

**Schlüsselwörter**

*Deponie  
Horn  
Gmünd  
Basisdichtschicht  
Adsorption*

# Untersuchungen zum Adsorptionsverhalten der Basisdichtschichten der Deponien Gmünd und Horn – Eine Funktionsanalyse nach mehrjährigem Deponiebetrieb

BERND SCHWAIGHOFER<sup>1</sup>, HANNES KUGLER<sup>1</sup>, FRANZ OTTNER<sup>1</sup>, RENATA ADAMCOVA<sup>2</sup>

14 Abbildungen, 1 Tabelle

## Inhalt

Zusammenfassung .....	185
Abstract .....	185
1. Einleitung und Fragestellung .....	186
2. Geographische Lage .....	186
3. Geologische und Hydrogeologische Situation .....	186
3.1 Deponie Gmünd .....	186
3.2 Deponie Horn .....	187
4. Probennahme .....	189
5. Methodik .....	189
6. Ergebnisse .....	190
6.1 Gesamt- und Tonmineralogische Zusammensetzung .....	190
6.2 Korngrößenverteilung .....	190
6.3 Plastizität, Durchlässigkeit und Kationenaustauschkapazität (nur Horn) .....	191
6.4 Schwermetall und Anionenverteilung .....	192
6.5 Diffusionsversuche und Abschätzung der Durchbruchzeit (nur Horn) .....	194
7. Schlussfolgerungen .....	199
Danksagung .....	200
Literatur .....	200

## Zusammenfassung

Im Zuge von Sanierungsarbeiten der Mülldeponien bei Horn und Gmünd (in der Böhmisches Masse in Niederösterreich) konnten die mineralischen Basisdichtungen, welche 10-15 Jahre kontaminierten Sickerwässern ausgesetzt gewesen waren, horizontweise beprobt werden. Ziel war es, die erfolgte Migration von Schwermetallen und anorganischen Anionen innerhalb der Dichtschichten zu erfassen und das diesbezügliche Adsorptionsvermögen abzuschätzen.

Die durchgeführten Untersuchungen zeigen einen mineralogisch homogenen Aufbau der mineralischen Barrieren aus kaolinitisch dominierendem Ton – wie er für Verwitterungsprodukte feldspatreicher Gesteine der Böhmisches Masse typisch ist. Die chemischen Analysen ergeben insgesamt eine äußerst geringe Eindringtiefe der Schwermetalle in die mineralische Barriere. Bereits nach 1-2 cm wird bei den meisten Elementen ein Wert erreicht, der dem geogenen background von Sedimenten entspricht. Anionen können infolge der sehr geringen Adsorption an den Tonmineralen tiefer in die mineralische Barriere vordringen, weshalb sie auch für erste Diffusionsuntersuchungen als Tracer herangezogen wurden.

Durch die vorliegenden Untersuchungen kann aufgezeigt werden, daß die mineralischen Barrieren auch nach mehrjähriger Kontamination die Funktion des Schadstoffrückhalts bezüglich Schwermetalle und anorganischer Anionen erfüllt haben und ihre Adsorptionsfähigkeiten darüberhinaus bei weitem noch nicht ausgeschöpft sind.

## Investigations of the adsorption of base mineral liners of the landfills Gmünd and Horn – a functional analysis after several years of operation.

### Abstract

In the course of reconstruction of municipal waste landfills near Horn and Gmünd (situated on the Bohemian Massif in Lower Austria) samples were taken at different depths from the base mineral liners, which had been contaminated with leachates throughout 10-15 years. The aim was to see how deep heavy metals and inorganic anions could migrate within the mineral liners and to estimate the sorption capacity with respect to these pollutants.

### Anschriften der Verfasser

<sup>1</sup> Institut für Angewandte Geologie, Universität für Bodenkultur Wien, Peter Jordan Straße 70

<sup>2</sup> Lehrstuhl für Ingenieurgeologie, Komenský Universität Bratislava, Mlynská Dolina 6

The results of the research project show a mineralogically homogeneous structure of the base mineral liners which consist of clay dominated by kaolinite. In the Bohemian Massif, this pattern is typical for products of weathered rocks that were originally rich in feldspar. As a whole, chemical analyses prove that heavy metals do not reach great depth within the mineral liner: even at a depth of 1-2 cm, most elements reach a level of concentration corresponding to the geogeneous background of sediments. Anions, however, are found in greater depth due to a very low adsorption on the clay, which is the reason why they were used as a tracer for initial research on diffusion.

The following results clearly demonstrate that the base mineral liners have fulfilled the requirements of retention of pollutants (i. e. heavy metals and anions) – even after a several years old contamination. Furthermore, the layers' capacities of adsorption are far from reaching their limits.

## 1. Einleitung und Fragestellung

Für das Institut für Angewandte Geologie, Univ. für Bodenkultur Wien, ergab sich bei den Deponien Horn und Gmünd (niederösterreichischer Teil der Böhmisches Masse) im Rahmen der Sanierungsarbeiten die Gelegenheit, die Basisdichtschichten, welche 10 bis 15 Jahre der Kontamination mit Sickerwässern ausgesetzt waren, zu beproben und zu untersuchen. Hintergrund dieser Untersuchungen war die Fragestellung, ob die mineralischen Basisdichtungen dieser Deponien die ihnen zugedachte Funktion des Schadstoffrückhalts über Jahre hinweg tatsächlich in entsprechender Weise erfüllt hatten. Dazu wurden Gesamtmineraluntersuchungen, Korngrößenanalysen, Tonmineralbestimmungen, und darüberhinaus Plastizitäts-, Durchlässigkeitstests und Diffusionsversuche (an ungestörten Proben aus Horn) durchgeführt, sowie Kationenaustauschkapazität (ebenfalls nur in Horn), Schwermetall- und Anionenverteilungen ermittelt.

Die Deponie Gmünd ist in einer ehemaligen Sandgrube situiert. Seit Mitte der 70er-Jahre fand hier eine Deponierung von Hausmüll auf einem nur zum Teil mit einer etwa 0,5 m mächtigen mineralischen Basisdichtung (mit einfachen Ableitungsdrains) versehenen Untergrund statt. 1992 wurde die Deponie in Hinblick auf den Grundwasserschutz geschlossen und in den darauffolgenden Jahren seitens der Niederösterreichischen Umweltschutzanstalt (NUA) eine Sanierung durchgeführt.

Auch die Deponie Horn liegt in einer ehemaligen Ton- und Sandgrube und wurde von der Stadt Horn als Hausmülldeponie betrieben. Erste Müllablagerungen erfolgten bereits Mitte der 70er-Jahre, aber erst 1986 wurde auf Grund starker Beeinträchtigungen der Grundwasser-Qualität (in Ermangelung einer Basisdichtung) auf etwa einem Drittel der endgültig verfüllten Fläche von der NUA eine mineralische Dichtschicht samt Drainagesystem hergestellt und die Deponierung fortgesetzt. Etwa 10 Jahre später wurde die Notwendigkeit einer Sanierung „von Grund auf“ erkannt und diese mit einer Erweiterung der Deponiekapazität in Form einer Bergschüttung durch die NUA sinnvoll kombiniert.

## 2. Geographische Lage

Die Mülldeponie Gmünd (Abb. 1) liegt im niederösterreichischen Waldviertel am westlichen Rand des etwa 300 m vom Deponiegelände entfernten Gelsenberges (505 m) direkt an der Landesstraße LH 62, unmittelbar an der Staatsgrenze zu Tschechien. Den Gelsenberg umgeben eine Vielzahl von ehemaligen und aktiven Sandgruben, von denen eine zum heutigen Deponiegelände umfunktioniert wurde. Das nächstgelegene Wohngebäude befindet sich ca. 700 m südöstlich, das nächstgelegene Siedlungsgebiet (Breitensee) ca. 1300 m in gleicher Richtung.

Die Deponie Horn (Abb. 1), ebenfalls im Waldviertel, liegt im westlich des Manhartsberges gelegenen Horner Becken am nordöstlichen Stadtrand von Horn. Sie befindet sich auf einem

gering nach S geneigten Höhenrücken in einer Höhe von 314 m bis 326 m ü. A. an der B 45 zwischen Horn und Breiteneich, wobei die nächstgelegenen Wohngebiete 700 m und die Zentren von Horn und Breiteneich 1 km, bzw. 1,5 km entfernt sind.

## 3. Geologische und hydrogeologische Situation

### 3.1 Deponie Gmünd

Die Deponie Gmünd liegt in der Gmünder Bucht, die einen Ausläufer des Wittingauer Beckens darstellt. Dieses ist ursprünglich ein tektonisches Zerrungsbecken der variszischen Gebirgsbildung, das aber seine heutige Ausbildung dem Einfluß der alpinen Orogenese während der Oberkreide und dem Paläogen verdankt. Während dieser Absenckphase wurde das Becken gleichzeitig sowohl von Meeres-, als auch Flußsedimenten aufgefüllt.

Im Bereich der Deponie stehen die oberkretazischen Gmünder Schichten an, die aus dem südböhmischen Wittingauer Becken nach Österreich hereinstreichen, terrestrisch-limnofluviale Süßwasserschichten darstellen und Mächtigkeiten von über 100 m erreichen können. Bei Gmünd und dem Lainsitztal aufwärts gegen Weitra liegt eine Folge sandiger, bunter Tone in inniger Verzahnung mit verschiedenen körnigen Sanden und Feinkonglomeraten vor. Die Gmünder Schichten liegen teilweise auf kaolinitisiertem Grundgebirge (FUCHS 1964).

Bei den Sandgruben im Bereich von Breitensee und der Deponie handelt es sich um fluvial aufgearbeitete Verwitterungsprodukte des östlich, bzw. nordöstlich anschließenden Kristallins in Form von Sand-Kies-Abfolgen mit internen Schräg- und Kreuzschichtungen. Das anstehende Kristallin als Bestandteil des südböhmischen Plutons bildet vorwiegend der hellgraue, mittel- bis grobkörnige Eisgarner Granit.

Von hydrogeologischer Relevanz sind v. a. die Lockersedimentkomplexe und Alluvialkörper der Lainsitz, aber auch die Randbereiche des Eisgarner Granits, welcher sandige bis grusige Verwitterungstaschen aufweist, die mit Lainsitzer Sanden und mit Sedimentresten verzahnt sind. Direkt im Deponieareal folgt unter einer flurnahen Deckschicht von 0,1-1 m der erste GW-Leiter, der hauptsächlich aus (kiesigen) Sanden besteht. Der Kies- und Sandanteil des Leiters beträgt insgesamt zw. 83 und 94% mit durchschnittlichen  $k_f$ -Werten zw.  $1,9 \times 10^{-4}$  und  $5 \times 10^{-4}$  m/s.

Im Liegenden des GW-Leiters folgt eine theoretisch als GW-Stauer fungierende Verwitterungsschwarte des Eisgarner Granits mit Mächtigkeiten zw. 0,8 und 6 m, sehr inhomogenem Aufbau und keiner einheitlichen Stauerqualität (Durchlässigkeiten:  $k_f$ -Werte zw.  $1,2 \times 10^{-8}$  und  $8 \times 10^{-11}$  m/s). Der kristalline Untergrund in Form des Eisgarner Granits zeigt starke Verwitterungsspuren in Form von intensiver Braunfärbung des Bohrkernes, Verwitterung einzelner Minerale und sandig-grusigen Kluffüllungen. Wasserabpreßversuche zeigen in den prak-

15 östl. Länge v. Greenwich

16

49

48

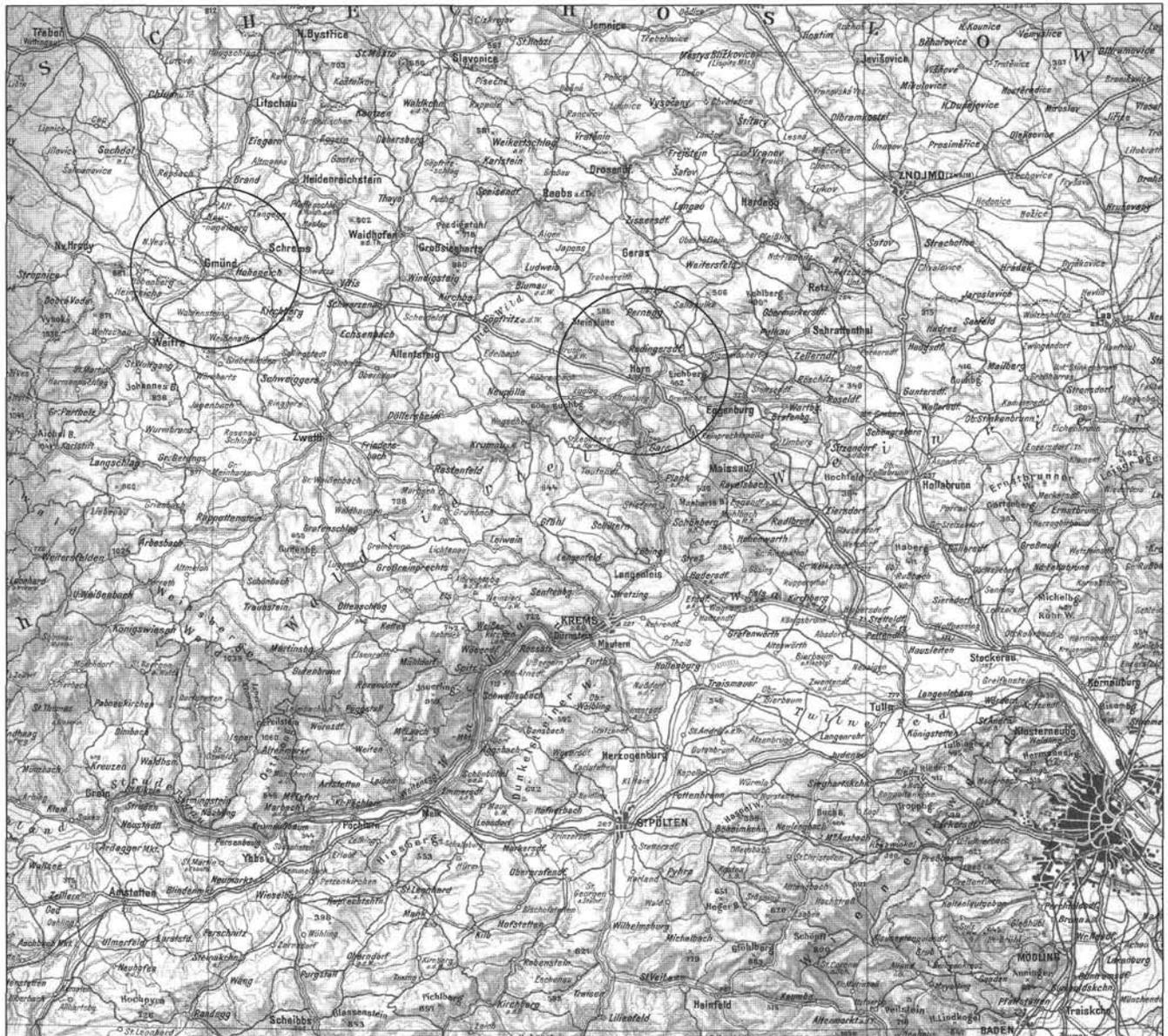


Abb. 1

Geographische Lage der Deponien Gmünd und Horn (Wien befindet sich im rechten unteren Bildteil).

tisch dichten Kristallinstrecken Durchlässigkeiten ( $k$ -Werte) von im ungünstigsten Fall  $1,97 \times 10^{-9}$  m/s, über  $7,6 \times 10^{-9}$  m/s bis hin zu keinerlei Wasseraufnahme.

Jener Bereich, der zum Großteil Eigenschaften eines GW-Leiters oder zumindest keine durchgehenden Stauerqualitäten besitzt (eigentlicher „Leiter“ plus der Verwitterungsschwarte und der klüftigen Anteile im Hangenden des Kristallins), weist im Deponiebereich insgesamt eine Mächtigkeit zw. 14,2 und 44,9 m auf (GW-Säulen erreichen Mächtigkeiten zw. ca. 9 und 34 m). Das nutzbare, bzw. durchflußwirksame Porenvolumen der GW-führenden Schichten liegt im Mittel bei ca. 24%, die generelle GW-Strömung im Deponiebereich ergibt eine Richtung von SSE nach NNW bei einem hydraulischen Gefälle von 0,2%.

In Ermangelung langfristig eingerichteter und beobachteter Meßstellen im direkten und weiteren Umfeld wird ein Höchst-GW von 472 müA vorgeschlagen (ÖKOPLAN 1993), wodurch zumindest ein Teil der Sohle des alten Deponiekörpers (471,8-473,2 m) knapp innerhalb des GW-Schwankungsbereiches gelegen ist!

### 3.2 Deponie Horn

Beim Horner Becken, einer 20 km langen und im Mittel 1-3,5 km breiten, im Grundriß winkelförmigen Senke, handelt es sich um ein tektonisches Zerrungsbecken entlang vorgegebener Schwächezonen innerhalb des Kristallins der Böhmisches Masse mit Gneisen und Glimmerschiefern als Beckenrahmen, bzw. Beckenuntergrund. Die oligozäne Bildung des Beckens (STEININGER & ROETZEL 1991) erfolgte synsedimentär mit der Auffüllung limnisch-fluvialer, aber auch mariner Sedimente, die in teilweise intensiver Wechsellagerung von vorwiegend Tonen, Schluffen und Sanden in einer Mächtigkeit von deutlich weniger als 100 m im weiteren Deponiebereich vorliegen (WERNER 1993). Die größte erbohrte Mächtigkeit der Beckensedimente bei Mörtersdorf weist allerdings 176 m auf (TOLLMANN 1985).

Grundsätzlich können im Beckenbereich zwei GW-Körper unterschieden werden, wobei der tiefere gespannt ist und einen rund 20-30 m unter GOK liegenden Druckausgleichspegel aufweist. Daneben liegen flurnahe Horizonte mit ört-

lich unterschiedlicher Bedeutung und einem Ruhewasserspiegel von 4-8 m unter GOK vor. Die GW-Strömungsrichtungen verlaufen im Bereich des Beckenkniees und der Deponie von NE nach SW, also Richtung Horn (WERNER 1993). Die GW-

Erneuerung erfolgt vorwiegend durch Gerinne, die dem Becken von außen zufließen, geringere Beiträge leistet der im direkten Einzugsbereich des Beckens fallende und versickernde Niederschlag mit etwa 15% des Jahresniederschlags

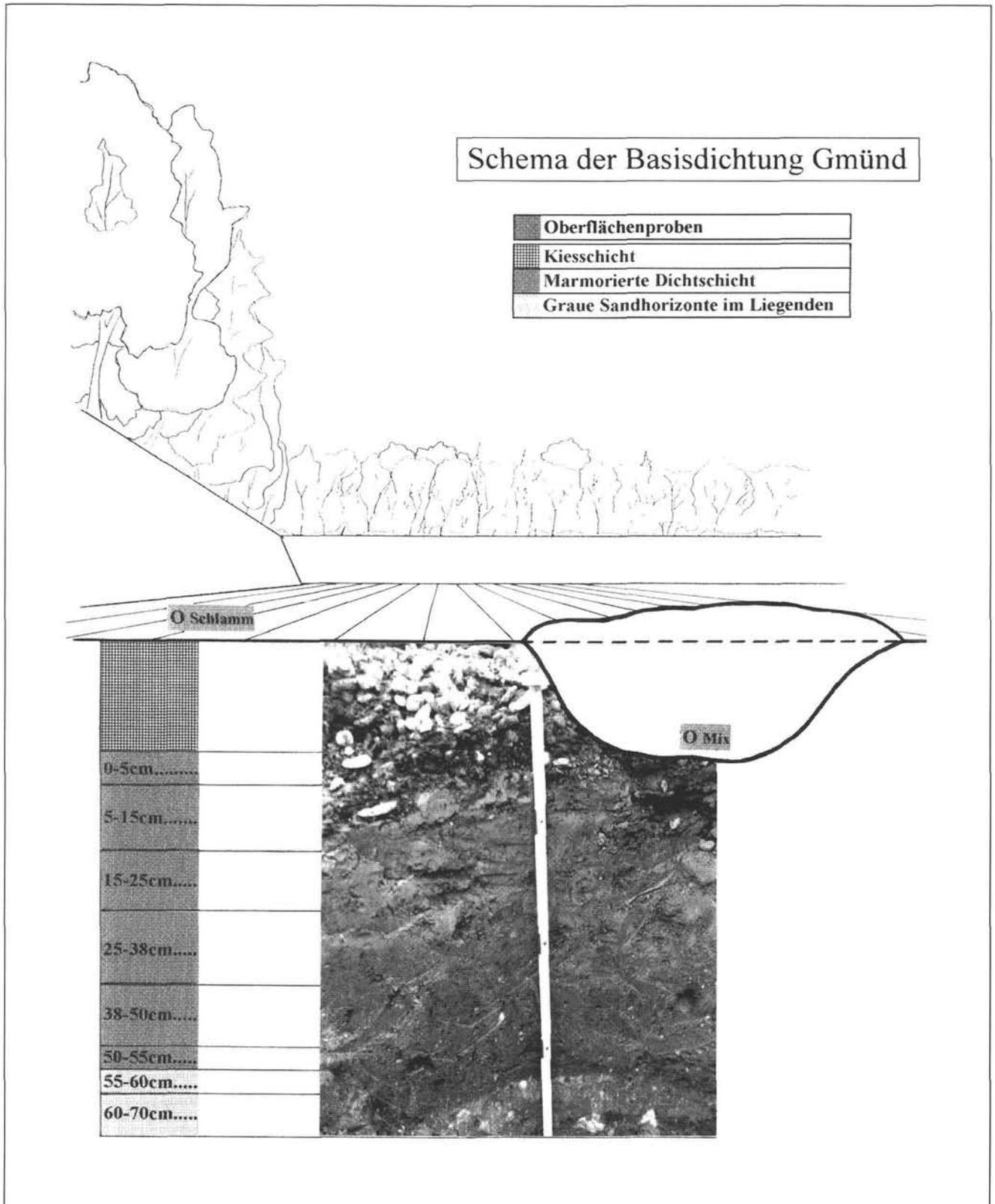


Abb. 2

Deponiebasisdichtschicht Gmünd mit Resten der aufliegenden Kiesdrainage. Die Horizontierung erfolgte nach augenscheinlichem Wechsel der Beschaffenheit der Barrierschicht. O Schlamm (bzw. „Schlamm“) ... schlammige Probe im Bereich der Kiesdrainage, O Mix ... Oberflächenmischprobe.

von ca. 600 mm. Insgesamt handelt es sich beim Horner Becken um ein bedeutendes GW-Vorkommen (WERNER 1993).

Auch im Deponieareal können zwei GW-Stockwerke unterschieden werden, die einen Kies- und Sandanteil von vorwiegend 80-90% und eine Durchlässigkeit ( $k_i$ ) zwischen  $3 \times 10^{-5}$  bis  $6 \times 10^{-4}$  m/s aufweisen. Die GW-Stauer mit Durchlässigkeiten ( $k_i$ ) zwischen  $1,1 \times 10^{-8}$  und  $1,0 \times 10^{-11}$  m/s werden im wesentlichen durch Ton-Schluffkomplexe oder Verwitterungsschwarzen, bzw. durch das Basiskristallin gebildet. Die für die Basisabdichtung relevante Staueroberkante befindet sich in einer Tiefe von rund 10 m unter GOK.

#### 4. Probennahme

Kurz nach Beseitigung des Abfalls und eines Großteils der kiesigen Schotterdrainage im Zuge der Sanierung durch die NUA wurden mittels eines Löffelbaggers in den mineralischen Barrieren beider Deponien etwa 1,5 m tiefe Röschen ausgehoben. In diesen Aufschließungen konnten detaillierte Beprobungen der eigentlichen mineralischen Barrieren erfolgen, wobei darüberhinaus noch einerseits an der GOK teilweise die Übergangsbereiche zwischen Kiesdrainage und mineralischer Barriere und andererseits Bereiche unterhalb der Barriere erfaßt wurden (Abb. 2). Der Schwerpunkt der Beprobung lag natürlich in der mineralischen Barriere selbst, wobei in den obersten 10 cm in sehr engen Abständen (v. a. in Horn) Proben entnommen wurden (alle 0,5-2 cm).

#### 5. Methodik

Das folgende Schema in Abb. 3 gibt einen groben Überblick zum Ablauf der Untersuchungen:

Die qualitative und die semiquantitative Gesamtmineralanalyse GMA (an texturfreien Kunstharzpräparaten) erfolgte mittels RDA (Gerät: Philips PW 1710, Cu-LFF-Röhre und Graphitmonochromator). Die Identifikation der einzelnen Minerale wurde nach BRINDLEY & BROWN 1980 durchgeführt (vergl. Abb. 4), eine semiquantitative Auswertung an texturfreien Präparaten erfolgte nach SCHULTZ 1964 (vergl. Abb. 5).

Bei der Tonmineralanalyse TMA wurden die Suspensionen zunächst mit  $K^+$  und  $Mg^{++}$  monoionar belegt und Texturpräparate auf porösen Keramikscheiben hergestellt. Ergänzend wurden Quell- und Kontraktionstests mittels Glycerin-, DMSO- und Ethylenglycol-Behandlung, bzw. durch Tempern auf  $550^\circ C$  durchgeführt (OTTNER et al. 1997). Die Messung erfolgte wie bei der GMA mittels XRD, wobei zur Identifikation der Tonminerale nach BRINDLEY & BROWN 1980, WILSON 1987 und MOORE & REYNOLDS 1989 vorgegangen wurde. Die semiquantitative Auswertung erfolgte nach RIEDMÜLLER 1978, die Tonmineralverteilungen wurden schließlich als Tiefenprofile dargestellt (siehe Abb. 6 und 7).

Die Korngrößenanalysen erfolgten durch Sieben (Bereich von 2 mm bis  $40 \mu m$ ) und anschließendem Sedigraphieren der Fraktion  $< 40 \mu m$  (Gerät: Micromeritics SediGraph 5000 ET). Die Resultate wurden als Kornsummenkurven dargestellt (siehe Abb. 8 und 9).

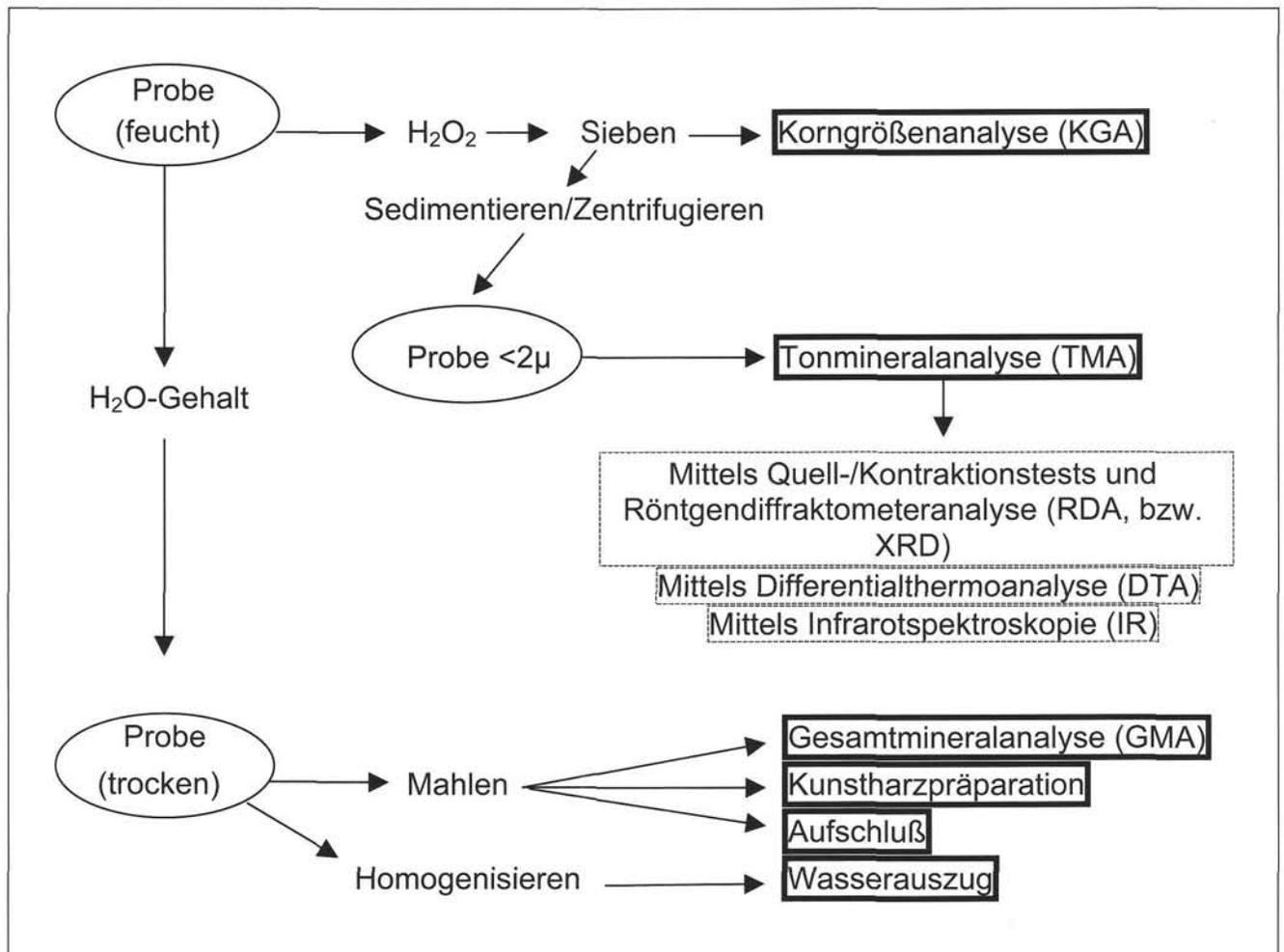


Abb. 3  
Flußdiagramm der Methodik.

## Gmünd-Gesamtmineralverteilung

	Quarz	Kalif.	Plag.	Glimmer	Kaolinit	Dolomit	Calcit
Schlamm	+	++	+	++	+	++	++++
Kies	++	++++	+	++	+	+++++	+++++
O Mix	++	++++	++	+++++	++	+	+
0-5 cm	+++	++++	+++++	++++	+++	++++	+++
5-15 cm	+++	+++	++	++++	++++	+	+
15-25 cm	++	+++	+	++++	++++	+	+
25-38 cm	++	++++	++	+++++	+++++	+	+
38-50 cm	++	++++	++	++++	+++	+	+
50-55 cm	++	+++	++	++	+++	+	+
55-60 cm	+++++	+++++	+++++	++	+	+++	+
60-70 cm	+++++	++++	+++++	++++	+	++	+

Abb. 4

Durch die Peakintensitäten der gepulverten Gesamtproben quantitativ abgeschätzte Verläufe der identifizierbaren Minerale im Tiefenprofil von Gmünd. „+“ bis „+++++“ entspricht der relativen Quantität eines bestimmten Minerals im Verlauf der Horizonte; ein Vergleich der Mengen unterschiedlicher Minerale ist unzulässig. „Schlamm“ ist eine schlammige Probe im Bereich der Kiesdrainage, „Kies“ ist eine, der Probe „Schlamm“ in ihrer Zusammensetzung und Herkunft sehr ähnliche Probe im Grenzbereich zwischen Kiesdrainage und mineralischer Barriere. „O Mix“ ist eine in flächenhafter Verteilung an der Oberfläche der Basisbarriere entnommene Oberflächenmischprobe; der dunkelgraue Bereich (0-55 cm) zeigt die eigentliche Dichtschicht, der punktierte Bereich darunter stellt Sandhorizonte im Liegenden dar.

Die Bestimmung der Durchlässigkeit erfolgte an ungestörten Tonproben aus Stechzylindern mit destilliertem Wasser in Triaxialkammern nach STN 72 1020 mit konstantem hydraulischem Gradient  $i=30$  (nach etwa einer Woche war die austretende Wassermenge konstant).

Die Diffusionsversuche wurden an von wasserdichten Gummimembranen umgebenen und wassergesättigten Proben im unmittelbaren Anschluß an die Durchlässigkeitsversuche durchgeführt (ADAMCOVA & KISOVA 1999). Auf eine Probe wurde dabei tropfenweise gesättigte  $ZnCl_2$ -Lösung aufgebracht, auf eine andere Probe wurden Kristalle von  $Pb(NO_3)_2$  flächendeckend aufgetragen. Nach etwa einem Monat bei Dunkelheit und Zimmertemperatur wurden die zylindrischen Proben quer zur Längsachse in wenige mm dicke Scheiben geschnitten, Schwermetall- und Anionengehalte gemessen und diese als Konzentrationsprofile über die Tiefe dargestellt (vergl. Abb. 13). Auf Basis der Ergebnisse der Diffusionsversuche kann, unter der Voraussetzung geringer konvektiver Durchlässigkeit, eine Abschätzung der Durchbruchzeiten bestimmter Schadstoffe durchgeführt werden (MADSEN & KAHR 1993, s. Kap. 6.5, Abb. 14).

Die Bestimmung der Kationenaustauschkapazität erfolgte (im Tonmineralogischen Labor am IGT ETH Zürich) photometrisch durch die Sorption von blauem Kupfersulfat- und Triethylentetraminkomplex nach KAHR & MEIER 1996.

Im Rahmen von Schwermetalluntersuchungen wurden mittels einer Säuremischung aus HF und  $HNO_3$  gemahlene Pulver in einem Mikrowellengerät aufgeschlossen. Im Österreichischen Forschungs- und Prüfzentrum Arsenal (Geotechnisches Institut, Abteilung Analytische Geochemie) wurden in den Lösungen mittels ICP-MS die Schwermetall-Konzentrationen gemessen.

Die durch einen Wasserauszug aus trockenem Pulver der einzelnen Horizonte gewonnene Lösung wurde zur Anionenbestimmung mittels Anionenchromatographen herangezogen (Chlorid, Nitrat, Sulfat). Sowohl Schwermetalle, als auch Anionen wurden als Konzentrationsprofile über die Tiefe dargestellt (siehe auch Abb. 10, 11 und 12).

## 6. Ergebnisse

### 6.1 Gesamt- und tonmineralogische Zusammensetzung

Die untersuchten Proben aus Gmünd und Horn bestehen in erster Linie aus Quarz (in Horn etwa 50-70%), daneben aus Glimmer und Kaolinit (bzw. Schichtsilikaten) und geringen Mengen an Feldspat. Kalzit und Dolomit treten bei beiden Deponien insbesondere in den obersten Zentimetern der Dichtschichten (Einfluß des Drainagekieses), sowie in Horn in den Müll-Lagen im Liegenden der Dichtschicht gehäuft auf. Innerhalb der eigentlichen Basisbarriere des Gmünder Tiefenprofils schwanken die Mengenverhältnisse der Minerale zumeist nur geringfügig (Abb. 4), wohingegen die Horner Basisbarriere ab einer Tiefe von etwa 20 cm eine relativ sprunghafte Veränderung der Mineralverteilung aufweist (deutlich mehr Schichtsilikate auf Kosten von Quarz; Abb. 5). Dieser Wechsel der Zusammensetzung des Horner Barrierematerials kommt auch in den Summenkurven der Korngrößenanalyse zum Ausdruck (Abb. 9).

In der Tonfraktion ( $<2 \mu m$ ) der Dichtschichten beider Deponien dominiert generell Kaolinit (incl. Fireclay als schlecht kristallisierter Kaolinit) mit etwa 80-90% in Gmünd und 75-85% in Horn. Smektit ist besonders in Horn mit bis zu 20% vertreten, weiters konnten bei beiden Deponien auch kleine Mengen an Illit semiquantitativ erfaßt werden. In Gmünd waren gegenüber Horn nur vergleichsweise geringfügige Smektit-Anteile festzustellen (siehe auch Abb. 6 und 7).

### 6.2 Korngrößenverteilung

In den bezüglich Schadstoffrückhalt besonders interessanten oberen Zentimetern der Dichtschichten zeigte sich in den Barrieren ein jeweils ähnlicher Aufbau mit einem Anteil der Tonfraktion ( $<2 \mu m$ ) von etwa 25% in Gmünd (Abb. 6 und 8) und 30% in Horn (Abb. 9a). Bei der Horner Basisbarriere liegt durch die Ergebnisse der Korngrößenanalyse die Vermutung nahe, daß es sich bei den zu differenzierenden Tiefenbereichen (Grenze etwa bei 20 cm Tiefe) um verschiedene Liefer-

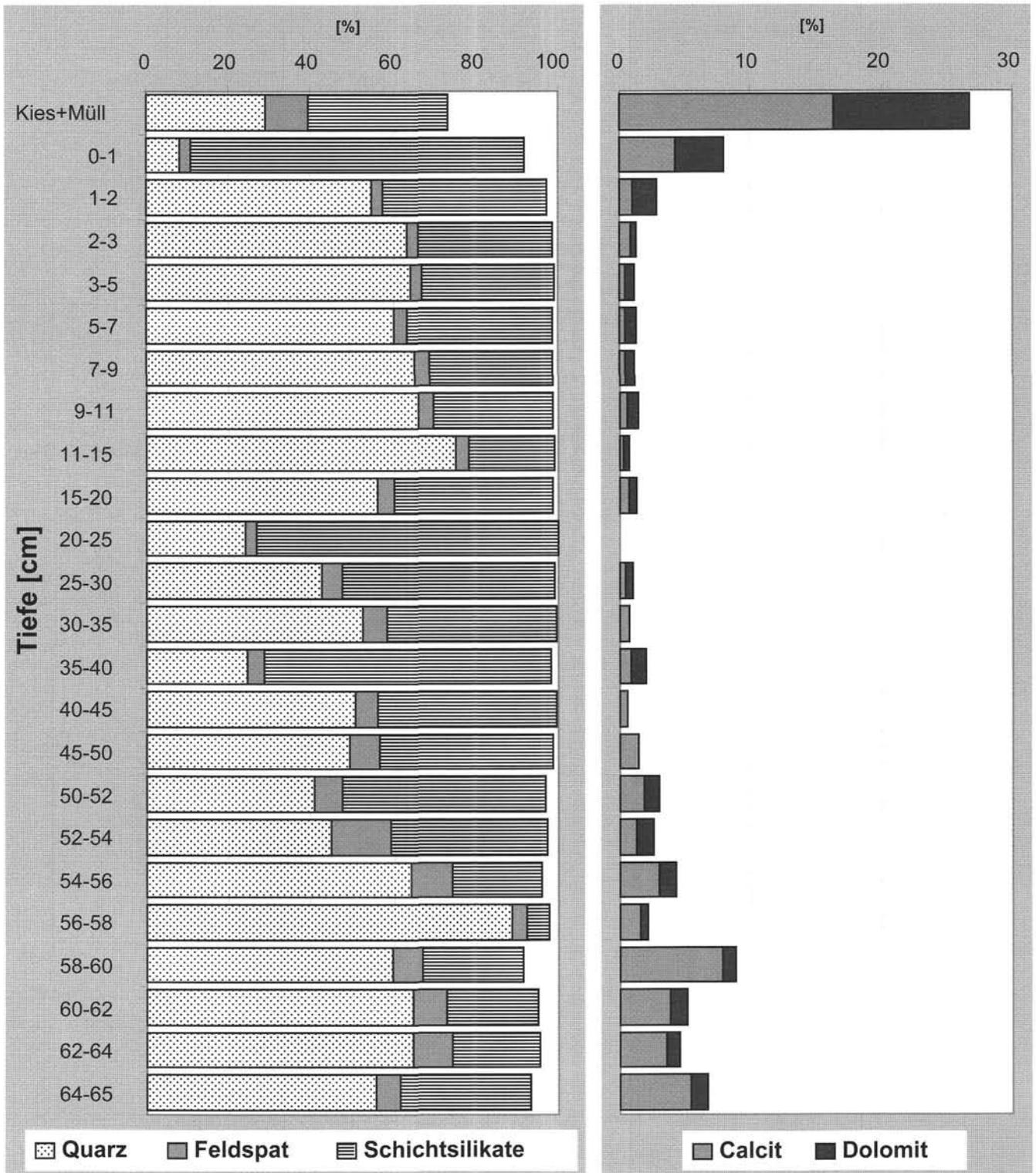


Abb. 5  
 Semiquantitative Gesamtmineralverteilung (Kunstharzpräparation) im Tiefenprofil der mineralischen Horner Basisbarriere (auf Grund vorwiegend geringer Karbonatgehalte wurde in der rechten Grafik eine andere Skalierung der prozentuellen Gehalte gewählt, trotzdem ergeben die Balken eines Horizontes von beiden Grafiken zusammen 100%). „Kies und Müll“ stellt eine Probe dar, bei der Dichtschichtmaterial noch mit Müll und Kies vermischt ist. Die eigentliche Dichtschicht reicht bis 54 cm, darunter befinden sich sandige Horizonte mit Bauschutt, ab 65 cm beginnt die Altlast.

chargen von Barrierematerial handelt. Der tiefere Bereich weist dabei tendenziell deutlich höhere Tongehalte auf (40-60%), weshalb grundsätzlich auch mit noch höherer Sorptionsleistung gegenüber Schwermetallen zu rechnen ist. Nach MÜLLER (1961) sind die Sedimente als stark sandige, stark schluffige Tone zu bezeichnen.

### 6.3 Plastizität, Durchlässigkeit und Kationenaustauschkapazität (nur Horn)

Die Bestimmung der Atterberggrenzen für die Horner Dichtschicht ergab Folgendes: Ausrollgrenze  $w_p=20\%$ , Fließgrenze  $w_L=54\%$ , Plastizitätsindex  $I_p=34\%$ . Nach ÖNORM B 4400

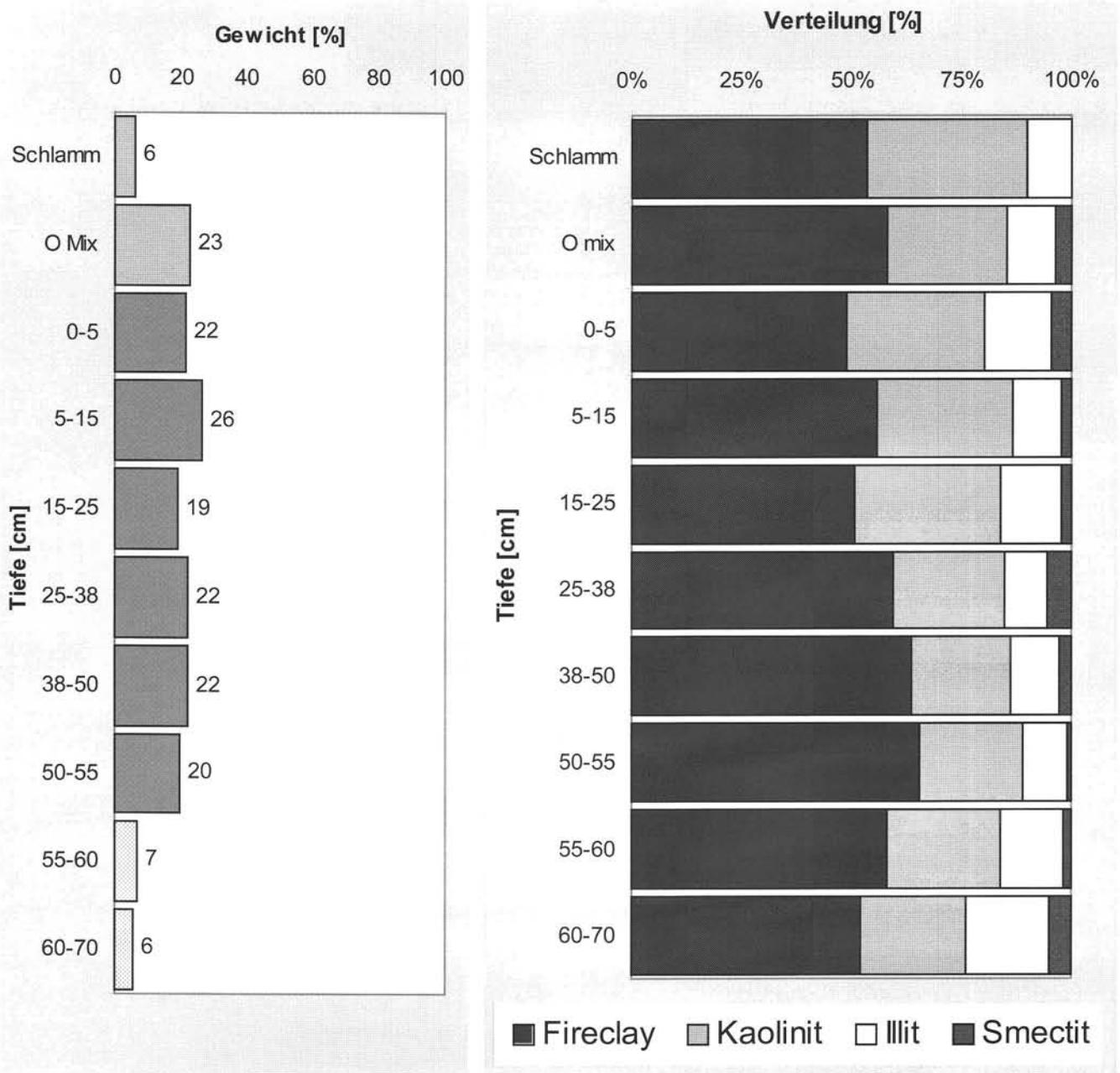


Abb. 6

Gegenüberstellung der Gewichtsanteile der Tonfraktionen mit den Verteilungen der Tonminerale in den Tonfraktionen der einzelnen Horizonte in Gmünd. Die dunkelgrauen Balken der linken Abbildung (bis 55 cm) stellen die eigentliche Dichtschicht dar, die punktierten Balken darunter sandige, mit Bauschutt angereicherte Horizonte.

(Nov. 1978) kann der Ton somit als „TA“, bzw. als „ausgeprägt plastischer Ton“ bezeichnet werden. Der Durchlässigkeitsbeiwert  $k_f$  beträgt für die Horner Dichtschicht zw.  $1,03 \times 10^{-11}$  und  $1,27 \times 10^{-11}$  m/s (die austretende Wassermenge war nach einer Woche konstant). Die Kationenaustauschkapazität für die Horner Dichtschicht beträgt 5,0-9,7 mmol/100g.

#### 6.4 Schwermetall- und Anionenverteilung

Im Rahmen dieser Untersuchungen wurden vertikale Konzentrationsprofile der umweltrelevanten Schwermetalle Zink, Blei, Nickel, Kobalt, Kupfer etc. bestimmt. Aus den Konzentrationen dieser Elemente ergeben sich Hinweise auf das Adsorptionsverhalten der Dichtschichten. Es zeigte sich bei allen untersuchten Schwermetallen eine starke Anreicherung in den obersten Zentimetern der eigentlichen Dichtschichten, wäh-

rend darunter (beachte geringe Tiefe!) die Werte relativ sprunghaft auf ein vergleichsweise sehr niedriges Niveau absinken (siehe Schwermetall-Verteilung in Abb. 10).

Besonders bemerkenswert ist der Vergleich der Gesamtfraktion mit der Tonfraktion der Basisdichtung in Gmünd (Abb. 11), weil deutlich wird, wie hoch die Adsorptionsleistung der Tonminerale in der Tonfraktion im Verhältnis zu den größeren Fraktionen (und auch Mineralen) der Gesamtprobe ist, in welcher der Tonanteil nur einen bestimmten Prozentsatz des Gesamtgewichtes ausmacht (siehe Kap. 6.2).

In Horn ist darüberhinaus in den untersten Zentimetern bei einigen Schwermetallen (Pb, Cd, Cu, Sb, Zn, Mn) ein erneuter, z. T. enormer Anstieg der Konzentrationen (siehe Pb, Abb. 10) zu verzeichnen, was auf eine Altlast, bzw. einen Müllhorizont unbekanntes Inhaltes unterhalb der Basisdichtschicht zurückzuführen ist.

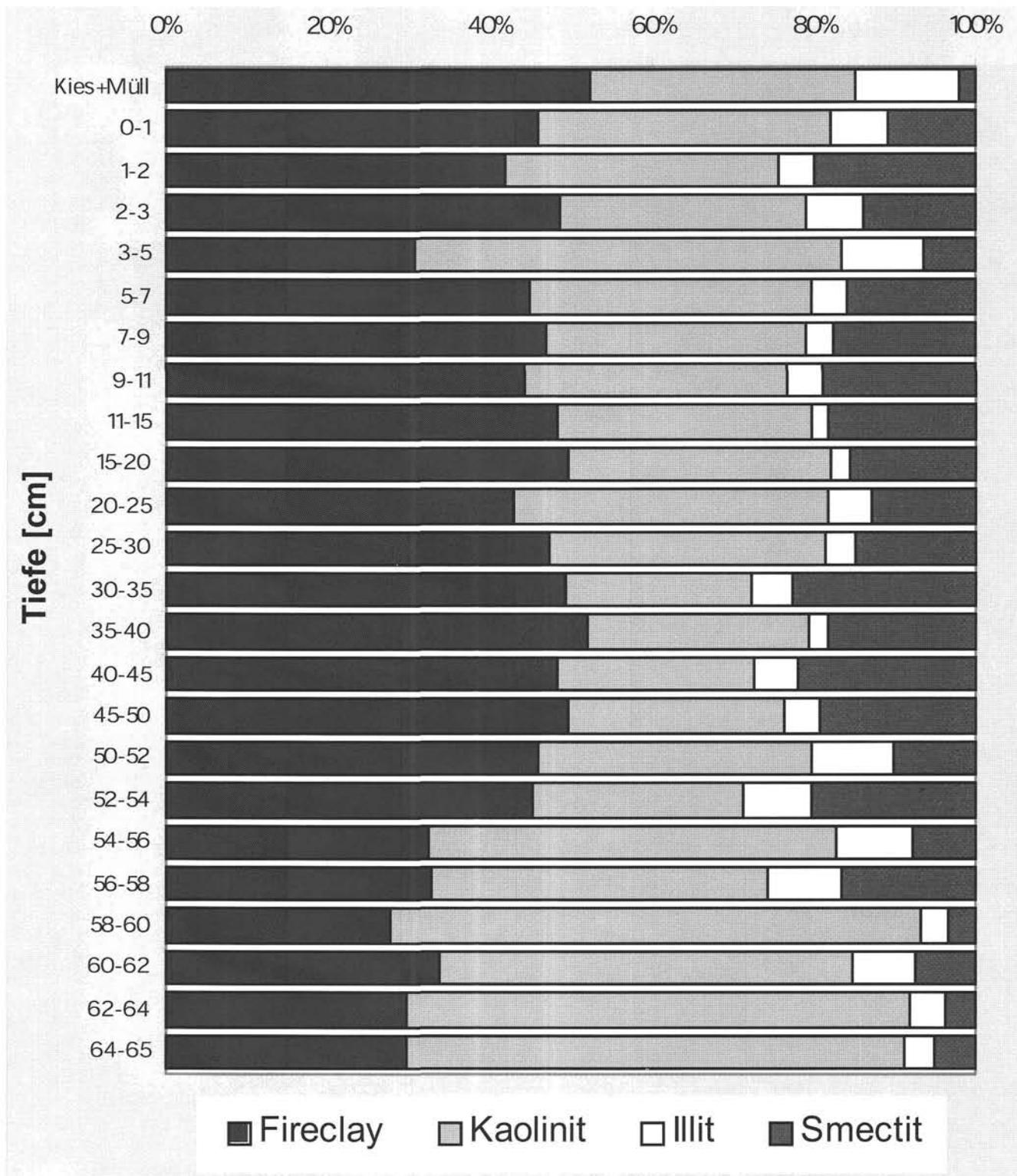


Abb. 7  
 Qualitative und semiquantitative Tonmineral-Verteilung innerhalb der Tonfraktion der mineralischen Basisbarriere von Horn. Die Dichtschicht reicht von 0-54 cm. „Kies und Müll“ stellt eine Probe dar, bei der Dichtschichtmaterial noch mit Müll und Kies vermengt ist. Die eigentliche Dichtschicht reicht bis 54 cm, darunter befinden sich sandige Horizonte mit Bauschutt, ab 65 cm beginnt die Altlast.

Die Ergebnisse der Anionenbestimmung (Abb. 12) liefern ähnliche Tendenzen wie die Schwermetall-Verteilung, nämlich ein rasches Absinken der Maximalkonzentrationen im Bereich der obersten Zentimeter auf ein relativ konstantes und niedriges Niveau innerhalb der Dichtschicht. Das gegenüber den Schwermetallen doch tiefere Eindringen der Anionen erklärt sich aus deren wesentlich geringerer Adsorption an den Ton-

mineralen, bzw. aus der damit verbundenen höheren Mobilität. Die Konzentrationsprofile der Sulfat- und Chloridionen korrelieren generell stark mit dem Verlauf der elektrischen Leitfähigkeit; infolge oben erwähnter Altlast unterhalb der Basisdichtschicht Horn kommt es wie bei den Schwermetallen auch bei Anionen wieder zu ansteigenden Konzentrationen in den unteren cm (Abb. 12).

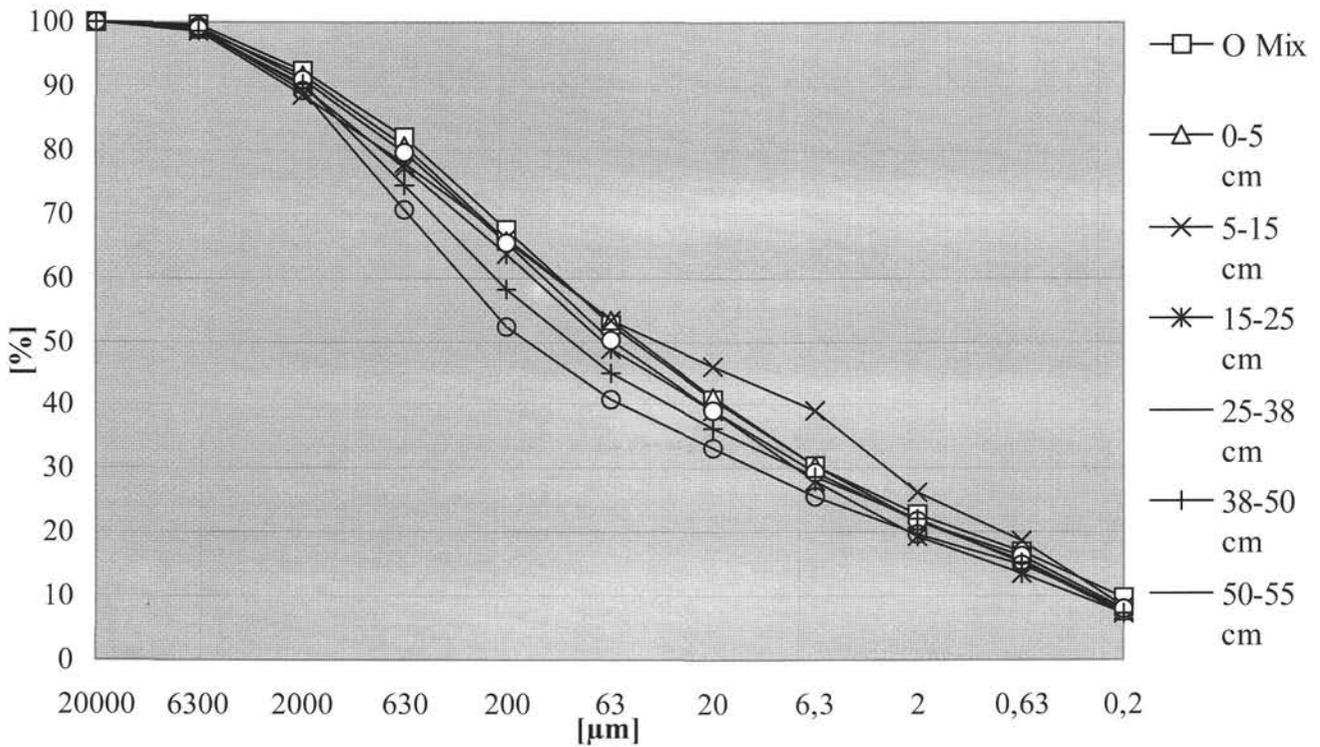


Abb. 8

Bereich der Kornsummenkurven der mineralischen Basisbarriere von Gmünd.  $O_{\text{Mix}}$  ist eine Oberflächenmischprobe. Der Anteil der Tonfraktion ( $< 2 \mu\text{m}$ ) liegt im wesentlichen über 20%.

### 6.5 Diffusionsversuche und Abschätzung der Durchbruchzeit (nur Horn)

Es zeigte sich eine relativ rasche Abnahme der Schwermetall-Konzentrationen (Pb, Zn) und ein vergleichsweise nur sehr geringer Rückhalt der zugehörigen Anionen ( $\text{NO}_3$ , Cl), welche als Tracer anzusehen sind und zur Ermittlung der effektiven Diffusionskoeffizienten, der Tortuosität (Verhältnis direkter zu gekrümmter Wegstrecke im porösen Medium), sowie der Retardationsfaktoren von Pb und Zn herangezogen werden konnten (Abb.13 bzw. Tab. 1).

Die aus den Diffusionsversuchen berechneten Retardationsparameter wurden mit den Daten von WAGNER (1991) für einen illitisch-kaolinitischen Ton verglichen (siehe Tab. 1). Die Werte stimmen größenordnungsmäßig sehr gut überein.

wurden Konzentrationsprofile „in situ“ (Abb. 10 und 11) mit der gleichen mathematischen Vorgangsweise (MADSEN & KAHR 1993) wie für die Diffusionsversuche (Dauer ca. ein Monat), aber für einen Zeitraum von 10 Jahren, berechnet. Die Resultate waren niedriger als die aus dem Diffusionsversuch: für die Chloridionen wurde  $D_a = 2,6 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$  und  $\tau = 0,09-0,13$ , für die Nitrationen  $D_a = 1 \times 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$  und  $\tau = 0,005$  ermittelt. Die aus dem Nitrat berechnete, niedrigere Tortuosität kann neben dem Fehler der mathematischen Annäherung auch durch große Unterschiede in den Ausgangskonzentrationen dieser zwei Anionen im Sickerwasser, möglicherweise auch durch eine gewisse Retardation der Nitrationen im Ton erklärt werden.

Wird schließlich der Durchbruch eines Schadstoffes durch eine Barriere als jener Moment definiert, zu dem die austreten-

Tab. 1

Retardationsparameter des Tons aus Horn im Vergleich mit einem ähnlich zusammengesetzten Ton nach WAGNER (1991); <sup>1)</sup> abhängig von  $\tau$

	Anion (Tracer)	Apparenter Diff.koeffizient $D_a$ [ $\text{m}^2/\text{s}$ ]	Tortuosität $\tau$	Kation	$D_a$ [ $\text{m}^2/\text{s}$ ]	$R_t$ eigene Messung	$R_t$ Vergleich (WAGNER, 1991)
Probe 1	Chlorid	$8 \cdot 10^{-10}$	0,39	Zink	$5,6 \cdot 10^{-11}$	5 <sup>1)</sup>	2,5-7,5
Probe 2	Nitrat	$1,1-1,7 \cdot 10^{-10}$	0,06-0,09	Blei	$1,2 \cdot 10^{-11}$	7-30 <sup>1)</sup>	7,5-22

Die Diffusion wird angesichts der niedrigen Durchlässigkeitsbeiwerte und einer damit unter realen Bedingungen (geringer Sickerwassereinstau von wenigen cm) praktisch zu vernachlässigenden Konvektion zum bestimmenden Transportmechanismus. Um zusätzlich zu den Diffusionsversuchen von Horn auch die „in situ“-Diffusionskoeffizienten abzuschätzen,

de Konzentration an einem Ende der Dichtschicht (Mächtigkeit =  $x$  [m]) die Hälfte der Ausgangskonzentration am anderen Ende erreicht, so ist die Durchbruchzeit (=  $t$ ) einfach nach der Formel  $t = x^2/D_a$  auszurechnen (MADSEN & KAHR 1993). Für den Durchbruch relevant sind zunächst die mobilsten Substanzen, wie etwa Chloridionen (Abschätzung des

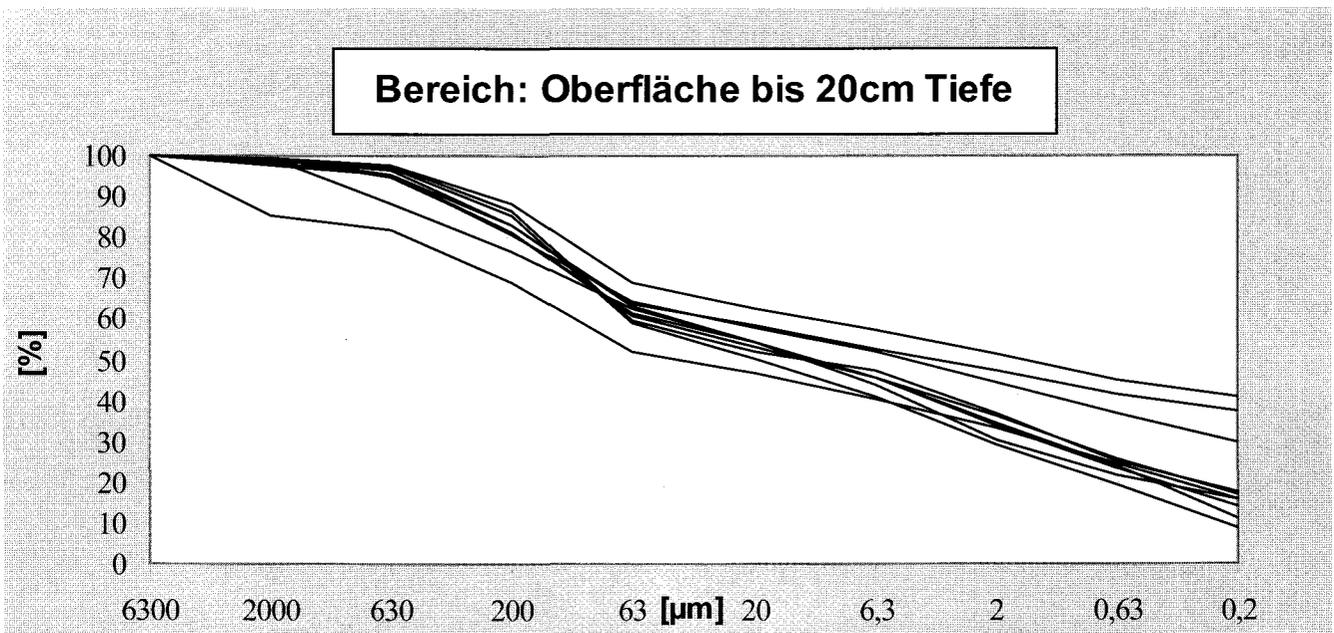


Abb. 9a  
Kornsummenkurven des oberen Bereiches (Oberfläche bis 20 cm Tiefe).

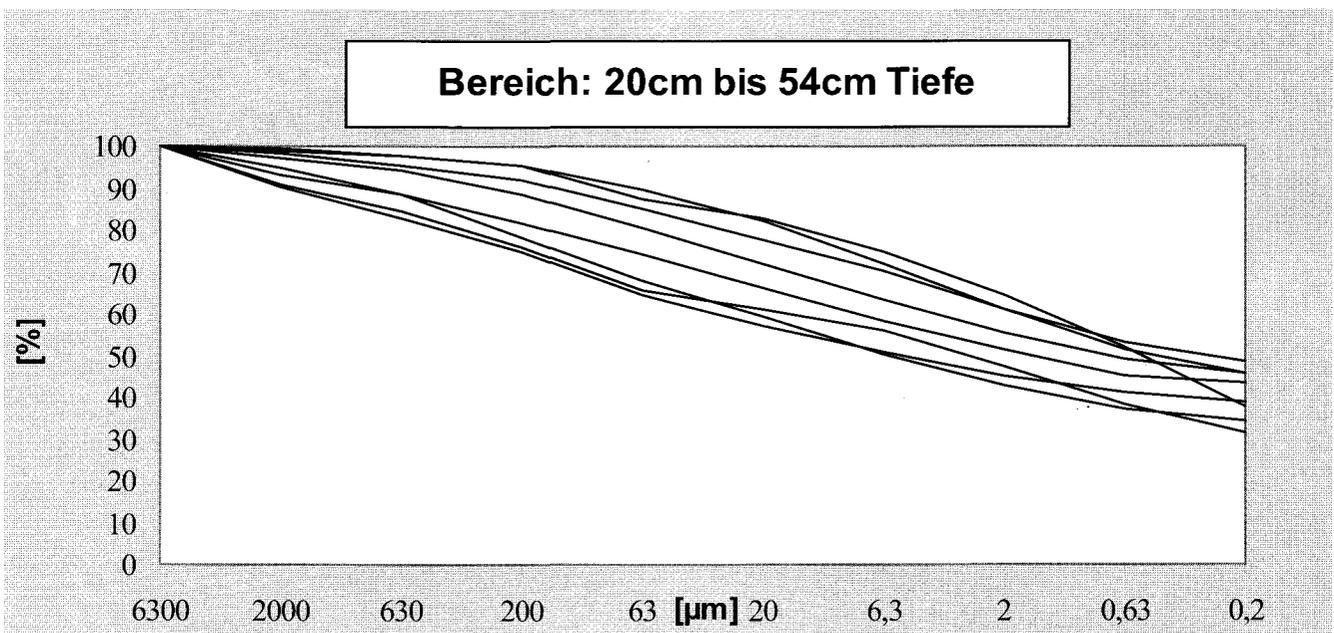


Abb. 9b  
Kornsummenkurven des unteren Bereiches (von 20 cm bis 54 cm Tiefe).

Abb. 9

Kornsummenkurven der mineralischen Basisbarriere in Horn. Wichtiger als die Differenzierung einzelner Horizonte ist die Tatsache, daß die gesamte Barriere auf Grund der Verläufe der Summenkurven in zwei Tiefenbereiche unterteilt werden kann (9a und 9b).

„worst case“), welche bei regressiv ermitteltem  $D_a$ -Wert (aus dem in-situ-Konzentrationsprofil, Abb. 12) 40 Jahre nach Beginn der Deponierung, bzw. erst 30 Jahre nach Sanierung der Deponie und Untersuchung der Basisdichtschicht durch dieselbe durchgebrochen wären (der Diffusionsversuch ergibt durch höhere Konzentrationen niedrigere Werte; Abb. 14).

Die Mobilität von Schwermetallen hingegen ist durch das Adsorptionsverhalten verschiedener Bestandteile der mineralischen Dichtschicht wesentlich stärker eingeschränkt. Durch Advektion und/oder Diffusion transportierte Stoffe können

demnach der Adsorption (an Tonmineralen, aber auch an organischer Substanz oder Oxiden), chemischer Fällung (es waren allerdings keine Fällungsprodukte, wie Schwermetall-Karbonate festzustellen) und Filterwirkung unterliegen (CZURDA 1996), was schließlich in der Retardation Ausdruck findet.

Daher würde es im konkreten Fall der untersuchten Basisbarriere der Deponie Horn den Diffusionsversuchen zufolge etwa bei Zn frühestens nach 224 Jahren oder bei Pb nach 752 Jahren zum Durchbruch nach obiger Definition kommen

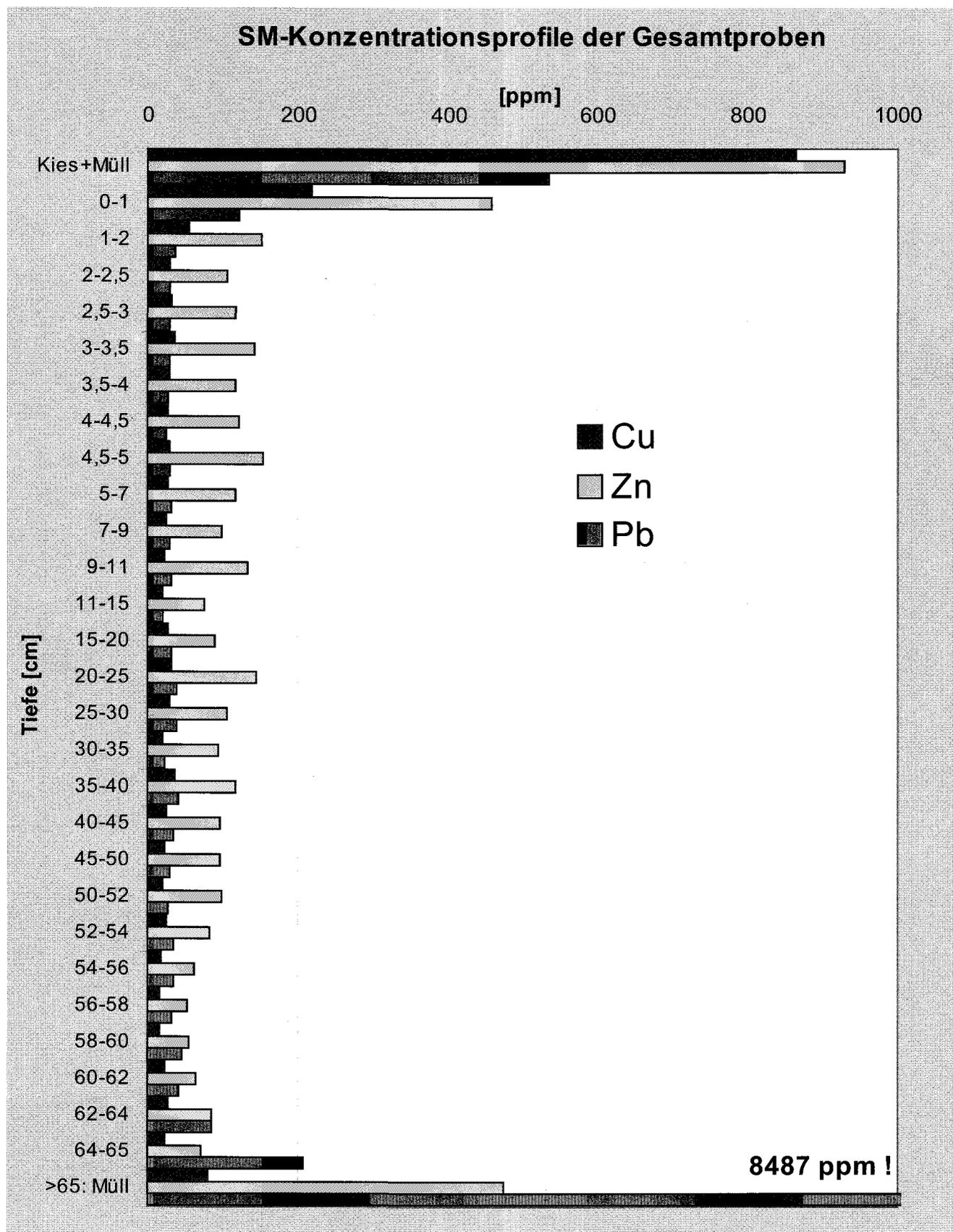


Abb. 10

Vertikale Konzentrationsprofile der Schwermetalle Cu, Zn und Pb innerhalb der Basisbarriere der Deponie Horn. Der Einfluß des kontaminierten Mülls zeigt sich nicht nur in den obersten cm, sondern auch an der Basis des Tiefenprofils durch eine Altlast im Liegenden.

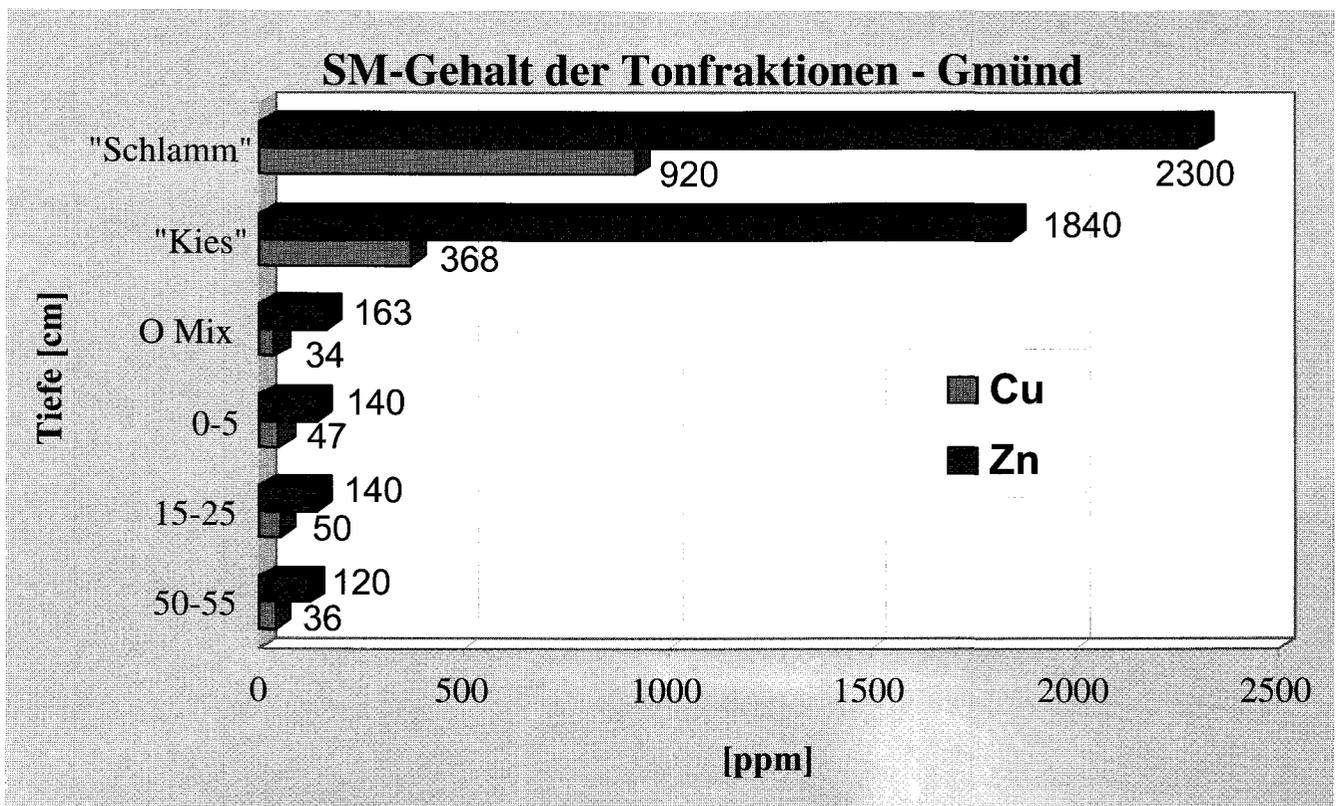
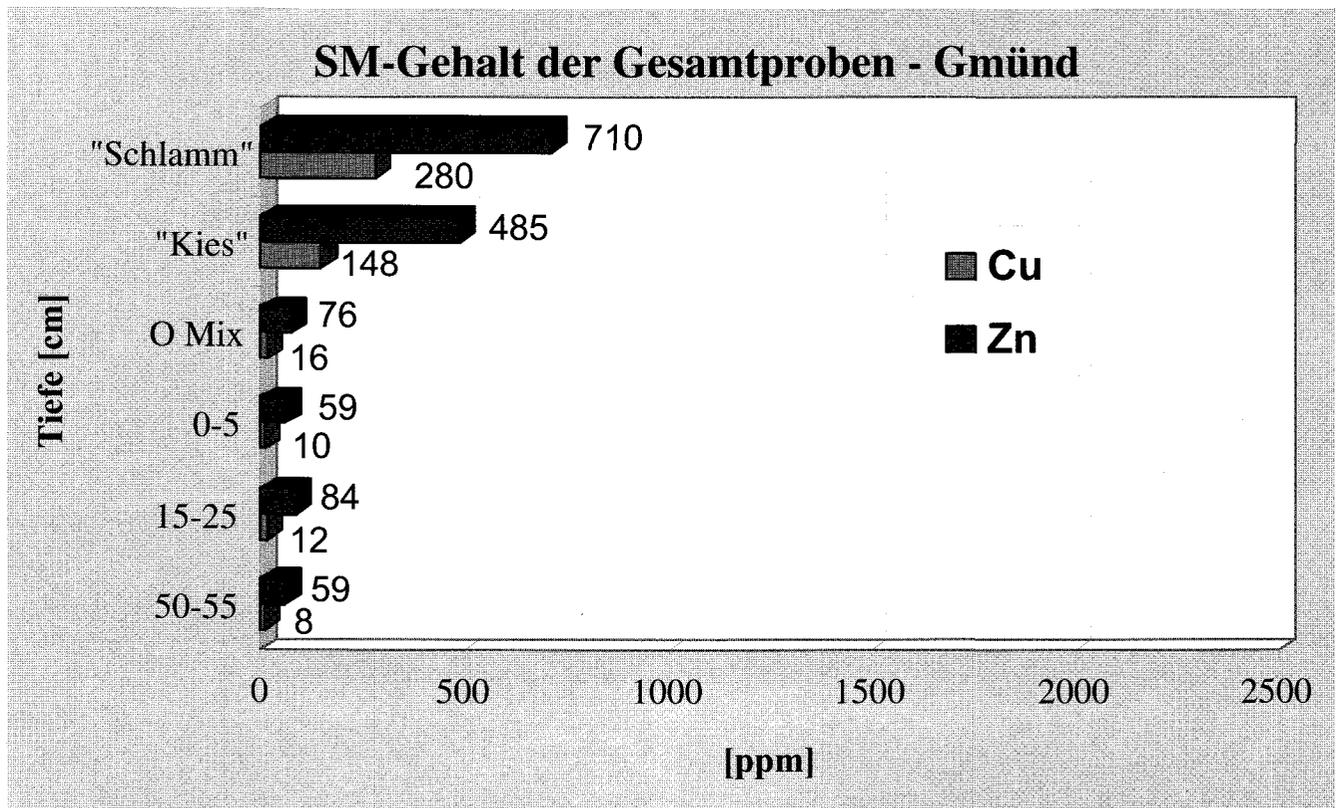


Abb. 11  
Gegenüberstellung von Schwermetall-Konzentrationsverläufen in Gesamtproben und Tonfraktionen der Basisdichtschicht Gmünd. Beachtenswert ist die eindeutige Anreicherung von an Tonmineralen adsorbierten Schwermetallen in der Tonfraktion und die verhältnismäßig geringe Adsorption in den übrigen (gröberen) Fraktionen, welche den Großteil der Gesamtfraktionen ausmachen. Zur Beschreibung von „Schlamm“, „Kies“ und „O<sub>Mix</sub>“ s. Abb. 4.

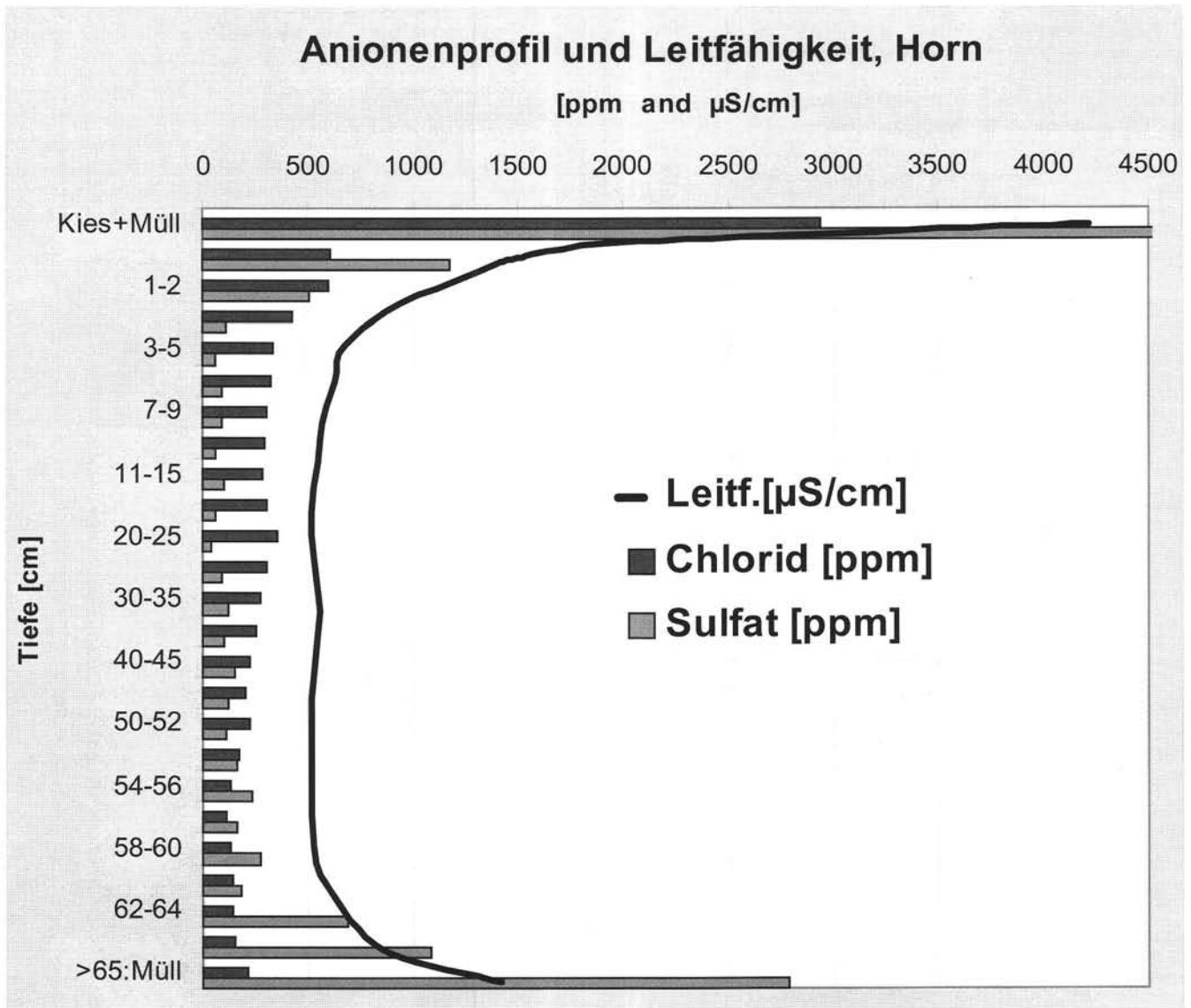
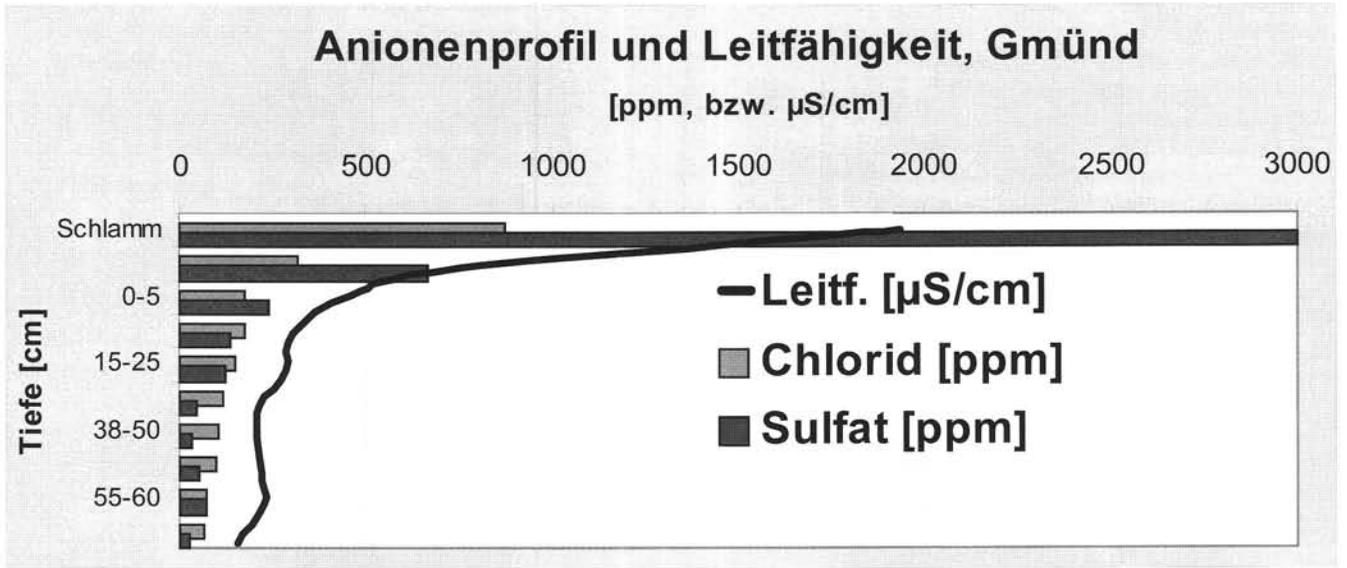


Abb. 12 Chlorid- und Sulfatkonzentrationsprofile in Gegenüberstellung mit den Leitfähigkeitsverläufen der Dichtschichten von Gmünd (oben) und Horn (unten). Die nicht angegebenen Tiefenbereiche ergeben sich aus den darüber und darunter angeführten Werten.

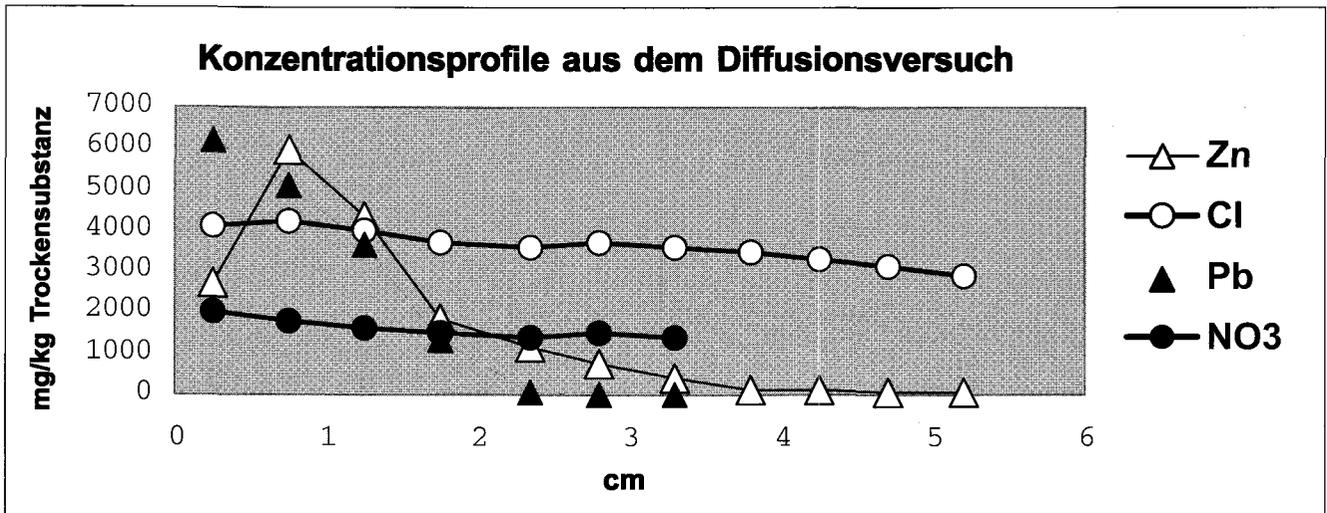


Abb. 13  
Konzentrationsprofile aus dem Diffusionsversuch an ungestörtem Basisdichtschichtmaterial aus Horn.

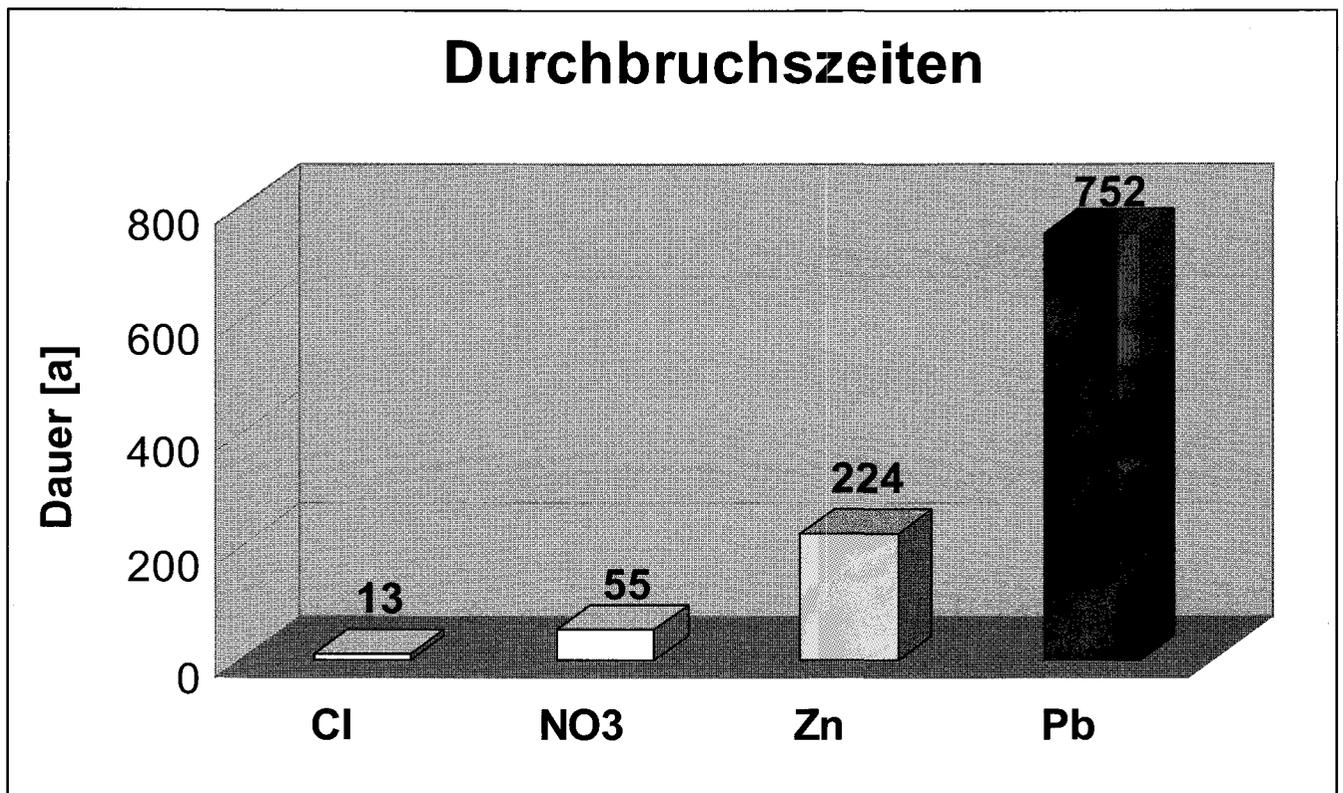


Abb. 14  
Die aus dem Diffusionsversuch an Horner Dichtschichtmaterial errechneten und hier angegebenen Durchbruchzeiten beziehen sich auf den Beginn der Deponierung.

(Abb. 14). Die in-situ gemessenen Werte ergeben sogar noch bedeutend längere Zeiträume. Hinzu kommt im Falle von Horn, daß der beim Diffusionsversuch nicht erfaßte untere Teil der mineralischen Barriere durch höheren Schichtsilikat- und Feinkornanteil, bzw. Tongehalt (Abb. 5 und 9b) eine noch höhere Sorptionsleistung aufweisen müßte.

## 7. Schlußfolgerungen

Trotz mehrjähriger Kontamination durch Deponiesickerwässer zeigen die mineralischen Basisbarrieren aus Gmünd und

Horn infolge ihrer geringen Durchlässigkeit, v. a. aber durch ihre tonmineralogischen Eigenschaften und die ermittelten Konzentrationsprofile ein nur geringes Eindringen von Schwermetallen und ein diesbezüglich nach wie vor hohes Schadstoffrückhaltevermögen.

Durch die vorliegenden Analysenergebnisse kann dokumentiert werden, daß die Adsorptionskapazität der tonigen Dichtschichten hinsichtlich Schwermetallen offenbar noch lange nicht erschöpft gewesen wäre.

## Danksagung

Die vorliegende Arbeit wurde dankenswerter Weise von der Grantagentur VEGA MSSR Nr.1/4099/97 und vom Hochschul-Jubiläumsfonds der Österreichischen Nationalbank finanziell unterstützt.

## Literatur

- ADAMCOVA, R. & KISOVA, M., 1999: Mineralne tesnenia s vysokym obsahom piescovej frakcie – skusenosti zo zahranicia a vlastne poznatky. – In: Medzin. odb. sem. Environmentalna geologia, Herlany. TU Kosice, ZHTPG SR, INHYDEO Kosice (im Druck).
- BRINDLEY, G. W., BROWN, G., 1980: Crystal structures of clay minerals and their x-ray identification. – Mineralogical society, 495 S., London.
- CZURDA, K., 1996: Die Funktionen eines Multibarriersystems für die Basis und die Oberfläche von Deponieabdichtungen. – Schriftenreihe Angewandte Geologie Karlsruhe, 44, S. 1-52.
- FUCHS, W., 1964: Die Molasse und ihr nichthelvetischer Vorlandanteil am Untergrund einschließlich der Sedimente auf der Bömischen Masse. – In: OBERHAUSER, R., 1980: Der Geologische Aufbau Österreichs, S. 144-176. – Springer-Verlag Wien New York.
- KAHR, G., MEIER, L. P., 1996: Einfache Bestimmungsmethode des Kationenaustauschvermögens von Tonen mit den Komplexverbindungen des Kupfer(II)-Ions mit Triethylentetramin und Tetraethylenpentamin. – In: D. WOLF, R. STARKE & R. KLEEBERG (Hrsg.) Beiträge zur Jahrestagung Freiberg. Berichte der Deutschen Ton- und Tonmineralgruppe eV, S. 122-126, Freiberg.
- MADSEN, F. T., KAHR, G., 1993: Diffusion of ions in compacted bentonite. – Proc. Of the Int. Conf. of Nuclear Waste Management and Envir. Remed. ASME Book No.10354A, 239-246.
- MOORE, D. M., REYNOLDS, R. C. JR., 1989: X-Ray diffraction and the identification and analysis of clay minerals. – Oxford University Press, 378 S., New York.
- MÜLLER, G., 1961: Das Sand-Silt-Ton-Verhältnis in rezenten marinen Sedimenten. – N.Jb.Mineral. Mh., S148- 163.
- ÖKOPLAN, Aug. 1993: Gmünd – Sanierung/Anpassung an den Stand der Technik. – Technischer Bericht, S. 13.
- ÖNORM B 4400, Nov. 1978: Bodenklassifikation für bautechnische Zwecke und Methoden zum Erkennen von Bodengruppen.
- OTTNER, F., SCHWAIGHOFER B., MÜLLER H. W., 1997: Quantitative Tonmineralanalyse: Phantasie, Philosophie oder Realität? – Zbl. Geol. Paläont. Teil I, H. 5/6, 561-572, Stuttgart.
- RIEDMÜLLER, G., 1978: Neof ormations and Transformations of Clay Minerals in Tectonic Shear Zones. – Tschermarks Min. Petr. Mitt. **25**, 219-242, Springer, Berlin, Heidelberg, New York.
- SCHULTZ, L. G., 1964: Quantitative interpretation of mineralogical composition from x-ray and chemical data for the Pierre Shale. – Geol. Surv. Prof. Paper, 391C, 1-31, Washington.
- STEININGER, F. F. & ROETZEL, R., 1991: Die tertiären Molassesedimente am Ostrand der Bömischen Masse. – In: ROETZEL, R. & NAGEL, D. (Hg): Exkursionen im Tertiär Österreichs. – Molassezone – Waschbergzone – Korneuburger Becken – Wiener Becken – Eisenstädter Becken. – Österr. Paläontol. Ges.: 59-141. (Schindler), Wien.
- STN 72 1020 Slowakische technische Norm. Durchlässigkeitsprüfung (in Slowakisch)
- TOLLMANN, A., 1985: Geologie von Österreich, Band 2. – XV+711 S., Deuticke, Wien.
- WAGNER, J. F., 1991: Transport und Festlegung von Schwermetallen in tonigen Deponiebasisabdichtungen. – In: Tonmineralogie und Geotechnik. Vorträge im Rahmen der Tagung der Deutschen Ton- und Tonmineralgruppe in Wien, Mitteilungen BOKU Wien, Reihe Angew. Geol., Heft 1, 106-122.
- WERNER, H., 1993: Mülldeponie Horn, Sanierung und Weiterbetrieb. – Einreichprojekt.
- WILSON, M. J., 1987: X-ray powder-diffraction methods. – In: WILSON, M. J. (editor): A handbook of determinative methodes in clay mineralogy, 26-98, Blackie, Glasgow and London.

Manuskript eingegangen am: 27. 10. 1998 ●

Revidierte Fassung eingegangen am: 26. 08. 1999 ●

Manuskript akzeptiert am: 07. 09. 1999 ●