalb der Dichtung;

IV: Unterhalb der Dichtungen aufgefangenes Wasser (= V + VI auf S3);

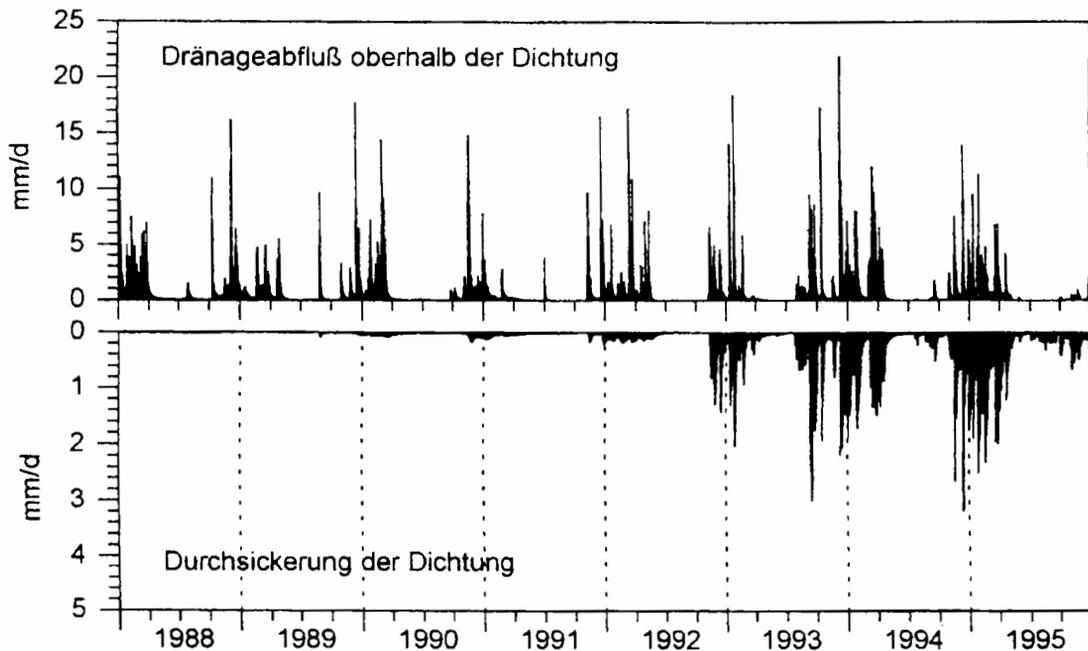
V: Lateraler Abfluß innerhalb der Kapillarschicht (nur auf S3);

VI: Vertikale Versickerung in den Kapillarblock (nur auf S3);

ET+dW: Aktuelle Verdunstung und Änderung des Bodenwasservorrats.

mm/a		1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995	Mittel
Niederschlag		854.8	713.9	917.3	744.1	853.7	1032.3	1019.9	780.2	864.5
Oberflächenabfluß S1		19.6	1.8	0.9	0.6	0.6	1.0	0.8	0.2	3.2
Oberflächenabfluß F1		5.5	1.2	1.9	1.0	1.7	3.3	1.9	1.0	2.2
<b>Bindige mineralische Dichtung</b>										
S1	II	5.8	2.5	4.1	2.3	4.2	5.3	5.2	3.5	4.1
	III	385.8	246.5	317.9	176.9	289.4	343.1	343.8	229.4	291.6
	IV	1.9	3.1	13.3	13.5	48.1	136.2	150.4	149.8	64.5
	ET+dW	441.7	460.0	581.1	550.8	511.4	546.7	519.7	397.3	501.1
F1	III	368.0	182.7	286.4	187.2	226.2	253.4	246.6	155.5	238.3
	IV	7.0	7.8	17.5	8.8	102.7	174.0	165.8	163.5	80.9
	ET+dW	474.3	522.2	611.5	547.1	523.1	601.6	605.6	460.2	543.1
S3	II	12.1	6.2	8.3	5.2	7.6	8.0	7.4	5.9	7.6
	III	395.9	233.8	318.8	200.1	278.6	263.2	248.4	150.6	261.2
	V+VI	8.4	13.9	31.0	32.5	116.8	171.0	184.0	201.4	94.9
	ET+dW	418.8	458.2	558.3	505.7	450.1	589.1	579.3	422.1	497.6
<b>Erweiterte Kapillarsperre</b>										
S3	V	8.4	13.9	31.0	32.5	101.7	169.9	172.0	152.7	85.3
	VI	0.0	0.0	0.0	0.0	15.1	1.1	12.0	48.7	9.6
<b>Kombinationsdichtung (Kunststoffdichtungsbahn über mineralischer Dichtung)</b>										
S2	II	13.2	5.9	8.5	5.3	8.3	10.8	9.7	6.8	8.6
	III	354.8	236.6	320.9	191.6	329.8	389.9	388.7	296.6	313.6
	IV	0.6	0.3	0.5	0.7	1.0	1.7	3.0	2.8	1.3
	ET+dW	466.6	469.3	586.5	545.9	514.0	628.9	617.7	473.8	537.8
F2	III	293.2	156.4	262.9	170.9	313.2	412.2	409.0	309.7	290.9
	IV	3.5	0.6	0.4	0.5	0.8	1.3	1.8	1.7	1.3
	ET+dW	552.6	555.7	652.1	571.7	538.0	615.5	607.2	467.8	570.1
F3	III	367.3	155.3	262.1	168.2	325.9	481.1	431.4	328.0	314.9
	IV	4.1	1.4	2.6	2.0	3.5	5.0	5.2	5.2	3.6
	ET+dW	477.9	556.0	650.7	572.9	522.6	542.9	581.4	446.0	543.8

**Tabelle 1: Wasserhaushalt der Testfelder auf der Altlast Hamburg-Georgswerder in mm/a (bilanziert auf Kalenderjahre)**



**Abb. 2: Bindige mineralische Dichtung auf Testfeld S1: Seitlicher Abfluß in der Entwässerungsschicht und Durchsickerung der Dichtung**

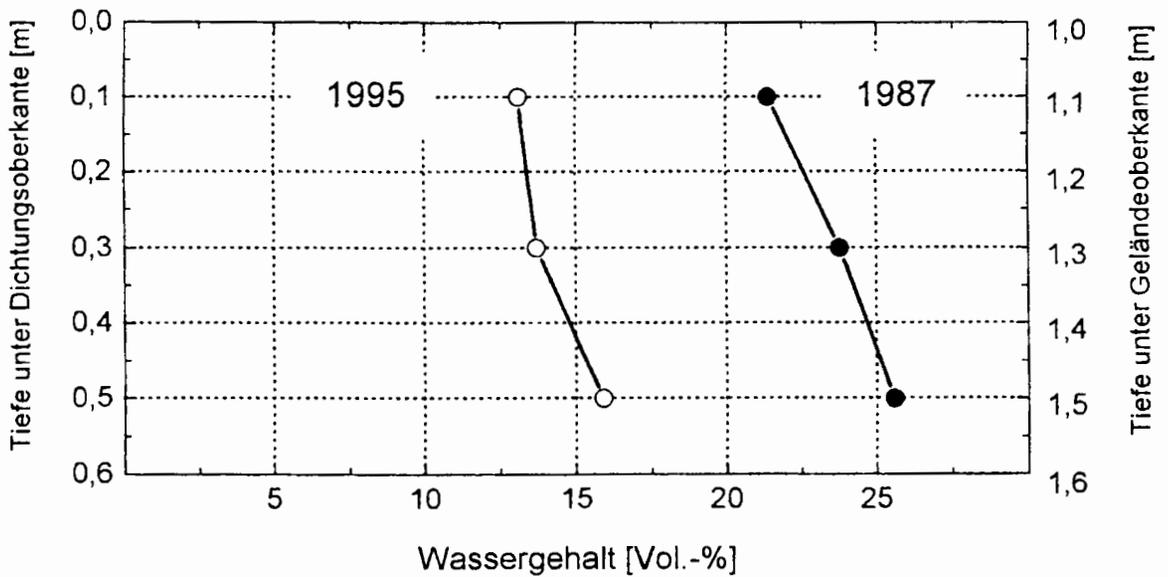
Das Abflußverhalten und die Ergebnisse eines Tracerversuches bewiesen die Existenz kontinuierlicher, bevorzugter Wasserleitbahnen in der Dichtung, die eine schnelle Versickerung erlauben. Im Herbst 1992 nahm die Dichtungsdurchsickerung nochmals heftig zu.

Die Maximalwerte der Dichtungsdurchsickerung haben auf Testfeld S1 wie folgt zugenommen:

1988/89:	$1 \cdot 10^{-10} \text{ m}^3 / (\text{m}^2 \cdot \text{s})$
1990/91:	$2 \cdot 10^{-9} \text{ m}^3 / (\text{m}^2 \cdot \text{s})$
1993/94:	$4 \cdot 10^{-8} \text{ m}^3 / (\text{m}^2 \cdot \text{s})$

Auf Feld F1 haben die maximalen Flußraten eine ähnliche Entwicklung durchlaufen und erreichten 1993  $1 \cdot 10^{-7} \text{ m}^3 / (\text{m}^2 \cdot \text{s})$ . Die gemessenen bodenhydrologischen Daten (Wassergehalt und Matrixpotential) zeigen deutlich, daß aufwärts gerichteter Wassertransport in die im Sommer trockenen Entwässerungs- und Rekultivierungsschichten die Austrocknung der Dichtungen und in der Folge die Bildung von Rissen verursacht haben (näheres in MELCHIOR 1993 und 1996).

1993 und 1995 wurden Aufgrabungen der mineralischen Dichtungen durchgeführt. Dabei zeigten sich in Dichtungen, die noch nicht von Pflanzenwurzeln durchwurzelt waren (Feld F1), schmale Risse, die mit bloßem Auge kaum zu erkennen waren. Auf Feld S1 wurden 1995 sehr viel drastischere Schäden sichtbar. Pflanzenwurzeln waren massiv in den Dichtungen eingedrungen und hatten diese in ihrer gesamten Mächtigkeit bis in eine Tiefe von 1,6 m unter Geländeoberfläche durchwurzelt (z. B. *Lotus corniculatus*, *Cirsium* spp., *Rumex* spp., *Armoracia rusticana*). Der Geschiebemergel war spröde, sehr hart und sehr trocken und von Rissen mit mehreren Millimetern Breite durchzogen. Abb. 3 zeigt die Austrocknung der Dichtung zwischen 1987 (Einbau) und 1995 (Aufgrabung). Der 1995 gemessene mittlere Wassergehalt (14,4 Vol.-%) liegt deutlich unter dem Wassergehalt, der im Labor bei der Bestimmung der Wasserretentionsfunktion bei Wasser spannungen von 3.000 hPa (22,6 Vol.-%) und 15.000 hPa (17,7 Vol.-%) festgestellt wird. Daher müssen in der Dichtung während des sehr trockenen Sommer 1995 entsprechend hohe Wasserspannungen geherrscht haben. Diese Wasserspannungen wirken im Boden als Zugspannungen und verursachen die Bildung der Schrumpfrisse.



**Abb. 3:** Wassergehalt der bindigen mineralischen Dichtung auf Feld S1 beim Einbau 1987 und bei der Aufgrabung 1995

Die Abfolge der zunehmend trockeneren Sommer von 1989, 1992 und 1995 hat zu steigenden Durchsickerungsraten der Dichtungen in den darauffolgenden Wintern geführt. Von 1993 bis 1995 sind 136 mm/a bis 202 mm/a durch die mineralischen Dichtungen gesickert (vgl. Tabelle 1: Fluß „IV“ der Felder F1 und S1, Fluß „V + VI“ auf S3). Die Summe des seitlichen Abflusses in der Entwässerungsschicht (Fluß „III“) und der Dichtungsdurchsickerung repräsentiert die potentielle Versickerung in den Deponiekörper. 1995 sind im Mittel 49 % dieser potentiellen Versickerungsrate tatsächlich durch die Dichtungen versickert.

## 4.2 Bentonitmatte

Bentonitmatten werden in Deutschland seit Anfang der 90er Jahre vermarktet. Sie werden für eine Vielzahl geotechnischer Anwendungen einschließlich der Abdeckung von Altlasten angeboten. Laborversuche haben gezeigt, daß die Wasserdurchlässigkeit gequollener Bentonitmatten auch nach einigen Trocken-Naß-Zyklen sehr gering bleibt. Angesichts der Austrocknungsgefährdung, denen bindige mineralische Dichtungen im Feld unterliegen, bestand jedoch die Frage, ob die

unter Feldbedingungen auftretenden Einwirkungen (z.B. Pflanzenwurzeln, im Bodenwasser gelöste Ionen, Kolloide und Hydroxide, vom Laborversuch abweichende Geschwindigkeit und Intensität von Austrocknung und Wiederbefeuchtung) das Verhalten der Bentonitmatten beeinflussen würden. Daher wurden im April 1994 zwei weitere Testfelder und drei Beobachtungsfelder installiert. Die Bentonitmatten wurden in diesen Feldern unter einer relativ dünnen Überdeckung untersucht. Die Mächtigkeit der Rekultivierungsschicht beträgt 0,3 m (sandiger Lehm, 4 % organischer Kohlenstoff) und 0,15 m Entwässerungsschicht (Kies, 1 mm bis 8 mm). Diese geringmächtige Überdeckung wurde aus zwei Gründen gewählt. Erstens werden Bentonitmatten in Abdecksystemen für Altlasten unter ähnlich geringmächtigen Überdeckungen eingesetzt. Zweitens sind Feldversuche zeitaufwendig. Aus den Versuchen an bindigen mineralischen Dichtungen ist bekannt, daß die Durchwurzelung und Austrocknung in trockenen Jahren bis in tiefe Bodenschichten reicht. Durch eine geringmächtige Überdeckung der Bentonitmatten wird deren Durchwurzelung und Austrocknung beschleunigt und sichergestellt, daß die für die Untersuchung maßgeblichen Einwirkungen innerhalb kurzer Zeit und nicht erst nach u.U. vielen Jahren auftreten.

Für die Versuche in den Testfeldern, in denen die Durchsickerung der Matten direkt gemessen wird, wurden zum einen eine vernadelte Bentonitmatten (Bentofix D 3000 mit natürlichem Natriumbentonit, Naue Fasertechnik) und eine vernähte Bentonitmatten (NaBento mit aktiviertem Calciumbentonit, Huesker Synthetic) ausgewählt. Die amerikanischen Bentonitmatten wurden in den Beobachtungsfeldern installiert, die keine Auffangwannen unter den Matten aufweisen. Das Untersuchungskonzept und der Aufbau der Testfelder wurde mit den Herstellern der Matten bzw. deren deutschen Vertriebspartnern vor Beginn der Studie abgestimmt.

Der durchschnittliche Wassergehalt der Bentonitmatten betrug bei der Installation im April 1994 10,4 Gew.-%. Im November 1994 waren die Bentonitmatten gequollen (der Wasserhalt von Bentomat und Claymax betrug 138 Gew.-% bzw. 152 Gew.-%; aus den anderen Matten wurden keine Proben entnommen) Pflanzenwurzeln hatten die Bentonitmatten zu diesem Zeitpunkt bereits erreicht. Der Sommer 1995 war in Hamburg extrem trocken (die Wassergehalte lagen in der Rekultivierungsschicht und der Drainage bei 5 Vol.-% bzw. 1 Vol.-%). Die Wasserspannung überschritt in den Bentonitmatten den Meßbereich von Tensiometern. Die gemessenen Wassergehalte von 29 Gew.-% (Bentomat) und 37 Gew.-% (Claymax) belegen ebenfalls die Austrocknung der Bentonitmatten. Im Herbst und Winter 1995 wurden die Bentonitmatten wieder befeuchtet und erreichten Wassergehalte > 100 Gew.-%. Der Bodenfrost drang im Winter nicht bis zu den Bentonitmatten vor. Visuelle Inspektionen von Bentomat und Claymax im Sommer 1995 und von Bentofix und NaBento in Frühjahr 1996 zeigten eine deutliche Bodenstruktur innerhalb der Bentonitlagen mit bis zu 2 mm breiten Rissen zwischen den Bentonitaggregaten, die rund 1 cm Durchmesser aufwiesen.

Die charakteristische Eigenschaft von Bentonitmatten ist ihre Fähigkeit zur Rehydratisierung und Quellung. *Abb. 4* zeigt die Niederschlagsdaten und die Durchsickerung der Bentonitmatten bis zum Frühjahr 1997. Beide Bentonitmatten der Felder B1 und B2 funktionierten im ersten Winter (0,0 mm/a und 4,1

mm/a Durchsickerung durch Bentofix bzw. NaBento im hydrologischen Jahr von April 1994 bis März 1995). Dieses Ergebnis zeigt die fehlerfreie Installation der Bentonitmatten einschließlich der Überlappungsbereiche. Nach dem trockenen Sommer 1995 bewirkten die ersten Niederschläge im August eine Wiederbefeuchtung des Oberbodens. Anschließend führte jedes nennenswerte Niederschlagsereignis zu hohen Durchsickerungsraten der Bentonitmatten (die Durchsickerungsvolumina erreichten  $1 \cdot 10^{-7} \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ). Im hydrologischen Jahr 1995/96 sickerten 56 mm/a durch Bentofix und 102 mm/a durch NaBento. Im gesamten Winterhalbjahr war die Rückquellung der Matten nicht ausreichend, um die in den Rissen gebildeten bevorzugten Fließwege durch die Matte wieder zu verschließen. Aufgrabungsergebnisse aus dem Jahr 1996 zeigten, daß das Tonmineral Bentonit nach wie vor in seiner Struktur erhalten geblieben ist. Die Ionenbelegung des Bentonits hat sich jedoch entscheidend verändert. Die ursprünglich am Tonmineral adsorbierten einwertigen Natriumionen sind mittlerweile größtenteils durch zweiwertige Calciumionen ersetzt worden. In der Folge hat das Quellungsvermögen des Bentonits stark abgenommen und zeigt nunmehr die typischen Werte eines Calciumbentonits. Andere Ursachen für die Schädigung der Bentonitmatten als Austrocknung und Ionenaustausch wurden bei der Aufgrabung 1996 nicht festgestellt (Herold 1997). Bislang gab es keine Anzeichen für die Verlagerung und Fällung von Ton-Humus-Komplexen, Carbonaten oder Metallhydroxiden, die im Zuge der langfristigen Bodenentwicklung im Abdecksystem freigesetzt und verlagert werden können.

### 4.3 Kapillarsperre

Die im Testfeld S3 untersuchte Kapillarsperre besteht aus 0,6 m Feinsand (78 % der Körner mit Durchmessern zwischen 0,1 mm und 0,2 mm) als lateral leitfähige Kapillarschicht über 0,25 m Grobsand und Feinkies (58 % zwischen 0,63 mm und 6,3 mm) als Kapillarblock. Die ungesättigte hydraulische Leitfähigkeit der Kapillarschicht beträgt  $1 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}$  bei Wasserspannungen unterhalb 30 hPa. Die Kapillarsperre wird - von oben nach unten - durch

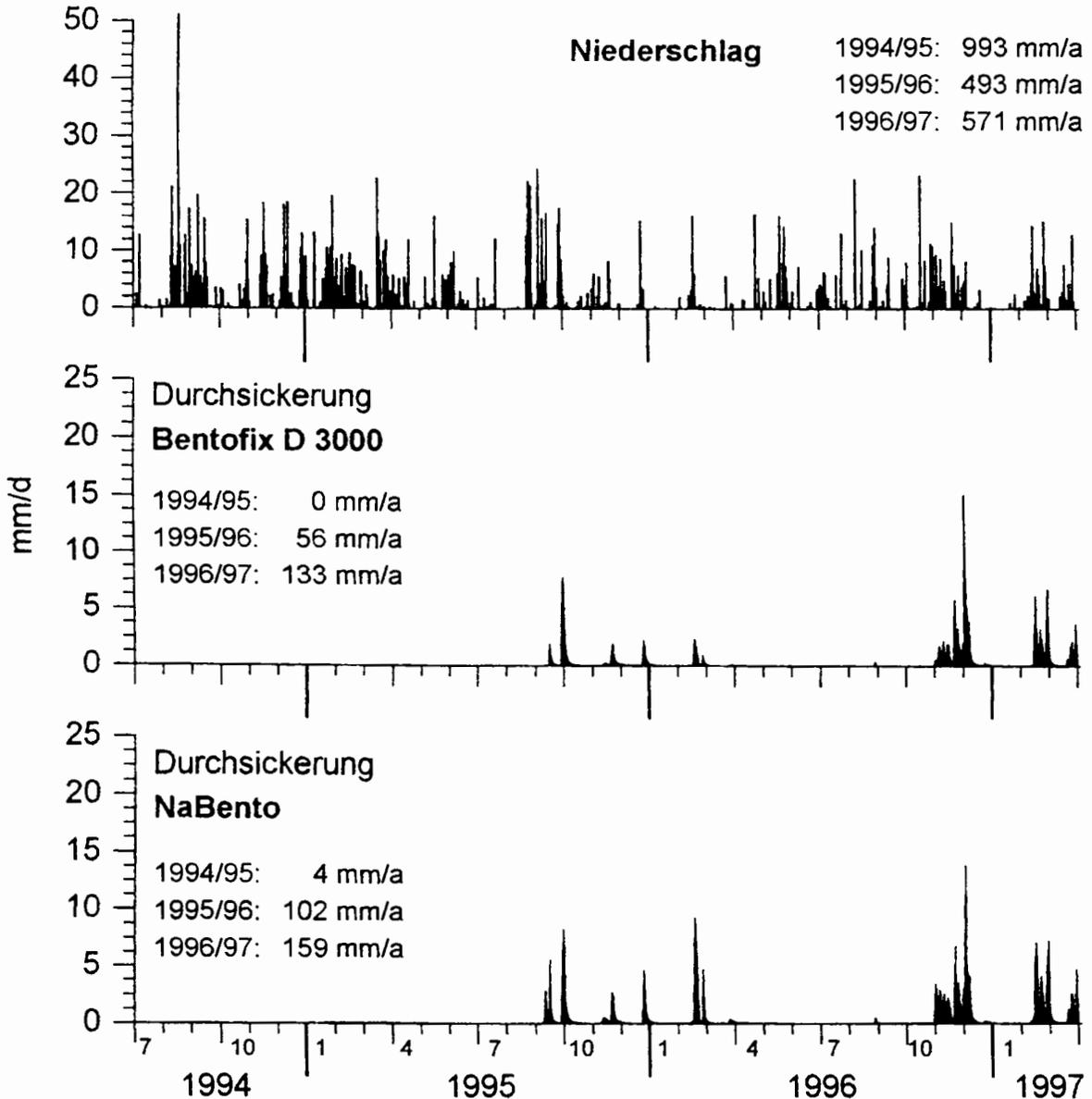


Abb. 4: Niederschlag und Durchsickerung der vernadelten Bentonitmatte (Bentofix D 3000) und der vernähten Bentonitmatte (NaBento)

eine Rekultivierungsschicht, eine Entwässerungsschicht und zwei Lagen verdichteten Geschiebemergels überdeckt. Die Geschiebemergeldichtung begrenzt den vertikalen Zufluß in die Kapillarschicht. Abb. 5 zeigt den lateralen Abfluß in der Entwässerungsschicht oberhalb der mineralischen Dichtung, den lateralen Abfluß innerhalb der Kapillarschicht und die vertikale Infiltration in den Kapillarblock (die jährlichen Wasserbilanzen sind in Tabelle 1 aufgelistet). Während der ersten 4,5 Jahre funktionierte das System trotz der seit 1989 nachlassenden Wirksamkeit der bindigen mineralischen Dichtung perfekt. Im

Sommer 1992 trocknete die bindige mineralische Dichtung jedoch stark aus. Die bereits 1989 eingetretene Rißbildung verstärkte sich, so daß ab November 1992 infolge der erhöhten Durchlässigkeit der bindigen mineralischen Dichtung eine Reihe von Ereignissen eintraten, bei denen die Infiltration in die Kapillarschicht deren laterale Dränkapazität überschritt und folglich eine vertikale Absickerung in den Kapillarblock auftrat (bis zu 49 mm/a im Jahre 1995, vgl. Tabelle 1).

In einer weiterführenden Studie haben wir unterschiedliche Materialkombinationen für

Kapillarsperren in einer 10 m langen Kipprinne bei unterschiedlicher Hangneigung und Zusickerungsrate untersucht (Steinert et al. 1997). Kapillarschichten mit Mittel- und Grobsanden haben dabei sehr viel höhere laterale Dränkapazitäten gezeigt als die Materialkombination, die im Testfeld S3 eingesetzt wurde. Diese Ergebnisse belegen, daß Kapillarsperren mit geeigneten Materialkombinationen eine erhebliche Leistungsfähigkeit besitzen.

#### 4.4 Kombinationsdichtung

(Kunststoffdichtungsbahn über mineralischer Dichtung)

Auf drei Testfeldern werden seit 1988 Kombinationsdichtungen aus einer 1,5 mm dicken PEHD-Kunststoffdichtungsbahn oberhalb von dreilagigen bindigen mineralischen Dichtungen untersucht (zu den Eigenschaften der mineralischen Dichtungen siehe oben). Auf zwei der Testfelder (S2, F2) sind die Kunststoffdichtungsbahnen verschweißt, auf Feld F3 wurden sie in Hangrichtung überlappend verlegt. Die Wirksamkeit der Kombinationsdichtungen ist ausgezeichnet. Tabelle 1 zeigt, daß im Durchschnitt 1,3 mm/a unter den Dichtun-

gen der Felder S2 und F2 aufgefangen wurden. Auf Feld F3 wurden geringfügig mehr (im Mittel 3,6 mm/a) aufgefangen. Die detaillierte Auswertung der bodenhydrologischen Daten und der Bodentemperaturen belegt, daß das unter den Dichtungen aufgefangene Wasser nicht das Ergebnis einer Durchsickerung von Fehlstellen innerhalb der Kunststoffdichtungsbahn ist, sondern auf eine temperaturabhängigen Wasserabgabe der bindigen mineralischen Komponente im Sommerhalbjahr beruht. Mit dieser sommerlichen Wasserabgabe der mineralischen Dichtungen, die immer dann auftritt, wenn die Oberkante der Dichtung wärmer ist als ihre Unterkante, geht eine Veränderung der Wasserspannung in der mineralischen Dichtung einher. Ergänzende Studien zum temperaturabhängigen Wassertransport in Kombinationsdichtungen (Vielhaber 1995) haben gezeigt, das sowohl die absolute Temperatur als auch die Temperaturgradienten die Wasserbewegung in dampfförmiger und flüssiger Phase von warmen zu kalten Bodenbereichen auslösen. Unter gemäßigten Klimabedingungen und unterhalb mächtigerer Rekultivierungsschichten ist die temperaturinduzierte, abwärts gerichtete Wasserabgabe jedoch gering und zudem auf eine kurze

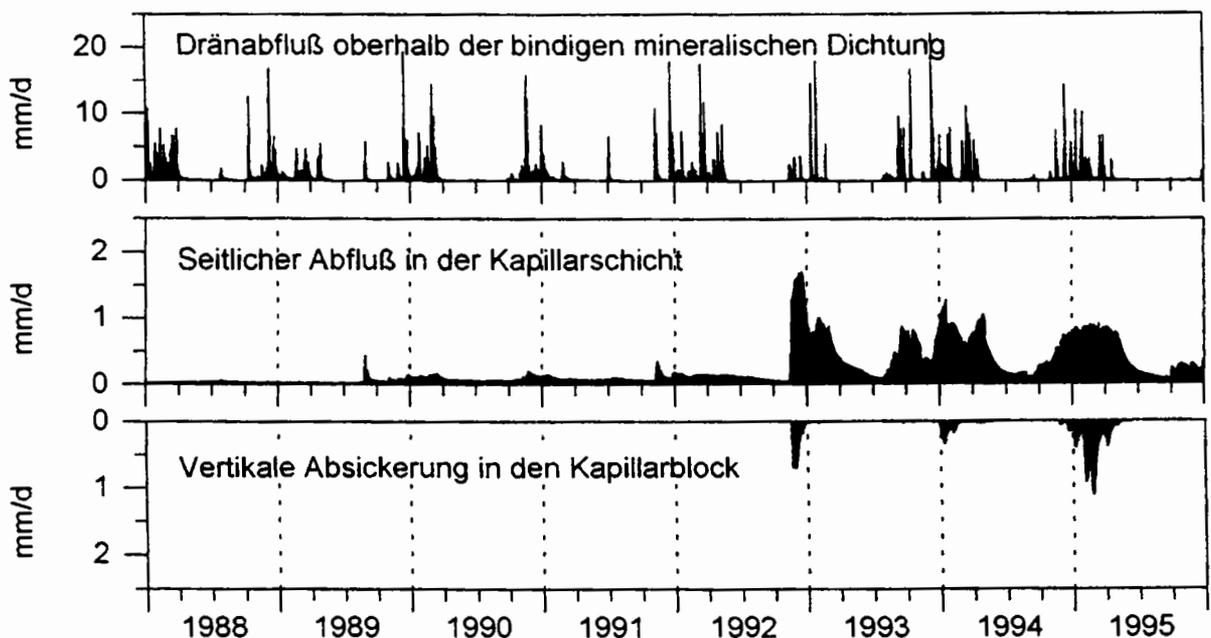


Abb. 5: Erweiterte Kapillarsperre (Feld S3)

Periode im Jahr begrenzt, so daß sie die mineralische Komponente der Kombinationsdichtungen erst nach vielen Jahrzehnten durch Austrocknung gefährden kann.

## 5 Schlußfolgerungen

Der Wasserhaushalt und die Wirksamkeit von mehrschichtigen Deponieabdeckungen können auf Testfeldern sehr genau untersucht werden. Solche Studien sind jedoch zeitaufwendig und benötigen einen angemessenen technischen Aufbau der Versuchsanlagen. Aus der Studie in Hamburg Georgswerder können nach gut zehn Jahren die folgenden wichtigsten Schlußfolgerungen gezogen werden:

Eine Abdeckung sollte so gestaltet werden, daß die Evapotranspiration und die seitliche Dränage von Wasser maximiert werden. Unter humiden Klimabedingungen und in semi-ariden Bereichen, die seltene - jedoch intensive - Niederschlagsereignisse aufweisen, ist allerdings eine Abdichtung erforderlich, um die Infiltration in eine Deponie oder Altlast zu minimieren.

Bindige mineralische Dichtungen und Bentonitmatten sind gegen Austrocknung und Schrumpfrissbildung sehr empfindlich. Aufwärts gerichtete Wasserabgabe in trockene Oberböden sowie die Wasserentnahme durch Pflanzenwurzeln haben die irreversible Bildung von Rissen und von bevorzugten Wasserleitbahnen in den untersuchten Dichtungen verursacht. Die Durchwurzelung und die Austrocknung von bindigen mineralischen Dichtungen und Bentonitmatten muß durch ausreichend mächtige Rekultivierungsschichten oder andere Schutzmaßnahmen verhindert werden. Gegenwärtig sind keine Maßnahmen bekannt und erprobt, durch die die Eigenschaften der Tone so beeinflußt werden, daß entweder die Bildung von bevorzugten Wasserleitbahnen während der Austrocknung verhindert wird oder sich die gebildeten Risse ausreichend schnell wieder schließen.

Kapillarsperren sind vielversprechende Komponenten von Abdecksystemen für Hänge. Sie sind in Abhängigkeit von Hangneigung, Hanglänge, Materialverfügbarkeit und erwarteter Zusickerung in die Kapillarschicht zu

dimensionieren. Die Materialkombination ist so auszuwählen, daß ihre laterale Dränkapazität den genannten Randbedingungen gerecht wird. Die Kapillarschicht sollte bis zu einer Wasserspannung von mindestens 30 hPa eine sehr hohe ungesättigte Wasserleitfähigkeit aufweisen. Sehr gut sortierte grobe Sande sind daher als Kapillarschichtmaterial besonders geeignet. Gestufte Materialien, Schluffe, Lehme, Tone aber auch Kiese sind für Kapillarschichten aufgrund zu geringer ungesättigter Wasserleitfähigkeit in der Regel ungeeignet. Der Kapillarschicht sollte aus Kies bestehen und gegenüber der Kapillarschicht ausreichend filterstabil sein. Innerhalb einer Verbunddichtung (z.B. unter einer Kunststoffdichtungsbahn) kann die Kapillarsperre eine Sekundärabdichtung bilden und gleichzeitig als Kontrollsystem für die Wirksamkeit der oberen primären Dichtung fungieren.

Kombinationsdichtungen mit Kunststoffdichtungsbahnen über bindiger mineralischer Dichtung haben sich am besten bewährt. Die Kunststoffdichtungsbahn ist eine effektive und über lange Zeiträume beständige Dichtung, sofern geeignete Polymere benutzt und die Bahnen intakt installiert werden. Die bindige Komponente der Kombinationsdichtung ist in der Lage, lokale Fehlstellen der Kunststoffdichtungsbahn abzudichten. Anders als in Basisdichtungen wird die bindige Komponente in der Oberflächendichtung jedoch nicht genutzt, um den Schadstofftransport zu begrenzen. Unter einer intakten Kunststoffdichtungsbahn ist die mineralische Dichtung zwar gegen aufwärts gerichtete Wasserabgabe geschützt, langfristig (zumindest nach einigen Jahrzehnten) ist dieses im Falle eines Versagens der Kunststoffdichtungsbahn jedoch nicht länger der Fall. Die der mineralischen Komponente ursprünglich zugeordnete Aufgabe, nach Versagen der Kunststoffdichtungsbahn wirksam zu werden, kann sie daher in der Oberflächenabdichtung nicht erfüllen. Zudem kann möglicherweise temperaturabhängiger Wassertransport auch unter einer intakten Kunststoffdichtungsbahn bereits zu einer Austrocknung der bindigen mineralischen Komponente führen. Zusammenfassend kann die Kombinationsdichtung daher als eine sehr effektive und über lange Zeiträume beständige Dichtung durchaus

empfohlen werden. Es gibt jedoch einige Möglichkeiten, um das Kosten-Nutzen-Verhältnis des Dichtsystems zu verbessern. So können die Mächtigkeit oder die Qualität der mineralischen Komponente verringert werden oder aber auch die bindige mineralische Komponente durch eine andere Kunststoffdichtungsbahn oder beispielsweise auch eine Kapillarsperre ersetzt werden.

Abdecksysteme für Altdeponien und Altlasten sollten immer vor dem Hintergrund der speziellen Randbedingungen des Einzelfalles entworfen werden (z. B. Witterungsverhältnisse am Standort, Geometrie des Abfallkörpers, aktuelle Gefahren und Gefährdungspotential, geplante Nachnutzung der Fläche, Materialverfügbarkeit, kritische Einwirkungen wie beispielsweise Setzungsdifferenzen oder der Angriff aggressiver Chemikalien, Kosten). Die Planer von Abdecksystemen können aus einer

Reihe von Optionen auswählen, um ein geeignetes und kostengünstiges Abdecksystem zu gestalten.

## Dank

Die Untersuchungen, über die in dieser Veröffentlichung berichtet wird, wurden am Institut für Bodenkunde der Universität Hamburg durchgeführt. G. Miehllich, B. Vielhaber, K. Berger, B. Steinert, J. Maaß, J. Ludwig, M. Türk und viele Studenten haben die Untersuchungen mit großem Einsatz mitgestaltet. Die Studien wurden über den Gesamtzeitraum von der Freien und Hansestadt Hamburg (FHH, Umweltbehörde) sowie in Teilperioden vom Bundesministerium für Forschung und Technologie (BMFT, jetzt BMBF) und von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt (DBU) gefördert.

## Literatur

HEROLD, C. (1997): Besondere Aspekte bei der Zulassung von Bentonitmatten für Oberflächenabdichtungssysteme von Deponien der Deponieklasse I. In LGA Bayern (Hrsg.): 13. Nürnberger Deponieseminar. 17 S.

MELCHIOR, S. (1993): Wasserhaushalt und Wirksamkeit mehrschichtiger Abdecksysteme für Deponien und Altlasten. Dissertation im Fachbereich Geowissenschaften der Universität Hamburg. Hamburger Bodenkundliche Arbeiten, 22, 330 S.

MELCHIOR S. (1996): Die Austrocknungsgefährdung von bindigen mineralischen Dichtungen und Bentonitmatten in der Oberflächenabdichtung - Ergebnisse von mehrjährigen In-Situ-Versuchen und Aufgrabungen auf der Altdeponie Hamburg-Georgswerder. In: Maier-Harth, U. (Hrsg.): Geologische Barriere, Basisabdichtung, Oberflächenabdichtung - Möglichkeiten zur standortbezogenen Optimierung. 3. Deponie-Seminar des Geologi-

schen Landesamtes Rheinland-Pfalz am 30.05.1996 in Bingen-Büdesheim/Rhein. Selbstverlag, Mainz, 40 S.

STEINERT, B., S. MELCHIOR, K. BURGER, K. BERGER, M. TÜRK & G. MIEHLICH (1997): Dimensionierung von Kapillarsperren zur Oberflächenabdichtung von Deponien und Altlasten. Hamburger Bodenkundliche Arbeiten, 32, 362 S.

VIELHABER, B. (1995) : Temperaturabhängiger Wassertransport in Deponieoberflächenabdichtungen. Feldversuche in bindigen mineralischen Dichtungen unter Kunststoffdichtungsbahn. Dissertation im Fachbereich Geowissenschaften der Universität Hamburg. Hamburger Bodenkundliche Arbeiten, 29, 200 S.

UMWELTBEHÖRDE HAMBURG (1995): Deponie Georgswerder, Sanierung 1984-95. 77 S.

## DISKUSSION:

## Schutz des Grundwassers durch Basisdichtungen

In-situ-Untersuchungen zur Wirksamkeit von  
Oberflächenabdichtungen

STEIRER: Ich darf bitte jetzt diese beiden Vorträge zur Diskussion stellen. Sie haben uns gezeigt, daß wir es im Deponiebau sowohl oben wie auch unten mit technischen Systemen zu tun haben, die natürlich auf Alterungsprozesse anfällig sind und dann versagen.

NEGENDANK: Das waren ganz exzellente Vorträge, mit ihren Ergebnissen. Daß wir hier weiterarbeiten müssen ist klar. Aber das Fazit Ihrer Untersuchungen: es gibt im Grunde keine vernünftige Form der Deponierung, also containern wir das Ganze, bauen wir anständige Dächer darüber, solange, bis man weiß, was damit irgendwann einmal in der Zukunft geschieht. Ist das richtig ?

ENTENMANN: Also grundsätzlich machen wir ja genau das die ganze Zeit: wir bauen eine Basisdichtung, wir bauen einen Müllkörper, und wir bauen einen Deckel darauf; im Prinzip ist das ja ein großer Container. Nur die einen glauben, wir machen das für die Ewigkeit, und die anderen, die zweifeln das an.

Wir haben das Problem, daß wir einen durchlässigen Körper zwischen zwei dichten Körpern haben, und dann noch irgendwo eine Basisdrainage, und der richtige Weg wäre, wenn das schon für alle Zeiten halten soll, daß wir diese Durchlässigkeitsunterschiede ausmerzen. Im Prinzip müßte es unten am dichtesten sein, dann sollte man als Sicherheitselement die Basisdrainage ruhig behalten, und dann müßte etwas kommen, was auch dicht ist, aber das ist momentan überhaupt nicht dicht, und ich glaube, hier müßte man angreifen. Der Müllkörper selbst hat meinen Untersuchungen zufolge Durchlässigkeiten von  $10^{-4}$  und  $10^{-6}$  m/sec und mit ganz geringen Ausnahmen auch einmal  $10^{-7}$  m/sec. Da kommt man mit Verdichtung und wenn mit Glück das Material stimmt hin; besser ist es einfach nicht möglich. Und

dann legen wir eine sehr gering durchlässige Oberflächenabdichtung darauf, und die wird irgendwann einmal wie jedes technische Element versagen. Wenn wir den Mittelteil nicht dichter machen, können wir eine langfristige Sicherheit nie gewährleisten.

Wenn wir das in der Mitte dicht machen können, und wenn wir es auch noch entfrachten von all den Schweinereien, die wir momentan noch einbauen, dann haben wir ein gutes Konzept, sodaß wir auch mit Deponierung in einigen hundert Jahren noch leben können.

MELCHIOR: Die Frage zielt ja auf die neuen Deponien. Man muß gerechterweise schon sagen, so schwierig die ganzen rechtlichen Vorgaben sind, die wir in den letzten Jahren erhalten haben, daß sie auch eine ganze Reihe von positiven Auswirkungen nach sich gezogen haben. Die Gesamtmüllmenge ist deutlich zurückgegangen, wir sortieren sehr viel besser, und es ist auch sehr gut möglich für neue Deponien genauer zu wissen, was man wie einbaut, und das Gefährdungspotential wird deutlich geringer sein als bisher. Dennoch sollte man sehr genau auf das chemische Milieu achten. Wir machen Unsinn, indem wir z.B. Schlämme, die belastet sind und unter stets reduzierenden Bedingungen eigentlich keine Schwermetallproblematik aufweisen, aus Gewässern baggern und sie in Landdeponien bringen, wo sie wunderbar durchlüftet werden, und wir erhalten dann auch sehr lange Zeit hohe Schwermetallfrachten im Sickerwasser. Das sind Dinge, bei denen man besser noch einmal die Ansätze hinterfragen sollte. Aber bei den neuen Deponien haben wir nicht die großen Probleme, bei denen technische Barrieren gerade an der Oberfläche oft zwingend erforderlich sind. Das sind eben die Altablagerungen, bei denen wir nicht wissen, was drin-

nen ist, wo zusätzlich auch noch die Einwirkungen auf die Oberfläche komplizierter sind als bei der neuen Deponie. Das Problem ist, daß man Altlasten und Altdeponien mit sehr viel Aufwand nachträglich technisch ausgestattet hat, sehr viel Lehrgeld bezahlt hat und heute eigentlich keiner mehr das Geld in die Hand nehmen will, um solche Altlasten zu sichern.

**KISTEN:** Sie haben sehr viele verschiedene Transformationsprozesse an den Systemen Sickerwasser und mineralische Barriere aufgezeigt ...*unverständlich*... Prozesse dargestellt, einmal mit Karbonatlösung und einmal mit Karbonatbildung. Welche Prozesse werden langfristig dominieren? Und als nachfolgende Frage: ist es sinnvoll bei einer mineralischen Barriere ...*unverständlich*... zu messen und eben von einer weiteren Verkomplizierung oder dem Einsatz technischer Möglichkeiten doch eher abzugehen?

**ENTENMANN:** Wenn wir differenzieren wollen: einmal haben wir diese Uraltdeponien, in die nicht viel an Schadstoffen hereingekommen ist; da sollte man nicht allzuviel darüber nachdenken, da sollte man eine ordentliche Oberflächenabdichtung darauflegen, und dann hat sich das. Worüber ich hauptsächlich gesprochen habe, das sind diese Deponien aus den Siebzigerjahren, in die wir alles hineingepackt haben, und das sind eben diese Reaktordeponien, da ist richtig Chemismus darin, wir haben Sickerwasser, das wir über ca. 20 Jahre beobachtet haben. Das Dumme ist, wir haben es gar nicht richtig beobachtet, meist haben wir Sickerwasserentnahmestellen in der Deponie, die über 2-3 Jahre Ergebnisse liefern, oder über 5 Jahre (ich habe eine, die sogar über 10 Jahre beobachtet worden ist, da können wir über den Chemismus Aussagen treffen), wir haben in Summe ganz wenige Parameter über wenige Jahre. Ich kann derzeit noch nichts über eine zeitliche Entwicklung des Chemismus im Sickerwasser sagen, ich kann nur sagen, daß diese Phase bei den alten Deponien immer "dicker" wird. Es ist immer mehr Organik drinnen und es kommen schubweise immer mehr Schwermetalle hinzu. Wie es sich insgesamt verlagert, das kann ich überhaupt noch nicht prognostizieren.

Diese Hoffnung, die ja allen diesen alten Konzepten zugrunde liegt, daß nach 12 bis 14 Jahren, solange wie die Gasphase läuft, auch die Sickerwasserphase läuft, ich glaube, die haben wir inzwischen widerlegt. Auf den meisten Deponien, die wir untersucht haben, sind wir in der Gasphase schon längst auf dem absteigenden Ast, da war dieses Problem fast schon zur Gänze erledigt, aber in der Sickerwasserphase, in der Sickerwasserbelastung, sind wir noch auf dem Weg nach oben. Was ich Ihnen sagen kann, ist, zwischen dem Deponiekörper und dem Bereich der Basis haben wir einen Sprung. Wir haben an der Stelle, wo die Drainage auf der Dichtung liegt, Sulfidfällung bis zum Gehnichts mehr. Wenn Sie da aufgraben, da stinkt es richtig, da kommt Ihnen der Schwefelwasserstoff entgegen. Da scheint sich was zu tun. Unterhalb dieser Drainschicht haben wir auch weiter untersucht, aber das haben wir nicht so detailliert machen können. In Neuwulmstorf ist der Porenraum von oben bis unten mit identischem Sickerwasser gefüllt, da gibt es keinen Unterschied, ob sie ganz oben sind in dieser Dichtung oder ganz unten. Da ist im Porenwasser immer dasselbe drin. Wenn wir jetzt einen Schritt weiter gehen und die Tonminerale untersuchen, das Adsorbierte, da zeigt sich auch nicht viel anderes. Egal, ob Sie 30 cm Ton nehmen oder 60 cm, zuerst kommt die Konvektion nach unten und dann breitet es sich lateral aus, geht also ins Gefüge hinein. Von daher ist auch die Diskussion, ob 70 cm oder 50 cm oder 3 m nur etwas, was die Zeit etwas beeinflußt, aber nicht allzuviel.

**VORTISCH:** Das heposive Ergebnis, wenn man die Ausführungen aus geologischer Sicht betrachtet, bestätigt was wir Geologen schon vor längerer Zeit befürchtend geäußert haben, daß nämlich in Wahrheit die nachsorgefreie Langzeitsicherheit nicht existiert. Auch bei Kapillarsperren nicht, denn die Abfuhr funktioniert nur solange, solange die Abfuhr garantiert ist, sie müssen also diesen Misthügel in der Landschaft verwaltungsmäßig immer mindestens solange kontrollieren, als das Schadstoffpotential existiert, und einige Schadstoffe leben bekanntermaßen ewig, gerade bei den Schwermetallen, und das ist ein

außerordentliches Schwergewicht dieses Resummes.

Das zweite wäre die Frage der Deponien, bei denen Verbrennungsrückstände abgelagert werden, in Gesamtheit oder einzelne Stoffgruppen für sich. Die Verbrennung, die auch noch sehr ausführlich zu diskutieren ist, und die zur Zeit öffentlich - rechtlich ja eher gefördert wird, entkommt ja der Deponierung auch nicht. Das was bei ihr übrig bleibt, ist in Wahrheit geologisch sogar noch problematischer auf bestimmte Stoffgruppen, gerade wenn man auf die Phasengleichgewichte schaut, die physiochemische Stabilität über die Prozesse, die da noch ablaufen können,.

Die Frage wäre, ob man überhaupt jemals eine Deponie gefunden hat, wo die Oberflächenabdichtung wirklich funktioniert hat, nachsorgefrei, und dann wäre die Frage ob da nicht sofort ein geologisches Argument zur Verfügung steht, um das auf längere Sicht in Zweifel zu stellen, denn wir reden von Langzeit, über größere Verwaltungszeiträume, über Generationen.

MELCHIOR: Zunächst einmal, ich bin von den Ergebnissen nicht ganz so deprimiert. Ich war sehr überrascht, daß die mineralische Dichtungen so schlecht abschneiden, daß die so austrocknen.

VORTISCH: Das haben wir erwartet

MELCHIOR: 1985 haben wir das so drastisch noch nicht erwartet, da haben wir mit diesen Untersuchungen erst begonnen. Wir haben wohl gedacht, daß sie austrocknen können, aber nicht in dem Ausmaß. Ich als Bodenkundler habe das damals so gesehen, das Ergebnis ist aber sehr eindeutig (bei den Bentonitmatten hatte ich dann auch entsprechende Bedenken). Aber ich habe zum Beispiel den Kunststoffdichtungsbahnen als Geowissenschaftler in Richtung Beständigkeit 1985 nicht sehr viel zugetraut, und habe mich da von den Ergebnissen belehren lassen müssen. Das KDB ist durchaus eine sehr wirkungsvolle Dichtung ist, die aber auch nicht ewig hält. Ganz klar. Die Kapillarsperren sind ein wesentlich angepassteres System an die ungesättigten Verhältnisse in der Oberflächendichtung, deswegen auch ein relativ beständiges

System, aber Stofftransport, Karbonate, alles, was die Dichtwirkung von Drainagen betrifft, das muß man auch bei Kapillarsperren als kritische Einwirkung betrachten.

Es ist klar, daß man eine Deponie nachsorgefrei haben will. Viele Deponien werden als nachsorgefrei bezeichnet, fast alle, denn keiner will die Nachsorge so betreiben, wie wir sie in Büchern und Vorschriften festlegen, das ist meine feste Überzeugung. Selbst in Fällen, wo alle Meßvorrichtungen installiert sind, kommt man zwei, drei Jahre später drauf: keiner hatte eigentlich die Zeit sich mit dem notwendigen Elan darum zu kümmern und man müßte alles wieder neu machen. Die Nachsorge wird entfallen, und wir werden dann sehr unterschiedliche Deponien haben, von denen eine Vielzahl gar nicht einmal so problematisch sein wird, wie wir das in der Vergangenheit selbst auch gedacht haben. Die Schadstoffausbreitung ist an vielen Standorten äußerst gering und wir werden erst prüfen müssen, wie das im Vergleich der Umweltbilanz zu anderen Entsorgungswegen aussieht. Es wird aber auch eine ganze Reihe gravierender Fälle geben, und an die muß man herangehen. Die Oberflächenabdichtung ist ein reparierbares System. Es gibt technische Lösungen, die doch kostengünstig sind und für eine relativ lange Zeitdauer funktionieren. Aber natürlich nicht für die Ewigkeit.

Es gibt einen anderen Bereich, in dem man diese ewige Haltbarkeit tatsächlich fordert, und auch berechtigterweise, das sind die Altstandorte der Rüstungsproduktion in Nordamerika. Eine Dimension völlig jenseits dessen, was wir von Sondermüllabfällen kennen, das ist lächerlich dagegen. Es gibt Kostenschätzungen, daß man allein auf den sechs oder sieben großen Standorten, Los Alamos und wie sie alle heißen, zur Sanierung mehr aufwenden muß, als die Herstellung des kompletten Straßensystems der Vereinigten Staaten jemals gekostet hat, inklusive Unterhalt. Das werden auch die USA nicht aufbringen können.

Dort sucht man nun Abdecksysteme, die wirklich für die Ewigkeit gedacht sind. Fragen werden debattiert, wie weit ändert sich in der

Zukunft die Sprache, man muß mit Piktogrammen arbeiten, die auch in 800 Jahren noch verstanden werden, denn man kann das nicht als Text irgendwo hinschreiben. Auch da kommt man zu Systemen mit Bitumen, mit Asphalt, kombiniert mit sehr blockigem Material ("rip-rap"), die durchaus sehr lange halten werden. Auch nicht ewig, und mit Tausendjährigen Institutionen haben wir insgesamt weltweit schlechte Erfahrungen gemacht.....

VORTISCH: Auch in den Fünfzigerjahren haben die Deponien unterschiedliche Einträge gehabt, vom Sofa über das Moped bis zu einem entsorgten toten Kaninchen, Eisenteile usw. Es gab natürlich nicht die hochentwickelten Stoffe, die erst später zum Tragen kommen, die Computer ...*unverständlich*... später entsorgen, aber ...*unverständlich*...

Bei Kunststoffdichtungsbahnen wird im allgemeinen eine Haltbarkeit von etwa 30-34 Jahren diskutiert. Sie sind ist also eine technische Lösung auf Zeit, die eine Verwaltungs-generation beruhigen kann, die aber eine Deponie, die irgendwie eingekapselt wird oder zum Teil eingekapselt funktioniert, die können wir aus geologischer Sicht eigentlich nicht als sicher auf Dauer sehen. Wir müssen uns klar machen, daß das Potential eben drinnen steckt, und wenn wir das Potential jetzt blocken, indem wir es gut oben abdichten und die ganzen Prozesse über die Zeit reduzieren, was wird später kommen wenn die Deponie längst vergessen ist, wenn sie solange eingegraben war, oder wenn irgend etwas gemacht wird und dann das Potential zum Tragen kommt.

Das eine wäre natürlich dann eine funktionierende geologische Barriere, obwohl diese unter Umständen, wenn wir sie von der Bilanz her sehen, gar nicht das erfüllen kann, was wir von ihr wollen. Denn entweder ist sie ganz dicht, dann wird eine vergessene Deponie eben einen oberflächennahen Abfluß haben und das Grundwasser entsprechend kontaminieren können, oder aber sie ist nicht dicht, dann geht's nach unten raus. Die ideale geologische Barriere müßte so beschaffen sein, daß sie fortlaufend gerade soviel aufnimmt, daß sie lange Zeit genügend herausfiltert durch die mechanischen und chemischen Prozesse, die

Mineralneubildung, Anlagerungs- und Austauschprozesse.

Was Sie heute erzählt, mit wunderbarer Klarheit dargestellt haben, haben wir natürlich auch schon in anderen Fällen diskutiert, und das, was wir an Ihren Basisdichtungen beobachtet haben, haben wir auch schon vermutet. Mit Koll. Riehl haben wir zusammen eine Exkursion zu einer Sondermülldeponie in Süddeutschland Anfang der Neunzigerjahre gemacht, das Planum war in der Bauphase, auch schon mit Reißbildung und Kunststoffdichtungsbahnen. Damals haben wir gesagt, die Kunststoffdichtungsbahnen werden solange halten, bis die Basisdichtung gut ausgetrocknet ist und entsprechende Risse hat und dann, wenn die Kunststoffe versagen, können wir sicher sein, daß auch die mineralische Basisdichtung ihre Funktion nicht mehr erfüllen kann. Abgesehen davon, kann selbst eine funktionsfähige Basisdichtung einen Wunschtraum kaum erfüllen, daß nämlich flächig komplett versiegelt wird.. Die Kalkulation das Schadstoffbindungsvermögen einer mineralischen Basisdichtung quantitativ einem Schadstoffpotential anzupassen, würde ja nur funktionieren, wenn es gleichmäßig durchsickert wird. Und das können wir nicht erwarten. Die Austauschprozesse, mit denen wir eine Entschärfung erhoffen, werden linear, also flächig verlaufen, und die Wirkung wird nur ein Bruchteil dessen sein, was wir uns erhofft haben. Das müssen wir uns meiner Meinung nach für die zukünftigen Verfahren einmal gemeinsam klarmachen.

NEGENDANK: Sie haben Trockenrisse in einer Bentonitmatte gezeigt. Welche Größenordnung haben die ?

Das ist eine Frage; die andere ist, im Oberboden hatten Sie schöne Durchgänge. Da würde mich interessieren, wie tief geht die und sind die ähnlich wie normale Kluftsysteme (Sigma 1, Sigma 2, Sigma 3) zu erläutern auf Grund der Austrocknung, die von oben nach unten fortschreitet.

MELCHIOR: Zum letzten habe ich mich offenbar nicht klar genug ausgedrückt. In der Rekultivierungsschicht oberhalb der Entwässerungsschicht haben wir diese Kluftsysteme

nicht gehabt, das war ein schwachbindiges Material. Ich kenne aber Rekultivierungsschichten, die aus tonigem Material bestehen und beim Einbau häufig überfahren wurden. Da finden wir das, was Sie eben ansprechen, dort gibt es tatsächlich in aller Regel solche "Elefantenfüße", polygonale Strukturen mit 30 - 40 cm Durchmesser, und die Rißtiefe reicht locker über 70, 80 cm und tiefer. Und dann kommen die Risse der nachfolgenden Generation, das ist lehrbuchhaft in so einem System. Das war aber im untersuchten Objekt nicht der Fall.

Zu den Rißgrößen in den Bentonitmatten und auch in der mineralischen Dichtung: die variieren. In Zeiten der Austrocknung im Sommer haben wir in den Matten Rißweiten von 2-2,5 mm festgestellt bei einer Gefügegröße um 1 cm Durchmesser. Das weist auf das enorme Quell- und Schrumpfvermögen der Bentonite hin, das muß so sein. Die Rißweiten verringern sich bei Wiederbefeuchtung, sie schließen aber nicht wieder so stark, daß die Matten wieder dichtwirksam wären, und im günstigsten Zustand hat man feine Haarrisse, die man mit der Lupe erkennen kann, mit bloßem Auge kaum.

Das war in der mineralischen Dichtung ähnlich; da hatten wir einerseits die vermeintlich gut aussehenden, die hatten auch Haarrisse, die häufig miteinander kommunizieren und erhöhte Flüssigkeitsdurchgänge erlauben. Die Risse sind im Sommerhalbjahr stärker. Nur die Gefügegrößen sind da anders als in den Bentonitmatten. Andererseits gibt es aber auch Dichtungen mit weitaus breiteren Rissen. Für die Durchlässigkeit ist die Rißbreite allerdings nachrangig. Bereits Haarrisse erhöhen die Durchlässigkeit drastisch.

HUMER: Sie haben erzählt, daß Pflanzen direkt an die Kunststoffolie herangehen...*unverständlich*... wenn sie. Zeit, Raum, Licht und Ruhe haben. Es ist allerdings bekannt, daß die Pflanzen, die Sie dort finden, kleinräumig die Chemie des Bodenwassers durch Wurzelausscheidungen verändern können, die ...*unverständlich*... Ausscheidungen. Gibt es Untersuchungen mit derartigen Wässern, wie lange die Bahnen unter deren Einfluß halten?

MELCHIOR: Untersuchungen mit Sekreten, die die Wurzel ausscheidet, um sich Nährstoffe zu erschließen, sind mir nicht bekannt. Sie sind auch kaum möglich, weil man die Menge an Sekret für einen solchen Test wohl kaum generieren kann. Es gibt aber eine Fülle von Untersuchungen zur Medienverträglichkeit von PE-Bahnen, die durch den Einsatz solcher Dichtungsbahnen in der Basisdichtung veranlaßt waren, und da hat man mit konzentrierten Laugen, Säuren und allen möglichen Flüssigkeiten geprüft und es gibt, glaube ich, in der ganzen Deponietechnik kein Konstruktionselement, das gerade auf chemische Angriffe hin so ausführlich untersucht worden ist wie Kunststoffdichtungsbahnen auf PE-Basis. Die Debatte ist mittlerweile geklärt, die Schätzungen, wie lange sie halten, gehen auseinander; aber der Mindestzeitraum der Haltbarkeit, der in den USA, aber auch in Deutschland, vertreten wird, ist 80 - 90 Jahre.

HUMER: Aber keine Praxisuntersuchungen?

MELCHIOR: Es gibt Zeitrafferversuche, die bei Hoechst an PEHD-Rohren unter Beaufschlagung mit Druck und erhöhter Temperatur seit Jahrzehnten durchgeführt werden. Aus bestimmten mechanischen Parametern leitet man mit speziellen Extrapolationsverfahren die Alterung und die Beständigkeitsdauer ab. Über dieses Vorgehen und die genannten Funktionszeiträume gibt es relativ weiten Konsens. Einige Fachleute gehen von noch sehr viel längeren Beständigkeiten aus. Ich bin frei von Lieferinteressen, und es würde mich nicht überraschen, wenn noch neue Versagensmechanismen durch kombinierte Einwirkung von Druck, Zug, Pflanzenwurzeln oder chemische Stoffe bekannt würden. Ob Schäden entstehen, ist aber in der Oberflächenabdichtung leicht prüfbar. Man muß einen Spaten in die Hand nehmen, ein kleines Stück herausnehmen, und man macht Zugversuche und andere Versuche, mit denen man die Beschaffenheit des PE, das man ja vom Einbau her sehr gut kennt, überprüft. Man kann die Alterung sehr gut erkennen, schon ehe es zum Totalversagen kommt.

Ich gehe damit völlig d'accord, daß man, wenn man die umweltverträgliche Deponie haben will, die Abfälle betrachten muß und das che-

mische Milieu, in dem sie liegen, und zweitens die Durchströmung, die sie erfahren können. Nur so kann man sich einer nachsorgefreien Deponie annähern. Ob man sie je erreichen wird, weiß ich nicht, aber bei all den Fällen, wo wir das nicht mehr tun können, weil der Dreck schon da liegt, muß man technische Systeme wählen. Die Oberflächenabdichtung kann man kontrollieren und kann man auch reparieren. Es gibt Systeme, die das leisten.

**BLÜHBERGER:** Nachdem Sie uns heute erklärt haben, daß Kombinationsdichtungen eigentlich nur an dieser Kunststoffdichtungsbahn wirksam sind, und die mineralische Dichtung nach kurzer Zeit eigentlich nicht mehr funktioniert, stellt sich die Frage, ob man diesen Aufwand für die Abdichtung überhaupt noch treiben soll oder ob man nicht Kapillarschichten oder andere Materialien als Unterschicht für Kunststoffdichtungsbahnen verwendet.

**MELCHIOR:** Ich weise auf die Gefährdung der mineralischen Dichtung hin. Es gibt wenige Fälle, die so untersucht sind wie Hamburg - Georgswerder und da haben wir diese Ergebnisse nun, und das Fazit daraus ist, es gibt eine deutliche Gefährdung der mineralischen Dichtung. Es würde mich nicht überraschen, wenn es irgendwo im Voralpenbereich bei 2000mm Niederschlag und bei einer Rekultivierungsschichtmächtigkeit von 2,5 m mineralische Dichtungen gibt, die gut funktionieren. Ich sage nicht, daß jede mineralische Oberflächenabdichtung in diesem Zeitraum, in dem wir sie beobachtet haben, kaputtgehen muß, wir können es aber auch nicht sicher ausschließen.

Zum finanziellen Aufwand: Kosten haben wir gar nicht angesprochen. Ich habe hier eine Folie, die die Kosten eines Projektes 1994 zeigt - da hat sich nicht viel geändert. Für eine Abdeckung, die insgesamt 88 Mio. DM geko-

stet hat, gibt spezielle Kosten, die in Fußpunkteinrichtungen, Gebäude, Infrastruktur gehen. Wenn man die herausnimmt und sich die Kosten des reinen Abdecksystems ansieht, dann sind die weniger als die Hälfte, und man kommt in diesem Fall auf einen Quadratmeterpreis von 146 DM. Und wenn man sieht, was die einzelnen Elemente hier kosten, dann stellt man fest, daß hier die Rekultivierungsschicht mit 30 DM dabei ist, die Drainage mit der Filterschicht mit 20 DM, die PEHD-Dichtung mit 36 DM, (das ist mittlerweile deutlich weniger geworden, die liegen im Moment verlegt zwischen 20,- und 25 DM), die mineralische Dichtung mit 27 DM, (das ist eher teurer geworden, weil man mittlerweile kompliziertere Einbautechniken anwendet). Sie sehen also, das Dichtungssystem kostet nur einen Bruchteil der gesamten Maßnahmen und die Kunststoffdichtungsbahn ist wie jedes andere Element, auch eine Kapillarsperre, kostenmäßig in diesem Rahmen, da sind die Kosten nicht so sehr differenziert. Man muß wirklich im Einzelfall überprüfen, was sind die Einwirkungen, was sind die Randbedingungen, und was ist unter diesen speziellen Rahmenbedingungen das technisch geeignetste System.

**NEGENDANK:** Ein Schieferdach aus spanischem Schiefer kostet etwa 160 DM, ein normales Dach aus deutschem Dachschiefer kostet 250 DM. Das heißt also, es ist so teuer, wie ein normales Dach über einem Haus.

**MELCHIOR:** Das Dach ist noch ein bißchen teurer, auf diesen Flächen schwer zu installieren und herzustellen, mit hohem Aufwand zu warten, Lebewesen, Mäuse, Menschen, kommen unter das Dach in ein entsprechendes Milieu mit Deponiegas usw.. Das Problem ist also nicht ganz leicht mit einer Überdachung zu lösen; aber rein von den Herstellungskosten her haben Sie recht.

**Diskussionsbeiträge von:**

*Ing. cand phil. Günther BLÜHBERGER*  
 Universität Wien  
 Inst. f. Geologie  
 Geozentrum  
 Althanstraße  
 1090 Wien

*Dr. W. ENTENMANN*  
 IGB Ingenieurbüro  
 Heinrich Hertz Straße 116  
 D-22083 Hamburg

*Dipl.Ing. Marion HUMER*  
 Abt. Abfallwirtschaft - IGWA  
 Universität f. Bodenkultur  
 1190 Wien

*Dr. Chr.P. KISTEN*  
 Abfallwirtschafts-  
 u. Umweltdienstleistungs GmbH  
 Hennickendorfer Chaussee 18-20  
 D-15344 Strausberg

*Dr.St. MELCHIOR*  
 IGB Ingenieurbüro  
 Heinrich Hertz Straße 116  
 D-22083 Hamburg

*Univ.Prof. Dr. Dipl.Geol. Jörg. F. W.*  
 NEGENDANK  
 GeoForschungsZentrum Potsdam  
 Aufgabenbereich 3  
 "Struktur und Evolution der Lithosphäre"  
 Telegrafenberg  
 D-14473 Potsdam

*Universität Potsdam*  
 Inst. für Geowissenschaften  
 Postfach 60 15 53  
 14415 Potsdam

*Dipl.Ing Thomas STEIRER*  
 Kommunalkredit Austria  
 Türkenstraße 9  
 1090 Wien

*Univ.Prof. Dr. Walter VORTISCH*  
 Inst. f. Geowissenschaften  
 Prospektion u. Angewandte Sedimentologie  
 Montanuniversität Leoben  
 A - 8700 Leoben



Barbara-Gespräche Payerbach 1998	Band 5	"Abfallentsorgung aus erdwissenschaftlicher Sicht" "Klima - Entwicklung"	Seite 79- 82	Payerbach 2001
-------------------------------------	--------	---	-----------------	-------------------

# BARBARA-GESPRÄCHE

## Payerbach 1998

Die thermische Abfallverwertung im Umweltvergleich

K. SCHEIDL



Payerbach,  
18. September 1998

**Anmerkung der Redaktion:**

Da das Originalmanuskript der Langfassung zum Zeitpunkt der Drucklegung nicht vorgelegen ist, findet hier die beim Vortrag aufgelegte Kurzfassung Verwendung.

*Anschrift des Verfassers:*

*Dipl.Ing. Dr. Kurt SCHEIDL  
Staatlich befugter und beeideter  
Zivilingenieur für technische Chemie*

*Wernerstraße 12  
A - 7000 Eisenstadt*

# Die thermische Abfallverwertung im Umweltvergleich

K. SCHEIDL

*Kurzfassung*

Für die Verwertung / Behandlung / Entsorgung von Abfällen stehen verschiedene Möglichkeiten beziehungsweise Verfahren mit unterschiedlichen Umweltauswirkungen zur Verfügung. Aus der Vielzahl an Abfällen soll Restmüll beispielhaft herangezogen werden, um bilanzielle Betrachtungen betreffend der Umweltrelevanz der verschiedenen Entsorgungswege anzustellen. Aufgrund des komplexen Themenbereiches sind abschließende Aussagen nicht ohne gewisse Unsicherheiten zu treffen, wobei ein wesentlicher Teil der Überlegungen auch die Darstellung von offenen Fragen umfaßt.

Das Ziel der Betrachtungen stellt nicht das Herausarbeiten von Gegensätzen dar, was bei kontroversiellen Diskussionen in der Öffentlichkeit häufig stattfindet, sondern der Versuch, mittels sachlich nachvollziehbarer Bewertungsmaßstäbe Umweltvergleiche auszuführen. Besonderes Augenmerk soll dabei auch auf mögliche gegenseitige Ergänzungen der unterschiedlichen Verfahren gelegt werden.

Bei den betrachteten Verfahren zur Verwertung / Behandlung / Entsorgung von Restmüll handelt es sich um folgende Möglichkeiten:

Deponierung ohne Vorbehandlung

Verbrennung des gesamten Restmülls

Mechanisch-biologische Abfallbehandlung

- Verbrennung / Mitverbrennung der heizwertreichen Fraktion
- biologische Behandlung der kompostierbaren Fraktion

Eine Darstellung der im Zusammenhang mit der Mitverbrennung von Abfällen in industriellen Anlagen auftretenden Problembereiche soll den Umweltvergleich ergänzen.

Die unterschiedlichen Verfahren werden anhand der verursachten Emissionen über die Pfade Luft, Wasser und Boden verglichen, wobei der Qualität der Rückstände aus den einzelnen Verfahren ein wesentlicher Teil bei der Umweltbewertung zukommt. Verschiedene Optionen der Rückstandsbehandlung wie Verfestigung und Immobilisierung mit Tonmineralien sollen ebenfalls einbezogen werden.

In der nachstehenden Matrix werden die einzelnen Verfahren und die Beurteilungsbereiche dargestellt, wobei Bereiche, welche aus Umweltsicht keine oder keine nennenswerten Probleme darstellen, mit dem Symbol „3“, gekennzeichnet sind und solche, in welchen Probleme gesehen werden mit dem Symbol „P“, versehen sind.

Im Bereich der Behandlung von Rückständen aus der thermischen Verwertung von Abfällen stellen sich im Hinblick auf eine umweltgerechte Verwertungs- beziehungsweise Entsorgungsmöglichkeit noch offene Fragen.

Zusammenfassend kann davon ausgegangen werden, daß nach Klärung der jeweiligen offenen Fragen verschiedene Verfahren zur Restabfallbehandlung umweltgerechte Lösungsmöglichkeiten darstellen.

Verfahren	verfahrensbedingte Emissionen			Rückstände	
	Luft	Wasser	Boden	ohne Beh.	mit Beh.
Deponierung ohne Vorbehandlung	P	P	P		
Verbrennung des gesamten Restmülls	✓	✓	✓	P	✓ ?
Mechanisch-biologische Abfallbehandlung					
Verbrennung der heizwertreichen Fraktion (Abfallverbrennung)	✓	✓	✓	P	✓ ?
Mitverbrennung der heizwertreichen Fraktion (Mitverbrennung in industriellen Anlagen)	P	✓	✓	P	✓ ?
biologische Behandlung der kompostierbaren Fraktion	P	✓	✓	✓ / P	✓

Barbara-Gespräche Payerbach 1998	Band 5	"Abfallentsorgung aus erdwissenschaftlicher Sicht" "Klima - Entwicklung"	Seite 83- 92	Payerbach 2001
-------------------------------------	--------	---	-----------------	-------------------

# BARBARA-GESPRÄCHE

## Payerbach 1998

### Langfristiges Deponieverhalten von Müllverbrennungsschlacken

H. HUBER  
M. JAROS  
P. LECHNER



Payerbach,  
18. September 1998

**INHALT**

1	Einleitung	85
2	Säureneutralisationskapazität	85
3	Chemische Veränderungen der Schlacke im Verlauf der Alterung	86
4	Auswirkungen der Alterungsprozesse auf die Säurepufferkapazität	87
5	Auswirkung von Niederschlagswasser auf die SNK	88
6	Zusammenfassung und Ausblick	89
7	Literatur	89
	Diskussion	91

*Anschrift der Verfasser:*

*Dipl.Ing. H. HUBER*

*Dipl.Ing. M. JAROS*

*Univ.Prof. Dr. P. LECHNER*

*Abteilung Abfallwirtschaft*

*Universität für Bodenkultur Wien*

*Nußdorfer Lände 29 - 31*

*A - 1190 Wien*

# Langfristiges Deponieverhalten von Müllverbrennungsschlacken

H. HUBER  
M. JAROS  
P. LECHNER

## 1 Einleitung

Das österreichische Abfallwirtschaftsgesetz (AWG §1, Absatz 1) fordert, daß nur reaktionsarme Abfälle abgelagert werden dürfen, welche nach dem Vorsorgeprinzip keine Gefährdung für nachfolgende Generationen darstellen. BACCINI & LICHTENSTEIGER (1989) beschreiben einen solchen Abfall als fest, anorganisch, in oxidierten Form und in Wasser schwerlöslich. Die Rückstände aus Müllverbrennungsanlagen erfüllen aber nur zum Teil diese Anforderungen. Frische Schlacke direkt aus dem Naßentschlacker zeigt zum Teil noch sehr hohe Restreaktivität.

Durch den Kontakt mit Wasser kommt es zur Hydratation der Alkali- und Erdalkalioxide, Oxidation von metallischem Aluminium unter Wasserstoffentwicklung und der Bildung von Sulfoaluminaten, Eisenkorrosion, sowie Sulfidoxidation unter Bildung von Schwefelsäure. Diese zum Teil stark exothermen Prozesse führen in einer Schlackemonodeponie zu einer Erwärmung auf bis zu 90°C und können dadurch das Deponiebasissystem beschädigen. Im weiteren Verlauf kommt es durch eindringendes Kohlendioxid aus der Atmosphäre in die Deponie zur Karbonatisierung von Alkali- und Erdalkalihydroxide und durch Niederschlagswasser zur Auswaschung von leichtlöslichen Salzen und Puffersubstanzen.

Langfristige Alterungsvorgänge wie die Verwitterung amorpher Glasphasen, Bildung von Kalzium-(Aluminium)-Silikat-Hydrat-Phasen (sog. C-(A)-S-H-Phasen) und Kristallneubildungen (z.B. Ettringit), sowie ihre Auswirkung auf die Schwermetallmobilität sind derzeit nur in Ansätzen bekannt (ZEVENBERGEN et al., 1995).

Ein Schlagwort, das bei der Untersuchung des langfristigen Deponieverhaltens (Jahrhunderte bis Jahrtausende) immer wieder auftaucht (JOHNSON, 1993) ist der „Zeitbombeneffekt“. Nach Absinken des pH-Wertes in den sauren Bereich könnte es zu einer erhöhten (toxikologisch relevanten) Freisetzung von Schwermetallen kommen. Um den Einfluß der wesentlichsten Alterungsprozesse auf die Schwermetallmobilität und die Säureneutralisationskapazität zu untersuchen, wurde im Rahmen eines zweijährigen Forschungsprojektes an der Universität für Bodenkultur MVA-Schlacke im Labor künstlich gealtert. (HUBER & JAROŠ, 1997).

## 2 Säureneutralisationskapazität

In humiden Klimaten nimmt durch den ständigen Eintrag von Säuren (bzw. Protonen H<sup>+</sup>) in die deponierte Schlacke der pH-Wert im Laufe der Zeit allmählich ab. Es kommt also zur Versauerung. Die Geschwindigkeit der Versauerung hängt außer vom H<sup>+</sup>-Anfall vor allem von der Kapazität der Schlacke ab, Säuren zu neutralisieren, welche als Säureneutralisationskapazität (SNK oder Säurepufferkapazität) bezeichnet wird. Sie ist somit ein Maß für die „Widerstandskraft“ der Schlacke gegenüber pH-Wert-absenkenden Prozessen in der Deponie.

Die Untersuchungen von HIRSCHMANN & FÖRSTNER (1997) zeigen, daß erst unterhalb des neutralen pH-Bereichs mit einer erhöhten Schwermetallfreisetzung zu rechnen ist. Die bis zu diesem pH-Wert interessierenden wesentlichsten Pufferbereiche bzw. Puffersubstanzen sind die Hydroxide und Karbonate der Alkali-

und Erdalkalielemente (v.a. Portlandit  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  und Kalzit  $\text{CaCO}_3$ ).

Die entscheidende Frage ist nun, wie hoch der Einfluß der oben genannten Alterungsprozesse auf die Säureneutralisationskapazität der Schlacke ist und ab welchem Zeitraum mit einer vermehrten Freisetzung von Schwermetallen gerechnet werden muß?

### 3 Chemische Veränderungen der Schlacke im Verlauf der Alterung

#### Hydratation

Im Naßentschlacker reagieren die während der Verbrennung gebildeten Alkali- und Erdalkalioxide mit Wasser zu basischen Hydroxiden. Als mengenmäßig wichtigstes Oxid ist  $\text{CaO}$  (Freikalk) zu nennen, wobei beim sog. Kalklöschen  $\text{CaO} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Ca}(\text{OH})_2$  Portlandit entsteht und eine Wärme von 65,2 kJ/mol frei wird. Hydratationsprozesse sind aufgrund ihres stark exothermen Charakters neben der Metallkorrosion für das Entstehen der hohen Temperaturen in der Deponie verantwortlich. Auch die hohen pH-Werte von 12 bis 13 in der Schlacke sind auf die Bildung und gute Wasserlöslichkeit von Alkali- und Erdalkalihydroxide zurückzuführen.

#### Karbonatisierung

Um das gebildete Portlandit konkurrieren im Verlauf der Alterung im wesentlichen zwei Reaktionen. Durch den Eintrag von Kohlendioxid in die feuchte Schlacke wird das vorhandene leicht lösliche Portlandit ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) zu Kalzit ( $\text{CaCO}_3$ ) umgewandelt, welches aufgrund seiner geringeren Löslichkeit ausfällt. Durch vollständige Karbonatisierung bei atmosphärischem  $\text{CO}_2$ -Partialdruck sinkt der pH-Wert nach Gleichgewichtseinstellung auf 8,3.



Bei  $\text{CO}_2$ -Mangel werden statt dessen aus Portlandit und amorpher Kieselsäure  $\text{SiO}_2$  vorwiegend Kalzium-(Aluminium)-Silikat-Hydrat-Phasen sog. C-(A)-S-H-Phasen gebildet (=festigkeitsbestimmender Prozeß bei der Aushärtung von Beton). Untersuchungen an 10

Jahre alter Schlacke aus der Deponie Riet in der Schweiz legen nahe, daß bei der Deponierung von frischer, wenig karbonatisierter Schlacke die zweite Reaktion bevorzugt abläuft. Dabei nimmt die Säurepufferkapazität bis pH 7 deutlich ab, da die neu gebildeten Phasen im alkalischen Bereich nur in geringem Ausmaß puffern. Allerdings sind diese Kalzium-Silikate bei Anwesenheit von nur geringsten Mengen an  $\text{CO}_2$  thermodynamisch instabil und reagieren dann langsam weiter zu Kalziumkarbonat und Kieselsäure (JOHNSON, 1992).

Eine wichtige Frage, die sich nun stellt, ist die Geschwindigkeit dieser Reaktionen. Aus Untersuchungen an Kohleflugasche (SABBAS, 1995) ist bekannt, daß die C(A)SH-Phasenbildung sehr rasch vor sich gehen kann. Bei Vorliegen von feinem reaktionsfähigem Material kann dies bereits innerhalb von Stunden erfolgen. Über die Geschwindigkeit der Karbonatisierung in MVA-Schlacke ist einerseits bekannt, daß bei einjährigen Ablagerungen von Schlacke die Karbonatisierungstiefe auf die ersten 10 - 20 cm begrenzt ist (MARZI et al., 1998). Andererseits berichtet KIESER et al. (1995) von einer Schlackeablagerung, in der 5 bis 25 Jahre alte Schlacke aus unterschiedlicher Tiefe bereits einen pH-Wert von 8,2 bis 9,8 aufweist. In den Versuchen mit künstlicher Alterung durch anaerobe feuchte Lagerung von MVA-Schlacke über mehrere Monate konnte keine Abnahme der SNK gemessen werden (HUBER & JAROŠ, 1997). Ob dies mit der kurzen Lagerungszeit oder mit der bereits fortgeschrittenen Karbonatisierung zusammenhängt, ist derzeit noch unklar.

#### Oxidation von Sulfiden und elementaren Metallen

In der Schlacke vorhandene Sulfide können oxidiert werden, wobei versauernde Protonen freigesetzt werden. Der Sulfidgehalt der frischen Schlacke lag bei 1,5 g/kgTS. Bei der künstlichen Alterung der Schlacke konnte sowohl bei der Begasung mit Luft, als auch im anaeroben Milieu eine rasche Abnahme der Sulfidkonzentration von bis zu 1 g/kg TS Schlacke innerhalb von 2 Monaten festgestellt werden. Hohe pH-Werte und Sauerstoffzufuhr scheinen die Sulfidoxidation zu begünstigen.

### Mikrobielle Aktivität

Die Bestimmung des mikrobiellen Abbaus von organischem Restkohlenstoff in der Schlacke erfolgte im aeroben Milieu über die Messung der Atmungsaktivität im Sapromat. Um zwischen mikrobiellem und anorganischem Sauerstoffverbrauch unterscheiden zu können, wurde jeweils eine der im Sapromat untersuchten Proben mit Natriumazid vergiftet. Aus der Differenz der beiden Summenkurven konnte ein mikrobieller Sauerstoffverbrauch von ca. 2 gO<sub>2</sub>/kg TS Schlacke festgestellt werden. Das entspricht umgerechnet etwa 700 mg verfügbaren Kohlenstoff je kg Schlacke. Im Eluat nach ÖN S2072 wurde ein vergleichbarer DOC (= der in Wasser lösliche, organische Kohlenstoff) von bis zu 500 mgC/kg gemessen. Zusammenfassend kann gesagt werden, daß unter der Voraussetzung eines guten Ausbrandes in der MVA (<3%TOC) nur ein geringer Anteil des gesamten TOC mikrobiell verfügbar ist.

## 4 Auswirkungen der Alterungsprozesse auf die Säurepufferkapazität

Die künstlich forcierte Alterung von MVA-Schlacke zeigte, daß interne, chemische Alterungsprozesse wie die Oxidation von Sulfiden und organischem Kohlenstoff die SNK bis zum (relevanten) pH-Wert von 6,5 nicht maßgeblich abzusenken vermögen (siehe Tabelle 1).

Das bedeutet, daß langfristig nur durch Eintrag von Niederschlagswasser in die Deponie und Auswaschung von Säurepufferkapazität, eine pH-Wertabsenkung unter den Neutralpunkt erfolgen kann. Aufgrund der experimentell bestimmten SNK von MVA-Schlacke und bekannter Säureeintrags- und Säurebildungs-raten sowie Basenauswaschung läßt sich die Dauer bis zur Unterschreitung jenes pH-Wertes abschätzen, ab welcher relevante Mengen an Schwermetallen ausgewaschen werden können.

	Gehalt in der Schlacke in g/kg	gebildete Protonen in mol/kg	Verringerung der SNK bis pH 8,3	Verringerung der SNK bis pH 6,5	Verringerung der SNK bis pH 4,0
<b>Gesamt-SNK</b>			1,2 mol/kg	2,2 mol/kg	3,9 mol/kg
<b>Sulfidoxidation</b>					
<b>maximal</b>	1,5 g/kg	0,09 mol/kg	8%	4%	2%
<b>gemessene</b>	1 g/kg	0,06 mol/kg	6%	3%	1,5%
<b>Abbau von organischem Material</b>					
<b>maximal (= TOC)</b>	11,6 g/kg	1,9 mol/kg	161%	73%	50%
<b>gemessen (= DOC)</b>	0,7 g/kg	0,12 mol/kg	10 %	5%	3%
<b>Karbonatisierung</b>					
<b>theoretisch</b>			100%	0%	0%
<b>gemessen</b>			73%*	1%	0,5%
<b>Auswaschung</b>					
<b>mit L/S = 10 l/kg</b>			42% *	13%	7%

\* ... Der Unterschied zwischen Berechnung und Messung ergibt sich aus der unvollständigen Karbonatisierung der Schlacke in Originalkorngröße nach CO<sub>2</sub>-Begasung.

**Tabelle 1: Auswirkung der untersuchten Alterungsprozesse auf die SNK**

## 5 Auswirkung von Niederschlagswasser auf die SNK

Um den Einfluß von Niederschlagswasser und Auslaugung auf die SNK abzuschätzen, wurde eine Modellrechnung mit den in Tabelle 2 getroffenen Annahmen durchgeführt. Der in die Deponie eindringende Niederschlag (=Versickerungsmenge) stellt dabei die ausschlaggebende Größe dar. In Österreich gibt es hinsichtlich der meteorologischen Verhältnisse große Unterschiede, weshalb zwei Extremstandorte ausgewählt wurden (HUBER, 1995). Als niederschlagsarm (arides Klima) mit hoher potentieller Evapotranspiration kann das Gebiet Großenzersdorf östlich von Wien bezeichnet werden. Im Gegensatz dazu gilt z.B. Salzburg als niederschlagsreich mit ca. 1400 mm pro Jahr und vergleichsweise geringer potentieller Evapotranspiration.

### Einfluß von saurem Niederschlagswasser

Geht man von einem pH von 4 im Niederschlag aus, ergibt sich für den Säureeintrag in die Deponie ein Wert von 0,04 mmol H<sup>+</sup> je kg Schlacke pro Jahr. Der Zeitraum, in welchem die SNK bis pH 6,5 (2,2 mol H<sup>+</sup> /kg TS Schlacke) durch Neutralisationsprozesse aufgebraucht ist, beläuft sich dabei auf 60.000 Jahre für Salzburg und 12.000.000 Jahre für Großenzersdorf. Daraus ist zu erkennen, daß der Einfluß an pH-bildenden starken Säuren (HNO<sub>3</sub>, H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) im Niederschlag auf die Säurepufferkapazität der Schlacke vernachlässigbar klein ist.

### Auswaschung von Hydroxiden

Etwa 20% des untersuchten Puffervermögens bis pH 6,5 liegen in der Schlacke als Portlandit vor. Da dieser sehr gut wasserlöslich ist, kann es durch Auswaschung des hydroxidischen Pufferanteils in der Schlacke kommen. Der Auswaschung entgegen stehen aber Prozesse wie Karbonatisierung und Ettringitbildung. Da diese Reaktionen in der Regel wesentlich rascher erfolgen, ist die Gefahr einer Hydroxidwaschung vernachlässigbar.

### Auswaschung von Karbonaten

Die Geschwindigkeit des Kalzitaustrags ist im wesentlichen vom CO<sub>2</sub>-Partialdruck abhängig (SIGG & STUMM, 1996). Höhere CO<sub>2</sub>-Partialdrücke wären zum Beispiel denkbar, wenn der Niederschlag vor seinem Eindringen in die Deponie einen natürlichen, belebten Boden (z.B. in Form einer Deponieabdeckung) durchsickert und dort mit CO<sub>2</sub> angereichert wird. Die durchschnittliche CO<sub>2</sub>-Konzentrationen in der Bodenluft beträgt 0,2 bis 0,7 % (SCHACHTSCHABEL et al., 1992). Dabei stellen sich pH-Werte zwischen 7,8 und 7,4 ein. Tabelle 3 zeigt die Geschwindigkeit der Karbonatwaschung unter den gegebenen Milieubedingungen und in Abhängigkeit vom CO<sub>2</sub>-Partialdruck. Bei einem Anstieg des Partialdruckes auf 0,7 % wird das Karbonat fast dreimal so schnell ausgetragen. Erst wenn nur noch größere Kalksteinreste vorliegen, kann der pH-Wert im Porenwasser niedriger sein, als es dem Gleichgewicht entspricht, weil das Karbonat unregelmäßig verteilt und die reaktive Oberfläche stark verkleinert ist.

Scenario:	Salzburg	Großenzersdorf
Versickerungsmenge:	700 l/m <sup>2</sup> ,a	70 l/m <sup>2</sup> ,a
Perkolation durch die Deponie:	homogen	
Höhe der Deponie:	1 Meter	20 Meter
Ablagerungsdichte:	1,7 t/m <sup>3</sup>	
Infiltrationsrate:	0,4 l/kg,a	0,002 l/kg,a

**Tabelle 2: Gewählte Annahmen für die Modellrechnung**

Karbonatgesamtgehalt: 1 mol CO <sub>3</sub> / kg Schlacke			Szenario Sbg.	Szenario Gr.
CO <sub>2</sub> - Partialdruck	pH-Wert (nach Gleichgewichts- einstellung)	Löslichkeit von HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> [mol/l]	Dauer der Pufferauswaschung	
pCO <sub>2</sub> = 0,03 %	8,3	0,002	1300 Jahre	250 000 Jahre
pCO <sub>2</sub> = 0,2 %	7,8	0,004	700 Jahre	130 000 Jahre
pCO <sub>2</sub> = 0,7 %	7,4	0,005	500 Jahre	100 000 Jahre

**Tabelle 3: Zeitdauer der Pufferauswaschung**

Die Modellrechnung, die einen „Worst-Case“ darstellt, zeigt, daß die Zeiträume in denen mit einer relevanten pH-Wert-Absenkung zu rechnen ist, sehr lange sind, vor allem wenn man die Mächtigkeit von Schlackemonodeponien (10-20m) und freie Sickerwasserwege (Klüfte) zusätzlich berücksichtigt. Letztere führen zwar lokal zur einer schnelleren SNK-Abnahme, aber durch den Verdünnungseffekt ist mit geringeren Schadstoffkonzentrationen im Sickerwasser zu rechnen.

## 6 Zusammenfassung und Ausblick

Die Untersuchungen über die internen chemischen Vorgänge in der Schlacke und die Be-

rechnungen über die Auslaugbarkeit von Puffersubstanzen lassen einen prognostizierten Zeitbombeneffekt in den nächsten 5000 bis 10000 Jahren als sehr unrealistisch erscheinen. Aufgrund der Annahme der homogenen Durchströmung in der durchgeführten Modellrechnung muß die Aussagekraft über das Langzeitverhalten auf eine Schlackesäule mit einer Grundfläche von 1 m<sup>2</sup> beschränkt bleiben. Aber gerade die Unsicherheit der getroffenen Annahmen zeigen im speziellen die Notwendigkeit und die Schwerpunkte für weiteren Forschungsbedarf, vor allem hinsichtlich der Vorhersagbarkeit der zu erwartenden Sickerwasserqualität bei der Deponierung von Abfällen.

## 7 Literatur

BACCINI, P., LICHTENSTEIGER, T. (1989): The landfill reactor and final storage, Conclusions and outlook; Lecture Notes in Earth Sciences 20, Baccini, P. (Hrsg.), Springer V., Berlin, 427-431

HIRSCHMANN G., FÖRSTNER U. (1997): Langfristiges Deponieverhalten von Müllverbrennungsschlacken, BMBF-Verbundvorhaben Deponiekörper - Inerte Abfälle, Technische Universität Hamburg-Harburg, Arbeitsbereich Umweltschutz

HUBER H. (1995): Wasser-, Gas- und Stoffhaushalt der Mülldeponie; Diplomarbeit an der TU-Wien, Abteilung Abfallwirtschaft

HUBER H., Jaroš M. (1997): Emissionsverhalten von MVA-Schlacke nach forcierter Alterung, Waste Reports 6/97, Hrsg. Lechner P., Abteilung Abfallwirtschaft, Universität für Bodenkultur Wien

JOHNSON C.A. (1993): Chemische Eigenschaften und Langzeitverhalten der Müllschlacke, in Deponierung fester Rückstände aus der Abfallwirtschaft, Workshop Kartause Ittingen, Hrsg. Baccini u. Gamper, EAWAG Dübendorf und ETH Zürich

JOHNSON C.A. (1992): Alterungsprozesse in der Schlacke, In: Belevi, H., Johnson, A., Lichtensteiger, T., Zeltner, C., Emissionsabschätzung für Kehrichtschlacke - Projekt EKESA 1992, Seite 104-109

KIESER J., BEGAND S., HANKE W. (1996): Untersuchung kausaler Zusammenhänge zwischen Stoffwandlungsvorgängen und Temperaturverhältnissen in der MVA-Schlackedeponie Offenbach/M, Hessische Landesanstalt für Umwelt, Umweltplanung, Arbeits- und Umweltschutz, Heft 204

MARZI TH., PALITZSCH S., BECKMANN R., KÜMMEL R., BEARD A., KELDENICH K. (1998):

Wirkungsmechanismen bei der Alterung von Müllverbrennungsaschen, Müll und Abfall 5/98, S. 316-322

SCHACHTSCHABEL P., BLUME H.-P., BRÜMMER G., HARTGE K.-H., SCHWERTMANN U. (1992): Lehrbuch der Bodenkunde, 13. Auflage, Stuttgart

SIGG L., STUMM W.; (1996): Aquatische Chemie - Eine Einführung in die Chemie wässriger Lösungen und natürlicher Gewässer, 4., durchges. Aufl. - Zürich: vdf, Hochschulverl. an der ETH Zürich; Stuttgart: Teubner

SABBAS T. (1995): Verhalten von Wirbelschichtfeuerungsaschen im Laufe ihrer Stabilisierung, Dissertation an der Formal- und Naturwissenschaftlichen Fakultät der Universität Wien.

ZEVENBERGEN C., REEUWIJK VAN L.P., BRADLEY J.P., KEIJZER J., KROES R. (1995): Leaching of heavy metals from MSW incineration bottom ash in a disposal environment. In: Proceedings of Sardinia '95, Fifth International Landfill Symposium, Volume III, CISA Environmental Sanitary Engineering Centre, Cagliari/Sardinia, Italy

## DISKUSSION

Langfristiges Deponieverhalten von  
Müllverbrennungsschlacken

## Die thermische Abfallverwertung im Umweltvergleich

RIEHL-H.: Ich möchte darauf hinweisen, daß ich schon vor einigen Jahrzehnten darauf hingewiesen habe, daß eine Deponie an sich untersucht gehört und nicht Laboruntersuchungen das allein Seligmachende sind. Das wird jetzt nachträglich sehr spät zwar aber trotzdem bestätigt. Außerdem möchte ich die homogene Durchdringung einer Deponie ganz strikte in Abrede stellen.

HUBER: Das habe ich deutlich gesagt.

RIEHL-H.: Der Fehler wird immer wieder gemacht, wenn der Ansatz gewählt wird, eine Basisdichtung als Ganzes in Rechnung zu stellen, ein Spalt oder eine undichte Stelle im Müllkörper wird immer ausgeschwemmt sein, es wird zu "Verkarstungen" kommen, das hat man auch in Breitenau gesehen, und die Basisdichtung punktuell belasten. Vor Pauschalrechnungen, die eine gesamte homogene Durchströmung einer Deponie voraussetzen, kann man nicht eindringlich genug warnen.

HUBER: Die Untersuchungen im Labor sind wichtig, um die Schwerpunkte festzulegen, wo sind die Knackpunkte, wo finden die wichtigsten Prozesse statt, und das haben wir auch zeigen können, daß die Auswaschung der wichtigste Prozeß ist, und deshalb müssen wir jetzt unbedingt auf die Deponie gehen, um diese Prozesse zu untersuchen, um Vorhersagen über das langfristige Verhalten überhaupt machen zu können.

SCHEIDL: Ich habe selbst für den Standort ...**unverständlich**... an der Fischa die Untersuchungen ausgeführt für die Abnahme der Pufferkapazität, und die Zahlen decken sich nahezu. Das ist eine Modellrechnung, die im Labormaßstab und mit den Erfahrungen aus dem Labor möglich ist.

Ich habe dann versucht, war ein Sickerwasser zu modellieren, das habe ich zur Seite gelegt, es geht nicht. Wenn man das versucht, kommt

man darauf, daß man noch viel zu wenig Daten über die Abfälle hat, über die Wegigkeiten und und und...

Ich habe die Literatur auf Anhaltspunkte durchforstet, völlig unmöglich.

HUBER: Die biochemischen Modelle gehen immer von einem homogenen Material aus, deshalb muß man immer Modelle miteinander kombinieren, die auch die freien Sickerwasserwege mitberücksichtigen.

VORTISCH: Eine der wichtigen Fragen: bei den Schlacken Die Situation ...**unverständlich**... schlechter als die Glasphase. Gläser sind kurzzeitig relativ stabil, geologisch aber instabil und sogar die instabilste Materie, die die Erde selbst natürlich hervorbringen kann, das dürfen wir nicht vergessen. Das zweite, Sie haben eigentlich keine krustenähnliche Zusammensetzung, Sie haben sehr hohe CaO-Gehalte gehabt. Wissen Sie, woher die in Ihrem Fall bei einem Hausmüll stammen ?

HUBER: Die hohen Ca-Konzentrationen ?

VORTISCH: Die Oxidgehalte.

HUBER: Man muß hier sagen, es ist eigentlich nur als Calciumoxid dargestellt, ein Teil ist bereits Karbonat, ein Teil Hydroxid, ein Teil liegt als Gips vor, das ist kein reines Calciumoxid, das war, wie es eigentlich aus der Verbrennung kommen sollte.

VORTISCH: Wenn es vom Rost herunterkommt, ist es sicher Oxid und ein Teil Silikat.

HUBER: Sicher wird kein geringer Teil silikatisch vorliegen, etwa 40 - 50%.

VORTISCH: Was für die Stabilitätsbetrachtungen natürlich auch wichtig wäre.

HUBER: Das ist richtig. Gerade bei der Verwitterung von Gläsern hat ZEVENBERGEN einiges untersucht, 10-20 Jahre alte Schlacke, und hat sich die Glasphasen angesehen, und da konnte er wirklich an der Oberfläche dieser

gebildeten Gläser Verwitterung feststellen. Es findet eine Tonmineralbildung statt. Die Dicke dieser Mineralbildung beschränkt sich aber auf Nanometer, das möchte ich bewußt betonen.

VORTISCH: 10-20 Jahre ist keine allzulange Zeit.

HUBER: Man kann hochrechnen.

UNBEKANNT: Darf ich vielleicht darauf hinweisen, daß ich die hohe Silikatbildungsrate sehr bezweifle, und zwar aus dem ganz einfachen Grund, man würde bei Zementklinkerbrand nicht auf 1450°C Brenntemperatur hochgehen müssen, um genau diese Reaktion erzielen zu können. Die setzt eigentlich nicht bei 850°C wirklich ein. Wenn wir einen Zementdrehofen vergleichen, als Modell betrachtet, da haben wir bei 850°C höchstens eine Karbonatreaktion, außer, man hat bereits vorher Silikat drinnen, aber normalerweise ist diese Sinterbildung, die ja mit der Calciumsilikatbildung verbunden ist, bei dieser Temperatur noch nicht sehr wahrscheinlich.

Ich bin kein Geologe, aber ich habe zu lange Zement gebrannt, da weiß ich viel darüber, es ist eher sehr unwahrscheinlich.

HUBER: Es finden sich auch fast keine glasierten Phasen, das Glas, das gefunden wird, ist eigentlich Flaschenbruch.

VORTISCH: Orthoklas- und Wollastonitbildung ist bei diesen Temperaturen nicht möglich.

UNBEKANNT: Bei diesen Temperaturen nicht. Was wahrscheinlich ist, daß wir eine

erhöhte Sulfatbildung haben, also Calciumsulfat, das liegt genau im Bereich des Anhydrits.

VORTISCH: Wobei der Ettringit das Problem hat, daß er in der Löslichkeit ähnlich wie Gips ist und zunächst als Speichermineral Schadstoffe erheblich aufnehmen kann und dann eine Stabilität vortäuschen kann. Darum gibt es ja Leute, die Gips oder Ettringit gerne für eine Ablagerung als Speichermineral verwenden möchten, der aber in Wirklichkeit natürlich keine stabile Phase darstellt. Die Frage ist, haben Sie die Ettringit-Instabilität bei Ihren Untersuchungen mit berücksichtigen können ?

HUBER: In die Mineralogie konnte ich mit diesem Projekt nicht gehen, aber wenn Sie auf den Gips hinweisen, wir haben die Schlacke intensiv mit CO<sub>2</sub> begast, wir haben gerade den Einfluß des CO<sub>2</sub> in den natürlichen Prozessen vorweggenommen und hier findet wirklich eine Umwandlung des Gipses in Karbonat, also eine Umfällung statt, und dann haben wir plötzlich die hohen Sulfatkonzentrationen gefunden, die man aus den Schlacken- ich denke jetzt in Richtung Behandlung - mit Laugung eigentlich nicht herausbekommt. Erst nach einer Alterung könnte man höhere Sulfatkonzentrationen auslaugen.

VORTISCH: Ettringit ist ein Problem, das man im Auge behalten sollte, auch wenn der bei diesem Verfahren unter Umständen noch nicht zur Verfügung steht, aber gerade er neigt dazu, erst nach längerer Zeit in Lösung zu gehen.

### **Diskussionsbeiträge von:**

*Dipl.Ing. H. HUBER*

*Abteilung Abfallwirtschaft  
Universität für Bodenkultur Wien  
Nußdorfer Lände 29 - 31  
A - 1190 Wien*

*Dr. Georg RIEHL - H*

*Hauptstraße 70  
A - 2801 Katzelsdorf*

*Dipl.Ing. Dr. Kurt SCHEIDL*

*Staatlich befugter und beedeter  
Zivilingenieur für technische Chemie  
Wernerstraße 12  
A - 7000 Eisenstadt*

*Prof. Dr. Walter VORTISCH*

*Inst. f. Geowissenschaften, Prospektion  
u. angewandte Sedimentologie  
Montanuniversität Leoben  
A - 8700 Leoben*

Barbara-Gespräche Payerbach 1998	Band 5	"Abfallentsorgung aus erdwissenschaftlicher Sicht" "Klima - Entwicklung"	Seite 93 - 106 Abb. 1 - 6	Payerbach 2001
-------------------------------------	--------	---	------------------------------	-------------------

# BARBARA-GESPRÄCHE

## Payerbach 1998

Deponiebürtige Methanemissionen und deren Vermeidung

M. HUMER  
D. GRASSINGER  
P. LECHNER



Payerbach,  
18. September 1998

**INHALT**

1	Methanbildung und Methanmengen	95
2	Vermeidung deponiebürtiger Methanemissionen	97
3	Mechanisch-biologische Vorbehandlung	98
4	Methanoxidation in Deponieabdeckschichten	99
5	Zusammenfassung	102
	Literatur	102
	Diskussion	103

*Anschrift der Verfasser:**Dipl.Ing. Marion HUMER**Dipl.Ing. D. GRASSINGER**Univ.Prof. Dr. Peter LECHNER**Abteilung Abfallwirtschaft**Universität für Bodenkultur Wien**Nußdorfer Lände 29 - 31**A - 1190 Wien*

# Deponiebürtige Methanemissionen und deren Vermeidung

M. HUMER, D. GRASSINGER, P. LECHNER

## 1 Methanbildung und Methanmengen

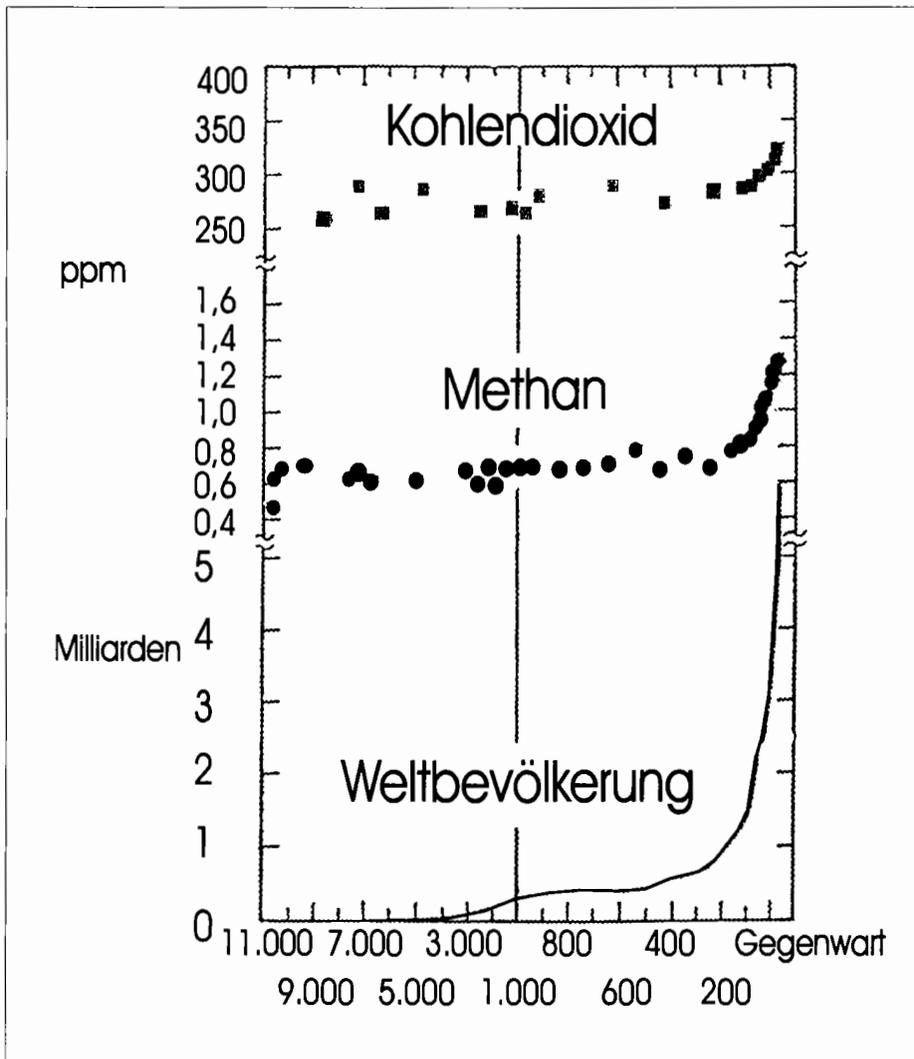
Bei der Ablagerung von Hausmüll wird durch den mikrobiellen Abbau der organischen Inhaltsstoffe unter Luftabschluß Deponiegas gebildet. Aus einer Tonne abgelagertem Müll können in Abhängigkeit des Gehalts an abbaubarem Kohlenstoff rund 120 bis 250 m<sup>3</sup> Deponiegas freigesetzt werden. Dieses besteht zu ca. 60 % aus Methan und 40 % Kohlendioxid mit geringem Anteil an Spurenstoffen. Deponiegas

entsteht bereits wenige Wochen bis Monate nach der ersten Müllablagerung.

Auf geordneten Deponien wird dieses Gas in der Regel über technische Entgasungsanlagen entsorgt. Allerdings können technische Entgasungsanlagen erst nach dem Abschluß eines Deponieabschnittes wirkungsvoll in Betrieb gehen. Zu diesem Zeitpunkt ist aber bereits ein Großteil des Deponiegases in die Atmosphäre entwichen.

Tab. 1: Globale Emissionen von Methan in Millionen Tonnen (nach Deutscher Bundestag 1990)

	Millionen Tonnen CH <sub>4</sub> pro Jahr	
<b>Natürliche Quellen</b>		
Feutgebiete (Moore, Sümpfe, Tundra)	115	(50-200)
Ozeane	10	(5-20)
Seen	5	(1-25)
Zersetzung von CH <sub>4</sub> Hydraten	5	(0-100)
Termiten und andere Insekten	40	(10-100)
Fermentation (durch wildlebende Wiederkäuer)	5	(2-8)
alle natürlichen Quellen	<b>180</b>	<b>(68-453)</b>
<b>Anthropogene Quellen</b>		
Reisfelder (Naßreis)	130	(70-170)
Fermentation durch Wiederkäuer (Viehhaltung)	75	(70-80)
Mülldeponien	40	(20-60)
Verbrennung von Biomasse	40	(20-80)
Erdgas-Verluste bei der Gewinnung und Verteilung	30	(10-50)
Kohlebergbau	35	(10-80)
alle anthropogenen Quellen	<b>350</b>	<b>(200-520)</b>
unbekannte fossile Quellen	60	
alle Quellen	<b>590</b>	<b>(268-973)</b>



**Abb. 1:** Konzentrationszunahme an Methan und Kohlendioxid im Vergleich zum Anstieg der Weltbevölkerung; nach JACOBSON und FIROR (1992) zitiert bei KRAPFENBAUER (1995)

In den letzten Jahrzehnten zeigt sich ein kontinuierlicher Anstieg des Methangehaltes der Atmosphäre mit einem Zuwachs von ca. 1 % pro Jahr. Luft einschüsse in Eisbohrkernen von Grönland ließen erkennen, daß der Methangehalt der Atmosphäre vor 1800 bei ca. 0,8 ppm lag und seither korrelierend mit dem Bevölkerungswachstum auf derzeit rund 1,7 ppm angestiegen ist (siehe Abbildung 1).

In Österreich wurden in den letzten Jahren ca. 640.000 t Methan pro Jahr (Stand 1995) emittiert. Davon stammen rund 30%, das sind ca. 185.000 t, aus Deponien und Altablagerungen. Weltweit werden jährlich geschätzte 40 - 60 Mio t Methan aus Müllablagerungen in die Atmosphäre freigesetzt. Damit liegen Deponien

an dritter Stelle des vom Menschen verursachten Methanausstoßes (Tab. 1).

Das auf diese Weise gebildete Kohlendioxid ist klimaneutral, da es meist biogenen Ursprungs ist und über den Photosynthesekreislauf von den Pflanzen wieder aufgenommen und gebunden werden kann. Das Methan hingegen kann nicht von Pflanzen aufgenommen werden und ist - wenn es einmal in die Atmosphäre freigesetzt wird - über einen Zeitraum von ca. 10 Jahren klimarelevant. Weiters ist eine Masseneinheit Methan aufgrund seiner physikalischen und luftchemischen Eigenschaften um den Faktor 21 treibhauswirksamer als eine Masseneinheit Kohlendioxid.

## 2 Vermeidung deponiebürtiger Methanemissionen

Abfallwirtschaftliche Maßnahmen zur Reduktion bzw. Vermeidung von Methanemissionen aus Deponien beginnen bereits bei der getrennten Sammlung des Hausmülls. Durch die getrennte Sammlung biogener Abfälle kann eine deutliche Entfrachtung des leicht abbaubaren organischen Kohlenstoffanteils im Müll erreicht werden, was sich positiv auf das Gasbildungspotential des abgelagerten Mülls aus-

wirkt. Durch eine entsprechende Vorbehandlung (z.B. thermische oder mechanisch-biologische) des organikentfrachteten Restmülls kommt es zu einer weiteren Abnahme des Gasbildungspotentials. In Abbildung 2 ist die mögliche Reduktion des Gasbildungspotentials von einer Tonne feuchtem Hausmüll durch entsprechende Maßnahmen im Vorfeld der Deponierung schematisch dargestellt. Die Restemissionen der abgelagerten Stoffe müssen durch Maßnahmen auf der Deponie gefasst werden.

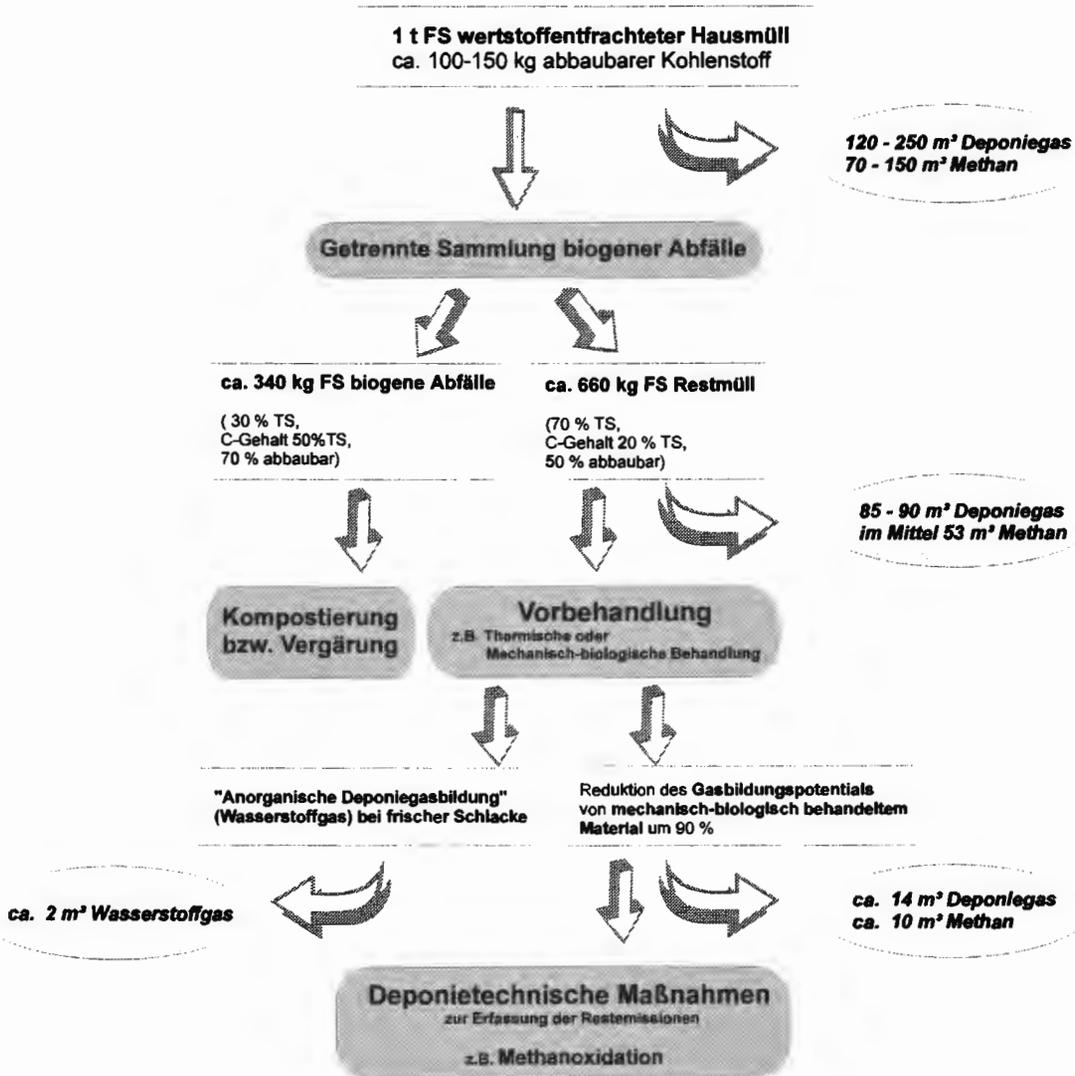


Abb. 2: Mögliche Reduktion des Gasbildungspotentials durch Maßnahmen im Vorfeld der Deponierung (FS = Feuchtsubstanz)

Auch bei frischer Schlacke aus der Müllverbrennung ist in der Anfangsphase der Ablagerung mit Gasproduktion zu rechnen. Hierbei handelt es sich nicht um die "klassische Depo-niegasbildung" sondern vielmehr um eine "anorganische Gasgenese". Aufgrund der hohen Affinität des in der Schlacke elementar vorliegenden Aluminiums zu Sauerstoff, ist es in der Lage Wasser zu spalten, wobei Wasserstoffgas freigesetzt wird. Bei Versuchen von Turk et al. (1997) wurde eine Wasserstoffproduktion von mehr als 10 l/kg TS Schlacke nachgewiesen. Auch wurde an Schlackedepo-nien die Ausgasung von Ammoniak beobachtet.

Im Folgenden wird auf ein biologisches Vorbehandlungsverfahren und eine natürliche Nachsorgemaßnahme zur Verringerung der Methanemissionen eingegangen.

### 3 Mechanisch-biologische Vorbehandlung

Bei einer biologischen Vorbehandlung des Restmülls werden die mikrobiellen Abbauprozesse, die in einer Deponie unkontrolliert und oft über sehr lange Zeiträume (Jahrzehnte) ablaufen können, in wenigen Wochen kontrolliert vorweggenommen. In geschlossenen Sy-

stemen kann durch entsprechende Steuerung der Abbauprozesse optimiert und auftretende Emissionen gefaßt werden. Das Emissionsverhalten eines Rotteproduktes aus einer biologischen Vorbehandlung ist stark von der Behandlungsdauer abhängig. Werden in einer nur relativ kurzen Vorbehandlungszeit von etwa 3 - 4 Wochen die leicht abbaubaren organischen Bestandteile umgesetzt, läßt sich in der Deponie die Phase der sauren Gärung größtenteils vorwegnehmen. Können in längeren Vorbehandlungszeiten (10 - 12 Wochen) stabile organische Substanzen aufgebaut werden, so lassen sich auch Methanemissionen bei der nachfolgenden Deponierung weitgehend vermeiden.

Untersuchungen von Binner (1998) zum Gasbildungspotential in Inkubationsversuchen zeigen eine bis zu 95%-ige Verringerung der Gasmenge bei mechanisch-biologisch vorbehandeltem Restmüll (Abb. 3).

Das Ausmaß der Reduktion ist dabei sehr stark von der vorangegangenen Behandlungsdauer abhängig. Qualitativ weist das Gas aus mechanisch-biologisch behandeltem Restmüll in der Regel die typische Deponiegaszusammensetzung (40% CO<sub>2</sub>, 60 % CH<sub>4</sub>) auf.

#### Einfluß der MBA auf die Gasspendensummen

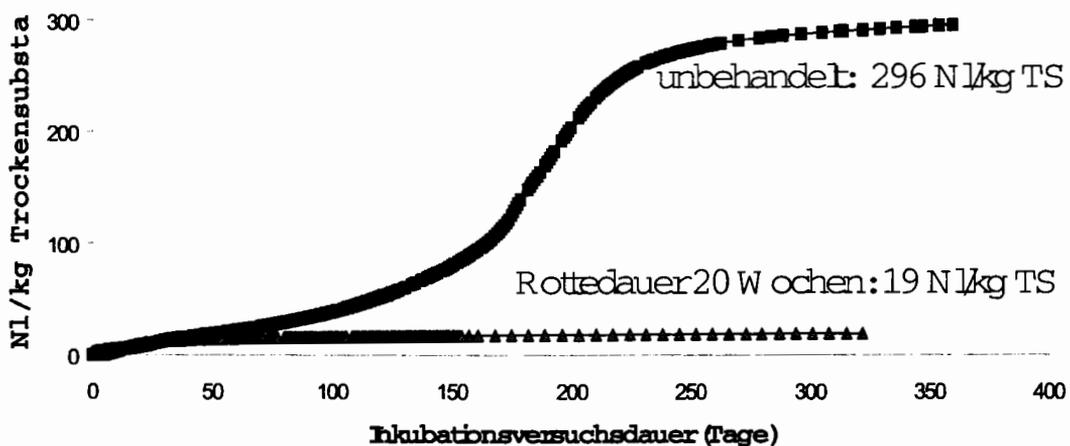
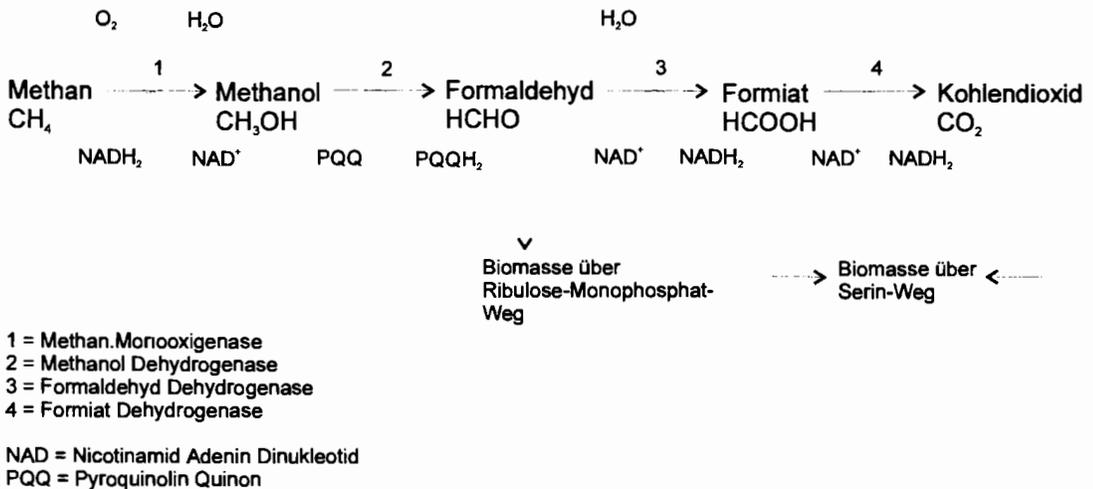


Abb. 3: Gasspendensumme mit bzw. ohne mechanisch-biologischer Behandlung; die lange LAG-Phase bis zum 125. Versuchstag beim unbehandelten Restmüll ist auf Versäuerung in der Anfangsphase zurückzuführen (nach Binner, 1998)

Bestätigt werden diese Ergebnisse auch durch Erfahrungen aus der Deponiepraxis (BINNER 1998). Auf einem Deponieabschnitt der Deponie Lustenau /Vbg. wird seit 1989 unbehandelter Restmüll abgelagert, wo ca. 7 m<sup>3</sup> Gas/t FS und Jahr anfallen. Auf der Deponie Allerheiligen/Stmk. wird im Vergleich dazu auf einem Abschnitt mit ca. 30 Wochen gerottetem Restmüll eine Gasmenge von 0,25 m<sup>3</sup>/t FS und Jahr gemessen. In letzt genannter Anlage führt diese geringe Menge verbunden mit einem vergleichsweise geringem Methangehalt (28%) bereits zu Problemen in der herkömmlichen Deponiegasentsorgung (Zwangsentgasung mit Abfackelung).

#### 4 Methanoxidation in Deponieabdeckschichten

Eine einfache biologische und kostengünstige Methode zur Erfassung der Restemissionen aus abgelagertem, mechanisch-biologisch vorbehandeltem Restmüll stellt die mikrobielle Methanoxidation in dafür geeigneten Deponieabdeckschichten dar. Dabei wird das Methan durch spezielle Mikroorganismen, sogenannte methanotrophe Bakterien, in mikrobielle Biomasse, Kohlendioxid und Wasser umgewandelt (siehe Abbildung 4).



**Abb. 4: Weg der Energiegewinnung von Methan zu Kohlendioxid; nach WITTENBURY und DALTON (1981) zitiert bei CROFT et al. (1989)**

Methanverwertende Mikroorganismen sind seit Beginn unseres Jahrhunderts bekannt und sind in verschiedenen natürlichen Ökosystemen wie z.B. Sumpfgebieten und marinen Gewässern weltweit verbreitet. Untersuchungen in den Sumpfgebieten Floridas zeigen, daß 70 - 90 % des in anaeroben Zonen gebildeten Methans in darüberliegenden, sauerstoffreichen Schichten vor Erreichen der Atmosphäre wieder abgebaut werden. Damit stellt die biologische Methanoxidation einen wichtigen Faktor im natürlichen Kohlenstoffkreislauf dar.

Die Abbauleistung der methanotrophen Bakterien ist stark von den vorherrschenden Milieubedingungen abhängig. Die methanotrophen Organismen bevorzugen vor allem nährstoff- und humusreiche, gut durchlüftete Böden mit einem entsprechenden Wassergehalt und einer kontinuierlichen Methanversorgung (Tab. 2). Auch die Umgebungstemperatur spielt eine wesentliche Rolle, wobei es für unterschiedliche Temperaturbereiche speziell angepaßte Bakterienstämme gibt. So haben gewisse Bakterienstämme ihr Lebensoptimum bei Bodentemperaturen zwischen 15 und 25°C (soge-

nannte mesophile Arten), während z.B. kälte-liebende Arten noch bei Temperaturen knapp über dem Gefrierpunkt aktiv sein können.

In jenen Bodenschichten, in denen das Milieu für die Mikroorganismen, vor allem das Verhältnis zwischen Sauerstoff- und Methanversorgung, optimal ist, bildet sich ein meist scharf abgegrenzter, 10 - 30 cm breiter „Methanoxidationshorizont“, aus (Abb. 5). In diesem Horizont des Bodens sind die meisten methanabbauenden Bakterien zu finden. Dieser Horizont kann bei veränderten Bedingungen, z.B. bei verminderter Methanzufuhr oder Sauerstoffversorgung, im Bodenprofil auf und ab wandern. Somit können sich die methanotropen Bakterien ideal an die jeweils herrschenden Umgebungsbedingungen anpassen.

Optimiert man durch entsprechende Ausführung der Deponieabdeckschicht die Milieubedingungen dieser Bakterien, können sehr hohe Methanumsatzraten erzielt werden. In Laborversuchen an der Abteilung für Abfallwirtschaft zeigte sich die besondere Eignung von

reifen Abfallkomposten als Trägermaterial einer Methanoxidation. Die erreichten Methanabbauraten in den Komposten liegen deutlich höher als jene in Erde bzw. in herkömmlich bindigen Deponieabdeckmaterialien. Mit einer 60 cm mächtigen Schicht aus ausgereiftem Müllkompost ließen sich unter optimalen Bedingungen Methanmengen, wie sie üblicherweise aus Hausmülldeponien in den ersten Jahren nach der Schüttung freigesetzt werden (ca. 120 m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>/ m<sup>2</sup> Jahr bei einer Schüttmächtigkeit von ca. 20 m), vollständig abbauen. In der folgenden Abbildung sind die maximalen, mittleren und minimalen Abbauraten von verschiedenen Komposten den kalkulierten Gasbildungsraten einer Hausmülldeponie, Altlast und Ablagerung aus mechanisch-biologisch vorbehandeltem Restmüll (jeweils bei einer angenommenen Deponieschüttung von 15 - 20 m) gegenübergestellt. Ebenso sind aus der Literatur entnommene Methanabbauraten von Erde, tonig-lehmigem Deponieabdecksubstrat und einem nährstoffangereicherten Sand angeführt.

**Tab. 2: Milieubedingungen methanotropher Mikroorganismen (zusammengestellt aus diversen Literaturstellen)**

Milieubedingung		Anmerkung
pH-Wert	5 - 8,5	sehr tolerant
Sauerstoffversorgung	optimales stöchiometrisches Verhältnis CH <sub>4</sub> : O <sub>2</sub> = 1 : 2	auch unter mikroaerophilen Verhältnissen existent (ab ca. 2% O <sub>2</sub> in Bodenluft)
Wassergehalt	> 13 % der max. Wasserkapazität	obere Grenze wird durch das Wechselspiel luft-/ wassergefüllte Poren bestimmt
Temperatur	psychrophile Arten: 5 - 15°C mesophile Arten: 20 - 35 °C thermophile Arten: bis 55 °C	können durch exothermen Oxidationsprozeß in einem gewissen Bereich Temperatur selbst beeinflussen
Methanversorgung	aktive Population nimmt mit steigendem Methanangebot zu	reagieren auf unterschiedliches Methanangebot sehr flexibel
Hemmstoffe	z. B.: Ammonium	hohe NH <sub>4</sub> -Konzentrationen im Trägersubstrat sollten vermieden werden
Bodenzustand	hohes Luftporenvolumen und Wasserspeichervermögen, gute Nährstoffversorgung	Trägersubstrat soll auch bei hohen Wassergehalten noch ein ausreichendes Luftporenvolumen aufweisen



Abb. 5: Laborversuchssäule zur Überprüfung der Methanoxidation gefüllt mit Klärschlammkompost; durch starken Biomasseaufwuchs sichtbarer Methanoxidationshorizont zwischen Meßstelle in 10 und 20 cm Tiefe.

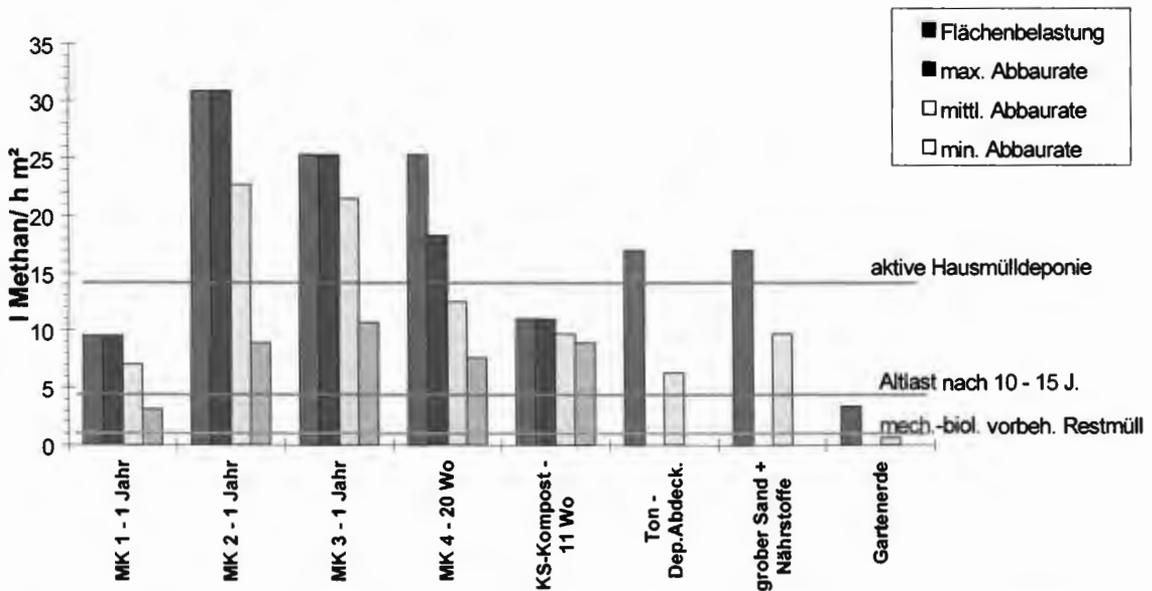


Abb. 6: Methanabbauraten in unterschiedlich alten Abfallkomposten (MK = Müllkompost; KS= Klärschlamm) verglichen mit Gasproduktionsraten einer Hausmülldeponie, Altlast, Ablagerung aus mechanisch-biologisch vorbehandeltem Restmüll und den Methanabbauraten natürlicher Substrate; (der Balken „Flächenbelastung“, stellt die Methanzufuhrmenge im Laborversuch dar)

## 5 Zusammenfassung

Durch entsprechende Maßnahmen im Vorfeld der Deponierung (Entfrachtung von leicht abbaubaren organischen Substanzen durch getrennte Sammlung, Vorbehandlung des Restmülls) kann das Methanbildungspotential des Mülls deutlich reduziert werden. Die verbleibenden Restemissionen können durch die einfache Methode der biologischen Methanoxidation kostengünstig erfaßt werden. Lassen sich die bisher im Labor gewonnenen Erkenntnisse in einem im Frühjahr 1999 beginnenden großtechnischen Praxisversuch bestätigen und auch der Sickerwasseranfall durch entsprechende Kompostabdeckschichten verringern, kann aus wissenschaftlicher Sicht diese Methode in Zukunft eine Alternative zur herkömmlichen Oberflächenabdichtung auf Deponien darstellen.

Diese Methode, die Forcierung der Methanoxidationsleistung durch entsprechende Gestal-

tung der Deponieabdeckung, kann auch eingesetzt werden

- Bei Altlasten zur Vermeidung von Methanrestemissionen
- In Entwicklungsländern - hier muß man mit besonders hohen Methanemissionen rechnen, weil in der Regel keine getrennte Sammlung der biogenen Abfälle (Biotonne) durchgeführt wird. Der notwendige Kompost kann durch eine einfache Mietenkompostierung auf der Deponie erzeugt werden.
- Auf Müll- bzw. Restmülldeponien als Zwischenabdeckung - damit ließen sich bereits während der Betriebsphase der Deponie maßgebliche Methanemissionen vermeiden
- Als Endabdeckung auf Müll- bzw. Restmülldeponien - damit können Methanrestemissionen kostengünstig biologisch entsorgt und auch die Sickerwassermenge mit Hilfe einer entsprechenden Bepflanzung deutlich verringert werden.

## Literatur

E. BINNER, P. LECHNER (1998): Stand der mechanisch-biologischen Abfallbehandlung in Österreich, Beitrag im Tagungsband der 2. Niedersächsischen Abfalltage in Oldenburg, März 1998

B. CROFT, R. EMBERTON (1989): Landfill gas and the Oxidation of methane in soil, in: The Technical Aspects of Controlled Waste Management, Department of the Environment, Wastes Technical Division, Research Report No. CWM 049/89

DEUTSCHER BUNDESTAG (1990): Zur Sache - Schutz der Erde 19/90; Referat für Öffentlichkeitsarbeit; Bonner Universitätsdruckerei

M. HUMER, P. LECHNER (1997): Grundlagen der biologischen Methanoxidation; Waste-Reports Nr. 05, August 1997, Abteilung Abfallwirtschaft, Universität für Bodenkultur Wien

A. KRAPPENBAUER (1995): „Bewertung der Methanemission“, Artikel in Waste Reports Nr. 02, August 1995, pg 60 - 65

M. TURK, H.-J. COLLINS, P. LECHNER, K.-U. HEYER, D. REGENER (1997): Ablagerungsverhalten thermisch behandelter Restabfälle, Beitrag in Beiheft zu Müll und Abfall, Heft 33, Seiten 99-107, Hamburg 1997

## DISKUSSION

## Deponiebürtige Methanemissionen und deren Vermeidung

ENTENMANN: Wir haben immer die Probleme, daß die Methanbildung nicht so schön gleichmäßig über eine lange Zeit verläuft, ganz im Gegenteil, wir haben kurzfristig hohe Emissionen, und ganz lange Zeit geringe Emissionen, die sich auf viele Jahre erstrecken. Üblicherweise kann man sagen, daß nach 10 Jahre bei diesen kleinen Ablagerungen die Methanbildung überhaupt nicht meßbar oder schon längst vorbei ist. Nun ist die Frage, brauchen bei diesem Verfahren mit den Bakterien diese ein Minimum an Methan, daß das System überhaupt aufrecht erhalten werden kann.

HUMER: Nein, es gibt zwei unterschiedliche Bakterientypen. Ein Typ ist spezialisiert darauf, hohe Methanmengen auch bei geringen Sauerstoffkonzentrationen hervorragend abzubauen, ein zweiter Typ nimmt sogar troposphärische Methankonzentrationen auf. Es gibt also keine Limitation bezüglich der Minima, es gibt vielleicht eine beim Maximum, wir haben das bisher aber noch nicht ausloten können, weil die hohen Mengen bei optimalen Laborbedingungen natürlich abgebaut werden konnten.

UNBEKANNT: Die Bakterien sind generell im Kompost drinnen. Können nur im Kompost leben und sich vermehren, indem Methan verarbeiten ?

HUMER: Sie können nicht nur im Kompost leben, sie kommen eigentlich in jeder Gartenerde, in jedem Boden vor, sie finden nur im Kompost optimale Bedingungen vor und können somit auch mit hohen Belastungen von Methan umgehen. Sie brauchen also nicht speziell animpfen, sie sind ja praktisch in jedem Substrat drinnen, nur ist das Substrat deswegen wichtig, weil es die Nährstoffversorgung gewährleisten muß, vor allem mit Stickstoff, auch mit Phosphor. Das Substrat muß die Zutrittsmöglichkeit von Sauerstoff und Methan gewährleisten, und da war Kompost bis jetzt am besten geeignet.

LECHNER: Wir haben diesen Methanoxidationshorizont genau gesehen, das war ja das Überraschende, daß man das so gut sehen konnte, es bildete sich hier ein richtiger Bakterien Schleim aus. Dieser Horizont ist nicht starr in einem Bereich, er kann nach oben oder nach unten wandern in Abhängigkeit vom Angebot an Methan.

VORTISCH: Ich danke Ihnen für den Hinweis, daß Böden als Abbaubereich des Methans auch wichtig sind in Bezug auf die Bodenerosion.

Was mich bei diesem Thema besonders beschäftigt, sind die gigantischen wilden Abfalldeponien im Grenzbereich bei den südamerikanischen Millionenstädten oder überhaupt in der Dritten Welt und den Schwellenländern, die eine Müllproduktion haben, die unsere zum Teil noch übersteigt, das ist ein krasser Gegensatz zwischen der Armut großer Bevölkerungskreise und dem sehr hohem Müllaufkommen.

Das Problem ist, daß wir dort ein extrem wechselfeuchtes Klima haben. Wie kann man solche Systeme bei langer Trockenheit und Jahresmitteltemperaturen von weit über 20°C aufrechterhalten ?

Die Niederschlagsphase kann kurz sein, da können sie in relativ kurzer Zeit 1000 mm haben, nur ist das in einigen wenigen Monaten. Es kommt dann auch die Frage der mechanischen Stabilität, der Schichtstärke und Böschungsneigung, aber da wird man Möglichkeiten finden. Die wichtigste Frage für mich an Sie wäre, denn ich möchte das mit hinübernehmen, wie kann man es schaffen, oder welche Aussicht besteht, die Bakterienaktivität über die Trockenphase hinaus aufrecht zu erhalten ? Muß man beregnen oder schaffen die das selber ?

HUMER: Nach unseren Untersuchungen sind etwa 13% der maximalen Wasserkapazität - des maximalen Wasseraufnahmevermögens eines Substrates - erforderlich, das ist ein Richtwert.

**VORTISCH:** Wie hoch ist die Wasserkapazität bei Ihnen gewesen ?

**HUMER:** Die liegt bei Kompost etwa bei 120-130g Wasser pro 100g Trockensubstanz, also sehr hoch, und wenn Sie eine entsprechende Schicht haben. Wenn Sie sehr viele Niederschläge innerhalb kurzer Zeit haben, kann Kompost sehr viel Wasser speichern, ein hoher Kompostkörper umso mehr, und er bietet auch einen Isolierungseffekt gegen die Austrocknung der obersten Schicht und der Randschichten. Es gibt auch keinen Wassertransport mehr nach außen, weil auch die kapillare Wassernachlieferung gestört ist. Diese Schicht wird hydrophob, es ist ein Isolationskörper, in dem Bakterien über längere Zeit, auch wenn kein Niederschlag kommt, genügend Wasser vorfinden.

**VORTISCH:** Bei Extremklimata würden Sie welche Kompostmächtigkeiten empfehlen ?

**LECHNER:** Ich glaube, das Dilemma ist, daß diese austrocknende Schicht einerseits sinnvoll ist wegen der genannten Isolationsmechanismen, auf der anderen Seite ist sie ja sehr erosionsanfällig.

**VORTISCH:** Man muß die Regulierungsschicht an die gegebenen Verhältnisse anpassen. Die Methanproduktion geht weiter und sogar sehr gut, der Müll, auch mit Erde abgedeckt, kann unten gut weiterproduzieren, aber oben ist es so extrem trocken, daß ich mir nicht vorstellen kann, daß bakterielles Leben weiterbestehen kann.

**MELCHIOR:** Bei der Schlußfolgerung mit den Anwendungsbereichen haben Sie einen ganze Reihe von Punkten aufgelistet, die sehr umfassend waren, da habe ich einige Fragen.

Die eine betrifft die Zwischenabdeckung, da kann ich mir schon vorstellen, daß es bei Methanproduktion sinnvoll ist, einen Biofilter daraufzulegen. Soll der langfristig verbleiben oder wird er wieder heruntergenommen ?

Die zweite Anmerkung bezieht sich auf die Abdeckung von Altlasten, da wäre eine Kompostschicht ein System, das ausschließlich auf die Unterbindung von Methanaustritten hin dimensioniert ist. Meinen Sie, daß das ein Gesamtsystem für die Anforderung auf eine dauerhafte Abdeckung ist ?

**HUMER:** Wir haben Untersuchungen nicht nur auf Methanemissionen hin unternommen. Eine Kollegin hat die unterschiedlichen Materialien auf deren Wasserhaushalt hin untersucht.

Es sind jeweils drei Varianten einer Energiepflanze, Gras, Brache und Miscanthus, mit Mischungen von 40% Klärschlammkompost zu 60% Erde, 60% Kompost zu 40% Erde, und reine Erde verwendet worden, und man sieht bei einem Niederschlagsereignis im pannonischen Klimagebiet mit relativ wenig Niederschlag deutlich, daß wir bei einer Miscanthus-60% Klärschlammkompostvariante eine 10%-Sickerwasserbildungsrate des Niederschlags erreichen. Die Kollegin hat teilweise versucht durch zusätzliche Bewässerung auszugleichen und andere Klimata zu simulieren. Wenn ich eine entsprechende Bepflanzung und eine entsprechende Schichtstärke habe, kann ich vielleicht nicht nur das Methan biologisch entfernen, sondern auch den Wasserhaushalt positiv beeinflussen.

**MELCHIOR:** Das hängt natürlich vom Standort ab, was die Kompostschicht leisten kann und der Ansatz vom Kompost als Regulierungsschicht ist ein interessantes Thema. Langfristig muß man natürlich eine Obergrenze der organischen Substanz in der Regulierungsschicht ansetzen, da wir ja auch in natürlichen Böden Humusgehalte von 3-6% haben und man in der Kompostschicht bei langer Dauer schon damit rechnen muß, daß organische Substanz ausgetragen wird

**LECHNER:** Ich glaube, Sie haben das auch erwähnt, daß man erstens einmal den Einzelfall betrachten muß und zum zweiten muß ich natürlich unterscheiden, habe ich eine Altlast, in der gefährliche Abfallstoffe liegen, oder ist das einfach eine Altablagerung von Hausmüll.

**HUMER:** Die Bepflanzung verdichtet und verbessert sich auch mit den Jahren, und dann spielt es auch keine große Rolle, ob die Wasserspeicherkapazität des Substrates auf Grund des Verlustes organischer Substanz abnimmt, weil durch vermehrte Blattmasse wieder mehr transpiert werden kann.

**STEIRER:** Ich hätte noch eine Frage zum Wasserhaushalt. Inwieweit spielt das Wasser, das beim Abbauprozess entsteht, eine Rolle ?

HUMER: Minimalst; es sind etwa 1-2% Wasser, das gebildet wird, das wird aber mit den aufsteigenden CO<sub>2</sub>- und Stickstoffmengen wieder ausgetragen.

STEIRER: Aber zur Erhaltung eines entsprechenden Wassergehaltes in trockenen Perioden kann es beitragen ?

HUMER: Das müßte man sich genau ansehen, es wird aber meiner Meinung nach wenig maßgebend sein.

HOLZER: Für welche Schichtstärke, können Sie trotzdem eine Empfehlung abgeben z.B. für eine zukünftige Maßnahmen auf einer Deponie, die Rückstände aus der mechanisch - biologischen Abfallbehandlung aufnimmt ?

HUMER: Nein, das möchte ich eigentlich noch nicht. Wir haben verschiedenste Schichtstärken in unseren Testfeldern erprobt. Die Methanoxidation läuft in einem relativ engen Horizont von 10-20 cm ab. Aber ich brauche eine Isolierungswirkung gegenüber Klimateinflüssen und es wird wahrscheinlich eine optimale Schichte im pannonischen Raum anders aussehen also irgendwo anders.

HOLZER: Ungefähr?

HUMER: 80 cm bis 1,5 m. Es ist sinnvollerweise begrenzt durch die maximale Diffusionstiefe, also, wie tief kann Sauerstoff eindringen. Wenn ich eine 5 m-Schicht aufbringe und der Sauerstoff geht ohnedies nur bis 1,5 m hinein, bringt mir das nichts.

UNBEKANNT: Gibt es weitergehende Überlegungen, wenn man die Abdeckung wirklich für eine Altlast systematisch zur Anwendung bringen will, was man später damit macht ? Der Kompost ergibt ja keine tatsächliche Oberflächenabdichtung, weil nur diese Schicht aufgebracht wird, sicher nur für einen gewissen Zeitraum wirksam. Was ist nach diesem Zeitraum, kann das dann bleiben, nimmt man es weg ?

HUMER: Ich würde hier gar nicht diese zeitliche Begrenzung sehen, abhängig vom Anwendungsfall. Wenn ich die Schicht aufbringe und mit der Zeit rekultiviere und sich eine Vegetation bildet, ist eigentlich die Idee dahinter, ich möchte ein natürliches System schaffen, das sich selbst regulierend verwaltet, sowohl vom Wasserhaushalt als auch vom Gashaushalt her.

ich kann es vielleicht nicht in allen extremen Klimagebieten einsetzen, das muß man sich jeweils ansehen, das ist je nach Anwendungsfall individuell verschieden. Es ist nicht dran gedacht, nach 5 Jahren die Schicht wegzukarren und irgendeine Dichtung darauf zu legen.

LECHNER: Ich möchte noch einmal auf die letzte Folie hinweisen, wo die Rekultivierung mit Miscanthus wirklich eine sehr gute Restsickerwasseremissionsrate gezeigt hat. Miscanthus als eine Kulturpflanze kann als Energiepflanze nutzbar gemacht werden. Man könnte sich überhaupt ein Konzept überlegen, daß man Altlasten einer bedingten Nutzungsform, zum Beispiel zur Produktion von Energiepflanzen, zuordnet. Dann hat man erstens die Möglichkeit, Restmethanemissionen zu bewältigen, hat zweitens eine Optimierung des Wasserhaushaltes und hat letztlich noch einen Nutzen in Form der Energie. Es sind nur Gedankengänge....

RIEHL - H.: Es gibt ja schon ein Großmodell, das Feld III der Hausmüllversuchsanlage Breitenau, das mit so einer 1m-Kompostschicht abgedeckt worden ist, was an sich sehr positiv begonnen hat. Wir haben das Ergebnis auch publiziert und verbreitet, aber das Kapitel ist momentan blockiert. Breitenau wurde, aus welchem Grund immer, offiziell getötet.

HUMER: Das stimmt, es war das Feld, das eigentlich im Verlauf der Zeit die wenigste Rate an Sickerwasser gebracht hat:

LECHNER: Nur für die Anwensenden: In Breitenau wurden drei verschiedene Oberflächenabdeckungen ausgeführt. Die mineralische Dichtung hat teils durch Alterung, teils auf Grund der geotechnischen Veränderungen, der Setzungen des Deponiekörpers dazu geführt, daß genau diese Risse, die von Hr. Melchior beschrieben worden sind, sehr rasch aufgetreten sind, sodaß dort die höchsten Sickerwasserraten waren, und im anderen Extrem hat jenes Feld, daß mit Kompost abgedeckt worden ist, die geringsten Sickerwasserraten gebracht. Natürlich muß man den spezifischen Klimabereich berücksichtigen.

UNBEKANNT: Zu dem Vorschlag, die Kompostabdeckung nach einiger Zeit wegzukarren und eine andere Abdichtung herzustellen: der

Vortrag von Hr. Melchior hat ja gezeigt, es gibt keine 100% sichere Abdeckung, schon gar nicht auf längere Zeit. Die Frage, die wir uns stellen müssen, ist, welche Restemissionen lassen wir zukünftig zu, welche Restemissionen sind für unsere nachfolgenden Generationen akzeptabel?

Ich glaube, da müssen wir einmal Levels festlegen von praktikablen Stoffflüssen in die Natur. Da gibt es ja auch diese Stoffflüsse. Es gibt auch natürliche hot spots mit hohen Schwermetallemissionen und ich will nicht sagen, daß wir uns an denen orientieren sollen, aber irgendwann müssen wir einmal diese Levels definieren, damit man zukünftige Strategien für alle Abfall- und Deponietypen festlegen kann.

HOLZER: Mit ist es darum gegangen festzustellen, ob dieses System eine Dauerlösung sein

kann und damit eine echte Alternative zur Abdichtung ist - ich will damit nicht sagen, daß es schlechter ist als eine Abdichtung, aber es zielt ja auf etwas Bestimmtes ab, nämlich auf den Methanabbau, während in einer Deponie abhängig davon, was abgelegt worden ist, noch einiges drinnen ist, was mit dem Methan nicht unmittelbar zu tun hat, und, wenn Niederschlag eindringt, ausgewaschen wird, und das sind zwei verschiedene Paar Schuhe. Mir geht es darum, wie schaut das System insgesamt aus. Selbstverständlich scheint es mir auch sinnvoll, die Schicht an Ort und Stelle zu belassen.

HUMER: Ich habe nur auf das Methan und nicht auf das Gesamtsystem abgezielt, um Titel und Inhalt des Vortrages gerecht zu werden.

### **Diskussionsbeiträge von:**

*Dipl.Ing. D. GRASSINGER*  
Abteilung Abfallwirtschaft  
Universität für Bodenkultur Wien  
Nußdorfer Lände 29 - 31  
A - 1190 Wien

*Dipl.Ing. Chr. HOLZER*  
BMLFUW  
Stubenbastei 5  
1010 Wien

*Dipl.Ing. M. HUMER*  
Abteilung Abfallwirtschaft  
Universität für Bodenkultur Wien  
Nußdorfer Lände 29 - 31  
A - 1190 Wien

*Univ.Prof. Dr. P. LECHNER*  
Abteilung Abfallwirtschaft  
Universität für Bodenkultur Wien  
Nußdorfer Lände 29 - 31  
A - 1190 Wien

*Dr. St. MELCHIOR*  
IGB Hamburg  
Heinrich Hertz Straße 116  
D-22 083 Hamburg

*Dr. Georg RIEHL - H*  
Hauptstraße 70  
A - 2801 Katzelsdorf

*Dipl.Ing. Th. STEIRER*  
Österr. Kommunalkredit  
Türkenstraße 9  
1090 Wien

*Prof. Dr. Walter VORTISCH*  
Inst. f. Geowissenschaften  
Prospektion u. Angewandte Sedimentologie  
Montanuniversität Leoben  
A - 8700 Leoben

Barbara-Gespräche Payerbach 1998	Band 5	"Abfallentsorgung aus erdwissenschaftlicher Sicht" "Klima - Entwicklung"	Seite 107- 112	Payerbach 2001
-------------------------------------	--------	---	-------------------	-------------------

# BARBARA-GESPRÄCHE

## Payerbach 1998

Die endgültige Abfallagerung nach dem Vorbild der Natur

W. VORTISCH



Payerbach,  
18. September 1998

**Anmerkung der Redaktion:**

Da das Originalmanuskript der Langfassung zum Zeitpunkt der Drucklegung nicht vorgelegen ist, findet hier die beim Vortrag aufgelegte Kurzfassung Verwendung.

*Anschrift des Verfassers:*

*Prof. Dr. Walter VORTISCH*

*Inst. f. Geowissenschaften*

*Prospektion u. Angewandte Sedimentologie*

*Montanuniversität Leoben*

*Peter Tunner Straße*

*A - 8700 Leoben*

# Die endgültige Abfallagerung nach dem Vorbild der Natur

W. VORTISCH

*Kurzfassung*

Das Streben nach hoher Sicherheit bei der Abfallablagerung hat zur Entwicklung technisch (und verwaltungsmäßig) aufwendiger Systeme geführt, deren Langzeitsicherheit im geologischen Sinne aber leider keineswegs gewährleistet ist. Die bisher entwickelten technischen Abdichtungs- und Drainagesysteme haben sich immer wieder als störungsanfällig erwiesen und bedürfen, auch nach Schließung einer Deponie, einer mehr oder weniger kontinuierlichen Betreuung. Wichtige Schadstoffgruppen werden nur sehr langsam oder, wie die Schwermetalle, überhaupt nicht abgebaut. Es ist daher sinnvoll nach Abfallablagerungs- und -behandlungsverfahren zu suchen, mit denen Deponien geschaffen werden können, die wirkliche Langzeitsicherheit im geologischen Sinne aufweisen und einer langfristigen Nachsorge nicht bedürfen.

Vorbilder für Deponierungsverfahren, die diese Anforderungen erfüllen, bietet die Natur selbst. Sedimente, wie die auch in Mitteleuropa verbreitet auftretenden Schwarzschiefer, können aufgrund ihrer besonderen Eigenschaften selbst in Oberflächennähe so hohe natürliche Schwermetallgehalte aufweisen, daß sie, falls sie als Bodenaushub bei Baggerarbeiten anfallen würden, direkt in eine Sondermülldeponie entsorgt werden müßten. Und trotzdem leben und wirtschaften Menschen seit vielen Generationen auf derartigem geologischen Untergrund ohne Schaden zu nehmen.

Was die dauerhafte Entsorgung problematischer Abfallstoffe anbelangt, könnte seitens eines Abfallwirtschafters auch an die verschiedenen, vom Menschen genutzten Lagerstätten gedacht werden, die naturgemäß oft höchste Konzentrationen an Schwermetallen aufweisen. Bei oft recht erheblicher physiko-chemischer Instabilität unter Erdoberflächenbedingungen,

stellen solche Lagerstätten ab einer gewissen - z.T. geringen - Mindesttiefe unter Bodenoberfläche stabile, auch über geologische Zeiträume kaum veränderliche Körper dar, die keinerlei Risiko für Mensch und Biosphäre darstellen. In Bezug auf Abfälle mit hohen organischen Anteilen, könnten als Beispiele die Kohlelagerstätten genannt werden, die diagenetisch veränderte, über geologische Zeiträume stabile, große Akkumulationen organischen Materials darstellen.

Auf der Grundlage solcher geologischer Vorstellungen und Beobachtungen wurde das Verfahren der Diagenetischen Inertisierung entwickelt. Durch innige Vermengung des Abfalls mit problemgerecht ausgewählten, feinkörnigen natürlichen Sedimentmaterialien wird, bei richtiger Standortwahl, ein Abfallkörper geschaffen, dessen Stabilität bezüglich der Schadstoffimmobilisierung natürlichen geologischen Körpern mit hohen Schadstoffgehalten vergleichbar ist.

Die Diagenetische Inertisierung wurde für eine Reihe von verschiedenen Abfallarten mit Hilfe von mehrjährigen Lysimeterversuchen geprüft. Die Versuche, deren wichtigste Ergebnisse hier dargestellt werden, zeigten u.a., daß Sickerwasseraustrag und Schadstofffrachten von Abfallkörpern durch dieses Verfahren auf minimale Beträge reduziert werden können. Bei abfallgerechter Anwendung ermöglicht die Diagenetische Inertisierung den Bau von Abfalldeponien, für die längere Nachsorgephasen entfallen.



## DISKUSSION

## Die endgültige Abfallagerung nach dem Vorbild der Natur

STEIRER: Wie ist der Einfluß der mikrobiellen Prozesse bei dem Verfahren zu bewerten ?

VORTISCH: Leider ist Frau Dr. Zibuschka nicht hier, die das bearbeitet hat.

RIEHLH.: Laut Aussagen von Dr. Zibuschka führen die mikrobiologischen Aktivitäten zu einer Ablagerung von Schleimfäden, die die Dichte des Materials noch zusätzlich erhöhen.

VORTISCH: Ich als Geologe möchte dazu sagen, daß es für die Langzeitdichtigkeit über geologische Zeiträume nicht unbedingt dieser mikrobiellen Dichtigkeit bedarf.

RIEHL-H.: Bei einer landläufigen Deponie, die durch Verkarstung, durch die Umsetzung des organischen Kohlenstoffes etc im Laufe der Zeit immer durchlässiger wird, kommt es zu Auswaschungen und dadurch zu noch erhöhten Setzungen. Die diagenetisch inertisierte Deponie wird hingegen immer stabiler. Sie wird durch die Setzung - darum auch die Plastizität - stabiler und dichter.

VORTISCH: Eine der wichtigsten Wirkungen der Diagenese ist neben Kompaktion auch Zementation. Sobald das Lockermaterial einmal in größere Teufe absinkt wird etwas Festeres daraus wie etwa die Kohlen oder die Tonsteine.

RIEHL-H.: Wir sind dabei, zwei Behälter mit einem Stahlmantel zu umgeben und mit 4 m Überlagerung zusätzlich zu belasten, also nach der normalen Laufzeit die Auflast zu erhöhen und zu schauen, welche Größenordnungen die Veränderung hat.

LECHNER: Ich möchte noch einen kurzen Hinweis geben zu der Folie mit der unterschiedlichen Durchlässigkeiten. Man muß natürlich schon beachten, daß wir uns bei den Versuchen in Katzelsdorf praktisch im überlinearen Bereich bewegt haben und das ist nicht viel, wir haben einen Gradienten von 1,2. In Breitenau haben wir während des Betriebes der Deponie einen wesentlich höheren Gradienten gehabt haben und uns dann im linearen Bereich bewegt.

VORTISCH: Die Frage ist, wie permanent war der Einstau an der Basisdichtung in Breitenau.

RIEHL-H.: Natürlich war nur lokal eingestaut, aber bei den Lysimetern in Katzelsdorf haben wir einen permanenten Einstau, während normalerweise in einer Deponie wie in Breitenau nur durch Unebenheiten bis maximal 50 cm lokale Einstaubereiche angenommen werden können. Wir haben dort auch bewußt bis 4 m eingestaut und dann die  $k_f$ -Werte berechnet.

LECHNER: Ich möchte jetzt versuchen, den heutigen Tag zusammenzufassen. Wir haben zuerst von Herrn ENTENMANN die Mängel an Basisdichtungssystemen vernommen, im Entwässerungsbereich, wo es insbesondere beim Versagen einer Pumpe zum eben zitierten Einstau kommen kann, und dann hat man einen erhöhten hydraulischen Gradienten, bei dem die Basisdichtung nicht mehr die Dichtigkeit aufweist, jedoch findet man auch die Inkrustationen, die offensichtlichen Karbonatausfällungen. Gerade die österreichische gesetzliche Vorgabe über die Deponieverordnung schließt sicherlich zum einen das erste durch die sogenannte "freie Sickerwasservorflut" aus, wir sind also in den letzten Jahren bereits aus den Gruben herausgegangen, damit diese Situation möglichst nicht mehr eintritt. Diese Karbonatausfällungen werden ja auch nur durch das saure Sickerwasser verursacht, das man durch eine entsprechende Vorbehandlung vermeiden kann. Das geschieht beispielsweise schon sehr lange in Sickerwiesen in Salzburg, wo die Deponie keine saure Phase mehr hat, sofort in die Methangärung übergeht, und damit werden diese Probleme im Entwässerungssystem vermieden.

VORTISCH: Dazu müßte man auch die Eisen-seite mitbetrachten. Die Karbonatseite wäre damit entschärft, aber die Änderung der Redoxverhältnisse bereiten dann noch Probleme.

LECHNER: Für mich war der Hinweis interessant, das, wenn Altdeponien untersucht werden, der Einflußbereich im Grundwasser relativ gering ist. Wichtig wäre nun zu unterscheiden zwischen toxischen und abbaubaren Inhaltsstof-

fen, bzw. den synergetischen Effekten. Es werden Einflußbereiche von 100 m genannt, wenn wir in die Literatur gehen auch von 200 m bis maximal 400 m, auch bei sehr großen Deponien

Herr MELCHIOR hat verschiedene Oberflächenabdeckungssysteme verglichen. Die gesetzlichen Vorgaben in Deutschland (TASI) zeigen eigentlich, daß derartige technische Systeme, vor allem, wenn sie über eine mineralische Komponente verfügen, über große Zeiträume nicht entsprechen, und als Alternative hat er die Kapillarsperre oder die Folie oder beide in Kombination vorgestellt, wobei vor allem bei der Folie anzumerken ist, daß die Dauerhaftigkeit der Folie sicherlich ein Diskussionspunkt sein sollte. Er hat, was sehr wesentlich war, auf die Erhöhung der Transpirationsleistung durch die Vegetation hingewiesen.

Herr SCHEIDL hat versucht eine Bewertung der unterschiedlichen Vorbehandlungsmethoden durchzuführen, wobei natürlich zwangsläufig die direkte Ablagerung am schlechtesten abschneidet, wie es ja auch die Erfahrungen der letzten Jahrzehnte gezeigt haben, und in beiden gesetzlichen Vorgaben, in Österreich wie Deutschland, ist dies auch nicht mehr vorgesehen. Wir haben gesehen, daß bei der Verbrennung als Vorbehandlung luftseitig alles bereits auf einem sehr hohen Standard ist, der meines Erachtens nach auch nicht mehr verbesserungsnotwendig ist, die direkte Ablagerung von Schlacke jedoch massiv zu Problemen führt. Bei der MBA stellt die Abluftseite noch ein Problem dar, das ebenfalls bewältigt gehört.

Herr HUBER hat sehr schön gezeigt, welche Möglichkeiten bestehen, diese Müllverbren-

nungsschlacken so vorzubehandeln, daß Alterungsprozesse, die normalerweise in der Deponie stattfinden, vorgezogen werden können, um einen Karbonatpuffer aufzubauen. Auf Grund seiner Überlegungen zum Langzeitverhalten bzw. zum Austrag von Schwermetallen scheint es so zu sein, daß dieser Karbonatpuffer in der Lage ist, über lange Zeit einem Austrag entgegenzuwirken. Auch Herr Melchior hat am Vormittag gesagt, wir müssen natürliche Systeme besser verstehen lernen und dann diese durch technische Maßnahmen optimieren.

Damit kommen wir zu solchen natürlichen Systemen. Ein natürliches System wurde von Frau HUMER mit der biologischen Methanoxidation vorgestellt. Wir haben hier gesehen, welche Möglichkeiten in der Vorbehandlung über mechanisch-biologische Systeme liegen, insbesondere im Bereich der Methanreduktion, was vor allem im Zuge der derzeitigen Klimadiskussion sehr wichtig ist. Wegen des ziemlich eindeutigen Zusammenhanges der Erwärmung der Erdatmosphäre und CO<sub>2</sub>- und Methanausstoß müßte alles getan werden um deren Emission zu vermeiden.

Herr VORTISCH hat mit der Diagenetischen Inertisierung ein weiteres natürliches System vorgestellt. Zunächst hat er am Beispiel Schwarzschiefer gezeigt, daß es durchaus möglich ist, hohe Schadstoffkonzentrationen auch oberflächennah zu akzeptieren. Das Beispiel aus der Geologie paßt hier sehr gut, und daß es vielleicht mit der Diagenetischen Inertisierung möglich ist, das in geologischen Zeiträumen zu simulieren.

### **Diskussionsbeiträge von:**

*Univ.Prof. Dr. Peter LECHNER*  
*Abteilung Abfallwirtschaft*  
*Universität für Bodenkultur Wien*  
*Nußdorfer Lände 29 - 31*  
*A - 1190 Wien*

*Dr. Georg RIEHL - H.*  
*Hauptstraße 70*  
*A - 2801 Katzelsdorf*

*Dipl.Ing. Thomas STEIRER*  
*Kommunalkredit Austria*  
*Türkenstraße 9*  
*1090 Wien*

*Univ.Prof. Dr. Walter VORTISCH*  
*Inst. f. Geowissenschaften*  
*Prospektion u. Angewandte Sedimentologie*  
*Montanuniversität Leoben*  
*A - 8700 Leoben*

# BARBARA-GESPRÄCHE

## Payerbach 1998

### „DIE NACHSORGE - FREIE DEPONIE“

Diagenetische Inertisierung  
eine nahezu emissionsfreie Alternative  
für Altlastensanierung und Müllentsorgung

Winfried ENTENMANN

Georg RIEHL-HERWIRSCH

mit Beiträgen von:

P. CARNIEL

M. HACKENBERG



Payerbach

**INHALT**

Zusammenfassung / Summary / Resume / Streszczenie	115
1 Einleitung	119
2 Anforderungen an die heutige Abfallbeseitigung	119
2.1 Anforderungen der europäischen Deponierichtlinie	120
2.2 Über die europäische Deponierichtlinie hinausgehende Anforderungen in Deutschland und Österreich	122
3 Die Methode der DIAGENETISCHEN INERTISIERUNG	123
3.1 Lysimeterversuche Katzelsdorf	124
3.2 DIAINERT-Deponie Hehenberg	127
3.3 Hausmüllversuchsanlage Breitenau	130
4 Zusammenfassende Ergebnisdarstellung der wissenschaftlichen Arbeiten und der betreuenden Meßarbeiten; Parameter-Erfassung	131
4.1 Raumgewicht	131
4.2 Setzungsverhalten	131
4.3 Durchlässigkeit	131
4.4 Sickerwasserentwicklung	133
4.5 Gasproduktion	136
4.5.1 Gasquantitäten	136
4.5.2 Konzentrationen	137
4.5.3 Gasfrachten	138
4.6 Temperaturentwicklung im Abfallkörper	138
4.7 Chemische und mikrobiologische Entwicklung	138
5 Bewertung der DIAGENETISCHEN INERTISIERUNG im Vergleich zu anderen Arten der Abfallentsorgung	142
5.1 Vergleichskriterien	142
5.2 Kurzcharakterisierung der Methoden	142
5.3 Endprodukte der Entsorgungsmethoden	143
5.4 Emissionen	148
6 Schlußbemerkung	151
Förderungen und Kooperationen	153
Literatur	153

*Das Manuskript ist Anfang 2001 eingelangt.*

*Anschrift der Autoren:*

*Dr. Winfried ENTENMANN  
IGB Ingenieurgesellschaft mbH  
Heinrich Hertz Straße 116  
D-22083 Hamburg*

*Ing. Peter CARNIEL  
Geoinert Umwelttechnik GmbH  
Hauptstraße 70  
A - 2801 Katzelsdorf*

*Dr. Georg RIEHL - HERWIRSCH  
Geoinert Umwelttechnik GmbH  
Hauptstraße 70  
A - 2801 Katzelsdorf*

*Michael HACKENBERG  
Geoinert Umwelttechnik GmbH  
Hauptstraße 70  
A - 2801 Katzelsdorf*

# DIE NACHSORGE - FREIE DEPONIE

## DIAGENETISCHE INERTISIERUNG

Eine nahezu emissionsfreie Alternative  
für Altlastensanierung und Müllentsorgung

Winfried ENTENMANN  
Georg RIEHL-HERWIRSCH

### Zusammenfassung

Die DIAGENETISCHE INERTISIERUNG ist ein neues Verfahren für die Altlastensanierung und eine Alternative zu den derzeit gängigen Verfahren der Entsorgung von Siedlungs-, Industrie-, und gefährlichen Abfällen. Sie basiert auf der gezielten intensiven Vermengung von vorbehandelten Abfällen bzw. Altlastenmaterial mit silikatisch - karbonatischen mineralischen Feinteilen. Alternativ können auch Abfallstoffe von Produktionsprozessen, wie Schlämme der Kieswäsche oder Hafenschlick eingesetzt werden. Aus dem so behandelten Abfall wird unter lagenweisem Einbau ein sehr hoch verdichteter Müllkörper hergestellt. Die so errichtete DIAINERT-Deponie unterscheidet sich grundsätzlich von den übrigen, derzeit in Anwendung befindlichen Abfallbeseitigungsverfahren, der konventionellen Deponierung und der Deponierung von thermisch oder mechanisch-biologisch vorbehandeltem Müll (MBA). Bei all diesen Verfahren entsteht über einen, je nach der gewählten Methode mehr oder weniger langen Zeitraum, in einem wasserwegsamen, sich stark setzenden, reaktiven Müllkörper Sickerwasser, teilweise auch Deponiegas. Diese müssen mit technischen Maßnahmen über lange Zeiträume gefasst werden. Der Schutz der Umwelt erfolgt durch eine technische Sicherungsmaßnahme in Form einer allseitigen Einkapselung.

Die DIAGENETISCHE INERTISIERUNG dagegen setzt in konsequenter Anwendung des „Multi-barrierenprinzips“ zum einen auf einen nahezu wasserdichten Müllkörper und nicht auf eine wasserdichte Hülle, auf die aus technischer Sicht auf Dauer ganz verzichtet werden kann.

Im Gegensatz zur konventionellen Deponierung, bei der eine sukzessive Lösung die Wasserwegigkeit im Deponiekörper vergrößert und infolge von Setzungen die Dichtigkeit der Oberflächenabdichtung gefährdet wird, weist die DIAINERT-Deponie nachweislich im Laufe der Zeit eine Zunahme der Dichtigkeit und Dichte des behandelten Materials auf.

Wie auch bei den Deponien mit MBA - Behandlung wird eine mechanisch-biologische Vorbehandlung durchgeführt, die jedoch erheblich verkürzt sein kann, denn es geht lediglich darum, die sehr leicht abbaubaren Anteile erst gar nicht zur Ablagerung kommen zu lassen. Zum anderen wird nach dem Einbau in die Deponie jedoch ein ganz anderer Reaktionsmechanismus verfolgt: Es werden die Rahmenbedingungen für einen Inkohlungsprozess geschaffen, d.h. der schwer abbaubaren organischen Substanz wird die Möglichkeit gegeben, über sehr lange Zeiträume durch Abspaltung von Sauerstoff und Wasserstoff immer kohlenstoffreicher zu werden, während bei den anderen Methoden der Deponierung eine Aufoxidation zum Kohlendioxid, gegebenenfalls über den Umweg des Methans, stattfindet. Erreicht wird dieser völlig andere Mechanismus durch die extreme Verlangsamung der Reaktionen im Deponiekörper hin zu geochemischen, diagenetischen Mechanismen. Dies geschieht einerseits durch die Reduktion der Fließgeschwindigkeiten im Müllkörper um bis zu fünf Zehnerpotenzen gegenüber konventionellen Deponien und damit die praktische Vermeidung eines Fluid- und Gas-Austausches mit der Umgebung, andererseits durch die Verringerung der

Porengröße in mindestens derselben Größenordnung. Außerdem haben die eingebrachten Tonminerale die Aufgabe Schadstoffe zu adsorbieren, die Karbonate das Milieu abzupuffern und Schwermetalle mittels Fällungsreaktionen in nahezu unlösliche Verbindungen über zu

## Summary

DIAGENETIC INERTIZATION is a new site remediation technology and also an alternative to current methods of municipal and hazardous waste disposal. It is based on an intensive mixing of already pre-treated solid waste with mineral fines, comprising silicatic and carbonatic components. Alternatively, waste material, derived from production processes, as for example tailings or harbour sludges, can be applied. The so treated waste is placed in thin layers and compacted thoroughly. A waste body of a remarkable compactness, revealing dry densities of an average of 1.2 t/m<sup>3</sup> to 1.3 t/m<sup>3</sup> results. These high densities mean that the addition of fines does not result in an increased deposition volume, but on the contrary, in some cases reduces it. On the other hand, the high density means only very little settlement for building structures founded on the waste. Also the pre-treatment means a homogenisation of the waste resulting in very low differential settlements. This was proved at the Hehenberg site, where a wide-span hall was founded on shallow footings directly on the pre-treated, diagenetically inert waste.

This first DIAINERT-landfill in Hehenberg was established after a ten year period of research, comprising large-scale lysimeter tests in Katzelsdorf, Lower Austria. These tests were carried out with various materials and additives in order to develop a widely applicable technology. Some of these tests are continued up to now and will as well be continued in the future in order to derive the long-term behaviour of the DIAINERT-material in comparison to untreated, thermally or mechanically-biologically pre-treated waste.

The DIAINERT-landfill is totally different from the other forms of landfills, currently in use, namely the deposition of thermally and mechanically-biologically pre-treated waste or untreated waste. All these landfills are formed

führen. Damit ist mit der DIAGENETISCHEN INERTISIERUNG der Schritt von den äußeren zu den inneren Barrieren getan, die dafür sorgen, dass umweltgefährliche Fluide und Gase erst gar nicht entstehen.

of a more or less permeable, highly transformable body, undergoing appreciable long-term settlements. All these deposited materials, waste and incineration slags, are more or less reactive, producing leachate and partially enormous quantities of gas. These have to be treated technically over long periods and, in the case of leachate, even not foreseeable. Protection of the environment therefore means a total encapsulation with technical barriers.

DIAGENETIC INERTIZATION, by contrast, means to aim at the internal barriers: The DIAINERT-landfill reveals hydraulic conductivities, appreciably less than  $1 \cdot 10^{-9}$  m/s throughout. The waste body as a whole is less permeable than requirements state for the artificial base and top sealing liners of conventional landfills according to most regulations. That means consequently that there is no technical necessity for a base and top sealing liner for the DIAINERT-landfill. Before mixing and placing, a very short mechanical-biological pre-treatment is necessary in order to remove the very easily degradable components from the waste.

On the other hand, after placing, DIAGENETIC INERTIZATION, follows another principle of long-term geochemical stability: The mechanical, hydraulic and geochemical conditions within the waste body mean to enable reaction mechanisms similar to the natural process of coalification, i.e. the continuous splitting of hydrogen and oxygen and an enrichment of carbon in a very long time, especially in form of the less soluble and degradable compounds. The mechanisms within the waste body of conventional landfills are different: Organic compounds are oxidized and result in CO<sub>2</sub>, at last via oxidation of methane.

The totally different concept of long-term behaviour of DIAGENETIC INERTIZATION is intended to be achieved by the enormous reduc-

tion of flow velocities within the waste body in the order of fifth logarithm compared to conventional landfills. Thus, fluid and gas exchange with the surrounding soil and the atmosphere is almost totally prevented. This is also caused by the reduction of pore-space at least in the same order. Furthermore the admixed clay mineral fines have a great adsorption potential for contaminants and the car-

bonate fines buffer the hydrochemical conditions and also form almost insoluble compounds with the heavy metals released from the waste. Therefore, DIAGENETIC INERTIZATION means the step from mainly outer barriers to the inner barriers in order to prevent adverse gas and leachate to develop instead of prevent them from spreading into the atmosphere and groundwater.

## Resume

L'INERTISATION DIAGENETIQUE est un procédé innovant pour l'assainissement des déchets et une alternative aux procédés habituels et actuels des traitements des déchets ménagers, industriels et dangereux.

Ce procédé est basé sur le malaxage intense des déchets journaliers ou anciens déjà pré-traités grâce à l'ajout d'une proportion précise de particules minérales de silice et carbonate. L'autre alternative pourrait être l'utilisation dans le procédé de boues provenant du lavage des graviers ou de vases portuaires.

De ces déchets ainsi traités va se constituer un corps de déchets de très haute étanchéité grâce aux dépôts successifs.

La décharge réalisée d'après la méthode DI-AINERT se différencie fondamentalement des dépôts conventionnels et actuels que ce soit par traitement thermique ou mécanique et biologique (DMB).

A travers tous ces procédés habituels et quelle que soit la méthode choisie, après un temps plus ou moins long se produisent dans le corps des déchets tassés et en réaction de l'eau de décharge et également du gaz. Toutes ces émissions doivent être captées pour une durée longue par des moyens techniques appropriés. Cela implique une protection de l'environnement se réalisant à travers des techniques sécurisées sous forme de contrôles maîtrisant tous les aspects des nuisances.

L'INERTISATION DIAGENETIQUE, en revanche, utilisée de manière cohérente présente l'avantage du principe des « barrières multiples » - le corps de déchets est étanche en lui-

même et ceci permet de renoncer à des supports techniques comme des liners.

Contrairement aux dépôts conventionnels dans lesquels l'eau de ruissellement augmente à cause de la décomposition successive des matériaux, et où l'étanchéité de la couche supérieure s'amenuise à cause du tassement, la décharge DIAINERT présente une étanchéité renforcée des matériaux traités au cours du temps.

Comme pour les procédés selon la méthode DMB, un pré-traitement mécanique-biologique de courte durée est effectué pour enlever les petites particules facilement dégradables. Après placement dans la décharge se produit une réaction complètement différente : les conditions sont réunies pour un procédé de « carbonation » c'est-à-dire les substances difficilement dégradables peuvent après un très long temps s'enrichir en carbone grâce à la séparation de l'oxygène et de l'hydrogène alors que se forme dans les autres méthodes de décharge une oxydation pour produire du dioxyde de carbone quelquefois par le biais de méthane.

Ce mécanisme complètement différent est réalisé grâce à l'extrême lenteur des réactions dans le corps des déchets provoquant des mécanismes géo-chimiques et diagenétiques.

Ceci est possible d'un côté, grâce à la réduction de la vitesse de ruissellement dans le corps des déchets d'environ  $10^5$  par rapport aux dépôts conventionnels et l'échange fluide-gaz avec l'environnement est presque totalement évité et d'un autre côté à cause de la réduction de la taille des pores dans le même ordre.

*En plus les minéraux argileux rajoutés absorbent les substances toxiques ; les carbonates tamponnent les réactions hydro-chimiques et forment aussi des liaisons chimiques presque insolubles avec les métaux lourds libérés des déchets.*

## **Streszczenie**

Jerzy GOŚCIŃSKI

**Inertyzacja diagenetyczna®** jest metodą budowy praktycznie bezemisyjnych ostatecznych składowisk odpadów, tworzącą w końcowym efekcie obiekty o zerowych kosztach poeksploatacyjnych.

Metoda **inertyzacji diagenetycznej®** jest zarówno technologią sanitacji i modernizacji wysypisk zastarzałych jak i alternatywą dla konwencjonalnych metod pozbywania się nowopowstających odpadów komunalnych i odpadów szczególnie uciążliwych. Bazuje ona na intensywnym wymieszaniu wstępnie obrabionych odpadów świeżych lub zastarzałych z krzemowo-węglanowym, drobnoziarnistym naturalnym materiałem mineralnym. Zamiennie do tych mogą być również stosowane odpady mineralne z procesów produkcyjnych jak np. muły z płukalni żwiru lub szlamy portowe. Z tak obrabionych odpadów, poprzez warstwowe wypełnianie składowiska tworzona jest bardzo zagęszczona masa. W ten sposób stworzone **diainertne** składowisko różni się zasadniczo od pozostałych, budowanych według dziś powszechnie stosowanych założeń i standardów technologicznych konwencjonalnego składowania i składowania odpadów po wstępnej obróbce termicznej lub mechaniczno-biologicznej (tkzw. MBO). Przy takim postępowaniu, w zależności od wybranej metody wcześniej lub później, w przepuszczalnej dla wody, mocno osiadającej, aktywnej chemicznie masie zdeponowanych odpadów powstają odcieki a często i gaz wysypiskowy. Odcieki i gaz muszą być ujmowane i unieszkodliwiane przez długie okresy czasu przy zastosowaniu środków technicznych. Ochrona lokalnego środowiska polega na stosowaniu rozwiązań budowlano-technicznych w celu ogólnego odizolowania składowiska od otoczenia.

*Avec l'INERTISATION DIAGENETIQUE est tracé le chemin des barrières extérieures vers les barrières intérieures qui veillent à ce que ne se produisent pas de fluides et de gaz dangereux pour l'environnement*

W przeciwieństwie do tego **inertyzacja diagenetyczna®** w przypadku konsekwentego jej stosowania polega na zasadzie wewnętrznej „wielozaporowości“ praktycznie nieprzepuszczalnej dla wody masy odpadów a nie na nieprzepuszczalności osłony zewnętrznej, z której perspektywicznie rzecz biorąc, można zrezygnować gdy tylko zaistnieje dostateczna ilość obiektów porównawczych.

W przeciwieństwie do składowisk konwencjonalnych, w których postępujące rozpuszczanie wzmagają penetrację wód i wypłukiwanie roztworów oraz osiadanie odpadów pociągające za sobą groźbę spękania przykrycia powierzchniowego, składowisko **diainertne** z upływem czasu wykazuje rosnącą nieprzepuszczalność w efekcie zagęszczania się tak zdeponowanego materiału.

Tak jak w przypadku składowisk typu MBO stosowana jest wstępna mechaniczno-biologiczna obróbka odpadów, która jednak może być znacznie skrócona, gdyż celem jej jest jedynie redukcja komponentów szybko rozkładających się, które z reguły nie powinny w ogóle trafiać na składowisko. Z drugiej strony po zdeponowaniu zachodzą zupełnie inne reakcje: powstają warunki sprzyjające procesom zwęglania się, tzn. wolnorozpadające się komponenty organiczne mają możliwość na wzbogacanie zawartości węgla poprzez rozpad węglanów i węglowodorów w długich okresach czasu, podczas gdy w warunkach typowych dla pozostałych metod składowania następuje dotlenienie prowadzące do powstania dwutlenku węgla, a nie rzadko pośrednio przybierając postać metanu. Ten inny mechanizm reakcji chemicznych powstaje poprzez ekstremalne spowolnienie wszelkich przemian w masie

*odpadów prowadząc aż do zachodzenia procesów geochemicznych i diagenetycznych. Dzieje się to z jednej strony poprzez redukcję współczynnika przepuszczalności masy odpadów aż o pięć wartości potęgi dziesiątnej w stosunku do wartości ze składowisk konwencjonalnych a co za tym idzie, praktyczne zapobieżenie wymianie fluidalno-gazowej z otoczeniem, z drugiej strony przez zmniejszenie porowatości w conajmniej tej samej skali wielkości. Poza tym wprowadzone*

*minerały glinne mają za zadanie absorbowanie szkodliwych substancji, węglany buforowanie kwasowości środowiska i wiązanie metali ciężkich w wytrącających się praktycznie nierozpuszczalnych związkach. Tym samym dzięki inertyzacji diagenetycznej® następuje przejście od zewnętrznych do wewnętrznych barier, które powodują, że w ogóle nie dochodzi do powstawania niebezpiecznych dla środowiska gazów i odcieków.*

## 1 Einleitung

Die Abfallentsorgung in Europa ist derzeit im Umbruch begriffen. Während in der Vergangenheit zunächst Abfälle wahllos in Geländevertiefungen abgelagert wurden, entstanden in den 70er und 80er Jahren des vorigen Jahrhunderts große Zentraldeponien, in die aber nach wie vor unsortierter und unbehandelter Müll ungesichert eingelagert wurde. Mitte der 80er Jahre erfolgte dann die Deponierung in basis- und oberflächengedichteten Deponien mit Sickerwasserreinigung. Erst gegen Ende der 90er Jahre wurde dazu übergegangen, vorsortierten, schadstoffentfrachteten und vorbehandelten Müll einzulagern, (vgl. W. ENTENMANN 2001, im selben Band). Die europäische Deponierichtlinie (EU 1999/31/EG) stellt neue Anforderungen an die Ablagerung von Siedlungsabfällen. Darüber noch hinausgehende Anforderungen werden in Deutschland (TA-Siedlungsabfall 1993) und Österreich (Deponieverordnung 1996) gestellt.

Generell werden demnach in Zukunft nur noch vorbehandelte Abfälle abgelagert. So ist in Deutschland (UBA 2000) die Ablagerung nicht vorbehandelter Abfälle ab 2005, in Österreich ab 2004 (Deponieverordnung 1996) nicht mehr zulässig. Lange Zeit sah es so aus, dass dies auf eine ausschließliche thermische Behandlung des Mülls und Ablagerung der Müllverbrennungsschlacken hinauslaufen würde (R. STEGMANN 1995). Derzeit setzt sich zumindest in weniger dicht besiedelten Bereichen und mit besonderem Nachdruck im Bundesland Niedersachsen, Deutschland, die mechanisch-biologische Vorbehandlung (MBA) als gleichwertiges Verfahren durch (UBA 1999). Inzwischen wurden schon zahlreiche Genehmigungen, vorerst als Ausnahmegenehmigungen befristet auf das Jahr 2020, für den Betrieb von basisgedichteten Siedlungsabfalldeponien mit vorgeschalteter MBA erteilt (ANONYMUS 1997).

## 2 Anforderungen an die heutige Abfallbeseitigung

Das Streben nach hoher Sicherheit bei der Abfallablagerung hat zur Entwicklung technisch (und verwaltungsmäßig) aufwendiger Systeme geführt, deren Langzeitsicherheit in geologischem Sinne jedoch keineswegs gewährleistet ist (P.H. BRUNNER 1994, S. MELCHIOR 1996). Die bisher entwickelten technischen Abdichtungs- und Drainagesysteme haben sich immer wieder als störungsanfällig erwiesen und bedürfen, auch nach Schließung einer Deponie, einer mehr oder weniger kontinuierlichen Betreuung (S. MELCHIOR 2001). Wichtige

Schadstoffgruppen werden nur sehr langsam oder, wie die Schwermetalle, überhaupt nicht abgebaut (P. LECHNER 1997). Es ist daher sinnvoll nach Abfallablagerungs- und Behandlungsverfahren zu suchen, mit denen Deponien geschaffen werden können, die wirkliche Langzeitsicherheit im geologischen Sinne aufweisen und einer langfristigen Nachsorge nicht bedürfen.

Die Umweltrelevanz von Abfallablagerungen ist direkt abhängig von den Schadstoffen, die

sie an ihre Umgebung emittieren, von einer möglichen Nachnutzung ihres Areals nach dem Ende der Verfüllungs- und Rekultivierungsarbeiten (P. BACCINI 1992), aber auch von der ideellen und finanziellen Belastung kommender Generationen durch Sanierungs- und Nachsorgekosten.

In diesem Sinne muss die Maxime gelten, dass jede Abfalldeponie nach kurzer Beobachtungs- und Nachsorgezeit sich selbst überlassen werden kann; alles andere ist ökologisch, ökonomisch und moralisch unvertretbar. Im Hinblick auf die erforderliche Langzeitsicherheit unter Berücksichtigung der ökologischen und ökonomischen Aspekte sollten künftige Abfallablagerungen nicht nur so gut wie vorgeschrieben, sondern so weit ökologisch erforderlich und ökonomisch vertretbar (G. RIEHL 1993) ausgeführt sein.

Der Austrag von Schadstoffen aus den Deponien, die derzeit noch Stand der Technik sind, erfolgt über die Medien Wasser und Gas; der mobilisierbare Kohlenstoffgehalt wird zu ca. 10% über das Wasser und zu ca. 90% über das Deponiegas ausgetragen, Schwermetalle und andere Biotoxine sind an den Transport durch das Wasser gebunden (E. BINNER et al. 1997), sei es durch Diffusion oder sei es Konvektion. Es ist nicht ausreichend, die Schadstoffkonzentrationen der emittierten Medien für die Bewertung der Umweltverträglichkeit vor dem Einbau in die Deponie heranzuziehen oder zu bilanzieren, da Fracht und Zeitdauer der Emissionen wesentliche Faktoren für die Belastung der Umwelt sind. Auch z.B. Bleilagerstätten geben Pb als geogenen Eintrag an die Umgebung ab (W. VORTISCH 1995), jedoch im Regelfall in biologisch verträglichen - und im Fall mancher Spurenelemente sogar notwendigen - Dosen.

Vorwiegendes Ziel muß es sein, die Sicherheit im Sinne des natürlichen Geschehens so zu definieren, dass die Emissionen anthropogener Sedimentationen sich im Rahmen biotoxisch unbedenklicher geogener Ablagerungen zu halten haben.

## 2.1 Anforderungen der europäischen Deponierichtlinie L31EG

Die europäische Deponierichtlinie (EU 1999 L31/EG) enthält eine Vielzahl von Anforderungen an die geordnete Ablagerung von Siedlungsabfällen. Daraus werden nachfolgend diejenigen zusammengefasst, die für das bauliche Konzept, die Sicherungseinrichtungen und die Gewährleistung der Langzeitsicherheit der Ablagerung entscheidend sind. Dabei werden zunächst einige der wesentlichen Sätze aus der Präambel (1) bis (34) zitiert, in denen die Begründung für die Richtlinie gegeben wird und nachfolgend aus den Artikeln (A1) bis (A19), mit denen die Ziele der Richtlinie erreicht werden sollen.

### Begründung der Richtlinie

- (6) Potentielle nachhaltige Auswirkungen auf die Umwelt und Gefahren für die menschliche Gesundheit müssen vermieden oder eingeschränkt werden.
- (7) Es sind Maßnahmen zu ergreifen, die in den Abfällen enthaltenen Stoffe beherrschbar zu machen.
- (7) Stoffe sollen nur in vorhersagbarer Weise reagieren.
- (8) Die Verwertung wird begünstigt, angestrebt ist eine Volumenverringerung sowie eine Verringerung der Stoffgefährlichkeit.
- (12) Vorbeugungs- und Schutzmaßnahmen sind erforderlich gegen kurz- oder langfristig abzusehende Umweltbeeinträchtigungen. Dabei ist vorrangiges Schutzziel, dass weder Grundwasserbeeinträchtigungen noch Bodenbeeinflussungen durch Sickerwasser stattfinden.
- (16) Methangas ist einzudämmen aus Gründen des Klimaschutzes.
- (23) Die Kontrollierbarkeit als Mittel, um in der Betriebs- und Nachsorgephase auf Schäden reagieren zu können, wird besonders betont.
- (24) Der Betreiber ist auch in der Nachsorgephase verantwortlich.

- (29) Deponiegebühren sollen alle Kosten für die Errichtung, den Betrieb, die Stilllegung und die Nachsorge umfassen.

### Ziele der Richtlinie (Artikel)

- (A2) Die Unterscheidung zwischen „Siedlungsabfällen“ und „gefährlichen“ Abfällen wird definitorisch in der EU-Richtlinie über gefährliche Abfälle (EU 91/689/EWG) festgelegt.

Inertabfälle werden definiert als Abfälle, die keinen wesentlichen physikalischen, chemischen oder biologischen Veränderungen unterliegen. Dabei müssen die Auslaugbarkeit und die Schadstoffgehalte der Abfälle unerheblich sein und diese sich nicht biologisch abbauen lassen.

- (A4) Die Deponien werden insgesamt 3 Klassen zugeordnet: Deponien für gefährliche Abfälle, für nicht gefährliche Abfälle und für Inertabfälle.
- (A5) Biologisch abbaubare Siedlungsabfälle müssen durch diesen Abbau innerhalb von 5 Jahren auf 75 %, nach 8 Jahren auf 50 % und nach 15 Jahren auf 35 % reduziert werden.
- (A6) Es dürfen nur behandelte Abfälle abgelagert werden, außer wenn sich durch die Behandlung die Menge und die Gefährdung nicht verringert. Behandelte Siedlungsabfälle gelten als „nicht gefährliche Abfälle“. Gefährliche Abfälle dürfen dort jedoch auch deponiert werden, wenn sie stabil und nicht reaktiv bzw. verfestigt sind. Dann gilt das Kriterium des Auslaugungsverhaltens.
- (A10) Das Entgelt während des Betriebes hat die Nachsorgekosten für zumindest 30 Jahre zu beinhalten.

### Anhang

- I.3.2 Gefordert wird eine geologische Barriere für Siedlungsabfälle in einer Mächtigkeit  $M \geq 1$  m und einer Durchlässigkeit  $k \leq 1,0 \times 10^{-9}$  m/s. Diese kann künstlich vervollständigt werden.
- I.3.3 Für Siedlungsabfalldeponien wird eine künstliche Basisdichtung gefordert, die jedoch nicht definiert wird. In Anlehnung an die Ausführungen zur geologischen Barriere darf geschlossen werden, dass es sich dabei um eine mineralische Dichtungsschicht derselben Anforderungen handeln wird. Weiterhin wird eine mehr als 0,5 m mächtige Drainageschicht gefordert. Eine Oberflächenabdichtung wird nur nach Abwägung vorgeschrieben. Sollte die Genehmigungsbehörde zur Auffassung kommen, dass sie erforderlich ist, wird eine Gasdrainage, eine mineralische Abdichtungsschicht, eine mehr als 0,5 m mächtige Drainageschicht und ein mehr als 1 m mächtiger Oberboden empfohlen.
- I.4 Eine Gasfassung wird vorgeschrieben, wenn biologisch abbaubare Abfälle abgelagert werden.
- III. Ein Mess- und Überwachungsprogramm während der Betriebs- und der Nachsorgephase wird vorgeschrieben und lässt im einzelnen sehr viel Spielraum.

Insgesamt muss angezweifelt werden, dass die eingangs formulierten hochgesteckten Ziele mit den in den Artikeln beschriebenen und im Anhang erläuterten Maßnahmen erreichbar sind. Insbesondere die in den Anhängen beschriebenen technischen Mindestanforderungen dürften als kleinster gemeinsamer Nenner der Mitgliedstaaten angesehen werden, deren Anwendung jedoch weder kurzfristig noch, angesichts der langen Übergangszeiten, in denen belastetes Sickerwasser produzierende Abfälle eingelagert werden dürfen, langfristig eine sichere Ablagerung garantiert. Zudem hat es sich in der Praxis herausgestellt, dass in Siedlungsabfällen weiterhin ein großer Anteil Abfälle enthalten sind, die gemäß EU (91/689/EWG) als gefährlich gelten. Im einzelnen wird auf die Erreichbarkeit der Ziele der EU-Richtlinie im Abschnitt 4 eingegangen.

## 2.2 Über die europäische Deponierichtlinie hinausgehende Anforderungen in Deutschland und Österreich

In **Deutschland** gilt für die Ablagerung von Hausmüll die TA SIEDLUNGSABFALL (1993). Vergleicht man ihre Ziele mit denen der EU-Richtlinie, so stimmen diese weitgehend überein, in ihrer Formulierung sind sie jedoch weiter gefasst:

- Abfälle sind weitestgehend zu verwerten.
- Die Schadstoffgehalte der Abfälle sind gering zu halten.
- Eine umweltgerechte Behandlung und Ablagerung der nicht verwertbaren Anteile ist sicherzustellen.

Im Unterschied zur EU-Richtlinie wird jedoch ausdrücklich gefordert, dass heutige Entsorgungsprobleme nicht auf zukünftige Generationen verlagert werden dürfen.

Hinsichtlich der Art und Weise, wie die sichere Ablagerung zu erfolgen hat, stellt die TA SIEDLUNGSABFALL insgesamt höhere Anforderungen:

- Die geologische Barriere muss sehr viel mächtiger sein, wenn auch nicht von so geringer Durchlässigkeit.
- Für die Basisdichtung ist eine Kombinationsdichtung vorgeschrieben.
- Die Basisdrainage muss technisch hochwertig ausgeführt sein.
- Eine hochwertige Oberflächenabdichtung ist zwingend vorgeschrieben; von der ursprünglichen Kombidichtung wird jedoch mittlerweile zunehmend Abstand genommen (R. STEGMANN 1997, K. BERGER & V. SOKOLLEK 1997)

Hinsichtlich der Ablagerung von Hausmüll wird vom Umweltministerium das Multibarrierenkonzept (K. STIEF 1986) als mit dem Abschnitt 10.1 in der TA SIEDLUNGSABFALL festgeschrieben angesehen (F. PETERSEN 1998). An die einzelnen Barrieren werden, zusammenfassend beurteilt, höhere Anforderungen als in der EU-Richtlinie gestellt. Für die Errichtung

von Deponien bedeutet dies vorrangig höhere Aufwendungen für das Basisdichtungssystem mit Flächendrainage und für die Oberflächenabdichtung.

Mittlerweile wird die Umsetzung der TA SIEDLUNGSABFALL sehr kontrovers diskutiert. Einerseits wird erkannt, dass die ihr konforme Ablagerung kaum finanzierbare Kosten verursacht (vgl. die ausführlichen Diskussionen in BMU 1999). Dabei ist jedoch derzeit nicht sichergestellt, dass deren Intention, das Nicht-Verlagern von Problemen in die Zukunft, erreicht wird. Andererseits werden von der Politik her noch weitergehende Ziele wie die vollständige Kreislaufführung durch Verwertung gesteckt (C.A. RADDE 1999).

In **Österreich** gelten für die Ziele ähnliche Bedingungen (AWG 1990/2000), doch wird zusätzlich hervorgehoben:

- Die Schonung von Rohstoff- und Energiereserven
- Das Verbot der Verlagerung des Entsorgungsproblems auf kommende Generationen (wie in Deutschland)
- Die Geringhaltung der Abfallmengen und die Abfallvermeidung ist ausdrücklich gefordert.
- Die reaktionsarme Lagerung
- Thermische und stoffliche Verwertung soll nur dann durchgeführt werden, wenn sie ökologisch vorteilhaft ist. (AWG1990/2000, §1 (2) 2.)

An die Methode der Ablagerung stellt man auch in Österreich höhere Anforderungen als die EU (DEPONIEVERORDNUNG 1996), wobei ab 2004-01-01 gilt:

- Man unterscheidet vier Deponietypen
  1. Bodenaushubdeponie
  2. Baurestmassendeponie
  3. Reststoffdeponie
  4. Massenabfalldeponie
- Gewisse Standorte sind - je nach Deponietypus - ausgeschlossen, insbesondere solche, die durch Massenbewegungen und Hoch-

- wasser gefährdet sein können (im alpinen Bereich sehr wichtig), solche mit stark klüftigem Untergrund, Wasserschutzgebiete im weitesten Sinn, aber auch Berücksichtigung von Gebieten zur Sicherung künftiger Wasserreserven.
- Verbot der Vermischung zum Zweck der Unterschreitung der im Anhang vorgegebenen Grenzwerte; eine gemeinsame Behandlung zählt nicht als Vermischung.
- Die geologische Barriere muss  $M \geq 5m$  betragen, wenn auch nicht von so geringer Durchlässigkeit sein.

- Die Basisdichtung muss als Kombinationsdichtung ausgeführt sein.
- Die freie Vorflut oder eine adäquate Einrichtung muss gewährleistet sein.
- Mit Ausnahme der Bodenaushubdeponie ist eine hochwertige Oberflächenabdeckung vorgeschrieben.

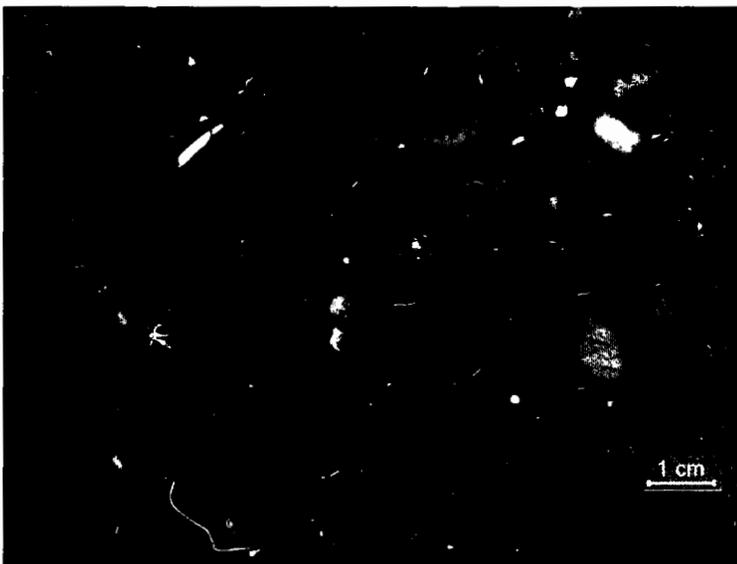
Bis 2003-12-31 wird vom Deponiebetreiber die Einhebung eines je nach Deponieausstattung gestaffelten „Altlastensanierungsbeitrages“ vorgeschrieben (ALSAG 1989/1996). Dieser Beitrag ist für den Fall einer eventuell nötigen zukünftigen Sanierung vorgesehen.

### 3 Die Methode der DIAGENETISCHEN INERTISIERUNG

Das Verfahren der DIAGENETISCHEN INERTISIERUNG wurde in Österreich für die Altlastensanierung entwickelt (G. RIEHL 1993). Sie läßt sich in sonst hydrogeologisch sensiblen Bereichen für alte, unzulänglich oder nicht abgedichtete Deponien anwenden.

Die Methode bietet sich als Alternative und Ergänzung zu den Verfahren der thermischen Abfallverwertung und der MBA an. Die nach diesem Verfahren errichtete DIAGENERT-Deponie zeichnet sich durch ihren nahezu nachsorgefreien Betrieb und ihre Endlagerstätten-Eigenschaft aus.

Die DIAGENETISCHE INERTISIERUNG ist ein patentrechtlich geschütztes Verfahren für die Bearbeitung und Ablagerung von mechanisch-biologisch vorbehandelten Siedlungsabfällen, von Sonderabfällen, MVA-Schlacke und Altlastenmaterial. Das Verfahren beruht auf dem Prinzip, die hohlraumreichen Abfälle mit mineralischem Feinkorn intensiv zu vermengen (Abb. 1) und dann mit sehr hoher Lagerungsdichte mittels schwerem Erdbaugerät einzubauen. Dabei entsteht ein Müllkörper von so geringer Durchlässigkeit, dass nahezu kein Niederschlagswasser eindringen und folglich nur Konsolidierungswasser, aber kein Sickerwasser



*Abb. 1: Aus verschiedenen Lysimetern bei Versuchen zur DIAGENETISCHEN INERTISIERUNG wurden Feststoffproben als Bohrkerne genommen (Beispiel: Altlastenmaterial, AL) und mit Gefriertrocknung und anschließender Tränkung mit Harzen stabilisiert (Ch. KISTEN, TU Berlin). Die Homogenität von mineralischer Matrix und Abfall ist sehr gut erkennbar. Schliffproben der Kerne konnten die Qualität der Vermengung im Mikroporenbereich bestätigen.*

entstehen kann, wenn die Methode nach den Regeln der Bodenmechanik und Erdbautechnik (Wassergehalt, Proctordichte, Einbau) optimal angewandt wird. Im Deponiekörper laufen über lange Zeiten geochemische Prozesse ab, die zu einer dauerhaften Festlegung, einem Einschluß und einem Umbau von Schadstoffen mit Gefährdungspotential für das Grundwasser – Inertisierung – führen. Dieses Prinzip ist dem in der Natur ablaufenden langfristigen Prozess der Diagenese (Gesteinsverfestigung) abgeschaut, aufgrund derer in der Natur, wie z. B. im Kupferschiefer (W. VORTISCH 1995), hochtoxische Stoffe in heute für die Umwelt völlig unschädlicher Form vorliegen

Die Sicherheit von Deponien mit nach der Methode der DIAGENETISCHEN INERTISIERUNG aufbereitetem Material beruht auf drei Säulen:

- 1) Ihre geringe Wasserdurchlässigkeit: Bei einem  $k_f$ -Wert deutlich unter  $10^{-9}$  m/s, findet nahezu keine Wasserbewegung im Müllkörper statt.
- 2) Die Bindung von Schwermetallen durch das Kationenaustauschvermögen der Tonminerale.
- 3) Die Fällung von Schwermetallen an Karbonaten und ähnlichen Verbindungen, so dass sie dann in schwer- bis unlöslicher Form vorliegen. Durch die homogene Verteilung der mineralischen Feinteile im Gemenge können diese in doppelter Hinsicht genutzt werden: Die Karbonate puffern das Milieu ab und sorgen so dafür, dass das Schadstoffbindevermögen der Tonminerale nicht geschädigt wird, die Tonminerale wiederum geben durch die Reduktion der Fließgeschwindigkeit im Müllkörper den Karbonaten für die Fällungsreaktionen Zeit (W. VORTISCH 1995).

Das Verfahren der DIAGENETISCHEN INERTISIERUNG wurde in langjährigen Versuchsreihen (Abb. 2) überprüft (G. RIEHL et al. 1996):

- Bislang neunjähriger Betrieb einer Versuchshalle mit 25 Großlysimetern in Katzelsdorf, Niederösterreich.
- Errichtung der ersten kommunalen Siedlungsabfalldeponie als DIAINERT-Deponie in Hehenberg, Oberösterreich, betrieben durch die Firma H. BURGSTALLER,

Haag am Hausruck, in den Jahren 1996 bis 2000. Diese Deponie wurde vollständig nach der Methode der DIAGENETISCHEN INERTISIERUNG aufgebaut. Sie enthält in erster Linie Altlastenmaterial der ungedichteten Vorläuferdeponie Taufkirchen. Außerdem konnte Material der Altlast Grubhof aus Rückständen der Lederindustrie nach dem Verfahren der DIAGENETISCHEN INERTISIERUNG bearbeitet und in Hehenberg wieder eingebaut werden.

- Von einer unabhängigen wissenschaftlichen Institution, dem Austrian Research Center Seibersdorf, Niederösterreich, werden seit 1999 Großlysimeter-Versuche mit nach dem Verfahren der DIAGENETISCHEN INERTISIERUNG behandeltem Material im Vergleich zu anderen in-situ - Sanierungsformen durchgeführt.

In naher Zukunft ist die Errichtung einer wissenschaftlichen Versuchsdeponie in Österreich und zweier gewerblich betriebener Referenzprojekte in Ost- und Südosteuropa in Vorbereitung.

### 3.1 Lysimeterversuche Katzelsdorf

In Katzelsdorf bei Wiener Neustadt, Österreich, wurden und werden Lysimeter-Langzeitversuche durchgeführt. Nullversuche an unbehandeltem Material werden dem nach der Methode der DIAGENETISCHEN INERTISIERUNG aufbereiteten Material gegenübergestellt, um die nötigen Feinteilzugaben mit mineralischen Rohstoffen verschiedener Herkunft und Zusammensetzung zu erproben und um die Grundlagen des Verfahrens zu erarbeiten.

Die Versuche wurden, obwohl die Methode in erster Linie für die Sanierung von Altlasten entwickelt worden ist, an verschiedenen Materialien mit je Lysimeter unterschiedlicher Feinteilzugabe ausgeführt, wobei von jeder Abfallart auch unvermengtes Ausgangsmaterial geprüft worden ist. Diese Nullversuchlysimeter erhielten generell die Bezeichnung „5“ und wurden mit der Menge des Niederschlagsäquivalentes des relativ trockenen südlichen Wiener Beckens (690 mm/a, d.s. für das Lysimeter 10 l/Woche) wöchentlich beaufschlagt (G. RIEHL et al. 1996).

Versuche / Ziele	Zeitraum	untersuchte Materialien	Bez.
<b>Vorprojekte</b>			
<i>Untersuchung über die Verwendung des Schlämmmaterials aus der Kieswäsche als Grundwasserschutz unter Deponien. (Untersuchungen an Kleinlysimitern - D 20cm, Freiluftlysimitern - D 100cm, und im Maßstab 1:1 in Breitenau - ca. 100.000 t Hausmüll)</i>			
<b>Acrylglaslysimeter Freiluftlysimeter</b>	1978 - 1982	Schlämmmaterial aus dem Wiener Becken Hausmüll aus Wien	
<b>Versuchsanlage Breitenau Maßstab 1:1</b>	1986 - 1995	Schlämmmaterial aus dem Wiener Becken Hausmüll aus Graz bzw. Wien	
<b>Lysimeter Katzelsdorf</b> ab 1992			
<i>Quantität und Qualität von Emissionen bei Wasserüberlagerung, Setzungen, Temperaturen (hydr.Gradient ca. 1,25 - Versuchsvolumen ca. 1,5 m<sup>3</sup> bzw 0,08 m<sup>3</sup>)</i>			
<b>1. Phase</b>	ab 12/92	Restmüll (Bez. Leoben) Vorerotteter Hausmüll Altlast (Fischer Deponie) ausgefaulter Klärschlamm (Wiener Neustadt) Rückstände der Rauchgaswäsche (EBS Wien, Schwechat)	<b>RM</b> <b>VH</b> <b>AL</b> <b>KS</b> <b>ES</b>
<b>2. Phase</b>	ab 1995	Verschiedene Feinteil/Abfall Mischungen. für die Mischungsoptimierung im Pilotversuch Hehenberg.	
<b>3. Phase</b>	ab 1996	Altlastmaterial Taufkirchen Haus-/Gewerbemüll ca. 30 Jahre alt  Altlastmaterial Grubhof Abfälle aus einer Lederfabrikation bis ca.40 Jahre alt	<b>HA</b> <b>WU</b>
Die Lysimeter stehen derzeit (2001) noch unter Beobachtung			
<b>Lysimeter Seibersdorf</b> 07/1999-07/2001			
<i>Vergleichende Untersuchungen an drei ausgewählten in-situ Sanierungsmethoden mit Nullversuch (Lysimetervolumen: 8 m<sup>3</sup>)</i>			
<b>Diagenetische Inertisierung</b>		Ausgangsmaterial für alle Varianten:	<b>Seib</b>
<b>Bio-Puster (Reakt.beschl. durch O<sub>2</sub>-Zufuhr)</b>		Altlastmaterial Taufkirchen	
<b>Flow-Monta (Basisdichtung: Montanwachs)</b>		(Haus-/Gewerbemüll)	
<b>Null-Versuch</b>		ca. 12 Jahre alt	
<b>Deponie Hehenberg</b> ab 1996			
<i>Quantität und Qualität von Emissionen, Temperaturen, Bodenmechanik unter realen Bedingungen im Großversuch mit verschiedenen Mischeinrichtungen (insges: 111.000 t)</i>			
<b>Vorversuche</b>		Abfallzwischenlager / frischer Hausmüll	<b>Drain 1</b>
<b>Mischgerät: Mehrfachwellenmischer</b>		Altlastmaterial Taufkirchen: Haus-/Gewerbemüll ca. 30 Jahre alt	<b>Drain 2</b>
<b>Mischgerät: gekapselter Zwangsmischer</b>		Altlastmaterial Grubhof: Abfälle aus einer Lederfabrikation bis ca.40 Jahre alt	<b>Drain 3</b>
Mengenaufeilung siehe Lageplan Abb. 4			

Abb. 2: Übersicht über die Versuchsphasen und die untersuchten Abfallarten

# LYSIMETERAUFBAU

## ACRYLGLASLYSIMETER

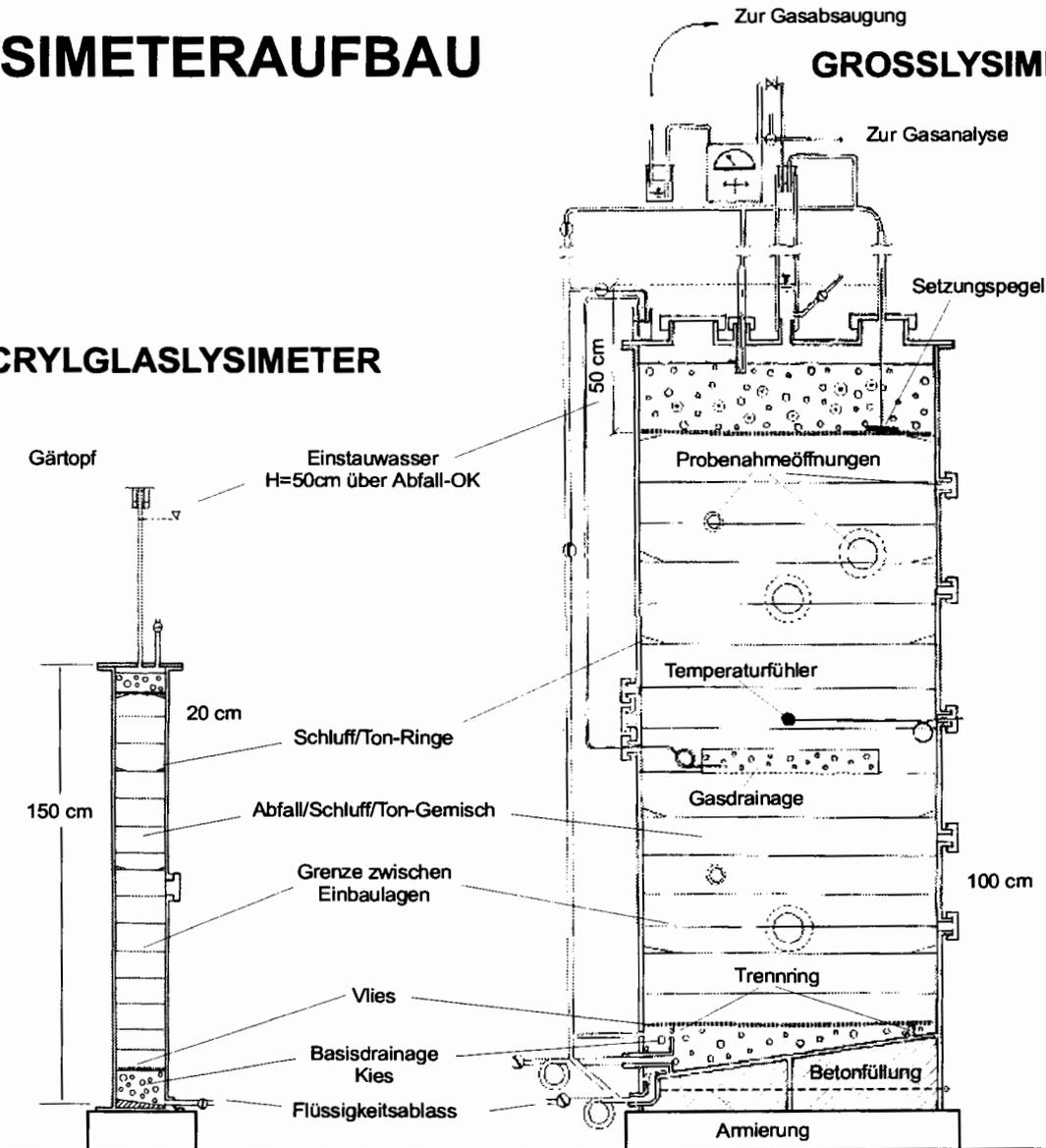


Abb. 3: Schema zum Aufbau der Versuchslysimeter

Die Großlysimeter bestehen aus einem zylindrischen Mantel aus Polypropylen von 250 cm Höhe und 100 cm Durchmesser mit einer zum unteren Auslaß hin schräg abfallenden Bodenplatte und einer luftdicht verschraubten Abdeckplatte. Auf die Bodenplatte wurde für die nach 1996 beginnenden Versuche ein Trennring aufgesetzt, um am Rand durchsickernde Wässer getrennt erfassen zu können, da sich bei Temperaturänderungen gezeigt hat, dass auf Grund unterschiedlicher Dehnungskoeffizienten von Untersuchungs- und Mantelmaterial randliche Wegsamkeiten entstehen können, durch die das Überlagerungswasser zur Basis abfließen kann. Über insgesamt 14 luftdicht verschließbare Öffnungen werden die austretenden Wässer und Gase abgeleitet, die Temperaturfühler und Pegel geführt und es können an verschiedensten Positionen verschiedene Materialproben genommen werden. Das schichtweise verdichtete Untersuchungsmaterial ist mit Kies sowie 50 cm Wasser überlagert.

Die Acrylglaslysimeter zur Sichtbarmachung der inneren Vorgänge weisen eine Höhe von 150 cm und einen Durchmesser von 20 cm auf. Das Material wird ebenfalls mit einer Wassersäule von 50 cm überlagert. Die Abb. 15 und 16 zeigen solche Lysimeter.

Mit den Materialien wurden zylindrische Großlysimeter von 2,5 m Höhe und 1 m Durchmesser verfüllt. Diese Lysimeter weisen entsprechende Öffnungen für Probenahme, Gas- und Sickerwasserableitung sowie Setzungspegel auf. Die Konstruktion der Lysimeter ist der Abb. 3 zu entnehmen. Eine Ergänzung an der Basisplatte stellt einen Innenring zur Abtrennung von Randumlaufwasser von der Kernzone dar. Der Ring wurde nachträglich eingebaut und hat sich sehr gut bewährt

Zusätzlich wurden die gleichen Materialien, die in die Großlysimeter verfüllt worden sind, auch in Acrylglaslysimeter mit 1,5 m Höhe und 20 cm Durchmesser zur Sichtbarmachung der Vorgänge eingebaut. Die Prüfmateriale sind permanent mit 50 cm Wasser (isotopisch markiert) überlagert, es wird also der „worst case“ einer ständig überfluteten Ablagerung simuliert (Unebenheiten und „Mulden“ auf der Deponieoberfläche, in denen längere Zeit Niederschlagswasser stehen bleibt).

Die erste Phase (Abb. 2) der Lysimeteruntersuchungen dauerte von 12/92 bis 12/95; zum Abschluß dieser Versuchreihe wurden einige Lysimeter geräumt und die Materialien nochmals eingehend untersucht. Die Ergebnisse der ersten Versuchsphase sind bereits veröffentlicht (G. RIEHL et al. 1996).

Eine zweite Phase (1995-1996) umfasste die Verfüllung von 13 Acrylglaslysimetern mit Müll/Feinteilmengen aus verschiedenen Mischungsvorgängen zur Festlegung der geeignetsten Mischmaschinenausstattung.

In einer dritten Phase wurden wiederum Groß- und Acrylglaslysimeter mit „Hehenberg-spezifischen“ Materialien zur Paralleluntersuchung zum Deponieeinbau verfüllt (Altlast Taufkirchen=HA, Altlast Grubhof=WU). Hierbei wurde auch der Einfluß der Aussortierung thermisch verwertbarer Kunststoffe auf die Endlagerqualität untersucht.

Parallel zu dieser dritten Phase sind vom Austrian Research Center (ARC) Seibersdorf Versuchslysimeter eingerichtet worden, mit deren Hilfe verschiedene in-situ-Methoden der Altlastensanierung überprüft werden.

Die Lysimeter der ersten Versuchsphase werden bis dato weiterhin betreut. Es stehen heute Untersuchungsergebnisse über eine Dauer von

nahezu neun Jahren zur Verfügung, so dass von einem „Langzeitversuch“ gesprochen werden kann.

### 3.2 DIAINERT-Deponie Hehenberg

In die Deponie Hehenberg des Abfallverbandes Grieskirchen (Abb. 4 und 5) konnten die nach der Methode der DIAGENETISCHEN INERTISIERUNG aufbereiteten Materialien der Altlast Taufkirchen und der Altlast Grubhof eingebracht werden; zusätzlich erfolgte während der Aufarbeitung dieser Materialien eine wechselnde, jedoch geringfügige Beimengung von Frischmüll, wobei vor allem zu Beginn kurz vorgerotteter und frischer Abfall eingebaut worden sind.

Die Altlast Taufkirchen enthielt gemischten unsortierten Hausmüll aus einem Gebiet mit landwirtschaftlicher Dominanz und war etwa 30 Jahre gelagert. Vor Einbringung des Materials wurde dieses nach einer optischen Kontrolle und Vorauslese von gefährlichen Anteilen und Metallkomponenten zerkleinert, gesiebt und die brennbaren Anteile für die thermische Verwertung ausgeschieden.

Die Altablagerung der ehemaligen Deponie Grubhof war durch die Produktionsabfälle einer Lederfabrik stark belastet, sie enthielt vor allem Lederreste, Haare, Filz und Produktionshilfsmittel, wobei polycyclische aromatische Kohlenwasserstoffe, vorrangig Naphthalin, Benzolhomologe, sowie vor allem Chrom den Untergrund belastet haben. Die Vermengung mit mineralischen Feinteilen fand direkt neben der Altlast statt. Der Abbau dieses Materials erfolgte unter einem Zelt mit Frischluftzufuhr und Abluftreinigung. Im Zelt wurde eine Vorauslese und Zerkleinerung des Materials mit anschließender Siebung vorgenommen. Der Abfall wurde in einem eingekapselten Zwangsmischer mit mineralischen Feinteilen vermengt, und das Gemenge zur Deponie Hehenberg gebracht.

Für den Bau der Deponie Hehenberg war amtlicherseits aus formaljuristischen Gründen die Konstruktion einer konventionellen Deponie mit voller Abdeckung vorgeschrieben, unabhängig von der Einlagerung des nach der Methode der DIAGENETISCHEN INERTISIERUNG aufbereiteten Materials.

# DIAINERT-DEPONIE HEHENBERG

## Schematischer Lageplan

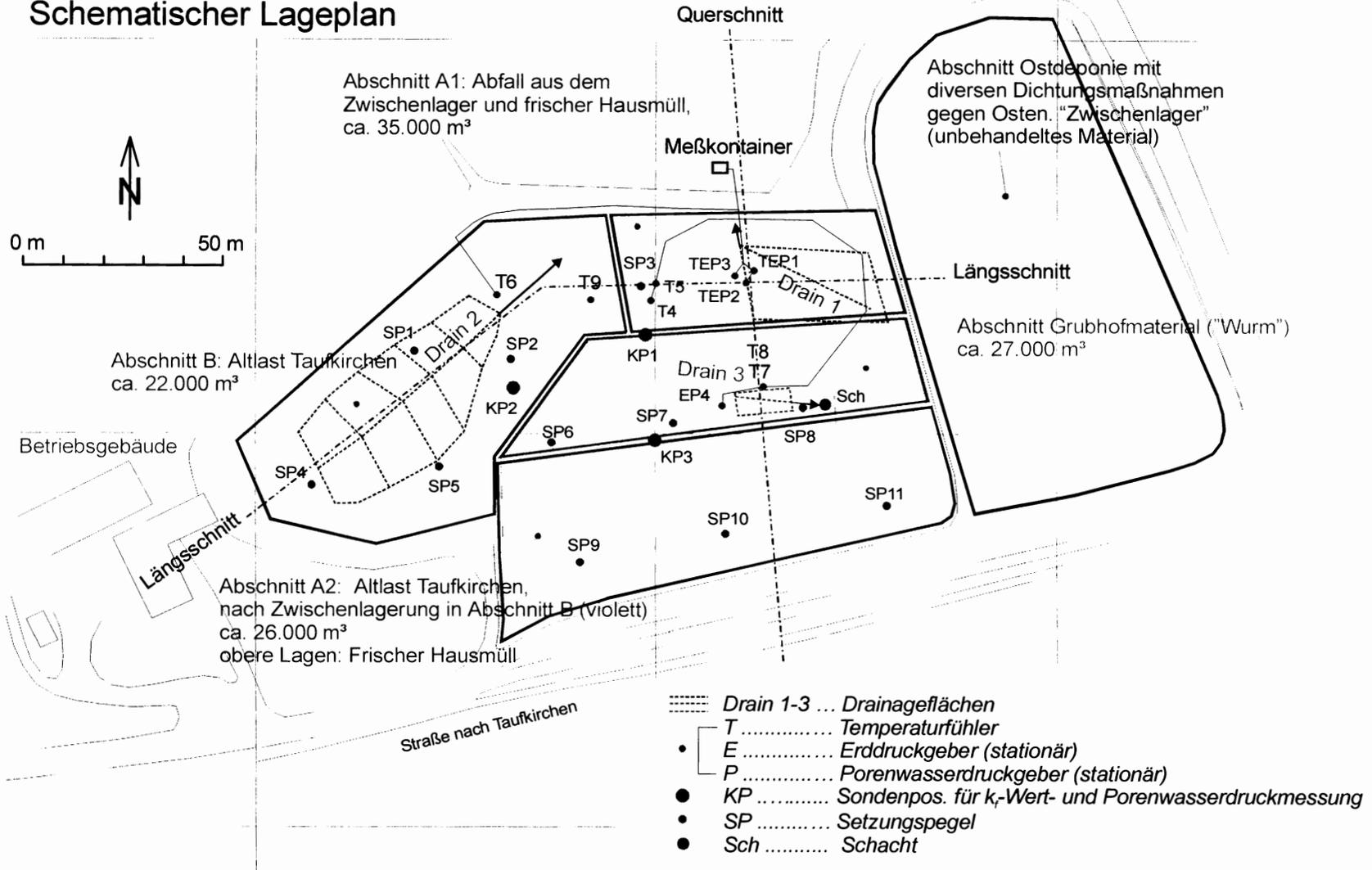
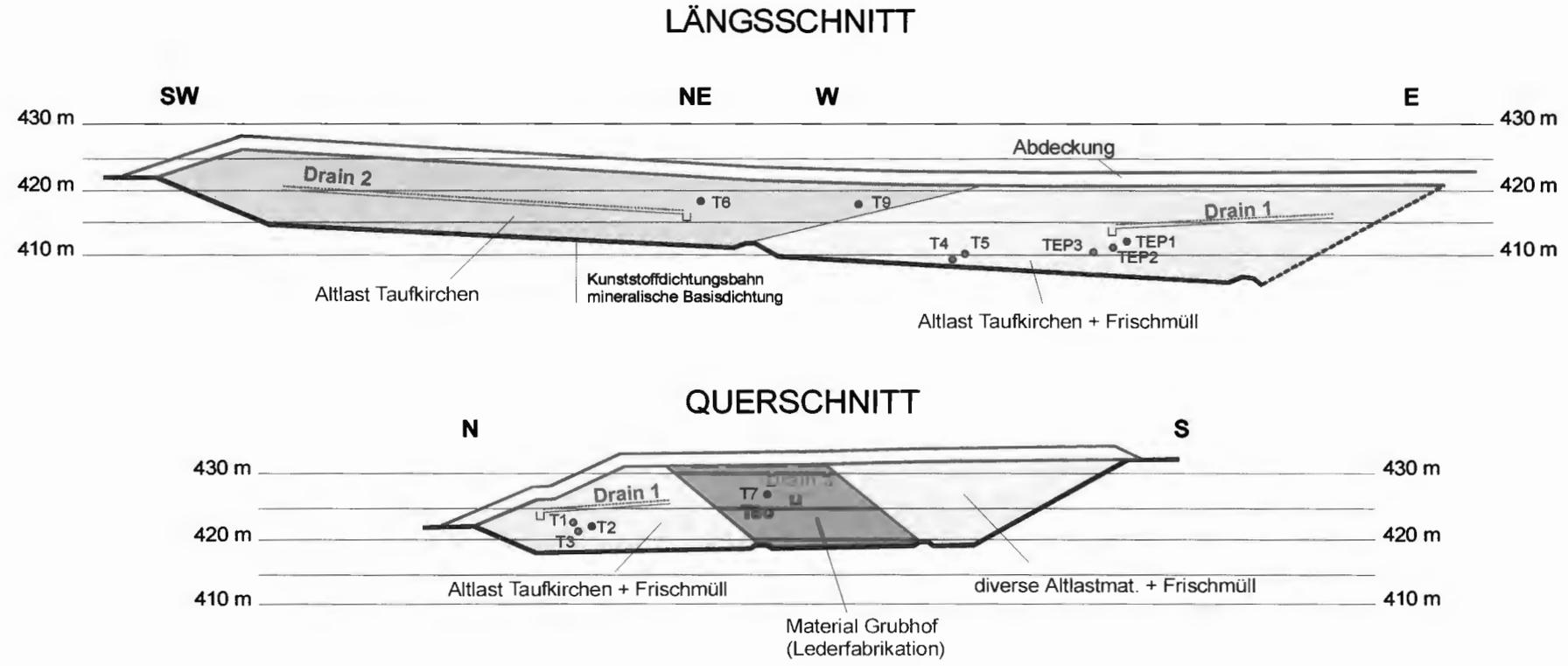


Abb. 4: Übersichtsplan der DIAINERT-Deponie Hehenberg mit den einzelnen Abschnitten, Messpositionen und Drainagen sowie der Position der in Abb. 5 gezeigten Schnitte.

# DIAINERT-DEPONIE HEHENBERG

## Schematische Schnitte



- T..... Temperaturfühler
- TEP ... Temp-, Erddruck- und Porenwasserfühler
- ▤ Drain1 bis Drain3 .... Drainageflächen im Deponiekörper
- └ Drainageableitung

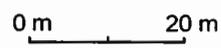


Abb. 5: Schematische Schnitte durch die DIAINERT-Deponie Hehenberg. Position der Drainagen und Messfühler.

Die Basisdichtung der Deponie Hehenberg besteht folglich aus einer mineralischen Dichtung auf der geotextilgeschützte verschweißte Kunststoffdichtungsbahnen bis zur Oberkante der Deponiewanne verlegt worden sind. Gegen die Ostdeponie hin, einem älteren Abschnitt, erfolgte keine Abdichtung, lediglich ein Lehm-schlag an der Basis trennt die beiden Abschnitte. Einen schematischer Schnitt durch die Deponie zeigt Abb. 5.

Die Verfüllung der Deponie begann im August 1996, wobei die Altlast Taufkirchen ab Februar 1998 und die Altlast Grubhof ab Dezember 1998 eingebracht worden sind. Die Einbringung beider Materialien endete mit September 1999. Bis September 2000 werden Finalarbeiten durchgeführt, die Schüttung geringer Abfallmengen vermengt mit mineralischen Feinteilen ist bis Juli 2001 vorgesehen.

In der Deponieanlage Hehenberg stehen drei Kompartimente (Abb. 4) für Untersuchungen zur Verfügung. In einer Höhe von ca. 6 m über der Basisdrainage sind Zwischendrainagen angeordnet, die der Erfassung von Emissionen dienen. Im Kompartiment mit Drain 1 wurde zwischengelagertes und vorgerottetes sowie frisches Material nach der Methode der DIAGENETISCHEN INERTISIERUNG aufbereitet und eingebracht, im Feld mit Drain 2 fast ausschließlich nach der Methode der DIAGENETISCHEN INERTISIERUNG aufbereitetes Altlastenmaterial Taufkirchen - bedingt durch den raschen Einbau nur sehr wenig Frischmüll - und im Bereich um Drain 3 Altlastenmaterial aus Grubhof. Parallel dazu erfolgten auch Lysimeteruntersuchungen (vgl. 3.1.).

### 3.3 Hausmüll Versuchsanlage Breitenau

Die Entwicklung der Methode der DIAGENETISCHEN INERTISIERUNG wurde begonnen, als sich abzeichnete, dass die konventionelle Reaktor - Deponie (R - Deponie) lediglich Sicherungseigenschaften auf Zeit und keine Endlagereigenschaften vorweist. Diese Erkenntnisse konnten insbesondere mit der großmaßstäblichen wissenschaftlichen Versuchsdeponie, der Hausmüll-Versuchsanlage Breitenau, erarbeitet werden. Aus diesem Grunde und weil die dort ermittelten Daten für Vergleichszwecke heran-

gezogen werden können, wird auf Breitenau nachfolgend ausführlicher eingegangen.

In Breitenau am Steinfeld, Bez. Neunkirchen, NÖ, wurde 1986-1988 von der TU Wien, Inst. f. Geologie (Inst.Vorst. F. MAKOVEC) und Inst. f. Wasserwirtschaft, Abt. Abfallwirtschaft (Inst.Vorst. W. KEMMERLING) eine Versuchsdeponie mit unsortiertem Hausmüll errichtet (Abb. 14).

Die Beobachtung dieser Ablagerung erfolgte permanent bis 1995. Da es keine kommerzielle Deponie dieser Dimension gibt, die eine so intensive und ununterbrochene Beobachtung erfahren hat (D. RANK et al. 1992; A. LAGERKVIST et al., 1997) und deren Müllzusammensetzung auch nur annähernd so genau bekannt ist (A. LAGERKVIST et al. 1995), wird die Hausmüllversuchsanlage als Beispiel einer konventionellen Deponie herangezogen.

Zum Schwerpunkt der Untersuchungen war das Thema des Einflusses von müllverfüllten Kiesgruben auf das Grundwasser gewählt worden, die Eignung von Schlämmrückständen aus der Kieswäsche als Grundwasserschutzschicht und der Einfluß von Deponieabdeckung und Oberflächengestaltung auf den Wasserhaushalt konnten zusätzlich einbezogen werden.

Die Errichtung dieser Versuchsdeponie war die letzte Stufe einer Untersuchungsfolge. Die Ergebnisse der ersten beiden Phasen (Lysimeterversuche an Schluffen - Modelldimension einige Liter, halbtechnischer Versuch in Großlysimeter - Modelldimension ein m<sup>3</sup>, sind veröffentlicht (G. RIEHL et al. 1983) ebenso die Ergebnisse der ersten fünf Jahre der Versuchsanlage (G. RIEHL & P. LECHNER 1995) sowie der Folgejahre (G. RIEHL et al. 1997).

Die Versuchsdeponie Breitenau ist in drei Felder mit z.T. unterschiedlicher Basisausführung und unterschiedlichen Oberflächenabdeckungen untergliedert.

Die Einbringung des befeuchteten und verdichteten Abfalles erfolgte von 1/87 bis 09/88, abschließende Abdeckungs- und Finalisierungsarbeiten waren mit 03/89 beendet.

An Hand der Schnittbilder zur Versuchsanlage Breitenau (Abb. 14) werden die wesentlichen Ergebnisse noch einmal zusammenfassend dargestellt.

## 4 Zusammenfassende Ergebnisdarstellung der wissenschaftlichen Arbeiten und betreuende Messüberwachung; Parameter-Erfassung

Es würde den Rahmen dieser Arbeit sprengen, die gesamten ermittelten Daten an dieser Stelle bekannt zu geben; es sind daher einzelne, charakteristische Werte bei unterschiedlichen Materialien herausgestellt, wobei bei den Lysimeterversuchen besonders vorgerotteter Hausmüll (VH) und Altlastenmaterial (AL) herangezogen werden, da diese für die Vergleichsbetrachtung zur DIAGENERT-Deponie Hehenberg und zur konventionellen Deponie, der Hausmüll-Versuchsanlage Breitenau, die meiste Relevanz besitzen.

### 4.1 Raumgewicht

Das Raumgewicht des nach der Methode der DIAGENETISCHEN INERTISIERUNG aufbereiteten Materials ist nicht nur von der Zugabe der Feinteile abhängig, sondern vor allem von der optimalen und fachgerechten Verdichtung beim Einbau. Diese ist technisch ohne Probleme durchführbar, da die gegenüber unbehandeltem Material wesentlich bessere Kornabstufung und Konsistenz des behandelten Materials die gute Kompaktion begünstigt. Abb. 6 zeigt dies anhand einiger ausgewählter Proctorkurven.

Für die Erreichung einer optimalen Einbaudichte spielt, wie aus dem Erdbau bekannt, beim Einbau gemischtkörniger bindiger Böden der Wassergehalt eine entscheidende Rolle. Die jeweils günstigsten Wassergehalte (Schnittsehn) sind dem nachstehenden Diagramm zu entnehmen (Abb. 6).

Es konnten in den Lysimetern Trockendichten zwischen  $1,2 \text{ t/m}^3$  und  $1,3 \text{ t/m}^3$ , bei geringen  $C_{\text{org}}$ -Gehalten von über  $1,5 \text{ t/m}^3$  erzielt werden. Messungen auf den Versuchsfeldern von Hehenberg mittels Sandersatzversuchen erbrachten ebenfalls Werte zwischen  $1,2 \text{ t/m}^3$  und  $1,3 \text{ t/m}^3$ . Diese Trockendichte entspricht einer Feuchtdichte von ca.  $1,5$  bis  $1,85 \text{ t/m}^3$ .

Die gute Kompaktierbarkeit und die hohen erzielbaren Dichten ermöglichen es, dass trotz der Zugabe von Feinteilen kein zusätzlicher Deponieraum benötigt wird. Bei manchen Abfallarten konnte sogar eine Volumersparnis von über 10 % erreicht werden.

### 4.2 Setzungsverhalten

Für eine eventuelle Nachnutzung von großem Interesse ist das Setzungsverhalten des Abfallkörpers. Bei konventionellen Deponien wie Breitenau treten Setzungen im Ausmaß von bis zu 20% der Einbauhöhe auf, die sich auch auf technische Einrichtungen (Drainageleitungen, Zwangsentgasung etc.) naturgemäß negativ auswirken.

In Hehenberg kann über Setzungen noch wenig ausgesagt werden; erste Messungen lassen jedoch den Schluß zu, dass sich das nach der Methode der DIAGENETISCHEN INERTISIERUNG aufbereitete Material auch in der Pilotdeponie so verhält wie in den Lysimetern. Auf Grund der guten Verdichtbarkeit sind bei korrektem Einbau Setzungsbeträge unter 2% zu erwarten, im Regelfall unter 1%.

### 4.3 Durchlässigkeit

Dem Parameter „Durchlässigkeit“ galt eines der Hauptaugenmerke der Untersuchungen. Die Durchlässigkeit wurde sowohl vor dem Einbau in das Lysimeter nach ÖNORM B2400 mit konstanter Druckhöhe ermittelt als auch in einer Auswertung als Großversuch mittels Umrechnung der Emissionsdaten auf die gegebenen Versuchsbedingungen. Probeweise gab es auch Feldmessungen mit BAT-Technologie (Permeameter): Mittels einer Rammsonde wird eine Filterspitze (*filter tip*) in die gewünschte Mess- bzw. Probenahmetiefe gebracht und über eine doppelendige Injektionskanüle eine hydraulische Verbindung zwischen dem Zielhorizont und der Mess-/Entnahmesonde hergestellt.

Außerdem sind die hydraulischen Daten der Versuchsfelder der Deponie Hehenberg ausgewertet und damit für Deponievolumina von  $8500 \text{ m}^3$  großräumige  $k_f$ -Werte bestimmt worden. In Abb. 8 sind die  $k_f$ -Werte aufgelistet und im untersten Teil als Diagramm dargestellt. Zusätzlich sind diese Werte denen der Basisdichtung einer konventionellen Deponie als Vergleich gegenübergestellt.

## Darstellung der Standard-Proctorversuche

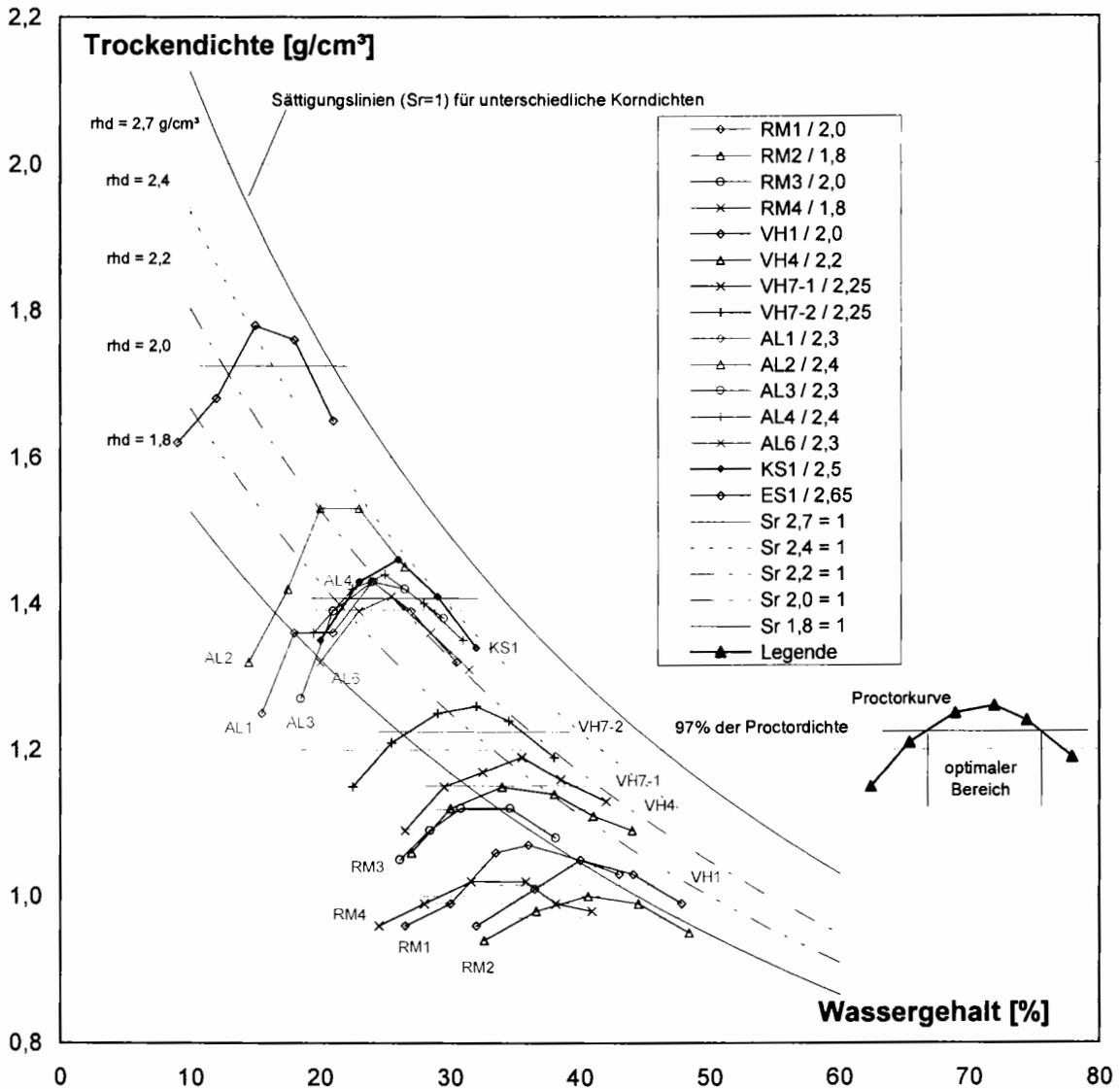
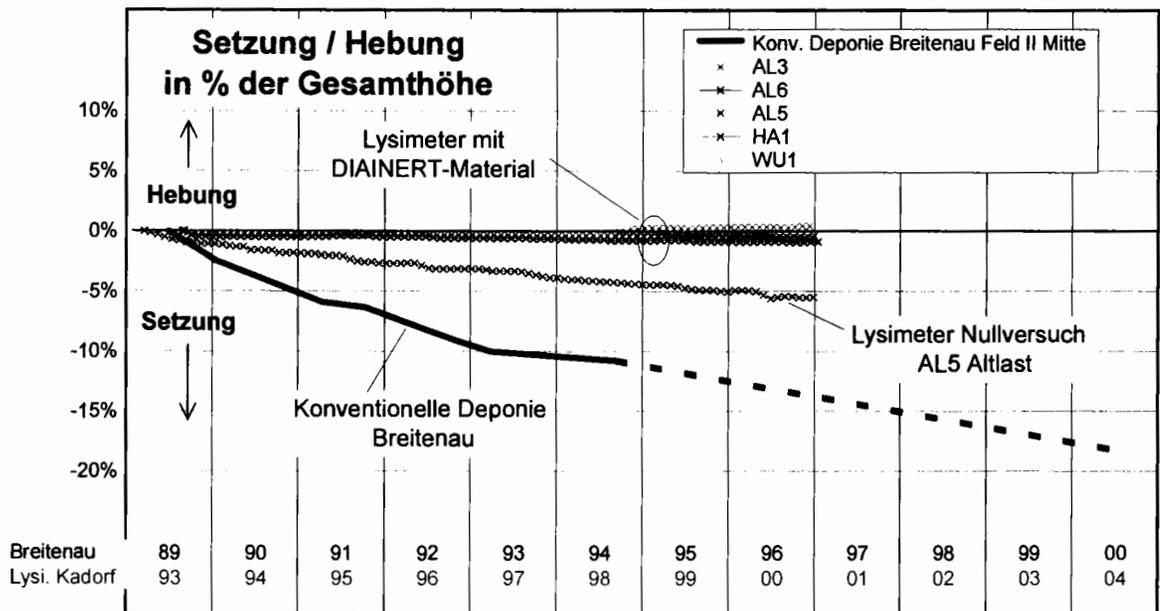


Abb. 6: An verschiedenen nach der Methode der DIAGENETISCHEN INERTISIERUNG aufbereiteten Untersuchungsmaterialien wurde die optimale Einbaudichte bestimmt. (RM = Restmüll, VH = vorgeroteter Hausmüll, AL = Altlastenmaterial, KS = Klärschlamm, ES = Rauchgasreinigungserzeugnis; die unterschiedlichen Nummern bezeichnen verschiedene Zusammensetzungen der Müll/Feinteilmischung). Die Sättigungskurven in dieser Sammeldarstellung entsprechen der vollständigen Sättigung bei unterschiedlichen (geschätzten) Korndichten (in der Legende neben der Lysimeterbezeichnung, z.B. RM1/2,0), wobei der Heterogenität der Abfallmaterialien wegen (mit Ausnahme von ES und KS) nur bedingt von einem Korngefüge im bodenmechanischen Sinn gesprochen werden kann.

Die optimale Proctordichte nimmt mit der Abnahme des organischen Kohlenstoffes zu; dies liegt daran, dass mit zunehmender Fortdauer der Umsetzung auch mehr organische Feinteile als Rückstände mikrobieller Umsetzungen im Material vorliegen. Mit der Abnahme von Korngröße und Organik ist die optimale Dichte bei immer niedrigeren Wassergehalten zu erzielen. Der optimale Wassergehalt umfasst jeweils einen Bereich von ca. 10 % (Schnittsehne der Proctorkurve, rechts im Bild).

(Untersuchungen: BOKU-Wien, Inst. f. Geotechnik, Univ.Prof. Dipl.Ing. Dr. O. PREGL, in: G. RIEHL-H. et al. 1996)



**Abb. 7: Vergleich der Setzungen in den Lysimeterversuchen bei AL - Altlastenmaterial. Deutlich ist das Absinken der Oberkante des unbehandelten Materials (rot) zu erkennen, während das nach der Methode der DIAGENETISCHEN INERTISIERUNG aufbereitete Material kaum Setzungen zeigt. Zum Vergleich ist die Setzung auf der Hausmüll - Versuchsanlage Breitenau als Beispiel einer konventionellen Deponie angeführt (schwarz). Bei der Bewertung der Eigensetzungen zu berücksichtigen ist allerdings, dass die Lysimeter eine Höhe von lediglich 2 m aufweisen, während die Versuchsanlage Breitenau eine Ausgangsschütthöhe von etwa 12 m aufwies. Die Ergebnisse der Lysimeter sind alle direkt miteinander vergleichbar, bei den Breitenau-Werten muss die erhöhte Auflast auf die tieferen Schichten in Ansatz gebracht werden.**

Nahezu in allen Fällen ist der  $k_f$ -Wert besser als der für mineralische Basisdichtungen vorgeschriebene Wert von  $1 \cdot 10^{-9}$  m/s (In-situ-Messung). Mit Fortdauer der Lagerung nimmt diese Durchlässigkeit noch ab, da dank der Plastizität des nach der Methode der DIAGENETISCHEN INERTISIERUNG aufbereiteten Materials nach dem Austritt der Konsolidierungswässer dieses noch geringdurchlässiger wird.

#### 4.4 Sickerwasserentwicklung

Einer der großen Kostenfaktoren bei der Betriebsführung einer Abfalldeponie ist das Sickerwasser und seine Entsorgung (W. BAUMANN 1985). Wegen der Gefährdung des Grundwassers ist Deponiesickerwasser eines der gravierendsten ökologischen Risiken (P. BACCINI, et al., 1987). Besondere Bedeutung kommt dem Umstand zu, dass Schwer-

metalle nur durch das Wasser in die Biosphäre verfrachtet werden (L. SIGG, et al. 1996).

Eine Abfalldeponie setzt Wässer verschiedener Entstehung frei:

- Sickerwasser: Meteorische Wässer, die in den Abfallkörper eindringen, diesen durchströmen und auslaugen und an der Basis wieder austreten.
- Prozesswasser: Entsteht bei der Umsetzung organischer Materie; mengenmäßig fällt es bei konventionellen Deponien gegenüber dem Sickerwasser kaum ins Gewicht
- Porenwasser: In Mikroporen enthaltenes Wasser („Feuchtigkeit“, „Bergfeuchte“ etc.). Unter Druck (Kompaktion) kommt es zur gravitativen Entwässerung und es tritt ein Teil als „Konsolidierungswasser“ aus; ein Rest bleibt als „Bergfeuchte“ erhalten.

Durchlässigkeit $k_f$ [m/s]													
	Vor dem Einbau nach ONORM B2400			Während des Versuches berechnet aus Versuchsbedingungen									
	Schicht höhe [m]	hydr. Grad	$k_f$ -Wert	Schicht höhe [m]	hydr. Grad	$k_f$ -Wert							
						1	2	3	Versuchsjahr		6	7	8
<b>in-situ Versuche</b>													
<b>Mineralische Basisdichtung: Konvent. Deponie, Versuchsanlage Breitenau (siehe Kap. 3.3.)</b>													
Feld I				1.8	1.2	8,8E-10	7,0E-10	6,1E-10	5,4E-10				
Feld II				1.8	1.2	6,9E-10	1,1E-09	1,1E-09	9,8E-10				
<b>DIAINERT-Deponie Hehenberg</b>													
Drain 2 (Altlast Taufkirchen)				4.5	1	5,9E-09	5,4E-10						
P2 (Altlast Taufkirchen)							1,3E-10	... BAT-Permeameter (in 4m Tiefe)					
P3 (Material Grubhof)							9,1E-11	... BAT-Permeameter (in 7m Tiefe)					
<b>Lysimeterversuche (DIAINERT-Material)</b>													
(Vor dem Einbau: Schichthöhe 0.1-0.25 m, hydr. Gradient 10-20)													
<b>Restmüll: "Saubermacher", Bez. Leoben</b>													
RM2 (RM)			7,7E-09	2.01	1.25	8,9E-10	2,0E-10	4,7E-10	1,9E-10	1,3E-10	1,1E-10	8,7E-11	7,7E-11
RM4 (RM)				2.04	1.25	1,4E-09	3,8E-10	4,4E-10	2,6E-10	1,3E-10	1,6E-10	1,3E-10	1,3E-10
<b>Vorgerotteter Hausmüll: Deponie Hehenberg, Bezirk Grieskirchen</b>													
VH1 (VH)	0.1	20	1,4E-09	1,98	1,25	9,6E-10	2,3E-10	1,3E-10	7,6E-11	8,5E-11	1,1E-10	8,4E-11	1,0E-10
VH4 (VH)				2,04	1,25	7,3E-10	1,0E-10	4,9E-11	5,5E-11	4,9E-11	6,3E-11	5,4E-11	
VH7 (VH)			8,0E-11	2,02	1,25	1,5E-10	4,7E-11	5,0E-11	5,8E-11	4,3E-11	4,6E-11		
<b>Altlast: "Fischerdeponie", NÖ, ca. 25a</b>													
AL3 (AL)	0.1	10	1,2E-10	1,92	1,26	1,4E-11	3,9E-11	1,1E-10	8,1E-11	6,4E-11	7,1E-11	6,6E-11	
AL4 (AL)	0.1	10	1,5E-10	1,83	1,27	3,0E-10	1,6E-10	2,0E-10	1,1E-10	8,1E-11	8,9E-11	7,8E-11	
AL6 (AL)	0.1	10	4,5E-10	1,87	1,27	4,7E-10	3,2E-10	1,7E-10	9,0E-11	1,1E-10	9,0E-11	8,4E-11	
<b>Klärschlamm (ausgefaut): Kläranlage Wiener Neustadt</b>													
KS2 (KS)			6,2E-07	2,03	1,25	5,0E-10	2,0E-10	1,6E-10	1,5E-10	9,8E-11	1,3E-10		
KS5 (KS)				2,04	1,25	3,2E-09	2,4E-09	5,3E-09	4,6E-09	7,4E-09	7,2E-09	1,0E-08	
<b>Altlast Taufkirchen: Deponie Hehenberg, ca. 40a</b>													
HA1 (Altlast 40a)				1,80	1,28	4,2E-10	3,2E-10						
HA2 (Altlast 12a)			8,2E-10	1,93	1,26	6,1E-10							
HA3 (Altlast 12a)				1,99	1,25	5,8E-10							

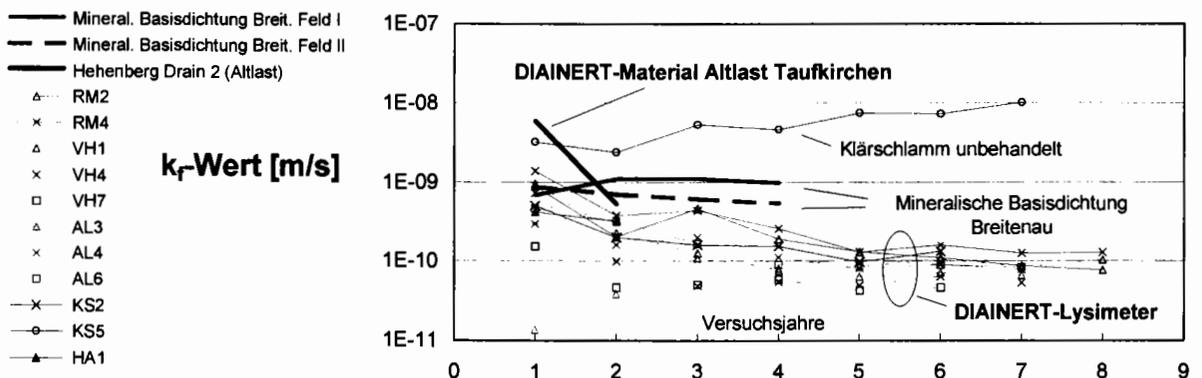
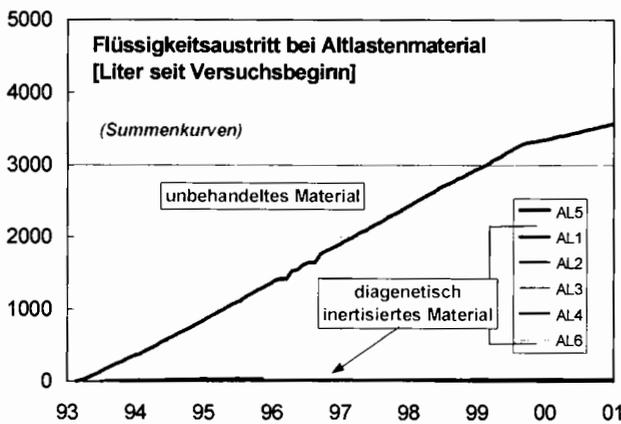


Abb. 8: Die  $k_f$ -Werte der nach der Methode der DIAGENETISCHEN INERTISIERUNG aufbereiteten Materialien wurden vor dem Einbau in Normversuchen bestimmt. Während der Langzeitbeobachtung der Großlysimeter erfolgte die Ableitung aus den Versuchsbedingungen und den austretenden Flüssigkeitsmengen. Bei fast allen Materialien zeigt sich eine Tendenz zu weiterer Verbesserung der Werte. (Laborwerte vor dem Einbau: Univ.Prof. Dipl.Ing. Dr. O. PREGL, Inst. f. Geotechnik, BOKU-Wien, in: G. RIEHL-H. et al. 1996)

## Lysimeterversuche

Bereits in der ersten Versuchsphase hat sich gezeigt, dass die nach der Methode der DIAGENETISCHEN INERTISIERUNG aufbereiteten Mischungen trotz dauernder Überlagerung mit einer 50 cm Wassersäule nur wenig Flüssigkeit abgeben. Das Überlagerungswasser wurde isotopisch markiert und Untersuchungen an den austretenden Wässern haben bewiesen, dass es sich hierbei ausschließlich um durch Eigenkompaktion ausgepresstes Konsolidierungswasser handelt. Die  $k_f$ -Werte betragen  $10^{-9}$  m/s bis  $10^{-11}$  m/s. Das nicht behandelte Material der Nullversuche wird vom Wasser sofort durchströmt (Abb. 9).



**Abb. 9:** *Summe der austretenden Flüssigkeiten am Beispiel AL - Altlastenmaterial; während die aufgegebene Wassermenge das unbehandelte Material zur Gänze durchsickert, ist die Menge des austretenden Porenwassers der diagenetisch inertisierten Abfälle (Konsolidierungswasser) so gering, dass es im Mengenvergleich bei linearem Maßstab kaum darstellbar ist.*

## Deponie Hehenberg

Die aus der Drainage 2 austretenden Flüssigkeitsmengen lagen anfangs auf Grund der Einbaubedingungen (ursprünglicher Wassergehalt, Niederschläge während der Verarbeitung) sehr hoch; sie fielen jedoch unerwartet schnell ab und gelangten ein Jahr nach dem Einbau sogar noch unter den ohnedies niedrigen Mengenbereich der Lysimeter (Abb. 11-12). Die gute

Qualität der Verarbeitung und Verdichtung in diesem Bereich der Deponie ist nicht zuletzt darauf zurück zu führen, dass eine kontinuierliche fachliche Betreuung und gesonderte Bauaufsicht (R. PERNITZ) erfolgt ist.

Etwas anders gelagert ist die Situation bei Drain 1, da durch den Bau einer Verarbeitungshalle auf der Deponie bei der Fundierung der Abfall/Feinteilkörper durchstoßen und so die Drainageschicht direkt von der Oberfläche her alimentiert worden ist. Die niederschlagsbedingten Schwankungen sind sehr gut der Abb. 11-12 zu entnehmen. Außerdem steht die Drainage 1 mit der Außenseite und damit dem angrenzenden alten Ostabschnitt (Abb. 4) der Deponie in Verbindung, was infolge eines Unfalles wegen ausgetretenen Benzins, das als „Tracer“ in Drainage 1 wiedergefunden werden konnte, nachgewiesen worden ist. Die Daten dieses Feldes müssen daher für eine Bewertung der Sickerwasserproduktion vernachlässigt werden.

Drain 3 entwässert das Grubhof-Material. Leider ist dieses Material vor dem Einbau längere Zeit ohne wirkungsvolle Abdeckung „auf Zwischenlager“ gelegt worden. Das niederschlagsreiche Wetter 1999 sorgte für völlige Durchnässung des locker geschütteten Gemenges. Daher ergeben sich hier sehr hohe Wassermengen, die jedoch zwischenzeitlich stark zurückgehen (ca. Faktor 10).

Für die Praxis ergibt sich daraus, dass nicht nur der angelieferte Abfall kontrolliert und dokumentiert werden muss, wie es gesetzlich vorgeschrieben ist, auch Bearbeitung und Einbau bedürfen einer kontinuierlichen fachlichen Betreuung, um eine Minimierung technischen und menschlichen Versagens zu erreichen.

## Frachten in austretenden Flüssigkeiten

Von den Schadstoffkonzentrationen her - insbesondere die Organik betreffend - sind sich die aus den unterschiedlichen Deponietypen austretenden Flüssigkeiten sehr ähnlich. Für die Umweltbelastung sind allerdings nur die Schadstofffrachten insgesamt relevant. Diese belegen eindeutig die Überlegenheit der DIAGENETISCHEN INERTISIERUNG. Als Beispiel sei hier Quecksilber als besonders kritisches

Schwermetall in Rückständen aus der Rauchgaswäsche nach der thermischen Behandlung von Abfällen herausgegriffen (Abb. 10).

Da die Schadstoffkonzentrationen, wie oben angeführt, sich nicht wesentlich unterscheiden, bewirkt die sehr viel geringere Durchströmungsrate beim nach der Methode der DIAGENETISCHEN INERTISIERUNG aufbereiteten Material in allen Parametern sehr viel günstigere Frachten, die in der Größenordnung von 1-3 Zehnerpotenzen kleiner als beim unbehandelten Material sind.

## 4.5 Gasproduktion

### 4.5.1 Quantitäten

Um allen Versuchsbedingungen gerecht zu werden, wurde die Gasproduktion für alle zu vergleichenden Quellen auf  $\text{m}^3$  pro T  $C_{\text{org}}$  und Tag berechnet.

#### Lysimeterversuch

Im Lysimeterversuch ist die Umgebungstemperatur während der ersten zwei Jahre konstant auf  $10^\circ\text{C}$  gehalten worden (Abb. 11 Mitte), im dritten Jahr sind die Kühl/Heizaggregate in der Versuchshalle abgeschaltet worden und die Hallentemperatur verläuft parallel zur Außentemperatur. Die Gasproduktion in den Lysimetern zeigt einen temperaturabhängigen Verlauf.

Unabhängig von diesem Jahresgang zeigt das Lysimeter VH 4 mit nach der Methode der DIAGENETISCHEN INERTISIERUNG aufbereitetem vorgerottetem Hausmüll nach etwa 2 Jahren geringer Produktion einen starken Rückgang und liefert im 4., 5. u. 6. Jahr de facto kein Gas mehr. Im siebenten Jahr lässt sich wieder eine marginale Gasproduktion feststellen.

Das Altlastenmaterial AL4, ebenfalls nach der Methode der DIAGENETISCHEN INERTISIERUNG behandelt, zeigt einen etwas konstanteren Verlauf mit extrem geringer Gasproduktion.

Einzig der frische Restmüll hat auch in den Lysimetern eine anhaltende höhere Gasproduktion, die aber noch immer unter den Vergleichswerten des unbehandelten Materials und weit unter der Produktion von Breitenau liegt (G. RIEHL & P. LECHNER 1995). Hier müssen allerdings die anfangs niedrigen Versuchstemperaturen berücksichtigt werden.

Stellt man die Relation zwischen den „Gaspendern“ prozentuell dar und nimmt die Emissionen der Hausmülldeponie-Versuchsanlage Breitenau als Beispiel einer konventionellen Deponie mit 100 an, so treten die großen Differenzen deutlich hervor, wobei sie sich etwa wie folgt zueinander verhalten:

konventionelle Deponie (Frishmüll)	100
Hehenberg Drain 1 (+Frishmüll)	10
Hehenberg Drain 2, (Altlast)	5
Lysimeter RM4 (frischer Restmüll)	5
Lysimeter VH4 (vorger. Hausmüll)	0,05
Lysimeter AL4 (Altlast)	0,01 - 0,001

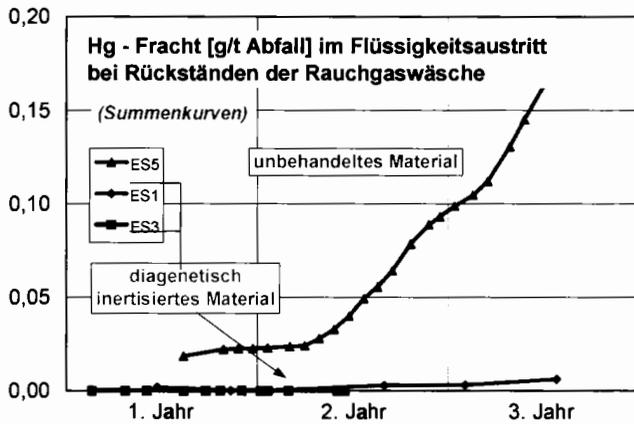
Bei den beiden letzten Lysimetern ist auf Grund der geringen Mengen eine gewisse Messungenauigkeit gegeben. Die angegebenen Relationen beziehen sich auf die Gesamtemission während der ersten vier Jahre, wobei Drain 2 nach den bisherigen Werten (2,5 Jahre) hochgerechnet worden ist.

Überdies hat sich im Lysimeterversuch bei den Acrylglaslysimetern, die parallel zu den Großlysimetern zur Sichtbarmachung der Vorgänge verfüllt worden sind, durchaus nicht überraschend gezeigt, dass bei unbehandeltem Abfallmaterial Entgasungskanäle im Müllkörper entstehen (Abb. 15, 16), die bei vermindertem Gasdruck zum Ende der Gasbildungsphase von meteorischen Wässern als bevorzugte Eindringstellen genutzt werden (G. RIEHL. et. al. 1997).

#### Hehenberg

Die Gasproduktion in Hehenberg (Abb. 11, 12) stieg in Drain 1 unerwartet hoch an; es stellte sich heraus, dass die Ursache dafür unter das Altlastenmaterial gemengter Frishmüll gewesen ist. Binnen kürzester Zeit fiel aber die produzierte Gasmenge unter den für eine Zwangsabsaugung vorgeschriebenen Wert und war nach 13 Monaten ab Juni 1998 nicht mehr im Bereich des Messbaren. Mit August 2000 war eine minimale Produktion eben noch festzustellen.

Bei dem mit inertisiertem Altlastenmaterial ohne Frishmüllzumengung verfüllten Feldabschnitt (Drain 2) zeigt sich eine stetige Abnahme der schon zu Beginn nur geringen Gasproduktion zur Grenze des messbaren Bereiches hin.



**Abb. 10:** Die Quecksilberfracht in diagenetisch inertisiertem und in unbehandeltem Material. Während Hg mit dem Beginn des 2. Jahres im unbehandelten Material mobilisiert wird, ist der Quecksilberaustrag des diagenetisch inertisierten Materials unbedeutend.

#### 4.5.2 Konzentrationen

Deponiegaszusammensetzungen hängen vom Entwicklungsstadium einer Deponie ab (G. RETTENBERGER 1992). Es beginnt mit der aeroben Phase, sodann folgen die anaeroben Phasen mit saurer Gärung, mit instabiler Methangärung und mit stabiler Methangärung. Bei Altlastenmaterial ist anzunehmen, dass letztere Phase erreicht ist (G. RETTENBERGER 1997), bei vorgerottetem Material ist mit der Möglichkeit zu rechnen, dass der Abfall erst in die instabile Methanphase eintritt.

In der stabilen Methanphase wird mit einem Verhältnis  $\text{CH}_4 : \text{CO}_2$  von etwa 60 : 40 gerechnet (R. STEGMANN 1990).

Die Methanphase geht in die Langzeitphase über, wobei auch nach 75 Jahren noch Gasbildungen bekannt sind (G. RETTENBERGER 1994). Geologisch gesehen sind Methangasbildungen in der Kohle auch noch mehrere Zehnermillionen Jahre lang möglich (Abb. 17). Dies liegt u.a. daran, dass nicht sämtlicher Kohlenstoff umgesetzt wird, so dass die Idealformel, dass 1 kg C ein Gasvolumen von 1,868  $\text{m}^3$  ergibt, bei Abfallablagerungen nur sehr bedingt angewandt werden kann (S. BAUER 1996). Die tatsächliche Gasproduktion wird im wesentlichen beeinflusst:

- vom aeroben Abbau beim Einbau und unmittelbar danach
- vom Sickerwasseraustrag organischer Substanzen
- von der Umsetzung zu stabileren Phasen,
- von unvollständigem Gesamtabbau.

Vor allem der zuletzt angeführte Punkt, der eine Einschränkung der Umsetzungsvorgänge durch ungünstige Wassergehalte, Nährstoffsituationen und anderen, für die Methanbildner kontraproduktiven Milieubedingungen inkludiert, führt dazu, dass eine konventionelle, wasserwegig abgelagerte Deponie immer wieder schein-inerte Bereiche aufweist, in denen etwa auch nach 40 Jahren noch Zeitungsartikel zu lesen sind. Ein Deponiekörper, der keine Gasproduktion aufweist, muss nicht notwendigerweise vollständig mineralisiert sein (LAGA, 1991)

In dieser Langzeitphase beginnt sich allmählich das Verhältnis  $\text{CH}_4 : \text{CO}_2$  nach ca. 65:25 hin zu verschieben, wobei ein zunehmender Stickstoffanteil festzustellen sein wird. Dieser ist das erste Zeichen der „Luft eindringphase“ (G. RETTENBERGER 1994), in der der Methangehalt auf ca. 30% absinkt, und der die Methanoxidationsphase folgt mit starkem Absinken der Methanbildung, erneuter Erhöhung der  $\text{CO}_2$ -Bildung und zunehmender Anpassung des Deponiemilieus an die atmosphärischen Bedingungen, die nach der Kohlendioxidphase letztendlich erreicht werden.

Anders zu bewerten ist der Weg der DIAINERT-Deponie, der naturgemäß infolge anderer geologischer Randbedingungen wie z.B., in einem Sedimentationsraum durch höhere Überlagerungen in Richtung Diagenese verläuft.

Im Lysimeterversuch verläuft die Deponiegasbildung etwas anders. Während Gas aus dem Frischmüll etwa die beschriebene Zusammensetzung 60%  $\text{CH}_4$  : 40%  $\text{CO}_2$  aufweist, tritt beim vorgerotteten Hausmüll und beim Altlastenmaterial das Phänomen auf, dass sehr hohe Methankonzentrationen (80 - 90%) gemessen werden können. Wegen der äußerst geringen bis nicht mehr messbaren Gasproduktion und der sehr gleichmäßigen Temperatur wird das

Deponiegas über längere Zeit hinweg nicht durchbewegt, weder infolge Durchströmung noch durch Konvektion. Dadurch könnte es zu einer Entmischung kommen; das schwerere  $\text{CO}_2$  sinkt ab und nur das leichtere  $\text{CH}_4$  wird an der Probeöffnung, die sich am Top des Lysimeters befindet, gemessen.

Auf der Deponie Hehenberg konnten Methankonzentrationen zwischen 60 - 75% und die entsprechenden  $\text{CO}_2$ -Konzentrationen gemessen werden. Die Methangehalte zeigen leicht steigende, die Kohlendioxidgehalte leicht fallende Tendenz.

#### 4.5.3 Gasfrachten

Es gilt festzustellen, inwieweit die im Lysimeterversuch erhöhten  $\text{CH}_4$ -Konzentrationen umweltrelevant sind, da alleine die Schadstofffrachten, nicht die Konzentrationen dafür von Bedeutung sind.

Sechs Jahre nach Versuchsbeginn sind bei vorgerottetem Hausmüll im Lysimeterversuch bei unbehandeltem Material ca.  $20 \text{ m}^3 \text{ CH}_4$  und ca.  $9 \text{ m}^3 \text{ CO}_2$  pro Tonne organischem C freigesetzt worden; dies entspricht ca. 2% des gesamten Gasbildungspotentials. Trotz der o.a. höheren  $\text{CH}_4$ -Konzentrationen betragen aber die bei dem nach der Methode der DIAGENETISCHEN INERTISIERUNG aufbereitetem Material emittierten Mengen nur ca.  $0,5 \text{ m}^3/\text{t C}_{\text{org}}$ . Das unbehandelte Material produziert nach wie vor Gas, während das aufbereitete Material die Produktion nahezu eingestellt hat. Somit ist es durch die Methode der DIAGENETISCHEN INERTISIERUNG möglich, bei dieser Abfallart im angegebenen Zeitraum den  $\text{CH}_4$ -Ausstoß auf 1/40 zu minimieren. Wie der Verlauf der Kurven zeigt, ist in Zukunft mit einem noch wesentlich günstigeren Ergebnis zu rechnen.

Bei Altlastenmaterial sieht das Ergebnis des Lysimeterversuches noch etwas günstiger aus. Der Produktion von ca.  $12 \text{ m}^3 \text{ CH}_4$  beim unbehandelten Material stehen  $0,2 \text{ m}^3$  beim nach der Methode der DIAGENETISCHEN INERTISIERUNG aufbereiteten Material gegenüber, also eine Reduktion auf 1/60.

## 4.6 Temperaturentwicklung im Abfallkörper

Die Temperaturentwicklung im Müllkörper kann für die Kuststoffdichtungsbahn der Basisdichtung ein wesentliches Problem sein, da diese sich bei hohen Temperaturen leichter verformen kann und sich so Schwachstellen entwickeln können. In konventionellen Deponien entstehen auf Grund der Umsetzungsvorgänge und des „Kochkisteneffektes“ Temperaturen bis  $70^\circ\text{C}$ , in der Versuchsanlage Breitenau sind über längere Zeit (Abb. 11) Temperaturen nahe  $50^\circ\text{C}$  nachgewiesen.

Der Lysimeterversuch kann für die Temperaturentwicklung nur bedingt herangezogen werden: das Volumen und die Versuchsmenge sind zu gering um den Temperaturstau hervorzurufen; dementsprechend folgen die Temperaturen im Versuchskörper dem Temperaturverlauf in der Versuchshalle.

Auf der Pilotanlage in Hehenberg stiegen die Temperaturen im Müllkörper zunächst auf knapp unter  $30^\circ\text{C}$  an, also wesentlich niedriger als in konventionellen Deponien, und sinken derzeit langsam ab. Einen derart zu beobachtenden kontinuierlichen Temperaturabfall unter  $25^\circ\text{C}$  zeigt Abb. 11-12. Das Material bei Drain 3 (Grubhofmaterial), das auf Grund von Oxidationsvorgängen unmittelbar nach der Vermengung, vor allem aber auf Grund von Reaktionen mit  $\text{CaO}$  vor und während des Einbaues sehr hohe Temperaturen aufgewiesen hat (bis  $70^\circ\text{C}$ ), hat sich sehr schnell abgekühlt und liegt nun unter  $20^\circ\text{C}$ .

An dieser Stelle sei noch erwähnt, dass bei diagenetisch inertisiertem Material auf Grund der Zusammensetzung und Struktur eine Selbstentzündung und damit ein Deponiebrand ausgeschlossen werden kann.

## 4.7 Chemische und mikrobiologische Entwicklung

### Schwermetalle

RM (Restmüll): In den Sickerwässern des Nullversuches konnten  $\text{Cu}$ ,  $\text{Pb}$ ,  $\text{Zn}$ ,  $\text{Cd}$  und  $\text{Cr}$  festgestellt werden. In den Konsolidierungswässern des nach der Methode der DIAGE-

NETISCHEN INERTISIERUNG aufbereiteten Materials konnten nur bei zwei von vier Lysimetern Zn und Cr festgestellt werden, Zn um 1 - 3 Zehnerpotenzen unter den Konzentrationen des Nullversuches. Andere Schwermetalle lagen unter der Nachweisgrenze.

VH (vorgerotteter Hausmüll): Der Nullversuch ergab Gehalte von Cu, Pb, Zn, Cd, Cr. Bei 2 von 5 Lysimetern mit behandeltem Material konnten Spuren von Cu, Pb und Zn festgestellt werden, jedoch um 1-2 Zehnerpotenzen unter denen des Nullversuches.

AL (Altlastenmaterial): Im Nullversuch wurde Cu, Pb, Zn gemessen, die Werte des Feinteil/Abfall-Gemenges (5 Lysimeter) lagen unter der Nachweisgrenze.

KS (Klärschlamm): Die Wässer des Nullversuches enthielten Cu, Ni, Zn, Cr. Im behandelten Material war lediglich noch Zn nachzuweisen.

ES (Rauchgasreinigungsprodukt): An Schwermetallen wurden im Sickerwasser des Ausgangsmaterial nachgewiesen: Cu, Ni, Zn, Cd, Hg. Cu trat in den Lysimetern mit nach der Methode der DIAGENETISCHEN INERTISIERUNG aufbereitetem Material einmal in Spuren auf, Cd knapp an der Nachweisgrenze, ebenso Hg (siehe Abb. 7).

HA (Altlast Taufkirchen): In den Sickerwässern des Ausgangsmaterials wurden Cr, Cu, Ni, und Zn nachgewiesen. Ein Lysimeter mit behandeltem Material zeigt ähnliche Werte wie das Ausgangsmaterial, in zwei weiteren konnten Cu und Ni nicht nachgewiesen werden, Cr und Ni waren um 25 - 75 % gegenüber den Ausgangswerten reduziert.

### **Organische Belastung**

Die Konzentrationen an organischer Belastung sind in den Wässern des nach der Methode der DIAGENETISCHEN INERTISIERUNG aufbereiteten Materials im allgemeinen mit denen eines

Sickerwassers einer Deponie mit Material aus der mechanisch - biologischen Abfallbehandlung vergleichbar. Relevant sind allerdings sehr wohl die unterschiedlichen Frachten.

### **Frachten - Flüssigkeiten**

Die sich bei Berücksichtigung der austretenden Wassermengen ergebenden Frachten liegen bei behandeltem Material um etwa 1-2 Zehnerpotenzen unter denen des unbehandelten Materials. Dies betrifft sowohl die Schwermetalle als auch die organische Belastung. Die Emissionen einer DIAINERT-Deponie sind daher ungleich umweltverträglicher als die einer konventionellen Deponie

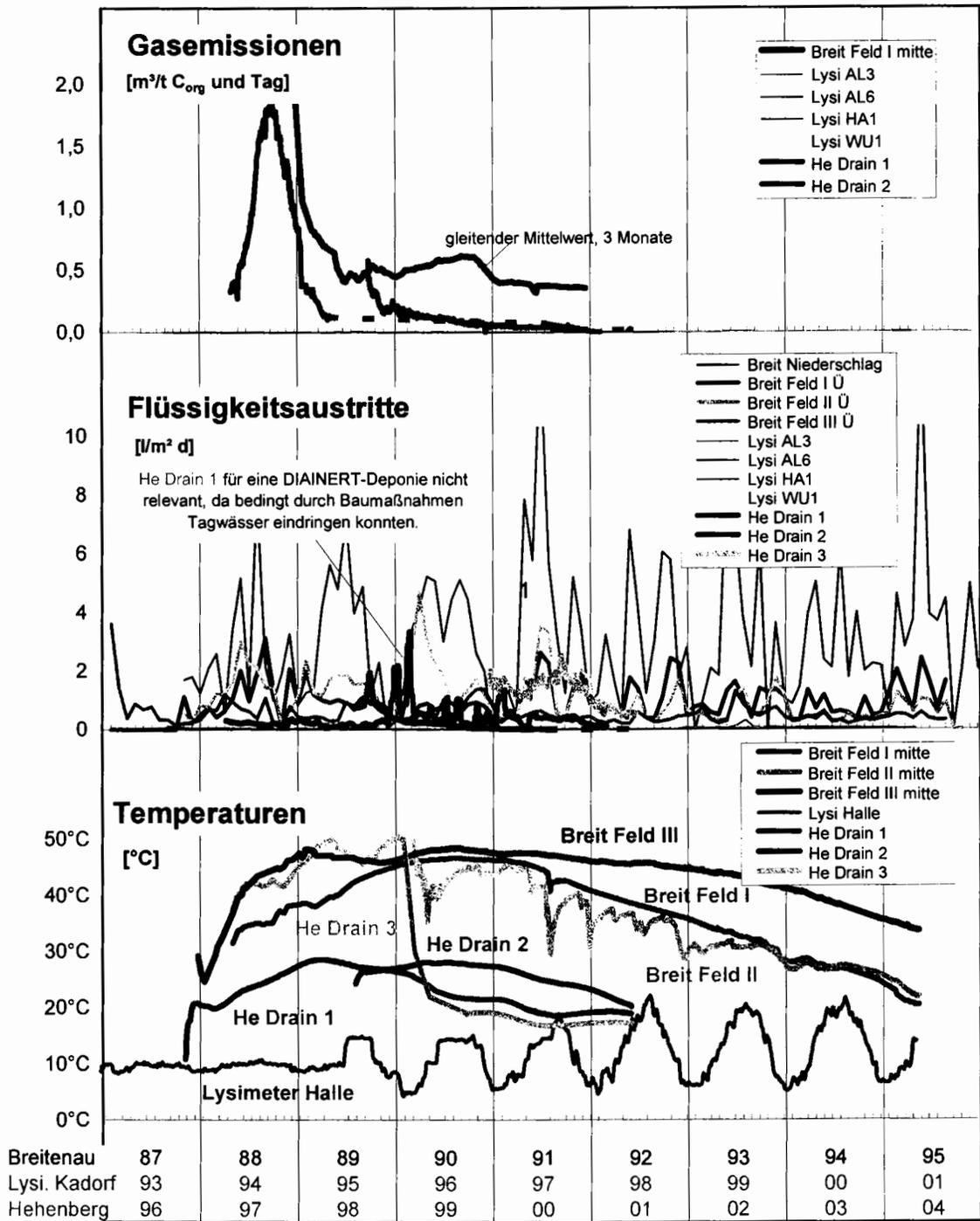
### **Mikrobiologie, Biotoxizität**

Gegenüber den Nullversuchen war im Lysimeterversuch mit nach der Methode der DIAGENETISCHEN INERTISIERUNG aufbereitetem Material eine Abnahme der Esterasenaktivität zu bemerken. Das Abklingen der Gasproduktion führt P. LECHNER im Endbericht zu den Untersuchungen (G. RIEHL - H. et al., 1996) darauf zurück, dass auf Grund der Dichtigkeit des Körpers (die Größe der Porenräume liegt z.T. unter der eines Bakteriums) und der daraus resultierenden mangelnden Durchströmung keine ausreichende Nahrungszufuhr erfolgen kann, gleichzeitig aber die Stoffwechselprodukte nicht abgeführt werden („Propionsäuretod“).

Die Ausbildung bakterieller Schleime führt zu einer weiteren internen Abdichtung etwaiger Porenräume (F. ZIBUSCHKA in G. RIEHL - H. et al., 1996)

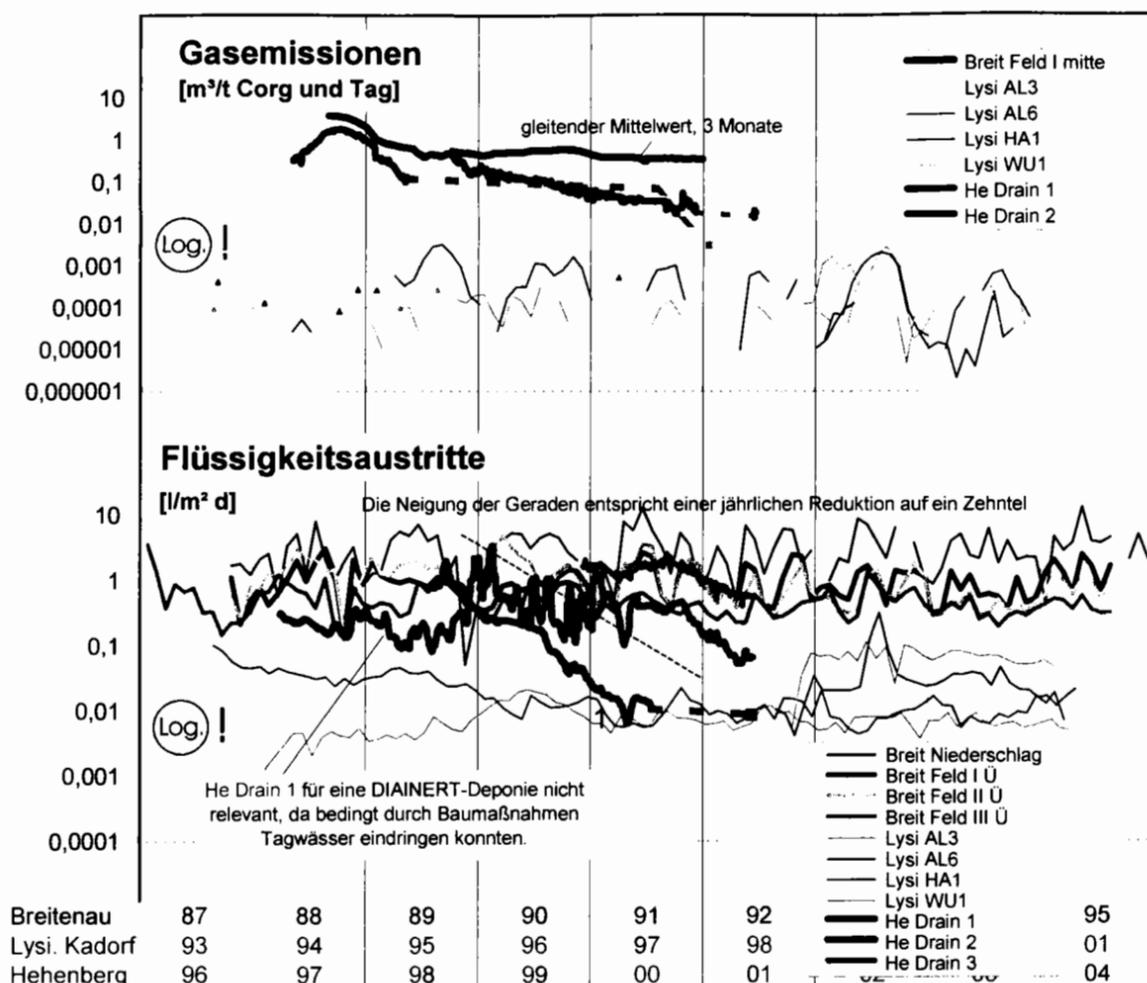
Biotoxizitätstests (H30) mit *vibrio fischeri* ergaben bei allen Abfallarten durchwegs günstigere Werte für die DIAGENETISCHE INERTISIERUNG als im Nullversuch.

**Abb. 11** lineare Maßstäbe



**Abb. 11, 12, 13:** In einer Gegenüberstellung der konventionelle R-Deponie Breitenau, der DIANERT-Deponie Hehenberg und entsprechenden Lysimeterversuchen gibt Abbild 11 die Gas- und Flüssigkeitsaustritte im linearen, Abb. 12 im logarithmischen Maßstab wieder. Abb. 13 zeigt die entsprechenden Summenkurven im linearen Maßstab. Abb. 11 enthält zusätzlich noch die für alle Diagramme gleichmäßig geltenden Temperaturabläufe. Bei den Diagrammen wurde für alle Versuchsphasen als Nullpunkt der Zeitachse der Beginn des ersten Versuchsjahres gesetzt; die tatsächliche kalendarische Reihe ergibt sich aus den in verschiedene Farben gehaltenen Jahreszahlen. Um die verschiedenen Mengen miteinander vergleichen zu können, wurden die Gasemissionen auf den Gehalt an organischem Kohlenstoff, die Flüssigkeitsaustritte auf die Größe der Drainageflächen bezogen.

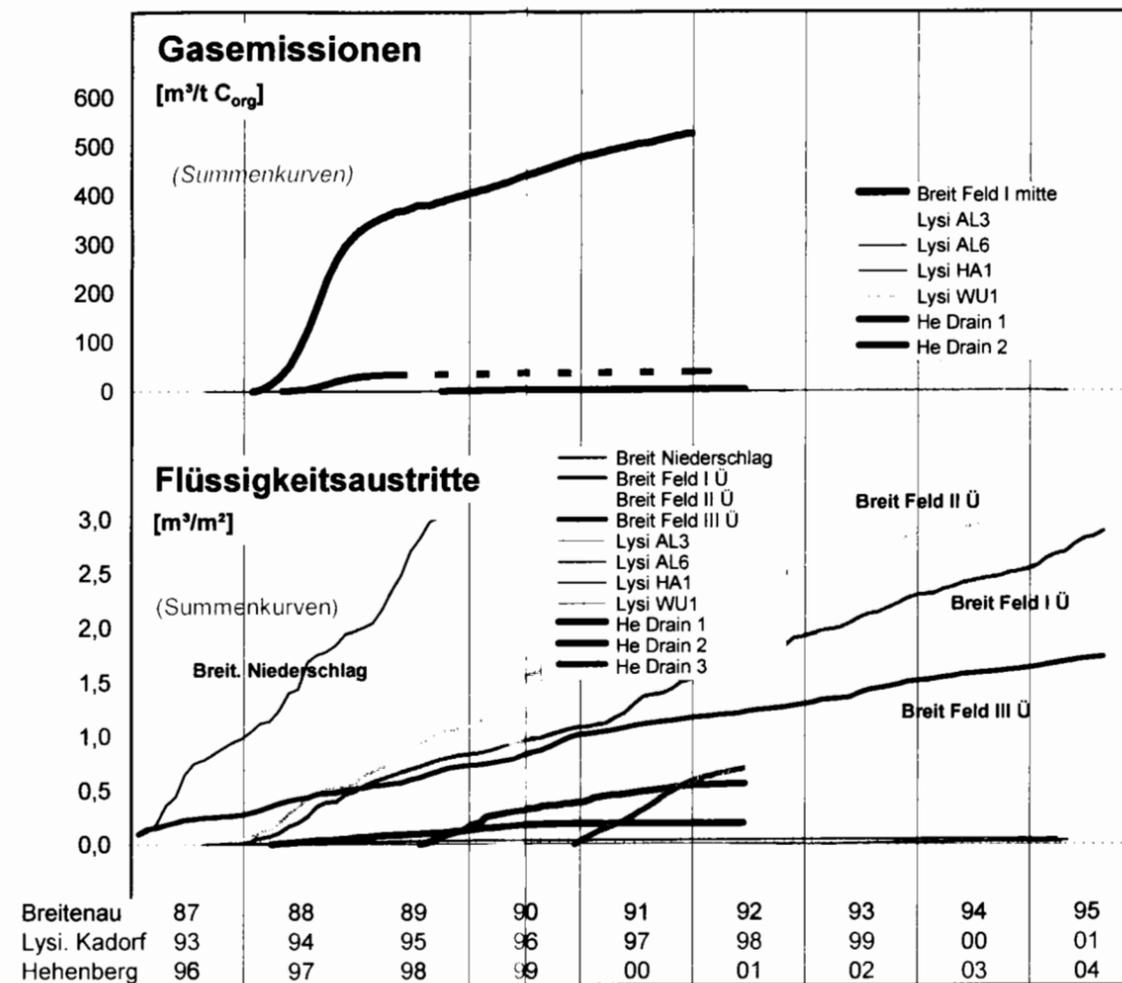
**Abb. 12** logarithmische Maßstäbe



**Gasemissionen:** Da die Gasemission in Breitenau während der Schüttung begonnen hat und zu diesem Zeitpunkt noch keine Messeinrichtung vorhanden war, stehen für den Beginn der spontanen Umsetzungsreaktionen keine Werte zur Verfügung. Aus der Tendenz der Gasentwicklung ist erkennbar, dass noch lange Zeit mit - wenn auch gegenüber dem Beginn stark geminderter - Gasproduktion zu rechnen ist. Im Gegensatz dazu geht durch die Hintanhaltung mikrobieller Umsetzung bei der DIAGENETISCHEN INERTISIERUNG die Gasproduktion rasch zurück und tendiert gegen Null. Der hohe Peak des Drain 1 in Hehenberg ist auf die Beigabe von Frischmüll zurückzuführen. Sehr rasch nimmt die Gasproduktion bei Drain 2 ab. Die Emissionen der Lysimeter sind im linearen Maßstab nicht mehr darstellbar, im logarithmischen Maßstab erkennt man die Abhängigkeit der überaus geringen Produktion von der Temperatur in der Versuchshalle.

**Temperaturwerte:** Grau und schwarz sind die Temperaturen der Breitenauer Versuchsfelder abgebildet (konventionelle Hausmülldeponie), in rot, violett und blau die Temperaturentwicklung in der DIAINERT-Deponie Hehenberg, gelb dargestellt ist die Temperatur in der Halle der Lysimeterversuche (ident mit der Temperatur in den Lysimetern). In den Feldern der konventionellen Deponie wurden weit höhere Temperaturen und diese über einen weitaus längeren Zeitraum gemessen als in der DIAINERT-Deponie. Die anfänglich hohe Temperatur des Drain 3 ist auf die behördlicherseits vorgeschriebene Zumengung von CaO und dessen Reaktion zurückzuführen. Der unregelmäßige Verlauf der Temperatur in Feld II von Breitenau ist darauf zurückzuführen, dass eindringendes Wasser nach Niederschlagsereignissen entlang der Wasserwege kleinräumige Abkühlungen bewirkt hat.

**Abb. 13** lineare Maßstäbe Summenkurven



**Flüssigkeitsaustritte:** In linearer Darstellung sind die geringen Mengen austretender Flüssigkeiten beim Lysimeterversuch zur DIAGENETISCHEN INERTISIERUNG nicht differenzierbar. Bei den Sickerwässern von Breitenau ist die Abhängigkeit der Sickerwasseremission von den Niederschlägen sehr gut nachvollziehbar. Die hohen und schwankenden Werte des Drain 1 der DIAINERT-Deponie Hehenberg sind auf die im Text angeführte Durchörterung (Gründungspfähle) des Deponiekörpers bis zur Drainageschicht auf Grund des Baues einer Maschinenhalle zurückzuführen sowie auf eine nachgewiesene Verbindung der Drainage zum nebengelegenen, nicht abgedeckten und konventionell abgelagerten Ostfeld (Abb.4, vgl. Abschn. 4.4.). Somit ist dieser Drain zwei Jahre lang von meteorischen Wässern alimentiert worden, zeigt aber nun nach Reparatur der Leckagen und der Abdeckung des Ostfeldes wieder abnehmende Tendenz. Bei Drain 2 ist mit kontinuierlicher fachlicher Betreuung sowohl beim Misch- als auch beim Einbauvorgang eingebaut worden. Entsprechend günstig sind auch die Emissionswerte und die Abnahme der Menge des Konsolidierungswassers. Das Material im Bereich um Drain 3 war vor dem Einbau während einer Zwischenlagerung unverdichtet wochenlang dem Niederschlag ausgesetzt gewesen (Abschn. 4.4.) und daher beim Einbau wassergesättigt (Wassergehalte bis ca. 80% TS). So kann das hohe Entwässerungsniveau erklärt werden. Der anfängliche Anstieg hängt mit Abdeckungsarbeiten zusammen, die eine höhere Auflast ergeben haben. Die sich zuletzt einstellende Mengenabnahme entspricht dem Verhalten einer DIAINERT-Deponie, bei der nach den ersten Erfahrungen mit einer Reduzierung um etwa einen Faktor 10 innerhalb eines Jahres gerechnet werden kann. Fehlende Zwischendaten bei Drain 2 sind durch bauliche Veränderungen im Bereich des Flüssigkeitsableitungssystem bedingt.

## 5 DIAGENETISCHE INERTISIERUNG im Vergleich mit anderen Arten der Abfallbehandlung

Abschließend wird eine DIAINERT-Deponie mit anderen Methoden der Abfallentsorgung verglichen. Dabei kann nur generalisierend und nicht auf Einzelheiten und Spezialverfahren eingegangen werden.

Für diesen Vergleich wurden ausgewählt:

- Die konventionelle Deponie, in Österreich und Deutschland nur noch bis 2004/2005 zulässig, in der EU insgesamt jedoch noch über viele Übergangsjahre geduldet und in den meisten übrigen Ländern der Welt die Standardabfallentsorgung.
- Die mechanisch-biologische Abfallbehandlung mit anschließender Ablagerung auf gedichteten Deponien.
- Die thermische Abfallbehandlung mit anschließender Deponierung der Aschen und Schlacken auf Monodeponien und der Filterstäube auf Sondermülldeponien.

### 5.1 Vergleichskriterien

Aufgrund der im Vergleich zur Gesamtlebensdauer einer Deponie bislang zur Verfügung stehenden sehr geringen Beobachtungszeit (ENTENMANN 2001 im selben Band) zur Beurteilung von Abfallablagerungen ist eine Gesamtbilanzierung in der Art einer „Ökobilanz“ von vornherein ausgeschlossen. Es werden daher nachfolgend die derzeit als signifikant zu bezeichnenden Kriterien zusammengestellt und eine Abschätzung vorgenommen:

- Welches Endprodukt entsteht im Resultat der gewählten Entsorgungsform und wie ist dieses hinsichtlich seiner Langzeitsicherheit zu bewerten?
- Welche Emissionen sind auf dem Weg zum Endprodukt zu bilanzieren?
- Welche natürlichen Ressourcen sind aufzuwenden?
- Welche finanziellen Mittel sind aufzuwenden?

### 5.2 Kurzcharakterisierung der Methoden

Beim Vergleich der Methoden wird vorausgesetzt, dass bei allen vier nachstehend angeführten Methoden vorab dieselbe möglichst weitgehende Schadstoffentfrachtung durch Aussortierung stattgefunden hat, während die Vorbehandlung als Teil der jeweiligen Methode mit zu vergleichen ist.

#### Konventionelle Deponie (R - Deponie)

Die konventionelle Deponie ist eine Reaktor-deponie (H.J. COLLINS & P. SPILLMANN 1986), nachfolgend R-Deponie bezeichnet, bei der die organischen Anteile des Mülls durch anfangs aerobe, überwiegend jedoch anaerobe Vorgänge in einem derzeit noch unüberschaubar langen Zeitraum zersetzt werden. Dabei entstehen im wesentlichen ein voraussichtlich reaktionsträger Restmüll sowie große Mengen Sickerwasser, Kohlendioxid und Methan. Dem Stand der Technik entsprechend wird der Deponiekörper rundum von Dichtungselementen eingeschlossen und mittels einer Basisdrainage entwässert und über ein Gassammelsystem entgast.

#### MBA – Deponie

Die MBA-Deponie unterscheidet sich von der konventionellen Deponie lediglich durch die zusätzliche mechanisch-biologische Vorbehandlung, bei der die Hauptmasse organischer Substanz in der Vorbehandlung zu Kohlendioxid, Wasser, Methan und Resten umgesetzt wird. Im eingekapselten Deponiekörper finden dann dieselben Reaktionsmechanismen wie in der konventionellen Deponie statt, nur sehr viel weniger heftig und kürzer.

#### DIAINERT-Deponie

Die DIAINERT-Deponie unterscheidet sich grundsätzlich in ihrem Prinzip von den oben beschriebenen Deponien. Sie setzt zum einen auf einen nahezu wasserdichten Müllkörper und nicht auf eine wasserdichte Hülle, auf die in letzter Konsequenz – die Zustimmung der Prüfbehörde vorausgesetzt – aus technischer Sicht ganz verzichtet werden kann.

Wie auch bei der MBA-Deponie wird eine mechanisch-biologische Vorbehandlung durchgeführt, die jedoch erheblich verkürzt sein kann, denn es geht lediglich darum, die sehr leicht abbaubaren Stoffe erst gar nicht zur Ablagerung kommen zu lassen. Nach dem Einbau in die Deponie wird jedoch ein ganz anderer Reaktionsmechanismus verfolgt:

Es werden die Rahmenbedingungen für einen Inkohlungsprozess geschaffen, d.h. der schwer abbaubaren organischen Substanz wird die Möglichkeit gegeben, durch Abspaltung von Sauerstoff und Wasserstoff immer kohlenstoffreicher zu werden (Abb. 17), während bei den anderen Methoden der Deponierung eine Aufoxidation zum Kohlendioxid, gegebenenfalls über den Umweg des Methans, stattfindet. Erreicht wird dieser völlig andere Mechanismus durch die extreme Verlangsamung der Reaktionen im Deponiekörper hin zu geochemischen, diagenetischen Mechanismen.

Daneben verfügt die DIAINERT-Deponie in konsequenter Anwendung des Multibarrierenkonzeptes über die beiden inneren Barrieren „Dichtigkeit“ und „Reaktionsmechanismus“ hin zu immer unschädlicheren und immobileren Stoffen hinaus zwei weitere innere Barrieren: Zum einen werden Schadstoffe über langandauernde, „diagenetische“ Prozesse an Tonminerale adsorbiert und zum anderen Schwermetalle mittels Reaktionen mit Karbonaten und anderen schwerlöslichen Verbindungen festgehalten.

### Thermische Abfallverwertung

Die thermische Abfallverwertung unterscheidet sich gar nicht so sehr von den übrigen Methoden, denn auch dabei wird nach einer Vorbehandlung deponiert. Der organische Anteil des Mülls wird jedoch, anders als bei der konventionellen und der MBA-Deponie, direkt oxidiert und nicht über den Zwischenschritt des Methans. Der gesamte Kohlenstoff wird als  $\text{CO}_2$  (explosionsähnlich in seiner Wirkung) an die Atmosphäre abgegeben.

Die unerwünschten Stäube in den gasförmigen Produkten werden größtenteils mittels Rauchgasreinigung separiert und dann der Sondermüllentsorgung zugeführt. Die entstehenden Schlacken und Aschen sind zunächst heftigen,

im wesentlichen als mineralogisch anzusehenden Reaktionen unterworfen und werden nach Abklingen der stark exothermen Reaktionen in Monodeponien abgelagert, wo belastete Sickerwässer anfallen (L. JOHNSON 1993). Deponien mit vorgeschalteter thermischer Behandlung werden nachfolgend als MVA-Deponie bezeichnet.

## 5.3 Endprodukt der Entsorgungsmethoden

### Aufbau

Der Aufbau einer Deponie hat ganz entscheidenden Einfluss auf sein Emissionsverhalten. Da aufgrund fehlender Daten in vielen Fällen von Laborversuchen auf die Verhältnisse insitu extrapoliert wird, resultieren häufig unzutreffende Bewertungen des Emissionsverhaltens. Für die **R-Deponie** müssten dann aufgrund des Maßstabsproblems homogene Verhältnisse angenommen werden. Im Zuge der Arbeiten bei der Errichtung der Hausmüll-Versuchsanlage Breitenau konnte bestätigt werden, dass es diesen homogenen Körper nicht gibt. Schon bei der Anlieferungskontrolle waren nicht nur verschiedenste Inhalte, sondern auch unterschiedlich befeuchtete Tranchen zu bemerken. Bedenkt man noch dazu die in der Praxis wohl nicht zu verhindernde unterschiedliche Verdichtung einzelner Bereiche, so ist klar, dass die Umsetzungsvorgänge auch nicht gleichmäßig ablaufen können. Dies wird im einzelnen bei G. RIEHL & P. LECHNER. 1995 analysiert.

Abb. 14 zeigt als Schnittbild die Verhältnisse einer sachgerecht geschütteten und verdichteten Deponie. Zahlreiche Wegsamkeiten dienen den Oberflächenwässern als Durchflußkanäle. Dichtere Körper werden umflossen, zum Teil kommt es zur Ausbildung virtueller Wasserspiegel größeren Ausmaßes, aber auch zur Ausbildung von trockenen Bereichen, die aber später bei Änderung der Durchflußbedingungen durch Resedimentation und Verschlammung dieser Durchflußkanäle aktiviert werden können (Abb. 15). Selektive Lösung und Auswaschung sind das Resultat.

Die Inhomogenität des abgelagerten Materials und die damit zusammenhängenden negativen

Einflüsse auf die Emission sind bei der **MBA-Deponie** aufgrund der Vorbehandlung geringer, jedoch ebenso vorhanden. Anders dagegen verhält sich das Material der **MVA-Deponie**, das aufgrund des vorgeschalteten thermischen Prozesses sehr viel homogener und gleichkörniger ausfällt. Aufgrund der Zwangsmischung vor der Deponierung ist die **DIANERT-Deponie** wiederum sehr homogen aufgebaut, unterscheidet sich jedoch in ihrem weiten Korngrößenspektrum vom zugegebenen Tonkorn bis zum Größtkorn von etwa 100 mm, das von der Vorabsiebung der Leichtfraktion vorgegeben ist, von den anderen Deponien.

### Dichte, Dichtigkeit

Für die **R-Deponie** kann erfahrungsgemäß bei guter Verdichtung von einer Trocken-Dichte von etwa  $0,8 \text{ t/m}^3$  ausgegangen werden. Dieser Wert kann von der **MBA-Deponie** aufgrund des günstigeren Kornaufbaus übertroffen werden. H. DOEDENS & A. GRIESSE (1998) geben Feucht-Dichten von  $1,3 \text{ t/m}^3$  an, was realistisch etwas höhere Trocken-Dichten als bei der **R-Deponie** bedeutet. Die von R. STEGMANN et al. (1999) angegebenen, noch wesentlich höheren Werte an Trockendichten bis  $1,25 \text{ t/m}^3$  dürften in der Praxis nur in Ausnahmen erzielbar sein, insbesondere da nach Aussagen der Betreiber bei Niederschlägen eine breiige Konsistenz des Materials den Einbau sehr erschwert. Dagegen können bei der **MVA-Deponie** und der **DIANERT-Deponie** vergleichbare, sehr viel höhere Dichten erzielt werden. Bei der **DIANERT-Deponie** wurden Einzelwerte der Trockendichte bis  $1,53 \text{ t/m}^3$  gemessen.

Für die **R-Deponie** können großräumig in-situ bestimmte Durchlässigkeitsbeiwerte im Mittel um  $5 \cdot 10^{-6} \text{ m/s}$  angegeben werden (W. ENTENMANN 1998). Bei der **MBA-Deponie** wird von einigen Autoren (z.B. UBA 1999, R. STEGMANN et al. 1999) angenommen, dass sehr geringe Durchlässigkeiten unter  $1 \cdot 10^{-8} \text{ m/s}$  erzielt werden können. Diese Annahme beruht im wesentlichen auf Lysimeterversuchen oder gar Oedometerversuchen und widerspricht der Praxis, in der ein schwammartiges Verhalten beobachtet wird, das sich schwerlich mittels  $k_f$ -Wert beschreiben lässt. Für die **MVA-Deponie** lassen sich entsprechend des gemischtkörnigen Kornaufbaus Werte um  $1 \cdot 10^{-6} \text{ m/s}$  abschätzen.

Für die **DIANERT-Deponie** dagegen liegen großräumig in-situ ermittelte Versuchswerte vor, die generell besser sind als  $1 \cdot 10^{-9} \text{ m/s}$ .

### Mechanische Stabilität

Das abgelagerte Material der **R-Deponie** hat eine geringe Stabilität, es treten daher große Setzungen auf. Betreiber der **MBA-Deponien** berichten von einer sehr hohen Sensibilität der Konsistenz des Materials in Abhängigkeit von Wassergehaltsänderungen. Das Material der **MVA-Deponie** dagegen ist nicht kornstabil, die Einzelkörner als poröse Aggregate zerbrechen leicht und sind sehr verwitterungsanfällig (C. ZEVENBERGEN et al. 1995, T. MARZI et al. 1998). Die **DIANERT-Deponie** zeichnet sich, wie oben beschrieben, durch sehr stabile Lagerungsbedingungen aus.

### Mineralogische, chemische Stabilität, Umsetzungsvorgänge

Die **R-Deponie** ist aufgrund der in ihrem Inneren über sehr lange Zeiträume ablaufenden Reaktionen hochgradig instabil, ebenso die **MBA-Deponie**, bei der die Zeitdauer der Reaktivität lediglich reduziert aber keineswegs beseitigt ist. Allerdings kann angenommen werden, dass die Stoffgefährlichkeit abnimmt. Die in **MVA-Deponien** abgelagerten Müllschlacken sind sehr reaktiv (L. JOHNSON 1993). Es muss auch nach der stark exothermen Anfangsphase insbesondere auch neueren mineralogischen Untersuchungen zufolge (C. SPEISER et al. 1998) von sehr lang anhaltenden Emissionen vorzugsweise schwermetallbelasteter und aggressiver Sickerwässer ausgegangen werden. Zwar werden auch Immobilisierungsreaktionen beschrieben (C. SCHMITT-RIEGRAF et al. 1998), deren Langzeitsicherheit ist jedoch nur bei hohem pH-Wert gegeben. Diesen Ergebnissen zufolge scheint die Intention der deutschen Bundesregierung (BMU 1999) MVA-Schlacken bis 2020 vollständig in den Wirtschaftskreislauf zurückzuführen bislang lediglich eine Option auf eine gegebenenfalls so weit verbesserbare Technik der Verbrennung zu sein. Die **DIANERT-Deponie** dagegen setzt auf einen inneren Aufbau des Deponiekörpers, der nur extrem langsame Reaktionen zulässt, sowie auf die Festlegung von Schadstoffen über sehr lange Zeiträume.

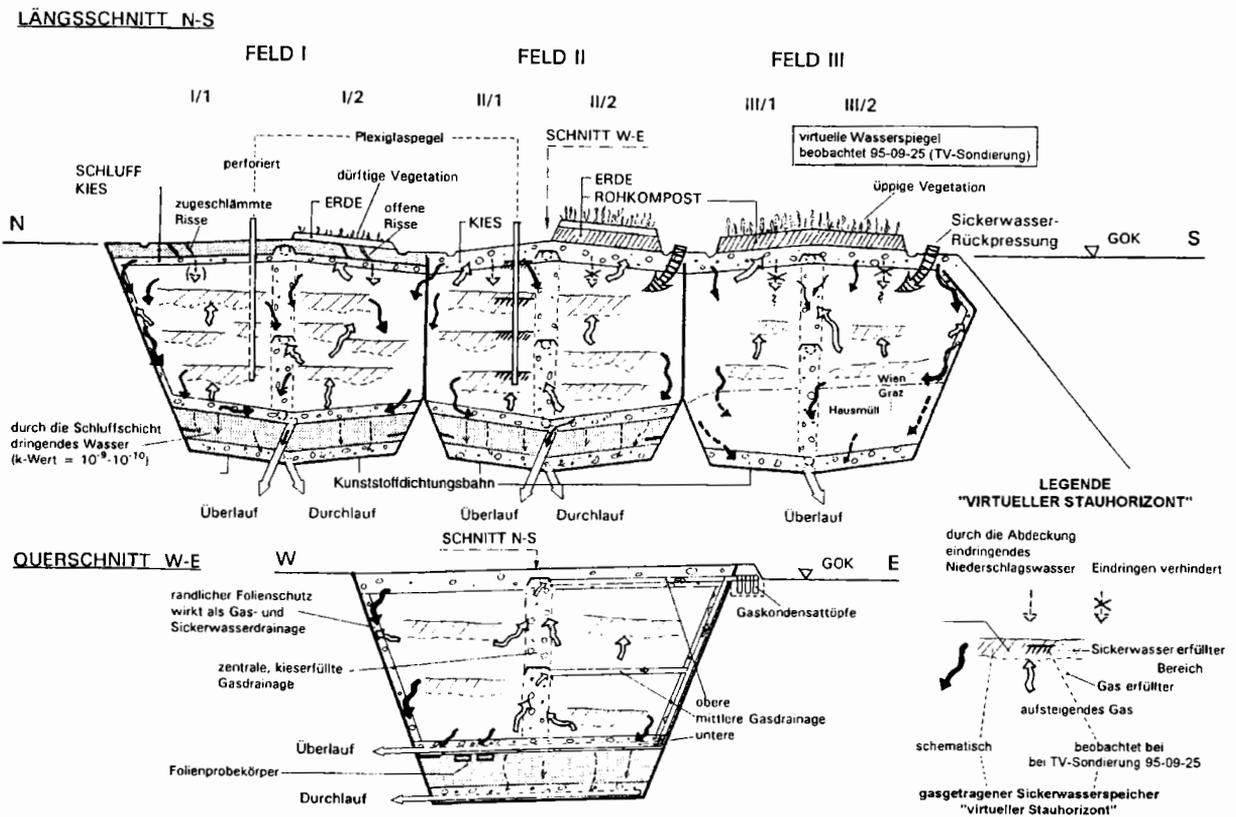
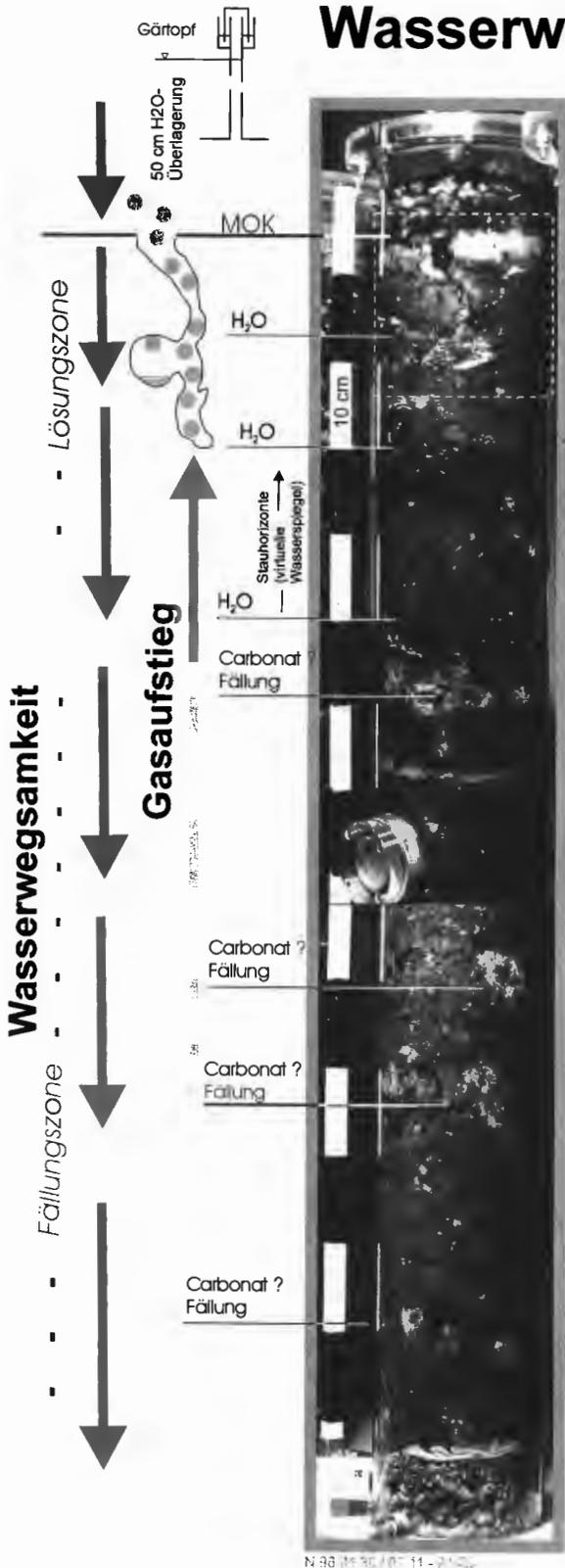


Abb.14: Schema zum Vorstellungsmodell der Gas- und Wasserwegsamkeit in der Hausmüll Versuchsanlage Breitenau (nach G. RIEHL & P. LECHNER 1995, RIEHL et al. 1997).

Die Versuchsdeponie Breitenau ist in drei Felder geteilt. In Feld III wurde an der Basis oberhalb der Kunststoffdichtungsbahn nur eine Dränageschicht eingebaut und es diente als „Nullversuch“. In den Feldern I und II war eine mineralische Dichtschicht mit Schluff/Tonen aus der Kieswäsche eingebaut worden, deren Wirksamkeit es zu überprüfen galt. Die Sickerwässer wurden nach der Mülleinbringung über dieser Dichtschicht (Überlauf - Ü) und unterhalb (Durchlauf - D) erfaßt. Die Felder waren mit unterschiedlichen Abdeckungen versehen: Auf Feld III Kies und Rohkompost, auf Feld II/1 Kies (mit Mulchung zur Förderung der natürlichen Sukzession), auf Feld II/2 Kies, Rohkompost und Erde der Umgebung, auf Feld I/1 Schluff/Ton-Abdeckung, auf Feld I/2 Schluff/Ton-Abdeckung mit Erde überlagert. Im zweiten Betriebsjahr wurde die Abdeckung des Feldes I durch randliche Senkungsrisse undicht und es kam zu sprunghaft ansteigenden Sickerwassermengen, wobei sich jedes Niederschlagsereignis sofort durchgeprägt hat (siehe Leporello - Darstellung G. RIEHL & P. LECHNER 1995).

Es ist grundsätzlich nicht möglich, Abfallkörper vollständig und dauerhaft mittels technischer Systeme einzukapseln. Zu irgendeinem, dann meist unerwarteten Zeitpunkt, wird die „Kapsel“ durchlässig und karstähnliche Wegsamkeiten entstehen. Gas (aufsteigend) und Wasser (durchfließend) nutzen sowohl Großformen wie Risse als auch klein dimensionierte Gasaufstiegskanäle sowie Mikroporen. Das Sickerwasser kann wie im hochalpinen Karst durch Verlegungen, undurchlässige Schichten (Kunststofffolien, befristete virtuelle Wasserspiegel) und morphologische Veränderungen plötzlich gänzlich andere Wege nehmen und so den Reaktionsstart in bisher nicht umgesetzten Teilen der Deponie bewirken. Ähnlich wechselnde Intensitäten des Schadstoffanfalles im räumlich - zeitlichen Wechselspiel werden auch in Schadensbildern der „Fischerdeponie“, Theresienfeld, Niederösterreich festgestellt, dort aber erwiesenermaßen vor allem durch das „Durchrosten“ von Faßgebinden mit kritischen Inhalten.

# Wasserwegige Lagerung AL5P



Unbehandeltes Altlastenmaterial

Nullversuch

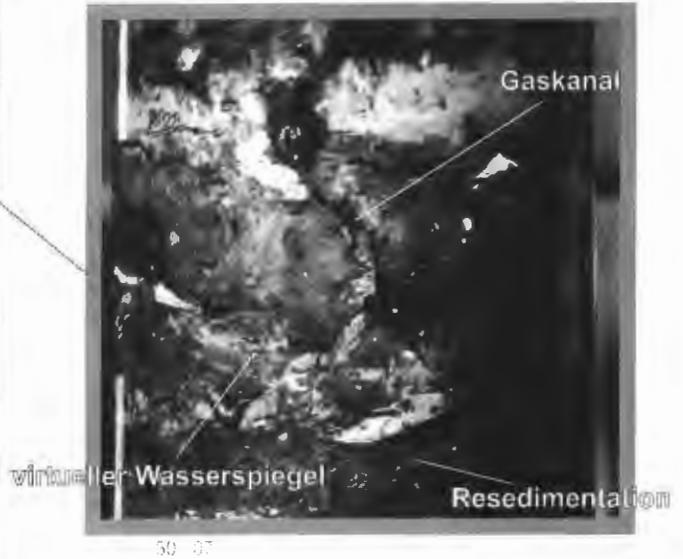
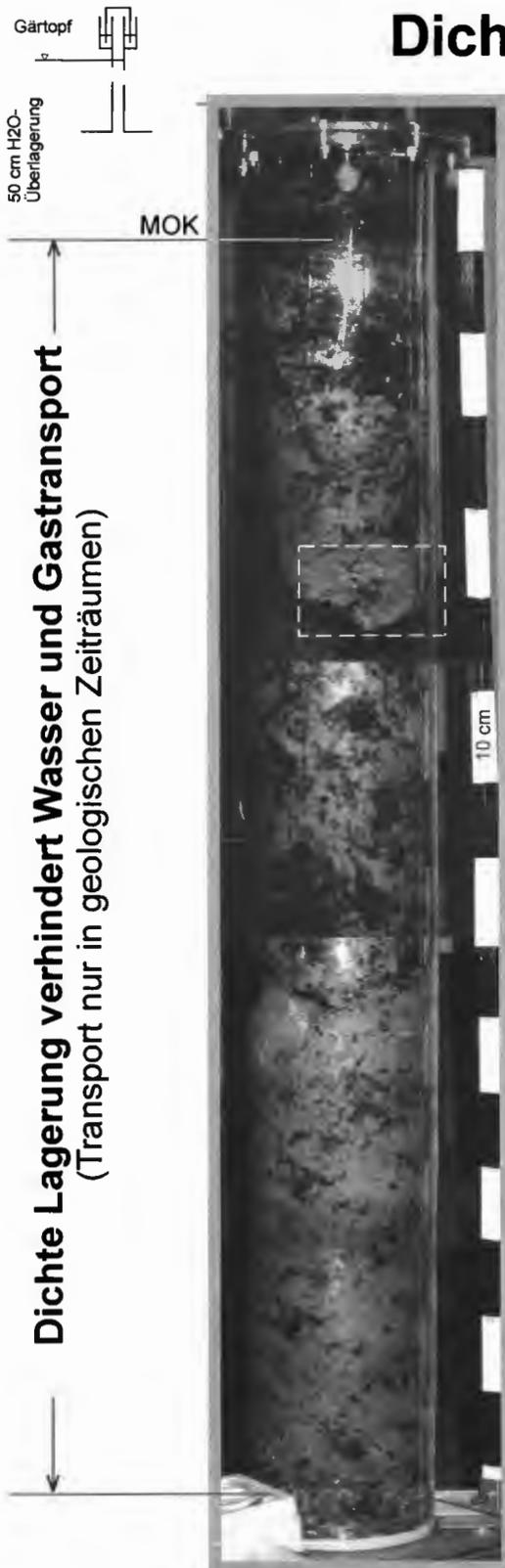


Abb. 15 (links): Das Acrylglaslysimeter mit purem unbehandeltem Material zeigt mehrere Stauhori-zonte ("virtuelle Wasserspiegel"); bei Öffnen des Entlastungshahnes am Lysimeter-deckel beginnt das im Wasser gehaltene Gas aufzuperlen und im Abfallkörper aufzusteigen. Die Aufwärtsbewegung der Gasblasen beginnt ca. 80 - 100 cm unter der Müll-oberkante (ca. 1,5 m H<sub>2</sub>O-Überlagerung. Diese Aufstiegswege werden descendent vom Überlagerungswasser genutzt. Aus dem Müll-körper werden lösliche Stoffe durch das Was-ser in die tieferen Schichten transportiert. In diesem Lysimeter ist zu beobachten, wie die Ausfällungen im Sinne von RAMKE (1990) an der Oberfläche von Bakterien erfolgen oder auch lagig um Zonen besonderer Weg-samkeiten ausfallen und dort zu Zementation-ten führen. Dieses Lysimeter gibt im Gegen-satz zu den Großlysimetern nur wenig Sicker-wasser ab, da das Durchsickern des Wassers im geringen Durchmesser von 20 cm durch Folienreste etc. ("Größtkorn" bei der Zerklei-nerung 10 cm) stark behindert wird. Bei den dazugehörigen Großlysimetern (D: 100 cm) bewegt sich das gesamte Aufschlagwasser durch den Müllkörper, desgleichen wohl auch bei allen wasserwegig gelagerten "konventio-nellen" Deponien.

Abb. 15 (oben rechts): "Entgasungskanal" im obersten Bereich des AL5P; diese Gaskanäle sind in der oberen Hälfte des Lysimeters er-kennbar. In ihrem Bereich findet Auswa-schung, Umlagerung und Resedimentation von Feinteilen statt.

# Dichte Lagerung RM1P

Diagenetisch inertisiertes Restmüllmaterial



P 96 06 14 / 23 - 21 bis 25



P 96 05 30 / 07 11 - 29

*Abb. 16 (oben): Die Kristallisate auf der linken Seite befinden sich im oberen Drittel des Lysimeters, sie sind in situ entstanden*

*Abb. 16 (links): Auf Grund der Dichte findet keine beobachtbare Wasserbewegung statt. Vorhanden ist nur Porenwasser, das nicht zur Bildung virtueller Wasserspiegel führen kann. An mehreren Stellen können feinnadelig verfilzte, bzw. randständige Neukristallisate beobachtet werden, vereinzelt "offene Strukturen" bzw. Hohlräume wachsen zu. Bei den Aggregaten handelt es sich vermutlich um ein Carbonat, (Calcit, ev. geringe SM-Einlagerungen?). Die Schwarzfärbung des Überlagerungswassers am Kontakt zum Abfall/Feinteilmengende sowie der organischen Abfallkomponenten im Gemisch ist auf die Wirkung von sulfatreduzierenden Bakterien zurückzuführen. Im inertisierten Müllkörper liegt Calcium als Bicarbonat oder Gips vor. Unter den vorherrschenden Bedingungen wird aus Calciumsulfat Calciumcarbonat ausgefällt, wenn Sulfat mit Acetat durch die Sulfatreduzierer zu Schwefelwasserstoff reduziert wird. Außerdem entsteht Calcit durch pH-Änderung, wobei das Bicarbonat zum schwer löslichen Carbonat reduziert wird.*

### Langfristige Auslaugbarkeit

Die langfristige Auslaugbarkeit ist das Resultat der oben beschriebenen Eigenschaften des Deponiekörpers. Bei allen beschriebenen Deponietypen bis auf die **DIAINERT-Deponie** ist sie hoch aufgrund der langandauernden Reaktionen und der mehr oder weniger großen Durchlässigkeit des Deponiekörpers.

## 5.4 Emissionen

### Sickerwasser

Die Gesamtbilanz der Sickerwasseremissionen ist abhängig von der Sickerwasserqualität, von der Sickerwasserabflussrate und von der Gesamtzeitdauer der Emission. Diese wiederum sind abhängig vom Niederschlag, von der Oberflächengestaltung und von der Durchlässigkeit des Abfallkörpers.

### Sickerwasserqualität

Die Sickerwässer der **R-Deponien** sind anorganisch wie organisch hoch belastet. Vor allem während der sauren Phase sind die Belastungen sehr hoch. Etwa 10% des organischen Kohlenstoffes wird über das Wasser ausgetragen. Diese Belastung nimmt zwar im Verlaufe von Jahren ab (jedoch, wie zuvor beschrieben, wechselnd), die Gesamtfracht ist aber auf Grund der abgegebenen Mengen nicht umweltverträglich. Die Biotoxizität zeigt ebenfalls sehr schwankende Werte (je nach Neumobilisation in Deponiezonen, die zuvor nicht von den Umsetzungen erfaßt gewesen sind) und liegt in den Bereichen der starken bis sehr starken Hemmung von Leuchtbakterien.

Die Sickerwässer der **MBA-Deponie** sind auf Grund des vorangegangenen Abbaues geringer belastet als die einer konventionellen Deponie, dennoch ist noch ein erheblicher Anteil an organischem Kohlenstoff vorhanden. Schwermetalle können mit dem Wasser ausgetragen werden. Biotoxische Untersuchungen zeigen ambivalente Ergebnisse beim Leuchtbakterientest.

Sickerwasser aus deponierten Verbrennungsrückständen in **MVA-Deponien** ist nahezu frei von organischer Belastung; indessen können beachtliche Schwermetallmengen mobilisiert

werden (Abb. 10). Biotoxizitätsuntersuchungen zeigen bei der Freisetzung der Schwermetalle eine Totalschädigung der Leuchtbakterien.

Bei **DIAINERT-Deponien** ist das austretende Wasser in der Qualität dem der **MBA** vergleichbar. Der Leuchtbakterientest zeigte bei der Diagenetischen Inertisierung allerdings eine geringere Hemmung (Bereich „mäßig“). Sickerwasser von ausgereiften Produkten der mechanisch-biologischen Abfallbehandlung ist von den organischen Parametern her günstiger einzustufen, das der Diagenetischen Inertisierung bei der Schwermetallfraktion. Selbst Konsolidierungswasser aus dem nach der Methode der **DIAGENETISCHEN INERTISIERUNG** aufbereiteten Material der Rauchgaswäsche einer thermischen Behandlung zeigt im völligen Gegensatz zum Sickerwasser des unbehandelten Ausgangsmaterials nur eine unbedeutende Hemmung der Leuchtbakterien.

### Sickerwasserquantität

Sickerwasser entsteht in den verschiedenen Deponien in unterschiedlichem Umfang und wird, solange die Sicherungseinrichtungen, die Dichtungsschichten und insbesondere die Drainagen (vgl. W. ENTENMANN 2001 im selben Band) funktionieren, in der Kläranlage behandelt. Nach dem Versagen dieser Sicherungselemente gelangt es ins Grund- oder Oberflächenwasser. Es muss davon ausgegangen werden, dass der Zeitraum der Entstehung von Sickerwasser sehr viel länger ist als die Lebensdauer der Sicherungseinrichtungen, wie K. KRUSE (1995) anhand von Extrapolationen von Laborversuchen ableitet. Diese Ergebnisse werden durch Untersuchungen alter Deponien und Altlasten bestätigt (W. ENTENMANN 1998, W. ENTENMANN & SCHWINN 1997, W. ENTENMANN & J. RAPPERT 1998). Die Emissionen ergeben sich für alle Deponien dann aus der Wasserbilanz (W. ENTENMANN 1999). Eine Verringerung der Sickerwasseremission tritt keineswegs automatisch bei einer Reduktion der Durchlässigkeit des Müllkörpers oder dessen Sicherungseinrichtungen auf, sondern erst ab einem Schwellenwertbereich, der bei sehr geringen Durchlässigkeitsbeiwerten liegt (W. ENTENMANN 1998). Nachweislich erzielt nur die **DIAINERT-Deponie** diese Werte: Der nahezu undurchlässige Depo-

niekörper (Abb. 1, 16) lässt kein Sickerwasser zu. Das Konsolidierungswasser (durch gravitative Kompaktion ausgepresstes Porenwasser) tendiert gegen Null und beträgt ca. 1 % des Sickerwassers der **R-Deponie**.

#### Gesamtzeitdauer der Sickerwasseremission

Bei keiner anderen als der **DIAINERT-Deponie** ist beim derzeitigen Stand des Wissens die Zeitdauer der Sickerwasserproduktion auch nur annähernd absehbar. Vorliegende Prognosen (K. KRUSE 1995) sind lediglich Extrapolationen aus Lysimeterversuchen oder noch einfacheren Säulenversuchen. Die **DIAINERT-Deponie** dagegen lässt Sickerwasser schon von Beginn an nicht entstehen und wird nachweislich während der bislang versuchstechnisch belegten Zeiträume immer wasserundurchlässiger und zusätzlich von ihrem geochemischen Gefüge her immer günstiger.

#### Gesamtbilanz

Von der Gesamtbilanz her ist die **R-Deponie** am ungünstigsten, denn sie liefert am längsten mit organischem Material, Salzen und Schwermetallen belastetes Sickerwasser. Bei der **MBA-Deponie** ist ein großer Anteil an Sickerwasser-Bildungspotential vorweggenommen, so dass die Sickerwasserproduktion insbesondere in dem Zeitraum nach Versagen der Entwässerungseinrichtungen und künstlichen Dichtungen erheblich günstiger ausfällt. Über das Langzeitverhalten der **MVA-Deponie** ist derzeit noch zu wenig bekannt um einen echten Vergleich anzustellen. Insbesondere die hohe Toxizität in Verbindung mit den Aussagen aus der Literatur, die auf einen sehr langandauernden Verwitterungsprozess im Inneren der durch eine vorläufige Verwitterungsrinde geschützten Deponien (MARZI et al. 1998) und auf eine sehr lange Emissionszeit schließen lassen, lang anhaltende mineralische Umwandlungen und pH-Wert-Verschiebungen, auch Karbonatlösungen, geben Anlass für eine ungünstige Prognose. Insbesondere sind die Auswirkungen des sehr ungünstigen Sickerwasserchemismus auf die Entwässerungsschicht (K.U. HEYER & R. STEGMANN 1997) zu berücksichtigen, die deren Lebensdauer einschränkt.

Die übrigen Barrieren, wie Basisdichtung und technische Barriere sind nach einem kompletten Versagen der Entwässerung unwirksam, wie W. ENTENMANN (2001, im selben Band) anhand von Beispielen sogar schon aus der Betriebszeit von Deponien aufzeigen konnte. Die **DIAINERT-Deponie** dagegen schneidet ungleich günstiger ab, da sie darauf basiert, die Schadstofffrachten über die gesamte Ablagerungszeit gering zu halten.

Zieht man nur die derzeit messbaren Frachtraten zur Bewertung heran, dann ist der Vorteil der Diagenetischen Inertisierung gegenüber den anderen Methoden sehr deutlich.

#### Deponiegas

Bei der **R-Deponie** findet spontane heftige Gasbildung noch während der Schüttung und dann eine lang anhaltende Produktion von CO<sub>2</sub> und Methan statt. Eine Zwangsentgasung ist erforderlich.

Bei der **MBA-Deponie** wird das nach der Schüttung verbleibende Methanbildungspotential durch den vorweggenommenen Abbau der organischen Substanz in der aeroben Rotte (K. LEIKAM & R. STEGMANN 1995) eingeschränkt. Nach Abklingen der spontanen Reaktionen und Ablagerung in einem Deponieraum besteht weiterhin die Möglichkeit von Deponiegasbildung (H.-J. EHRIG, 1991), wenn auch in gemäßigttem Ausmaß. Aus diesem Grunde sind derzeit in Deutschland aktive Entgasungsmaßnahmen noch vorgeschrieben.

Bei der **MVA-Deponie** ist von keinem wesentlichen Gasbildungspotential auszugehen. Das organische Material wird vorab nahezu vollständig zu Kohlendioxid umgesetzt.

Prinzipiell ist das Gasbildungspotential in der **DIAINERT-Deponie** dem der **MBA** gleichzusetzen; dem Vorteil des Abbaues organischer Substanz im Rotteprozeß steht hier die weitgehende Unterbindung von Luft- und Wasserzutritten gegenüber.

Bei der nahezu dichten Umhüllung der Abfallpartikel ist davon auszugehen, dass biologische Prozesse zum Erliegen kommen.

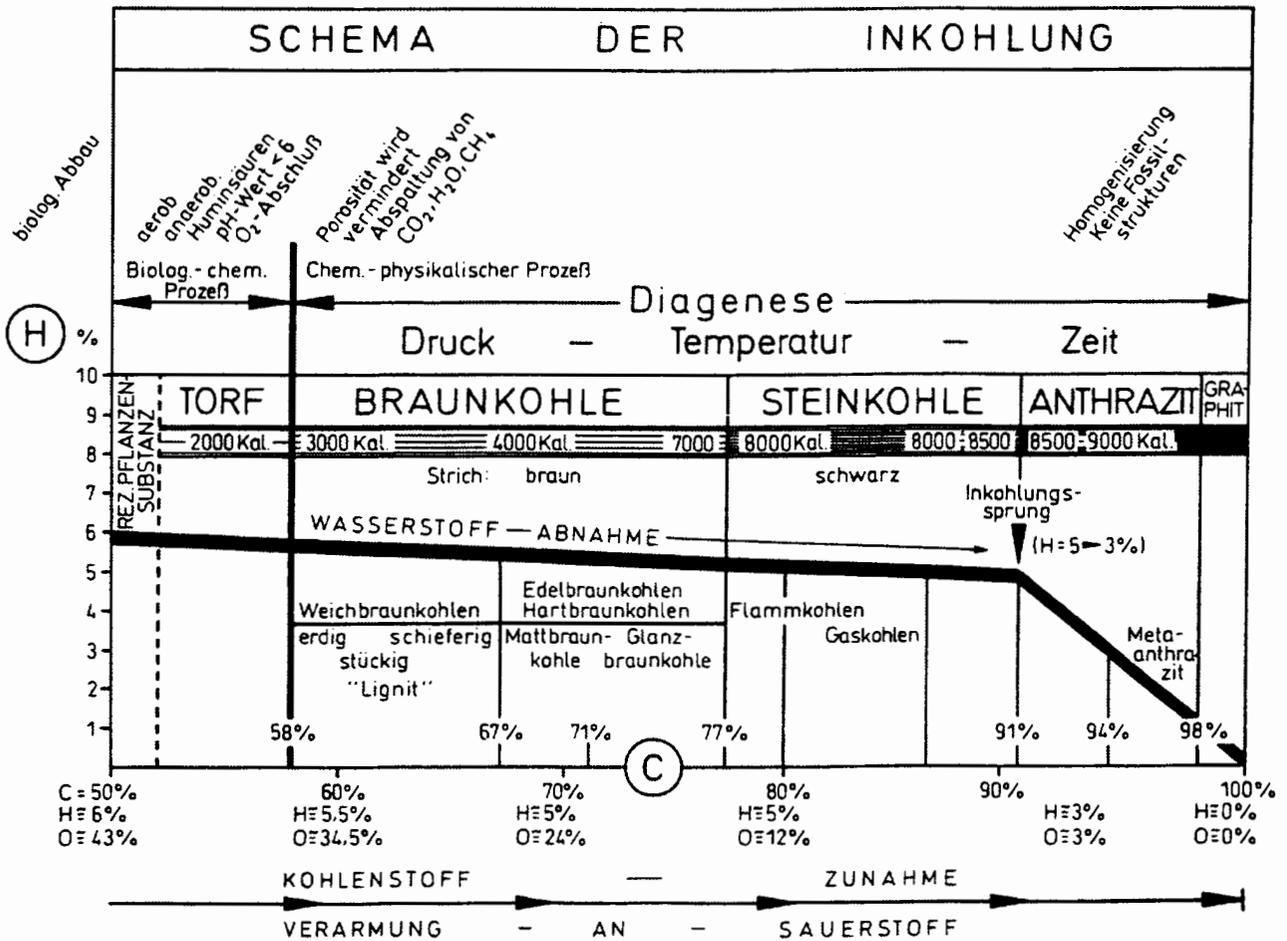


Abb. 17: Wasserstoffabgabe und Kohlenstoffanreicherung beim Vorgang der Kohlenbildung nach E. THENIUS & N. VAVRA 1996 nach W. KLAUS 1987

Am Beispiel der Inkohlung läßt sich der Beweis erbringen, dass es absolut nicht notwendig ist, den gesamten organischen Kohlenstoff von Abfällen in Form von CO<sub>2</sub> in die Atmosphäre zu entlassen. Die organische Masse selbst ist die beste Kohlen(dioxid)senke.

Der organische Kohlenstoff läßt sich aufgliedern

- in leicht umsetzbare Anteile, die z. T. spontan unter Bildung von CH<sub>4</sub> und CO<sub>2</sub> reagieren; dieser Teil der Organik wird in der Abfalltechnik bei der MBA oder einer sonstigen Art von Vorrotte reduziert.
- in mäßig schwer umsetzbare Anteile, die zum Teil nicht mehr auf bakterieller Basis, sondern auch z.B. über Pilze, abgebaut werden.
- in schwer umsetzbare Anteile, bei denen der Kohlenstoff vor allem in Form von Huminsäuren und Lignin vorliegt und die kein Umweltrisiko bergen. Ihre Umsetzung geht unter anaeroben Bedingungen und unter dem Einfluß von Druck und Temperatur sehr langsam weiter, bis der letzte Wasserstoff verbraucht ist (Inkohlungs-sprung, Anthrazit).

Bei der ersten Inkohlungsstufe, dem Torf, liegen bei entsprechenden pH-Werten nur mehr mäßig schwer umsetzbare und schwer umsetzbare Kohlenstoffanteile vor.

Der Abbau des Wasserstoffs läßt sich in einer **DIAINERT-Deponie** parallelisieren mit den Vorgängen der Inkohlung (Abb. 17). In geologischen Zeiträumen wird er sukzessive an die Umwelt abgegeben, die rasche Abgabe des Restwasserstoffes beim Inkohlungsprung zum Anthrazit ist erst in einigen Zehnermillionen Jahren zu erwarten. Die bisherigen Ergebnisse zeigen aber, dass die Gasproduktion durch Mikroorganismen nahezu zum Erliegen kommt. Geringe etwaig entstehende und aus der Deponie austretende Restmengen können problemlos durch die Wahl einer geeigneten Abdeckung (B. STEINERT et al. 1996) oder durch methanreduzierende Bakterien „entschärft“ werden (M. HUMER et al. 1997, 2001 i. gl. Bd.)

Hinsichtlich der Bewertung der Emissionen ist daher zusammenzufassen: Prinzipiell muss bei den Emissionen unterschieden werden zwischen dem klimaschädlichen CO<sub>2</sub> und dem schädlicheren Methan. Die R-Deponie ist am

ungünstigsten, es entsteht am meisten Methan. Bei der Verbrennung wird nahezu der gesamte Kohlenstoff vorab in CO<sub>2</sub> umgesetzt. Dies ist nur dann positiv zu werten, wenn die thermische Nutzung dazu in Relation steht. Bei zunehmender Vorsortierung des Mülls ist dies immer weniger gegeben; im Gegenteil müssen fossile Energieträger mit eingesetzt werden. Die **MVA-Deponie** ist dann jedoch nahezu emissionsfrei. Bei der **MBA-Deponie** entsteht mehr Methan, dieses wird jedoch zu einem Großteil gefasst und dann in CO<sub>2</sub> umgesetzt. Sicherlich wird auf Dauer ein Teil des Kohlenstoffs in der Deponie festgelegt und aus der Atmosphäre ferngehalten. Die **DIAINERT-Deponie** dagegen setzt vorrangig auf dieses Prinzip, nämlich nach der Vorbehandlung so wenig wie möglich klimaschädliche Gase entstehen zu lassen und auch einen Großteil des mittel- und schwer abbaubaren Kohlenstoffes in der Deponie zu stabilisieren.

## 6 Schlußbemerkung

Die **DIAGENETISCHE INERTISIERUNG** ist nicht als Konkurrenz zur thermischen Abfallverwertung oder zur mechanisch - biologischen Abfallbehandlung gedacht, sondern als Ergänzung beider Methoden.

Die thermische Abfallbehandlung hat ihre Berechtigung, wenn tatsächlich brennbare Materialien verwertet werden können, so dass nicht zusätzlich Brennstoff zugeführt werden muss und wenn die thermische Energie sinnvoll genutzt werden kann, etwa

- in Industrieanlagen
- durch Wärmenutzung
- durch Verstromung.

Die **DIAGENETISCHE INERTISIERUNG** sorgt durch die der Behandlung vorausgehende Absiebung der brennbaren Fraktion dafür, dass den Verbrennungsanlagen qualitativ hochwertiger Brennstoff zur Verfügung steht. Die restierenden Schlacken und Filterstoffe können durch die **DIAGENETISCHE INERTISIERUNG** sicher eingebunden und umweltneutral wieder deponiert werden.

Die **MBA** wieder hat ihre Vorzüge vor allem in landwirtschaftlich dominierten Gebieten, in denen bedeutende Mengen organischen Mülls anfallen. Aber auch sie hinterläßt ein Produkt, das einer sicheren Deponierung bedarf.

Der konventionellen Deponie gegenüber hat die **DIAGENETISCHE INERTISIERUNG** zahlreiche Vorzüge:

### Auf dem Sektor Sicherheit:

**Deponiegas** wird nur zu Beginn, und da in vernachlässigbaren Mengen gebildet: keine Geruchsbelästigung, keine Brandgefahr. (Hier liegen sehr gute Erfahrungen vom Bau der **DIAINERT-Deponie Hehenberg** vor)

**Sickerwasser** gibt es nicht. Durch Überlagerungsdruck austretende Porenwässer machen nur einen geringen Teil der Menge des Sickerwassers einer konventionellen Deponie aus und tendieren bei sachgerechtem Einbau gegen Null.

**Schadstoffausträge** sind durch die Dichte des Abfallkörpers auf die Größenordnung natürlicher Lagerstätten reduziert: ohne durchströmendes Wasser kein Transport; Schwermetalle sind an Tonminerale gebunden oder durch Karbonate gefällt.

Auf dem Sektor Kosten:

Den gegenüber einer konventionellen Deponie um ca. 10% höheren Behandlungskosten stehen mannigfaltige Ersparnisse bei der Nachsorge gegenüber:

**Keine Zwangsentgasung**, die aufwendig und wenig wirksam ist

**Keine Sickerwasserentsorgung**, die auch die nächsten Generationen belastet.

**Kein Mehrbedarf an Deponievolumen:** trotz Feinteilzugabe wird durch das Erreichen hoher Einbaudichten Deponievolumen gespart.

Auf dem Sektor Umweltverträglichkeit:

Durch die **Gasminimierung** werden sowohl die Methanemissionen konventioneller Deponien als auch die Kohlendioxidemissionen thermischer Abfallbehandlung vermieden; die DIAINERT-Deponie ist damit auf dem Gebiet der Abfallwirtschaft ein ideales Instrument der Durchsetzung der Kyoto-Protokolle.

Durch die **Ausscheidung von Kunststoffen** und anderen brennbaren Materialien vor dem eigentlichen Vermengungsprozeß wird hochwertiges Heizmaterial für die kalorische Verwertung gesichert.

Durch den **Einsatz mobiler Maschineneinheiten** können auch kleine Deponieeinheiten vor Ort bearbeitet werden.

Geringe, vor allem zu Beginn der Ablagerung auftretende Emissionen werden problem- und schadlos in den **Kreislauf der Natur** eingebunden.

## Förderungen und Kooperationen



Die Untersuchungen wurden finanziell unterstützt von der Österreichischen Kommunalkredit (Betreuung: Dipl.Ing Th. STEIRER), die zur Verfügung gestellten Mittel werden bei der Anwendung aus Lizenzgebühren refundiert und belasten nicht den Steuerzahler!

Die Umsetzung des Verfahrens in die praktische Anwendung ist durch die Unterstützung (Förderungsbeginn 10/97) des Bundesministeriums für Wirtschaft und Arbeit (vorm. Bundesministerium für wirtschaftliche Angelegenheiten) unter Bundesminister Dr. J. FARNLEITNER, Abt. IX/A/7, Technik und Innovation, sowie des Forschungsförderungsfonds FFF (gefördertes Projekt abgeschlossen) ermöglicht worden.

### Folgende Stellen waren am Untersuchungsprojekt (Lysimeter) beteiligt :

Koordination u. Leitung: Dr.G. RIEHL- H.

BOKU Wien: Abt. Abfallwirtschaft,  
Univ.Prof. Dr. P. LECHNER  
Inst. f. Wasservorsorge, Gewässerökologie u. Abfallwirtschaft, Dr. F. ZIBUSCHKA  
Inst. f. Geotechnik u. Verkehrswegebau, Univ.Prof. Dr. O. PREGL

TU Wien: Inst. f. Erdölchemie, Univ.Prof. Dipl.Ing. H. SCHINDLBAUER

Montanuniv. Leoben: Inst. f Sedimentologie, Univ.Prof. Dr. W. VORTISCH

ÖFPZ Arsenal GmbH, Bereich Umwelt, Univ.Prof. Dipl.Ing. Dr. RANK

TU Berlin: Inst. f. Geologie  
Univ.Prof. Dr. H. KALLENBACH

Dipl.Geol. Dr. Chr. KISTEN

Fa. Geoseis: Ing. P. CARNIEL;  
M. HACKENBERG

**Untersuchungen ARC Seibersdorf:**  
Dipl.Ing. A. KRENN

### Folgende Stellen waren bei der Umsetzung der Methode in die Praxis beteiligt:

Wiss. Leitung: Dr. G. RIEHL- H.

Betreiber: Abfallverband Grieskirchen,  
OÖ, Österreich

Baubeauftrag: H. BURGSTALLER GmbH,  
Haag

ztw. Bauleitung: Ing. R. PERNITZ

Analytik: Dipl.Ing. K. SCHEIDL

Montanuniv. Leoben: Inst. f Sedimentologie,  
Univ.Prof. Dr. W. VORTISCH

Fa. Geoinert: Ing. P. CARNIEL;  
M. HACKENBERG

## Literatur

ANONYMUS 1997

Erste Ausnahmen von der TAsi. EP-Journal 9/1997, S. 4., 1997

ALSAG 1989/1996

Altlastensanierungsgesetz BGBl Nr. 299/1989 i.d. Fassung Art. 87 Strukturanpassungsgesetz BGBl. Nr. 201/1996, Wien 1996

AWG 1990/2000

Abfallwirtschaftsgesetz BGBl Nr. 325/1990 in der Fassung BGBl I Nr. 90/2000, Wien 2000

P. BACCINI, et al., 1987

"Water and Element Balances of Municipale Solid Waste Landfills". In: Waste Management and Research (1987), 5, pp 483 - 499, 1987

P. BACCINI, 1992

"Die Deponie in einer ökologisch orientierten Volkswirtschaft." In: GAIA no. 1. 1992, Zürich 1992

E. BINNER, 1995

Inkubationsversuche zur Beurteilung der Reaktivität von Abfällen; In: Waste Reports No. 02 "Emissionsverhalten von Restmüll", Dokumentation eines Arbeitsgespräches, P. LECHNER (Hrsg.), ABF-BOKU Wien, 1995

- S. BAUER, 1996  
Messung der Methanemission von Deponien, unv. Dipl.Arb. BOKU Wien 1996
- W. BAUMANN, 1985  
"Minimierung und langfristige Abschätzung von Sickerwasseremissionen aus Hausmülldeponien" INFU Werkstattreihe Heft 15, Institut für Umweltschutz der Universität Dortmund, 1985
- K. BERGER & V. SOKOLLEK, 1997  
Sind qualifizierte Abdeckungen von Altdeponien unter den gegebenen klimatischen Voraussetzungen der BRD sinnvoll bzw. möglich? - In: Egloffstein/Burkhardt: Oberflächenabdichtungen von Deponien und Altlasten – Abfallwirtschaft in Forschung und Praxis 103: 15-39; Berlin 1997
- B. BERGFELDT,  
E. DÄUBER & J. VEHLow, 1998  
Norm und Wirklichkeit – zur Aussagekraft standardisierter Elutionstests. Geo-Berlin 98 V 27 Terra Nostra 98/3; Berlin 1998
- E. BINNER & Th. LAHNER, 1997  
Wasserhaushalt und Emissionssituation am Beispiel der Hausmüllversuchsanlage Breitenau, Barbaragespräche 1995, Wien 1997
- BMU, 1999  
Stärkung von Wettbewerb, Vielfalt und Innovation in der Abfallwirtschaft. Fachgespräch des Bundesumweltministeriums zur Einbeziehung mechanisch-biologischer Verfahren in die Abfallentsorgung. Materialienband 24.09.1999; Berlin 1999
- P.H. BRUNNER, 1994  
Abfall als Langzeitrisiko, Barbaragespräche 1993 „Grenzen der Geotechnik“, pg 103-106, Wien 1994
- H.J. COLLINS & P. SPILLMANN, 1986  
Wasser- und Schadstoffhaushalt von Abfalldeponien und deren Wirkungen auf Gewässer, 337 S., 104 Abb., 63 Tab.; Forschungsbericht - Deutsche Forschungsgemeinschaft Weinheim, Berlin 1986
- DEPONIEVERORDNUNG, 1996  
Verordnung des Bundesministers für Umwelt über die Ablagerung von Abfällen (Deponieverordnung), 164. Verordnung, Wien 1996
- H. DOEDENS & A. GRIESSE, 1998  
Nachweis der Gleichwertigkeit gemäß den Schutzziele der TASI. 2. Niedersächsische Abfalltage 02.-04.03.98 Seite 49-60, 1998
- H.-J. EHRIG, 1991  
Gasprognosen bei Restmülldeponien. In: Deponiegasnutzung, Trier Berichte zur Abfallwirtschaft Bd. 2, Rettenberger/Stegmann (Hrsg.), Economica Verlag, Bonn 1991
- EU RICHTLINIE, 1999  
Richtlinie 1999/31/EG des Rates über Abfalldeponien, Brüssel 1999
- W. ENTENMANN, & K. H. SCHWINN, 1997  
Emission of pollutants from different contaminated sites into groundwater - a comparative study from Northern German quaternary sediments. Proc. Int. Conf. IAEG Athen: 1817-1822, 3 Abb., 2 Tab.; Balkema, Rotterdam 1997
- W. ENTENMANN, 1998  
Hydrogeologische Untersuchungsmethoden von Altlasten, 152 Abb., 49 Tab., 373 S., Springer, Berlin-Heidelberg-New York, 1998
- W. ENTENMANN & J. RAPPERT 1998  
Estimation of seepage discharge from polluted sites and landfills. - Proc. 8th. International IAEG Congress Vancouver IV: 2299-2305, 4 Abb., 1 Tab.; Balkema, Rotterdam 1998
- W. ENTENMANN, 1999  
Wasser- und Stoffbilanzen bei der Gefährdungsabschätzung von Altlasten und Deponien. - Geowissenschaften & Umwelt 3: Ressourcen-Umwelt-Management: 37-54, 6 Abb., 5 Tab.; Springer, Berlin 1999.
- W. ENTENMANN, 2001  
Untersuchungen zur Wirksamkeit von Deponieabdichtungssystemen im Hinblick auf den Grundwasserschutz,, 33 S., Barbaragespräche 1998, Bd. 5, Payerbach 2001
- FGSV, 1995  
Technische Lieferbedingungen für Hausmüllverbrennungsasche im Straßenbau TL HMVA-StB 95, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen 10 S.; Köln 1995

- K. U. HEYER & R. STEGMANN, 1997  
Landfilling of bottom ashes from incineration of municipal solid waste: a general survey. Proc. Sardinia 97: 521- 533; Cagliari 1997
- G. HIRSCHMANN, U. FÖRSTNER, 1997  
Langfristiges Deponieverhalten von Müllverbrennungsschlacken, BMBF-Verbundvorhaben Deponiekörper - Inerte Abfälle, Technische Universität Hamburg-Harburg, Arbeitsbereich Umweltschutz, Hamburg 1997
- H. HUBER, M. JAROŠ, 1997  
Emissionsverhalten von MVA-Schlacke nach forcierter Alterung, Waste Reports 6/97, Hrsg. P. Lechner, Abteilung Abfallwirtschaft, Universität für Bodenkultur Wien 1997
- M. HUMER, P. LECHNER, 1997  
Grundlagen der biologischen Methanoxidation; Waste-Reports Nr. 05, August 1997, Abteilung Abfallwirtschaft, Universität für Bodenkultur Wien 1997
- C.A. JOHNSON, 1992  
Alterungsprozesse in der Schlacke, In: Belevi, H., Johnson, A., Lichtensteiger, T., Zeltner, C., Emissionsabschätzung für Kehrichtschlacke - Projekt EKESA 1992, Seite 104-109, Dübendorf 1992
- L. JOHNSON, 1993  
Chemische Eigenschaften der Müllschlacke. - In: BACCINI & GAMPER: Deponierung fester Rückstände aus der Abfallwirtschaft: 35 - 51; Dübendorf - Zürich 1993
- K. KRUSE, 1995  
Sickerwasseremissionen bei alten Deponien - wie lange problematisch? UTECH Berlin 43. Seminar S.31-52; Berlin 1995
- LAGA, 1991  
(Länderarbeitsgemeinschaft Abfall), Informationsschrift Altablagerungen und Altlasten, Erich Schmidt Verlag, Berlin 1991
- A. LAGERKVIST, H. ECKE, 1995  
„Data base of landfill test cells“ (Manuskript) IEA Expert Working Group on Landfill Gas, Lulea 1995
- A. LAGERKVIST; H. ECKE, 1997  
Deponierungsstrategien, Versuchsfelder und die Zukunft, Barbaragespräche 1995, Wien 1997
- P. LECHNER, 1997  
Emissionen von Deponien - derzeit und in Zukunft, Barbara-Gespräche 1995, Bd. 4, 10 S., Wien 1997
- K. LEIKAM & R. STEGMANN 1995  
Emissionsverhalten von mechanisch-biologisch vorbehandelten Restabfällen; In: Waste Reports No. 02 "Emissionsverhalten von Restmüll", Dokumentation eines Arbeitsgespräches, Lechner (Hrsg.), ABF-BOKU Wien, 1995
- T. MARZI, S. PALITZSCH, R. BECKMANN, R. KÜMMEL, A. BEARD & K. KELDENICHS, 1998  
Wirkungsmechanismen bei der Alterung von Müllverbrennungsschlacken. - Müll und Abfall 1990 (5): 316 - 322, Oberhausen 1998
- S. MELCHIOR, 1996  
Die Austrocknungsgefährdung von bindigen mineralischen Dichtungen und Bentonitmatten in der Oberflächenabdichtung - Ergebnisse der mehrjährigen In-situ-Versuche und Aufgrabungen auf der Altdeponie Hamburg-Georgswerder, in: U. MAIER-HARTH (Hrsg.): Geologische Barriere, Basisabdichtung, Oberflächenabdichtung - Möglichkeiten zur standortbezogenen Optimierung, 3. Deponie-Seminar in Bingen-Büdesheim, 40 S, Mainz 1996
- S. MELCHIOR, 2001  
In-situ-Untersuchungen zur Wirksamkeit von Oberflächenabdichtungen, Barbara-Gespräche 1998, Bd. 5, 15 S., Payerbach 2001
- F. PETERSEN, 1998  
Die Pflichten der Länder zur Umsetzung der TA Siedlungsabfall. Müll und Abfall 9/1998 S. 560 - 567; Berlin 1998
- G. PFRANG-STOTZ & J. REICHEL, 1998  
Kann man aus Müll Strassen bauen? Der Einsatz von Müllverbrennungsschlacken im Strassenbau aus mineralogischer Sicht. Geo-Berlin 98 V 262 Terra Nostra 98/3; Berlin 1998

- C.-A. RADDE, 1999  
Siedlungsabfallentsorgung in Deutschland vor dem Hintergrund der TA Siedlungsabfall und der europäischen Deponierichtlinie. – In: Egloffstein/Burkhardt/Czurda: Oberflächenabdichtungen von Deponien und Altlasten '99 – Abfallwirtschaft in Forschung und Praxis 116: 1-19; Berlin 1999
- H.-G. RAMKE, M. BRUNE, 1990  
Untersuchungen zur Funktionsfähigkeit von Entwässerungsschichten in Deponiebasisdichtungssystemen, Abschlußbericht Forschungsvorhaben FK BMFT 1450457 3; Braunschweig 1990
- D. RANK, W. PAPESCH, V. RAJNER, G. RIEHL-HERWIRSCH, 1992  
Environmental isotopes study at the Breitenau Experimental Landfill (Lower Austria). In: H. HÖTZL & A. WERNER (Hrsg.) Proc. of the 6. Int. Symp. on Water Tracing, Karlsruhe, 1992, A.A. Balkema, Rotterdam, 1992
- G. RETTENBERG, H. METZGER, 1992  
Der Deponiegashaushalt in Altablagerungen - Vorgehensweise und Technik zu seiner Erkundung und Bewertung (Leitfaden Deponiegas), Handbuch Altlasten, Bd. 10, Hrsg. Landesanstalt für Umweltschutz Baden - Württemberg, Karlsruhe 1992
- G. RETTENBERGER, 1994 a  
Deponierückbau auf der Deponie Burghof - wissenschaftliche Begleitung, Konzeption und erste Ergebnisse des Meßprogramms, in: Abfallwirtschaft in Forschung und Praxis Bd 70: Fortschritte der Deponietechnik 1994, Stief/Fehlau (Hrsg.), Erich Schmid Verlag, Berlin 1994
- G. RETTENBERGER, 1994 b  
Der Deponiegashaushalt von Altablagerungen, in. Müllhandbuch KZ 4355, Lfg. 2/94, Erich Schmidt-Verlag, Berlin 1994
- G. RETTENBERGER, 1997  
Emissionsverhalten hochverdichteter Abfälle - Erfahrungen aus der Deponie „Burghof“, in.. Verbundvorhaben Deponiekörper, bmb+f, Wuppertal 1997
- G. RIEHL-HERWIRSCH, P. LECHNER, 1983  
Untersuchung über die Verwendung des Schlämmmaterials aus der Kieswäsche als Grundwasserschutzschicht, 66 S., In: Wasserwirtschaft Wasservorsorge Hrsg.: BMLuF, Wasserwirtschaftskataster, Wien 1983
- G. RIEHL-HERWIRSCH, 1993  
Die "Diagenetische Inertisierung" - eine umweltneutrale Rückeinbindung von Abfall in den natürlichen Stoffkreislauf, Restmüll Enquete, Informationsreihe Abfallwirtschaft des Landes Steiermark, Band 1, p69-72, Graz 1993
- G. RIEHL-HERWIRSCH & P. LECHNER, E. BINNER, P. CARNIEL, M. HACKENBERG, Th. LAHNER, G. RANK, E. RITTER, E. VITEK, J. WALTER, 1995  
Hausmüllversuchsanlage Breitenau, Abschlußbericht zum Beobachtungszeitraum 1986 - 1991, pg. 1-199 BMLuF (Hrsg.), Wasserwirtschaftskataster, Wien 1995
- G. RIEHL-HERWIRSCH, P. CARNIEL, M. HACKENBERG, 1996  
Diagenetische Inertisierung - ein Immobilisierungsverfahren, Lysimeterversuche Katzelsdorf, NÖ, 1992-1996, Kurzfassung des Endberichtes, pg. 1-23, Hrsg. H. HOLZER (BMfUJF), Th STEIRER (Österr. Kommunalkredit AG), Wr. Neustadt 1996
- G. RIEHL-HERWIRSCH, P. CARNIEL, M. HACKENBERG, 1997  
Die Versuchsanlage Breitenau - Aufbau und Wasserwegsamkeit, Ergebnisse und Fragen Barbara-Gespräche 1995, Bd. 2, p 191-226, Wien 1997
- G. RIEHL-H., St. PUXKANDL, M. HACKENBERG, 2000  
New technology for old waste treatment. Diagenetic Inertization - ecological security for geological times, Consoil 2000, Conference Proceedings, Leipzig 2000
- C. SCHNITT-RIEGRAF, H. U. BAMBAUER & M. DÜLMER, 1998  
Verfestigungsprodukte aus Müllverbrennungssaschen als inneres Barriersystem von Deponien, Geo-Berlin 98 V 310 Terra Nostra 98/3; Berlin, 1998

- L. SIGG, W. STUMM, 1996  
Aquatische Chemie - Eine Einführung in die Chemie wässriger Lösungen und natürlicher Gewässer, 4., durchges. Aufl. - Zürich: vdf, Hochschulverl. an der ETH Zürich; Teubner, Stuttgart 1996
- B. SINGER & K. T. FEHR, 1998  
Bestimmung des Phasenbestands in Kesselaschen aus Müllverbrennungsanlagen. Geo-Berlin 98 V 337 Terra Nostra 98/3; Berlin 1998
- C. SPEISER, TH. BAUMANN & R. NIESSNER, 1998  
Änderung des Massenbestandes bei der Ablagerung von MVA-Schlacken, Geo-Berlin 98 V 343 Terra Nostra 98/3; Berlin 1998
- R. STEGMANN, 1990  
Landfill Gas Extraction, in: Sanitary Landfill-Process, Technology and Environmental Impact; Academic Press, London, 1990
- R. STEGMANN, 1995  
Thermische oder mechanisch-biologische Restabfallvorbehandlung. UTA 1/1995 S. 41-42; Berlin 1995
- R. STEGMANN, 1997  
Oberflächenabdichtung nach TASI treibt Kosten. EP Journal 09/1997 Seite 1 und 4, 1997
- R. STEGMANN & K. HUPE, 1997  
Anpassung der Deponietechnik an die MBV-Reststoffe. In: Stegmann/Rettenberger: Entwicklungstendenzen in der Deponietechnik, Hamburger Berichte Abfallwirtschaft 12 S. 345-359; Hamburg 1997
- B. STEINERT, S. MELCHIOR, K. BURGER K. BERGER, M. TÜRK, 1996  
Dimensionierung von Kapillarsperren zur Oberflächenabdichtung von Deponien und Altlasten, in: Verbundvorhaben Weiterentwicklung von Deponieabdichtungssystemen Teil- BMBF -Vorhaben 39, Kurzfassung, Hamburg 1996
- K. STIEF, 1986  
Das Multibarrierenkonzept als Grundlage von Bau, Betrieb und Nutzung von Deponien, Müll und Abfall 18 (1):15-20; Berlin 1986
- TA SIEDLUNGSABFALL, 1993  
Technische Anleitung zur Verwertung, Behandlung und sonstigen Entsorgung von Siedlungsabfällen. Dritte allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Abfallgesetz. - Bundesanzeiger Hensfelder - Ludwig (Bearb.); 117 S., 3 Tab., Köln 1993
- E. THENIUS & N. VAVRA, 1996  
Fossilien im Volksglauben und im Alltag, 179 S., 197 Abb., Senckenbergband 71, Kramer, Frankfurt/M. 1996
- UBA, 2000  
Eckpunktepapier zur Änderung der TA Siedlungsabfall. Umwelt 5/2000, S. 265 - 266; Berlin 2000
- W. VORTISCH, 1995  
Diagenetische Inertisierung - Geologisch-mineralogische Grundlagen und Beispiele aus der Natur; In: Waste Reports No. 01 "Immobilisierung schadstoffhaltiger Abfälle", Dokumentation eines Arbeitsgespräches, P. LECHNER (Hrsg.), ABF-BOKU Wien, 1995
- C. ZEVENBERGEN, L. VAN REEUWIJK, J. BRADLEY, J. KEIJZER & R. KROES, 1995  
Leaching of heavy metals from MSUD-Incineration bottom ash in a disposal environment. - Proc. Sardinia '95: 369 - 377; Cagliari 1995



# BARBARA-GESPRÄCHE

## Payerbach 1998

Zunahme umweltbedingter Erkrankungen:  
Umweltmedizinische Erkenntnisse von heute  
sind die Prävention von morgen \*

Michael P. JAUMANN



Payerbach,  
18. September 1998

*\* Als Manuskript eingelangt Juli 2000*

**INHALT**

Vorwort	161
Einleitung	161
Inhalative Belastung	162
Neurotoxische Substanzen / Autoimmun-Erkrankungen	163
Derzeitige Situation	166
Zusammenfassung	166
Nachwort: Struktur des Prionenproteins	166
Legende	167
Literatur	167

*Anschrift des Verfassers:*

*Dr. med. Michael P. JAUMANN*

*HNO Beleg-Abteilung*

*Klinik am Eichert*

*D - 73035 Göppingen*

# Zunahme umweltbedingter Erkrankungen: Umweltmedizinische Erkenntnisse von heute sind die Prävention für morgen

Michael P. JAUMANN

## **Vorwort**

*Prävention ist derzeit in aller Munde und soll gefördert werden. Dies ist sicher wichtig, fragt sich nur, wer die Kosten dafür tragen soll. Allerdings ist vorstellbar, dass Prävention im weiteren Sinne sich auszahlt, indem Krankheiten weniger häufig werden. Die Krankheitsmuster und Krankheitshäufigkeiten sowie deren Verteilung regional haben sich in diesem Jahrhundert dramatisch verändert. Die Infektionskrankheiten sind weitgehend unter Kontrolle. Die wichtigsten Krankheiten, mit denen auch unsere Kinder konfrontiert werden, sind rasant steigende Häufigkeiten von Allergien, die Asthmamortalität hat sich verdoppelt, die Inzidenz an Leukämie, Hirntumoren und Diabetes ist gestiegen, die entwicklungsneurologischen Störungen und Verhaltensauffälligkeiten (ADD, ADHD\*) sind inzwischen weit verbreitet. Diese Entwicklungen drohen unsere Sozialsysteme zu sprengen.*

*Erstmals bietet die Umweltmedizin als ein interdisziplinäres Fach Möglichkeiten, diese fachübergreifenden Sachverhalte zu untersuchen und die Bewertungen in neuen vernetzten Zusammenhängen darzustellen. Neue immunologische und molekularbiologische Erkenntnisse ermöglichen das pathophysiologische Verstehen der Entstehung vieler "neuartiger" Erkrankungen. Die Konsequenzen aus diesen Erkenntnissen wären, dass in vielen Fällen Erkrankungen vermieden werden könnten, wenn die Exposition gegenüber toxischen Fremdstoffen reduziert werden würde.*

## **Einleitung**

Der Mensch und seine Umwelt stehen in einer sehr engen Beziehung. So gibt es heutzutage mehr denn je zuvor Substanzen, die Gesundheitsrisiken nach sich ziehen. Das rasante Wachstum moderner Technologien in unseren Industrie- und Wohlstandsgesellschaften ist begleitet von der Verbreitung neuartiger Substanzen, mit denen die Menschheit und die Mitwelt in der Evolution bisher nicht konfrontiert waren. Anorganische Schadstoffe stehen hier neben organischen Schadstoffen wie Pestiziden, Formaldehyd, Lösungsmitteln, Terpenen, Reinigungskemikalien, Zigarettenrauch, Verbrennungsprodukten und Drogen.

Die bisherige Kenntnis über die Wirkungsmechanismen von Chemikalien beruht auf der Wirkungsweise von hohen Dosierungen bzw. Vergiftungen. Für das Entstehen chronischer

Schäden, die oft erst nach jahrelanger Einwirkung in oft minimalen Mengen, zusammen mit einer Unzahl anderer Stoffe, auftreten, gibt es zunehmende Hinweise. Seien wir doch ehrlich? Wir Menschen und wir Mediziner sind nur bereit, etwas als Phänomen wahrzunehmen und eine Kausalität zu akzeptieren, wenn es eine mechanistische Erklärung auf dem Boden unseres naturwissenschaftlichen Weltbildes gibt. Bei Gesundheitsstörungen, die möglicherweise umweltbedingt bzw. komplexer Art sind, stecken wir in einem Dilemma. Wir tun uns schwer, Beschwerden zu akzeptieren, wenn sie nicht - evtl. noch nicht - mit unserem subtilen diagnostischen Arsenal objektivierbar sind.

Ich möchte deshalb versuchen, Ihnen eine neue Sicht für diese zunehmenden Zahlen von Patienten mit Allergien, Kopfschmerzen, Ohrgeräuschen, Schwindel, Hörstörungen, chronischer Bronchitis, Asthma und rheumähnlichen Autoimmun-Erkrankungen anzubieten. Die

\* Abkürzungen siehe Legende

Menschheit hat in diesem Jahrhundert etwa 10 Millionen neuartiger chemischer Substanzen geschaffen, deren Auswirkungen auf uns Menschen, unser Immun-, Hormon- und Nervensystem wir erst langsam erkennen.

## Inhalative Belastung

Besonders gefährlich für uns Menschen ist die inhalative Belastung mit Fremdstoffen. Dies betrifft insbesondere die an Feinstaub und Feinstaub gebundenen Stoffe, die nach neuen wissenschaftlichen Erkenntnissen <sup>(20)</sup> zu fast 100% vom Organismus aufgenommen werden (Abb. 1).

Die Blut-Hirn-Schranke, ein Schutzmechanismus für unser Gehirn, ist für die meisten dieser Stoffe kein Hindernis. So können gerade

Hippocampus mit Amygdala sind ein Hauptziel für die Toxine <sup>(29)</sup> und betrifft damit die wichtigsten Schaltstellen neuronaler Informationswege, das autonome Nervensystem ebenso wie die hormonelle Steuerung der Hypophyse <sup>(3;9)</sup> (Abb. 2).

Hinzu kommt, dass es durch diese Fremdstoffe am respiratorischen Epithel zu einer Herabsetzung der Zilienschlagfrequenz und Steigerung der Permeabilität kommt <sup>(4;22)</sup>. Hierdurch gelangen sowohl Allergene als auch andere Stoffe leichter in das darunter liegende Bindegewebe, wo sich Mastzellen und andere proinflammatorische Zellen befinden. Dies und die verstärkte Durchblutung verursachen eine erhöhte Permeabilität der Gefäßwand mit vermehrter interstitieller Flüssigkeit. Hinzu kommt, dass diese "Entzündungen" sensorische Nervenfasern in der Schleimhaut stimulieren und eine neuro-

gene Entzündung mit nachfolgender Vasodilatation, Ödem, Schleimsekretion und möglicherweise Kontraktion der glatten Muskulatur verursachen <sup>(17)</sup>. Mitursache für eine solche neurogene Entzündung ist die neuroimmunologische Kopplung. Bei dieser bindet sich Histamin aus Mastzellen an den Rezeptoren sensibler Nervenfasern und bedingt die Freisetzung der Substanz P, die sich ihrerseits wieder an Rezeptoren von Mastzellen bindet und eine neuerliche Degranulation in Gang setzt.

### Staubpartikel, halogenierte Kohlenwasserstoffe

<b>90 %</b>	<b>der Stäube in Atmosphäre &lt;10 µm</b> (P.J. CRUTZEN, 1994) stammen aus anthropogenen Verbrennungsprozessen
<b>87,5 %</b>	<b>PCDD/F an Partikeln &lt; 2 µm angelagert</b> (EPA, 1994) diese bestens alveolengängig!
<b>100 %</b>	<b>Bioverfügbarkeit dieser Substanzen</b> (C.S. NESSEL et al, 1990)

Abb. 1

die besonders gefährlichen lipophilen Stoffe wie Kohlenwasserstoffe, Hexachlorbenzol, polychlorierte Biphenyle, Dioxine und Furane mühelos die Bluthirnschranke überwinden. Nach Passage der Phospholipid-Bausteine der Zellmembranen lagern sich diese Stoffe an Nervenscheiden (Myelin) oder an die Hirnsubstanz an und verursachen entzündungsähnliche Veränderungen, Störungen bzw. Schädigungen. Dies betrifft insbesondere in die rhinencephalen Strukturen, den Hypothalamus, das limbische System, die temporalen Hirnregionen und den Hirnstamm. Der Hypothalamus und der

### Organochlor - Verbindungen Neurotoxizität

- \* mentale Entwicklungsstörungen
- \* Hirnstamm
- \* Neuropathie (sensibel, autonom)
- \* hormonelle Störungen

Abb. 2

Weiterhin zeigt sich, dass die von den Epithelzellen produzierten Zytokine die Konzentration der Adhaesionsmoleküle auf den Endothelzellen steigern<sup>(18)</sup> und es über diesen Mechanismus ebenfalls zu einem vermehrten Einstrom von Entzündungszellen in die Schleimhaut kommt. Ein weiteres Problem sind die Teilchen kleiner 1-3 µm, welche bis in die Lungenbläschen gelangen und dort oftmals für Monate und Jahre verbleiben, insbesondere dann, wenn die Oberfläche der Lunge durch Luftverschmutzung, Zigarettenrauchen oder rezidivierende Entzündungen verändert ist (Abb. 3).

<b><u>Auswirkungen von Feinstäuben</u></b> (Schweiz, 1993)	
3.800	vorzeitige Todesfälle
38.000	Fälle chron. Bronchitis
2,6 Mill.	Asthma - Anfälle
791.000 Tage	Arbeitsunfähigkeit
22.900 Tage	im Krankenhaus durch Atemwegs-/Herzkrankungen
(Bundesärztekammer 08-07-97)	

Abb. 3

Untersuchungen in Österreich und Deutschland zeigten, dass sich auf Staubpartikeln und Pollenoberflächen organische Agglomerate und neuartige Eiweiße als Ausdruck einer Freisetzung in Folge exogener Belastungen fanden und hiermit das vermehrte Auftreten von Pollenallergenen erklären. Die gleichzeitige Feinstaub- und Pollenallergenpräsentation auf der Schleimhaut könnte ein Modell für die simultane toxische und allergische Einwirkung auf die Epithelien sein. Die Wirkstoffsynergie mit gleichzeitiger toxisch-allergischer Affektion wäre eine gute Hypothese für die erhöhte allergische Sensibilisierung bzw. Immunmodifikation in westlichen Ballungsräumen. Neben den schon lange bekannten und seit 40 Jahren zunehmenden „Pollenallergien“ ist die rasant ansteigende Allergisierungs- und Erkrankungsrate bzgl. Latex ein klassisches Beispiel<sup>(25)</sup> für diese hier dargelegten Sachverhalte (Abb. 4). Über diese Mechanismen

kommt es zusätzlich bei erhöhten Belastungen mit Ozon (Verkehr) und Kohlenmonoxid (Rauchen) zu einem verzögerten Wachstum der Lunge bei Säuglingen und Kleinkindern<sup>(5;7)</sup>.

<b><u>Allergie gegen Naturlatex</u></b>	
<b>Prävalenz</b>	1,7 % Schweden 17,1 % USA
<b>nicht betroffen:</b>	DDR, Japan, England
<b>mögliche Ursache:</b>	ungepuderte Handschuhe, mehrfache Verwendung
RUEF, F. (1999)	

Abb. 4

### **Neurotoxische Substanzen / Autoimmun-Erkrankungen**

Neurotoxische Schäden des Organismus und nachfolgende Erkrankungen sind ein bisher wenig erforschtes Problem in der Medizin. Untersuchungen über die additiven und synergistischen Kombinationswirkungen von Xenobiotika (Pestiziden) in subtoxischen Konzentrationen auf menschliche Fibroblasten<sup>(32)</sup> belegten bei vielen Chemikalien nicht nur additive Schädigungen, sondern auch vielfache synergistische Effekte. Und dies bei subtoxischen Konzentrationen! So werden die starken Lipophilitätsunterschiede der kombinierten Substanzen als mögliche Ursache der synergistischen Effekte diskutiert<sup>(10)</sup>.

Neben sensiblen und motorischen Störungen gehören die Fehlfunktionen der Sinnesorgane bis hin zum kompletten Ausfall eines Sinnesorgans (z.B. Hörsturz) zu den Frühsymptomen einer neurotoxischen Schädigung. So bedingen Xenotika-Belastungen eine Vorschädigung bzw. erhöhte Empfindlichkeit von Sinneszellen (z.B. Innenohr, Netzhaut). Verschärft wird diese Situation durch eine immuntoxische Ödembildung der Endothelien in den Gefäßen mit nachfolgender Verminderung der Durchblutung<sup>(14)</sup> (Abb. 5).

**Immunologie**

Schwermetall - Ionen induzieren Adhäsionsmoleküle (KLEIN, 1994)

Monozyten und funktionsgestörte Endothelzellen induzieren Gewebefaktoren → lokalisierte Thrombosen (LEWIS, 1995)

Moleküle (Chemikalien) und Ionen (Schwermetalle) induzieren Zytokine, heat shock proteins (HSP70, HSP90) (KIRKPATRICK, 1996; TRIEBSKORN, 1998)

Diese anatomischen und pathophysiologischen Besonderheiten könnten Ursache für die erhöhten Konzentrationen an Schwermetallen und Organochlorverbindungen im Hirnstamm bei entsprechend exponierten Versuchstieren sein (<sup>15</sup>).

Neueste Untersuchungsergebnisse belegen, dass der Hirnstamm bei Menschen mit entsprechenden Vorbelastungen oder Expositionen am Arbeitsplatz eine statistisch signifikante Verminderung der dopaminergen D2-Rezeptoren im Corpus striatum aufwies. So bestand eine Korrelation mit der Dauer der Schadstoffexposition und der Schädigung der Dopamin-D2-Rezeptoren an den postsynaptischen Membranen (<sup>16</sup>). Hypothese für die Schadstoffwirkungen im ZNS könnte sein, dass die Schadstoffe an den Hirngefäßen zu chronisch-rezidivierenden Vaskulitiden mit immunogenen Entzündungsstadien führen. Schadstoffe wirken auf das Immunsystem und induzieren eine Antikörperbildung, die zu einer Dopamin-Blockade an der postsynaptischen Membrane führt (<sup>19</sup>). So können Chemikalien mit niedrigem Molekulargewicht native Proteine verändern, als Hapten wirken und eine Autoimmun-Reaktion bewirken (<sup>27</sup>).

Abb. 5

Die Permeabilität der Gehirngefäße wird durch die Bluthirnschranke bestimmt und kann manche Substanzen am Übertritt in das Zentralnervensystem (ZNS) hindern (<sup>23</sup>). Andererseits können Chemikalien, Metalle und Arzneimittel die Permeabilität der Bluthirnschranke erhöhen (<sup>12;13</sup>). Sehr häufig betroffen ist der Hirnstamm mit seiner Ansammlung wichtiger Schaltstellen verschiedenster Nerven und Regelkreise (<sup>2</sup>). Eine Ursache hierfür könnte sein, dass im Bereich der Formatio reticularis und im Bereich des Hypothalamus (<sup>21</sup>) keine Bluthirnschranke vorhanden ist.

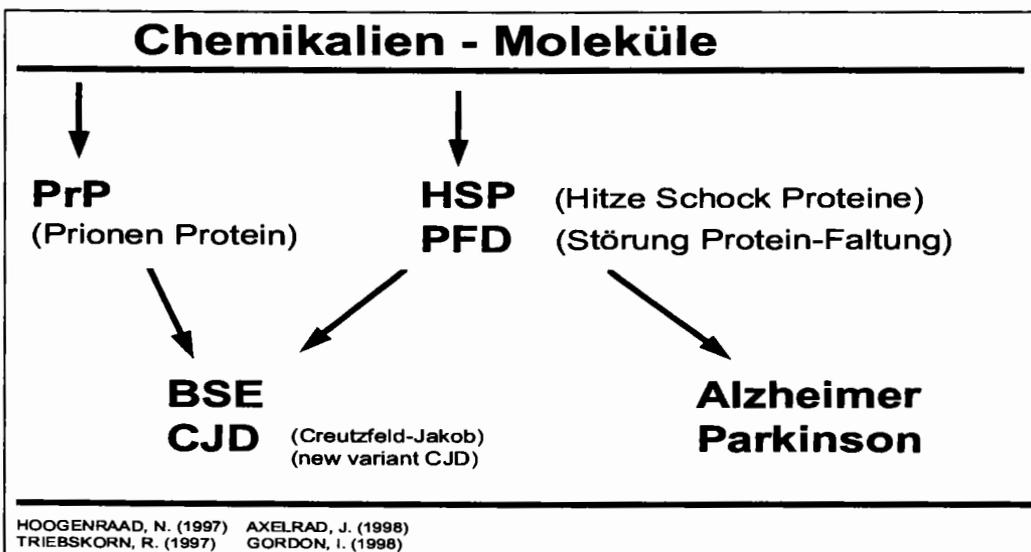
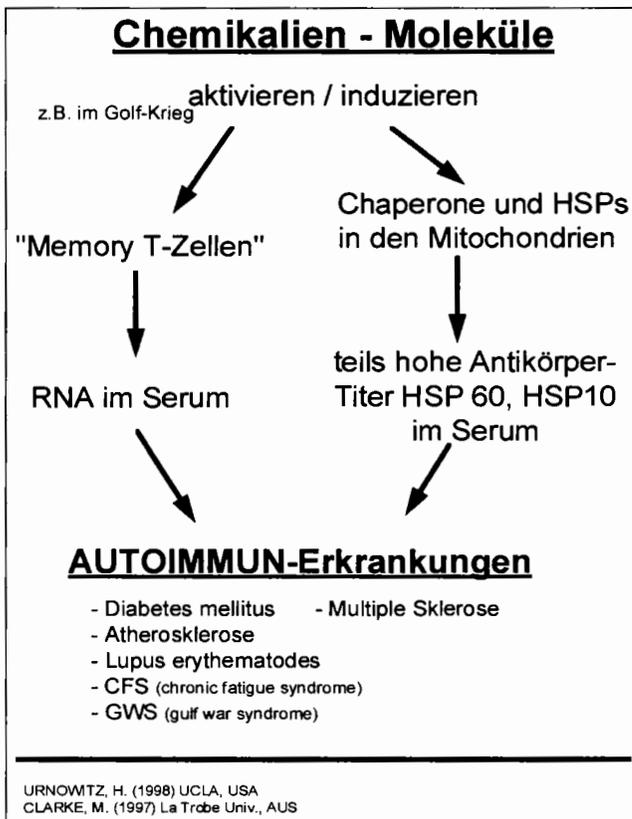


Abb. 6



Diese Störungen bzw. Veränderungen des Immunsystems und der Proteinfaltung haben Konsequenzen: Ein bedrohliches Beispiel ist das Prionen-Protein (PrP), welches z.B. durch Organophosphatpestizide zu krankhaftem Prionenprotein wird und beim Tier BSE und beim Menschen CJK (Creutzfeldt-Jakob-Krankheit) auslöst (Abb. 6)<sup>o</sup>. Der weit überwiegende Anteil der an CJK in Europa Verstorbenen war **nicht** an der infektiösen Variante erkrankt. Bei Untersuchungen in England ist aufgefallen, dass BSE bei Rindern überwiegend auf den Bauernhöfen auftrat, die Organophosphatpestizide benutzten (<sup>11,6,30</sup>). Vergleichbare Mechanismen sind für die Entstehung der Alzheimer-Erkrankungen und der Atherosklerose (<sup>24,26,31,28</sup>) bekannt geworden (Abb. 7).

<sup>o</sup>) Detail siehe Nachwort

Abb. 7

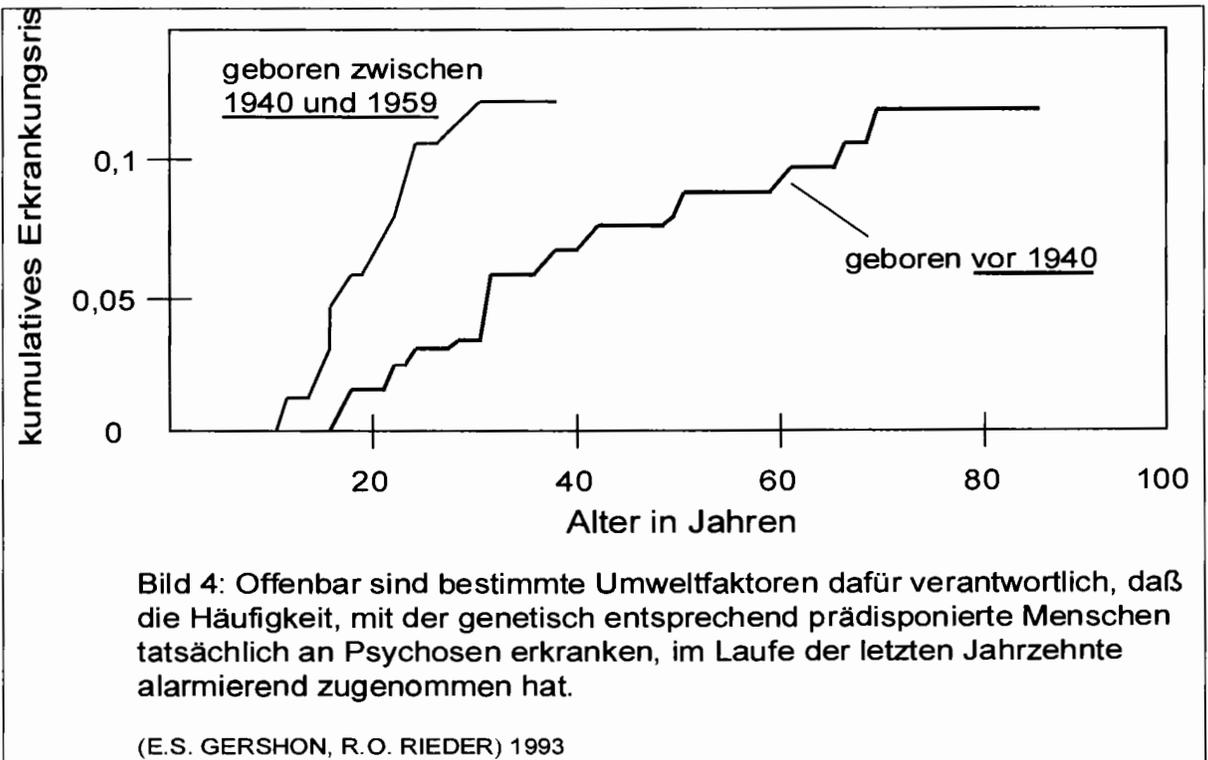


Abb. 8

## Derzeitige Situation

Innerhalb der letzten 50 Jahre ist es zu einer zusätzlichen Verschiebung der Morbiditätsrisiken gekommen, so dass viele Menschen – Dank des medizinischen Fortschritts - von der Kindheit bis in das Alter Dauerpatienten sind und dass eine Fülle neuartiger Erkrankungen wie MCS, CFS, SBS\* und Fibromyalgie über uns hereingebrendet sind. Obwohl erkennbar ist, dass lineare monokausale Sachverhalte nicht mehr gefragt sind, sondern komplexe Ursachen die Menschen krankmachen, sucht man bei den Verantwortlichen in Ärztekammern und Politik vergeblich nach biokybernetischen Lösungsansätzen.

Psychosomatische Erklärungen, wie früher beim „Magenulkus-Typ“ sind schnell bei der Hand (Abb. 8). Vielleicht ist dies auch eine Erklärung für die hohe Anzahl psychiatrischer Krankenhausbetten. Es interessiert in diesem Zusammenhang nicht, dass längst eine genetische Varianz entgiftender Enzymsysteme der Menschen nachgewiesen wurde. Durch die molekularbiologischen Erkenntnisse der letzten drei Jahre ist klar, dass zur genetischen Disposition eine exogene Noxe als Auslöser einer entsprechenden Erkrankung hinzukommen muß. Dies analog zur Prionen-Theorie von PRUSINER (Nobel-Preis), dass der Faktor X das Prion erst "infektiös" macht (<sup>1</sup>).

Wie sehr Umweltschadstoffe die Zytokinexpression und damit direkt das Leistungsprofil des Immunsystems beeinflussen, wie diese die Expression von Zelladhäsionsmolekülen durch chronische Metallzufuhr und die Induktion der archaischen Heat-Shock-Proteine (HSP) verur, ist bestens untersucht. So zeigen neueste Resultate aus dem Bereich der Psycho-Neuro-Immunologie, wie bedeutsam die immunrelevanten Zytokine für den Datentransfer im Zentralnervensystem sind. Hiermit wurde auch belegt, dass Änderungen der immunologischen Situation neurologische Störungen zur Folge haben können (<sup>8</sup>).

## Zusammenfassung

Die Umweltmedizin, als ein interdisziplinäres Fach, untersucht fachübergreifende Sachverhalte und stellt diese in neuen vernetzten Zusammenhängen dar. Durch die Verknüpfung neuer immunologischer und molekularbiologischer Erkenntnisse wird das pathophysiologische Verstehen vieler „neuartiger“ Erkrankungen ermöglicht. Hinzu kommen epidemiologische Ergebnisse der letzten Jahre, die belegen, dass in vielen Fällen Erkrankungen im Zusammenhang mit Umweltbelastungen entstehen und vermieden werden könnten, wenn die Exposition reduziert würde. Dies wiederum bedeutet, dass die tagtägliche und ubiquitäre Belastung der Bevölkerung mit Chemikalien, Schwermetallen und Lärm zu vermindern ist.

**Dies wäre in der Tat die beste Prävention für morgen!**

### Nachwort: Struktur des Prionenproteins

Nach der von Sir Stanley B. Prusiner vorgeschlagenen Theorie werden bei den Prionenerkrankungen wie BSE und Scrapie durch eine Gestaltänderung von zellulärem Prionenprotein PrP mittels eines bisher nicht nachgewiesenen "Faktors X" krankhafte Prionenproteine PrP<sup>SC</sup> hervorgerufen. Dies bedeutet eine völlig neuartige Klasse von „Infektionskrankheiten“ bei diesem Modell übertragbarer Encephalopathien. So soll das Prionenprotein selbst in seiner krankhaft veränderten Scrapie-Form als infektiöses Agens wirken. In dieser Form soll es in der Lage sein, sich mit harmlosem zellulärem Prionenprotein zusammenzulagern. Dann wird in einem solchen Komplex das zelluläre Protein PrP in die pathologische Form PrP<sup>SC</sup> überführt. Ist dieser Umwandlungsprozeß erst einmal eingeleitet, kann im Körper die Menge an pathologischem PrP<sup>SC</sup> lawinenartig ansteigen. Die durch diesen sich selbst beschleunigenden Prozess gebildeten veränderten Proteine werden kaum abgebaut, sondern bilden im Gehirn Ablagerungen, quasi Zellschutt, die sogenannten Plaques. Experten diskutieren bereits, inwieweit die Infektionen generell sekundäre Erscheinungen sind und ob Hitzeschockproteine (HSPs) zu Prionen "degenerieren" bzw. fehlgefaltet (PFD) werden können.

\* Abkürzungen siehe Legende

**Legende:**

MCS	Multiple Chemical Sensitivities
CFS	Chronic Fatigue Syndrome
SBS	Sick Building Syndrome
ADD	Attention Deficit Disorder
ADHD	Attention Deficit Hyperactivity Disorder
µm	Mikrometer
PFD	Protein Folding Disease
BSE	Bovine Spongiform Encephalopathy

**Literatur**

- AXELRAD J. (1998) An autoimmune response causes transmissible spongiform encephalopathies, *MED. HYPOTHESES*: 50(3) 259-264.
- BIGELOW D.C., EISEN M.D., YEN D.M., SAULL S.C. (1998) Otolaryngological manifestations of Creutzfeldt-Jakob disease. *Arch. ORL Med. Neck S.* 124(6):707-710.
- CORWIN A. (1987) „A Chemist Looks at Health and Disease“, *Proceedings of the Society for Clinical Ecology*, 12th Advanced Seminar, Key Biscayne, FL. *Organohalogen Compounds Vol. 7 (2)*: 407ff:129-142.
- DAVIES R.J. (1997) S. Bartholomew Hospital, London, England, personal communication.
- FRISCHER T. (1996) Persönliche Mitteilungen.
- GORDON I. et al (BSE-Inquiry) (1998) *Neuroreport* 9, in press.
- HASCHKE N., STUDNICKA M., HORAK F., VEITER A., KUEHR J., GARTNER C., URBANECK R., FRISCHER T. (1997) Persistent lung function decrements following three month summer-time ozone exposure in young children. *Pediatr. Pulmonol.*, im Druck.
- AAS H.S. (1997) Neuroimmunomodulation via limbic Structures. *Progress Neurobiology* (51) 195-222.
- ISAACSON R.L., JENSEN K.F. (1992) *The vulnerable Brain and environmental Risks Vol. 1*, Plenum Press, New York.
- JACOBI H., LEIER G., WITTE I. (1996) Correlation of the lipophilicity of xenobiotics with their synergistic effects on the DANN-synthesis in human fibroblasts. *Chemosphere* 32, 1251-1259.
- JAMAL G. (1998) personal communication. LONDON Feb. 98, Parliamentary Briefing UKOPRP.
- JAUMANN M.P., ECKRICH W., SCHWINGER G. (1991) Early detection of neurotoxic effects of organo-halogen compounds by auditory evoked potentials (AEP). *Organohalogen Compounds VOL. 7 (2)*, 406-409.
- KATZMANN R. (1981) Blood-Brain-CSF barriers. In *Basic Neurochemistry* 3rd ed G. Siegel et al. (Boston: Little Brown and Comp.).
- KIRKPATRICK C.J., BITTINGER F., KLEIN C.L., HAUPTMANN S., KLOSTERHALFEN B. (1996) The role of the microcirculation in multiple organ dysfunction syndrome (MODS): a review and perspective. *Virchows-Arch.* 427 (5):461-76.
- KORANSKY W., PORTIG J., VOHLAND H.-W. (1989) Einige Beispiele der Biokinetik und des Metabolismus persistierender halogenorganischer Verbindungen. *VDI-Berichte Nr. 745*: 749-761.

- 16 LABOUVIE S., MÜLLER K.E., FINGER M. (1997) Szintigraphie der dopaminergen D2-Rezeptoren bei Belastung durch Xenobiotika. *Ökologisches Ärzteblatt* 1/97, Vol. 10:28-31.
- 17 MEGGS W.J. (1993) Neurogenic inflammation and sensitivity to environmental chemicals. *Env. Health Persp.* 101:234-8.
- 18 MENSING T. (1997) Lubricants cause airway hyperresponsiveness after exposure to cooling lubricants in a rabbit model. 6th International Symposium Inhalation Toxicology, Hannover.
- 19 MÜLLER K.E., LABOUVIE S., FINGER M. (1997) Szintigraphie der dopaminergen D2-Rezeptoren bei Belastung durch Xenobiotika. *Ökologisches Ärzteblatt* 1/97, Vol. 10:28-31.
- 20 NESSEL C.S., AMORUSO M.A., UMBREIT T.H., GALLO M.A. (1990) Hepatic aryl hydrocarbon hydroxylase and cytochrome P450 induction following the transpulmonary absorption of TCDD from intratracheally instilled particles. *Fund. Appl. Toxicol.* 15:500-509.
- 21 NRC (1986) National Research Council: Drinking Water and Health. Nat. Acad. Press (Washington D.C.).
- 22 OBERDÖRSTER G. (1997) Ultrafine Particles: Inducers of acute lung injury? 6th International Symposium Inhalation Toxicology, Hannover.
- 23 OLDENDORF W. (1987) The Blood-Brain-Barrier. In *Encyclopedia of Neuroscience* Vol. 1 (George Adelman ed.: Boston: Birkhauser).
- 24 PRUSINER (1998) BSE-Hearing, London (England), Internet-statement.
- 25 RUEFF F., SCHÖPF P., HUBER R., LANG S., KOPFHAMMER W., PRZYBILLA B. (1999) Naturlatexallergie – Die verdrängte Berufskrankheit, *Dt. Ärztebl.* 1999; 96: A-1204-1207.
- 26 STRONG J.P., MALCOLM G.T., McMAHAN C.A., TRACY R.E. (1999). Prevalence and Extent of Atherosclerosis in Adolescents and Young Adults, *JAMA* 281: 727-735.
- 27 TRASHER J. et al (1987) Evidence for Formaldehyde Antibodies and Altered Cellular Immunity in Subjects Exposed to Formaldehyde in Mobile Homes. *Archives of Environmental Health* 42(6):347-350.
- 28 URNOWITZ, H. (1998) Report: Secret To Gulf War Illness Must Lie In Genes, *Univ. South Calif., USA.*
- 29 WALSH T., EMERICH D. (1988) „The Hippocampus as a Common Target of Neurotoxic Agents“, 49:137-140.
- 30 WHATLEY S.A. (1998) Statement to the BSE Inquiry, LONDON 31/03/98. Deptm Neurosciences and Psychiatry, London.
- 31 WICK (1997). Beginnt die Atherosklerose mit einer Autoimmun-Reaktion? *Ärzte Zeitung* 16.9.1997.
- 32 WITTE I., JACOBI H., JUHL-STRAUSS U. (1995) Correlation of synergistic cytotoxic effects of environmental chemicals in human fibroblasts. *Chemosphere* 31, 4041-4049.

# BARBARA-GESPRÄCHE

## Payerbach 1998

Stäube und Fremdstoffe als Verursacher von Nerven- und  
Immunsystemschiidigungen

Neuro-/Immunotoxizitit von Xenobiotika

Michael P. JAUMANN



Payerbach,  
18. September 1998

\*Als Manuskript eingelangt Juli 2000

*Anschrift des Verfassers:*

*Dr. med. Michael P. JAUMANN*

*HNO Beleg-Abteilung*

*Klinik am Eichert*

*D - 73035 Göppingen*

# Stäube und Fremdstoffe als Verursacher von Nerven- und Immunsystems­chädigungen

## Neuro-/Immunotoxizität von Xenobiotika

Michael P. JAUMANN

### Inhalative Belastungen

Untersuchungen haben belegt, daß über 90 % der in der Luft vorhandenen Stäube bzw. Partikel kleiner als 10 Mikrometer ( $< 10 \mu\text{m}$ ) sind (GRAEDEL, CRUTZEN, 1994). Diese Stäube bzw. Partikel stammen überwiegend aus anthropogenen Verbrennungsprozessen. In den vergangenen 15 Jahren wurden zwar besonders große Fortschritte in der Filtertechnik bzgl. der Filterung von Schwefeldioxid ( $\text{SO}_2$ ) und Grobstäuben gemacht. Leider wurde bzgl. der Abgasreinigung für Partikel kleiner als 10 Mikrometer (PM 10) wenig erreicht. Diese sind nach wie vor in den Rauchgasen vorhanden mit entsprechend hohen, an diesen Partikeln angelagerten Schadstofffrachtern. In einem definierten Luftvolumen sind 87,5 % der Dioxine (PCDD) und Furane (PSDF) an Partikel kleiner als 2 Mikrometer angelagert und damit bestens alveolengängig (USEPA, 1994). So konnte auch gezeigt werden, daß diese alveolengängige Partikel und die anhaftenden Schadstoffe zu 100 % verfügbar sind (NESSEL, 1990). Dies ist verständlich, da die kleinen Partikel, die bis in die Lungenbläschen (Alveolen) vordringen, dort von Makrophagen in den Körper aufgenommen werden. Andererseits sind diese Moleküle so klein, daß sie mühelos die Phospholipidbausteine unserer Zellmembranen passieren und damit direkt in das Blut oder die Lymphe aufgenommen werden können.

Neueste Erkenntnisse über die Pathophysiologie und Wirkungsweise verschiedener Luftschadstoffe (DAVIES, 1997) zeigen, daß es durch diese am respiratorischen Epithel zu einer Herabsetzung der Zilienschlagfrequenz und Steigerung der Permeabilität (OBERDÖRSTER, 1997) kommt. Dadurch gelangen sowohl

Allergene als auch andere Schadstoffe leichter in das darunter liegende Bindegewebe, wo sich Mastzellen und andere proinflammatorische Zellen befinden. Dies und die verstärkte Durchblutung verursachen eine erhöhte Permeabilität der Gefäßwand mit vermehrter interstitieller Flüssigkeit. Hinzu kommt, daß diese Entzündungen sensorische Nervenfasern in der Schleimhaut stimulieren und eine neurogene Entzündung mit nachfolgender Vasodilatation, Ödem, Schleimsekretion und möglicherweise Kontraktionen der glatten Muskulatur (MEGGS, 1994). In diesem Zusammenhang kann eine zusätzliche sehr schnelle Reaktion beobachtet werden: die tight-junctions der Zellen gehen auf und werden zu sogenannten leaky-junctions. Weiterhin zeigte sich, daß unter Schadstoffeinfluß die von Epithelzellen produzierte Zytokine die Konzentration der Adhäsionsmoleküle auf den Endothelzellen steigerten (MENSING, 1997). Über diesen Mechanismus kommt es ebenfalls zu einem vermehrten Einstrom von Entzündungszellen in die Schleimhaut.

### Neurotoxische Substanzen

Neurotoxische Schäden des Organismus und nachfolgende Erkrankungen sind ein bisher wenig erforschtes Problem in der Medizin. Bisher stammt die Kenntnis neurologischer und immunologischer Schäden durch bestimmte Stoffe wie Schwermetalle, halogenierte Kohlenwasserstoffe aus der Kenntnis akuter Erkrankungen oder nach hochdosierten Belastungen/Vergiftungen Einzelner oder überschaubarer Bevölkerungsgruppen.

Untersuchungen über die additiven und synergistischen Kombinationswirkungen von Xeno-

biotika (Pestiziden) in subtoxischen Konzentrationen auf menschliche Fibroblasten (WITTE, 1995) belegten bei vielen Chemikalien nicht nur additive Schädigungen, sondern auch vielfache synergistische Effekte. Und dies bei subtoxischen Konzentrationen! So werden die starken Lipophilitätsunterschiede der kombinierten Substanzen als mögliche Ursache der synergistischen Effekte diskutiert (JACOBI, 1996).

Neben sensiblen und motorischen Störungen gehören die Fehlfunktionen der Sinnesorgane bis hin zum kompletten Ausfall eines Sinnesorgans (z.B. Hörsturz) zu den Frühsymptomen einer neurotoxischen Schädigung. So bedingen Xenobiotika-Belastungen eine Vorschädigung bzw. erhöhte Empfindlichkeit von Sinneszellen (z.B. Innenohr, Netzhaut). Verschärft wird diese Situation durch eine immuntoxische Ödembildung der Endothelien in den Gefäßen mit nachfolgender Verminderung der Durchblutung (KIRKPATRICK, 1996).

Die Permeabilität der Gehirngefäße wird durch die Bluthirnschranke bestimmt und kann manche Substanzen am Übertritt in das Zentralnervensystem (ZNS) hindern (OLDENDORF, 1987). Andererseits können Chemikalien, Metalle und Arzneimittel die Permeabilität der Bluthirnschranke erhöhen (JAUMANN, 1991; KATZMANN, 1981).

Sehr häufig betroffen ist der Hirnstamm mit seiner Ansammlung wichtiger Schaltstellen verschiedenster Nerven und Regelkreise. Eine Ursache hierfür könnte sein, daß im Bereich der *Formatio reticularis* und im Bereich des Hypothalamus (NRC, 1986) keine Bluthirnschranke vorhanden ist. Neueste Untersuchungsergebnisse belegen, daß der Hirnstamm bei Menschen mit entsprechenden Vorbelastrungen oder Expositionen am Arbeitsplatz eine statistisch signifikante Verminderung der dopaminergen D2-Rezeptoren im Corpus striatum aufwies. So bestand eine Korrelation mit der Dauer der Schadstoffexposition und der Schädigung der Dopamin-D2-Rezeptoren an den postsynaptischen Membranen (LABOUVIE, 1997). Hypothese für die Schadstoffwirkungen im ZNS könnte sein, daß die Schadstoffe an den Hirngefäßen zu chronisch-rezidivierenden Vaskulitiden mit immunogenen Entzün-

dungsstadien führen. Schadstoffe wirken auf das Immunsystem und induzieren eine Antikörperbildung, die zu einer Dopamin-Blockade an der postsynaptischen Membrane führt (MÜLLER, 1997). So können Chemikalien mit niedrigem Molekulargewicht native Proteine verändern, als Hapten wirken und eine Autoimmun-Reaktion bewirken (TRASHER, 1987).

Diese anatomischen und pathophysiologischen Besonderheiten könnten Ursache für die erhöhten Konzentrationen an Schwermetallen und Organochlorverbindungen im Hirnstamm bei entsprechend exponierten Versuchstieren sein (KORANSKY, 1989). Eine weitere Besonderheit ist die hohe Konzentration des AH-Rezeptors (aromatic hydrocarbon receptor), der in hohen Konzentrationen im Hirnstamm (Thalamus, Thymus) vorkommt und eine hohe Affinität für Dioxin, PCBs und andere chlororganische Stoffe hat (SILBERGELD, 1994). Dieses Rezeptor-Protein beeinflusst die Aktivität der Arylhydrocarbonhydroxylase (AHH) einerseits und verbindet sich andererseits als Rezeptor-Liganden-Komplex mit Zellkernbestandteilen und beeinflusst hierdurch die Gen-Expression (VOS, 1991). Große physiologische Ähnlichkeiten bestehen zwischen dem Ah-Rezeptor und den Steroid-Rezeptoren (SILBERGELD, 1991). Allerdings ist derzeit noch unklar, ob der Ah-Rezeptor der Familie der steroidal/thyreoidalen und retinalen Rezeptoren zugerechnet werden kann (EVANS, 1988; BEATO, 1989).

Neben der oralen Aufnahme von Fremdstoffen (Ingestion) wurde der inhalative Pfad über die Schleimhaut von Nase, Rachen und Bronchialbaum bisher zu wenig beachtet. Inhalierte Moleküle/Substanzen (z.B. Toxine) werden über die weniger als 0,6 µm dünne Luft-Blut-Schranke der Alveolen und/oder die Nasenschleimhaut in Sekunden bzw. Minuten ins Gehirn transportiert (FREY, 1998), insbesondere in die rhinencephalen Strukturen, den Hypothalamus (limbisches System), die temporalen Hirnregionen und den Hirnstamm. Der Hypothalamus und der Hypocampus mit Amygdala sind ein Hauptziel für die Toxine (NAS, 1990; WALSH, 1988) und betrifft damit die wichtigsten Schaltstellen neuronaler Infor-

mationswege, das autonome Nervensystem ebenso wie die hormonelle Steuerung der Hypophyse (CORWIN, 1987; ISAACSON, 1992). Diese pathophysiologischen Gegebenheiten und moderne diagnostische Verfahren inclusive

subtiler elektrophysiologischer Meßmethoden weisen dem HNO-Arzt und Otoneurologen eine wichtige Stellung in der Früherkennung und Diagnostik neurotoxischer Schäden zu (JAUMANN, 1993).

## Literatur

- BEATO M. (1989) Gene regulation by steroid hormones. *Cell* 56:335.
- CORWIN A. (1987) „A Chemist Looks at Health and Disease“, Proceedings of the Society for Clinical Ecology, 12th Advanced Seminar, Key Biscayne, FL. *Organohalogen Compounds* Vol. 7 (2): 407ff:129-142.
- DAVIES R.J. (1997) S. Bartholomew Hospital, London, England, personal communication.
- EVANS R.M. (1988) The steroid and thyroid hormone receptor superfamily. *Science* 240:889.
- GRAEDEL T.E., CRUTZEN P.J. (1994) *Chemie der Atmosphäre; Bedeutung für Klima und Umwelt*, Adakem. Verlag Heidelberg.
- ISAACSON R.L., JENSEN K.F. (1992) *The vulnerable Brain and environmental risks* Vol. 1, Plenum Press, New York.
- JACOBI H., LEIER G., WITTE I. (1996) Correlation of the lipophilicity of xenobiotics with their synergistic effects on the DANN synthesis in human fibroblasts. *Chemosphere* 32, 1251-1259.
- JAUMANN M.P., ECKRICH W., SCHWINGER G. (1991) Early detection of neurotoxic effects of organo-halogen compounds by auditory evoked potentials (AEP). *Organohalogen Compounds* VOL. 7 (2), 406-409.
- JAUMANN M.P. (1993) Neurotoxizität in der Hals-Nasen-Ohrenheilkunde, *Proceed. Workshop Neurotoxizität* (Fulde 23.-24.4.93).
- JAUMANN M.P., MÜLLER K. (1998) Hypersensitivity reactions (olfactory/trigeminal) to perfume and/or chemicals in multiple chemical sensitivities (MCS), *Toxicol. Ind. Health* (submitted).
- KATZMANN R. (1981) Blood-Brain-CFS barriers. In *Basic Neurochemistry* 3rd ed G. Siegel et al. (Boston: Little Brown and Comp.).
- KIRKPATRICK C.J., BITTINGER F., KLEIN C.L., HAUPTMANN S., KLOSTERHALFEN B. (1996) The role of the microcirculation in multiple organ dysfunction syndrome (MODS): a review and perspective. *Virchows-Arch.* 427 (5):461-76.
- KORANSKY W., PORTIG J., VOHLAND H.-W. (1989) Einige Beispiele der Biokinetik und des Metabolismus persistierender hologenorganischer Verbindungen. *VDI-Berichte* Nr. 745: 749-761.
- LABOUVIE S., MÜLLER K. (1997) Diagnostischer Schwellenwert der SPECT-Hirn-Perfusionsszintigraphie und der SPECT-Hirnstamm-Rezeptorszintigraphie beim MCS-Syndrom. *Zentralblatt für Hygiene und Umweltmedizin*, Vol 199 (5), 485.
- MEGGS W.J. (1993) Neurogenic inflammation and sensitivity to environmental chemicals. *Env. Health Persp.* 101:234-8.
- MENSING T. (1997) Lubricants cause airway hyperresponsiveness after exposure to cooling lubricants in a rabbit model. 6th International Symposium Inhalation Toxicology, Hannover.

- MÜLLER K. (1997) Biochemische und immunologische Reaktionsmechanismen auf Formaldehyd in „Politikum Formaldehyd“ Hrsg. A. Vogel.
- MÜLLER K.E., LABOUVIE S., FINGER M. (1997) Szintigraphie der dopaminergen D2-Rezeptoren bei Belastung durch Xenobiotika. *Ökologisches Ärzteblatt* 1/97, Vol. 10:28-31.
- NESSEL C.S., AMORUSO M.A., UMBREIT T.H., GALLO M.A. (1990) Hepatic aryl hydrocarbon hydroxylase and cytochrome P450 induction following the transpulmonary absorption of TCDD from intratracheally instilled particles. *Fund. Appl. Toxicol.* 15:500-509.
- NRC (1986) National Research Council: Drinking Water and Health. Nat. Acad. Press (Washington D.C.).
- OBERDÖRSTER G. (1997) Ultrafine Particles: Inducers of acute lung injury? 6th International Symposium Inhalation Toxicology, Hannover.
- OLDENDORF W. (1987) The Blood-Brain-Barrier. In *Encyclopedia of Neuroscience* Vol. 1 (George Adelman ed.: Boston: Birkhauser).
- REA W. (1997) „Environmentally Triggered Small Vessel Vasculitis“, *Annals of Allergy* 38:245-251.
- ROGAN W. et al (1997) Conference On Environmental Oestrogens, Arlington VA, USA, *New Scientist* S. 5.
- SCHOLZ R. (1992) Biochemische Wirkungsmechanismen von Umwelttoxinen, *Proceed. 1. Kongreß Medizin und Umwelt*, Bern (Schweiz).
- SILBERGELD E.K., GASIEWICZ T.A. (1989) Dioxin and the Ah receptor *Am. J. Indust. Med.* 16:455.
- SILBERGELD E.K. (1991) Dioxin: Receptor-based Approaches to Risk Assessment. *Bandury Report Nr. 35: Biological Bases for Risk Assessment of Dioxin and Related Compounds.*
- SILBERGELD E.K. (1994) Personal communication.
- TRASHER J. et al (1987) Evidence for Formaldehyde Antibodies and Altered Cellular Immunity in Subjects Exposed to Formaldehyde in Mobile Homes. *Archives of Environmental Health* 42(6):347-350.
- US-EPA (1994) Health Assessment Document for 2378-TCDD.
- VOS J.G., VAN LOREN H., SCHUURMAN H.-J. (1991) Immunotoxicity of Dioxin: Immune Function and Host Resistance in Laboratory Animals and Humans. *Bandury Report Nr. 35: Biological Basis for Risk Assessment of Dioxins and Related Compounds.*
- WALSH T., EMERICH D. (1988) „The Hippocampus as a Common Target of Neurotoxic Agents“, 49:137-140.
- WITTE I., JACOBI H., JUHL-STRAUSS U. (1995) Correlation of synergistic cytotoxic effects of environmental chemicals in human fibroblasts. *Chemosphere* 31, 4041-4049.

Barbara-Gespräche Payerbach 1998	Band 5	"Abfallentsorgung aus erdwissenschaftlicher Sicht" „Klima - Entwicklung"	Seite 175 - 186 Abb. 1 - 8	Payerbach 2001
-------------------------------------	--------	---	-------------------------------	-------------------

# BARBARA-GESPRÄCHE

## Payerbach 1998

Maßnahmen zur Reduktion der Abfallmengen

S. GRUBER



**POSTERPRÄSENTATION**

Payerbach,  
18 September 1998

**INHALT**

1	Einleitung	177
2	Maßnahmenebenen zur Abfallminimierung	178
3	Primäre Massnahmen zur Abfallminimierung	180
3.1	Abfallvermeidung	180
3.2	Abfallverringerung	181
4	Sekundäre Massnahmen zur Abfallminimierung	183
4.1	Recycling	183
4.2	Stoffliche Nutzung	183
4.3	Thermische Nutzung	183
5	Tertiäre Massnahmen zur Abfallminimierung	184
5.1	Behandlung der Reststoffe	184
5.2	Verdichtung von Abfall- oder Reststoffen	184
5.3	Ablagerung	184
6	Auswirkungen der getrennten Stoffsammlung und Abfallverwertung auf die Restmüllmengen am Beispiel Stadt München	184

*Anschrift der Verfasser:*

*Dr. Susanne GRUBER*

*Institut f. Technologie und Warenwirtschaftslehre  
Wirtschaftsuniversität Wien*

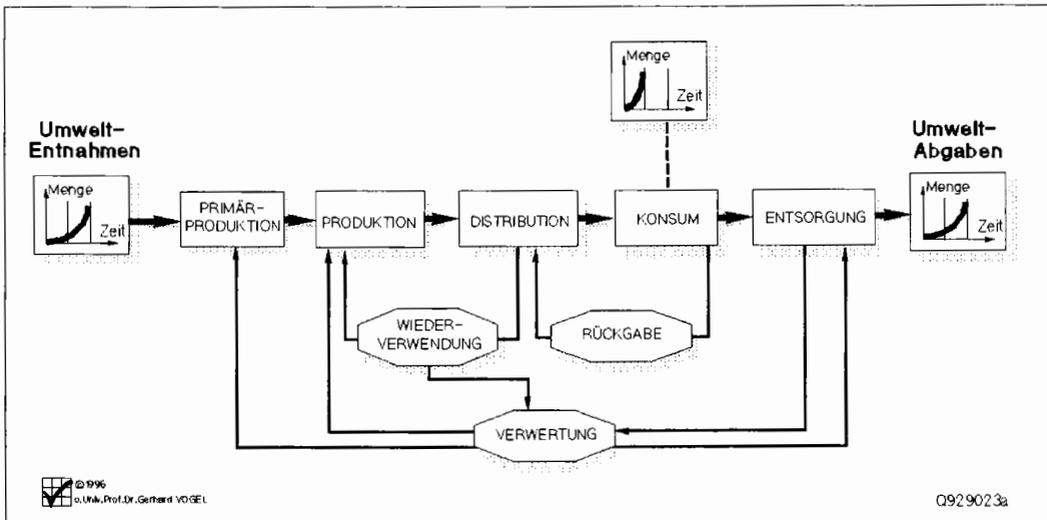
*Augasse 2-6  
A - 1090 Wien*

# Maßnahmen zur Reduktion von Abfallmengen

S. GRUBER

## 1 Einleitung

Das heutige Wirtschaftssystem in den industrialisierten Staaten ist durch ein lineares Durchflußsystem gekennzeichnet. Durch den ständig steigenden Konsum - bedingt durch steigende Kaufkraft - werden immer mehr materielle Güter hergestellt und vertrieben. Dies verursacht eine steigende Nachfrage nach materiellen regenerativen und nicht regenerativen Rohstoffen und Energieträgern, was aber gleichzeitig zu steigenden Emissionen und Abfällen führt.<sup>1</sup> Der exponentiell steigenden Schadstoff- und Abfallmenge steht in der Natur nur eine begrenzte Aufnahmekapazität (für Abfälle in Form von Deponien) gegenüber.



**Abb. 1: Schematische Stoffflüsse im derzeitigen Wirtschaftssystem**

Quelle: VOGEL, G. und LIST, W.: *Abfallwirtschaft, Band 1, Einführung in die Abfallwirtschaft, Skriptenreihe des Instituts für Technologie und Warenwirtschaftslehre, Wien 1994, S. 5*

Die derzeit installierten Systeme zur Wiederverwendung und Verwertung von Produkten reduzieren lediglich die Geschwindigkeit mit der wir auf eine Ver- und Entsorgungskrise zusteuern, werden diese Krise aber nicht verhindern.

Um einen möglichst geringen Ausstoß an Stoffen (Emissionen jeglicher Art; zu deponierende Abfälle) zu erzielen und dadurch die Selbstreinigungskräfte der Natur nicht zu überschreiten, ist es notwendig zu Beginn der Prozeßkette - bei der Rohstoffgewinnung und der Produktkonstruktion - anzusetzen.

<sup>1</sup> VOGEL, G.: Beiträge zu einem Sustainable Development, Wien 1994, S. 2f

Zur Erreichung einer 50 %igen Reduktion der zu deponierenden Abfälle ist ein Mix aus Abfallvermeidung (13 %) und einer Ausweitung der stofflichen Verwertung notwendig. Um jedoch eine nachhaltige 90 %ige Reduktion zu erhalten, ist zusätzlich zur stofflichen eine thermische Verwertung von Abfällen erforderlich.<sup>2</sup>

Dazu wurde im Zuge des OECD-Projektes „Waste Minimisation for the OECD Waste Management Policy Group“ ein Schema erarbeitet, das alle möglichen Maßnahmen zur Abfallminimierung und deren „Rang“ aufzeigt.<sup>3</sup>

## 2 Maßnahmenebenen zur Abfallminimierung

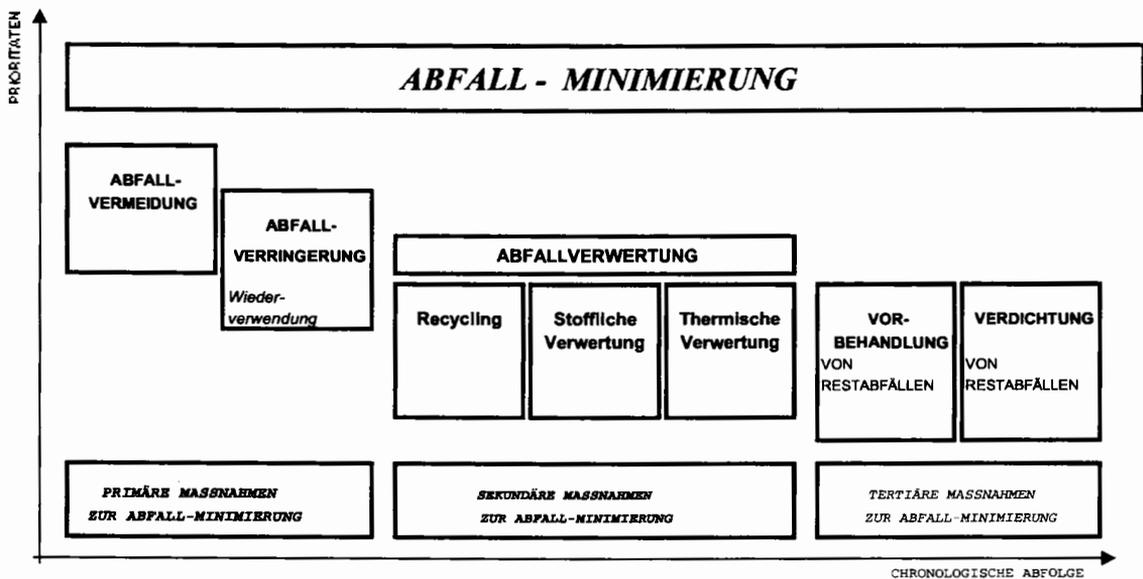


Abb. 2: Maßnahmenebenen zur Abfallminimierung

Die OECD anerkennt allerdings nur die Ebenen von der Abfallvermeidung bis zur Stofflichen Verwertung als Maßnahme zur Abfallminimierung an.<sup>4</sup> In Österreich haben allerdings auch die folgenden Ebenen – die Thermische Verwertung, die Abfallbehandlung und Verdichtung – eine große Bedeutung für die Verfügbarkeit von Deponievolumen.

<sup>2</sup> VOGEL, G.: Beiträge zu einem Sustainable Development, Wien 1994, S. 54f

<sup>3</sup> VOGEL, G. und GRUBER, S.: Final Report on Waste Minimisation for the OECD Waste Management Policy Group, Work Programme on Waste Minimisation for 1996 – 1997, Paris 1997

<sup>4</sup> OECD-Konferenz zum Work Programme on Waste Minimisation, Berlin Oktober 1997

**PRIMÄRE MASSNAHMEN ZUR ABFALL-MINIMIERUNG**

- \* **Abfallvermeidung und Abfallverringerung** ... ist das vollständige oder teilweise Verhindern des Entstehens von Abfällen, insbesondere von toxischen und gefährlichen Substanzen (qualitativ), des Material- oder Energieverbrauches, einschließlich des Transports und des Konsums von Waren (quantitativ)

**SEKUNDÄRE MASSNAHMEN ZUR ABFALL-MINIMIERUNG**

- \* **Recycling** ... ist die Nutzung von Abfallstoffen in der Form, daß die ursprüngliche Produktidentität verloren geht, die Materialstruktur aber erhalten bleibt
- \* **stoffliche Nutzung** ... ist die Nutzung von Abfallstoffen in der Form, daß die Materialstruktur verloren geht
- \* **thermische Nutzung** ... ist die Verwertung der Energieinhalte mit/ohne Aufbereitung oder Vorbehandlung

**TERTIÄRE MASSNAHMEN ZUR ABFALL-MINIMIERUNG**

- \* **Behandlung der Reststoffe** ... ist die Reduktion des Volumens, der Masse oder der Toxizität bzw. des Gefahrenpotentials von Abfallstoffen durch mechanische, physikalische, chemische oder biochemische Prozesse vor deren Deponierung oder endgültigen Lagerung
- \* **Verdichtung von Abfall- oder Reststoffen** ... ist die Reduktion des Volumens oder der Masse von zu deponierenden Abfallstoffen durch mechanische, physikalische, chemische oder biochemische Prozesse
- \* **Ablagerung (endgültig)**

Die Definition der **Abfallminimierung** der OECD faßt dies zusammen:

**ABFALL-MINIMIERUNG IST**

**DIE VERMEIDUNG UND/ODER VERRINGERUNG DER ERZEUGUNG VON ABFÄLLEN,**

**DIE ERHÖHUNG DER QUALITÄT DER ENTSTEHENDEN ABFÄLLE, SOWIE DIE REDUZIERUNG DER GEFÄHRLICHKEIT, UND**

**DIE FÖRDERUNG DER WIEDERVERWENDUNG, DES RECYCLING UND DER VERWERTUNG.**

(Berlin, OECD 1996)<sup>5</sup>

Nur durch Verfahrenskombinationen und die Berücksichtigung bzw. das Durchlaufen eines Gutes durch alle Ebenen sind wir imstande, Umweltentnahmen und einen Schadstoffausstoß zu minimieren und für eine maximale Deponieebensdauer zu sorgen.

<sup>5</sup> „Waste Minimisation is: preventing and / or reducing the generation of waste at source, improving the quality of waste generated, such as reducing the hazard, and encouraging re-use, recycling and recovery.“

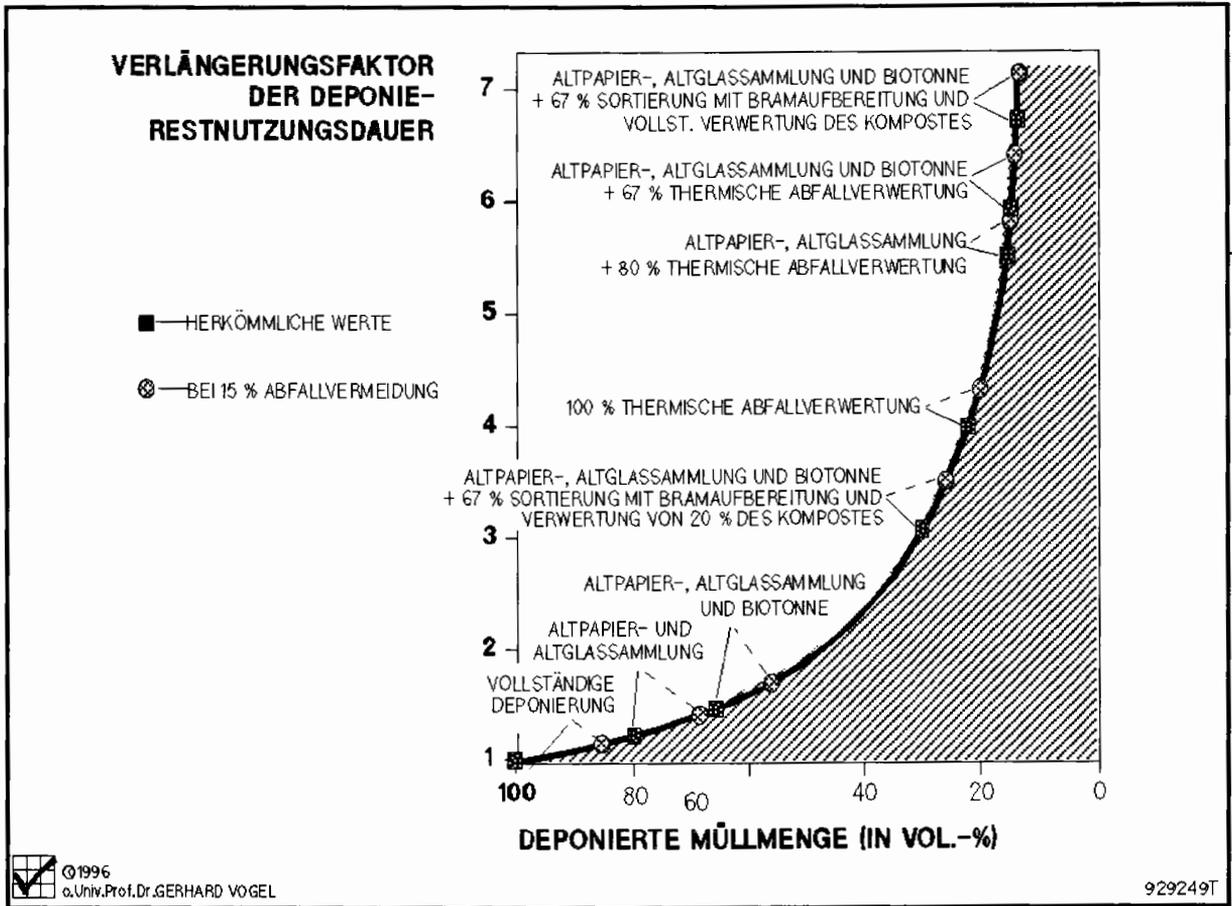


Abb. 3: Beitrag verschiedener Verfahren zur Erhöhung der Deponielebensdauer

Bei Ausfall einer Anlage zur thermischen Nutzung muß der mögliche Verlängerungsfaktor für die Lebensdauer der Deponie vom Faktor 7 auf 3 zurückgesetzt werden. D. h. eine bestehende Deponie mit einer Restlebensdauer von z. B. 10 Jahren, bei einer Deponierung der Abfälle ohne jegliche Maßnahmen, würde dann nicht 70, sondern nur noch 30 Jahre weiter verwendet werden können.

### 3 Primäre Massnahmen zur Abfallminimierung

Die höchste Priorität haben jene Maßnahmen, die ohne stoffliche Nutzung oder Verwertung und ohne thermische Nutzung der Materialien einhergehen. Die eingesetzten Materialien werden einerseits sparsamer eingesetzt bzw. es können überhaupt Materialien vermieden werden – sie gelangen nicht in den Prozeßkreislauf.

#### 3.1 Abfallvermeidung

Durch Verfahrensumstellungen oder überlegtere Konstruktionen können Materialien zur Gänze eingespart werden.

##### Beispiele – quantitative Vermeidung

- durch Verzicht und Vermeidung von unnötigem Materialverbrauch (z. B. durch Vermeidung von unnötigen Produkten, Teilen von Produkten oder Produktfunktionen)
- Vermeidung von Umverpackungen von Tuben

- durch die Nutzung der Windenergie kann der Einsatz von fossilen oder auch nachwachsenden Rohstoffen (Treibstoffen) vermieden werden. Es entfällt die Gewinnung der Rohstoffe und die Verarbeitung der Rohstoffe zu Treibstoffen. Weiters fallen dadurch keine Abgase oder Abfälle (Produktions- oder Verbrennungsrückstände) an.

Beispiele – qualitative Vermeidung

- durch Verzicht und Vermeidung von Materialien mit toxischer Wirkung – insbesondere auf den Menschen und die Umwelt (vollständiges Weglassen von gefährlichen Substanzen oder Ersatz durch umweltverträgliche Substanzen)
- durch Vermeidung von Treibgasen in Sprays durch Einsatz von Pumpsystemen

3.2 Abfallverringering

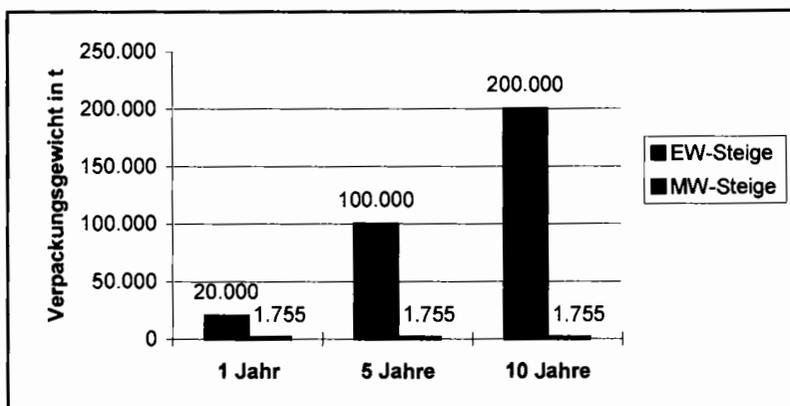
Beispiele – quantitative Verringerung

- durch die Anwendung des Sparsamkeitsprinzips (das bedeutet die gleiche Produktquantität und – funktionen bei einem Minimum an Ressourcen zu erzielen – z. B. Reduktion von Foliendicken, Einführung von Mehrwegsystemen, Miniaturisierung, Clean Technologies, Berücksichtigung von umweltschonendem Vertrieb und Konsum)
- durch die Auswahl von geeigneten Konstruktionen und Substanzen können Wiederverwendung und Reparatur ermöglicht werden

Mehrwegsystem im Vertrieb - Österreichischer Kistenpool:<sup>6</sup>

Zur Verringerung von Müll aus Einweggebinden für den Vertrieb von Obst- und Gemüse und zur Verbesserung der Qualität der angelieferten Ware wurde ein Kisten-MW-System eingeführt. Die Mehrwegsteigen werden nur an Mitglieder des Kistenpools abgegeben und dürfen nur gegen Pfand bzw. 1 : 1-Tausch weitergegeben werden.

	EW-Steige	MW-Steige	Reduktion in kg	Reduktion in %
Gewicht d. Einzelverpackung in kg	1	1		
Gesamtgewicht (1 Jahr) in t	20.000	1.755	18.245	91,23
Gesamtgewicht (5 Jahre) in t	100.000	1.755	98.245	98,25
Gesamtgewicht (10 Jahre) in t	200.000	1.755	198.245	99,12



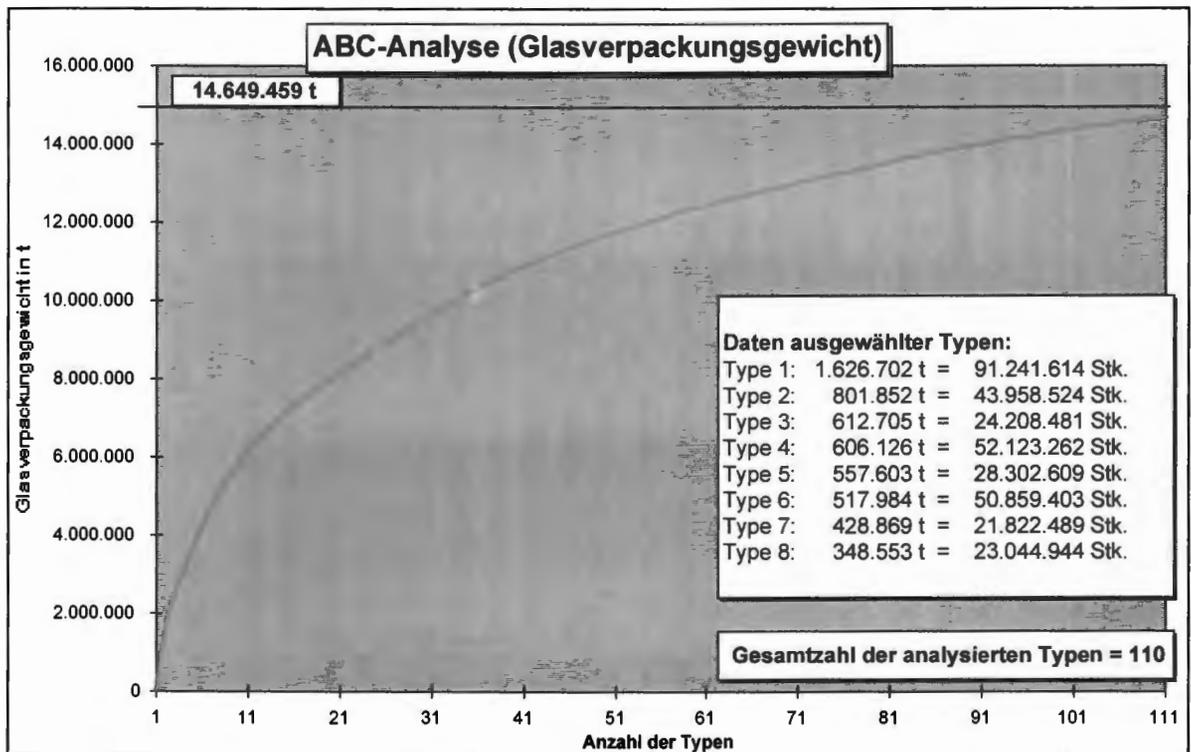
*Abb. 4: Reduktion des Verpackungsgewichtes nach Einführung von MW-Steigen für Obst- und Gemüse*

<sup>6</sup> GRUBER, S.: Strategien und Potentiale zur betrieblichen Abfallverringering in Österreich, Diplomarbeit, in: Schriftenreihe Umweltschutz und Ressourcenökonomie des Instituts für Technologie und Warenwirtschaftslehre der Wirtschaftsuniversität Wien, Wien 1995

Bereits im 1. Jahr nach der Installation des Systems konnte die anfallende Verpackungsmenge zu 91 % reduziert werden. Eine über 99 %ige Reduktion erreicht das System nach 10 Jahren.

- durch geeignete Maßnahmen, die eine Erhöhung der Produktlebensdauer bewirken (einfaches Service, ausgewählte Materialien)
- durch Wiederverwendung mit oder ohne Behandlung oder Aufbereitung

In Dänemark werden EW-Glas-Flaschen aus dem In- und Ausland über eine Computererkennung nach Flaschentypen sortiert, gelagert und bei Bedarf gewaschen und ausgeliefert. Auf diese Weise können ca. 170.000 Glas-Flaschen pro Tag einer Wiederbefüllung zugeführt werden. Selbst in Österreich könnte eine Rekonditionierungsanlage betrieben werden. Es sind über 14 Millionen Tonnen EW-Glas-Verpackungen in Umlauf. Die 10 am stärksten vertretenen Glasverpackungs-Typen werden zu mehr als je 20 Millionen Stück pro Jahr vertrieben. Diese 10 Glasverpackungs-Typen betragen ca. 36 % aller EW-Glasverpackungen des Gesamtmarktes.<sup>7</sup>



**Abb. 5: ABC-Analyse zum Umlauf von EW-Glasverpackungen**

#### Beispiele – qualitative Verringerung

- durch möglichst vollständigen Verzicht von gefährlichen Substanzen in Produkten, Produktions- und Verkaufssystemen, Konsum und Entsorgungssystemen
- durch die möglichst vollständige Elimination von gefährlichen Substanzen bei jeder Form von Abfallbehandlung (z. B. Deinking in Altpapieraufbereitung, Asche- oder Schlackenbehandlung nach der Abfallverbrennung)

<sup>7</sup> unveröffentlichte Studie: Struktur von EW-Glasverpackungen, Wien 1997

## 4 Sekundäre Massnahmen zur Abfallminimierung

Als vorgeschaltete Maßnahme ist die Getrennte Sammlung anzuführen. Sie ermöglicht bzw. erleichtert erheblich die Wiederverwendung (aus der ersten Stufe), das Recycling und die stoffliche und thermische Nutzung, aber auch die nachgeschalteten tertiären Maßnahmen. Dadurch können ebenfalls Ressourcen eingespart werden.

### 4.1 Recycling

- Einweg-Glasflaschen werden industriell eingeschmolzen und zur Erzeugung von neuen Flaschen verwendet
- Gesammelte Zeitungen werden für die Produktion von Toilettenprodukten aus Altpapier verwendet
- Aus gesammelten und anschließend gereinigten, sortenreinen Kunststoffen wird zunächst Mahlgut hergestellt, das zu Granulat und in Folge wieder zu Kunststoffprodukten weiterverarbeitet werden kann. Bei Verwendung zu Lebensmittelverpackungen werden die RC-Produkte zusätzlich mit einer Schichte neuem Kunststoff überzogen.

### 4.2 Stoffliche Nutzung

- aerobe oder anaerobe Behandlung von getrennt gesammelten organischen Haushaltsabfällen (Bio-Abfall) oder von nicht-toxischen oder ungefährlichen Schlämmen für die Bodenverbesserung
- organische Küchenabfälle werden nach Sterilisation für Tierfutter verwendet
- Im Wiener Kompostwerk wird der gesammelte und angelieferte Bio-Abfall zentral in Mieten kompostiert. Nach ca. 9 Monaten steht der fertige Kompost den Haushalten kostenlos zur Verfügung. Die übrige Menge wird in Gärtnereien verwendet.

### 4.3 Thermische Nutzung

#### - mit vorheriger Aufbereitung oder Behandlung

- Gewinnung von Brennmaterial aus Abfällen nach mechanischer Sortierung und Pelletisierung
- Verbrennung gefährlicher Abfälle nach Dekantierung
- Verwertung von Biogas aus anaeroben Prozessen zu Gewinnung von elektrischem Strom

#### - ohne vorheriger Aufbereitung

- Durch die Verbrennung von Hausmüll kann das Volumen des Abfalls erheblich verringert werden. Der Energieinhalt in den Abfallstoffen ist über die Fernwärmeversorgung (o. ä.) zu nutzen.

## **5 Tertiäre Massnahmen zur Abfallminimierung**

### **5.1 Behandlung der Reststoffe**

- Mechanische Sortierung von inerten und reaktiven Materialien
- Verbrennung von Gefährlichen Abfällen um die Toxicität zu reduzieren
- Biochemische Behandlung von ölverunreinigten Böden
- Inertisierung von Aschen und Schlacken aus Verbrennungsanlagen für Gefährliche Abfälle
- Sterilisierung von speziellen Krankenhausabfällen
- Bei der Verbrennung von Hausmüll fallen als Reststoffe Schlacke und Asche aus der Rauchgasreinigung an. Diese Stoffe sind zu deponieren. In Wien wird die Asche mit Zement vermischt und dient zur Erhöhung des Neigungswinkels des Deponiekörpers.

### **5.2 Verdichtung von Abfall- oder Reststoffen**

- Einsatz von Verdichtern auf Hausmülldeponien. Die Verdichtung der zu deponierenden Restabfälle auf der Deponie Rautenweg bewirkt eine Reduzierung des Volumens auf ein Drittel.
- Einsatz von Wasser um biochemische Prozesse auf Hausmülldeponien in Gang zu setzen und um organische Bestandteile zu zersetzen

### **5.3 Ablagerung**

Die Ablagerung stellt den Endpunkt nach derzeitigem Stand der Technik dar und ist somit die Stufe mit der geringsten Wertigkeit.

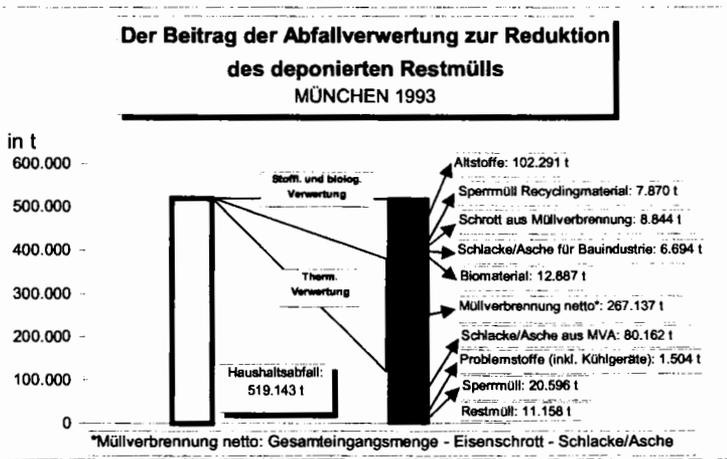
## **6 Auswirkungen der getrennten Stoffsammlung und Abfallverwertung auf die Restmüllmengen am Beispiel Stadt München<sup>8</sup>**

Die getrennte Sammlung von Problemstoffen wäre imstande, die Schadstofffracht der Müllmassen zu reduzieren. Die getrennte Sammlung von Altstoffen, biogenen Stoffen und die thermische Verwertung ist aber imstande, jene Mengen, die deponiert werden müssen, zu minimieren. Letztlich wird eine weitere Reduktion der Abfallmengen auf der Deponie selbst durch die langjährige Lagerung erreicht.

Wir sind gefordert, entsprechende Maßnahmen über den gesamten Produktlebenszyklus zu setzen, um sowohl die Umweltentnahmen - über die Rohstoff- und Energiegewinnung - möglichst gering zu halten, als auch alle Produktionsstufen und die Distribution umweltkonform und ressourcenschonend durchzuführen. Durch entsprechendes Konsumverhalten kann Einfluß auf die Warenproduktion genommen werden.

---

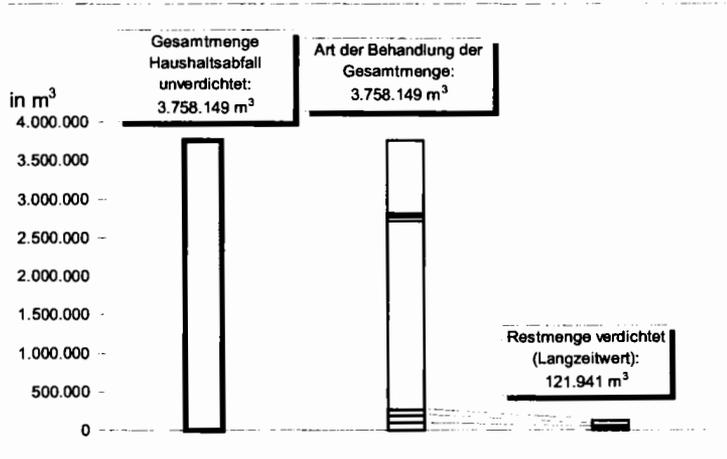
<sup>8</sup> VOGEL, G.: Abfallwirtschaft in europäischen Städten, Case-Study München, Wien 1997, S. 42ff



**Abb. 6: Die Reduktion der Hausabfallmenge durch die getrennte Sammlung von Altstoffen, biogenen Stoffen und der thermischen Verwertung von Müll in München 1993 nach dem Gewicht**



**Abb. 7: Die Reduktion der Hausabfallmenge durch die getrennte Sammlung von Altstoffen, biogenen Stoffen und der thermischen Verwertung von Müll in München 1993 nach dem Volumen**



**Abb. 8: Die Reduktion der Hausabfallmenge durch die Sammlung von Altstoffen, biogenen Stoffen und der thermischen Verwertung von Müll in München 1993 inklusive der langjährigen Verdichtung auf der Deponie - nach dem Volumen**

Letzenendes sind die Umweltabgaben - seien es Abgase, Abwässer oder Abfälle - so aufzubereiten, oder zu behandeln, daß möglichst geringe und möglichst unschädliche Mengen an Stoffen in die Umwelt gelangen, und somit unser Ökosystem weitgehend unbelastet bleibt. Lediglich eine Kombination aus allen 3 Ebenen kann ein Höchstmaß an Ressourceneinsparung und Abfallminimierung erreichen.

# KLIMA - ENTWICKLUNG

Geogener Ablauf und menschlicher Einfluß



*Payerbach,  
17. September 1998*



Barbara-Gespräche Payerbach 1998	Band 5	"Abfallentsorgung aus erdwissenschaftlicher Sicht" "Klima - Entwicklung"	Seite 189 - 216 Fig. 1- 9	Payerbach 2001
-------------------------------------	--------	---	------------------------------	-------------------

# BARBARA-GESPRÄCHE

## Payerbach 1998

The Development of Climate during Earth History  
*Die Klimaentwicklung im Verlauf der Erdgeschichte*

WILLIAM W. HAY



Payerbach,  
18. September 1998

**INHALT**

Abstract / Zusammenfassung	191
Introduction	192
Insolation and Albedo	193
Greenhouse gasses	200
Paleogeography	201
Distribution of land and sea	201
Opening and Closing Oceanic Gateways	202
Plants	205
Summary	206
References	207
Diskussion	213

*Anschrift des Verfassers:*

*Univ.Prof. Dr. William W. HAY  
GeoMar Kiel*

*GEOMAR Forschungszentrum  
für marine Geowissenschaften  
Christian Albrechts Universität Kiel*

*Wischhofstraße 1-3  
D - 24148 Kiel*

# The Development of Climate during Earth History

## *Die Klimaentwicklung im Verlauf der Erdgeschichte*

WILLIAM W. HAY

### **Abstract**

*During its 4.5 billion year history the Earth has had many climatic states. During the Proterozoic and Phanerozoic It has been an extremely arid planet, an extremely wet planet, an ice-free planet and a planet with extensive ice sheets. Its condition today represents a brief episode of a warm climate within a much longer period of cold glacial climates.*

*The major factors influencing climate are insolation, albedo, greenhouse gasses, paleogeography, and vegetation. The energy radiated by the sun increases as it grows older. Cyclic changes in the Earth's orbital parameters*

*affect the amount of radiation received from the sun at different latitudes over the course of the year. During the last climate cycle, the waxing and waning of the northern hemisphere continental ice sheets closely followed the changes in summer insolation at the latitude of the*

*northern hemisphere polar circle. The intensity of insolation in each hemisphere is governed by the precession and ellipticity of the Earth's orbit. At the polar circle a meridional minimum of summer insolation becomes alternately more and less pronounced as the obliquity of the Earth's axis of rotation changes. Feedback processes amplify the insolation signal.*

*The naturally occurring greenhouse gasses (H<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, O<sub>3</sub>) modulate the insolation-driven climate. Without the greenhouse effect the earth's surface would be frozen. In the Precambrian the weaker insolation was balanced by a much higher atmospheric content of greenhouse gasses, mostly the CO<sub>2</sub> that is now trapped in limestone and buried organic carbon. The CO<sub>2</sub> and H<sub>2</sub>O combined to weather silicate rocks in such a way as to act as a thermostat to maintain the earth's surface temperature between the freezing and boiling points of water. The reduction of atmospheric*

*CO<sub>2</sub> concentrations during the Cenozoic is frequently cited as the cause of the general cooling of the planet since the middle Eocene.*

*The changing distribution of land and sea has affected the planet's uptake of energy from the sun and the pattern of its radiation back into space. The changing configurations of the ocean basins have altered the patterns of poleward heat transport.*

*Plants have changed the planetary albedo and modified the greenhouse by consuming CO<sub>2</sub> and returning soil moisture to the atmosphere. However, during the later Cenozoic many of the freely-transpiring C3 plants have been replaced by water-conserving C4 plants, mostly grasses, that have enhanced the global cooling trend and promoted desertification.*

### **Zusammenfassung**

*Im Verlauf der letzten 4,5 Milliarden Jahre hat es auf der Erde verschiedene klimatische Stadien gegeben. Während des Proterozoikums und des Phanerozoikums war die Erde sowohl ein äußerst heißer und trockener, als auch ein warmer und niederschlagsreicher sowie ein kalter und eisbedeckter Planet. Der heutige Zustand stellt eine kurze Episode mit warmem Klima in einer wesentlich längeren Phase mit einem kalten glazialen Klima, diese wiederum innerhalb einer längeren Phase mit warmem Klima dar.*

*Die wichtigsten klimabeeinflussenden Faktoren sind die Sonneneinstrahlung, Albedo, Treibhausgase, die Paläogeographie und die Vegetation. Die von der Sonne ausgestrahlte Energie nimmt mit fortschreitendem Alter zu. Im Verlauf eines Jahres beeinflussen zyklische Veränderungen der orbitalen Erdparameter die Aufnahme der von der Sonne ausgesendeten Strahlung auf verschiedenen Breitengraden. Während des letzten klimatischen Zyklus gab es einen engen Zusammenhang zwischen Ausdehnung und Schrumpfung der kontinentalen*

*Eismassen in der nördlichen Hemisphäre und den Veränderungen des sommerlichen Sonneneinstrahlungsminimums auf dem Breitengrad des Polarkreises. Die Intensität der Einstrahlung in den beiden Hemisphären wird von der Präzession und dem ellipsenförmigen Verlauf der Erdbahn gesteuert. Am Polarkreis wird die Sonneneinstrahlung mit zunehmender Veränderung der Neigung der Rotationsachse der Erde immer geringer. Rückkopplungseffekte verstärken das Signal der Einstrahlung.*

*Die natürlich vorkommenden Treibhausgase ( $H_2O$ ,  $CO_2$ ,  $CH_4$ ,  $O_3$ ) regulieren das von der Sonneneinstrahlung angetriebene Klima. Ohne den Treibhauseffekt wäre die Erdoberfläche gefroren. Im Präkambrium wurde die geringere Sonneneinstrahlung durch einen wesentlich höheren Gehalt der Atmosphäre an Treibhausgasen, vor allem durch den Gehalt an  $CO_2$ , welcher heute an Kalksteine und an organischen Kohlenstoff gebunden vorliegt, kompensiert.  $CO_2$  und  $H_2O$  zusammen tragen zur Verwitterung von silikatischen Gesteinen bei und agieren dadurch als Thermostat, um*

*die Temperaturen an der Erdoberfläche zwischen dem Gefrierpunkt und dem Siedepunkt von Wasser zu halten. Eine Reduzierung von atmosphärischen  $CO_2$ -Konzentrationen während des Känozoikums wird häufig als der Hauptgrund für ein Abkühlen der Erde seit dem mittleren Eozän angeführt.*

*Zudem haben auch die veränderte Verteilung der Landmassen und der Ozeane die Aufnahme und Rückstrahlung von Energie auf der Erde beeinflusst. Wechselnde Strukturen der ozeanischen Becken haben die Muster eines polwärts gerichteten Wärmetransports ebenfalls immer wieder verändert.*

*Pflanzen haben die planetare Albedo geändert. Durch ihre  $CO_2$ -Aufnahme und Rückgabe von Bodenfeuchte in die Atmosphäre haben sie auch zu veränderten Treibhausbedingungen beigetragen. Während des späten Känozoikums wurden jedoch viele  $C_3$ -Pflanzen von wasserspeichernden  $C_4$ -Pflanzen verdrängt. Vor allem Gräser haben den globalen Abkühlungstrend verstärkt und zur Ausbreitung von Wüsten beigetragen.*

## Introduction

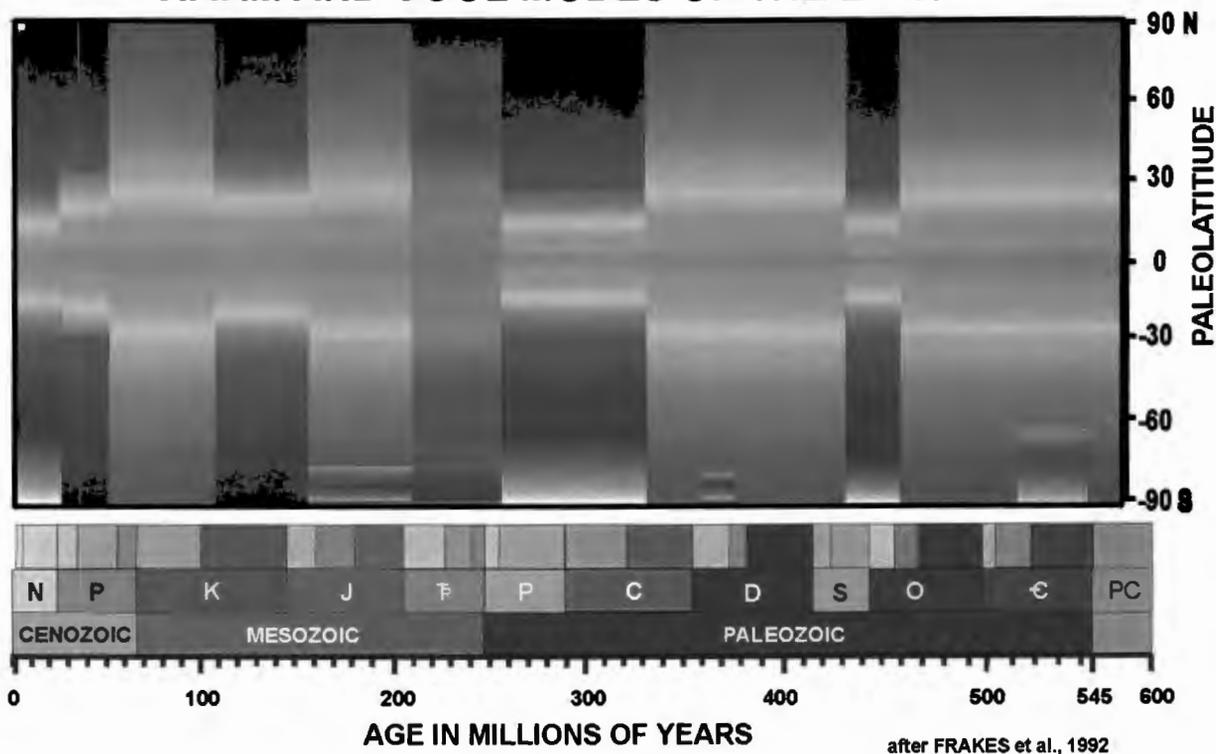
During its 4.5 billion year history the Earth has had many climatic states. During the Proterozoic and Phanerozoic its climate has varied from hot and arid to warm and wet to cold and ice-covered. Its modern condition represents a brief episode of warm climate within a longer period of cold glacial climates that have replaced much longer-lasting conditions of global warmth. The climatic history of the Earth over the last 600 million years is summarized in Fig. 1.

Conditions like those at present have been characteristic of interglacial episodes, but these are short and have persisted for less than 10% of the past million years. Large ice sheets have been the most prominent features of northern hemisphere geography during most of the late Quaternary. They have acted as high frigid plateaus blocking the zonal atmospheric circulation and creating their own atmospheric pressure systems. Centered on 60-65 ° N, they have forced a sharp temperature gradient to the

equator. Sea level has been lower throughout most of the Quaternary, with shelf seas having a much smaller areal extent than at present. The cooler global temperatures during the glacial episodes imply a lesser role for latent heat transport by the atmosphere, and hence a different partitioning of energy transport between the ocean and atmosphere.

However, continental ice sheets are also not typical of the planet's "average" state. Such ice sheets have been present during no more than 30% of the Phanerozoic (CROWELL, 1982). The planet's "normal" state is to have an equator-to-pole temperature gradient less than half that of today, and to be free of large continental ice sheets (FRAKES et al., 1992). FISCHER and ARTHUR (1977) coined the terms "icehouse" and "greenhouse" for these contrasting states of the Earth's climate. FRAKES et al. (1992) discussion of the Phanerozoic history of the Earth in terms of an alternation between these two states forms the basis for Fig. 1.

## WARM AND COOL MODES OF THE EARTH



*Fig. 1: Warm and cool modes of the Earth through the Phanerozoic. Temperatures are indicated semi-quantitatively, with red being very hot, orange being hot, yellow being warm, green being moderate, blue being cold, and white indicating ice-covered. The temperature history is based on the discussions in FRAKES et al. (1992) and other sources.*

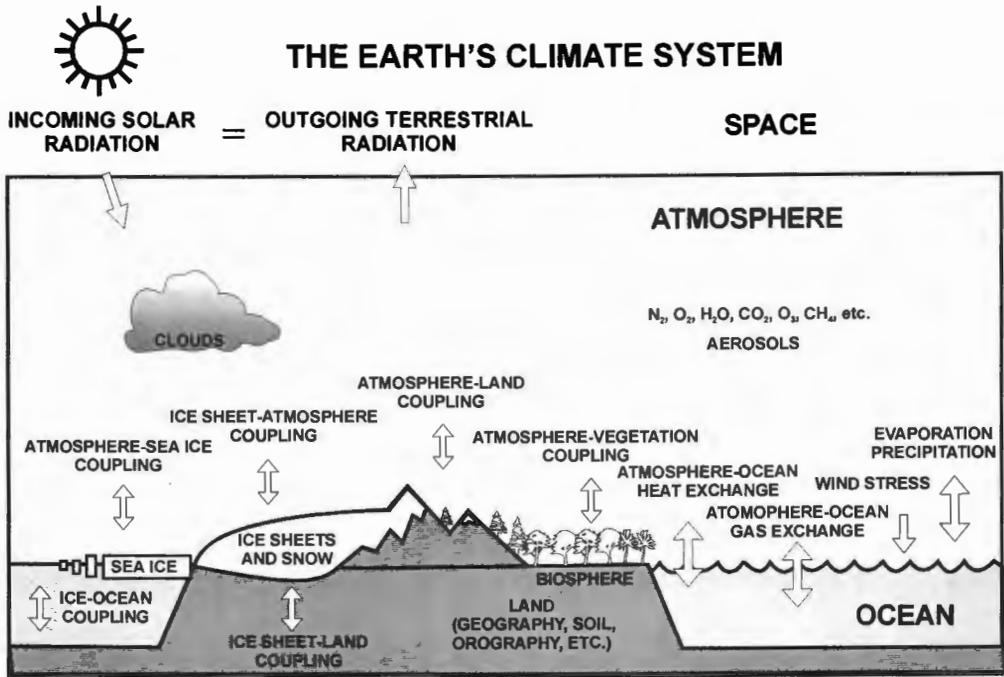
Even more extreme climatic conditions may have existed during the Precambrian. There is growing evidence that the Earth may have been completely covered by snow and ice at several times during the Proterozoic (HOFFMANN et al., 1998). These “Snowball Earth” glaciations ended with brief episodes of an intense greenhouse condition. It has been suggested that these extreme climatic alternations may have set the stage for the development of Metazoa and were a necessary precursor to the Cambrian explosion of life.

The major factors influencing the climate are insolation, greenhouse gasses, paleogeography, and vegetation, as shown in Fig. 2. The following sections treat each of these topics although the climate as a whole is the result of their complex interplay.

### Insolation and Albedo

Insolation and albedo determine how much energy planet Earth receives from the sun. Insolation is the amount of radiation from the sun received at the top of the atmosphere; the albedo is the proportion of the insolation that is reflected back into space.

Studies of solar evolution indicate that energy radiated by the sun increases as it grows older (NEWMAN and ROOD, 1977; ENDAL, 1981; GILLILAND, 1989). At the time of the accretion of the Earth, the radiation from the sun is estimated to have been 25 - 30 % less than it is today. The problem of the “faint young sun” was a major topic that provided the first wedding of paleoclimatology and climate modeling (WETHERALD and MANABE, 1975; SELLERS, 1990). In the 1970's it was thought that although there was evidence for water on the surface of the planet since early in the Precambrian, there was no evidence that



**Fig. 2:** The Earth's climate system, showing the major interactions between components of the system.

the planet had ever been completely frozen. Yet the lower level of radiation of the early sun implied that unless there was some offsetting factor, such as a higher greenhouse gas content in the atmosphere, the Earth should have been completely frozen (OWEN et al., 1979). At that time it was argued that if the Earth were ever to freeze completely over, the high albedo of its surface would make it impossible for it ever to thaw. The "faint young sun paradox" was explored using a simple energy balance argument: radiation received from the sun must equal radiation into space from the Earth (NORTH et al., 1981).

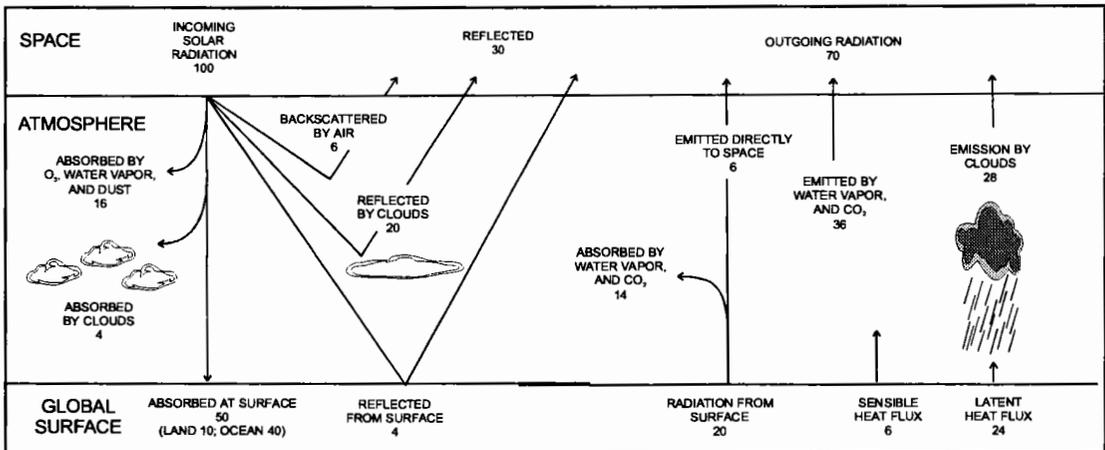
Figure 3 shows how incoming solar radiation is reflected, absorbed, and returned to space. It is evident that the Earth's albedo (0.30) is mostly a function of cloud cover and backscattering from the air. Only about 4 % of the incoming radiation is reflected from the surface. The albedo of the Earth is unique among the planets of the solar system. The rocky planets which essentially lack an atmosphere (Mercury and Mars) are much less reflective, having much lower albedos of 0.06 and 0.16 respectively. The planets with a thicker cloud-filled atmosphere (Venus, Jupiter, Saturn, Uranus, Neptune) are much more reflective,

having albedos of 0.70 or higher. Changes in the cloud cover of the Earth could result in significant differences in its albedo, but virtually nothing is known about the long-term history of clouds and atmospheric backscattering.

The simplest energy balance models, used to estimate the planetary temperature under different conditions, treat the entire Earth as a single point. They were used in early investigations of the "faint young sun" problem. Following the Stefan-Boltzman law for black-body radiation, the energy balance for the Earth can be written as:

$$Q_0 (1 - \alpha_p) \pi r^2 = 4 \pi r^2 \sigma T^4$$

The left-hand side of the equation is the absorbed short-wave solar radiation:  $Q_0$  is the solar constant (presently  $1360 \text{ W m}^{-2}$ ),  $\alpha_p$  is the present planetary albedo (0.30), and  $r$  is the radius of the Earth ( $6.371 \times 10^6 \text{ m}$ ).  $\pi r^2$  is the area of a disc the size of the earth intercepting sun's radiation. The right-hand side of the equation is the radiation emitted by the Earth, where  $4 \pi r^2$  is the area of the surface of the earth,  $\sigma$  is the Stefan-Boltzmann Constant ( $5.67 \times 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$ ), and  $\sigma T^4$  is the outgoing radiation per unit area (Stefan's Law). The area of a disc the size of the



**Fig. 3: The Earth's global energy budget, showing the amount of energy reflected, absorbed and re radiated by components of the Earth system. Numbers represent the percentage of incoming solar radiation.**

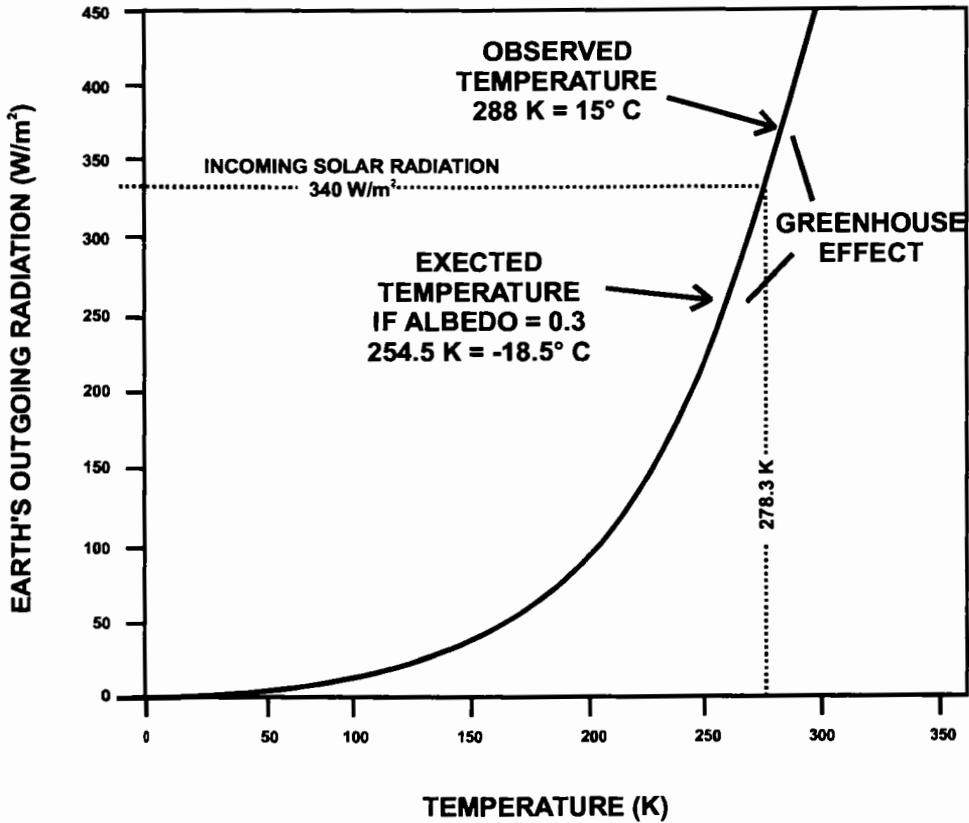
Earth, and of its spherical surface differ by a factor of 4, so that the average energy received by the planet is  $1360 / 4 = 340 \text{ W m}^{-2}$ . The effect of changing solar the solar constant and /or the Earth's albedo is shown in Fig. 4.

This simple calculation of the temperature of the Earth's surface required to re radiate energy in balance with the absorbed solar insolation ( $340 \text{ W m}^{-2} \times (1 - 0.30) = 238 \text{ W m}^{-2}$ ) using the Stefan-Boltzmann Law indicates that the present-day surface temperature should be 254.5 K or  $-18.5^\circ\text{C}$  (PEIXOTO and OORT, 1992). However, the mean surface temperature of the earth today is about  $15^\circ\text{C}$ ; the  $33.5^\circ\text{C}$  difference between the  $18.5^\circ\text{C}$  calculated and the  $+15^\circ\text{C}$  observed is due to the effect of atmospheric greenhouse gases. With incoming radiation 20% less than it is at present but liquid water present on the planet's surface, there must have been a much more effective greenhouse than that we have today. The change in luminosity of the sun is thought to be linear during this phase of its development, so the increase in the solar constant since the beginning of the Phanerozoic is only about 3%.

In contrast to the slow steady increase of the sun's luminosity, cyclic changes in the Earth's orbital parameters affect the amount of radiation received from the sun at different latitudes over the course of the year. During the last

climate cycle, the waxing and waning of the northern hemisphere continental ice sheets closely followed the changes in summer insolation at the latitude of the northern hemisphere polar circle. The intensity of insolation in each hemisphere is governed by the precession and ellipticity of the Earth's orbit. At the polar circle a meridional minimum of summer insolation becomes alternately more and less pronounced as the obliquity of the Earth's axis of rotation changes. Feedback processes amplify the insolation signal.

The annual variation in insolation at different latitudes which result from the tilt of the Earth's axis relative to the plane of the Earth's orbit around the sun produces the four seasons: spring, summer, fall, and winter. The intensity of the seasonal insolation varies on time scales of 104-105 years because of variations in the Earth's orbital parameters induced by the combined gravitational attraction of the moon, sun and other planets (BERGER, 1981). The major orbital variations affecting insolation are shown in Fig. 5. The ellipticity of the Earth's orbit changes the Earth-Sun distance during the course of the year; it varies on a roughly 95,000 year time scale, with a longer cycle of variation of about 400,000 years (Fig. 5a). The precession of the long axis of the elliptical orbit changes the time of the year when the planet is closest to the sun and has a period of about 105,000 years

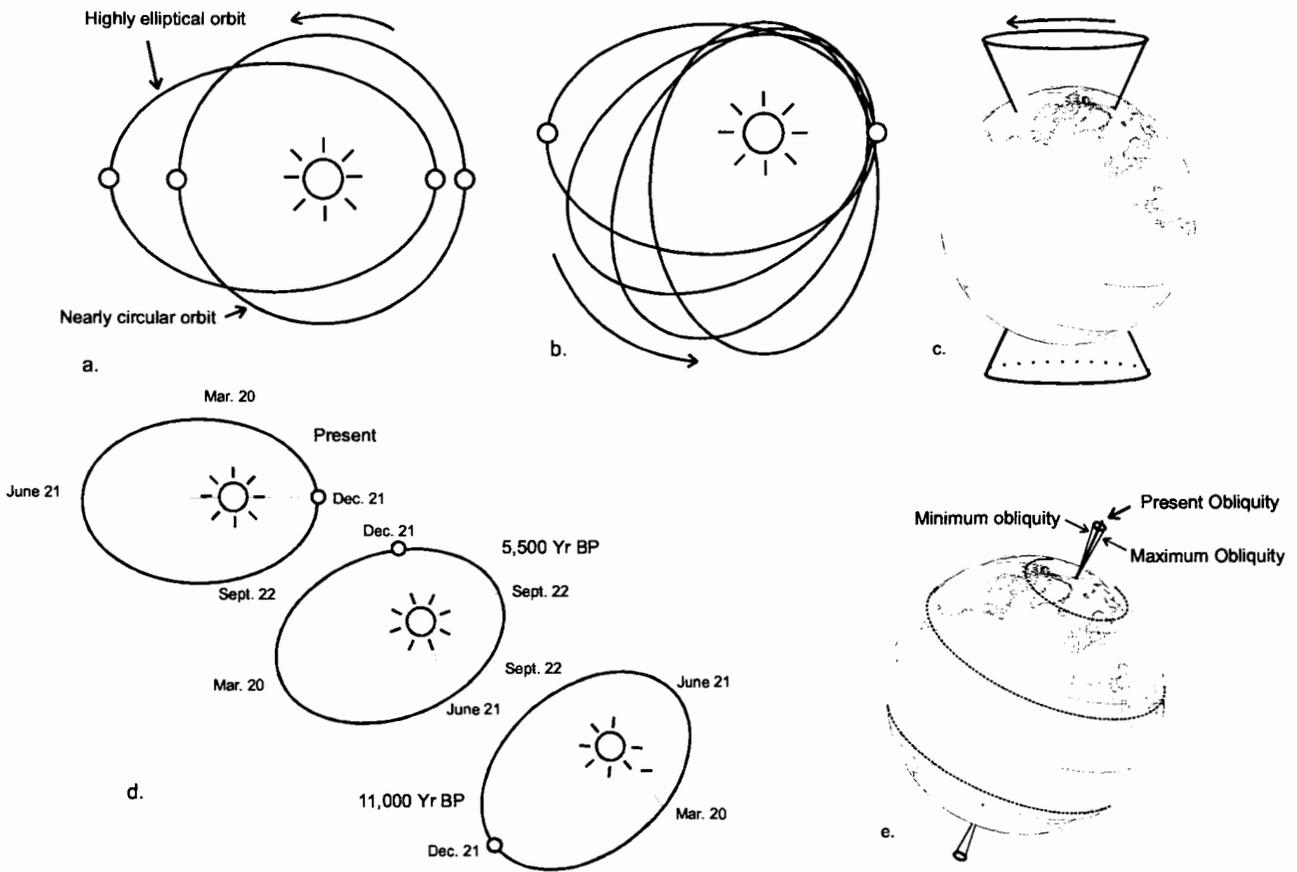


**Fig. 4:** Balance between incoming and outgoing radiation, and the greenhouse effect. For discussion see text.

(Fig. 5b). The precession of the Earth’s axis of rotation also affects the season at which the earth is closest to the sun and has a period of 27,000 years (Fig. 5c). The combined effect of precession of the axis of rotation and the elliptical orbit is to produce an apparent period of 23,000 years. Similarly, the cyclic changes in ellipticity combines with these motions to produce another apparent period of 19,000 years. These three orbital variations combine in such a way that perihelion coincides with seasonal summer in each hemisphere about every 21,700 years. This effect is termed the precession of the equinoxes, and is shown in Fig. 5d. Although these orbital variations have a negligible effect on the total amount of insolation received by the Earth during a year, they result in major redistributions of the energy received at different latitudes during different seasons. The distribution of the energy received at perihelion and aphelion is modulated by the precession of the elliptical orbit and axis of rotation, so that the effects are

concentrated alternately in the northern and southern hemispheres. As a result there is an oscillation of the intensity of seasonality between the northern and southern hemispheres, a displacement of the caloric equator into the hemisphere closest to the sun during its seasonal summer, and shifts of the low latitude climate zones. At present the Earth is at perihelion shortly after the northern hemisphere winter solstice, so the seasonal contrast is minimal in the northern hemisphere and maximal in the southern hemisphere. These effects are shown in Fig. 6 which presents the summer-winter and equinoctial insolation patterns for present.

Another orbital variation is the obliquity (“tilt”) of the Earth’s axis of rotation relative to the ecliptic (plane of the orbit), which varies between 22°2’ and 24°30’ on a 41,000 year time scale (Fig. 5e). The obliquity of the axis of rotation determines the position of the tropics and the polar circles. The tilt of the axis produces a local insolation minimum during



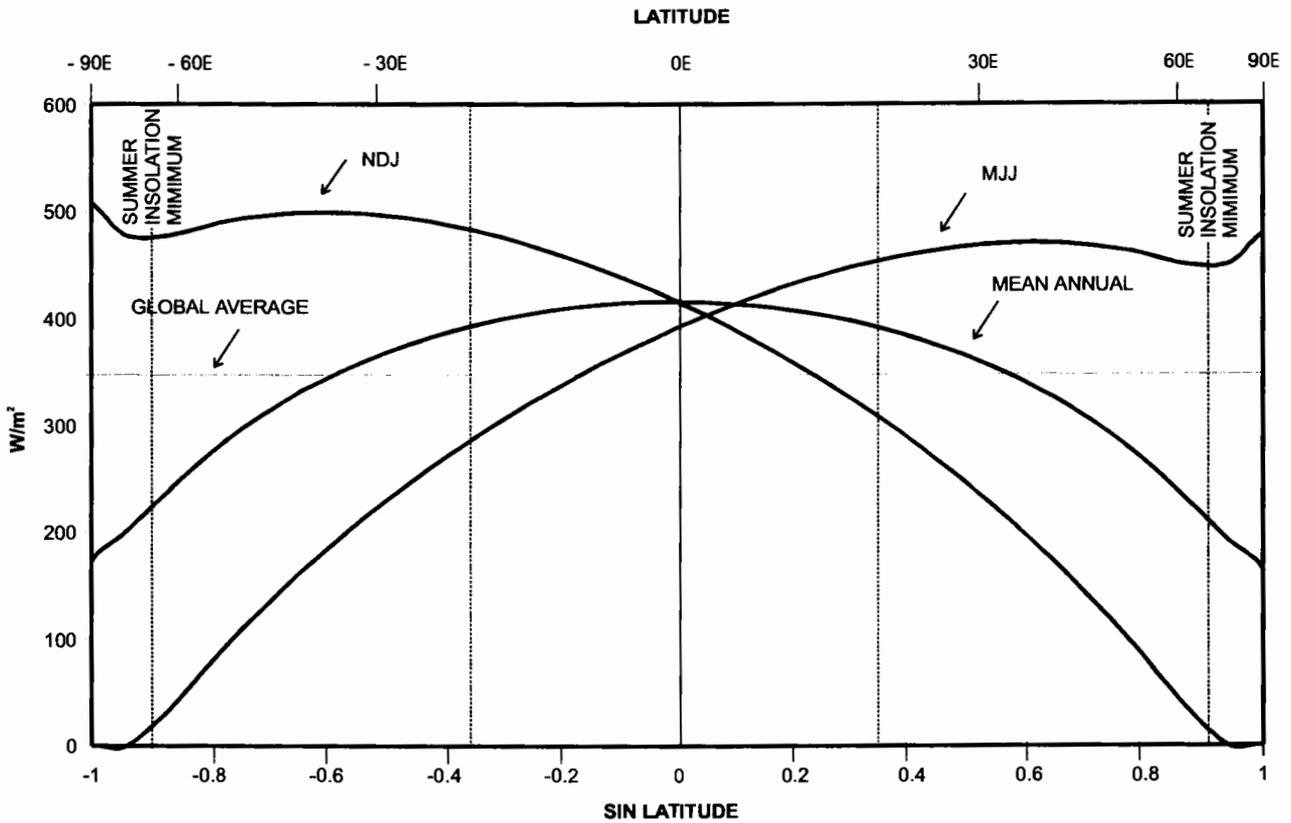
**Fig. 5: Variations in the Earth's orbital and rotational parameters. For discussion see text.**

the summer in each hemisphere, as shown in Fig. 6. Changes in obliquity redistribute the energy received at high and low latitudes, alternately concentrating and dispersing the insolation poleward of the polar circle. This results in alternate intensification and diminishing of the meridional minimum of summer insolation associated with the polar circle, shown in Fig. 6.

The effect is identical in both northern and southern hemispheres. MULLER and MACDONALD (1995) have suggested that another orbital variation may be responsible for the 100-kyr cycle of glaciations and interglacials: the inclination of the Earth's orbit relative to the Zodiac, the average plane of planetary orbits in the solar system. They found that the inclination minima have the same period as glacial maxima, but precede them by 33.3 kyr. There is a concentration of dust in zodiacal plane ("zodiacal cloud"), and as the inclination of the Earth's orbit passes

through it the insolation received by the Earth must be reduced. They suggested that if this is the cause of the 100-kyr glacial cycles, it should be possible to find a 100-kyr cycle in the rate of accumulation of meteoritic dust. Such a periodicity in the accretion of interplanetary dust has subsequently been reported by KORTENKAMP and DERMOTT (1998).

Largely because of the increase in day length during the summer, the polar regions receive more insolation than other parts of the Earth during this season. During the summer there is a secondary insolation maximum at about  $40^\circ$  as a result of both the increase in day length and elevation of the sun. Fig. 6 shows the minimum in summer insolation at the latitude of the polar circle, about  $66.5^\circ\text{N}$  and  $\text{S}$ . This summer insolation minimum is closely associated with the growth and decay of the northern hemisphere ice sheets. Snow which accumulates during the fall winter and spring is most likely to remain where the solar insolation is minimal during summer,



**Fig. 6: Variations in insolation at the top of the atmosphere during summer, winter and equinoctial seasons. Note the summer insolation minima near the polar circles, discussed in text. The x-axis is a linear representation of the sine of the latitude, correctly showing the relative areas in each latitude band.**

and uplands near the polar circle appear to have served as the site of nucleation of the Greenland, Laurentide, and Scandinavian ice sheets

Climate models suggest that the changes in solar insolation resulting from the orbital variations are too small to initiate the glacial-interglacial cycles. There are of two sorts of feedback mechanisms that might amplify the signal, those directly affecting the planetary radiation balance, and those changing the concentrations of greenhouse gasses in the atmosphere. Mechanisms affecting the radiation balance include the ice-albedo feedback, isostatic adjustment of the earth's surface to the ice load, instability of ice sheets grounded below sea level, effect of meltwater on supply of moisture to the ice sheets, changes in the atmospheric dust flux, and changes in vegetation (BROECKER and DENTON, 1989; BROECKER, 1995). The feedback mechanisms changing greenhouse gas concentrations

and their climatic effects are discussed in the next section.

The ice-albedo feedback is most directly related to insolation. The high reflectivity of snow in upland areas reduces the absorbed insolation. This helps to protect the snow and ice from summer melting and results in a strong positive feedback promoting further accumulation of snow (FLINT, 1943; BUDYKO, 1968; SELLERS, 1969; IVES et al., 1975; CROWLEY and NORTH, 1991).

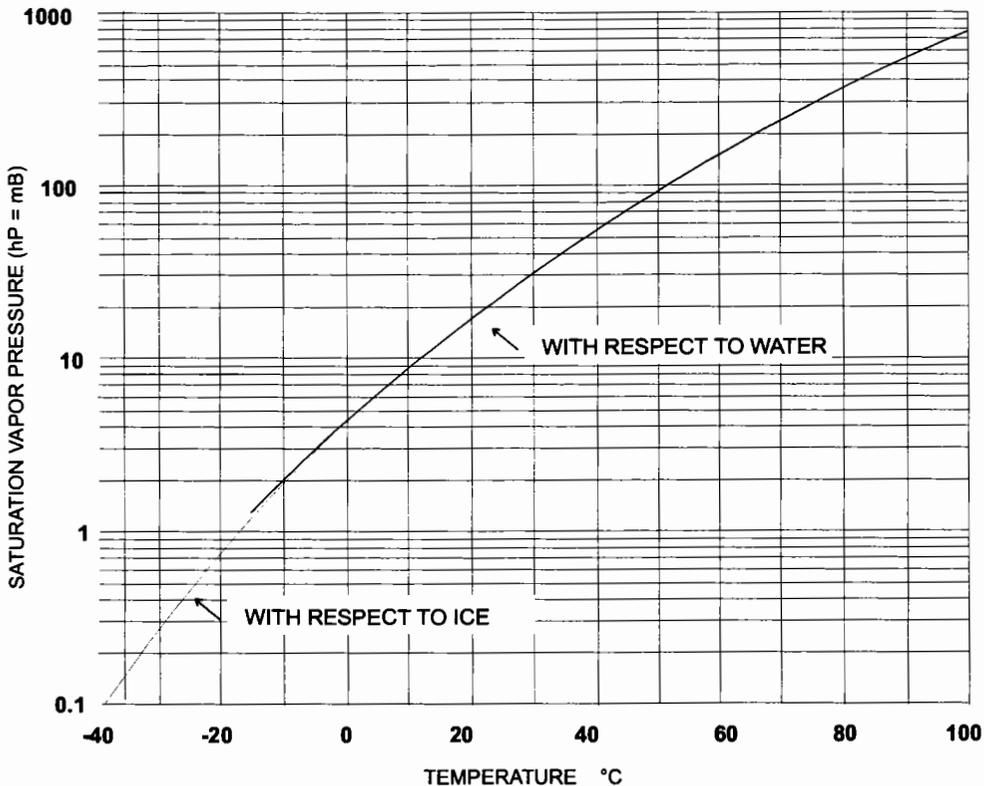
Isostatic adjustment of the Earth's surface to the ice loads has been proposed as the cause of the 100,000 year periodicity of growth and decay of the Quaternary northern hemisphere ice sheets (WEERTMAN, 1976; POLLARD, 1982; HYDE and PELTIER, 1985). As the ice sheet grows, it depresses the land surface by about 1/3 of its own thickness. If the equilibrium snow line, which separates the region of accumulation from that of ablation, were to remain constant for a long period of time, the ice sheet would

reach a steady state. However, the equilibrium snow line moves up and down in response to insolation changes faster than isostatic adjustment can take place. When the equilibrium snow line rises, the area of the ice sheet undergoing melting increases and the area of ice accumulation decreases. Because of the long response time of the isostatic adjustment to the lighter load, the area of ablation and melting continues to increase; this positive feedback mechanism may explain the rapid melting of the northern hemisphere ice sheets at the end of each glacial.

The inherent instability of ice sheets grounded below the level of surrounding fresh or marine waters has been cited as a cause of rapid deglaciation (ANDREWS, 1973). Rising sea level buoys grounded maritime ice sheets, making them ripe for surging. The layers of

ice-rafted detritus deposited by flotillas of icebergs, known as Heinrich Events (HEINRICH, 1988; BROECKER et al., 1990; ANDREWS and TEDESCO, 1992; MACAYEAL, 1993; BOND and LOTTI, 1995), reflect surging of maritime ice sheets.

During the Quaternary, changes in vegetation have affected both the planetary albedo and the concentration of greenhouse gasses in the atmosphere. During interglacial episodes the high albedo (60-95%) ice and snow cover of northern North America, Europe, and Asia was replaced by low albedo (15-20%) evergreen forests and tundra (COHMAP, 1988; OVERPECK et al., 1992), and the extensive sand deserts that existed during glacial times at lower latitudes were replaced by tropical forests and grasslands (Samthein, 1978).



**Fig. 7: Saturation vapor pressure of water at different temperatures. The amount of water that can be evaporated approximately doubles with every 10°C increase in temperature.**

## Greenhouse gasses

Atmospheric greenhouse gasses are another major factor in the climate system. All tri atomic and more complex air molecules ( $H_2O$ ,  $CH_4$ ,  $CO_2$ ,  $O_3$ , man-made chlorofluorocarbons, etc.) capture and re radiate incoming and/or outgoing radiation (WELLS, 1986), as shown in Fig. 3.

Water vapor is the most abundant and effective greenhouse gas, but its content in the atmosphere is strongly dependent on temperature, as shown in Fig. 7. Because of today's sharp meridional temperature gradient, the effectiveness of water vapor as a greenhouse gas is limited to the equatorial and tropical regions. Because water vapor condenses with cooling of rising air, most of the moisture in the equatorial and tropical atmosphere is concentrated in the lower troposphere. Other greenhouse gasses are not temperature dependant, and their effects are particularly prominent in the polar regions, where the water vapor content is low.

Methane is also very effective as a greenhouse gas, but it is relatively short-lived, rapidly becoming oxidized in the atmosphere. Nevertheless, it has been suspected to have played a significant role in the climate of the past. Some rapid global warming events, such as the Late Paleocene Thermal Maximum (KENNETT and STOTT, 1991; ZACHOS et al., 1994), are thought to be the result of massive release of methane as a result of decomposition of gas clathrates on the upper continental slopes (DICKENS et al., 1995, 1997). In addition to its formation from the anaerobic decomposition of organic matter in lacustrine and marine sediments, methane is produced in swamps, bogs, and by ruminant animals, such as cows and perhaps dinosaurs (BAKKER, 1986). Ice core studies have shown that during the Last Glacial Maximum methane levels in the atmosphere were about half of their pre-industrial value (STAUFFER et al., 1988). It is thought that the increase in methane since the last glaciation is most likely due to the increase in area of high-latitude peat bogs and lower latitude coastal swamps, but release from clathrates cannot be excluded. The sudden

episodes of warming that have punctuated the history of the Quaternary (Dansgaard-Oeschger Events) are thought to be the result of catastrophic releases of methane from marine sediments (KENNETT et al., 2000).

Carbon dioxide,  $CO_2$ , is the greenhouse gas suspected of having had the greatest role in influencing the Earth's climate since the Archaean. BUDYKO and RONO (1979), on the basis of the masses of carbonate rocks of different ages preserved on the continents, proposed that increased levels of atmospheric  $CO_2$  were responsible for the warm polar conditions that prevailed during the Late Cretaceous. They also reasoned that the  $CO_2$  content of the atmosphere should parallel volcanic activity, but  $CO_2$  is also introduced by weathering of sedimentary rocks containing organic carbon. The amount of  $CO_2$  in the atmosphere reflects the balance of the supply from volcanoes and weathering of organic carbon in sediments, and the weathering of silicates through the carbonation reaction and burial of organic carbon in young sediments (BERNER, 1999). Changing atmospheric  $CO_2$  concentrations has been accepted as the thermostat mechanism responsible for maintaining the Earth's surface temperature within the range of liquid water (WALKER et al., 1981; KASTING 1989). As temperatures increase, the rate of silicate weathering would increase, doubling with every  $10^\circ C$  rise. As temperatures decline, the rate of silicate weathering through the carbonation would also decrease to cease completely when water freezes (BERNER and BERNER, 1997). It is interesting that the amount of C present as  $CO_2$  in the atmosphere of Venus is almost the same as the amount of C in carbonate rocks and buried organic matter on Earth.

Changes in atmospheric  $CO_2$  are thought to be responsible for long-term climatic trends, such as the global cooling since the Eocene (RAYMO et al, 1988; RAYMO, 1991). Shorter-term variations of atmospheric  $CO_2$  are known to occur during the Quaternary, on both glacial-interglacial and shorter time scales. Ice cores indicate that the variations in temperature are closely paralleled by variations in atmospheric  $CO_2$  from pre-industrial levels of about 280 ppm to about 195 ppm during the Last Glacial

Maximum. It is thought that these changes may reflect the vigor of the global thermohaline circulation system ("The Great Conveyor," BROECKER, 1987, 1991). If the thermohaline circulation system runs rapidly, the deep ocean is well ventilated, but if it is sluggish, CO<sub>2</sub> accumulates in the deep sea, lowering its concentration in the atmosphere.

Climate model simulations with atmospheric CO<sub>2</sub> concentrations higher than present clearly show that the increased CO<sub>2</sub> raises the temperature of the polar regions while having little effect on the tropics and equatorial region (SCHLESINGER, 1989). This is because the warm lower atmosphere of low latitude areas already has a high content of the more effective greenhouse gas, water vapor. Adding CO<sub>2</sub> to the atmosphere most strongly affects the colder high latitude areas where the water vapor content of the air is low. The overall effect is to produce strong polar warming. The warmer polar air can then hold more water vapor, creating a positive feedback enhancing the greenhouse effect. It is generally accepted that the warm polar regions characteristic of most of the Phanerozoic were the result of atmospheric CO<sub>2</sub> concentrations at least several times that of today.

The 30% glacial-interglacial variations in CO<sub>2</sub> content of the atmosphere are minor compared with those between the warm "greenhouse" Earth and its present "icehouse" state, thought to be in the order of 400-700%. BERNER (1994), on the basis of a geochemical model, estimated levels of atmospheric CO<sub>2</sub> in the Early Paleozoic to be 16 - 20 times present. The geochemical model is in general agreement with evidence from paleosols (CERLING, 1991). Atmospheric CO<sub>2</sub> levels in the Precambrian may have been even higher, compensating for the weaker solar radiation.

The Snowball Earth hypothesis (HOFFMAN et al., 1998) postulates that it was a fall in atmospheric CO<sub>2</sub>, perhaps as the result of an episode of unusually high productivity and burial of organic carbon in the ocean, that initiated glacial conditions. The ice-albedo feedback then led to a runaway icehouse, producing ice sheets on land and completely freezing over the ocean. Continued production of

CO<sub>2</sub> from volcanoes then raised its concentration in the atmosphere to 400 times present levels. Such a high concentration would warm global temperatures to the point that the ice cover would melt, but then an extreme greenhouse condition would exist for a brief period until carbonate sedimentation in the ocean reduced the atmospheric CO<sub>2</sub> to lower levels.

## Paleogeography

### Distribution of land and sea

LYELL (1830) proposed that a different latitudinal distribution of land and sea was the cause of the differences in climate recorded by the geologic record. More extensive land areas in the polar regions would result in a cooler, but more land in the equatorial regions a warmer, Earth. Lyell was convinced that the latitudinal distribution of land and sea had been different in the past, and was responsible for the deposition of the Carboniferous coals and for the differences in the molluscan assemblages of Mesozoic and Cenozoic deposits.

KRIECHGAUER (1902) had suggested polar wander as a cause for the different latitudinal distribution of landmasses in the past, but it was WEGENER (1912, 1929) who formally proposed that the horizontal movement of the major continental blocks ("continental drift") had produced the climatic changes observed in the geologic record. Wegener's hypothesis was that the continental blocks had moved beneath climatic zones that were fixed with respect to latitude. We now know that during the Mesozoic and Cenozoic, most of the motions of continents are zonal, parallel to latitude. Only India and Australia have had a large meridional component in their motion.

Sea level also makes major changes in paleogeography. Today only a narrow shelf area along the margins of the continents is flooded, and the continents were almost totally emergent during the low sea-level stand of the last glaciation. At other times during the Phanerozoic, as 30 % or more of the continental block area has been flooded, and contiguous land areas were greatly reduced.

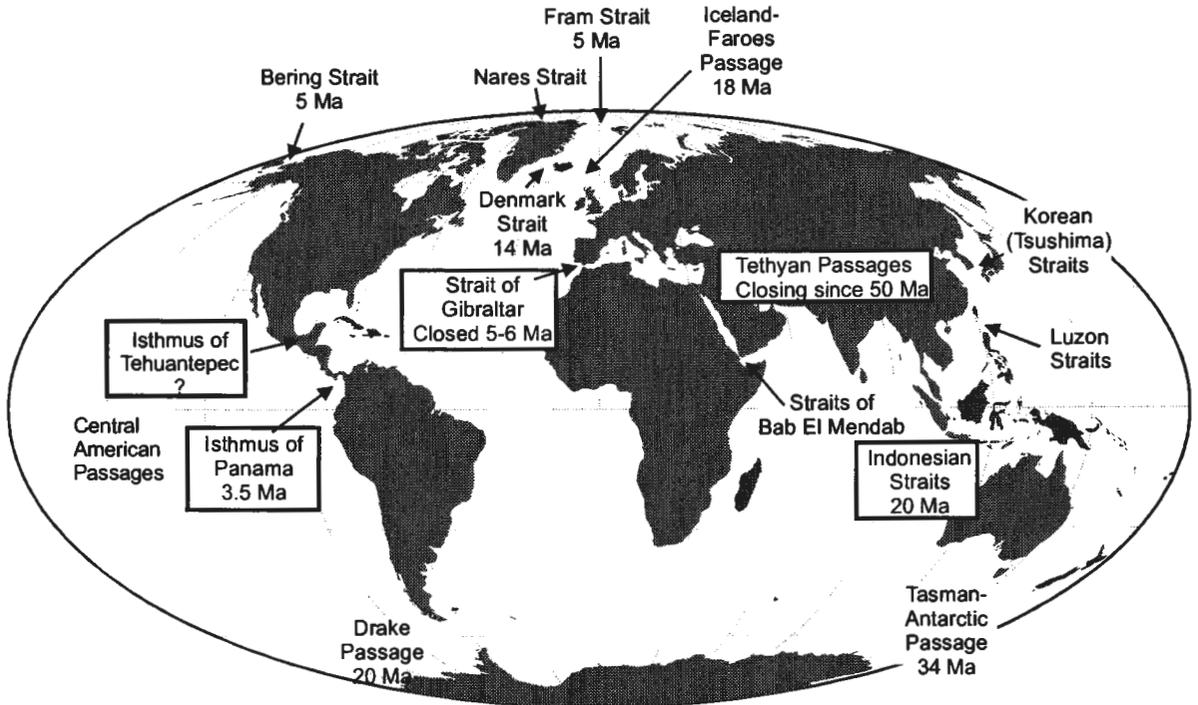
Using global paleogeographic maps based on plate tectonics, BARRON et al. (1980) speculated that changes in land-sea distribution since the Jurassic altered the surface albedo enough to be the underlying cause of climate change. Following CROWELL and FRAKES (1971), BARRON (1981) concluded that the presence or absence of land at the pole was one of the most critical factors affecting the global climate.

To explore the effects of changing paleogeography, BARRON and WASHINGTON (1984) conducted a series of insightful experiments with the NCAR (U.S. National Center for Atmospheric Research) Atmospheric General Circulation Model (AGCM) CCM1. A complete account of these experiments has been discussed in the light of subsequent studies by BARRON and MOORE (1994). Five sensitivity experiments were performed, all using modern mean annual solar insolation. The experiments compared the results of simulations for the present with the Cretaceous paleogeography of BARRON et al. (1981), but East and West Antarctica blocks translated to conform to TARLING (1978), and using the paleotopography shown in the Cenomanian maps of PARRISH and CURTIS (1982, figs. 3, 4). For each of the five sensitivity experiments only one paleogeographic variable was changed. The first experiment used present-day geography and explored the effect of changing the albedo of the surfaces of Antarctica and Greenland from snow-covered to snow free, eliminating the present ice-albedo feedback. The result was an increase of the global mean temperature of  $0^{\circ}\text{C}$  and an increase of Antarctic temperatures of  $10\text{--}15^{\circ}\text{C}$ . The second experiment removed the relief from the present-day continents to explore the effect of topography on the climate. The global mean temperature increased  $1.1^{\circ}\text{C}$ , but the temperature of present lowland areas decreased  $1\text{--}7^{\circ}\text{C}$  while the temperature of the Antarctic increased by  $15^{\circ}\text{C}$ . The third experiment moved the flat continents with present-day shorelines to their Cretaceous positions. This produced an increase of  $3.1^{\circ}\text{C}$  in global mean temperature, with temperatures in the northern polar region increasing by  $21^{\circ}\text{C}$ . The fourth experiment changed the shorelines to reflect the higher sea-level of the

mid-Cretaceous. Although it had been anticipated that the much greater area of low-albedo epicontinental seas would result in significant warming, the global mean temperature decreased by  $0.1^{\circ}\text{C}$ , largely as a result of cloud production over the shallow seas. The fifth experiment added Cretaceous topography, this resulted in a decrease of the global mean temperature of  $1.1^{\circ}\text{C}$ , exactly compensating for the temperature decrease that had resulted from removing topography from the present land areas carried out in the second experiment. Comparing the end result of these simulations using mid-Cretaceous geography directly to a simulation for the present, BARRON and MOORE (1994) found a global average temperature increase of  $4.8\text{ K}$  for the mid-Cretaceous, with tropical temperatures increasing  $2^{\circ}\text{C}$ , the North Pole  $15^{\circ}\text{C}$  and the South Pole  $39^{\circ}\text{C}$  warmer than in the present-day simulation. BARRON and WASHINGTON (1985) concluded that the major factor causing the globally warm climate of the Cretaceous was not paleogeographic, but a higher concentration of atmospheric  $\text{CO}_2$ .

### Opening and Closing Oceanic Gateways

It has long been suspected that the opening and closing of gateways between ocean basins must play a major role in climate change (BERGGREN and HOLLISTER, 1974; BERGER et al., 1981; HAQ, 1984) but descriptions of the effects have remained mostly qualitative and speculative. Interocean gateways that have played an important role in the development of the climate during the Cenozoic are shown in Fig. 8. The closure of the Tethyan passages that promoted zonal low-latitude circulation in the Mesozoic and early Cenozoic, and opening of high-latitude passages around Antarctica has had a profound effect on the global ocean circulation and its ability to transport heat from the equatorial region to higher latitudes. The onset of glaciation of Antarctica was linked to the opening of the passage between the Australian Block (including Tasmania) and East Antarctica (KENNETT, 1977), and expansion of Antarctic Glaciation to the opening of the Drake Passage (WISE et al., 1985). Paleoceanographers have assumed that the opening of the Tasman-

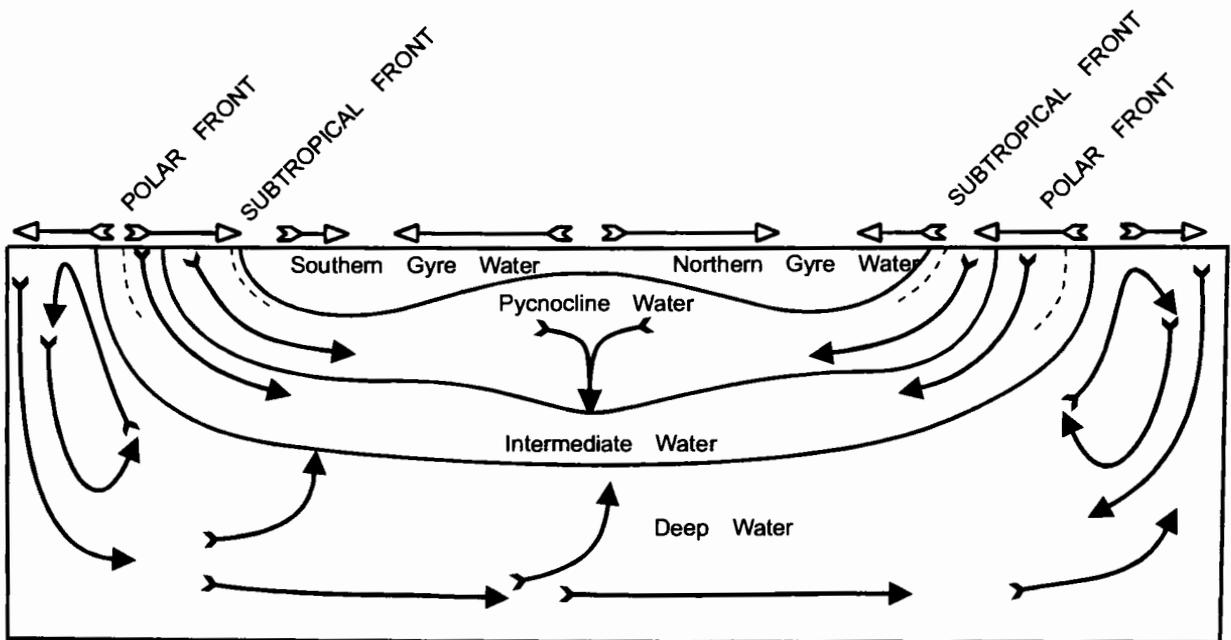


**Fig. 8:** Major interoceanic gateways active during the Cenozoic. Square frame indicates that the gateway has been closing, no frame indicates that it has been opening. Ages indicated are approximate time of complete closure or opening.

Antarctic Passage (Fig. 8) and the Drake Passage (Fig. 8) led to isolation of the Antarctic continent, and resulted in a sharp meridional thermal gradient that allowed glaciation of the Antarctic continent. HAUG and TIEDEMANN (1998) have shown that the closure of the low latitude connection of the Atlantic and Pacific across Panama is the critical event in inducing the northern hemisphere glaciation.

Globally, the ocean and atmosphere are thought to carry roughly equal amounts of energy poleward, but their relative importance varies with latitude. The ocean dominates the system by a factor of two at low latitudes, and the atmosphere dominates by a similar amount at high latitudes. ROOTH (1982) noted that the Subtropical Convergences at about 45° N and S act as barriers to poleward heat transport by the ocean. Only where deep water forms at high latitudes are warm subtropical waters drawn poleward to higher latitudes to replace the sinking waters. At present about 80% of the ocean heat transport is carried by surface currents and 20% by the thermohaline circulation.

Interoceanic gateways can promote or restrict meridional flow of surface and deep waters. However, the effect of a gateway depends on its width, depth and location. At present the ocean between the Subtropical Fronts that lie at about 45° N and S is stratified, whereas poleward of the polar fronts at about 55° N and S the water convects to the ocean floor, as shown in Fig. 9. Along and between the Subtropical and Polar Fronts waters sink, forming the thermocline and intermediate water masses that underlie the tropical-subtropical gyres. Intermediate waters can also have their origin in the outflow of negative water-balance (evaporation > precipitation + runoff) marginal seas. In the tropics and subtropics, the surface currents of the anticyclonic gyres are a few tens of meters thick along the eastern margins of the oceans and several hundreds of meters thick along the western margins, so that these currents can be intercepted by relatively shallow gateways. The Kuroshio Current, for example, passes through the Tsushima Straits But is then partially trapped in the Sea of Japan, reducing its capability to transport heat northward. Between the Subtropical Fronts the depths from the base of the surface currents to



**Fig. 9:** Schematic representation of major ocean water masses, showing the sites of their origin on the surface. Arrows with open heads along the surface indicate the meridional motion of the water induced by zonal winds.

about 1000 m are occupied by the main ocean thermocline, intermediate waters lie between 1000 and 2000 m, and deep and bottom waters extend from 2000 m to the ocean floor. Passages with depths less than 2000 m preclude flow of deep and bottom waters. Today the Antillean Arc prevents deep waters from entering the Caribbean Basin, but admits small amounts of Antarctic Intermediate Water. Shallow passages (< 500 m) connecting negative fresh-water balance seas (evaporation > precipitation + runoff) with the ocean, such as the Strait of Gibraltar and Straits of Bab El Mendab serve as point sources for introduction of warm saline intermediate waters into the ocean.

The thermohaline circulation of the ocean is small but important part of the ocean heat transport system, connecting high and low latitudes. Altering its flow would have regional or global climatic effects. Today, the cold saline deep waters that form in the polar regions and the cool, lower salinity intermediate waters that sink along the polar fronts are an important part of the global energy transport system, carrying cold water equatorward whe-

re it returns to the surface through the diffuse upwelling beneath the tropical-subtropical gyres and in the equatorial region. Reversals of the thermohaline system, with warm saline ocean deep waters forming in the tropics and flowing poleward (BRASS et al., 1982), would transport heat poleward into the relatively small polar regions, where it can become incorporated into the high-latitude deep convection. In the Mesozoic and early Cenozoic this may have been a more effective mechanism for warming the polar regions than heat transport by surface currents. However, for this system to operate efficiently there must be deep passages open into the ocean basins of the polar regions. The ability of the ocean heat transport system to warm the polar regions has generally been overestimated. BARRON (1983) calculated that the oceanic heat flux required to produce the warm Arctic temperatures of the Cretaceous and Paleogene would necessitate a water volume flow of about 112 Sverdrups (Sv) crossing the Arctic Circle. This is an enormous flow, compared to about 40 Sv for the Gulf Stream and about 3 Sv for the Norwegian Current today.

## Plants

It is becoming evident that the evolution of land plants has played a major role in the development of climates during the Phanerozoic. Although there may have been plant life on land during the Proterozoic, perhaps in the form of cyanobacterial mats, vascular plants first appeared during the Silurian, and spread to cover much of the Earth's surface during the Devonian and Carboniferous. The vascular plants had an enormous effect on surficial geological processes. Acids secreted by the plants and the symbiotic fungi have increased the weathering rates for many mineral materials, but the effect of plant roots in binding together soil has reduced rates of erosion.

BERNER (1998) has postulated that the rise of land plants has had a major impact on the history of atmospheric oxygen and CO<sub>2</sub>. The Carboniferous was a time of burial of very large masses of organic carbon. Every mole of carbon buried as organic matter results in a mole of molecular oxygen being added to the atmosphere. It is thought that the massive burial of organic carbon during the Carboniferous was possible because organisms capable of decomposing lignin did not develop until the end of the Permian. Thus the woody lignin produced by Carboniferous plants did not rot and decompose, but was buried instead. This allowed a major draw-down of atmospheric CO<sub>2</sub> and a rise in atmospheric oxygen. The lower CO<sub>2</sub> content of the atmosphere is thought to have provided the condition necessary to initiate the Permo-Carboniferous glaciation of Gondwana.

Another possibility for plants to affect the climate system has occurred more recently though the spread of plants utilizing new photosynthetic pathways that alter the hydrologic cycle and change the atmospheric heat transport mechanisms.

Most trees and shrubs utilize the Calvin cycle to convert CO<sub>2</sub> and water vapor into organic matter via photosynthesis, releasing O<sub>2</sub>. This process of consuming CO<sub>2</sub> and H<sub>2</sub>O to produce organic matter and O<sub>2</sub> is termed carboxylation. The Calvin cycle involves an acid, phosphoglyceric acid, that contain three carbon atoms,

hence the plants using this photosynthetic pathway are termed C3 plants. Unfortunately, enzymes involved in the photosynthesis also catalyze oxygenation of other compounds, consuming O<sub>2</sub> and releasing CO<sub>2</sub>. The relative reaction rates of carboxylation to oxygenation depend on the atmospheric ratio of CO<sub>2</sub> to O<sub>2</sub>, the temperature, and the brightness of the light. C3 plants have their maximum efficiency at high levels of CO<sub>2</sub>, low levels of O<sub>2</sub>, temperatures between 15 and 25°C, and medium illumination. Their efficiency decreases with decreasing levels of atmospheric CO<sub>2</sub>, temperatures above 25°C, and in bright light. The decreasing levels of atmospheric CO<sub>2</sub> during the Cenozoic have resulted in decreased efficiency of CO<sub>2</sub> fixation by the C3 pathway. The limiting value for C3 plants, at which the carboxylation and oxygenation reactions are equal and there is no net fixation of CO<sub>2</sub> is probably between 150 and 50 ppm atmospheric CO<sub>2</sub> (CERLING, 1997). C3 plants typically have deep roots, and can tap the moisture in the deeper layers of soil. They play an important role in recycling water over land areas.

Fast-growing plants, such as maize and sugar cane, and many grasses, sedges, and some other plants typical of grasslands, savannas, and semi-arid regions utilize the Hatch-Stack cycle, a photosynthetic pathway which is markedly different from that of the C3 plants. These plants have a distinctive structure (Kranz anatomy), with the vascular tissue surrounded by a dense layer of bundle sheath cells with a high concentration of chloroplasts. Layers of mesophyll surround the bundle sheath cells. Different parts of the photosynthetic process take place in these different parts of the plant. The initial fixation of CO<sub>2</sub> takes place in mesophyll cells, where a 4-carbon acid, oxaloacetic acid, which is then reduced to malic acid, another 4-carbon compound. These acids give the name C4 to plants utilizing this pathway. The malate is then transported to bundle sheath cells, where it enters the chloroplasts and is oxidized to release CO<sub>2</sub>. Then photosynthesis proceeds as in C3 plants. The extra step in the C4 pathway reduces its efficiency, but this loss is more than compensated for by an increased efficiency of carboxylation over oxygenation. The increased efficiency of carboxylation is achieved by enrichment of

the CO<sub>2</sub> concentration in the bundle sheath cells until it is almost an order of magnitude higher than the atmospheric concentration (CERLING, 1997). The spread of C4 plants is regarded as an adaptation to the lowering of atmospheric CO<sub>2</sub> levels during the Cenozoic (EHRLINGER and MONSON, 1993), but they are also capable of much more rapid fixation rates than C3 plants. The most rapidly growing plants, such as maize and sugar cane are C4 plants. Because of their overall greater efficiency in fixing CO<sub>2</sub>, C4 plants lose less water through transpiration per unit C fixed. Their maximum efficiency occurs at temperatures between 30 and 40°C and under bright light. Hence, C4 plants are adapted to warmer, drier, and brighter conditions. They typically have shallow roots and remove moisture only from the upper layers of the soil. Because of their efficient use of water and inability to use water from deeper soil layers, they have an important effect on the hydrologic cycle. They restrict the return of water to the atmosphere and promote drier conditions downwind.

Another group of plants, the Crassulaceae, cacti, euphorbias, and other succulents use a temporal separation of CO<sub>2</sub> uptake and photosynthesis (RICKLEFS, 1997) within the same cells. This modification of the photosynthetic pathway is termed crassulacean acid metabolism (CAM). The CAM plants open their stomata and take up CO<sub>2</sub> at night, when the temperatures are lower. During the hot day the stomata remain closed, conserving water. They are not as efficient at CO<sub>2</sub> fixation as either C3 or other C4 plants, but they can live under inhospitable conditions. CAM plants are especially adapted to semiarid and arid conditions, and include agaves, cacti, and other succulents. Their maximum efficiency occurs at temperatures around 35°C and under bright light. Their roots are usually restricted to shallow layers of the soil. Although they are a very minor component of the global biomass and have very low growth rates, their capability for water retention suggests that they may play a role in creating arid conditions.

DECONTO (1996) and HAY et al. (1997) noted that the atmospheric energy transfer system made much greater use of latent heat

transport before the C4 and CAM plants appeared. DECONTO et al. (1998, 1999) believe that this is the explanation of a vexing problem in modeling a warm Earth. Even though CO<sub>2</sub> warms the polar regions effectively, simulations of the warm Cretaceous and Paleogene Earth were unable to produce an Asian continental interior warm enough in winter to correspond to interpretation of plant data from central Siberia. DeConto et al. found that by eliminating the C4 plants from the interactive vegetation component of the climate model, the winter temperatures in the interior of Asia increased to levels consistent with the plant data. The increase is due to an increased energy transport to the interior of the continent by the latent heat of water vapor. The greater amount of water vapor transported into the interior is the result of greater transpiration by C3 plants. The higher rates of evapotranspiration associated with C3 plants appear to have been the factor responsible for the lesser temperature gradients between the coasts and continental interiors in the past. Although the full history of C4 plants is not known, their spread around 8 Ma (CERLING, 1997) may have played a major role in modifying the earth's climate. It could be the major cause of the "Late Neogene climatic deterioration."

## Summary

The many climatic states the Earth has experienced over its 4.5 billion year history are the result of changes in insolation, albedo, atmospheric greenhouse gas concentrations, paleogeography, and the evolution of vegetation, particularly that on land.

The energy radiated by the sun increases as it grows older. This effect has been compensated by a gradual decrease in atmospheric greenhouse gas concentrations. Cyclic changes in the Earth's orbital parameters affect the amount of radiation received from the sun at different latitudes over the course of the year. During the Quaternary, and probably during other times when the Earth was glaciated, the waxing and waning of continental ice sheets closely followed the changes in summer insolation at the latitude of the polar circle. The seasonal inten-

sity of insolation in each hemisphere is governed by the precession and ellipticity of the Earth's orbit. At the polar circle the meridional minimum of summer insolation becomes alternately more and less pronounced as the obliquity of the Earth's axis of rotation changes. A variety of feedback processes amplify the insolation signals.

The naturally occurring greenhouse gasses ( $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{O}_3$ ) modulate the insolation-driven climate and are probably responsible for the long-term history of climate change. Without the greenhouse effect the earth's surface would be frozen. In the Precambrian the weaker insolation was balanced by a much higher atmospheric content of greenhouse gasses, mostly the  $\text{CO}_2$  that is now trapped in limestone and buried organic carbon. The  $\text{CO}_2$  and  $\text{H}_2\text{O}$  have combined to weather silicate rocks in such a way as to act as a thermostat to maintain the earth's surface temperature between the freezing and boiling points of water. The reduction of atmospheric  $\text{CO}_2$  concentrations during the Cenozoic is frequently cited as the cause of the general cooling of the planet since the middle Eocene.

The changing distribution of land and sea has altered the planetary albedo and affected the planet's uptake of energy from the sun and the pattern of its radiation back into space. The changing configurations of the ocean basins, and particularly interconnections between the oceans through narrow passages or gateways have altered the patterns of poleward ocean heat transport.

Plants have changed the planetary albedo and modified the greenhouse by consuming  $\text{CO}_2$  and returning soil moisture to the atmosphere.

However, during the later Cenozoic many of the freely-transpiring C3 plants have been replaced by water-conserving C4 plants, mostly grasses, that have enhanced the global cooling trend and promoted desertification. Before the spread of C4 plants, the greater latent heat transport by water vapor into the continental interiors was a major factor in producing the equable climates of warm times.

## References

- ANDREWS J.T. (1973): The Wisconsin Laurentide ice sheet: Dispersal centers, problems of rates of retreat, and climatic implications: Arctic and Alpine Research 5, p.185-199.
- ANDREWS J.T., TEDESCO K. (1992): Detrital carbonate-rich sediments, northwestern Labrador Sea: Implications for ice-sheet dynamics and iceberg rafting (Heinrich) events in the North Atlantic: *Geology* 20, p. 1087-1090.
- BAKKER, R.T. (1986): *The Dinosaur Heresies*: Kensington Publishing, New York, N. Y., 481 pp.
- BARRON, E.J. (1981): Paleogeography as a climatic forcing factor: *Geologische Rundschau* 70, p. 737-747.
- BARRON, E.J. (1983): The oceans and atmosphere during warm geologic periods: in CNC/SCOR (Canadian National Committee/Scientific Committee of Oceanic Research (ed.) Proceedings of the Joint Oceanographic Assembly 1982 — General Symposia. Department of Fisheries and Oceans, Scientific Information and Publications Branch, Ottawa, Ontario, Canada, p. 64-71.
- BARRON, E.J., HARRISON, C.G., SLOAN, J.L., HAY, W.W. (1981): Paleogeography, 180 million years ago to the present: *Eclogae Geologicae Helvetiae* 74, p. 443-470.
- BARRON, E.J., MOORE, G.T. (1994): Climate Model Application in Paleoenvironmental Analysis: in SEPM Short Course No. 33. SEPM (Society for Sedimentary Geology), Tulsa, Oklahoma, 339 pp.

- BARRON, E.J., WASHINGTON, W.M., (1984): The role of geographic variables in explaining paleoclimates: Results from Cretaceous climate model sensitivity studies: *Journal of Geophysical Research* 89, p. 1267-179.
- BARRON, E.J., WASHINGTON, W.M., (1985): Warm Cretaceous climates: High atmospheric CO<sub>2</sub> as a plausible mechanism: in E.T. SUNDQUIST, W.S. BROECKER (eds.) *The Carbon Cycle and Atmospheric CO<sub>2</sub>: Natural Variations Archaean to Present: Geophysical Monograph Series, v. 32. American Geophysical Union, Washington, D.C., p. 546-553.*
- BERGER, A.L., (1981): The astronomical theory of paleoclimates: in A.L. BERGER (ed.) *Climatic Variations and Variability: Facts and Theories. D. Riedel, Dordrecht, The Netherlands, p. 501-525.*
- BERGER, W.H., VINCENT, E., THIERSTEIN, H., (1981): The deep-sea record: Major steps in Cenozoic ocean evolution: in J.E. WARME, R.E. DOUGLAS, E.L. WINTERER (eds.) *The Deep Sea Drilling Project: A Decade of Progress: Special Publication No. 32. Society of Economic Paleontologists and Mineralogists, Tulsa, OK, p. 489-504.*
- BERGGREN, W.A., HOLLISTER, C.D., (1974): Paleogeography, paleobiogeography, and the history of circulation of the Atlantic Ocean: in W.W. HAY (ed.) *Studies in Paleo-Oceanography, Special Publication 20. Society of Economic Paleontologists and Mineralogists, Tulsa, OK, p. 126-186.*
- BERNER, R.A., (1994): Geocarb II: A revised model of atmospheric CO<sub>2</sub> over Phanerozoic time: *American Journal of Science* 294, p. 56-91.
- BERNER, R.A., (1998): The carbon cycle and CO<sub>2</sub> over Phanerozoic time: the role of land plants: *Philosophical Transactions of the Royal Society, London, B, 353, p. 75-82.*
- BERNER, R.A., (1999): A new look at the long-term carbon cycle: *GSA Today*, 9/11, p. 1-6.
- BERNER, R.A., BERNER, E.K., (1997): Silicate weathering and climate: in W.F. RUDDIMAN (ed.) *Tectonic Uplift and Climate Change. Plenum Press, New York, NY, 313-327 pp.*
- BOND G., LOTTI, R., (1995): Iceberg discharges into the North Atlantic on millennial time scales during the last deglaciation: *Science* 267, p.1005-1010.
- BROECKER, W.S., (1987): The biggest chill: *Natural History Magazine* 97, p. 74-82.
- BROECKER, W.S., (1991): The great ocean conveyor: *Oceanography* 4, p. 79-89.
- BROECKER, W.S., (1995): *The Glacial World According to Wally: Revised Edition. Eldigio Press, Palisades, New York, 318 pp.*
- BROECKER, W.S., BOND, G., MCMANUS, J., KLAS, M., CLARK, E., (1990): Origin of the northern North Atlantic's Heinrich events: *Climate Dynamics* 6, p. 265-273.
- BROECKER, W.S., DENTON, G.H., (1989): The role of ocean-atmosphere reorganizations in glacial cycles: *Geochimica et Cosmochimica Acta* 53, p. 2465-2501.
- BUDYKO, M.I., (1968): O proischozhenii lednikov"ich epoch: *Meteorologiya i Gidrologiya* 11, p. 3-12.
- BUDYKO, M.I., RONO, A.B., (1979): Chemical evolution of the atmosphere in the Phanerozoic: *Geochemistry International* 15, p. 1-9.
- CERLING, T.E., (1991): Carbon dioxide in the atmosphere: evidence from Cenozoic and Mesozoic paleosols: *American Journal of Science* 291, p. 377-400.
- CERLING, T.E. (1997): Late Cenozoic vegetation change, atmospheric CO<sub>2</sub>, and tectonics: in W.F. RUDDIMAN (ed.) *Tectonic Uplift and Climate Change. Plenum Press, New York, NY, p. 313-327.*
- COHMAP MEMBERS (1988): Climatic changes of the last 18,000 years: Observations and model simulations: *Science* 241, p. 1043-1052.

- CROWELL, J.C., (1982): Continental glaciation through geologic times: in W.H. BERGER, J.C. CROWELL (eds.) *Climate in Earth History*. National Academy Press, Washington, D.C., p. 77-82.
- CROWELL, J.C., FRAKES, L.A., (1970): Phanerozoic glaciations and the causes of ice ages: *American Journal of Science* 268, p. 193-224.
- CROWLEY, T.J., NORTH, G.R., (1991): *Paleoclimatology*: Oxford University Press, New York, p 339.
- DECONTO, R.M., (1996): Late Cretaceous Climate, Vegetation and Ocean Interactions: An Earth System Approach to Modeling an Extreme Climate. Ph.D. Thesis. University of Colorado, Boulder, Colorado, 236 pp.
- DECONTO, R.M., HAY, W.W., BERGENGREN, J.C., (1998): Modeling Late Cretaceous climate and vegetation: *Zentralblatt für Geologie und Paläontologie*, Teil I, 1996 (11/12), p.1433-1444.
- DECONTO, R.M., HAY, W.W., THOMPSON, S.L., BERGENGREN, J. (1999): Late Cretaceous climate and vegetation interactions: The cold continental interior paradox: in E. BARRERA, C. JOHNSON (eds.) *The Evolution of Cretaceous Ocean/Climate Systems*. Geological Society of America Special Paper 332. Geological Society of America, Boulder, Colorado, p. 391-406
- DECONTO, R.M., THOMPSON, S.L., POLLARD, D., BRADY, E.C., BERGENGREN, J., HAY, W.W., (2000): Late Cretaceous Climate, Vegetation, and Ocean Interactions. In: B.T. HUBER, K.G. MACLEOD, S.L. WING (eds.) *Warm Climates in Earth History*. Columbia University Press, New York, N. Y., p. 275-296.
- DICKENS, G.R., O'NEIL, J.R., REA, D.K., OWEN, R.M., (1995): Dissociation of oceanic methane hydrate as a cause of the carbon isotope excursion at the end of the Paleocene: *Paleoceanography*, 10, p. 965-971.
- DICKENS, G.R., CASTILLO, M.M., WALKER, J.G.C., (1997): A blast of gas in the latest Paleocene: Simulating first-order effects of massive dissociation of oceanic methane hydrate: *Geology*, 25, p. 259-262.
- EHRLINGER, J.R., MONSON, R.K., (1993): Evolutionary and ecological aspects of photosynthetic pathway variation: *Annual Review of Ecology and Systematics* 24, p. 411-439.
- ENDAL, A.S., (1981): Evolutionary variations of solar luminosity: in *Variations of the Solar Constant*: NASA Conference Publication 2191, p. 175-183.
- FISCHER, A.G., ARTHUR, M.A., (1977): Secular variations in the pelagic realm. in H.E. COOK, P. ENOS (eds.) *Deep Water Carbonate Environments*, Society of Economic Paleontologists and Mineralogists Special Publication 25. Society of Economic Paleontologists and Mineralogists, Tulsa, Oklahoma, p. 18-50.
- FLINT, R.F. (1943): Growth of the North American ice sheet during the Wisconsin Age. *Geological Society of America Bulletin* 54, p.325-362.
- FRAKES, L.A., FRANCIS, J.E., SYKTUS, J. (1992): *Climate Modes of the Phanerozoic*: Cambridge University Press, New York, 285 pp.
- GILLILAND, R.L., (1989): Solar evolution: *Global and Planetary Change* 1, p. 35-56.
- HAQ, B., (1984): Paleooceanography: A synoptic overview of 200 million years of ocean history: in B. HAQ, J. MILLIMAN (eds.) *Marine Geology and Oceanography of the Arabian Sea and Coastal Pakistan*. Van Nostrand Reinhold Co., New York, p. 201-231.
- HAUG, G.H., TIEDEMANN, R., (1998): Effects of the formation of the Isthmus of Panama on Atlantic thermohaline circulation: *Nature* 393, p. 673-676.
- HAY, W.W., DECONTO, R.M., WOLD, C.N., (1997): Climate: Is the past the key to the future? *Geologische Rundschau* 86, p. 471-491.

- HEINRICH, H., (1988): Origin and consequences of cyclic ice rafting in the northeast Atlantic Ocean during the past 130,000 years: *Quaternary Research* 29, p. 143-152.
- HENDERSON-SELLERS, A., COGLEY, J.G., (1982): The earth's early hydrosphere: *Nature* 298, p. 832-835.
- HOFFMANN, P.F., KAUFMAN, A.J., HALVERSON, G.P., SCHRAG, D.P., (1998): A Neoproterozoic Snowball Earth: *Science*, 281, p. 1342-1346.
- HYDE, W.T., PELTIER, W.R., (1985): Sensitivity experiments with a model of the ice age cycle: The response to harmonic forcing: *Journal of Atmospheric Science* 42, p. 2170-2188.
- IVES, J.D., ANDREWS, J.T., BARRY, R.G. (1975): Growth and decay of the Laurentide Ice Sheet and comparison with Fennoscandia: *Die Naturwissenschaften* 62, p. 118-125.
- KASTING, J.F., (1989): Long term stability of the earth's climate: *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology (Global and Planetary Change Section)* 75, p. 83-96.
- KENNETT, J.P., (1977): Cenozoic evolution of Antarctic glaciation, the circum-Antarctic current and their impact on global paleoceanography: *Journal of Geophysical Research* 82, p. 3843-3860.
- KENNETT, J.P., CANNARIATO, K.G., HENDY, I.L., BEHL, R.J., (2000): Carbon isotopic evidence for methane hydrate instability during Quaternary interstadials: *Science*, 288, p. 128-133.
- KENNETT, J.P., STOTT, L.D., (1991): Terminal Paleocene deep-sea benthic crisis: Sharp deep-sea warming and paleoceanographic changes in Antarctica: *Nature* 353, p. 244-247.
- KORTENKAMP, S.J., DERMOTT, S.F., (1998): A 100,000-year periodicity in the accretionary rate of interplanetary dust. *Science* 280, p. 874-876.
- KREICHGAUER D. (1902): *Die Aequatorfrage in der Geologie*. Missionsdruckerei in Steyl, Kaldenkirchen/Rheinland.
- Yell, C., (1830): *Principles of Geology, being an attempt to explain the former changes of the earth's surface by reference to causes now in operation*: John Murray, London, 551 pp.
- MACAYEAL, D.R., (1993): Binge/purge oscillations of the Laurentian ice sheet as a cause of the North Atlantic's Heinrich events: *Paleoceanography* 8, p.775-784.
- NEWMAN, M. J., ROOD, R.T., (1977): Implications of solar evolution for the earth's early atmosphere: *Science*, 194, p. 1413-1414.
- MULLER, R.A., MACDONALD, G.J., (1995): Glacial cycles and orbital inclination: *Nature* 377, p. 107-108.
- NORTH, G.R., CALAHAN, R.F., COAKLEY, J.A., (1981): Energy balance climate models: *Reviews of Geophysics and Space Physics*, 19, p. 91-121.
- OVERPECK, J.T., WEBB, R.S., WEBB III, T. (1992): Mapping eastern North American vegetation change of the past 18 ka: No-analogs and the future: *Geology* 20, p. 1071-1074.
- OWEN, T.R., CESS, R.D., RAMANATHAN, V., (1979): Early earth: An enhanced carbon dioxide greenhouse to compensate for reduced solar luminosity: *Nature* 277, p. 640-642.
- Parish, J.T, CURTIS, R.L., (1982): Atmospheric circulation, upwelling and organic-rich rocks in the Mesozoic and Cenozoic Eras: *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 40, p. 31-66.
- PEIXOTO, J.P., OORT, A.H., (1992) *Physics of Climate*: American Institute of Physics, New York, 520 pp.
- POLLARD, D., (1982): A simple ice sheet model yields realistic 100 kyr glacial cycles: *Nature* 296, p. 334-338.
- RAYMO, M.E., (1991): Geochemical evidence supporting T.C. Chamberlin's theory of glaciation: *Geology* 19, p. 344-347.

- RAY MO, M.E., RUDDIMAN, W.F., (1992): Tectonic forcing of late Cenozoic climate: *Nature* 359, p. 117-122.
- RAYMO, M.E., RUDDIMAN, W.F., FROELICH, P.N., (1988): Influence of late Cenozoic mountain building on ocean geochemical cycles: *Geology* 16, p. 649-653.
- RICKLEFS, R.E., (1997): *The Economy of Nature*: W. H. Freeman and Co., San Francisco, California, USA, 678 pp.
- ROOTH, C., (1982): Hydrology and ocean circulation: *Progress in Oceanography* 11, p. 131-149.
- SARNTHEIN, M., (1978): Sand deserts during glacial maximum and climatic optimum: *Nature* 272, p. 43-46.
- SELLERS, W.D., (1990): The genesis of energy balance modeling and the cool sun paradox: *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology (Global and Planetary Change Section)* 82, p. 217-224.
- STAUFFER, B., LOCHBRONNER, E., OESCHGER, H., SCHWANDER, J., (1988): Methane concentration in the glacial atmosphere was only half that of the pre-industrial Holocene: *Nature* 332, p. 812-814.
- TARLING, D.H., (1978): The geological-geophysical framework of ice ages: in J. GRIBBIN (ed.) *Climatic Change*. Cambridge University Press, Cambridge, U.K., p. 3-24.
- WALKER, J.C., HAYS, P.B., KASTING, J.F., (1981): A negative feedback mechanism for the long-term stabilization of the Earth's surface temperature: *Journal of Geophysical Research* 86, p. 9776-9782.
- WEERTMAN, J., (1976): Milankovitch solar radiation variations and ice age sheet sizes: *Nature* 261, p. 17-20.
- WEGENER, A., (1912): Die Entstehung der Kontinente: *Geologische Rundschau* 3, p. 276-292.
- WEGENER, A., (1929): Die Entstehung der Kontinente und Ozeane: Friedrich Vieweg und Sohn, Braunschweig.
- WELLS, N., (1986): *The Atmosphere and Ocean: A Physical Introduction*: Tyler & Francis, London, 347 pp.
- WETHERALD, R.T., MANABE, S., (1975): The effects of changing the solar constant on the climate of a general circulation model: *Journal of Atmospheric Science*, 32, p. 2044-2059.
- WISE, S.W., GOMBOS, A.M., MUZA, J.P., (1985): Cenozoic evolution of polar water masses, southwest Atlantic Ocean: in K.J. HSU, H. WEISSERT (eds.) *South Atlantic Paleooceanography*. Cambridge University Press, Cambridge, p. 283-324.
- ZACHOS, J.C., LOHMANN, K.C., WALKER, J.C.G., WISE, S.W., (1993): Abrupt climate change and transient climates during the Paleogene: A marine perspective: *Journal of Geology* 101, p. 191-213.



## DISKUSSION

## Die Klimaentwicklung im Verlauf der Erdgeschichte

**KALLENBACH:** Sie haben uns mit den Faktoren vertraut gemacht, die für die Klimaentwicklung Bedeutung haben und uns gleichzeitig einen Blick in die Vergangenheit gegeben. Das ist insofern von großer Bedeutung, weil unsere rezente Klimabetrachtung ja nur einen ganz kurzen Zeitraum einnimmt und unsere Aussagemöglichkeiten für die Zukunft sind ja damit auch sehr beschränkt, das heißt der Blick in die Vergangenheit ermöglicht erst einen Blick in die Zukunft.

**KERN:** In der Kreidezeit sollen der  $\text{CO}_2$ -Gehalt und der Sauerstoffgehalt viel höher gewesen sein. Haben sie da aktuelle Daten? In der Literatur werden Sauerstoffgehalte von 27%, ja sogar bis 30% genannt und auch der  $\text{CO}_2$ -Gehalt war ein vielfaches des heutigen. Natürlich hängt das mit dem Klima und dem Pflanzenwuchs zusammen, denn je mehr Photosynthese, desto mehr Sauerstoff wird produziert.

Zur Frage der  $\text{C}_4$ -Pflanzen, ich habe das nicht ganz verstanden, mit der Ausbreitung der  $\text{C}_4$ -Pflanzen kann ich mir nur vorstellen, daß das Miozän gemeint ist; vorher kann es nicht gewesen sein, denn die  $\text{C}_4$ -Pflanzen haben ja Probleme bei ihren  $\text{CO}_2$ -Werten, da sie ja nicht konkurrenzfähig sind. Sie sind ja nur auf gewissen, engen Standorten, z.B. Wüstenstandorten, spezialisiert; sobald über 1%  $\text{CO}_2$  erreicht wird haben sie große Probleme, denn dann gibt es Generalpflanzen (?), die konkurrenzfähiger sind, und in diesem Fall geht es ja darum, daß aus dem  $\text{CO}_2$ -Gehalt kein Konkurrenzvorteil erwächst.

**HAY:** Es gibt tatsächlich Hinweise, daß der  $\text{CO}_2$ -Gehalt in der Kreide höher war. Es gibt gewisse Bodenminerale, die darauf hindeuten und zwar in Wüstengebieten, wo kein organischer Kohlenstoffgehalt im Boden gewesen sein soll, das ist hauptsächlich von CERLING in Utah publiziert worden:

Für Sauerstoff kann man sagen, daß er der heutigen Atmosphäre entspricht, unter der Berück-

sichtigung, wieviel organischer Kohlenstoff begraben wird und wenn man organischen Kohlenstoff nicht wieder abbaut. Sauerstoff wird durch die Photosynthese produziert, d.h., wenn Sauerstoff produziert wird, dann wird auch organischer Kohlenstoff gebildet. Wenn dieser nicht wieder oxidiert wird, dann bleibt mehr Sauerstoff. Was man sagen kann: im Kimmeridge und in der Unterkreide sind riesige Mengen organischen Kohlenstoffes begraben worden, da sollte der Sauerstoffgehalt höher gewesen sein.

**PREISINGER:** Ich hätte zu dem Thema der Klimaschwankungen zwei Anmerkungen. Da sind einmal die MILANKOVIC-Zyklen, die auf den Erdparametern und den chaotischen Einflüssen der anderen Planeten beruhen und auch berechnet werden können, zur Zeit von Herrn LASCAR in Paris bis zurück auf 100 Millionen Jahre. Sind das eigentlich die einzigen Parameter, die den Lichteinfall von der oberen Erdatmosphäre ausmachen, oder gibt es auch noch kosmischen Staub und Variationen des kosmischen Staubes bis hin zu Asteroiden die hier einen Einfluß haben.

**HAY:** Es wurde von Gordon McDONALD u.a. in Californien vor zwei oder drei Jahren behauptet, es wäre noch einen vierten Mechanismus vorhanden. In der mittleren Ebene des Sonnensystems gäbe es eine ganz dünne Staubschicht. Die Erdlaufbahn ist geneigt, aber das ändert sich mit einem 100.000-Jahre Zyklus und sie geht durch diese Mittelebene. Das ist aber alles ziemlich hypothetisch.

**PREISINGER:** Diese Schwankungen des Immer-Eintauchens in den Asteroidenstaubwind sind aber in den letzten zehn Jahren über Satelliten gemessen worden. Es gibt aber zusätzlich auch noch die Möglichkeit, daß sich die Einstrahlung durch andere Staubsysteme zwischen 400 und 500 Watt pro  $\text{m}^2$  auf einen bestimmten Ort der Erde zusätzlich verändert. Es wird sich ja in der nächsten Zeit herausstellen, wenn die-

se Rechnungen von Herrn LASCAR im Dezember fertig sind, daß wir überprüfen können, speziell an den genauen Untersuchungen an der KT-Grenze, ob tatsächlich diese rhythmischen Störungen rein auf die MILANKOVIC-Zyklen, um ein Schlagwort zu nennen, zurückzuführen sind.

Eine zweite Bemerkung hätte ich noch: ein Charakteristikum der Kreide war, daß es Ost-West - Meere gegeben hat und keine Nord-Süd - Meere wie heute, was den Verlauf des Kaltwasserstromes und damit des Klimas schon sehr wesentlich beeinflusst. Können sie über den Beitrag dieser Ost-West - Strömung etwas sagen ?

HAY: Man könnte annehmen, daß die mehr zentrale Strömung höhere Temperaturunterschiede zwischen den polaren Zonen und den Tropen verursachen würde als die meridionale Transport durch den Ozean.. Aber das scheint nicht der Fall zu sein. Die Situation, die wir heute haben, wo Wasser im norwegisch-grönländischen Meer absinkt und der Nordatlantik, also der Golfstrom, nach Norden gezogen wird und Europa dabei erwärmt, das ist etwas ganz merkwürdiges und global gesehen relativ klein, wenn man indes die großen Eismassen betrachtet, die sich während des Glazials bilden, die sind alle um den Nordatlantik arrangiert, und das heißt, das ist eine Funktion der Feuchtigkeit, denn im...(unverständlich)... war das Wasser dort warm. Das ist ein begrenztes Gebiet, aber es hat doch eine globale Wirkung.

PREISINGER: Im Prinzip gehen wir davon aus, daß die Sonneneinstrahlung gar nicht konstant ist. Was sagt die Sonnenforschung ? Gibt es da in der Erdgeschichte irgendwelche Schwankungen in der Emission der Sonne ?

HAY: Das ist eine interessante Frage. Da gibt es das Neutrinoproblem. Nach der heutigen Theorie, wie die Sonne Energie erzeugt, müßte eine Flux von Neutrinos durch die Erde kommen. Man hat versucht, das zu messen und man hat fast keine gefunden, sodaß sich die Frage erhoben hat, ob die Sonne im Moment überhaupt läuft ? Denn die Photonen brauchen im Gegensatz zu Neutrinos ca. 6 Mio Jahre, um von der nuklearen Reaktion in der Sonnenmitte

bis zu ihrer Oberfläche zu gelangen, obwohl sie von dort dann in 8 Minuten auf der Erde sind. Es kann sein, daß das System in der Mitte der Sonne derzeit nicht läuft.

Zunächst hat man gemeint, es muß ein Problem mit dem Meßverfahren gewesen sein. Vor zwei Jahren hat man das neu untersucht, da braucht man Kohlenstofftetrachloridbehälter, ganz tief vergraben, und dann ist man zum Schluß gekommen, es liegt nicht an dem Verfahren, sondern der Neutrino flux ist nicht das, was man erwartet hat. Möglicherweise versteht man nicht ganz, wie die Sonne Energie erzeugt.

Es gibt Fluktuationen, aber wahrscheinlich sind sie nicht zu beobachten, weil die Photonen solange brauchen, und die gehen in verschiedene Richtungen.

PREISINGER: In letzter Zeit hat man mit der C14-Methode gezeigt, daß Kohlenstoff nicht konstant erzeugt wird, und damit ist die Absolutdatierung etwas problematischer geworden. Wenn man diese Schwankungen in den letzten paar tausend Jahren ansieht -mehr kann ich nicht beurteilen dann ist das echt typische kosmische Strahlung, die von der Sonne kommt, und die Schwankungen weisen Rhythmen von 30 - 50 Jahren auf, das kann man heute schon nachweisen.

KALLENBACH: Eine Frage, was die Sonneneinstrahlung betrifft: besonders im Sommer und auf den Polkappen ist den Energieimpuls extrem hoch. Aber wie steht das mit dem Einstrahlwinkel ? Für mich ist das nicht ganz einseitig, wir haben ja sehr flache Einstrahlwinkel, das müßte eigentlich die Energiebilanz verringern.

HAY: Das ist darin schon berücksichtigt

KERN: Bezüglich Sonnenstrahlung: Sicher, bis alle Photonen die Sonnenoberfläche erreichen, das dauert einige Zeit, aber die Sonnenfleckenaktivität hat man historisch verglichen; in der "kleinen Eiszeit" hatten wir keine Aktivitäten, und jetzt sehen wir einem Maximum entgegen, und das wird von einigen Autoren als möglicherweise eine Starthilfe für Eiszeiten oder Warmzeiten gesehen.

SCHROLL: Wir sollten die vulkanischen Erscheinungen, ganz gleich, wie sie zustande

kommen, nicht außer acht lassen. Hier kommt es ja zu einem enormen Ausfall an CO<sub>2</sub>, der in den Karbonatgesteinen gespeichert ist, oder Karbonatitbildungen, durch die riesige Mengen von CO<sub>2</sub> wieder ausgeschlossen werden.

HAY: Vulkane sind vor allem wichtig durch den Ausstoß von SO<sub>2</sub>, das ein Aerosol und relativ opak ist, und offenbar einen klimatischen Effekt hat. Allerdings gibt es eine ganz interessante Studie von U. ELSASSER, einem Klimatologen in Noah, USA, der vulkanische Eruptionen und Klima, besonders Abkühlungen, genau untersucht hat, und der hat eine bessere Korrelationen dafür gefunden, daß es eher nach einer Abkühlung eine vulkanische Eruption gibt als umgekehrt. Das hat er leider nie so richtig publiziert, aber das war so.

In der jungen Erdgeschichte, seit 10, aber besonders seit 5 Mio Jahren, gibt es eine Zunahme der Vulkanizität, das kann man mit Aschenmengen im Pazifikbecken nachweisen. Dann ist die Frage, was hat das mit Klimaänderungen zu tun und wie funktioniert das, aber eigentlich weiß man nicht sehr viel davon.

RIEHL - H.: Diese thermische freie Zeit oder überhaupt voll eisfreie Zeit, könnte das mit einem Meteoritenereignis in Zusammenhang

stehen ? Die Perm-Trias-Grenze ist eine der großen Grenzen und wir haben voriges Jahr diskutiert, ob damals ein solches Ereignis möglich gewesen wäre, ähnlich dem Chixculub - Ereignis an der KT - Grenze.

HAY: Die Enteisung im Paläozoikum geschieht im Mittelperm, vor der Faunengrenze, und für diese hat bis jetzt niemand etwas wirklich Zutreffendes für einen Meteoriteneinschlag gefunden. Aber was ganz merkwürdig da ist, ist die starke Verbeitung von Fungien, gerade an der Grenze ist z.B. Holz immer sehr stark von Pilzen angegriffen, und da kommt die Frage, ob wir da einfach eine Erfindung dieser Pflanzen sehen, daß die einfach entdeckt haben, wie man Holz abbaut, und dadurch viel CO<sub>2</sub> in die Atmosphäre abgegeben haben und daß das alles verändert hat, aber ich habe keine Ahnung davon.

PREISINGER: Es wurde die Frage angeschnitten, ob ein Impakt eines Meteoriten oder eines anderen kosmischen Körpers eine Vereisung auslösen kann. Ich würde glauben, daß das an der KT-Grenze wohl stattgefunden haben könnte, aber höchstens für ein paar hundert Jahre.

### ***Diskussionsbeiträge von:***

*Univ.Prof. Dr. William W. HAY*  
*GEOMAR Kiel*  
*Christian-Albrechts-Universität*  
*Wischhofstraße 1-3*  
*D-24148 Kiel*

*Univ.Prof. Dr. H. KALLENBACH*  
*Am Sandwerder 42a*  
*D - 14109 Berlin*

*Dr. Armin KERN*  
*Freudenberg 9*  
*A - 9064 Pischeldorf*

*Univ.Prof. Dr. A. PREISINGER*  
*TU Wien*  
*Karlsplatz 13*  
*A - 1040 Wien*

*Dr. Georg RIEHL - H*  
*Hauptstraße 70*  
*A - 2801 Katzelsdorf*

*Univ.Prof. Dr. Erich SCHROLL*  
*Haidbrunnngasse 14*  
*2700 Wr. Neustadt*



Barbara-Gespräche Payerbach 1998	Band 5	"Abfallentsorgung aus erdwissenschaftlicher Sicht" "Klima - Entwicklung"	Seite 217 - 232 Abb. 1 - 8	Payerbach 2001
-------------------------------------	--------	---	-------------------------------	-------------------

# BARBARA-GESPRÄCHE

## Payerbach 1998

Meerestemperaturen und CO<sub>2</sub>-Geschichte der letzten  
Jahrhunderte - Rekonstruktionen mit Riffkorallen  
und corallinen Schwämmen

Florian BÖHM  
Wolf - Chistian DULLO



Payerbach,  
17. September 1998

**INHALT**

Zusammenfassung	219
1 Einleitung	220
2 Temperaturrekonstruktionen mit Sauerstoffisotopen	221
3 Variationen im CO <sub>2</sub> -Kreislauf	225
4 Schlußfolgerungen	228
Dank	228
Literatur	228
Diskussion	231

*Anschrift der Verfassers:*

*Dr. Florian BÖHM  
Univ.Prof. Dr. Wolf - Christian DULLO  
GEOMAR Forschungszentrum  
für marine Geowissenschaften  
Christian Albrechts Universität Kiel*

*Wischhofstr. 1-3  
D-24148 Kiel*

*e-mail: fboehm@geomar.de, cdullo@geomar.de*

# Meerestemperaturen und CO<sub>2</sub>-Geschichte der letzten Jahrhunderte - Rekonstruktionen mit Riffkorallen und corallinen Schwämmen

F. BÖHM

W.- Chr. DULLO

## Zusammenfassung

Die tropischen Meere sind für die globale Klimaentwicklung von großer Bedeutung. Die dort lebenden Riffkorallen sind mit ihren massiven Kalkskeletten ergiebige Klimaarchive. Bei der Bildung ihrer Skelette bilden sie die Isotopenzusammensetzung und die Temperatur des Wassers ab. Wachstumsraten im Bereich von Zentimetern pro Jahr ermöglichen bei manchen Riffkorallen eine monatliche oder sogar wöchentliche zeitliche Auflösung. Mehrere Meter lange Bohrkerne aus großen Korallenstöcken liefern Klimarekonstruktionen, die mehrere Jahrhunderte zurückreichen. Dies erlaubt sowohl Rückschlüsse auf die natürliche Klimavariabilität, als auch auf die überlagerten menschlichen Einflüsse.

Korallen aus der Karibik (Puerto Rico) zeigen einen bis heute andauernden Erwärmungstrend, der jedoch schon Mitte des letzten Jahrhunderts einsetzte, also noch vor Beginn menschlicher Einflußnahme. Ein Korallenkern aus dem Roten Meer (Golf von Aqaba) zeigt im Vergleich zwischen frühem 19. und spätem 20. Jahrhundert eine deutliche Zunahme der Sommertemperaturen bei wenig veränderten Wintertemperaturen. Dagegen findet man im westlichen Indischen Ozean (Madagaskar) und in der zentralen Karibik (Jamaica) keine langfristigen Temperaturtrends.

Kohlenstoffisotope, die ebenfalls aus dem Meerwasser in das Kalkskelett eingebaut werden, spiegeln bei Korallen vor allem Änderungen im Stoffwechsel der Korallentiere wider. Dagegen bilden die vergleichsweise unschein-

baren corallinen Schwämme die originale isotopische Meerwasserzusammensetzung in ihren Skeletten ab. Diese hängt eng mit dem atmosphärischen CO<sub>2</sub>-Gehalt zusammen. Coralline Schwämme wachsen sehr langsam und können viele Jahrhunderte alt werden. Allerdings erlaubt der geringe jährliche Zuwachs nur eine schlechte zeitliche Auflösung.

Schwammskelette aus der Karibik zeigen leicht erhöhte <sup>13</sup>C/<sup>12</sup>C-Verhältnisse während der "Kleinen Eiszeit" (ca. 16. bis 19. Jahrhundert). Sehr eindrucksvoll tritt in allen untersuchten Schwammskeletten die industriell verursachte Änderung der Kohlenstoffisotopen-Verhältnisse seit dem 19. Jahrhundert in Erscheinung. Diese verläuft parallel zum bekannten Anstieg des Atmosphären-CO<sub>2</sub>-Gehaltes. Die in den Schwämmen gespeicherten Daten erlauben so eine detaillierte Rekonstruktion der Geschichte des CO<sub>2</sub>-Anstieges.

Sowohl die Korallen- als auch die Schwamm-daten verdeutlichen, daß schon vor der Einflußnahme des Menschen natürliche Klimaschwankungen auftraten, die möglicherweise bis heute andauern. Beim CO<sub>2</sub>-Gehalt waren diese Schwankungen in historischer Zeit verschwindend gering, verglichen mit den anthropogenen Änderungen. Bei den Klimatrends ist eine so deutliche Trennung jedoch nicht möglich, wenn auch vieles auf einen zunehmenden menschlichen Einfluß auf das Weltklima hindeutet.

## 1 Einleitung

Die tropischen Meere haben für das Klima der Erde große Bedeutung. Wohlbekannt ist spätestens seit dem Ende der 90er-Jahre das El Niño-Phänomen, das im tropischen Pazifik seinen Ausgang nimmt und das Wetter in vielen Teilen der Welt beeinflusst. Immer wieder aktuelle Beispiele sind auch die großen Hurricanes und Taifune, die in der Wärme der Tropenmeere entstehen, in den Tropen bisweilen schwere Verwüstungen anrichten und als große Tiefdruckgebiete bis in unsere Gefilde vordringen können. Ihre Energie bekommen diese schweren Stürme aus der Wärme der Meeresoberflächenschicht. Damit ist die Oberflächentemperatur der tropischen Meere ein wichtiger Steuerungsfaktor des Wettergeschehens.

Die tropischen Meere sind auch die Heimat von Korallenriffen. Riffe bieten vielen tropischen Atollen, Inseln und Kontinentküsten Schutz vor der Meeresbrandung. Dies wird angesichts des steigenden Meeresspiegels (LEDLEY et al. 1999) immer wichtiger, damit diese "Tropenparadiese" auch weiterhin für den Menschen bewohnbar bleiben. Andererseits sind Korallenriffe durch den Einfluß des Menschen weltweit bedroht und damit auch ihre Küstenschutzfunktion. Unter anderem setzt die seit Jahrzehnten ansteigende Meerestemperatur den Korallen zu (WINTER et al. 1998). Dieser Temperaturanstieg wird größtenteils auf die Zunahme des Atmosphären- $\text{CO}_2$  und den damit verbundenen Treibhauseffekt zurückgeführt (LEDLEY et al. 1999). Der atmosphärische  $\text{CO}_2$ -Gehalt hat von Mitte des 19. bis Ende des 20. Jahrhunderts durch das Verbrennen fossiler Brennstoffe um etwa 30% zugenommen (ETHERIDGE et al. 1996, KEELING & WHORF 1999). Wie erst kürzlich bekannt wurde, bedroht das  $\text{CO}_2$  auch ganz direkt die Fähigkeit der Korallen stabile Kalkgerüste zu bauen (KLEYPAS et al. 1999, § et al. 2000).  $\text{CO}_2$  reagiert mit Meerwasser unter Freisetzung von  $\text{H}^+$ -Ionen, wirkt also als Säure. Dadurch wird die Karbonatsättigung vermindert, was sich direkt auf die Skelettbildungsrate der Korallen auswirkt.

Mit den Isotopen-Untersuchungen an Kalkskeletten von Korallen und von corallinen

Schwämmen können wir sowohl das Eindringen von industriell erzeugtem  $\text{CO}_2$  in das Meerwasser, als auch den zeitlichen Verlauf von Wassertemperaturkurven rekonstruieren. Coralline Schwämme (Abb. 1) sind Verwandte der Badeschwämme, die ein den Korallen ähnliches Kalkskelett besitzen (Reitner 1992). Oft werden sie auch als „Sclerospongien“ bezeichnet (HARTMAN & GOREAU 1970). Sie leben versteckt in Riffhöhlen und in ca. 100 m Wassertiefe an Riffhängen (DUSTAN et al. 1976, DULLO 1997). Wegen dieser versteckten Lebensweise sind sie bislang nur relativ wenig erforscht worden. Diese Schwämme wachsen sehr langsam und können viele Jahrhunderte alt werden (SWART et al. 1998, WÖRHEIDE 1998, LAZARETH et al. 2000).

Bei der Bildung des Korallenskelettes aus Kalziumkarbonat ( $\text{CaCO}_3$ ) werden Sauerstoff



**Abb. 1:** Großes Exemplar von *Ceratoporella nicholsoni*, einer in der Karibik häufigen Art coralliner Schwämme, in situ in einer Riffhöhle vor Jamaica. Die Bildbreite entspricht etwa 1 m. Foto Helmut Lehnert.

atome über die im Meerwasser gelösten  $\text{CO}_3^{2-}$ -Ionen (Carbonat) eingebaut. Das eingebaute Carbonat steht mit  $\text{H}_2\text{O}$  in isotopischem Gleichgewicht. Somit bildet sich die Sauerstoff-Isotopenzusammensetzung des Wassers, die vor allem von Niederschlag und Verdunstung abhängt, im Skelett der Korallen oder Schwämme ab. Bei der Kristallisation von  $\text{CaCO}_3$  werden in Abhängigkeit von der Wassertemperatur die Isotopenverhältnisse im Skelett gegenüber dem Wasser systematisch verschoben. Die Fraktionierung zwischen Wasser und Aragonitkristall wird umso größer, je kälter

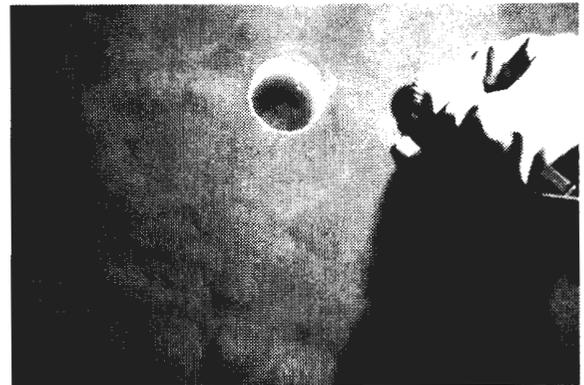
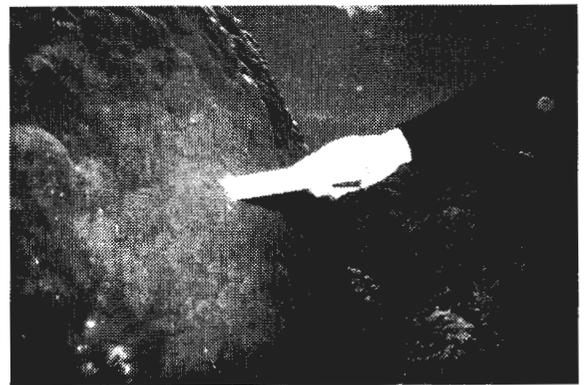
das umgebende Wasser ist. Beispielsweise ist, sofern sich ein thermodynamisches Gleichgewicht einstellen kann, bei 28°C kristallisierter Aragonit relativ zum Meerwasser um ca. 2.9% an <sup>18</sup>O angereichert, bei 20°C bereits um etwa 3.1% und bei 4°C sogar um 3.5%. Die Sauerstoffisotope in den Kalkskeletten ermöglichen also entweder eine Rekonstruktion der Niederschlagsmengen oder, wenn diese nicht variieren, der Wassertemperaturen.

Kohlenstoffisotope, die ebenfalls mit den im Meerwasser gelösten Carbonationen in das Kalkskelett gelangen, spiegeln bei Korallen teilweise klimatische Bedingungen wider (vor allem Wolkenbedeckung), teils aber auch Änderungen im Stoffwechsel der Korallentiere. Dagegen bilden coralline Schwämme die originale isotopische Meerwasserzusammensetzung in ihren Skeletten ab (DRUFFEL & BENAVIDES 1986, REITNER 1992, BÖHM et al. 1996).

Da das industriell erzeugte, aus fossilen Brennstoffen stammende CO<sub>2</sub> eine charakteristische Isotopenzusammensetzung hat (frei von <sup>14</sup>C, an <sup>12</sup>C angereichert, Suess-Effekt; NOZAKI et al. 1978), läßt sich aus der Isotopie der Atmosphäre und des Meerwassers (bzw. der Schwamm-skelette) auf den Anteil von industriellem CO<sub>2</sub> schließen, sofern andere Einflüsse ausgeschlossen werden können (DRUFFEL & BENAVIDES 1986, GRUBER et al. 1999). In globalem Maßstab kann man mit Hilfe der Kohlenstoffisotope sogar die Aufnahme von industriellem CO<sub>2</sub> in die Ozeane abschätzen (HEIMANN & MAIER-REIMER 1996, SONNERUP et al. 1999).

## 2 Temperaturrekonstruktionen mit Sauerstoffisotopen

Durch ihre hohen Wachstumsraten im Bereich von Zentimetern pro Jahr ermöglichen manche Riffkorallen eine monatliche (FAIRBANKS et al. 1997), in sehr günstigen Fällen sogar wöchentliche zeitliche Auflösung (GAGAN et al. 1994). Für die Beprobung werden aus großen Korallenstöcken wenige Zentimeter dicke und bis mehrere Meter lange Bohrkern mit Hilfe eines druckluftgetriebenen Bohrers entnommen (Abb. 2).



**Abb. 2: Probennahme an einem Korallenstock. Mit Hilfe eines Druckluftbohrers werden Kerne aus dem Skelett gebohrt.**

Die Bohrkern bestehen bedingt durch die Länge des Bohrers aus je 30 cm langen Segmenten. Das Bohrloch wird anschließend mit einem Zementstopfen verschlossen, um den Stock vor Bioerosion zu schützen. Dadurch bleibt der Stock unverletzt. Das Bohrloch wird innerhalb kurzer Zeit wieder überwachsen.

Aus den Kernen werden der Länge nach dünne Scheiben gesägt. Diese Scheiben werden geröntgt, wodurch eine Helldunkelbänderung sichtbar wird (Abb. 3). Dies sind Dichtebänder



**Abb. 3:** Röntgenographie eines Korallenbohrkerns von Puerto Rico. Die Jahresbänderung ist deutlich zu erkennen. Schräg verlaufende dunkle Linien sind Kelchwände der Coralliten. Der gezeigte Abschnitt wuchs im Zeitraum von etwa 1837 bis 1902 A.D.

des Skelettes, die sich im Wechsel der Jahreszeiten bilden. Es handelt sich also um Jahresbänder, ähnlich den Jahresringen in Bäumen. Durch Abzählen der Bänder erhält man eine erste zeitliche Einstufung. Für die weitere Datierung werden die saisonalen Temperaturschwankungen verwendet, die sich in den Sauerstoffisotopen widerspiegeln (Abb. 6). Mehrere Meter lange Bohrkerne liefern Klimarekonstruktionen, die mehrere Jahrhunderte zurückreichen. Dies erlaubt sowohl Rückschlüsse auf die natürliche Klimavariabilität im Untersuchungsgebiet, als auch auf die überlagerten menschlichen Einflüsse.

### **Karibik**

Abb. 3 zeigt einen Abschnitt eines Kernes aus der Karibik, von Puerto Rico. Die zugehörige Sauerstoffisotopenkurve (Abb. 4) läßt eine langfristige Temperaturzunahme seit etwa Mitte 19. Jahrhundert erkennen. Das frühe Einsetzen dieses Erwärmungstrends läßt sich kaum mit einer Erwärmung durch den Treibhauseffekt erklären, da zu diesem Zeitpunkt der Anstieg im atmosphärischen CO<sub>2</sub> noch zu gering war. Rekonstruktionen der globalen Oberflächentemperaturen (HANSEN et al. 1999, MANN et al. 1999) zeigen ein Einsetzen des Erwärmungstrends erst mit dem Beginn des 20. Jahrhunderts. Die bei Puerto Rico festgestellte Erwärmung dürfte somit eher natürliche Ursachen haben.

Wegen ihrem sehr langsamen Wachstum von weniger als 0.5 mm pro Jahr kann man aus corallinen Schwammskeletten keine hochaufgelösten Temperaturverläufe erhalten. Da unsere Proben mit Mikrobohrern von 0.5 mm Durchmesser genommen wurden, repräsentieren sie jeweils Mittelwerte über einen Zeitraum von wenigen Jahren. Diesen Mangel machen die Schwammskelette allerdings durch ihre extrem lange Lebensdauer einigermaßen wett. Die Sauerstoffisotopenkurven in Abb. 5 zeigen den langfristigen Temperaturverlauf seit der Renaissance (15. Jahrhundert) in der Karibik in Tiefen von 20 m (Jamaica) und 125 m (Pedro Bank). Die Meßgenauigkeit dieser Methode ist etwa 0.4°C (BÖHM et al. 2000). Die Daten belegen, daß in den letzten Jahrhunderten Änderungen der Meerestemperatur in der zentralen Karibik nur sehr gering waren.

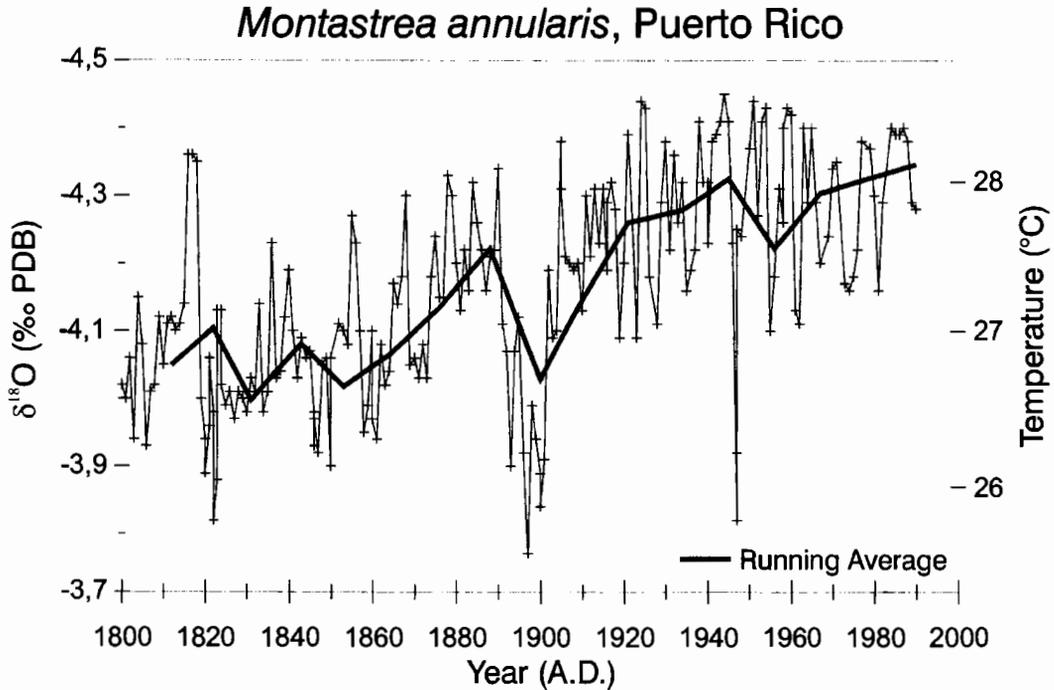


Abb. 4: Sauerstoffisotopenkurve aus einer Koralle (*Montastrea annularis*) von Puerto Rico. Die dicke Linie ist ein gleitender Mittelwert. An der rechten Achse ist die entsprechende Kristallisationstemperatur aufgetragen. Die Glättungskurve zeigt einen langfristig ansteigenden Temperaturentrend. Der erste Temperaturentstieg beginnt bereits Mitte des 19. Jahrhunderts. Danach folgt allerdings um die Jahrhundertwende nochmal eine Abkühlungsphase.

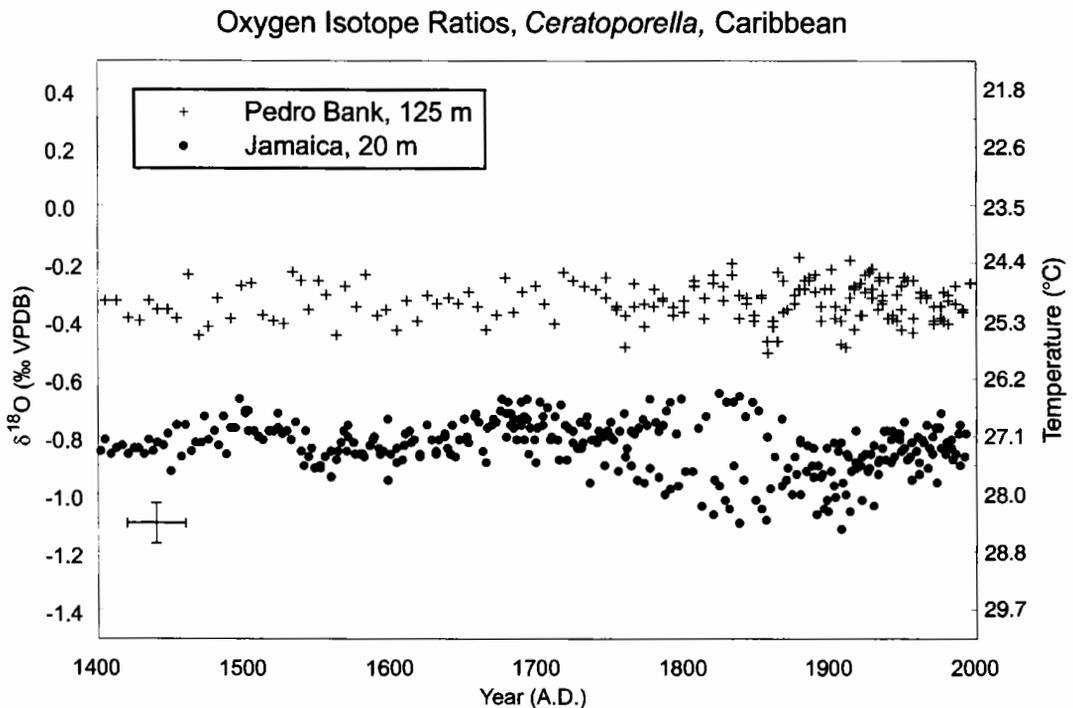
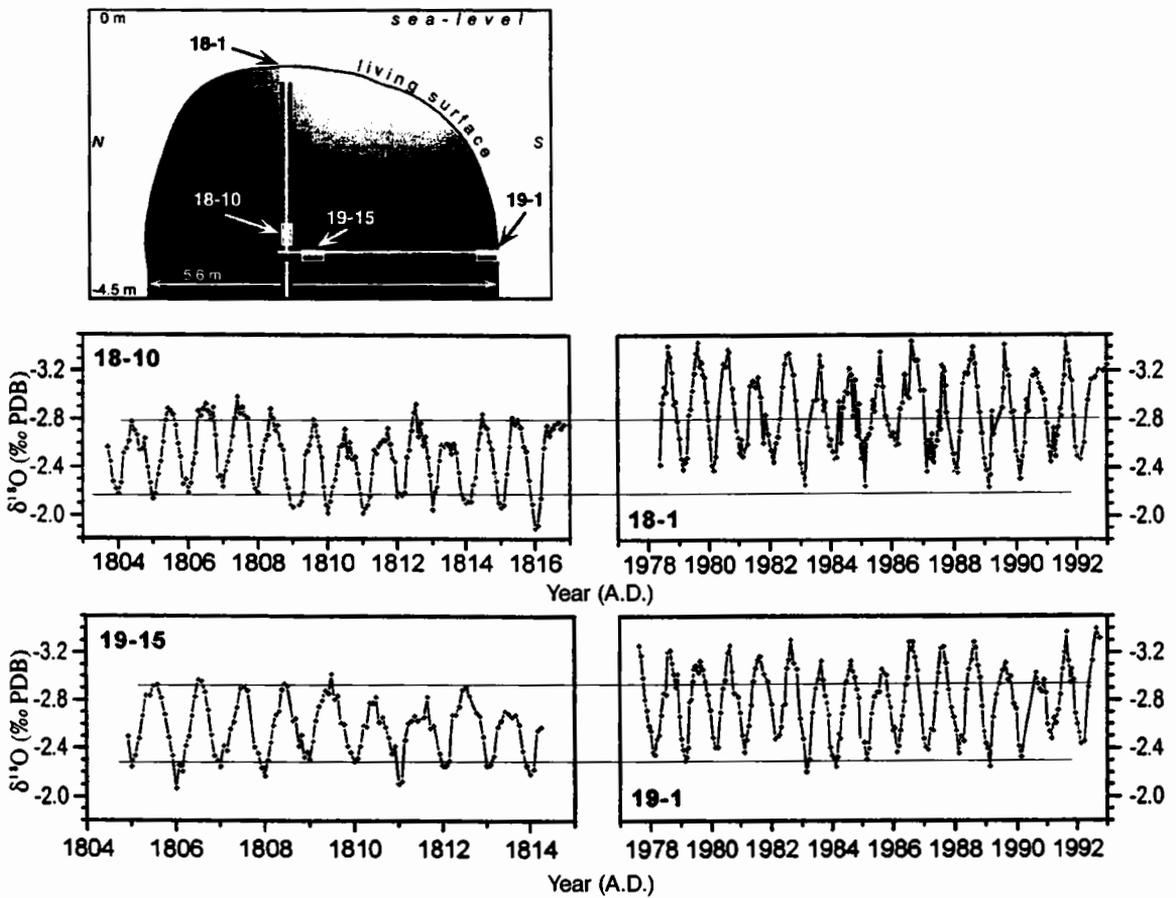


Abb. 5: Sauerstoffisotopenkurven von corallinen Schwämmen (*Ceratoporella nicholsoni*) aus der Karibik, aus 20 m und 125 m Wassertiefe. Beide Kurven zeigen leichte Variationen, aber keinen langfristigen Trend. Links unten sind die Fehlerbalken für die  $\delta^{18}\text{O}$ -Werte und die Altersbestimmungen (U-Th-Datierungen) angegeben. Eine  $\delta^{18}\text{O}$ -Änderung von 1 entspricht einer Temperaturentänderung von 4.4°C (Böhm et al. 2000). Die entsprechenden Temperaturen sind an der rechten y-Achse angegeben.



**Abb. 6:** Isotopenkurven zweier Kerne aus einer Koralle der Art *Porites lutea* aus dem Golf von Aqaba (Rotes Meer) und Skizze der Kernpositionen im Korallenstock. Die oberen beiden Isotopenkurven stammen aus dem senkrechten, die unteren beiden aus dem waagrechten Kern. Es sind jeweils zwei kurze, hochauflösend beprobte Zeitabschnitte zum Vergleich gezeigt. Das regelmäßige auf und ab der Kurven ist der Jahresgang. In beiden Kernen erkennt man eine Zunahme der Temperatur (Abnahme der  $\delta^{18}\text{O}$ -Werte, die y-Achsen sind verkehrt herum aufgetragen) vom frühen 19. zum späten 20. Jahrhundert. Beim waagrechten Kern beruht die Temperaturzunahme vor allem auf einer Erhöhung der Sommertemperaturen (Maxima der Kurve). Aus HEISS et al. (1999).

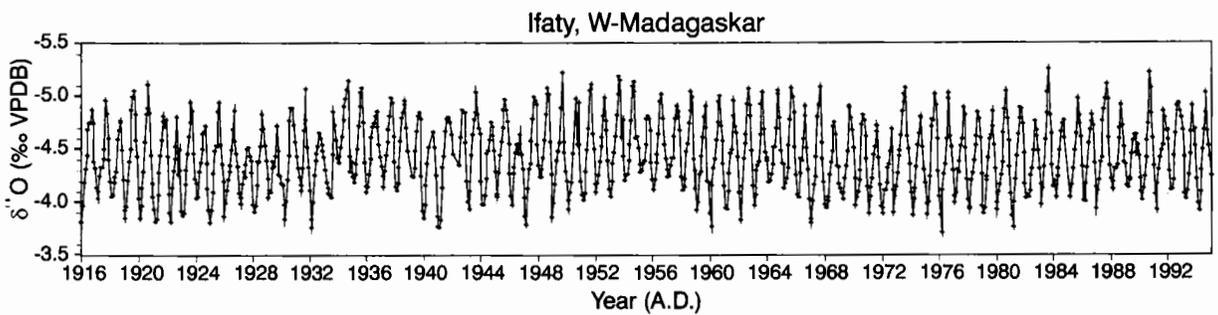
**Rotes Meer**

Ein Korallenkern aus dem nördlichen Roten Meer, Golf von Aqaba, erlaubt eine Temperaturrekonstruktion bis zurück zum Beginn des 19. Jahrhunderts. Der halbkugelig gewachsene Stock ermöglicht außerdem den Vergleich zwischen einem vertikal und einem horizontal entnommenen Kern (Abb. 6). Der Vertikalkern hat den Nachteil, daß sich der Abstand zur Wasseroberfläche im Lauf der Zeit verringert hat. Der Stock hat heute eine Höhe von 3.5 m. Seine Basis befindet sich in 4.5 m Tiefe. Tatsächlich zeigt ein Vergleich der beiden Kerne eine zunehmende Differenz. Der vertikale Kern zeigt eine stärkere Erwärmung an, als der horizontale

(HEISS et al. 2000). Offenbar erwärmt sich das Wasser über den Sommer in einer dünnen Oberflächenschicht stärker als in 4 m Tiefe. Allerdings zeigt auch der horizontal entnommene Kern eine langfristige Temperaturzunahme um 1.3°C seit dem Beginn des 19. Jahrhunderts (Abb. 6). Diese Temperaturzunahme ergibt sich aus zunehmenden Sommertemperaturen, wogegen die Wintertemperatur nur geringfügig anstieg (HEISS et al. 2000).

**Indischer Ozean**

Über die Steuerungsfaktoren und Zusammenhänge des Klimageschehens im tropischen Indischen Ozean ist nur wenig bekannt. Lang-



**Abb. 7: Sauerstoffisotopenkurve einer Koralle der Art *Porites lobata* von Ifaty (Madagaskar). Die Kurve zeigt einen sehr klaren Jahresgang und leichte interannuale bis dekadische Variationen, jedoch keinen langfristigen Trend.**

fristige Aufzeichnungen der Wassertemperatur sind nur spärlich vorhanden. Wichtigstes Klimaphänomen ist der Monsun. Darüber hinaus hat aber auch der Pazifik mit dem El Niño/Southern Oscillation (ENSO) einen Einfluß auf das Klima des Indik und der umgebenden Kontinente (COLE et al. 2000). Ein Korallenkern aus einem Riff vor dem südwestlichen Madagaskar (Ifaty) liefert Temperatur-Proxydaten für die letzten 75 Jahre (Abb. 7). Die Korrelation zwischen den Sauerstoffisotopenwerten und der in der Nähe gemessenen Wassertemperatur ist sehr gut (HEISS et al. 1997). Dabei ist der Jahresgang der Temperatur sehr groß (etwa 7°C) und sehr gleichmäßig (Abb. 7). Die Meßwerte zeigen langfristige Variationen, aber keinen sichtlichen Erwärmungstrend im 20. Jahrhundert. Dies ist anders als im unmittelbaren Einflußbereich des Monsuns. Nördlich der intertropischen Konvergenzzone wurde sowohl in einer Koralle von der Küste Kenias (COLE et al. 2000), als auch in einer von den Seychellen (CHARLES et al. 1997) ein deutlicher Erwärmungstrend für das 20. Jahrhundert beobachtet. Die Kenia-Koralle zeigt dabei wiederum einen Beginn der Erwärmung bereits im frühen 19. Jahrhundert.

Es zeigt sich also, daß auch in den Ozeanen und ihren Randmeeren ein relativ kleinräumig unterschiedlicher Klimaverlauf zu beobachten ist. Der im globalen Mittel gut erkennbare langfristige Erwärmungstrend des 20. Jahrhunderts (MANN et al. 1999) ist nicht nur auf den Kontinenten regional unterschiedlich ausgeprägt. Auch die Meere und Ozeane reagieren auf den globalen Klimawandel in verschiedener Weise.

Der schon in wenigen Metern Wassertiefe gedämpfte Temperaturanstieg, wie er sich im Beispiel der Koralle aus dem Roten Meer zeigt, ließe sich vielleicht so deuten, daß viele der beobachteten Trends ein reines Oberflächenphänomen sind. Dies wird auch in den invarianten Temperaturdatenreihen der corallinen Schwämme sichtbar, die aus noch größeren Tiefen (20 m und 125 m) stammen. Jüngst zeigte jedoch eine Auswertung von Temperaturaufzeichnungen aus der Tiefsee (LEVITUS et al. 2000), daß auch das Tiefenwasser sich in den letzten Jahrzehnten erwärmt hat. Diese Temperaturänderungen sind sehr gering und noch jenseits der Genauigkeit der Sauerstoffisotopen-Methodik. Jedoch ist die im Tiefenwasser gespeicherte Wärmemenge wegen des großen Volumens der erwärmten Wassermassen extrem groß. Somit dürfte die Tiefsee einen bisher kaum beachteten Wärmespeicher mit entscheidendem Einfluß auf das Weltklima darstellen. Verbesserte geochemische Methoden (z. B. Sr/Ca-Verhältnis als Temperatur-Proxy), angewandt auf Bewohner des Tiefenwassers wie coralline Schwämme und Tiefwasserkorallen, könnten für die Untersuchung dieses Wärmespeichers entscheidende Daten liefern.

### 3 Variationen im CO<sub>2</sub>-Kreislauf

Während die Kohlenstoffisotope von Korallenaragonit vor allem die Kalzifikationsrate und Stoffwechselfvorgänge des Korallenorganismus und seiner symbiotischen Algen widerspiegeln (McCONNAUGHEY et al. 1997), bilden

coralline Schwämme die originale isotopische Meerwasserzusammensetzung in ihren Skeletten ab (DRUFFEL & BENAVIDES 1986, REITNER 1992, BÖHM et al. 1996). Damit ermöglichen sie Rekonstruktionen der  $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ -Verhältnisse des im Meerwasser gelösten, anorganischen  $\text{CO}_2$  (dissolved inorganic carbon, DIC). Die Isotopenverhältnisse im DIC des Oberflächenwassers werden einerseits vom atmosphärischen  $\text{CO}_2$  beeinflusst, zum anderen durch den Entzug (Photosynthese) bzw. die Zufuhr (Respiration) von  $\text{CO}_2$  über organischen Kohlenstoff als "Transportmittel" (BROECKER & PENG 1982, BROECKER & MAIER-REIMER 1992). Auch Kalkfällung entzieht dem DIC Kohlenstoff, jedoch ist der Unterschied im Isotopenverhältnis zwischen Kalk und DIC sehr gering, meist deutlich kleiner als 0.5%. Anders bei organischem Kohlenstoff, wo der Unterschied zum DIC etwa 2% ausmacht. Dabei ist organischer Kohlenstoff an  $^{12}\text{C}$  angereichert. Im offenen Meer, wo Photosynthese die Respiration meist übertrifft, ist daher das Oberflächenwasser-DIC an  $^{13}\text{C}$  angereichert.

Durch das Verbrennen von organischem Kohlenstoff in Form von Kohle, Öl und Gas hat der Mensch in den vergangenen ca. 150 Jahren große Mengen von  $^{12}\text{C}$ -angereichertem Kohlenstoff aus der Erdkruste in den globalen  $\text{CO}_2$ -Kreislauf rückgeführt. Dadurch hat sich das Isotopenverhältnis des atmosphärischen Kohlendioxids meßbar verändert (KEELING et al. 1977, FRIEDLI et al. 1986, FRANCEY et al. 1999). Etwas zeitverzögert und abgedämpft folgte auch das in den Ozeanen gelöste  $\text{CO}_2$ ,  $\text{HCO}_3^-$ , und  $\text{CO}_3^{2-}$  (DIC) mit einer  $^{12}\text{C}$ -Anreicherung nach (NOZAKI et al. 1978, DRUFFEL & BENAVIDES 1986, BÖHM et al. 1996). Die Dämpfung rührt daher, daß sich das Oberflächenwasser mit Wasser aus größerer Tiefe mischt. Das Tiefenwasser hat aber noch sein ursprüngliches Isotopenverhältnis, da es noch keinen Kontakt mit der isotopisch veränderten Atmosphäre hatte.

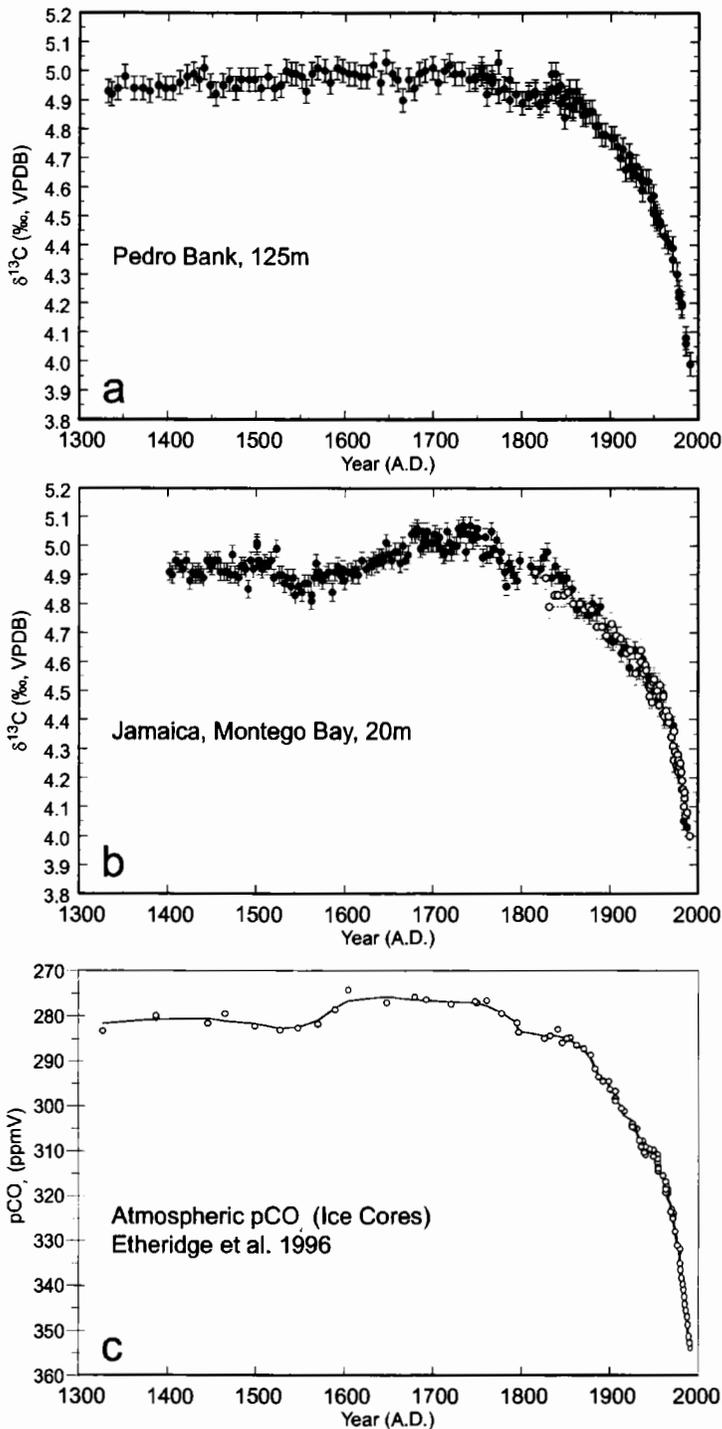
Unsere etwa 600 Jahre alten corallinen Schwämme aus der Karibik (Jamaika und Pedro Bank) zeigen die gesamte Zeitspanne der industriellen  $^{12}\text{C}$ -Zunahme (Abb. 8). Durch die Darstellung des Isotopenverhältnisses als  $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$

(seltenes Isotop steht im Zähler), äußert sich ein Anstieg im  $^{12}\text{C}$  als Abnahme des  $\delta^{13}\text{C}$  ( $\delta^{13}\text{C} = [^{13}\text{C}/^{12}\text{C}_{\text{Probe}} / ^{13}\text{C}/^{12}\text{C}_{\text{Standard}} - 1] * 1000$ ). Besonders eindrucksvoll ist der anthropogene Eingriff in den Kohlenstoffkreislauf im Vergleich zu den jahrhundertlang fast konstanten Werten in einem Schwamm skelett aus dem tieferen Wasser (Pedro Bank, 125 m Wassertiefe) zu sehen (Abb. 8a).

Bei dem Exemplar aus dem flacheren Wasser (Jamaica, 20 m) zeigt sich zusätzlich zur anthropogenen eine natürliche, deutlich geringere Variabilität im  $\delta^{13}\text{C}$  während der präindustriellen Zeit (vor 1850) (Abb. 8b). Man erkennt einen Anstieg zu maximalen Werten um etwa 1700-1750 A.D. und danach wieder eine langsame Abnahme des Anteils an  $^{13}\text{C}$  bis auf einen Wert wie im 15. Jahrhundert. Wenig später beginnt dann etwa 1830-1840 A.D. die drastische, industrielle Zunahme von  $^{12}\text{C}$  (= Abnahme im  $^{13}\text{C}$ ).

Im 17.-18. Jahrhundert fand auch in der Atmosphäre eine gleichartige Änderung des  $^{13}\text{C}$  statt (FRANCEY et al. 1999). Zur gleichen Zeit fiel der atmosphärische  $\text{CO}_2$ -Gehalt leicht ab (Abb. 8c; ETHERIDGE et al. 1996). Beides weiß man aus Untersuchungen an Gaseinschlüssen in Eiskernen der Antarktis.

Der Zeitraum vom 16. bis 19. Jahrhundert ist auch als "Kleine Eiszeit" bekannt (GROVE 1988). Die Änderungen im  $\text{CO}_2$  und seiner Isotopie deuten auf ein vermehrtes Wachstum der globalen Pflanzenmasse im Verlauf dieser Kaltphase hin (TRUDINGER et al. 1999). Da Pflanzen bevorzugt  $^{12}\text{C}$  speichern und aus der Luft  $\text{CO}_2$  aufnehmen, führt eine Zunahme der Pflanzenmasse zur Zunahme des  $\delta^{13}\text{C}$  im atmosphärischen  $\text{CO}_2$  bei gleichzeitiger Abnahme des  $p\text{CO}_2$ . Da Ozean und Atmosphäre ständig  $\text{CO}_2$  austauschen, gleicht sich das Oberflächenwasser mit leichter Zeitverzögerung der Atmosphäre an. Bei diesem Gasaustausch spielt auch die Wassertemperatur eine Rolle, da hierbei eine temperaturabhängige Isotopenfraktionierung zwischen Luft und Wasser auftritt. Dabei bewirkt eine Abkühlung, daß das atmosphärische  $\delta^{13}\text{C}$  niedriger wird. Im Ozean gibt es kaum eine temperaturbedingte Isotopenänderung, weil die dort gespeicherte Kohlenstoffmasse die der Atmosphäre bei weitem übertrifft



**Abb. 8:** Kohlenstoffisotopenkurven von corallinen Schwämmen der Art *Ceratoporella nicholsoni* aus der Karibik, aus (a): 125 m und (b): 20 m Wassertiefe. Zum Vergleich ist in (c) der CO<sub>2</sub>-Partialdruck der Atmosphäre dargestellt. Beachte, daß letztere Kurve zur besseren Vergleichbarkeit mit den Isotopenkurven mit verkehrter y-Achse aufgetragen ist. Die CO<sub>2</sub>-Kurve wurde aus Eiskernen der Antarktis gewonnen (Etheridge et al. 1996). Die 125 m-Kurve (a) zeigt kaum Variationen im präindustriellen Abschnitt (älter als 1850 A.D.). Dagegen sieht man in der Flachwasserkurve (b) ein  $\delta^{13}\text{C}$ -Maximum um das Jahr 1700 A.D., entsprechend einer leichten Abnahme in den CO<sub>2</sub>-Werten (c). In allen Kurven ist die industrielle Änderung (nach 1850 A.D.) deutlich zu sehen. In (c) sind Werte von zwei verschiedenen Standorten (gefüllte und ungefüllte Datenpunkte) dargestellt. Diese zeigen gute Übereinstimmung.

(KEIR et al. 1998). Aus dem beobachteten nahezu gleichen Verlauf der Atmosphären- und DIC-Isotopendaten läßt sich schließen, daß während der Kleinen Eiszeit die Meeresoberflächentemperatur im weltweiten Durchschnitt zwar leicht abkühlte, aber kaum um mehr als 1°C.

#### 4 Schlußfolgerungen

Sowohl die Korallen- als auch die Schwamm-  
daten verdeutlichen, daß schon vor der Ein-  
flußnahme des Menschen natürliche Klima-  
schwankungen auftraten, die möglicherweise

bis heute andauern. So begann ein langfristiger  
Temperaturanstieg stellenweise bereits deutlich  
vor dem industriellen CO<sub>2</sub>-Anstieg. Eine Tren-  
nung von natürlicher Variabilität und anthropo-  
genen Umweltveränderungen ist im weiteren  
Verlauf schwierig. Beim CO<sub>2</sub>-Gehalt waren  
dagegen die Schwankungen in historischer Zeit  
verschwindend gering, verglichen mit den  
anthropogenen Änderungen. Hier spielt sich ein  
Eingriff in den globalen Kohlenstoffkreislauf  
ab, wie er in der Erdgeschichte nur selten,  
möglicherweise noch nie stattgefunden hat.

#### Dank

Wir danken allen, die durch Diskussionen und tatkräftige Hilfe in Labors und im Gelände zu dieser Arbeit beigetragen haben. Besonderer Dank gebührt den Mitgliedern unserer Arbeitsgruppe, die an den hier dargestellten Studien direkt beteiligt waren: Gilbert Camoin (Aix- en-Provence), Anton Eisenhauer (Kiel), Georg Heiss (Bremen), Michael Joachimski (Erlangen), Helmut Lehnert (Oberottmarshausen), Joachim Reitner (Göttingen) und Gert Wörheide (Brisbane).

#### Literatur

- BÖHM, F., JOACHIMSKI, M.M., LEHNERT, H., MORGENROTH, G., KRETSCHMER, W., VACELET, J., DULLO, W.-CHR. (1996): Carbon isotope records from extant Caribbean and South Pacific sponges: Evolution of  $\delta^{13}\text{C}$  in surface water DIC.- Earth Planet. Sci Lett., 139, 291-303
- BÖHM, F., JOACHIMSKI, M.M., DULLO, W.-CHR., EISENHAUER, A., LEHNERT, H., REITNER, J., WÖRHEIDE, G. (2000): Oxygen isotope fractionation in marine aragonite of coralline sponges.- Geochim. Cosmochim. Acta, 64, 1695-1703
- BROECKER, W.S., PENG, T-H. (1982): Tracers in the sea.- 690 S., Palisades (Eldigio Press)
- BROECKER, W.S., MAIER-REIMER, E. (1992): The influence of air and sea exchange on the carbon isotope distribution in the sea.- Global Biogeochem. Cycles, 6, 315-320
- CHARLES, C.D., HUNTER, D.E., FAIRBANKS, R.G. (1997): Interaction Between the ENSO and the Asian Monsoon in a Coral Record of Tropical Climate.- Science, 277, 925-928
- COLE, J.E., DUNBAR, R.B., McCLANAHAN, T.R., MUTHIGA, N.A. (2000): Tropical Pacific Forcing of Decadal SST Variability in the Western Indian Ocean over the Past Two Centuries.- Science, 287, 617-619
- DRUFFEL, E.M., BENAVIDES, L.M. (1986): Input of excess CO<sub>2</sub> to the surface ocean based on  $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$  ratios in a banded Jamaican sclerosponge.- Nature, 321, 58-61
- DULLO, W.C. (1997): Die Plattformhangmorphologie der Pedro Bank in der Karibik.- Geol. Bl. NO-Bayern, 47, 303-320
- DUSTAN, P., JAAP, W., HALAS, J. (1976): The distribution of members of the Class Sclerospongiae.- Lethaia, 9, 419-420

- ETHERIDGE, D.M., STEELE, L.P., LANGENFELDS, R.L., FRANCEY, R.J., BARNOLA, J.M., MORGAN, V.I. (1996): Natural and anthropogenic changes in atmospheric CO<sub>2</sub> over the last 1000 years from air in Antarctic ice and firn.- Journ. Geophys. Res., D, 101, 4115-4128
- FAIRBANKS, R.G., EVANS, M.N., RUBENSTONE, J.L., MORTLOCK, R.A., BROAD, K., MOORE, M.D., CHARLES, C.D. (1997): Evaluating climate indices and their geochemical proxies measured in corals.- Coral Reefs, Suppl., 16, S93-S100
- FRANCEY, R.J., ALLISON, C.E., ETHERIDGE, D.M., TRUDINGER, C.M., ENTING, I.G., LEUENBERGER, M., LANGENFELDS, R.L., MICHEL, E., STEELE, L.P. (1999): A 1000-year high precision record of  $\delta^{13}\text{C}$  in atmospheric CO<sub>2</sub>.- Tellus, 51B, 170-193
- FRIEDLI, H., LÖTSCHER, H., OESCHGER, H., SIEGENTHALER, U., STAUFFER, B. (1986): Ice core record of the  $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$  ratio of atmospheric CO<sub>2</sub> in the past two centuries.- Nature, 324, 237-238
- GAGAN, M.K., CHIVAS, A.R., ISDALE, P.J. (1994): High-resolution isotopic records from corals using ocean temperature and mass-spawning chronometers.- Earth Planet. Sci. Lett., 121, 549-558
- GROVE, J.M. (1988): The Little Ice Age.- 498 S., London (Methuen)
- GRUBER, N., KEELING, C.D., BACASTOW, R.B., GUENTHER, P.R., LUEKER, T.J., WHALEN, M., MEIJER, H.A., MOOK, W.G., STOCKER, T.F. (1999): Spatiotemporal patterns of carbon-13 in the global surface ocean and the oceanic Suess effect.- Global Biogeochem. Cycles, 13, 307-335
- HANSEN, J., RUEDY, R., GLASCOE, J., SATO, M. (1999): GISS analysis of surface temperature change.- J. Geophys. Res., 104, 30997-31022
- HARTMAN, W.D., GOREAU, T.F. (1970): Jamaican coralline sponges: Their morphology, ecology and fossil relatives.- Symp. zool. Soc. London, 25, 205-243
- HEIMANN, M., MAIER-REIMER, E. (1996): On the relations between the oceanic uptake of CO<sub>2</sub> and its carbon isotopes.- Global Biogeochem. Cycles, 10, 89-110
- HEISS, G.A., CAMOIN, G.F., EISENHAUER, A., WISCHOW, D., DULLO, W-CHR., HANSEN, B. (1997): Stable isotope and Sr/Ca-signals in corals from the Indian Ocean.- Proc. 8th Int. Coral Reef Symp. II, , 1713-1718,
- HEISS, G.A., DULLO, W-CHR., JOACHIMSKI, M.M., REIJMER, J.J.G., SCHUHMACHER, H. (1999): Increased Seasonality in the Gulf of Aqaba, Red Sea, Recorded in the Oxygen Isotope Record of a *Porites lutea* Coral.- Senckenberg. maritima, 30, 17-26
- KEELING, C.D., MOOK, W.G., TANS, P.P. (1979): Recent trends in the  $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$  ratio of atmospheric carbon dioxide.- Nature, 277, 121-123
- KEELING, C.D., WHORF, T.P. (1999): Atmospheric CO<sub>2</sub> records from sites in the SIO air sampling network.- In: Trends - A compendium of data on global change. Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge National Laboratory, U.S. Dept. of Energy.  
<http://cdiac.esd.ornl.gov/trends/co2/contents.htm>
- KEIR, R., REHDER, G., SUESS, E., ERLENKEUSER, H. (1998): The  $\delta^{13}\text{C}$  anomaly in the northeastern Atlantic.- Global Biogeochemical Cycles, 12, 467-477
- KLEYPAS, J.A., BUDDEMEIER, R.W., ARCHER, D., GATTUSO, J-P., LANGDON, C., OPDYKE, B.N. (1999): Geochemical Consequences of Increased Atmospheric Carbon Dioxide on Coral Reefs.- Science, 284, 118-120
- LAZARETH, C.E., WILLENZ, P., NAVEZ, J., KEPPENS, E., DEHAIRS, F., ANDRÉ, L. (2000): Sclerosponges as a new potential recorder of environmental changes: Lead in *Ceratoporella nicholsoni*.- Geology, 28, 515-518

- LEDLEY, T.S., SUNDQUIST, E.T., SCHWARTZ, S.E., HALL, D.K., FELLOWS, J.D., KILLEN, T.L. (1999): Climate change and greenhouse gases.- EOS, 80/39, 453-458
- LEVITUS, S., ANTONOV, J.I., BOYER, T.P., STEPHENS, C. (2000): Warming of the World Ocean.- Science, 287, 2225-2229
- MANN, M.E., BRADLEY, R.S., HUGHES, M.K. (1999): Northern Hemisphere Temperatures During the Past Millennium: Inferences, Uncertainties, and Limitations.- Geophys. Res. Lett., 26, 759-762
- McCONNAUGHEY, T.A., BURDETT, J., WHELAN, J.F., PAULL, C.K. (1997): Carbon isotopes in biological carbonates: Respiration and photosynthesis.- Geochim. Cosmochim. Acta, 61, 611-622
- NOZAKI, Y., RYE, D.M., TUREKIAN, K.K., DODGE, R.E. (1978): A 200 year record of carbon-13 and carbon-14 variations in a Bermuda coral.- Geophys. Res. Lett., 5, 826-828
- REITNER, J. (1992): "Coralline Spongien". Der Versuch einer phylogenetisch-taxonomischen Analyse.- Berliner Geowiss. Abh., Reihe E, 1, 1-352
- SONNERUP, R.E., QUAY, P.D., MCNICHOL, A.P., BULLISTER, J.L. WESTBY, T.A., ANDERSON, H.L. (1999): Reconstructing the oceanic  $^{13}\text{C}$  Suess effect.- Global Biogeochem. Cycles, 13, 857-872
- SWART, P.K., MOORE, M., CHARLES, C., BÖHM, F. (1998): Sclerosponges May Hold New Keys to Marine Paleoclimate.- EOS, 79, 633-636
- TRUDINGER, C.M., ENTING, I.G., FRANCEY, R.J., ETHERIDGE, D.M., RAYNER, P.J (1999): Long-term variability in the global carbon cycle inferred from a high precision  $\text{CO}_2$  and  $^{13}\text{C}$  ice core record.- Tellus, 51B, 233-248
- WINTER, A., APPELDORN, R.S., BRUCKNER, A., WILLIAMS, E.H. JR., GOENAGA, C. (1998): Sea surface temperatures and coral reef bleaching off La Parguera, Puerto Rico (northeastern Caribbean Sea).- Coral Reefs, 17, 377-382
- WÖRHEIDE, G. (1998): The Reef Cave Dwelling Ultraconservative Coralline Demosponge *Astrosclera willeyana* LISTER 1900 from the Indo-Pacific.- Facies, 38, 1-88

## DISKUSSION:

## Meerestemperaturen und CO<sub>2</sub>-Geschichte der letzten Jahrhunderte - Rekonstruktionen mit Riffkorallen und corallinen Schwämmen

**KALLENBACH:** Sie haben uns gezeigt, daß Korallen und Schwämme nicht nur besondere ästhetische Reize besitzen, sondern auch exzellente Datenspeicher sind, die man hervorragend benutzen kann.

**TUFAR:** Ich wollte noch fragen, haben Sie auch Korallen und Schwämme aus der Tiefe, ca. 1800m Wassertiefe untersucht ?

**BÖHM:** Nein, haben wir nicht. Es gibt Arbeitsgruppen, die mit Hexakorallen arbeiten, bei den Schwämmen ist es ein Problem, die tiefsten Vorkommen sind nur bis ein paar hundert Meter Tiefe bekannt; ob es Tiefseebestände gibt, ist nicht bekannt.

**TUFAR:** Wir haben sie aus fast 3000m Tiefe geborgen

**BÖHM:** Coralline Schwämme oder Korallen ?

**TUFAR:** Kieselschwämme

**BÖHM:** Kieselschwämme enthalten leider keinen Kalk, den man für Kohlenstoffuntersuchungen nehmen kann. Sauerstoffisotope natürlich, aber wir haben bisher nur mit Karbonat gearbeitet.

**KERN:** Wie weit können sie aus diesen Schwämmen zurückrechnen ?

**BÖHM:** Die ältesten, die wir bis jetzt haben, sind etwa 600 Jahre alt, es gibt wahrscheinlich Schwämme, die 1000, ja vielleicht sogar 2000 Jahre alt sind, nur konnten wir davon noch keine bergen.

Es ist auch ein moralisch - ethisches Problem einen Schwamm, der solange gelebt hat, heraufzuholen. Für die Untersuchung müssen wir ihn ja töten.

Mit fossilen Vorkommen ist das Problem, daß sie in verborgenen Habitaten leben, außerdem

aus Aragonit bestehen, der sich leicht ändert. Man bekommt vielleicht aus dem Holozän, aus dem Pleistozän fossile Vorkommen, die aber aufgetaucht, meist diagenetisch verändert und damit für uns unbrauchbar sind.

**KERN:** Interessant wäre natürlich das Atlantikum oder die Klimateoptima um die Zeitenwende oder im Mittelalter. Es ist hier vielleicht nicht so relevant, aber gibt es Untersuchungen an den Stromatolithen in Australien, über Korrelationen von Temperatur und Kohlenstoffisotopen, und wie weit sind diese vergleichbar und spiegeln den CO<sub>2</sub>-Anstieg wieder, wie es jetzt ist und wie es damals im Atlantikum war

**BÖHM:** Da ist mir nichts bekannt. Kohlenstoffisotope sind immer ein Problem. Ich habe ja gezeigt, es gibt kaum Organismen, die sie unverändert einbauen. Von den Sauerstoffisotopen her ist es ein bißchen besser, einmal, weil Korallen häufiger sind, leichter zu finden sind, da gibt es beispielsweise Untersuchungen aus der letzten Zwischeneiszeit, aus dem Eem, auch aus dem Pleistozän gibt es Beispiele. Ich habe eine Meeresspiegelkurve gezeigt, die auf Korallenuntersuchungen basiert, aber Details kann ich dazu auch nicht sagen.

**KIKINGER:** Zum raschen Wachstum der Korallen: Wir haben im ersten Dia einen massiven Charakter gezeigt bekommen. Dieses Wachstum von mehreren Zentimetern im Jahr, ist das mehr auf flächig wachsende Korallenarten bezogen oder auch auf massiv wachsende ?

**BÖHM:** Das betrifft auch die massiven, deren normaler Zuwachs auch ein bis zwei cm pro Jahr beträgt.

**KALLENBACH:** Könnte man diese Methode auch in älteren Formationen gezielt Klimaentwicklungen aus den Korallenmaxima ableiten ?

**BÖHM:** Es gibt einzelne Untersuchungen, die ins Pleistozän zurückfallen. Bei älteren Vorkommen ist, wie gesagt, die Diagenese ein Problem, es gibt aber bei den Schwämmen Vorkommen von zum Teil identischen Gattungen, die heute noch leben, aus dem Perm oder Karbon, da gibt es Untersuchungen. Man bekommt aber von so einem Schwamm nur einen Ausschnitt von ein paar hundert Jahren und es ist die Frage, wie man so einen kurzen Schnappschuß aus so einem alten Zeitalter interpretieren kann, aber es gibt zumindest Ansätze und es scheint auch erfolversprechend

**RANK:** Was ist der Grund, warum ein Schwamm die Kohlenstoffisotopen nicht fraktioniert?

**BÖHM:** Die Bildungsweise seines Skelettes ist völlig anders als bei Korallen. Im Prinzip legt der Schwamm nur kleine Kristallkeime an und diese Keime machen dann ein syntaxiales Wachstum mehr oder weniger wie ein anorganischer Zement von selber weiter. Er nimmt dann kaum noch Einfluß auf diesen Kristallisationsprozeß.

**Diskussionsbeiträge von:**

*Dr. Florian BÖHM*  
*GEOMAR Kiel*  
*Christian-Albrechts-Universität*  
*Wischhofstr. 1-3*  
*D-24148 Kiel*

*Univ.Prof. Dr. H. KALLENBACH*  
*Am Sandwerder 42a*  
*D - 14109 Berlin*

*Dr. Armin KERN*  
*Freudenberg 9*  
*A - 9064 Pischeldorf*

*Univ.Prof. Hofr. Dr. Dipl.Ing. D. RANK*  
*OFPZ Arsenal*  
*Bereich Umwelt*  
*Faradaygasse*  
*A - 1030 Wien*

*Univ.Prof. Dr. W. TUFAR*  
*Philipp - Universität Marburg*  
*Fachbereich Geowissenschaften*  
*Hans - Meerwein - Straße*  
*D - 35032 Marburg/Lahn*

*Dr. R. KIKINGER*  
*Österr. Naturschutzbund*  
*Senftenbergeramt 13*  
*A - 3541 Senftenberg*

Barbara-Gespräche Payerbach 1998	Band 5	"Abfallentsorgung aus erdwissenschaftlicher Sicht" "Klima - Entwicklung"	Seite 233 - 240	Payerbach 2001
-------------------------------------	--------	---	-----------------	-------------------

# BARBARA-GESPRÄCHE

## Payerbach 1998

Maare und Eiskerne als Zeugen des Klimawandels

Jörg F. W. NEGENDANK



Payerbach,  
17. September 1998

**Anmerkung der Redaktion:**

Da das Originalmanuskript der Langfassung zum Zeitpunkt der Drucklegung nicht vorgelegen ist, findet hier die beim Vortrag aufgelegte Kurzfassung Verwendung.

*Univ.-Prof. Dr. Dipl.-Geol. Jörg F. W. NEGENDANK*

*GeoForschungsZentrum Potsdam*

*Aufgabenbereich 3 "Struktur und Evolution der Lithosphäre"*

*Telegrafenberg*

*14473 Potsdam*

*&*

*Universität Potsdam*

*Institut für Geowissenschaften*

*Postfach 60 15 53*

*14415 Potsdam*

# Maare und Eiskerne als Zeugen des Klimawandels

Jörg F. W. NEGENDANK

*Kurzfassung*

Unter Klima wird das Integral der Wettererscheinungen über einen Zeitraum von ca. 30 Jahren bis zu einem Monat verstanden, das den mittleren Zustand der Atmosphäre an einem bestimmten Ort der Erdoberfläche charakterisiert.

Will man also Klima und Klimavariabilitäten verstehen, so muß man verlässliche Zeitachsen entwickeln, auf denen man die Änderungen des Klimas nach Dauer und Intensität gliedert. Klimabeobachtungen der ca. letzten 150 Jahre können dabei auf physikalische Meßgrößen zurückgreifen, während für längere Zeiträume nur geo-biowissenschaftliche Archive in Frage kommen, die uns Näherungswerte, sog. Proxies, liefern.

Daran werden Periodenlänge und Amplitude von Klimawechseln – des Klimawandels – dokumentiert. Den einzelnen indirekten Meßwerten werden über z. T. komplexe Transfergleichungen physikalische und chemische Kenngrößen des Klimas zugeordnet, Verfahren, die allerdings – vor allem auf dem Festland – erheblich weiterzuentwickeln sind und die sowohl im Ozean, auf dem Festland (Seesedimente) und in Eiskernen eines enormen Arbeitsaufwandes von verschiedenen Wissenschaftsdisziplinen bedürfen.

Maarseesedimente und Eiskerne mit jährlicher und sogar jahreszeitlicher Auflösung stellen dabei zwei wichtige Archive dar, enthalten sie doch auf Kalenderskalenbasis unterschiedliche Klimainformationen wie u. a. die ehemalige Zusammensetzung der Atmosphäre bzw. abgeleitete Klimazustandsgrößen über biologische (Diatomeen, Pollen etc.) und geochemische etc. Parameter.

Für die Nutzung beider Archive zum Studium des Klimawandels gilt als Grundvoraussetzung,

daß jedem Archiv eine absolute Zeitskala zugrunde liegt und daß die Zeitgleichheit beider Archive gewährleistet ist.

Folgende Voraussetzungen müssen für eine Klimarekonstruktion erfüllt sein:

- Synthetische, absolute Zeitskala für alle Archive,
- Erstellung eines Multiparameternetzwerkes für jede Lokalität,
- Ableitung von Klimazustandsgrößen (Temperatur, Niederschlag, Zusammensetzung der Atmosphäre etc.) aus Multiparameternetzwerk,
- Variabilitäten der Parameter und Proxies,
- Modellierung des Klimas auf Jahresbasis.

Aus dem Vergleich der Rekonstruktionen des Klimawandels, der sich in den Maarsedimenten und Eiskernen ablesen läßt, ist auf lokale, regionale und globale Klimateinflüsse rückzuschließen. Hierbei hat sich gezeigt, daß die in den Warvendicken (Jahreslagen) zu beobachtenden Periodizitäten von 11, 22, 88, 208 und 491 Jahren sich in den Eiskernen in Form der  $^{14}\text{C}$ - und  $^{10}\text{Be}$ -Werte widerspiegeln und auf solare Einflüsse deuten. Die Hochauflösung beider Archive erlaubt zugleich die zeitliche Einengung von Klimatrends, -fluktuationen, -oszillationen und -schwankungen. So ist u. a. der Umschwung in die Jüngere Dryas in Mitteleuropa - einem Klimawechsel zu tundraischer Vegetation nach der ersten Erwärmung im Spätglazial - innerhalb von nur 25 – 30 Jahren – also innerhalb einer Generation - abgelaufen. Die Dauer dieses Kälterückschlages ist zugleich mit 1070 Jahren (Eifelmaare) in Mitteleuropa zu bestimmen.

Das Verhalten des 11,03 Jahre dauernden solaren Zyklus (Schwabe-Zyklus) in Holzmaarsedimenten (Eifel) zeigt einen charakteristischen Phasensprung einer halben Zyklenlänge bei 9650 cal. BP, was im GISP 2- Kern in <sup>18</sup>O-Werten zwischen 9700 und 9600 cal. BP

beobachtet werden kann. Das zeigt eine gute Übereinstimmung beider Jahreschronologien.

Diese Ergebnisse sind zugleich Basis für die Beurteilung anthropogener Einflüsse vor dem Hintergrund natürlicher Klimavariationen in den letzten 10.000 – 15.000 Jahren.

## DISKUSSION

## Maare und Eiskerne als Zeugen des Klimawandels

KALLENBACH: Es ist imponierend zu sehen, mit welchem Aufwand Sie in der Lage sind, ihre Datenträger zu enträtseln. Sie haben sehr gut dokumentiert, welche Probleme damit verbunden sind, aber auch welche Aussagekraft in diesen Daten liegt.

KERN: Meine erste Frage betrifft das Atlantikum, das ja eine wesentlich längere Zeitdauer gehabt als die "kleine Eiszeit". Inwiefern gibt es auch andere Ursachen, die mitspielen könnten, inwieweit sieht es mit erhöhten Spreading-Raten über den CO<sub>2</sub>-Eintrag aus, also eine Übersättigung der Meere, und inwiefern gibt es da von der Nordhalbkugel zur Südhalbkugel große regionale Unterschiede, oder ist es sehr global ausgeprägt?

Meine zweite Frage. Haben Sie schon Erkenntnisse über die im August vorgenommene dritte Bohrung? Die war ja notwendig, weil Amerikaner und Dänen zu verschiedenen Ergebnissen an der Basis gelangt sind. Ist das schon ausgewertet?

NEGENDANK: Sie meinen auf das Ehm bezogen. Soviel ich weiß, sind sie dabei, aber was herausgekommen ist, kann ich nicht sagen, da bin ich nicht informiert, ich habe auch Herrn WIEDER (?) ...*unverständlich*... nicht mehr getroffen.

Der untere Teil ist jedenfalls nicht korrelierbar, deshalb die neue Bohrung. Klar ist jedenfalls, daß man mit dem unteren Teil sehr vorsichtig umgehen muß, die starken Schwankungen, die man hier interpretiert hat, scheinen nicht existent zu sein. Das war übrigens auch das Argument aller Kollegen, die auf dem Kontinent ...*unverständlich*... gearbeitet haben, denn so extreme Schwankungen hat man nicht gefunden.

KERN: Paßt der CO<sub>2</sub>-Eintrag im Atlantikum in die Sonnenfleckenzyklen hinein, kann man das in irgendeiner Weise herausfiltern?

NEGENDANK: Man muß sich auf dieser Grafik im Optimum des Holzäns eine endlose Zahl von ...*unverständlich*... -Zyklen (?) denken. Wir wissen also relativ genau über die ...*unverständlich*... Bescheid. Dann wird es in den höheren Bereichen schwierig, denn da kommt das hinzu, was der Herr GERCHÉ (?) hinzuholen müssen, der jetzt nämlich rechnen muß, was wir prophezeit haben, d.h. die Präzessionsunterschiede. Wir können daher über die Längen entsprechend Kalt- und Warmwasser bisher noch gar nichts sagen denn da fehlt die Kombination von entsprechenden Großperiodizitäten, die sich in Einzelperiodizitäten auflösen. Das ist das nächste, was wir zu machen haben.,

Ich muß das jetzt ganz kurz erläutern: Die Großforschungseinrichtung nennt sich jetzt Helmutszentren (?), ...*unverständlich*... da sind fünf Archivgruppen und drei Modellierungsgruppen. Wir haben uns zusammengefunden um über die letzten 10000 Jahre Jahr für Jahr die Modelle Echern 3 und 4 zu nutzen und um mit Modellierungssystemen festzustellen, woher kommen die Variabilitäten und wer ist eigentlich dafür verantwortlich. Und zwar ist Eis einbezogen, marine Profile, Seeprofile, Baumringprofile und alle anderen Parameter, Isotope etc. und vielleicht können wir Ihnen in drei Jahren eine Antwort geben. Jetzt, muß ich ehrlich sagen, kann man zwar spekulieren, aber im Grunde ist es uns unklar.

AUGUSTIN: Welchen Wassergehalt haben die Bohrkerne aus den Maaren?

NEGENDANK: Im oberen Teil bis 30%, aber das geht hinunter, ich müßte nachsehen. Die Kompaktion haben Sie in den obersten 2m.

AUGUSTIN: Nur 2 Meter ?

NEGENDANK: Ja, über 2m eine normale Kompaktion, im Grunde entsprechend der Feuchtigkeitsrate, und das geht bis etwa 60m und dann kommt eine weitere Kompaktion.

AUGUSTIN: Und wurde mit diesem eingeschlossenen Wasser etwas zu tun versucht?

NEGENDANK: Ja, wir haben Porenwasserstudien an der Sediment/Wasser-Grenze gemacht. Wir stechen Dialysezellen 1-2m tief und lassen sie drin, zum Teil ein ganzes Jahr, mit Computer etc., und schauen uns die entsprechenden Porenwasserströme an. Das haben wir also entsprechend gemacht, aber nicht in tieferen Bereichen. Die Porenwässer ab 2m Tiefe haben wir bisher nur in einer Form untersucht, nämlich auf Bleisotope, weil wir ja römisches Blei finden, und das haben wir in bestimmten Lagen identifiziert. Diese Spuren römischer Besiedlung finden wir sehr schön in ganz Europa. Da können wir mit dem Isotopenmuster zeigen, daß das Blei nicht von weit her ist, sondern es ist in der Eifel gewonnen worden.

AUGUSTIN: Wird damit bewiesen, daß dieses Porenwasser eigentlich nicht austauschbar ist, es bleibt ziemlich lange stehen.

NEGENDANK: Im unteren Bereich ja, aber im oberen Bereich ist einwandfrei ein Austausch auch mit Phosphatverlagerung unten nach oben, und wenn der See flach ist und die Temperatur wechseln kann, dann gibt es ganz klare Sulfatreduktion, Oxidation und so weiter, da gibt es sehr komplexe Vorgänge. Wenn ein See 3-4 m tief ist und sich im Jahr erwärmt, haben wir ganz extreme Profile, da müßte ich Ihnen die Arbeit von Herrn SCHEDLER (?) schicken, der das über mehrere Jahre bearbeitet hat.

AUGUSTIN: Wir haben Erfahrung mit wesentlich jüngeren Ablagerungen in einem Staudamm bei Aschach, da kam es zur Sedimentablagerung bis 20m in dreißig Jahren. Wir haben ebenfalls gestochen und das Porenwasser untersucht, Dr. Rank könnte darüber mehr sagen. In diesen 30 Jahren gab es jedenfalls keinen Austausch.

NEGENDANK: Das ist ganz interessant. Wir haben eine Phosphatverlagerung im oberen Teil, aber nicht im tiefen Teil. Man kann natürlich auch Rückschlüsse ziehen daraus, sie sehen ja, unsere Warven haben sich - man sieht es an der Algenblüte - nicht geändert, aber in der Herbstlage kommt dann Vivianit, und der kommt oft diagenetisch, und da ist der Punkt, wo wir die Phosphatverlagerung haben entsprechend entweder an die Sedimentoberfläche oder in die untere Warve.

PREISINGER: Sie sagten, Sie konnten in den süditalienischen Maaren Vulkanausbrüche feststellen; können sie da auch konkret Vulkanausbrüche wie z.B. den auf Santorin vor 3500 Jahren zuordnen ?

NEGENDANK: Wir können die italienische Profile mittlerweile sehr gut zuordnen, da gibt es eine Doktorarbeit, die diesen Sachen sehr genau nachgegangen ist. Ob der Santorin dabei ist, suchen wir gerade..

RIEHL-H.: In Grönland ist er nachgewiesen.

PREISINGER: Da gibt es aber eine Streitfrage. Die Ägyptologen sagen, daß die Datierung von Grönland um 150 Jahre falsch ist.

NEGENDANK: Da sollte man immer die Leute zuziehen, die sich da auskennen, weil das ja doch ein sehr kompliziertes Feld ist.

PREISINGER: Meine Frage ist, ob Sie es eindeutig hier zuordnen können. Mit Elektronen (?) kann man natürlich keine eindeutige Zuordnung treffen. Man kann zwar sagen ...*unverständlich*... aber man kann nicht sagen, ob es vom ...*unverständlich*... oder aus dem Mittelmeerraum gekommen ist..

NEGENDANK: Zum Beispiel die blauen Positionen am Diagramm, Mercato, Avellino, Palleno usw., die können wir zuordnen, das sind Ausbrüche. Wir sind gerade mit italienischen Kollegen dabei einzelne Ausbrüche aus allen Vulkanfeldern mehr oder weniger zu identifizieren. Hier sind beispielsweise alle Ausbrüche über die letzten 30.000 Jahre, die aus dem Vesuv kommen.

PREISINGER: Meine zweite Frage ist, daß kurzzeitige Klimaschwankungen um 10 ...*unverständlich*... Natürlich ist nach der Eiszeit der Meeresspiegel stark gestiegen, aber

nicht kontinuierlich, sondern zwischen 11.000 und 9.000 Jahren höchstens um 10-12m gestiegen, aber zwischen 9000 und 8000 ist er innerhalb einer kurzen Zeitspanne um 80m gestiegen, im ganzen Mittelmeerraum und auch im Atlantik. Hat man da irgendeine Zuordnung und Erklärung, warum ein Temperaturanstieg und ein Abschmelzen des Eises in so einer kurzen Zeitspanne erfolgt ist, gerade in diesem Zeitraum, denn die Eiszeit war ja schon vorher zu Ende.

NEGENDANK: Der Bereich beinhaltet den jüngeren Dryas, da bezieht es sich ja nach dem Modell von Brügge darauf, daß es einen entsprechenden Süßwassereinbruch durch das Abschmelzen des Nordmeeres gegeben hat. Das ist die jüngere Dryas zwischen 12.600 und 11.000 und da haben wir die relativ schnellen Wechsel, wobei ja unklar ist, ob diese jüngere Dryas auf der ganzen Erde zu finden ist. Auf der Nordhalbkugel ist sie ja mehr oder weniger belegt, aber ich muß dazu sagen, manchmal sieht man die Zeitzuordnung nicht richtig. Man identifiziert ja die jüngere Dryas jetzt indirekt und nicht direkt. Die andere Frage ist jetzt die des großen Abschmelzens, da müßte ich Herrn HAY fragen, der ja auch gezeigt hat, bei 65° entsprechend, wo wir die Eisausdehnung haben, und dann entsprechend das Abschmelzen. Dazu können wir faktisch gar nichts sagen.

KALLENBACH: Gibt es da nicht auch ein Problem, was den organischen Inhalt angeht? Wenn wir eine Klimaänderung haben, bedeutet das ja, daß die organische Sache jetzt langsam nachzieht. Haben wir nicht sozusagen eine Differenz in der Beobachtung bei Ihren Kernen gegenüber der tatsächlichen Klimaentwicklung?

NEGENDANK: Das ist eine schwierige Frage, die wir immer wieder gestellt bekommen und auch immer wieder versuchen anzugehen. Es ist erstaunlich, aber es geht relativ schnell. Am schnellsten kommen die Käfer, und dann geht es auch mit der Vegetation relativ schnell. In unseren Seen sind ja sowieso Algenblüten, die sind da. Wenn sie Bäume nehmen, da haben sie natürlich eine große Streuung.

KALLENBACH: Das heißt, das muß man immer berücksichtigen, ob man unterschiedliche Informationen aus Pollen bekommt.

NEGENDANK: Nun ist immer die Frage, wenn man Pollen nimmt, wie weit ist der Flug. Dann ist noch eine andere Frage: sind es lichte Bestände oder nicht? Da müßte man die Vegetationsdynamik berücksichtigen

KERN: Zu den Meeresspiegelschwankungen müßte man den Sibirischen Eisstausee bzw. ähnliche Ereignisse wie Snake River, Utah heranziehen, bei denen jede Menge Süßwasser ins Meer gekommen ist, und da wird es natürlich zu lokalen Klimaveränderungen und so weiter gekommen sein. Man weiß ja auch, daß beispielsweise schon große Eisplatten den Golfstrom sperren können oder durch ihre Reflexion Einfluß auf das regionale Klima nehmen, dann erst recht solche Ereignisse

RIEHL-H.: Bleiben Sie mit Ihrer Chronologie nur in den obersten Teilen und wieweit haben Sie die Profile in Messel in ihre Überlegungen einbezogen.

NEGENDANK: Wir können heute 70 m erbohren und wir sind gerade dabei ein Gerät für weitere Tiefen zu entwickeln. Das ist ein technisches Problem, es gibt niemanden auf der Welt, der das richtig stechen kann. Es wird zwar von einem Seilkernverfahren behauptet, damit könnte man stechen und dann rotieren, aber der Kern innen drin dreht sich trotzdem. Deshalb hängen wir dato in den oberen Längen fest, das Gerät gibt es einfach noch nicht.

Jetzt zu Messel: das ist Eozän: Da haben wir ein Maar in der Eifel entdeckt, das fast schöner ist als Messel und auch ein berühmter Fundpunkt geworden ist, denn sie haben dort Affen, Primaten, was bisher in Messel nicht der Fall war. Wir suchen dort Periodizitäten. In den Folgen von Eckfeld haben wir Periodizitäten von 5,5 Jahren. Was das bedeutet, wissen wir nicht, aber wir haben eine jährliche Sedimentation, das können wir sehr schön zeigen, und entsprechend im Eozän die Profile. Wir haben dort ganz neue Bohrungen, und wollen das noch ganz speziell untersuchen, allerdings mit dem technischen Problem, daß bei den Kernen nur ein Stück von 3m für unsere Zwecke wirklich verwertbar ist.

In Maaren Erdgeschichte zu machen seit dem Tertiär, das geht, es müssen nur hunderte von Personen sein, die mitmachen. Uns hat natürlich interessiert, weil in unserem Areal im Eozän tropisches Klima herrschte, und ob da noch eine jährliche Schwankung oder ein solares Signal darin ist, und es scheint so zu sein. So ähnlich ist es übrigens in tropischen Seen, wir haben da in China gebohrt, da haben wir ähnliche Ergebnisse.

**KERN:** Das Tote Meer wurde erwähnt. Wie weit reicht das Tote Meer zurück, wie weit haben Sie gebohrt ?

**NEGENDANK:** Im Toten Meer haben israelische Kollegen von 20 - 70.000 Jahren eine jährliche Abfolge erbohrt. Wir haben zum erstenmal im Zentrum des Toten Meeres mit

einem Spezialgerät gebohrt, mit dem wir Salzlagen durchschlagen. Wir haben einen Kern von 3,65m geborgen. Darin finden wir einen Wechsel von Salzen und jahresgeschichtlichen ...*unverständlich*... Evaporiten, jeweils klastische Lagen, Aragonit, Gips, wir haben das genau untersucht und Periodizitäten 11, 22, 88, 210 Jahre, bestimmt.

Nachdem der Seespiegel jährlich um 80cm sinkt, haben wir jetzt am Fuße, an der Westseite des Toten Meeres mit israelischen Kollegen nach unserem System bis zu 30m gestochen. In der jungen Dryas ist eine Salzlage mit dem ganzen Profil und das haben wir in Jahresschichten. Also zeigt auch ein arides Profil dieselben Informationen wie ein europäisches.

### ***Diskussionsbeiträge von:***

*Dr. K. AUGUSTIN*  
*OPFZ Arsenal*  
*Bereich Umwelt*  
*Faradaygasse*  
*A - 1030 Wien*

*Univ.Prof. Dr. H. KALLENBACH*  
*Am Sandwerder 42a*  
*D - 14109 Berlin*

*Dr. Armin KERN*  
*Freudenberg 9*  
*A - 9064 Pischeldorf*

*Univ.Prof. Dir. Dr. Dipl.Geol.*  
*Jörg F. W. NEGENDANK*  
*GeoForschungsZentrum Potsdam*  
*Telegrafenberg*  
*14473 Potsdam*  
 &  
*Universität Potsdam*  
*Institut für Geowissenschaften*  
*Postfach 60 15 53*  
*14415 Potsdam*

*Univ.Prof. Dr. A. PREISINGER*  
*TU Wien*  
*Karlsplatz 13*  
*A - 1040 Wien*

*Dr. Georg RIEHL - H*  
*Hauptstraße 70*  
*A - 2801 Katzelsdorf*

Barbara-Gespräche Payerbach 1998	Band 5	"Abfallentsorgung aus erdwissenschaftlicher Sicht" "Klima - Entwicklung"	Seite 241 - 258 Abb. 1-11	Payerbach 2001
-------------------------------------	--------	---	------------------------------	-------------------

# BARBARA-GESPRÄCHE

## Payerbach 1998

Isotopenverhältnisse im natürlichen Wasserkreislauf -  
Indikatoren für Klimaänderungen

D. RANK

W. PAPESCH



Payerbach,  
17. September 1998

**INHALT**

Zusammenfassung / Abstract / Streszczenie	243
1 Einleitung	244
2 Niederschlag	245
3 Oberflächen- und Grundwässer	250
4 Schlußfolgerungen und Ausblick	253
Literatur	254
Diskussion	257

*Anschrift der Verfasser:*

*wHofr. Univ.Prof. Dr. Dieter RANK*

*Dr. Dipl.Ing. W. PAPESCH*

*ARCS Seibersdorf*

*Umwelt - und Lebenswissenschaften*

*Umweltforschung*

*Faradygasse 3 Obj. 214*

*A - 1030 Wien*

# Isotopenverhältnisse im natürlichen Wasserkreislauf - Indikatoren für Klimaänderungen

Dieter RANK  
Wolfgang PAPESCH

## Zusammenfassung

Daß sich die Isotopenzusammensetzung in den Niederschlägen bei starken Klimaänderungen signifikant ändert, ist seit langem bekannt. Dieses Isotopensignal wird sowohl in der Paläoklimatologie als auch in der Hydrologie erfolgreich als Untersuchungsinstrument eingesetzt. Neuer hingegen ist die Erkenntnis, daß auch mittelfristig – im Dekadenbereich – deutliche Änderungen im langjährigen  $^2\text{H}$ - bzw.  $^{18}\text{O}$ -Mittelwert der Niederschläge auftreten. Bis vor ungefähr fünfzehn Jahren ging man davon aus, daß im Niederschlag – der Eingangsgröße für die Isotopenhydrologie – die Gehalte der stabilen Isotope ( $^2\text{H}$ ,  $^{18}\text{O}$ ) im langjährigen Schnitt weitgehend konstant bleiben. Die Weiterführung der Niederschlagsmeßreihen brachte die Erkenntnis, daß die Zeitreihen einen Langzeittrend enthalten. Es fällt dabei auf, daß der zeitliche Verlauf der Isotopenmeßreihen bei den verschiedenen Beobachtungsstationen in Österreich nicht einheitlich ist. Besonders ausgeprägt sind die Änderungen in den letzten 30 Jahren im Gebirge. Den wichtigsten Einfluß haben dabei zeitliche Änderungen der Lufttemperatur, aber auch andere Einflüsse, wie die Änderung der zeitlichen und örtlichen Niederschlagsverteilung spielen eine Rolle.

## Abstract

### *Isotope Ratios In The Natural Water Cycle - Indicators Of Climatic Changes*

*It has been well known since many years that the isotopic composition in atmospheric precipitation is significantly changing during pronounced climatic fluctuations. This isotope signal has been successfully used as an investigation tool in paleoclimatology as well as in hydrology. Somewhat newer is the finding that there exist also distinct long-term - decadal - changes in the  $\delta^2\text{H}$  and  $\delta^{18}\text{O}$  mean values of precipitation. Up to about 15 years ago, the long-time means of the stable isotope contents of precipitation were thought to be more or less constant. However, the continuation of the isotope records showed long-term fluctuations. It is remarkable, that the isotopic trend is not uniform at different precipitation sampling stations. During the last 30 years, the changes have been more pronounced in the mountains. Temporal changes of air temperature have the most important influence, but also other parameters play a certain role, like temporal and spatial fluctuations of the amount of precipitation.*

## Streszczenie

### *Zmienność proporcji izotopów w naturalnym obiegu wód jako wskaźnik przemian klimatycznych*

*To, że skład izotopowy w opadach atmosferycznych znacznie się zmienia w zależności od przemian klimatycznych jest znane od dawna. Te znaki izotopowe są stosowane jako instrument badawczy zarówno w paleoklimatologii jak i w hydrologii. Nowym odkryciem jest natomiast to, że także w krótszych okresach czasu – w dekadach – następują znaczne zmiany średniej zawartości stabilnych izotopów  $^2\text{H}$  i  $^{18}\text{O}$  w opadach. Jeszcze przed mniej więcej piętnastoma laty zakładano, że w opadach – wielkości początkowej w hydrologii izotopowej – wieloletnia średnia zawartość izotopów ( $^2\text{H}$ ,  $^{18}\text{O}$ ) pozostaje praktycznie niezmienna. Kontynuowanie cyklu pomiarów wykazało, że przedziały czasu*

*zawierają długookresowe tendencje. Okazuje się, że różnice w czasowych zmianach wyników pomiarów izotopowych na terenie Austrii uzależnione są od położenia stacji obserwacyjnych. Szczególnie widoczne są zmiany w ostatnich 30 latach w rejonach górskich. Największy wpływ na to mają okresowe zmiany temperatury powietrza, nie bez znaczenia są też takie czynniki jak czasowe i przestrzenne zmiany w rozkładzie opadów.*

## 1 Einleitung

Neben dem "leichten" Wassermolekül  $^1\text{H}_2^{16}\text{O}$  tragen die "schweren" Moleküle  $^1\text{H}^2\text{H}^{16}\text{O}$  und  $^1\text{H}_2^{18}\text{O}$  mit ungefähr 0,32 bzw. 2,0 ‰ zur Zusammensetzung der natürlichen Wässer bei (MOSEK und RAUERT 1980). Da das aus schweren Molekülen bestehende Wasser einen geringeren Dampfdruck hat als leichtes Wasser, sind Isotopentrennprozesse überall dort im Wasserkreislauf zu erwarten, wo Phasenumwandlungen - Kondensieren, Erstarren, Verdampfen usw. - stattfinden oder andere physikalisch-chemische Prozesse, bei denen die Masse eine Rolle spielt. Das Ausmaß der Isotopenfraktionierung ist dabei umso größer, je niedriger die Temperatur bei der Phasenumwandlung ist.

Die Isotopenfraktionierung führt in der Folge zu einer örtlichen und zeitlichen Abhängigkeit des Isotopengehaltes in den Niederschlägen und den aus ihnen gebildeten Oberflächen- und Grundwässern. Tatsächlich findet man in natürlichen Wässern für das  $^1\text{H}^2\text{H}^{16}\text{O}$ -Molekül eine Schwankungsbreite von 0,18 bis 0,34 ‰ und für  $^1\text{H}_2^{18}\text{O}$  eine solche von 1,88 bis 2,01 ‰. Die Temperaturabhängigkeit der Isotopenfraktionierung ist dabei die Grundlage für klimatologische Aussagen aus den Isotopenverhältnissen in den Wässern des natürlichen Kreislaufes und in geologischen Archiven.

Daß sich die Isotopenzusammensetzung in den Niederschlägen bei starken Klimaänderungen - z. B. während der Eiszeit - signifikant ändert, ist seit langem bekannt. Dieses Isotopensignal wird sowohl in der Paläoklimatologie als auch in der Hydrologie erfolgreich als Untersuchungsinstrument eingesetzt.

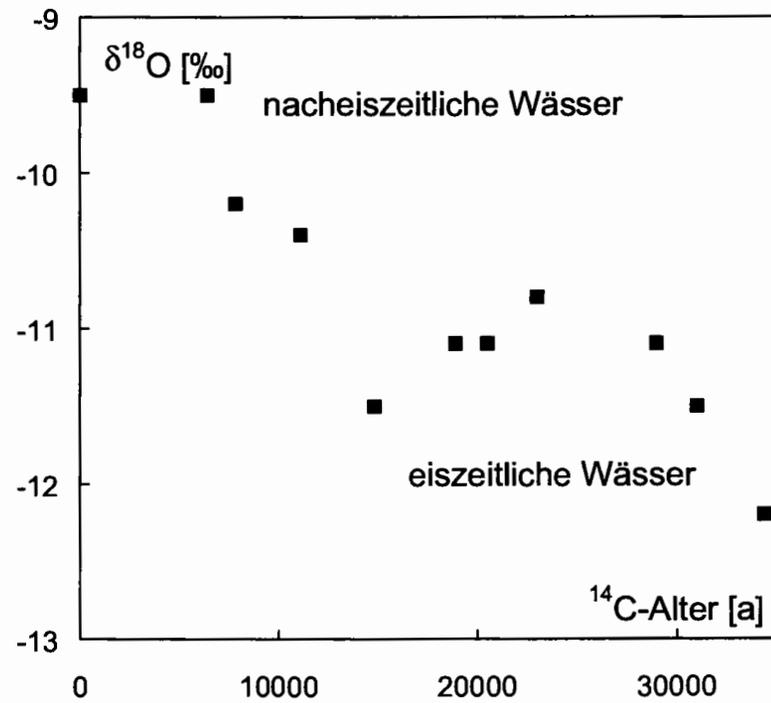
Beispielsweise können alte - eiszeitliche - Grundwässer im Neusiedlerseegebiet, in dem der isotopenhydrologische Höheneffekt keine

Rolle spielt, leicht an ihrem niedrigen  $^{18}\text{O}$ -Gehalt erkannt werden (Abb. 1). Der  $^{18}\text{O}$ -Wert dieser alten Wässer liegt bis zu 2,5 ‰ niedriger als der von Grundwässern, die aus aktuellen Niederschlägen gebildet werden. Marine Sedimente sind wegen der verhältnismäßig homogenen Bedingungen in den Weltmeeren die idealen Zeugen für die langfristige Klimaentwicklung der Erde. In ihnen bilden sich die Isotopenverhältnisse des Meerwassers als Funktion der Temperatur ab. Für die Klimaschwankungen im Pleistozän haben sich die polaren Eiskappen als ausgezeichnete Umweltarchive erwiesen. Für paläoklimatische Untersuchungen in Kontinentalebenen mittlerer und niedriger Breiten kommen vor allem Seesedimente in Betracht. Abb. 2 gibt eine Übersicht über die durch Klimaeinflüsse verursachten Schwankungen der Isotopenverhältnisse, wie sie in Umweltarchiven erhalten sind.

Neuer ist die Erkenntnis, daß auch mittelfristig - im Dekadenbereich - deutliche Änderungen im langjährigen  $^2\text{H}$ - bzw.  $^{18}\text{O}$ -Mittelwert der Niederschläge auftreten.

Bis vor ungefähr 15 Jahren ging man davon aus, daß im Niederschlag - der Eingangsgröße für die Isotopenhydrologie - die Gehalte der stabilen Isotope ( $^2\text{H}$ ,  $^{18}\text{O}$ ) im langjährigen Schnitt weitgehend konstant bleiben. Die Weiterführung der Niederschlagsmeßreihen brachte aber die Erkenntnis, daß die Zeitreihen einen „Langzeittrend“ enthalten (Abb. 3, RANK 1993).

Eine systematische Verfolgung der Isotopenzusammensetzung in meteorischen Wässern - Niederschlag und atmosphärischem Wasserdampf - kann helfen, den Zusammenhang zwischen den Niederschlägen und den Hauptfaktoren, die die meteorologischen Verhältnisse und das Klima steuern, zu verstehen. Dies ist auch eine wichtige Voraussetzung für eine genauere Interpretation der Isotopendaten im Rahmen paläoklimatischer Untersuchungen.



**Abb. 1:**  $^{18}\text{O}$ -Gehalt von Tiefengrundwässern im Neusiedlerseegebiet in Abhängigkeit vom  $^{14}\text{C}$ -Alter (Daten aus BOROVIČZÉNY et al. 1992, bezogen auf einen  $^{14}\text{C}$ -Anfangsgehalt von 85 % modern, unkorrigiert).

Der  $^{18}\text{O}$ -Gehalt wird als Relativwert zu einem Standard (V-SMOW, mittleres Meereswasser) angegeben:

$$\delta^{18}\text{O} = \frac{R_{\text{Probe}} - R_{\text{Standard}}}{R_{\text{Standard}}} \cdot 1000 (\text{‰})$$

$R_{\text{Probe}}$  und  $R_{\text{Standard}}$  sind darin die Isotopenverhältnisse  $[\text{O}^{18}]/[\text{O}^{16}]$  in Probe und Standard.

## 2 Niederschlag

Die Temperaturabhängigkeit der Isotopenfraktionierung führt zu einer Abhängigkeit des Isotopengehaltes der Niederschläge von der Jahreszeit. Der Jahresgang der Monatsmittelwerte zeigt im allgemeinen ein Minimum im Winter und ein Maximum im Sommer. Die Isotopengehalte der Einzelniederschläge können davon stark abweichen, bedingt durch den jeweiligen klimatischen Zustand während des Niederschlagsereignisses. Selbst innerhalb ein und desselben Ereignisses treten Änderungen der Isotopenverhältnisse auf, beispielsweise überstreicht der  $^{18}\text{O}$ -Gehalt des Niederschlagswassers während einer Starkregenperiode im August 1985 einen Bereich in der Größen-

ordnung der jahreszeitlichen Schwankung der  $^{18}\text{O}$ -Monatsmittelwerte (Abb. 4).

Maßgebend hierfür ist neben möglichen klimatischen Änderungen während des Ereignisses auch die Veränderung der Isotopenverhältnisse in der verbleibenden Luftfeuchtigkeit mit zunehmender Ausregnung (Mengeneffekt).

Schaltet man in den Isotopenganglinien den Einfluß der Ereignis- und jahreszeitlichen Schwankungen durch Bildung langjähriger Mittel aus, so treten deutlich Langzeittrends in den Niederschlagsreihen hervor (Abb. 3). Der zeitliche Verlauf der Isotopenmeßreihen bei den verschiedenen Beobachtungsstationen in Österreich ist dabei nicht einheitlich. Die Schwankungen sind bei den Gebirgsstationen

(Villacher Alpe, Patscherkofel) in den letzten 30 Jahren besonders ausgeprägt (ungefähr 1‰). Die Isotopendaten in Abb. 3 weisen weiters auf die Abhängigkeit des Isotopengehaltes der Niederschläge von der orographischen Höhe hin (Höheneffekt, siehe z.B. MOSER und RAUERT 1980) sowie auf den Einfluß der Herkunft der feuchten Luftmassen. Von Mittelmeerluftmassen beeinflusste Stationen im Süden Österreichs (Villacher Alpe, Graz) zeigen deutlich höhere  $^{18}\text{O}$ -Gehalte als die von Atlantikluftmassen beeinflussten Stationen. Hauptursache dafür ist der längere Weg der feuchten Luftmassen vom Atlantik über den Kontinent, wobei durch das sukzessive Ausreg-

nen sich in der verbleibenden Luftfeuchtigkeit die leichten Moleküle anreichern (Kontinentaleffekt).

Ein Vergleich des Verlaufes der Lufttemperatur mit dem des  $^{18}\text{O}$ -Gehaltes im Niederschlag belegt, daß die Hauptursache für die Isotopengehaltsschwankungen in Schwankungen der Lufttemperatur zu suchen ist (Abb. 5b). Aber es gibt offensichtlich auch noch andere Einflüsse. Dafür kommen Änderungen in der örtlichen und zeitlichen Niederschlagsverteilung in Frage, weiters Änderungen in der Herkunft der feuchten Luftmassen oder auch ein vom regionalen Trend abweichender klimatischer Verlauf

**Abb. 2: (rechts) Isotope als Indikatoren in der Paläoklimatologie. Ausgewählte Beispiele von klimatisch bedingten Schwankungen des  $^2\text{H}$ - und  $^{18}\text{O}$ -Gehaltes, wie sie in Umweltarchiven – marinen Sedimenten und polaren Eiskappen – festgeschrieben sind (ROZANSKI und GONFIANTINI 1990).**

Die ausgezogenen Linien in Diagramm A zeigen den Schwankungsbereich der Sauerstoffisotopenzusammensetzung in gut erhaltenen marinen Makrofossilien. Aus diesem Verlauf der Isotopenverhältnisse kann unter gewissen Annahmen eine Temperaturkurve abgeleitet werden. Es wird angenommen, daß die beobachteten Isotopenschwankungen jenseits von ungefähr 50 Millionen Jahren hauptsächlich durch einschneidende Änderungen bei der Ozeanzirkulation verursacht worden sind, wodurch starke Unterschiede der Isotopenverhältnisse zwischen Seicht- und Tiefwasserbereichen aufgetreten sind.

Diagramm B zeigt eine zusammengesetzte Kurve der  $^{18}\text{O}$ -Schwankungen in Foraminiferenschalen von fünf Tiefseekernen. Isotopieeffekte bei Verdunstung und Kondensation von Meereswasser führen zu einer Anreicherung von  $^{16}\text{O}$  in der vordringenden Eisdecke zu Beginn der Eiszeitperiode und zu einer entsprechenden  $^{18}\text{O}$ -Anreicherung im übrigen Ozean. Beim Rückzug der Eisdecke gelangt dieses isotopisch leichtere Wasser wieder in den Ozean. Andererseits hängt die Isotopenfraktionierung zwischen dem Karbonat der Foraminiferenschalen und dem Meereswasser von der Temperatur ab – Schalen, die bei höheren Meerestemperaturen gebildet werden, haben einen höheren  $^{18}\text{O}$ -Gehalt. Die Berechnungen ergeben, daß ungefähr 70 % der Gesamtamplitude der  $^{18}\text{O}$ -Schwankungen in Diagramm B durch Änderungen im Eisvolumen erklärt werden können. Der Rest ist auf Temperaturänderungen zurückzuführen.

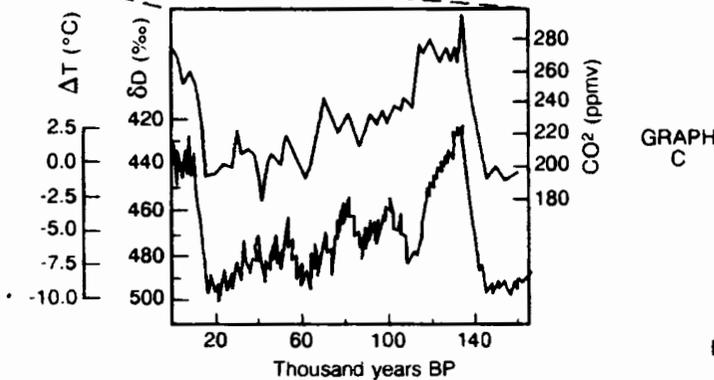
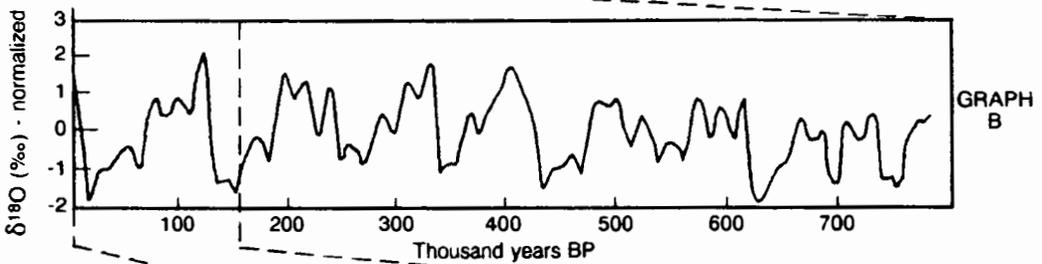
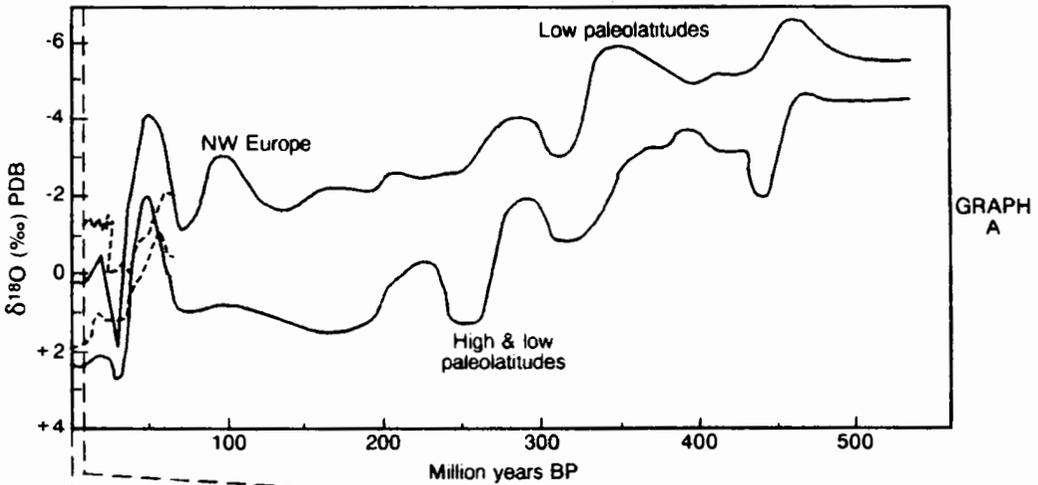
Diagramm C zeigt die Änderungen der  $\text{CO}_2$ -Konzentration in der Atmosphäre (obere Kurve, bestimmt aus den eingeschlossenen Luftblasen) und die Oberflächentemperatur – abgeleitet aus dem  $^2\text{H}$ -Profil (untere Kurve) – in Abhängigkeit vom Alter im Vostok-Eiskern. Das  $\text{CO}_2$ -Profil folgt der Temperaturkurve, was auf einen engen Zusammenhang zwischen den Schwankungen des  $\text{CO}_2$ -Gehaltes der Atmosphäre und dem Klima hindeutet.

Quellen: Diagramm A: adaptiert von L.B.Railsback, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 54, 1601-1609 (1990). Diagramm B: Imbrie et al., *Milankovitch and Climate, Part I*, Eds. A.L. Berger et al., D. Riedel Publishers, 269-305 (1984). Diagramm C: Barnola et al., *Nature*, 329, 408-414 (1987).

im Herkunftsgebiet (Verdunstung über der Meeresoberfläche). Die Unterschiede im zeitlichen Verlauf sind sicherlich zum Teil auch darauf zurückzuführen daß die hier verwendete Temperaturmittelung nicht unterscheidet zwischen Niederschlags- und niederschlagsfreien Perioden. Für den Zeitraum 1961-1973 stehen nur <sup>18</sup>O-Daten der Station Wien, Hohe Warte, zur Verfügung. Die Schwankungen und Abweichungen sind hier größer, dies kann als Maß für den Einfluß lokaler Unterschiede angesehen werden.

Der <sup>2</sup>H- und <sup>18</sup>O-Gehalt in den Niederschlägen folgt in erster Näherung der Beziehung  $^2\text{H} = 8 \cdot ^{18}\text{O} + 10$  („Globale Niederschlags-

gerade“). Abweichungen von dieser Beziehung treten auf, wenn Phasenumwandlungen nicht im vollständigen Gleichgewicht ablaufen. Ursache ist ein kinetischer Effekt als Folge des größeren Diffusionsvermögens von <sup>1</sup>H<sup>2</sup>H<sup>16</sup>O im Vergleich zu <sup>1</sup>H<sub>2</sub><sup>18</sup>O in Luft. Dies führt zu einer zusätzlichen Fraktionierung und zu einem Anstieg des als  $d = ^2\text{H} - 8 \cdot ^{18}\text{O}$  definierten „Deuteriumexzesses“. Dieser spielt eine wichtige Rolle bei der Ermittlung der Herkunft von Luftfeuchtigkeit. Beispielweise führt das Wiederverdunsten von Niederschlägen über dem Kontinent zu einer stärkeren Anreicherung des leichteren Moleküls <sup>1</sup>H<sup>2</sup>H<sup>16</sup>O und zu einem Anstieg des Deuteriumexzesses.



BP = Before Present, defined as 1950.

Neueste Messungen am Probenmaterial, das im Rahmen des österreichischen Isotopenmeßnetzes seit den sechziger Jahren gesammelt worden ist, haben gezeigt, daß beim Deuteriumexzess im alpinen Raum noch einige Fragen offen sind. Sie können hier nur kurz angesprochen werden. Zunächst ergaben sich für Gebirgs- und Tal- bzw. Vorlandstationen außerordentlich unterschiedliche Jahresgänge für  $d$  (Abb. 6) mit einem  $d$ -Maximum im Sommer bei den Gebirgsstationen und einem Minimum bei den Talstationen. Bei der Absicherung dieser Resultate durch Messungen bei weiteren Paaren von benachbarten Gebirgs- und Talstationen wurde bei der Station Weyregg (469 m, „Talstation“) am Fuße des Höllengebirges ein Jahresgang ähnlich dem der Gebirgsstationen festgestellt, allerdings mit niedrigeren Absolutwerten (Abb. 7). Da Weyregg bei den vorherrschenden Nordwestwetterlagen im Anströmbereich am Alpenrand gelegen ist, war die nächste Vermutung, daß das  $d$ -Minimum im Sommer nur in inneralpinen Tälern bzw. randlichen Becken in Abströmrichtung auftritt. In der Folge wurden Proben der östlich des Höllengebirges im Trauntal gelegenen Station Ebensee (425 m) untersucht. Diese Station liegt nur ungefähr 3 km Luftlinie vom Feuerkogel (1598 m) entfernt und weist einen völlig anderen Jahresgang im Deuteriumexzess auf. Dieser besitzt zwar kein ausgeprägtes Minimum im Sommer, aber jedenfalls kein Maximum und die Werte

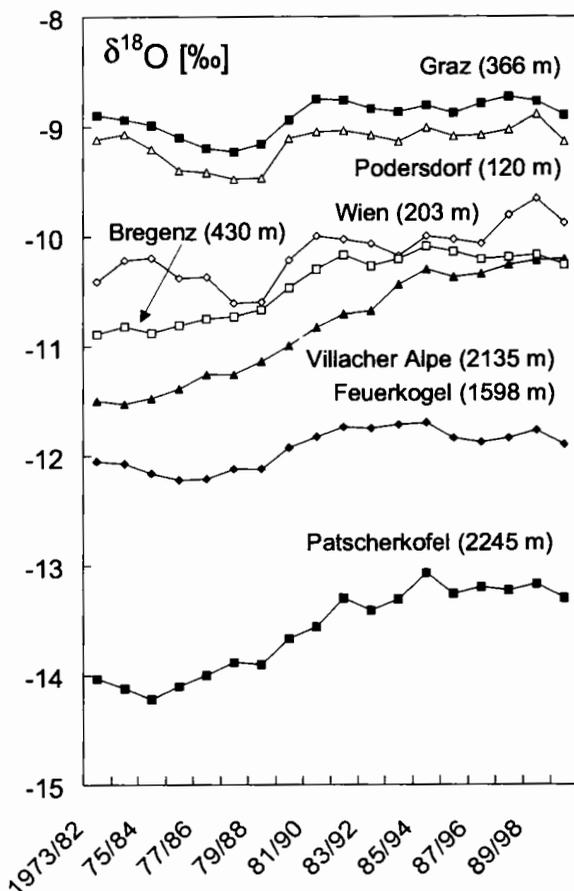
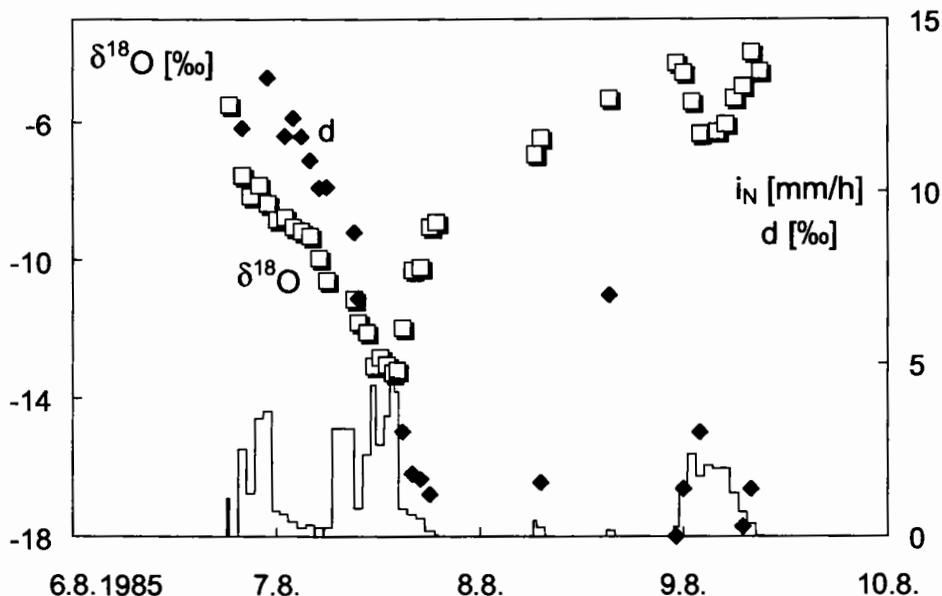


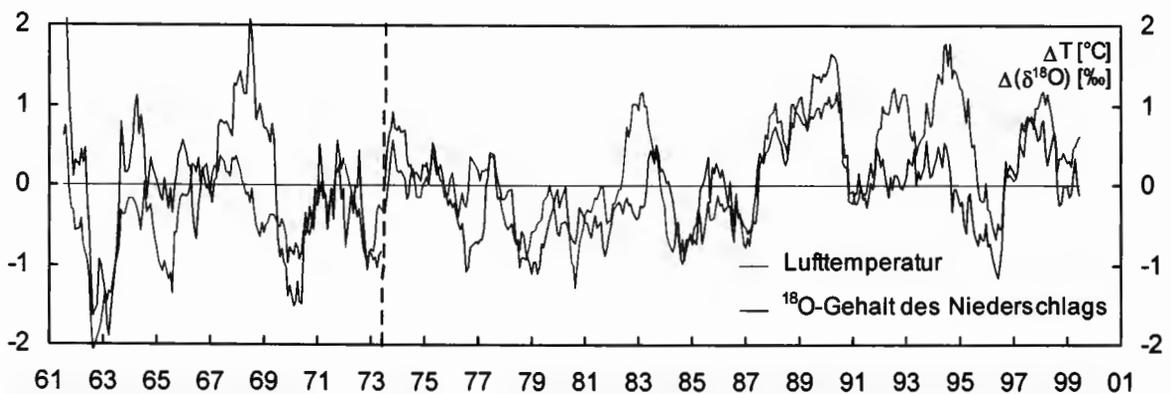
Abb. 3: Gleitendes Zehnjahresmittel des  $^{18}\text{O}$ -Gehaltes für einige Niederschlagsammelstationen in Österreich (nach RANK 1993, ergänzt).

Abb. 4:  $^{18}\text{O}$ -Gehalt und Deuteriumexzess  $d$  in den Niederschlägen vom 6. bis 9. August 1985 mit Angabe der Niederschlagsintensität  $i_N$  (Sammelstation Wien-Arsenal, 68 mm Niederschlagssumme); nach RANK 1991, ergänzt.





**Abb. 5a:** Österreichisches Isotopenmeßnetz: Niederschlagssammlung auf der Villacher Alpe (235m), meteorologische Station der ZAMG.



**Abb. 5b:** Österreichisches Isotopenmeßnetz: Abweichungen der Lufttemperatur und des  $^{18}\text{O}$ -Gehaltes des Niederschlags in Österreich vom langjährigen Mittel (1961-1999). Die Kurven stellen ein gleitendes Zwölfmonatsmittel von sieben meteorologischen Stationen dar (Bregenz, Feuerkogel, Graz, Klagenfurt, Salzburg, Villacher Alpe, Wien). Für den  $^{18}\text{O}$ -Gehalt liegen bis 1993 nur Werte der Station Wien – Hohe Warte vor. Die Temperaturwerte sind AUER et al. 2001 entnommen.

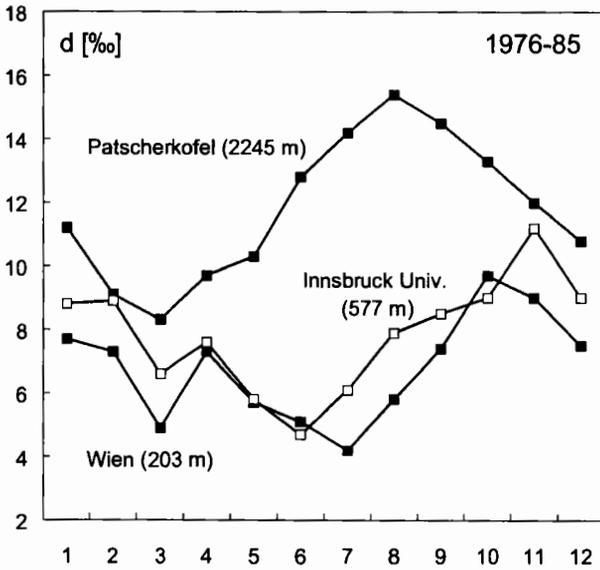


Abb. 6: Mittlerer jahreszeitlicher Verlauf des Deuteriumexzesses  $d$  im Niederschlag bei den Stationen Innsbruck-Universität, Patscherkofel und Wien - Hohe Warte.

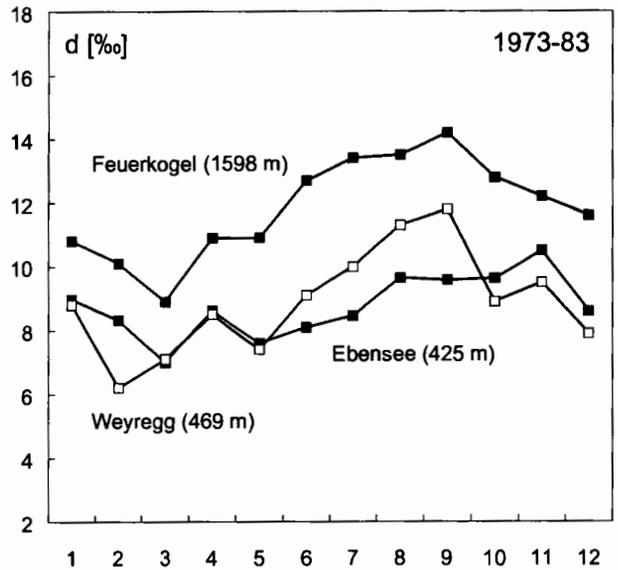


Abb. 7: Mittlerer jahreszeitlicher Verlauf des Deuteriumexzesses  $d$  im Niederschlag bei den Stationen Ebensee, Feuerkogel und Weyregg (KAISER et al 2001).

liegen im Schnitt um mehr als 3 ‰ niedriger als am benachbarten Feuerkogel. Anscheinend spielt die Fallhöhe des Regentropfens und der damit verbundene Einfluß der Verdunstung bzw. des Isotopenaustausches mit der Luftfeuchtigkeit eine entscheidende Rolle. Während im Anströmbereich (Weyregg) der Feuchtigkeitstransport in niedrigeren Schichten erfolgt, steigt die Feuchtigkeit am Gebirge empor und bewegt sich im Abströmbereich in größeren Höhen weiter. Sowohl das Aufsteigen der Feuchtigkeit am Gebirgsrand als auch das Fallen der Tropfen aus großen Höhen führen zu einem Höheneffekt des Deuteriumexzesses. Die Untersuchungen sind im Laufen.

### 3 Oberflächen- und Grundwässer

Als Folge der unterschiedlichen Isotopenzusammensetzung in den Niederschlägen treten auch in Oberflächen- und Grundwässern Schwankungen der Isotopenverhältnisse auf, die Klimainformation enthalten. Ein Vergleich des  $^{18}\text{O}$ -Gehaltes der Donau mit dem des Niederschlags zeigt, daß das Isotopensignal der Donau um ungefähr ein Jahr gegenüber dem im

Niederschlag verzögert ist (Abb. 8). Signifikante Unterschiede zum Niederschlag ergeben sich dann, wenn im Einzugsgebiet sehr unterschiedliche Niederschlagsverhältnisse herrschen. So sind die starken Unterschiede im  $^{18}\text{O}$ -Gehalt in Abb. 8 Anfang der achtziger Jahre darauf zurückzuführen, daß es im Alpenvorland bezogen auf die langjährigen Mittel viel weniger geregnet hat als im Gebirge (Auswirkung des  $^{18}\text{O}$ -Höheneffektes). Die Isotopenganglinie der Fließgewässer repräsentiert somit eher die regionale Entwicklung, wobei örtliche und zeitliche Variationen der Niederschlagsaktivität im Einzugsgebiet ausgemittelt werden.

Neben den jahreszeitlichen Schwankungen, die vor allem durch die Schneeschmelze in den Alpen geprägt werden, enthält der Verlauf des  $^{18}\text{O}$ -Gehaltes des Donauwassers einen signifikanten längerfristigen Trend (Abb. 9, Schwankungsbereich ungefähr 1,5 ‰, RANK und PAPESCH 1996). Die Isotopenverhältnisse spiegeln dabei die klimatischen Veränderungen – z.B. Erwärmung – wie sie beim Niederschlag beobachtet wurden, im regionalen Maßstab wider.

Wegen der unterschiedlichen Verweilzeit der Niederschlagswässer im Einzugsgebiet kommt

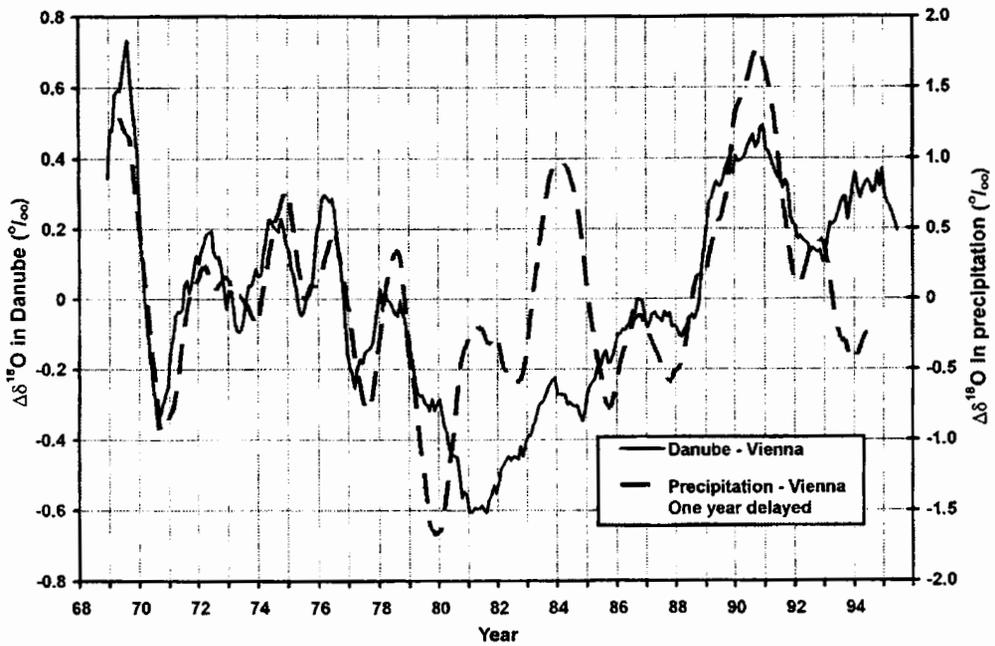


Abb. 8: Vergleich des Langzeitverlaufes des <sup>18</sup>O-Gehaltes in der Donau und im Niederschlag (Wien), dargestellt als Abweichung vom langjährigen Mittel (unter Anwendung eines Zwölfmonate-Tiefpaßfilters). Die Niederschlagskurve ist dabei um ein Jahr verschoben (RANK et al. 1998).

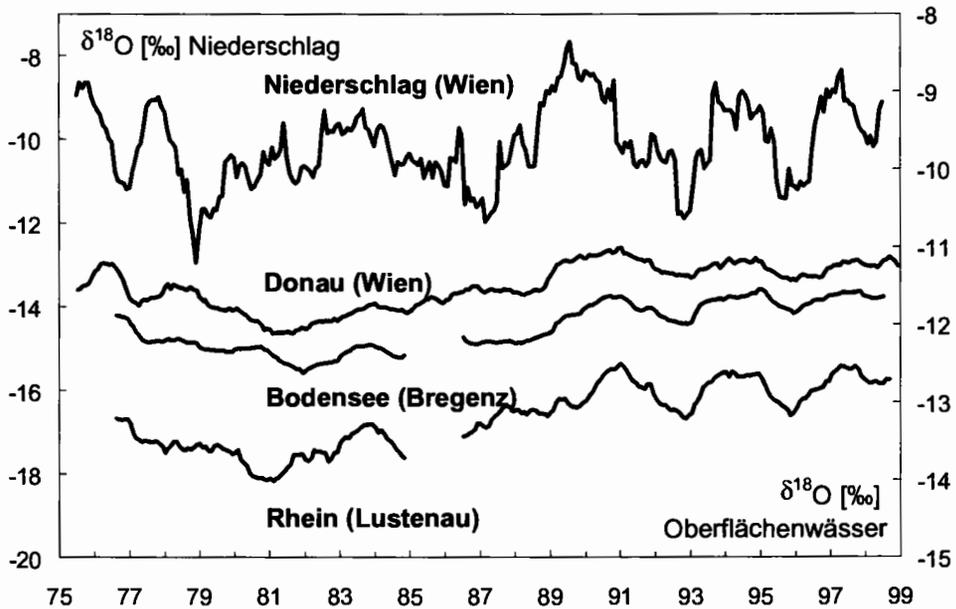
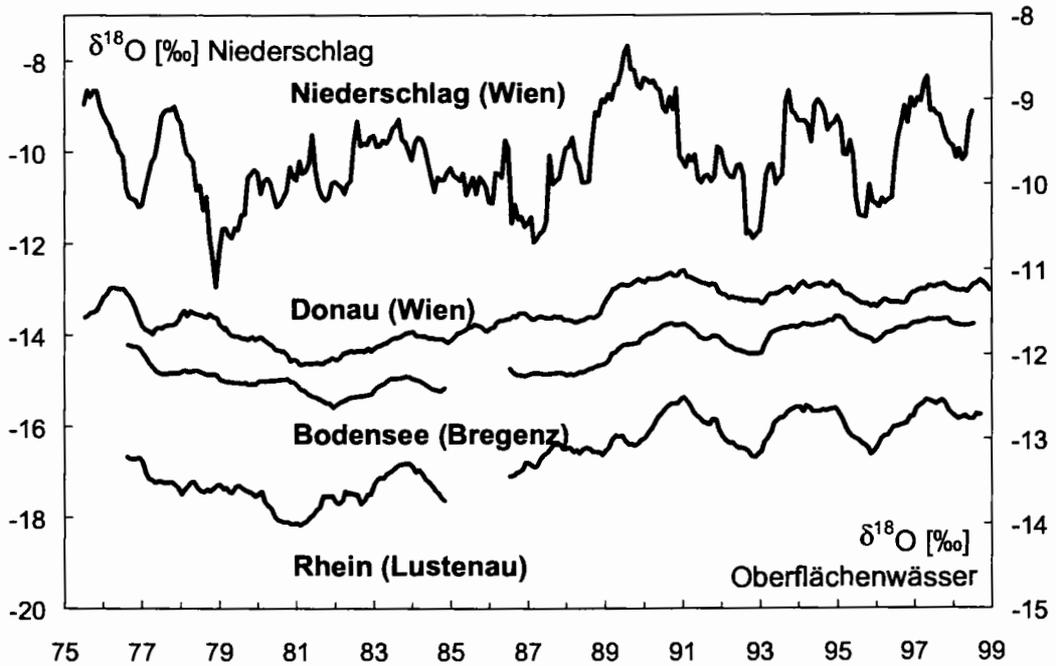
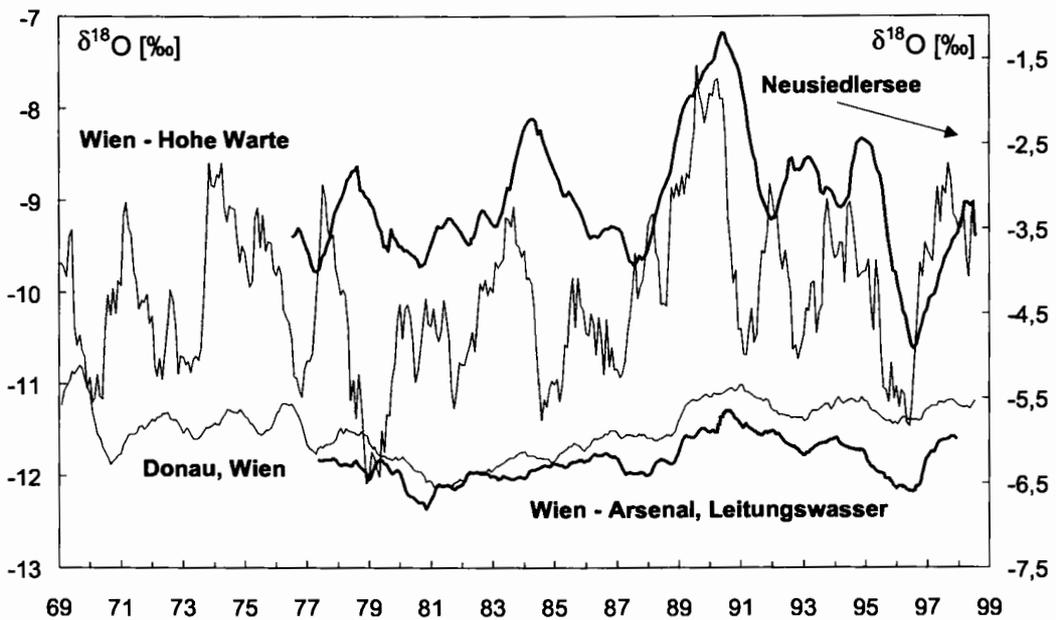


Abb. 9: <sup>18</sup>O-Gehalt der Donau in Wien 1968-2000 (monatliche Stichproben und gleitendes Zwölfmonatsmittel). Neben den jahreszeitlichen Schwankungen tritt deutlich ein Langzeittrend auf (nach RANK und PAPESCH 1996, ergänzt).



**Abb. 10:** Gleitendes Zwölfmonatsmittel des <sup>18</sup>O-Gehaltes des Niederschlags und der Donau in Wien, des Rheins bei Lustenau und des Bodensees bei Bregenz 1975-1999 (Mittelung beim Niederschlag auf Basis monatlicher Durchschnittsproben, bei den Oberflächengewässern auf Basis monatlicher Stichproben). RANK und PAPESCH 1996, ergänzt.



**Abb. 11.** Gleitendes Zwölfmonatsmittel des <sup>18</sup>O-Gehaltes des Niederschlags und der Donau in Wien, des Neusiedlersees bei Podersdorf und des Wiener Leitungswassers (Mittelung beim Niederschlag auf Basis monatlicher Durchschnittsproben, sonst auf Basis monatlicher Stichproben). Für den Neusiedlersee gilt die rechte <sup>18</sup>O-Skala.

es zu einer entsprechenden Dämpfung des Isotopensignals, vor allem der jahreszeitlichen Schwankungen. Die Ähnlichkeit in den Verläufen der Isotopendaten von Donau, Rhein und Bodensee weist auf den Einfluß von überregionalen Klimaänderungen hin, wobei der Verlauf des  $^{18}\text{O}$ -Gehaltes der Donau wegen des größeren und inhomogeneren Einzugsgebietes im Vergleich zu dem des Rheins bei Lustenau gedämpft erscheint (Abb. 10).

Zusätzlich zur regionalen Änderung von Klimafaktoren bilden sich auch stärkere Eingriffe in das hydrologische System (z.B. Stauseen, Bewässerungsausleitungen) im Isotopenverlauf ab, sofern sie zu Änderungen in der Niederschlags-Abfluß-Beziehung führen. Die Durchmischung des Wassers in größeren Stauseen beispielsweise bewirkt eine starke Dämpfung der jahreszeitlichen Schwankungen der Isotopenverhältnisse. Auf einen weiteren Einflußfaktor weist der Verlauf des  $^{18}\text{O}$ -Gehaltes im Neusiedlersee hin (Abb. 11): Bei seichten stehenden Gewässern spielt die Lage des Wasserspiegels eine entscheidende Rolle. Niedrige Wasserstände sind als Folge des verstärkten Verdunstungseinflusses mit hohen  $^{18}\text{O}$ -Gehalten verbunden (z.B. in den Jahren 1984 und 1990 in Abb. 11), hohe Wasserstände mit verhältnismäßig niedrigen  $^{18}\text{O}$ -Gehalten (1996). Dies führt zu mittelfristigen Schwankungen von einigen Promill im  $^{18}\text{O}$ -Wert. Diese Erkenntnis ist wichtig für die Interpretation von Isotopendaten in der Paläoklimatologie, wenn Untersuchungen an Sedimentstapeln ausgeführt werden, die in seichten Gewässern gebildet worden sind.

Auch bei Grundwässern treten in Abhängigkeit von der mittleren Verweilzeit des Wassers im Untergrund mittelfristige Schwankungen des Isotopengehaltes im Dekadenbereich auf. Sie betragen beim Karstwasser der Wiener Wasserversorgung ungefähr 1 ‰ im  $^{18}\text{O}$ -Wert (Abb. 11). Damit eignen sich auch Quellwässer mit entsprechender mittlerer Verweilzeit für isotope klimatologische Untersuchungen. Sie bieten den Vorteil, daß die kurzfristigen Isotopengehaltsschwankungen des Niederschlages im Quellwasser bereits weitgehend gedämpft sind. Aus isotope hydrologischer Sicht haben die mittelfristigen Schwankungen

die Konsequenz, daß sich auch die Höhenkalibrierung bei der Bestimmung der mittleren Höhe von Einzugsgebieten ändert. Eine genauere Auswertung ist dann nur bei vorhergehender Altersbestimmung möglich. Geht das Alter des Wassers über den Datierungszeitraum mit  $^3\text{H}$  – ungefähr 50 Jahre – hinaus, so erhöht das Fehlen der Information über die klimatischen Bedingungen bei der Infiltration der Niederschläge die Unsicherheiten bei der Bestimmung der Höhenlage des Infiltrationsgebietes (RANK und PAPESCH 1998).

#### 4 Schlussfolgerungen und Ausblick

Die Isotopenverhältnisse in den Wässern des natürlichen Kreislaufes enthalten Klimainformation. Neben kurzfristigen - Ereignis- und jahreszeitlichen - Schwankungen zeichnen sich im Verlauf der Isotopenverhältnisse der Niederschlagswässer auch mittelfristige Klimaschwankungen im Dekadenbereich ab. Besonders ausgeprägt sind dabei in den letzten dreißig Jahren die Schwankungen der Isotopenganglinien der Gebirgsniederschläge. Wichtigster Einflußparameter ist die Lufttemperatur, es spielen aber auch andere Einflüsse eine wichtige Rolle, wie die Änderung der zeitlichen und örtlichen Niederschlagsverteilung. Ein Ziel der aktuellen einschlägigen Forschung ist ein besseres Verständnis des Zusammenhanges zwischen dem Verlauf der Isotopenverhältnisse in den Wässern des natürlichen Kreislaufes und verschiedenen Klimaparametern.

Die mittelfristigen Schwankungen im langjährigen  $^{18}\text{O}$ -Mittel der Niederschläge betragen ungefähr 1 ‰. Im Vergleich dazu unterscheiden sich eiszeitliche Grundwässer in Mitteleuropa im  $^{18}\text{O}$ -Wert um maximal -2,5 ‰ von aus modernen Niederschlägen gebildeten Grundwässern. Die mittelfristigen Schwankungen im Niederschlag liegen somit in einer ähnlichen Größenordnung und liefern ein signifikantes Klimasignal. Die Isotopenverhältnisse in den Wässern des natürlichen Kreislaufes erweisen sich damit als verhältnismäßig empfindlicher Indikator für mittelfristige Klimaänderungen.

Die mittelfristigen Schwankungen des  $^{18}\text{O}$ -Gehaltes der Niederschläge im Einzugsgebiet - und damit Klimaänderungen - spiegeln sich auch im  $^{18}\text{O}$ -Gang der Flüsse wider. Der Verlauf des  $^{18}\text{O}$ -Gehaltes in Flüssen kann somit als Indikator für Klimaänderungen im Einzugsgebiet angesehen werden. Örtliche und kurzzeitige Unterschiede im Verlauf des  $^{18}\text{O}$ -Gehaltes, wie sie zwischen verschiedenen Niederschlagsbeobachtungsstationen im Einzugsgebiet auftreten können, werden dabei ausgemittelt. Ein Netz von einigen wenigen gut ausgewählten Beobachtungsstellen für Isotopenverhältnisse an großen Flüssen dürfte demnach eines der effektivsten Verfahren zur Verfolgung von mittelfristigen Klimaänderungen und Änderungen im natürlichen Wasserhaushalt im globalen Maßstab sein. Die IAEA in Wien verfolgt derzeit ein solches Konzept.

Die Erkenntnisse aus den Isotopenmeßreihen spielen eine Schlüsselrolle bei der Interpretation von Isotopenmeßdaten im Rahmen von paläoklimatischen Untersuchungen. Beispielsweise ist der mittelfristige Schwankungsbereich des  $^{18}\text{O}$ -Gehaltes in Niederschlags- bzw. Seewässern ein Hinweis, wie ähnliche Schwankungen in geologischen Archiven - z.B. in Seesedimenten - zu beurteilen sind.

## Literatur

- AUER, I., BÖHM, R., SCHÖNER, W.: Austrian long-term climate: Multiple instrumental climate time series in central Europe (1767-2000). – Österreichische Beiträge zu Meteorologie und Geophysik, Wien 2001 (im Druck).
- BOROVICZÉNY, F., et al.: Wasserhaushaltsstudie für den Neusiedlersee mit Hilfe der Geophysik und Geochemie 1980-1990. - Forschungsbericht 16, 1-214, Wien (Institut für Hydraulik, Gewässerkunde & Wasserwirtschaft der Technischen Universität Wien) 1992.
- IAEA: Consultants' Meeting on Operational Aspects of the Global Network "Isotopes in Precipitation". - Bericht, IAEA, Wien 1995.
- IAEA: GNIP (Global Network for Isotopes in Precipitation), 48 S., Wien (IAEA) 1996.
- Kaiser, A., Scheifinger, H., Kralik, M., Papesch, W., Rank, D., Stichler, W.: Links between meteorological conditions and spatial/temporal variations in long-term isotope records from the Austrian precipitation network. – In: Study of Environmental Change Using Isotope Techniques. IAEA-CN-80, Wien (IAEA) 2001 (im Druck).
- Moser, H., Rauert, W.: Isotopenmethoden in der Hydrologie. – 400 S., Berlin (Borntraeger) 1980.
- Rank, D.: „Umweltisotope“ – Fortschritte in Forschung und Anwendung. – Mitteilungen der österreichischen geologischen Gesellschaft, 83, 91-108, Wien 1991.
- Kurzfristige hydroklimatische Entwicklungen werden eines der wichtigsten Themen der Wissenschaft in den nächsten Jahrzehnten sein. Die Aufnahme langjähriger Meßreihen der Isotopenverhältnisse in Wässern des natürlichen Kreislaufes liefert Datenmaterial, an Hand dessen tiefgreifende Veränderungen im Wasserkreislauf frühzeitig erkannt und erfaßt werden können. Die hydrologische und klimatologische Gemeinschaft stellt dabei sowohl in quantitativer als auch in qualitativer Hinsicht wachsende Anforderungen an die Beobachtungsnetze. In den letzten Jahrzehnten wurden für isotopenhydrologische Zwecke eine Reihe von internationalen und nationalen Isotopenmeßnetzen eingerichtet (siehe z.B. IAEA 1996, Rank 1993). Es gilt nun, die bestehenden Netze für die klimatologischen Anforderungen zu adaptieren bzw. nicht mehr funktionierende Netze zu reaktivieren (IAEA 1995). Wichtig ist vor allem die Weiterführung der langjährigen Meßreihen. In Österreich bemühen sich ÖFPZ Arsenal und Umweltbundesamt, das in den sechziger und siebziger Jahren aufgebaute Isotopenmeßnetz (Niederschläge, Oberflächenwässer) möglichst im gesamten Umfang aufrecht zu erhalten und auf eine gesicherte finanzielle Basis zu stellen.

- RANK, D.: Das österreichische Niederschlagsisotopenmeßnetz. - Mitteilungsblatt des Hydrographischen Dienstes in Österreich, Heft 70, 72-76, Wien 1993.
- RANK, D., PAPESCH, W.: Die Isotopenverhältnisse im Donauwasser als Indikatoren für Klimaschwankungen im Einzugsgebiet. - Limnologische Berichte der 31. Arbeitstagung der Internationalen Arbeitsgemeinschaft Donauforschung, Wissenschaftliche Referate, 1, 521-526, Göd/ Vácraót 1996.
- RANK, D., PAPESCH, W.: Klimasignale in isotopenhydrologischen Zeitreihen und ihre Bedeutung für die Interpretation von Isotopendaten in der Hydrologie. - In: Erdwissenschaftliche Aspekte des Umweltschutzes. Tagungsband, 45-50, Wien (ÖFPZ Arsenal), 1998.
- RANK, D., ADLER, A. ARAGUÁS ARAGUÁS, L., FROEHLICH, K., ROZANSKI, K., STICHLER, W.: Hydrological parameters and climatic signals derived from long term tritium and stable isotope time series of the River Danube. - In: Isotope Techniques in the Study of Environmental Change. IAEA-SM-349, 191-205, Wien (IAEA) 1998.
- ROZANSKI, K., GONFIANTINI, R.: Isotopes in climatological studies. - IAEA Bulletin 32, No. 4, 9-15, Wien (IAEA) 1990.



## DISKUSSION

Isotopenverhältnisse im natürlichen Wasserkreislauf -  
Indikatoren für Klimaänderungen

TUFAR: Ich danke Ihnen vielmals, daß Sie uns anhand zahlreicher Beispiele von verschiedenen Standorten aufgezeigt haben, wie die Isotopenverhältnisse insbesondere des Sauerstoffs mögliche Klimaveränderungen anzeigen können.

Haben Sie das Donauwasser sowohl oberhalb als auch unterhalb Wiens genommen, damit man sieht, was eventuell an Kontaminationen aus der Stadt hinzukommt ?

RANK. Wir haben versucht, ein repräsentatives Bild zu erhalten. Unsere Probenahmestelle war in Nußdorf, nahe der Abzweigung des Kanals, wir haben auch Meßdaten von Hainburg. Was von den Wiener Kanälen hereinkommt, spielt im Durchfluß keine Rolle.

**Diskussionsbeiträge von:**

*Univ.Prof. Dr. W. TUFAR*  
*Philipp - Universität Marburg*  
*Fachbereich Geowissenschaften*  
*Hans - Meerwein - Straße*  
*D - 35032 Marburg/Lahn*

*Hofr. Univ.Prof. Dr. Dipl.Ing. Dieter RANK*  
*OFPZ Arsenal*  
*Bereich Umwelt*  
*Faradystraße*  
*A - 1030 Wien*

Barbara-Gespräche Payerbach 1998	Band 5	"Abfallentsorgung aus erdwissenschaftlicher Sicht" "Klima - Entwicklung"	Seite 267 - 275	Payerbach 2001
-------------------------------------	--------	---	--------------------	-------------------

# BARBARA-GESPRÄCHE

## Payerbach 1998

Menschliche Bodennutzung und Klima

W. VORTISCH



Payerbach,  
17. September 1998

**Anmerkung der Redaktion:**

Da das Originalmanuskript der Langfassung zum Zeitpunkt der Drucklegung nicht vorgelegen ist, findet hier die beim Vortrag aufgelegte Kurzfassung Verwendung.

*Anschrift des Verfassers:*

*Prof. Dr. Walter VORTISCH*

*Inst. f. Geowissenschaften  
Prospektion u. Angewandte Sedimentologie  
Montanuniversität Leoben*

*Peter Tunner Straße  
A - 8700 Leoben*

# Menschliche Bodennutzung und Klima

W. VORTISCH

*Kurzfassung*

Die Bedeutung der Folgen der menschlichen Tätigkeit für die natürlichen Lebensgrundlagen des Menschen ist heute allgemein bewußt geworden, wenngleich es für den engagierten Laien oft recht schwierig ist, Sensationsjournalismus und Realität zu unterscheiden. Dies liegt nicht zuletzt daran, daß bekanntlich selbst in entscheidenden Umweltfragen, wie z.B. der Klimaentwicklung, auch von wissenschaftlicher Seite dem interessierten Publikum oft völlig gegensätzliche Auffassungen dargelegt werden.

Weniger bekannt, dabei aber für den Laien im allgemeinen leichter darstellbar, ist die Bedeutung des Menschen als geologischer Faktor. Ohne allgemein bewußt wahrgenommen worden zu sein, hat die menschliche, auch in ihrer geologischen Bedeutung sich immer rascher steigernde Tätigkeit dazu geführt, daß wir uns heute aus sedimentologischer Sicht bereits voll innerhalb eines sog. „Events“ befinden; innerhalb eines markanten, in den Sedimentfolgen deutliche und leicht erkennbare Spuren hinterlassenden geologischen Ereignisses also.

Ein beeindruckendes Beispiel stellt hierfür der Komplex „Bodennutzung-Bodenveränderung-Bodenerosion-klastische Sedimentation in kontinentalen und marinen Becken“ dar. Die Bedeutung dieses Komplexes für das Klima kann aus verschiedenen Blickwinkeln und mit verschiedenen Maßstäben (kleinräumig-regional, großräumig-regional bis kontinental, global) betrachtet werden. Sichere Aussagen scheinen eher im regionalen als im globalen Rahmen möglich zu sein. (Interessante Zusammenhänge sind für den aufmerksamen Laien schon im Kleinbereich, wie z.B. in städtischen Siedlungsgebieten, beobachtbar.)

Wichtigste zu diskutierende Bodennutzungsform, stellt naturgemäß die Landwirtschaft mit ihren verschiedenen Wirtschaftsweisen dar. Sie ist in der Lage wirkungsvoll in den Wasserkreislauf einzugreifen und damit entsprechend auch in die regionalen Klimaverhältnisse. Bodennutzung, Bodenerosion, Wasserkreislauf und regionales Klima sind miteinander verknüpft. Aufgrund ihres Einflusses auf die Konzentration verschiedener klimarelevanter atmosphärischer Spurengase (vor allem CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O), ist die Landwirtschaft aber auch von erheblicher globaler Bedeutung. Angesichts des weiterhin stark wachsenden Anteils landwirtschaftlicher Nutzflächen an den festländischen Landoberflächen, verdient die Landwirtschaft aus umweltgeologischer Sicht daher sowohl in quantitativer wie auch in qualitativer Hinsicht (Nutzflächentopographie und Wirtschaftsweise) besondere Beachtung. Da die gegenwärtigen Weltwirtschaftsbedingungen die Entwicklung der Landwirtschaft fast aller Staaten der Erde entscheidend bestimmen, wird naturgemäß der Blick des umweltgeologisch tätigen Geowissenschaftlers auch auf diesen Bereich menschlicher Tätigkeit gelenkt.

Abschließend kann allgemein gesagt werden, daß bei unveränderter Verhaltensweise, aus geologischer Sicht für das nächste Jahrhundert einschneidende Verschlechterungen der menschlichen Daseinsbedingungen für erhebliche Teile der bisherigen Siedlungsgebiete mit großer Wahrscheinlichkeit zu erwarten sind. Zur Entschärfung dieser Entwicklung können die Geowissenschaftler einen wichtigen Beitrag leisten.



## DISKUSSION

## Menschliche Bodennutzung und Klima

**TUFAR:** Ich danke Ihnen für Ihren interessanten Vortrag, in dem Sie sehr viele Aspekte vom Einfluß des Menschen auf das Klima abgedeckt haben und dabei sicher einige Punkte berührt, die nicht unwidersprochen bleiben werden.

**KERN:** Ich möchte davon auf einen Punkt eingehen: die Eiszeitforscher *...unverständlich...* haben ja die Albedowirkung als wichtigen Faktor für die Entstehung der Eiszeiten diskutiert. Gibt es Computersimulationen, die auf die Veränderung der Oberfläche durch die Landwirtschaft eingehen? Man kann sich ja vorstellen, daß ein gerodeter Regenwald ein anderes Albedo aufweist als dichter Baumbestand, oder die Umwandlung der großen gemäßigt-subtropischen Grasländer in Agrargebiete die Albedo beeinflusst, besonders mit der sehr langen offenen Phase im Winter, in der ja durch die fehlende Isolierschicht der Vegetation die Liegedauer des Schnees stark beeinflusst wird.

**VORTISCH:** Eine berechtigte Frage, zu der ich aber leider nicht konkret antworten kann.

**HAY:** Das wird eben gemacht an der National *...unverst....* Research. Da gibt es auch ein Modell, wie sah das Klima aus ohne Menschen auf der Erde.

**HOFBAUER:** Ich zähle zu den interessierten Laien, die von Ihnen angesprochen worden sind. Ich darf einen Satz nochmals vorlesen: "...liegt zunächst darin, daß in entscheidenden Umweltfragen, z.B. Klimaentwicklung, auch von wissenschaftlicher Seite dem interessierten Publikum oft völlig gegensätzliche Darstellungen vorgelegt werden." Mich als Laien interessiert, welche Nutzenanwendung kann ich aus diesem ganzen hochwissenschaftlichen und äußerst interessanten Vorträgen ziehen? Ich habe z.B. Kinder und möchte dazu beitragen, daß diese eine bessere Zukunft haben, oder soll ich mich damit abfinden, wie es auch schon gesagt wurde, die Menschheit ist ja nur eine Episode in der Erdgeschichte, ob die Entwick-

lung jetzt 500 Jahre länger oder weniger lang dauert, ist eigentlich gleichgültig. Der letzte Vortragende ist ja auf dieses Thema eingegangen und hat Nutzenanwendungen durchblicken lassen, aber er hat auch gesagt: "verdient besondere Beachtung" und "wir sind in einer unglücklichen Phase". Wie könnte ich dieser unglücklichen Phase entgegenwirken?

**VORTISCH:** Als ich heute vormittag meine Daten zusammen gesammelt habe, sind sie mir etwas durcheinander geraten und habe darum den Vortrag etwas gekürzt, ich gebe es ehrlich zu. Zu den im Wust entschwundenen Unterlagen gehörte mein abschließendes Statement, und das wäre dieses gewesen:

Wir können erheblich zur Entschärfung dieser Entwicklung beitragen, das ist meine Überzeugung, sonst hätte unsere ganze Wissenschaft keinen Zweck. Wir kennen die Entwicklung in der Vergangenheit, wir wissen, daß wir jetzt ein gewisses Risikopotential aufhäufen, und dieses kann sehr hoch sein, aber wir kennen auch die Mechanismen, mit denen wir das aufbauen. Im Bereich der Bodennutzung wissen wir, daß Bodenerosion eben nicht nur eine Folge von starkem Oberflächenabfluß ist, nicht nur den regionalen Wasserkreislauf betrifft, sondern auch daß Stoffe freiwerden, die in die Bilanz eingehen. Wir wissen, daß beim Umwandeln von Waldgebieten in landwirtschaftliche Nutzflächen eben die einen CO<sub>2</sub> senken, CO<sub>2</sub> speichern, CO<sub>2</sub> selber umwandeln.

Vor zwei Jahren waren bei einem Klimatologenkongreß die Teilnehmer mehrheitlich der Meinung, daß die Biomasse der kontinentalen Festlandmassen, im wesentlichen Wälder und Vergleichbares, doch die entscheidende Rolle in der CO<sub>2</sub>-Bilanz spielen. Es gibt auch Ozeanographen, die sagen, es wäre der Ozean, der als Senke tatsächlich sehr viel leisten kann, aber der entscheidende Faktor dürfte doch die kontinentale Biomasse sein. Dabei dürfen wir nicht nur an die tropischen Regenwälder, an die

Rodungen im tropisch - subtropischen Bereich denken, sondern auch an die borealen Gebiete, die Vernichtung der kanadischen Wälder geht in die Bilanz auch ein. Aber wenn wir das wissen, muß es uns auch gelingen klarzulegen, in aller Ruhe und ohne ein großes Spektakel, daß es sinnvoll ist, andere Wirtschaftsweisen in diesem Zusammenhang zu entwickeln.

In der Landwirtschaft in den Tropen gibt es hervorragende Projekte für sylvine Agrikulturen, d.h. eine Kombination von Wald und Landwirtschaft, wo man teilnatürliche Waldbereiche belassen kann und trotzdem für eine sehr vernünftige Subsistenz Landwirtschaft treiben kann. Das geht natürlich nicht, wenn man riesige Exportproduktionszahlen haben will, die aber von der Welternährung her gesehen ohnedies nicht notwendig sind. Die Menschen des Westens essen sowieso zuviel Fleisch, das kann also weniger sein, und Getreide wird mehr angebaut, als gebraucht wird. Da sind die Preise auch ganz tief im Keller, deshalb muß ja auch immer mehr produziert werden, das ist ja der Unfug: die Preise sind schlecht, und die Landwirte können das nur über die Mengenzuwächse ausgleichen, und das erzeugt noch niedrigere Preise. Wenn das Produktions/Konsumverhalten aus diesen geologischen Einsichten heraus bewußt über die Politik gesteuert wird, könnte in diesem Bereich, was das globale angeht, Gutes geschehen.

Der Mensch ist an sich ein sehr vernünftiges Wesen, auch wenn er sich oft nicht so gibt, und wir müssen als bescheidene Wissenschaftler unsere Hoffnung auf Erziehung und Vernunft setzen. Das morgige Thema mit den Abfällen ist z.B. ein interessanter Teilbereich - polemisch kann man übrigens sagen, daß die Abfall-Lagerung ja auch Bodennutzung ist - zu dem die Geowissenschaftler wesentlich beitragen können. Meiner Meinung nach kann eine "sanfte Landung" im nächsten Jahrhundert möglich sein.

TUFAR: Da ich mit dieser Wortmeldung auch auf meinen Vortrag angesprochen worden bin, darf ich hierzu auch einige Punkte sagen: Sie haben immer wieder auf die Caymans hingewiesen, und erst vor wenigen Tagen im Rundfunk in Hessen eine heiße Diskussionsrunde gewesen, und da wurde sehr schön aufgezeigt,

daß vieles, was dort jetzt abläuft, hausgemacht ist. Man hat das Tropenholz verteufelt mit dem Effekt, daß kaum jemand mehr diesen Ländern das Tropenholz abkauft, sprich Teak, das nachweisbar dokumentiert seit Jahrzehnten in Farmen gezüchtet wird. Da den Leuten dort nicht bezahlt wird, weil sie nicht verkaufen, machen sie Dummheiten. Das ist nur eines der Beispiele, wo hier aus Polemik und Unwissenheit etwas in Gang gesetzt wird, das man nachher nicht mehr in den Griff bekommt. Mein Rat wäre, emotionslos an so ein Thema wie Klimaänderungen oder Umweltverschmutzung heranzugehen.

Als zweiten Punkt: Sie haben Australien und ...*unverst.*... angesprochen ...*unverst.*... war ein Völkerbundmandat, ursprünglich eine deutsche Kolonie, die im Ersten Weltkrieg verloren ging. Das bessere Beispiel als ...*unverst.*... ist ...*unverst.*... auf Neuguinea, ein riesiger Tagebau, und da hat sich gezeigt, wenn man da abholzt, und es geht um 30-40 km<sup>2</sup>, ist von einem Tag zum anderen das Gleichgewicht zwischen täglichem Regen und der Absorption in die Atmosphäre gestört und der tägliche tropische Niederschlag ist bis zu 70% zurückgegangen.

Die Österreicher und die Deutschen sind daran gegangen, Forstleute und Bodenkundler dorthin zu schicken, wo man wegen der Abholzung in den tropischen Wäldern, praktisch nichts mehr machen kann, um vielleicht doch ein bißchen Bodenverbesserung zu erzielen. Sie zahlen diesen Ländern nichts mehr bar aus, sondern versuchen das auf diese Weise in den Griff zu bekommen.

Dem Menschen im Holozän möchte ich da nicht soviel in die Schuhe schieben. Ein wesentlicher und wenig beachteter Effekt, der wieder zu Klimaveränderung geführt hat, war die Christianisierung, die nachfolgende Rodung und die Almwirtschaft, und das geht bis heute so weiter. Das ist hier nicht behandelt worden. Vielleicht sollte man wirklich konkret sagen, die Abholzung wirkt sich auf das Klima aus, wir haben vor der Haustüre zwei Beispiele, im Libanon und in Tunesien, und im Karst, an der adriatischen Küste im heutigen Kroatien.

Wie Sie immer wieder im Vortrag angedeutet haben, das ist alles eher ein politisches Pro-

blem. Wenn wir davon ausgehen, daß die Botaniker mit der Photosynthese-Wechselgleichung recht haben, können wir doch erhebliche Mengen an CO<sub>2</sub>, genauso wie Stickstoff mit ...*unverst.*..., Schmetterlingsblütern, Luzernen usw. aus der Atmosphäre herausholen, das wird nicht getan, man bezahlt die Leute lieber dafür, daß da ein bißchen etwas nachwächst, aber das bringt sehr, sehr wenig.

Noch ein weiteres Beispiel als Politikum: daß 4% der Weltbevölkerung über 22% der sogenannten Treibhausgase produzieren. Da ist es illusorisch zu diskutieren, ob man den Preis des Benzins auf 6 Mark anheben soll oder nicht. Was wir machen können, ist die Treibhausgase praktisch nur hinter der Kommastelle senken. Was dort geschieht, im Westen oder in Rußland, da tritt man hier ein bißchen auf dem Stand.

Wie sehr der moderne Mensch das Klima beeinflussen muß, kann man an folgendem Beispiel ermessen - ich habe bis heute keine vernünftige Antwort bekommen -. Wenn in Persien 30.000 Menschen unangemeldet von Teheran nach Schiras gehen, dann bekommen sie weder in Isfahan noch in Schiras, wo überall ausreichend Nahrungsmittel vorhanden sind, genügend zu essen. Also ist meine Frage: wie hat Alexander der Große, der mit 30.000 Soldaten dort durchgezogen ist, durch ein Wüstengebiet, wie hat er sie ohne Konserven und Tiefkühltruhen ernährt ? Und jetzt ganz provokant: Sie müssen sich vorstellen, daß sie in einem Land leben, in dem nicht Daimler oder Marcus das Auto erfunden haben, sondern der mittelalterliche Mensch. Der konnte es sich noch nicht erklären, daß er damals, im frühen Mittelalter Treibhausgase entwickelt hat, die zum Abschmelzen der Gletscher geführt haben, denn heute werden Stollen freigelegt, die der mittelalterliche Bergmann betrieben hat.

VORTISCH: Genau durch diese 200 m plus/minus Schwankungen, die gewaltig sind, werden jetzt diese Bergbaue wieder frei, wobei man immer noch nicht sagen kann, ist das regional begrenzt oder ist das global. Das ist sehr schwierig. Man weiß vom Mount Kenia zum Beispiel, daß es auch im Holozän erhebliche Schwankungen gegeben hat, weil das die Gleichzeitigkeit ist. Und natürlich habe ich

nicht gesagt, daß der mittelalterliche Mensch mit seiner...*unverst.*... das Klima beeinflusst hat ...*unverst.*... Ich glaube, daß von Klimabeeinflussung in globaler Hinsicht, wenn überhaupt jemals in jüngster Zeit ...*unverst.*... Ich habe ja Thailand oder ...*unverst.*... herausgegriffen, Thailand ist ja ...*unverst.*..., kenne ich selbst gerade gut. Natürlich ist es das Prinzip, z.B. das Prinzip weltweiten Massenreisenaubau, ...*unverst.*... während die ...*unverst.*... grundsätzlich auf Trockenreis im Laufe der Zeit umstellen kann. Welche Konsequenzen das für die Produktion z.B. hat, ob das ein Problem ist, ob das leicht geht, oder ob das nur eine Tradition ist ...*unverst.*..., das müßte man sehen, und der Fleischkonsum erinnert an eine wichtige Quelle ...*unverst.*...

TUFAR: Sie haben auch die Erosion in China angesprochen, da gibt es ein noch besser untersuchtes Beispiel. Ein mächtiger Fluß in Indien, der über tausende Kilometer sein Bett mit den Sedimenten bis weit ins Tertiär hinein Tertiär in den Indik hinein trägt. ...*unverst.*..., was da bereits ohne Menschen an Stofftransport passiert ist.

SCHROLL: Ein interessierter Laie sieht die Wissenschaft, die zum Teil widersprüchlich ist, meiner Meinung nach auch falsch. Das ist ja ein Ringen um Erkenntnisse. Wir müssen uns klar sein, das wir über unsere Existenz und über unsere Grundlagen noch immer viel zu wenig wissen, und die Probleme sind kompliziert, vernetzte Systeme, die wir früher nicht erkannt habe, Früher ist ein berühmter Professor am Katheder gestanden und hat erklärt, das müßt ihr mir glauben. Diese Zeit ist vorbei. Es ist eine gemeinsame Arbeit, eine Kooperative der Wissenschaftler, zu einer Erkenntnis zu kommen. Wir haben heute die Möglichkeit viele Meßdaten und auch viele Parameter zu messen, um diese dann mit den Rechensystemen zu bearbeiten.

Aber das, was notwendig ist, das ist in Österreich eine politische Frage, Die Politiker interessieren sich eigentlich für die Forschung nicht, höchstens, sie können vielleicht Technologiesprünge machen. Das ist auch notwendig und wichtig, aber die Grundlagenforschung, die Umweltforschung im weiteren Sinne, ist noch wichtiger. Wenn Sie mit einem Politiker reden,

der mit Wissenschaft zu tun hat, dann sagt er Ihnen, daß "die Leute" (die Wähler) keine Wissenschaft haben wollen, aber nur mit Pendeln, mit Esoterik, wird es nicht gehen. Aber das ist dann auch eine Sache aller, das Maul aufzumachen und es den Politikern zu sagen. Das wäre zum Beispiel eine Aufgabe für den Präsidenten der Akademie der Wissenschaften.. Wir in Österreich hinken ja nach. Wien war einmal ein naturwissenschaftliches Zentrum ...*unverst...* Man ist scheinbar der Meinung, das sind böse Leute, die denken.

**NEGENDANK:** Es gibt in Deutschland einen Soziologen, der hat das sehr schön beschrieben, das Dilemma zwischen den politisch Handelnden und der Wissenschaft, und jetzt darf man nicht anfangen von den Wissenschaftlern Antworten zu verlangen für die Politik. und gerade das haben einige Kollegen gemacht und damit

geraten wir in Teufels Küche. Man muß wissen, Wahrheit ist die Interpretationsversion der Plausibilität auf Zeit. Das gilt für alle Bereiche, auch für die Naturwissenschaften.

Nummer zwei ist, wenn ich Experten nehme, bekomme ich eine Variation von Meinungen, die muß ich aus der Politikberatung heraushalten, da muß ein Zwischenmedium sein, das übersetzt, aber man muß sich selbst und die Wissenschaft heraushalten, denn die Geschwindigkeit der Entwicklung ist so groß, daß man fast nichts mehr übersieht. Was Sie gesagt haben, lokal, oder mikro-, meso-, makroglobales Klima, das darf man nicht durcheinanderschmeißen. Das wird aber gemacht, und das nimmt katastrophale Ausmaße an und führt zu Panikmache und dazu, daß den Wissenschaftlern zum Schluß gesagt wird, ihr seid ja unzuverlässig, weil ihr uns die falschen Daten gebt.

**Diskussionsbeiträge von:**

*Univ.Prof. Dr. William W. HAY*  
*Geomar Kiel*  
*Christian-Albrechts-Universität*  
*Wischhofstraße 1-3*  
*D-24148 Kiel*

*Dipl.Ing. Peter HOFBAUER*  
*Wiener Wasserwerke*  
*Gemeinde Wien*

*Dr. Armin KERN*  
*Freudenberg 9*  
*A - 9064 Pischeldorf*

*Univ.Prof. Dr. Dipl.Geol. Jörg F. W.*  
**NEGENDANK**  
*GeoForschungsZentrum Potsdam*  
*Aufgabenbereich 3 "Struktur und Evolution*  
*der Lithosphäre"*  
*Telegrafenberg*  
*14473 Potsdam*  
 &  
*Universität Potsdam*  
*Institut für Geowissenschaften*  
*Postfach 60 15 53*  
*14415 Potsdam*

*Univ.Prof. Dr. Erich SCHROLL*  
*Haidbrunnngasse 14*  
*2700 Wr. Neustadt*

*Univ.Prof. Dr. W. TUFAR*  
*Philipp - Universität Marburg*  
*Fachbereich Geowissenschaften*  
*Hans - Meerwein - Straße*  
*D - 35032 Marburg/Lahn*

Barbara-Gespräche Payerbach 1998	Band 5	"Abfallentsorgung aus erdwissenschaftlicher Sicht" "Klima - Entwicklung"	Seite 267 - 276	Payerbach 2001
-------------------------------------	--------	---	--------------------	-------------------

# BARBARA-GESPRÄCHE

## Payerbach 1998

Die Möglichkeiten von Altersbestimmungen  
in den Erdwissenschaften

Jörg F. W. NEGENDANK



Payerbach,  
17. September 1998

**Anmerkung der Redaktion:**

Da das Originalmanuskript der Langfassung zum Zeitpunkt der Drucklegung nicht vorgelegen ist, findet hier die beim Vortrag aufgelegte Kurzfassung Verwendung.

*Univ.-Prof. Dr. Dipl.-Geol. Jörg F. W. NEGENDANK  
GeoForschungsZentrum Potsdam  
Aufgabenbereich 3 "Struktur und Evolution der Lithosphäre"  
Telegrafenberg  
14473 Potsdam  
&  
Universität Potsdam  
Institut für Geowissenschaften  
Postfach 60 15 53  
14415 Potsdam*

# Die Möglichkeiten von Altersbestimmungen in den Erdwissenschaften

Jörg F. W. NEGENDANK

*Kurzfassung*

Die Entwicklung der Erde ist in die Entwicklung des Weltalls eingebettet. Dabei haben die Geowissenschaften für die Geschichte der Erde bis zur Vorlage der heutigen "Geologic time scale" nach HARLAND et al. 1989 einen langen historischen Entwicklungsprozeß von der relativen Zeitskala über die Nutzung der radiometrischen Datierung zur Kombination relativer und absoluter Einheiten durchlaufen. Dieser Prozeß ist nicht abgeschlossen, sondern bekannte Methoden werden verfeinert und neue Methoden kommen hinzu. Besonderes Augenmerk ist dabei auf die radiometrische Datierung und auf die Erstellung absoluter Skalen gelegt worden, so der Dendrochronologie, der Eischronologie, der Speleothemchronologie, der Chronologie mit Hilfe der Korallenzuwachsringe und der Warvenchronologie.

Diese absoluten Chronologien - wie die Warvenchronologie - erlauben eine innere Zeitkontrolle auf Jahresbasis und sind Voraussetzung für zukünftige globale Klimarekonstruktionen und Klimamodellierungen auf Jahresbasis. Die Erstellung dieser absoluten Chronologien für alle Archive (Meeres-, Seesedimente, Eis, Baumringe, Speleotheme etc.) muß jedoch durch andere Methoden, so u. a. die  $^{14}\text{C}$ -Datierungen und magnetische Parameter kontrolliert werden.

Die Warvenchronologie konnte im Bereich Mitteleuropas bis auf ca. 23.000 Jahre vor heute erstellt werden, in Süditalien in einer

Kombination von Warven- und Sedimentationsratenchronologie bis 110.000 Jahre vor heute. Damit erfahren die Altersbestimmungen eine bisher nicht erwartete Präzision, wie sie ähnlich für diesen Zeitraum für Eiskerne und für die letzten 11.000 Jahre für Baumringe vorliegen. Maarseesedimente erlauben wahrscheinlich sogar eine zeitliche Auflösung auf Jahresbasis für die letzten 250.000 Jahre. Organische aber auch evaporitische Warven dokumentieren im Gegensatz zu den meisten klastischen Warven die Sedimentation aufgrund autochthoner Fällung zu allochthonem äolischem und aquatischem Eintrag über das ganze Jahr, während andere Stratigraphien Events nachzeichnen, also nur zeitlich befristete Ereignisse wie Turbidite u. a.

Diese Warvenchronologie erlaubt zugleich die Aufzeichnung der vulkanischen Geschichte von regionalen und globalen Ereignissen und ihre genaue Datierung, wie das z. B. in der Eifel und im Lago di Monticchio für die vulkanische Aktivität Mitteleuropas und Italiens für die letzten 28.000 und 110.000 Jahre gezeigt werden konnte. Mit diesen Serien ist zugleich die Geschichte des Magnetfeldes aufgezeichnet und datiert. Die geeichten magnetischen Parameterverläufe erlauben dann zugleich die Datierung und Korrelation anderer Seesedimentsequenzen, die sich einer sonstigen Datierung entziehen.



## DISKUSSION

## Die Möglichkeiten von Altersbestimmungen in den Erdwissenschaften

VORTISCH: Jeder, der einmal im ...*unverst.*..., ist begeistert, wenn er diese Zusammenfassung sieht und die neuesten Ergebnisse aus Ihrem Arbeitsbereich hört.

Diese alte Geschichte mit der Präkambrium/Kambrium - Grenze. Sie haben zwei Zahlen gezeigt, einmal ein ganz kleines, etwa 540, und einmal 780 Millionen. Was ist nun Ihre Meinung dazu, was soll man den Studenten erzählen ?

NEGENDANK: Also, es geht etwa auf 590. Aber da gibt es sehr unterschiedliche Auffassungen, je nachdem, welcher Bearbeiter das ist. Wenn Sie nach China gehen, sieht das anders aus, als wenn Sie das in einer anderen Folge entsprechend untersuchen. Altersbestimmungen sind natürlich immer eine Frage, je nachdem, ob Sie Tuffhorizonte finden oder nicht, und das ist also eine offene Diskussion. Ich kann Ihnen nicht alle neuesten Daten dazu sagen. Das ist HARLAND gewesen, an dem ich mich da fixiert habe.

VORTISCH: Wir kehren also zu den Altern zurück, die wir als Studenten gelernt haben. Das Problem ist natürlich auch, wie definieren wir jetzt das ganze Präkambrium/Kambrium in klastischen Folgen, eben nichts drinnen ist. In Skandinavien haben wir diese Folgen, die sich wenig oder gar nicht ...*unverst.*...

VORTISCH: Sie haben mit den Sedimenten praktisch einen petrographischen Wechsel. Die Suszeptibilität hängt ja mit den Eisenmineralen bevorzugt ...*unverst.*... zusammen. Wissen Sie worauf die Suszeptibilität im wesentlichen beruht?

NEGENDANK: Die Suszeptibilität ist natürlich etwas anderes, die beruht auf den magnetischen Trägern.

VORTISCH: Aber der letzte Suszeptibilität ...*unverst.*... interessanterweise auch Klimawechsel. ...*unverst.*..., das heißt, sie haben auch einen sedimentologischen Wechsel

NEGENDANK: Das Verhältnis von organischem zu anorganischem Sediment spiegelt sich wider in der magnetischen Suszeptibilität.

UNBEKANNT: Sie meinen, stark verdünnt. Und das ist der Klimaeffekt.

NEGENDANK: Aber man muß immer berücksichtigen, das gilt nur für eine Lokalität, man darf das nie übertragen in eine andere Klimazone. In identen Klimazonen stimmt das absolut überein. Können Sie reziprok rechnen.

JÄGER: Steigt der  $^{14}\text{C}$ -Gehalt immer kontinuierlich an oder nimmt er kontinuierlich ab oder besteht die Gefahr, daß von einem  $^{14}\text{C}$ -Gehalt, der zu mehreren Zeitpunkten möglich war.

NEGENDANK: Der  $^{14}\text{C}$ -Gehalt macht Schwankungen und zwar mit dem Magnetfeld. Sie können also sagen, es gibt Periodizitäten ca. 500 Jahr, 1000 Jahre, und daher ist das sehr genau anzuschauen. Wenn man in Plateaus gerät, dann kann man nicht mehr datieren, dann hat man eventuell ein paar hundert Jahre. Das ist eines der Probleme. Ich habe jetzt keine Grafiken da, wo ich es zeigen könnte. Man hat ja die „Plateaux“, wie Suess sehr schön gezeigt hat, und dann „Wiggle – Schwankungen“. Das ist relativ kompliziert, und wir versuchen das. Alles was wir da machen bei  $^{14}\text{C}$  sind AMS- $^{14}\text{C}$ , d.h, wir versuchen Pflanzenmaterial, das von außerhalb des Sees kommt, zu nutzen. Wir suchen das aus, ein Botaniker bestimmt das nochmals, und dann geht es erst zur Analyse. Gesamtanalyse machen wir nicht mehr, sondern nur an einzelnen, herausgesammelten Blättern. Sie können auch Früchte nehmen, aber auch da muß man immer wissen, was die Geschichte

sagt. Also, es gibt ganz klare Schwankungen und die passen sich gut ein in die Magnetfeldschwankungen.

VORTISCH: Der Vater der Warvenchronologie, De GEER, Skandinavien, der es ja geschafft hat, ganz früh in diesem Jahrhundert von heute bis minus 10-12.000 Jahre zu zählen, weil er das Glück hatte, einen Übergang in einem Binnensee, wo danach Eis ...*unverst*.... Die Frage ist jetzt, sind die Skandinavier mit eingehängt in diesen neuesten Ergebnissen? Funktioniert das auch mit deren Interstadialen.

NEGENDANK: Die ersten Warven sind klastische Warven, aus dem Väner- und Väterensee und das war eine gestückelte Chronologie aus mehreren Abschnitten. Man hat nachgezählt und ist da doch auf sehr große Diskrepanzen gekommen. Die Kollegen in Skandinavien haben jetzt andere Seen genommen und haben sie sehr genau untersucht. Es gibt aber in skandinavischen Seen Differenzen zu unseren Ergebnissen, vor allen Dingen im unteren Bereich um 10.000 Jahre. Woran das liegt, wissen sie selbst nicht. Deshalb versuchen sie eine Kombination, die ist recht trickreich, aber wir stimmen nicht damit überein. Sie gehen über  $^{14}\text{C}$  in den Sedimentkern und bestimmen von dort her ihr Alter, und ich bin der Ansicht, das dürfen wir im Moment noch nicht machen. Wir müssten jeweils erklären, woran das liegt und in der European Lake Drilling Community sitzen wir ja zusammen und wir treffen uns jetzt im Oktober in Griechenland. Da werden wir diskutieren, wie wir das miteinander korrelieren. Es gibt Differenzen, und wir wissen nicht, woran es liegt.

Wir müssen im einzelnen genau hinschauen, denn die haben Kaltphasen in ihren Seen. Wenn Sie weiter südlich gehen, z.B. Lake Gosciacz in Polen, der stimmt mit unseren Ergebnissen bis aufs Jahr genau überein. Irgendetwas muß da im Norden passiert sein, aber wir wissen nicht, was.

RIEHL - H: Sie haben ja Griechenland erwähnt, und ich habe mich vor 30 Jahren mit Santorin etwas näher befaßt. Dir. KURAT vom Naturhistorischen Museum hat vor einigen Wochen Tuff aus dem Grönlandbohrungen bei sich gehabt, und Sie sagen ja auch, daß Sie

immer wieder den Santorintuff in Grönland drinnen haben und erkennen. Gibt es da irgendwelche neuen Daten?

NEGENDANK: Mir ist das bis jetzt nicht geläufig, aber einige Leute suchen danach. Man muß petrographisch die Gläser nehmen und dann bestimmen und da ein spezielles Signal finden, mit dem ich den Tuff identifizieren kann. Ich glaube, in den Eiskernen muß man nochmal genau hinschauen, wenn man die einzelnen Tuffe erst einmal bestimmt hat. Sie müssen daran denken, es sind 310 Tuffe allein in Italien, und die kann man nicht so ohne weiteres differenzieren, und da braucht man Spezialisten. Auch wir, die wir in die Materie eingearbeitet sind, können das nicht so einfach sagen und brauchen den italienischen Kollegen dazu, der uns sagt, worauf wir aufpassen müssen. Und so ist das auch beim Eis, wobei ich glaube, daß wir irgenjemanden ansetzen müßten, der nur Santorin sucht. Der findet ihn dann auch, denn in den Seen ist das irgendwo drin. Nur, wenn Sie drei Körnchen in einer Lage haben, dann ist das die Nadel im Heuhaufen.

RIEHL-H: Auf Kreta, in den Bohrungen, da war es drin.

NEGENDANK: Dort auf jeden Fall. Wir haben jetzt einige marine Kerne aus dem Mittelmeer im Süden, und bearbeiten sie gerade und da wollen wir speziell hinschauen und von dort aus dann nach Monticchio versuchen; Korrelationen, das ist die Idee. Aber man braucht dazu immer Spezialisten, das ist eine Frage des "Fummelns".

KALLENBACH: Bei  $^{14}\text{C}$ -Werten haben wir ja heute das Problem, daß man eine Kontamination von der Oberfläche unter normaler Bedeckung hat, und da hat man dann jüngere Werte. Da macht man gerne eine Kontrolle mit den ...*unverst*.... Sind Sie in Ihren Seen da vollkommen dagegen gefeit?

NEGENDANK: Ja, und zwar, weil wir nur speziell herausuchen, ganz spezielle Pflanzenteile und Früchte. Wir lassen alles andere weg, denn das Phänomen kennen wir. Da haben Sie auch Hartwassereffekte, je nachdem, und das schließen wir von vornherein aus, weil wir AMS- $^{14}\text{C}$  machen.

**KALLENBACH:** Und Thermoluminiszenz können Sie nicht anwenden in Ihrem Bereich

**NEGENDANK:** Doch, wir haben z.B. Thermoluminiszenzdatierungen an Holz selbst gemacht, nur ist das nicht so präzise im Vergleich mit der Warvenchronologiedatierung. Das bringt uns nichts mehr, aber ich darf sagen, wir haben Thermoluminiszenz im Merfelder Maar gemacht und sind dort mit den paläomagnetischen Untersuchungen auf einen relativ ähnlichen Bereich geraten. Das ist natürlich relativ grob, wenn ich jetzt ins Detail, d.h. auf Jahresauflösung gehe.

**VORTISCH:** Umgekehrt könnten Sie die Thermoluminiszenz mit Ihrer anderen Methode eichen.

**NEGENDANK:** Das ist ja völlig richtig, und zwar der Kollege WAGNER, Heidelberg und andere Kollegen wollen bei uns in Monticchio Thermoluminiszenz machen und eichen. Übrigens soll auch die Uran/Thorium – Methode sogar an organischen Materialien gemacht werden.

**SCHROLL:** Haben Sie sich auch einmal beschäftigt mit dem Zerfall organischer Moleküle, z.B. Aminosäuren. Ich glaube, einer E-funktion folgen, das wäre doch heute ganz interessant, wo man diese Eiweißsubstanzen analysieren kann.

**NEGENDANK:** Sie schließen auf ein Gebiet, wo ich kein Spezialist bin. Aber wir haben eine Gruppe in Jülich dabei, die macht Biomarker. Die machen das vor allem mit Fettsäuren, denn da kann man gut unterscheiden, und das funktioniert übrigens auch sehr schön in Mezzano, Italien. Da gibt es eine entsprechende Publikation. Wir können also auch damit Temperaturen identifizieren. Wir arbeiten übrigens auch mit den Jülichern zusammen, also es ist eine Menge Geochemie gemacht worden.

**RANK:** Wie weit spielt bei Ihren Untersuchungen der Einfluß des windvertragenen Saharasesandes eine Rolle, wie haben Sie das berücksichtigt.

**NEGENDANK:** Das ist richtig. Ich habe selbst schon in der Eifel Sahara - Ereignisse vom Auto heruntergeholt. Nur, bisher hat das noch keiner in den Sedimenten gesehen, warum,

weiß ich nicht. Es kann glatt sein, daß die Partikelchen die gleiche Größe haben.

Aber ich darf auf einen Punkt hinweisen: Wir haben in den Maarseen der Eifel eine "Geisterfauna", Oligozän, und zwar Diatomeen, Schnecken, etc., und die Frage ist, wie kommt die Geisterfauna in unsere letzten 30.000 Jahre hinein. Da gibt es natürlich mehrere Diskussionsmöglichkeiten. Ich habe gedacht, das wäre äolisch und dann ist der Punkt gekommen, wo wir bei Diatomeen aufpassen müssen, daß sie eventuell aus der Sahara kommen.

Das andere ist, wir müssen daran denken, im Tertiär, wo wir wieder Oligozän in der Eifel haben. Ab Miozän ist die Eifel gehoben worden, die Flüsse haben sich eingeschnitten und abgetragen.

Da gibt es auch das Phänomen der Tsunamis, ich will das bewußt in die Diskussion werfen. Herr GERSONDE aus dem Alfred-Wegener-Institut in Bremerhafen hat einen Meteoriteneinschlag in der Weddelsee identifizieren, abbohren und sehr schön zeigen können. Und da ist man in drei Kilometer Meerestiefe, und der Meteorit ist relativ groß. Und nun haben Astrophysiker den Einschlag berechnet und dann berechnet, welche Tsunamis auf der Südhälfte daraus entstanden sind: in Neuseeland ca. 1 km Höhe. Und nun kommt etwas Spannendes: in Neuseeland findet man ja eine Geisterfauna in etwa 800-900 m Höhe, Diatomeen, wo amerikanische Wissenschaftler schon alles mögliche an Theorien entwickelt haben. Und Herr GERSONDE sagt jetzt, das sei dieser Tsunami aus dem Meteoriteneinschlag in der Weddelsee. So etwas Ähnliches müssen wir auch bedenken, wenn wir in den Maaren der Eifel sind, denn paläogeographisch sind wir nicht weit weg von den alten Küsten, wir haben in unmittelbarer Umgebung brackisches Mitteloligozän.

**KIKINGER:** Sie konnten in einigen Proben einen Klimawechsel vor 9.650 Jahren feststellen. Gibt es Theorien, wodurch der verursacht wurde - Stichwort Meteoriteneinschlag.

**NEGENDANK:** Ich weiß, worauf Sie hinauswollen, ich kann das nicht sagen, wir können das nur identifizieren. Wenn ich KRISTAN & TOLLMANN nehme und ähnliche Periodizitäten von der Sonne, da kommt eher die Sonne in

Frage. Deshalb würde ich die Diskussion, ob es sich um einen Meteoritenimpakt handelt, erst einmal auf die Seite schieben.

RIEHL-H.: War dieser Wechsel vor 9.600 Jahren nicht auch mit einer magnetischen Wechsel verbunden?

NEGENDANK: Ist mir nichts bekannt.

RIEHL-H.: Haben Sie Anhaltspunkte zur Polumkehr, haben Sie da Vorstellungen ?

NEGENDANK: Auf Grund unserer Untersuchungen können Sie sagen, das derzeitige Dipolfeld ist in 2000 Jahren zu Ende. Was dann kommt, wissen wir nicht, es könnte ja ein Quadropfeld werden. Herr GLATZMAYER hat ein Modell gerechnet, wie das geht; aber es könnte auch nur eine Umpolung sein, d.h. das Magnetfeld geht zur Zeit rasant dem Ende entgegen.

RIEHL-H.: Man hat lange gedacht, daß die Eiszeiten damit in Verbindung gebracht werden können, aber es scheint kein Zusammenhang zu bestehen.

NEGENDANK: Nicht unmittelbar. Prof. RASPOPOW aus St. Petersburg und Kollegen aus dem königlichen meteorologischen Institut Dänemark vermuten, daß die kosmische Strahlung, die auf uns herunterprasselt, die Wolkigkeit verursacht. So gibt es dann in solaren Maxima und Minima Unterschiede. Im Maximum bläst der Solarwind die kosmische Strahlung zum Teil beiseite und dadurch kommt es zu einer geringeren Wolkigkeit (4-5%). Dadurch ist eine größere Einstrahlung durch die Sonne gegeben und damit zusammen hängt das Magnetfeld. Das wird dadurch ganz massiv beeinflusst, ebenso die  $^{14}\text{C}$ -Produktion und wahrscheinlich auch einige Dinge, die wir bis heute nicht verstehen.

Es muß also irgendeinen Trigger geben, der alles dieses beeinflusst. Das muß man diskutieren; wir finden ja nur statistisch die Ähnlichkeiten, die Periodizitäten, aber wir haben noch nicht das missing link.

KERN: Die Amerikaner diskutieren ja derzeit wegen der rasanten Abnahme des Magnetfeldes, daß die Sonnenfleckaktivität im Jahr 2002 möglicherweise diese Umpolung beschleunigen könnte. Ich weiß nicht, das ist eine aktuelle Diskussion.

NEGENDANK: Da bin ich jetzt vorsichtig; nächste Woche treffen wir uns, wir machen einen neuen Schwerpunkt "erdmagnetische Variationen", da werden wir diese Frage andiskutieren.

Ich halte mich bei der Magnetopause heraus, Magnetfeld Sonne - Magnetfeld Erde, da verstehe ich nichts davon.

TUFAR: Ich möchte noch eine abschließende Bemerkung machen: hier im Lande wird eine neue Methode entwickelt. Nachdem nur über instabile Isotope gesprochen wird bei Altersbestimmungen, haben sich mein verehrter Lehrer Prof. SCHROLL und Prof. RANK zusammengesetzt und überlegt, ob man nicht auch stabile Isotope dafür heranziehen kann, Sauerstoff und Kohlenstoff, und Koll. RANK hat hier das "1. Rank'sche Gesetz erarbeitet, und. ...unverst.... niederösterreichischen Gefielden, in der Steiermark und im Burgenland abgeklärt worden und wurden datiert und an Flüssigkeitseinschlüssen aus dem Moldanubikum hat er einen Standard bereit gemacht für 1976. In der Wissenschaft heißt das im Moment noch "Heureka!" ...unverst.... Als Entwicklungshilfe von Österreich für Potsdam, ...unverst.... wo es sich langsam nach Rheinhessen vorarbeiten kann.

**Diskussionsbeiträge von:**

*Dr. Walter JÄGER*  
Wien

*Univ.Prof. Dr. H. KALLENBACH*  
Am Sandwerder 42a  
D - 14109 Berlin

*Dr. Armin KERN*  
Freudenberg 9  
A - 9064 Pischeldorf

*Dr. Reinhard KIKINGER*  
Österr. Naturschutzbund  
Universität Wien  
1010 Wien

*Univ.Prof. Dr. Dipl.Geol. Jörg F. W. NEGENDANK*  
GeoForschungsZentrum Potsdam  
Aufgabenbereich 3 "Struktur und Evolution der Lithosphäre"  
Telegrafenberg  
14473 Potsdam  
&  
Universität Potsdam  
Institut für Geowissenschaften  
Postfach 60 15 53  
14415 Potsdam

*Univ.Prof. Hr Dr. D. RANK*  
OFPZ Arsenal  
Bereich Umwelt  
Faradaygasse  
A - 1030 Wien

*Dr. Georg RIEHL - H*  
Hauptstraße 70  
A - 2801 Katzelsdorf

*Univ.Prof. Dr. Erich SCHROLL*  
Haidbrunnngasse 14  
2700 Wr. Neustadt

*Univ.Prof. Dr. W. TUFAR*  
Philipp - Universität Marburg  
Fachbereich Geowissenschaften  
Hans - Meerwein - Straße  
D - 35032 Marburg/Lahn

*Univ.Prof. Dr. W. VORTISCH*  
Montanuniversität Leoben  
Inst. f. Sedimentologie  
Peter Tunner Straße  
A - 8700 Leoben



## BISHER ERSCHIENEN

**Band 1 BARBARA-GESPRÄCHE Payerbach 1993 VERGRIFFEN**

Mitteilungen für Baugeologie und Geomechanik	Band 3	Baugeologische Tage Payerbach 1991	Seite 1 - 99	Wien 1994
Barbara-Gespräche	Band 1	"Grenzen der Geotechnik" Payerbach 1993	Seite 101 -216	Wien 1994

*Teil 1***BAUGEOLOGISCHE TAGE Payerbach 1991****ABFALL-LAGERUNG - WASSER****Seminar:**

- W. KOLLMANN Hydrogeol. Einführung in das südliche Wiener Becken  
 G. RIEHL-HERWIRSCH Aufbau und Funktionen der Hausmüll-Versuchsanlage Breitenau  
 E. VITEK Begrünungsversuch Hausmüll-Versuchsanlage Breitenau  
 F. PJANIC Die Hausmüll-VA. Breitenau aus der Sicht der Baudurchführung  
 TH. LAHNER & E. BINNER Maßnahmen zur Verbesserung des Abbauverhaltens org. Substanz vo. n Mülldeponien am Beispiel der Hausmüll-VA. Breitenau  
 P. CARNIEL & P. MELICHAR Geophysikalische Messungen - "Deponieerkundung" am Beispiel Breitenau  
 W. KASPER Die Hausmüll-VA Breitenau aus der Sicht der Wasser-Wirtschaft

**Vorträge:**

- W. VORTISCH Entwicklungen und Probleme mineralischer Dichtungen für Abfalldeponien  
 M. GANDOLLA Tendenzen der Deponietechnik in der Schweiz  
 H. HÖTZL Hydrogeol. Standortbewertung für Sonderabfalldeponien  
 W. POZAREK Umweltverträglichkeitsprüfung bei NÖ Sonderabfalldeponie-Standorten  
 W. DEMMER Grundsatzkonzept für die Möglichkeit der Endlagerung von radioaktivem Abfall aus der Sicht des Baugeologen  
 F. OTTNER & B. SCHWAIGHOFER Untersuchungen von Dichtungseigenschaften toniger Barrieregesteine  
 G. RIEHL-HERWIRSCH Die "Diagenetische Inertisierung" eine umweltneutrale Rückeinbindung von Abfall in den natürlichen Stoffkreislauf  
 D. RANK Natürliche und künstliche Markierungen in der Geohydrologie / Istopenverhältnisse und Radionuklide

**DER SEMMERINGBASISTUNNEL -  
NEUE ÖSTERREICHISCHE TUNNELBAUWEISE NÖT**

- G. W. MANDL & A. MATURA Geologischer Überblick über das Semmeringgebiet  
 G. HAMMERSCHMID Die Bedeutung des Semmeringtunnels aus verkehrspolitischer Sicht  
 A. STEMPKOWSKI Das Tunnelprojekt des Semmering Basistunnels  
 W. FÜRLINGER & G. RIEDMÜLLER Die geologischen Vorarbeiten für den Semmering-Basistunnel  
 P. REICHL, H. ZOJER Hydrogeologische Untersuchungen im Zuge der Planung des Semmering-Basistunnels  
 M. JOHN & W. PURRER Geotechnische Aspekte bei der Anwendung der NÖT beim Ärmelkanaltunnel  
 M. HACKENBERG Der Bergbau Grillenberg  
 R. PAP Der Bau der ersten Gebirgsbahn Europas über den Semmering

*Teil 2***BARBARA-GESPRÄCHE Payerbach 1993****GRENZEN DER GEOTECHNIK**

- H. H. BRUNNER Abfall als Langzeitrisiko  
 W. KASPER Behebung von Umweltschäden - am Beispiel des Grundwassers der Mitterndorfer Senke  
 H. KALLENBACH Zur Geologie von Berlin: Wirtschaftliche Nutzung und ökologische Probleme  
 E. SEMENZA & M. GHIROTTI Vaiont / Longarone - 30 Jahre nach der Katastrophe  
 H. LUDESCHER & P. OBERNHUBER Das Verhalten der Kölnbreinsperre nach der Errichtung einer talseitigen Abstützkonstruktion

**Band 2 BARBARA-GESPRÄCHE Payerbach 1995 VERGRIFFEN**

Barbara-Gespräche	Band 2	"Geogen - Anthropogen" - "Hausmüllversuchsanlage Breitenau" Payerbach 1995	Seite 1 - 290	Wien 1997
-------------------	--------	---	---------------	-----------

*1. Tag***GEOGEN-ANTHROPOGEN**

*Wertstoffe - Schadstoffe  
 Entstehung und Wirkung auf die Umwelt*

- W. TUFAR Rezente hydrothermale Aktivität und Lagerstättenbildung (Komplexmassivsulfiderze - "Schwarze Raucher") an aktiven Spreizungsrücken am Ozeanboden  
 K. AUGUSTIN-GYURITS Geochemische Untersuchungen an Fluß- und Bachablagerungen in Niederösterreich - Vergleich mit Bodendaten  
 R. GÖD Die Arsenanomalie Feistritz / Wechsel  
 G. MÜLLER Schwermetallgehalte in Fluß- und Seeablagerungen als Spiegelbild der historischen Entwicklung - weltweite Beispiele - Entsorgungsfragen  
 O. SCHERMANN Die Geochemie als Methode zur Lagerstättensuche und ihre Anwendung in der Umweltekundung  
 G. WESSELY Die Bohrung Payerbach-Thermal TH1 Geologische Grundlagen - Ergebnisse

*2. Tag***HAUSMÜLL-VERSUCHSANLAGE BREITENAU**

*8 Jahre Untersuchungsergebnisse*

- A. LAGERKVIST & H. ECKE Deponieversuchsanlagen aus internationaler Sicht  
 G. RIEHL-HERWIRSCH & P. CARNIEL & M. HACKENBERG Die Versuchsanlage Breitenau - Aufbau und Wasserwegsamkeiten, Ergebnisse und Fragen  
 E. BINNER & Th. LAHNER Wasserhaushalt und Emissionssituation am Beispiel der Hausmüll-Versuchsanlage Breitenau  
 D. RANK Isotopenuntersuchungen an Sickerwässern der Versuchsanlage Breitenau  
 P. LECHNER Die Emissionen von Deponien - derzeit und in Zukunft

**Band 3 BARBARA-GESPRÄCHE Payerbach1996**

Barbara-Gespräche	Band 3	Verkehrswege im Osten Österreichs "Wasser · Boden · Luft" - Grenzwerte-Richtwerte, Sinn oder Unsinn ? Payerbach 1995	Seite 1 - 290	Wien 1998
-------------------	--------	--	---------------	-----------

**1. Tag****VERKEHRSWEGE IM OSTENÖSTERREICHS***Nach Ostöffnung und EU-Beitritt*

W. DEMMER	Der Geologe em.Univ.Prof. DDR. E. Clar als Lehrer und Leitbild der österreichischen Ingenieurgeologie
F. ZIBUSCHKA	Die Verkehrsplanung in Ostösterreich
W. GOBIET	Anbindung Südostösterreichs an die europäischen Verkehrswege
G. SPAUN	Geologische Voruntersuchungen zur Umfahrung Haag - St. Valentin
J. KAISER	Die geologische Erstaufnahme beim Bau des Sondierstollens für den Semmeringbasistunnel als Grundlage aller weiteren Arbeiten und Berechnungen
K. KLIMA	Geologische Erkundung zur Trasse des Traidersbergtunnels, Steiermark
N. TOPLITSCH	Barbara - Weg einer Heiligen durch die Jahrhunderte

**2. Tag****WASSER - BODEN - LUFT***Grenzwerte - Richtwerte, Sinn oder Unsinn?*

J. WIMMER	How clean is clean, how safe is safe? Warum es ohne Grenzwerte nicht geht - und mit ihnen nicht viel besser.
H.D. GREGOR	Der "Critical Loads" - Ansatz als Konzept zur Grenzwertfindung
G. EDER	Stoffeintrag in das Grundwasser aus Böden mit landwirtschaftlicher Nutzung (Lysimeteranlage Gumpenstein)
M. HACKENBERG	"Arsen und Spitzenhäubchen". Zur Geschichte des Arsens
TH. FRISCHER	Ozon und seine Auswirkungen auf kindliche Atemwege - Untersuchungen in NÖ
M.P. JAUMANN	Können Grenzwerte oder Richtwerte die Menschen schützen?

**Band 4 BARBARA-GESPRÄCHE Payerbach1997**

Barbara-Gespräche	Band 4	" Events und Evolution " " Karsthydrologie und Wasserhaushalt"	Seite 1 - 224	Wien 2000
-------------------	--------	---	---------------	-----------

**1. Tag****EVENTS UND EVOLUTION***Katastrophen und Entwicklung in der Erdgeschichte*

T. CERNAJSEK	Plutonismus contra Neptunismus - ein historischer Rückblick zur Entwicklung der Geowissenschaften
G. KURAT	Materie aus dem All
E. FLÜGEL	Die Perm/Trias-Grenze als Umbruch in der Lebensentwicklung
A. PREISINGER	Die Kreide/Tertiär-Grenze
W. FRANK	Meteoriteneinschläge und ihre Altersbestimmung, nur Diskussion
H. P. SCHÖNLAUB	Wesentliche Events der Erdgeschichte und deren Auswirkungen - Zusammenfassung und Ausblick
A. TOLLMANN	Impakte (kosmische Einschläge) - ihre Auswirkungen auf die Erde und das Leben

W. STINNESBECK      Klastische Sedimente im Umkreis von Chixculub (Yukatan, Mexico),  
Zur Altersstellung des Impakt-Events und anderer Ereignisse  
an der Wende Kreide/Tertiär

D. NAGEL &  
G. RABEDER      Impaktismus und Paläontologie

2. Tag

**KARSTHYDROLOGIE UND WASSERHAUSHALT**  
*Kalkalpen und südliches Wiener Becken*

G. VÖLKL      Neue Wege in der karsthydrologischen Forschung

G. WESSELY      Tiefenwässer - Kalkalpen und Wiener Becken

H. ZANKL &  
M. FELLEHNER      Der Hauptdolomit als potentieller Trinkwasserspeicher am Beispiel  
der Region Reichenhall

G. KUSCHNIG      Karstforschungen der Wiener Wasserwerke zur Sicherung der  
Wasserversorgung

G. RIEHL-HERWIRSCH &  
P. GOTTSCHLING &  
D. RANK      Schwankungen im oberflächennahen Grundwasser und  
Wasserhaushalt im südlichen Wiener Becken

M. HACKENBERG &  
G. RIEHL - H.      Geologische Zeittabelle

Band 1 und Band 2 (Vergriffen) Band 3 (ATS 380,-) Band 4 (ATS 380,-) und Band 5 (ATS 380,-)  
können über folgende Adressen bezogen werden:

Geol. Dienst des Landes NÖ, HR Dr. P. GOTTSCHLING, A - 3108 St. Pölten, Landhausplatz 1  
oder: Geoschule Payerbach, 2650 Payerbach, Tel. 02666/52611, Fax 02666/52930,

## IN VORBEREITUNG

### **Band 6 BARBARA-GESPRÄCHE Payerbach 1999**

- 1. Tag* **EISEN**  
*Vom Erz zum Stahl*
- M. HACKENBERG Bergbau im Semmeringgebiet - ein geographisch-historischer Überblick  
W. TUFAR Die gegenwärtige Weltrohstoffversorgung mit Eisen aus  
lagerstättenkundlicher Sicht
- W. PROCHASKA Entstehung von Sideritlagerstätten, Interpretation von  
Flüssigkeitseinschlüssen
- L. WEBER Zur metallogenetischen Karte Österreichs - Vorstellung der CD-ROM  
H. STRAUBE Der Weg vom Erz zum Stahl mit historischen Schwerpunkten
- 2. Tag* **MINERALISCHE MASSENROHSTOFFE**  
*Abbau und gesellschaftliche Akzeptanz*
- K. AUST Massenrohstoffe und Baurohstoffe - Abbauproblematik  
aus Sicht der Behörden
- G. POPPINGER Kiesgruben - Abbauproblematik von Massenrohstoffen  
aus Sicht der Wirtschaft
- H. AUGUSTIN Schlacken als Rohstoff im Straßenbau
- G. RIEHL - HERWIRSCH Neugestaltung einer ökologischen Landschaft als Ziel der Rekultivierung  
und Nachnutzung von Abbaubereichen
- E. REIDINGER Wiener Neustadt A.D. 1192 - Stadtplanung im Grundwasser

### **Band 7 BARBARA-GESPRÄCHE Payerbach 2000**

- 1. Tag* **VULKANISMUS - ERDBEBEN**  
*Grenzen der Normalität ?*
- G. VÖLKL Hawaii
- G. RIEHL - H. Santorin
- K. DECKER Erdbeben - sichtbare Zeichen anhaltender Gebirgsbildung in den Ostalpen
- J. ZSCHAU Vulkan- und Erdbebenkatastrophen
- 2. Tag* **MINERALISCHE MASSENROHSTOFFE**  
*Abbau und gesellschaftliche Akzeptanz*
- J. FARNLEITNER Entscheidungen zwischen Politik, Wirtschaft und Umweltpflege
- G. NEUPER Festgesteinsabbau im Spannungsfeld von Geologie,  
Wirtschaftlichkeit und Umwelt
- W. PROCHASKA Lassing - Analyse einer Katastrophe
- L. WEBER Die Bergwasser - „Explosion“ Nassereith, Ursache und Problemlösung
- H. HABENICHT Schluß dem Überfluß - Die Falle der menschlichen Mängel  
bei der Bewahrung der Umwelt
- Podiumsdiskussion

