

MITTEILUNGEN  
des Institutes für Bodenforschung und Baueologie  
Abteilung Baueologie  
Universität für Bodenkultur Wien

---

Reihe: Angewandte Geowissenschaften

Heft 4



Vorträge 1992/1993

Herausgeber:  
B. SCHWAIGHOFER  
H. W. MÜLLER

---

Wien, März 1994

MITTEILUNGEN  
des Institutes für Bodenforschung und Baugeologie  
Abteilung Baugeologie  
Universität für Bodenkultur Wien

---

Reihe: Angewandte Geowissenschaften

Heft 4

**BAUGEOLOGISCHES  
SEMINAR**

Vorträge 1992/1993

Herausgeber:  
B. SCHWAIGHOFER  
H. W. MÜLLER

---

Wien, März 1994

**ISSN 10 21-7533**

## INHALTSVERZEICHNIS

ROHATSCH, A.:	Geologie in der Denkmalpflege anhand der Beispiele St. Stephan, Stiftskirche Klosterneuburg und St. Michael .....	3
POISL, R.:	Massenbewegungen - Standsicherheitsprobleme ober und unter Tage .....	45
WAGNER, J.F.:	Labor- und Geländeparameter der Schwermetallmigration in natürlichen Tonbarrieren .....	57
KÖHLER, M. & LEIMSER, W.:	Prognose und Baudurchführung des Inntaltunnels aus geologischer Sicht.....	75
FÜRLINGER, W. & BERGMAIR, M.:	HL-AG Eisenbahntunnel Lambach ein Beispiel für Tunnelbau in Lockergesteinen unter geringer Überlagerung - Erfahrungen beim Bau.....	87
STADLER, G.:	Injizieren im Fels, Gedanken über grundlegende Zusammenhänge .....	97
KALMAN, W.:	Photogrammetrische Aufnahme des Stephansdomes als Grundlage einer Dokumentation der petrographischen Zusammensetzung und des Verwitterungszustandes der Fassaden .....	109

<b>KNAAK, B.:</b>	<b>Tone als Barrieregesteine bei Mülldeponien, Mineralogische und geochemische Unter- suchungen an Tonen aus Mannersdorf, Göllersdorf und Hennersdorf .....</b>	<b>119</b>
<b>KNAAK, A.R.:</b>	<b>Tone als Barrieregesteine bei Mülldeponien, Geotechnische Untersuchungen an Tonen aus Göllersdorf und Hennersdorf .....</b>	<b>131</b>

# GEOLOGIE IN DER DENKMALPFLEGE

anhand der Beispiele St. Stephan,

Stiftskirche Klosterneuburg und St. Michael

Mag.Dr. Andreas ROHATSCH

*\*Wenn aber gebaut werden soll, sollen die Steine  
zwei Jahre vorher nicht im Winter, sondern im Sommer  
gebrochen werden und sie sollen dauernd an offenen  
Stellen liegen.*

*Diejenigen aber, die in diesen zwei Jahren der Witterung  
ausgesetzt, beschädigt sein werden, die sollen in  
Grundmauern eingebaut werden.*

*Die übrigen, die nicht beschädigt sind, werden,  
als von der Natur selbst geprüft, oberhalb der Erde  
verbaut. Dauer haben können.\**

VITRUVIUS, ca. 30 v. Chr.

## 1 Einleitung

Wie schon dieses Zitat von Vitruvius bezeugt, war die Auswahl von qualitativ hochwertigem Baumaterial eine erste Grundvoraussetzung für die Dauerhaftigkeit von Bauwerken. Da diese Regel aber vor allem bei mittelalterlichen Bauwerken offenbar nur in relativ wenigen Fällen berücksichtigt wurde, kommen durch die Verschmutzung unserer Umwelt, welche die natürlichen Verwitterungsvorgänge beschleunigt, Schäden an Objekten aus Naturstein auf uns zu, die nur mit höchstem finanziellen Einsatz und einem Maximum an Grundlagenforschung saniert werden können. Verwitterung als natürlicher Vorgang, der zu allen Zeiten das Antlitz unserer Erde maßgeblich formte und prägte, wird niemals vollständig unterbunden werden können; im idealen Fall wird der Verfall eines Kulturdenkmales bei in gleichem Maße fortschreitender Kontamination der Biosphäre um einige Dekaden verzögert. Auf eine

exponentielle Zunahme von Verwitterungsschäden seit dem Beginn der Industrialisierung durch die steigenden Emissionsraten von Schwefeldioxid (Industrie und Hausbrand) weist WINKLER (1973) hin.

Infolge der Zerstörung von originaler, historisch wertvoller Bausubstanz entstehen nicht nur unwiederbringliche kulturelle Verluste, sondern es erwachsen auch durch Restaurierungen und Konservierungen, die im letzten Augenblick durchgeführt werden, erhebliche Kosten, die bei einer rechtzeitigen Schadenserhebung und Materialbestimmung verhindert werden könnten. Der Erfassung der Verwitterungsschäden, der gesteinskundlichen Zusammensetzung sowie der Steinkonservierung wird international große Bedeutung beigemessen, wie zahlreiche Untersuchungen an sakralen, aber auch an profanen Bauwerken belegen (siehe Literatúrauswahl). In Österreich forschte vor allem Alois KIESLINGER (1930 bis 1972) in dieser Disziplin und lieferte wertvolle Grundlagen für weiterführende Untersuchungen.

An der Hochschule f. Angewandte Kunst beschäftigten sich VENDL et al. (1984) und WEBER (1986) mit Verwitterungsstudien an Naturbausteinen, unter anderem mittels Simulationen in Bewitterungskammern. Neuere grundlegende Untersuchungen wurden an der Abteilung Baugeologie (Inst. f. Bodenforschung u. Baugeologie) der Universität für Bodenkultur Wien von MENTLER et al. (1984, 1985, 1986), MÜLLER et al. (1984, 1985, 1986, 1990, 1991), SCHWAIGHOFER et al. (1984, 1985, 1986) und ROHATSCH et al. (1990, 1991) im Rahmen der FWF-Projekte 3000, 4769, 7007 und 8527 durchgeführt.

Die Geowissenschaften haben in der Denkmalpflege eine überwiegend dienende Funktion zu erfüllen, die sich einerseits auf die Erarbeitung von Planungsgrundlagen für Restaurierungen und andererseits mit den Verwitterungsschäden an Naturbausteinen wissenschaftlich auseinandersetzen muß. Beiden Aufgaben liegt die gesteinskundliche Aufnahme eines Objektes auf quadergerechten Planunterlagen sowie die Erfassung und Dokumentation des Verwitterungszustandes zugrunde. Auch für bauhistorische Fragestellungen können gesteinskundliche Aufnahmen wichtige Aussagen liefern, die jedoch nur in enger Zusammenarbeit mit dem Bau- bzw. Kunsthistoriker interpretiert werden dürfen.

Die Aufgaben der Geowissenschaften auf dem "Naturwerksteinsektor" stellte kürzlich MEYER (1992) schriftlich und graphisch dar (Abb. 1). Das in Abb. 2 dargestellte Flußdiagramm soll einerseits die Beziehungen der Erdwissenschaften zu den Aufgaben des Denkmalschutzes und andererseits den idealisierten Ablauf zur

Erarbeitung eines Restaurierungskonzeptes verdeutlichen, der aber noch in den seltensten Fällen verwirklicht wird.

Anhand der folgenden Beispiele, St. Stephan (Wien), Stiftskirche Klosterneuburg und St. Michael (Wien) werden einige der in den FWF-Projekten 7007 GEO und 8527 GEO erarbeiteten Untersuchungsergebnisse präsentiert (Projektleitung: Univ.Doiz.Dipl.Ing.Dr. Harald W. Müller, Univ.Prof.Dr. Bernd Schwaighofer). Auf detaillierte petrographische und mikrofazielle Beschreibungen und Auswertungen kann hier nicht eingegangen werden, da diese bereits publiziert wurden (ROHATSCH, 1991; ROHATSCH & MÜLLER, 1991).

# GEOWISSENSCHAFTEN UND NATURWERKSTEIN

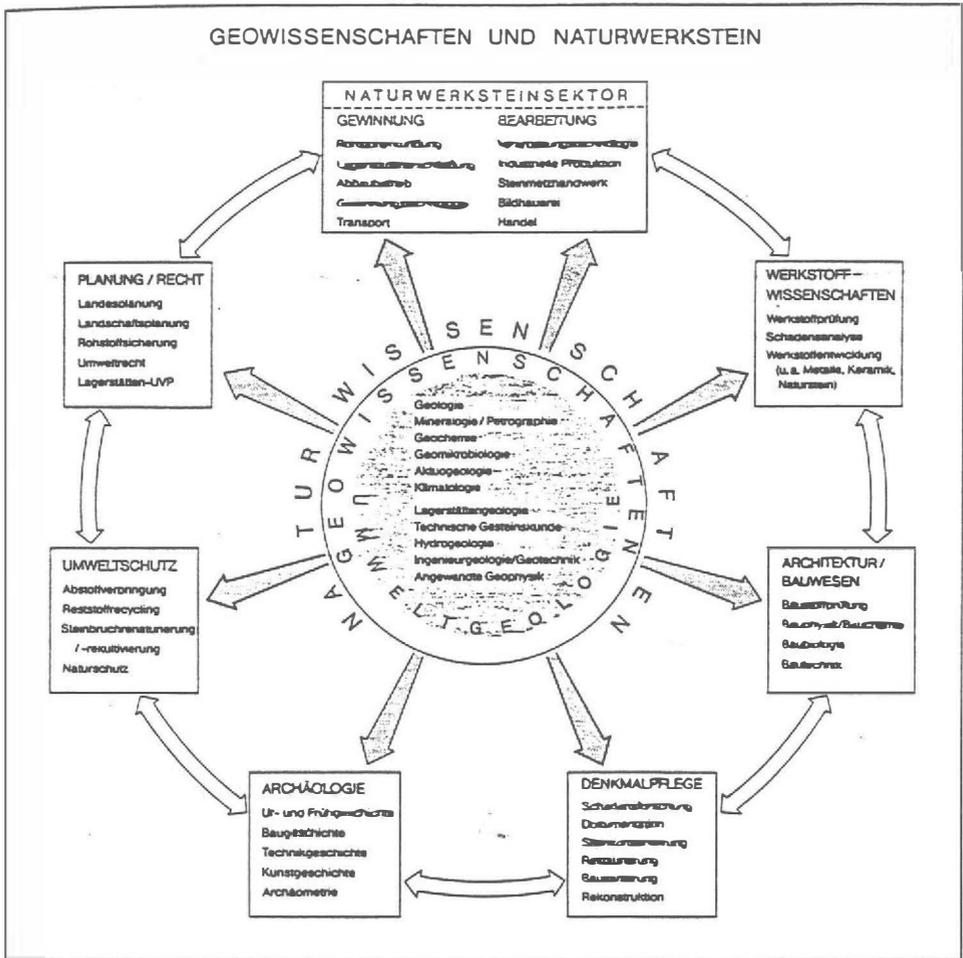


Abb.1: Die Stellung der Gowissenschaften in Forschung und Praxis zum Naturwerkstein (aus MEYER, 1992, S. 249).



## 2 St. Stephan

Die gesteinskundliche Aufnahme dieses überregional bedeutenden Sakralbaues, dessen Bauzeit sich über mehrere Jahrhunderte erstreckte (Weihe des Erstbaues im Jahre 1146 durch Bischof Reginbert von Passau Ende der Bauzeit ca. 1585), erforderte nicht nur die Kenntnis der historischen Baumaterialien sondern auch Verständnis für bautechnische und historische Zusammenhänge. Das Begreifen dieser Zusammenhänge ist ein steter Lernprozeß, umso mehr als geisteswissenschaftliche Disziplinen, wie zum Beispiel die Kunstgeschichte, eine vom naturwissenschaftlichen Problemlösungsansatz vollständig verschiedene Denkweise erfordern.

Bei dieser Bearbeitung anhand einer flächendeckenden Bauwerkskartierung sollten der gegenwärtige Zustand der Domfassaden, historische Bausubstanz und bereits restaurierte Bereiche dokumentiert werden, um den Verlust der originalen romanischen und gotischen Bauteile durch Verwitterungs- und Kriegsschäden aufzuzeigen. Außerdem sollten Bauphasen oder Abschnitte einer bevorzugten Gesteinsverwendung erfaßt und untersucht werden, um Aussagen über zeitliche und regionale Verbreitung sowie die Verfügbarkeit von bestimmten Gesteinsvarietäten treffen zu können und die in einigen Bereichen noch unzureichende Kenntnis der Baugeschichte zu erhellen.

Als Grundlage für die Erstellung der Fassadenpläne dienten photogrammetrische Aufnahmen, die in den Jahren 1987/88 unter Zuhilfenahme einer Hebebühne der Wiener Feuerwehr im Rahmen eines Forschungsprojektes (FWF-Projekt Nr. 4769) durchgeführt wurden. Die photogrammetrischen Aufnahmen erfolgten mit einer Meßbildkamera UMK der Firma Jenoptik (Jena) mit einem Bildformat 13 x 18 cm. Die Aufnahmemarbeiten wurden von den Mitarbeitern der Abteilung Baugeologie gemeinsam mit dem Institut für Vermessungswesen und Fernerkundung der Universität für Bodenkultur vorgenommen (MÜLLER, SCHWAIGHOFER, KALMAN, OTTNER & SCHNEIDER 1990). Eine Beschreibung der Planung und Durchführung der Aufnahmemarbeiten an den Fassaden des Stephansdomes gibt KALMAN (1993) in seiner, im Rahmen dieses Projektes angefertigten Diplomarbeit. Ein wesentliches Kriterium für die Aufnahmemarbeiten war die quadergerechte Darstellung der Fassaden, um die Lage der einzelnen Quader bei der petrographischen Kartierung zueinander nachvollziehen zu können. Eine absolute Lagegenauigkeit der Quader bezüglich eines Koordinatensystems war für diese Fragestellung nicht erforderlich. Die Negative wurden mittels Stahlbandmessungen von Sperrmaßen auf den ungefähren Maßstab 1 : 50 vergrößert. Insgesamt wurden etwa 95% der Fassaden und Türme des Stephansdomes bis zu einer Höhe von 56 Metern mit ca. 200

Meßbildern erfaßt, die zu ungefähr 70% stereoskopisch ausgewertet werden können. Fünf Jahre später, im Jahre 1992 wurde auf Anregung des mittlerweile verstorbenen Dombaumeisters Dipl.Ing. K. STÖGERER eine professionelle photogrammetrische Aufnahme der Außen- und Innenfassaden des Stephansdomes in Auftrag gegeben, deren stereoskopische Auswertung zum Teil bereits vorliegt.



Als wichtigste historische schriftliche Quelle, die Herkunft der Bausteine des Stephansdomes betreffend, dienen die Kirchenmeisterrechnungen (UHLIRZ, 1902), die aber leider erst ab 1404 überliefert sind. Die bedeutendste Arbeitsgrundlage war die monographische Bearbeitung von Alois Kieslinger -"Die Steine von St. Stephan" (KIESLINGER, 1949).

#### Auszug aus den Kirchenmeisterrechnungen (UHLIRZ, 1902)

Die wenigen überlieferten Daten belegen einerseits die Nutzung von Naturbausteinen vom Westrand des Wiener Beckens und andererseits Steinfuhren aus dem Leithagebirge.

1404	In diesem Jahr sind 196 - 200 Steinfuhren aus der Au (Leithagebirge) sowie Fuhren aus Hetzendorf und Hietzing bezeugt.
1407	Steinfuhren aus Au und Hetzendorf
1415	733 Stück aus Au
1416	Steinfuhren aus Au und Liesing
1417	werden Ritte in die Steinbrüche verrechnet
ab 1435	Steinfuhren aus Breitenbrunn
1476	Steinfuhren aus Au, Breitenbrunn (für Nordturm) und Marein (Sommerein)

Bei einigen Steinlieferungen wird auch der Verwendungszweck am Bauwerk angegeben.

*Kragsteine* aus Liesing

*Mönche* (orig. *munich*) aus Hietzing und Liesing

*Nachgehendes* aus Hietzing

*Breitsteine auf den Gang* aus Liesing

*Quader* aus Hietzing und Liesing

*Füllsteine* aus Hietzing, Hetzendorf und Liesing

Bei letztgenannten Verwendungsbeispielen handelt es sich ausschließlich um sarmatische Kalkarenite und Kalkrudite ("Atzgersdorfer Stein").

Über die Bau- und Kunstgeschichte des Wiener Stephansdomes liegen zahlreiche, umfangreiche Werke vor, sodaß hier nur zwei Übersichtswerke, nämlich ZYKAN

1981 und FEUCHTMÜLLER & KODERA (1978), genannt seien. Der Grundriß des Stephansdomes wird in Abbildung 4 dargestellt.

Die große Anzahl der am Bau beschäftigten Steinmetze spiegelt sich in den Steinmetzzeichenzusammenstellungen von KIESLINGER (1949, S. 167 ff.) und RZIHA (1883, Taf. 1 - 6) wieder. Bei den Steinmetzzeichen handelt es sich um wichtige, oft die einzigen historischen Zeugen aus der Bauzeit.

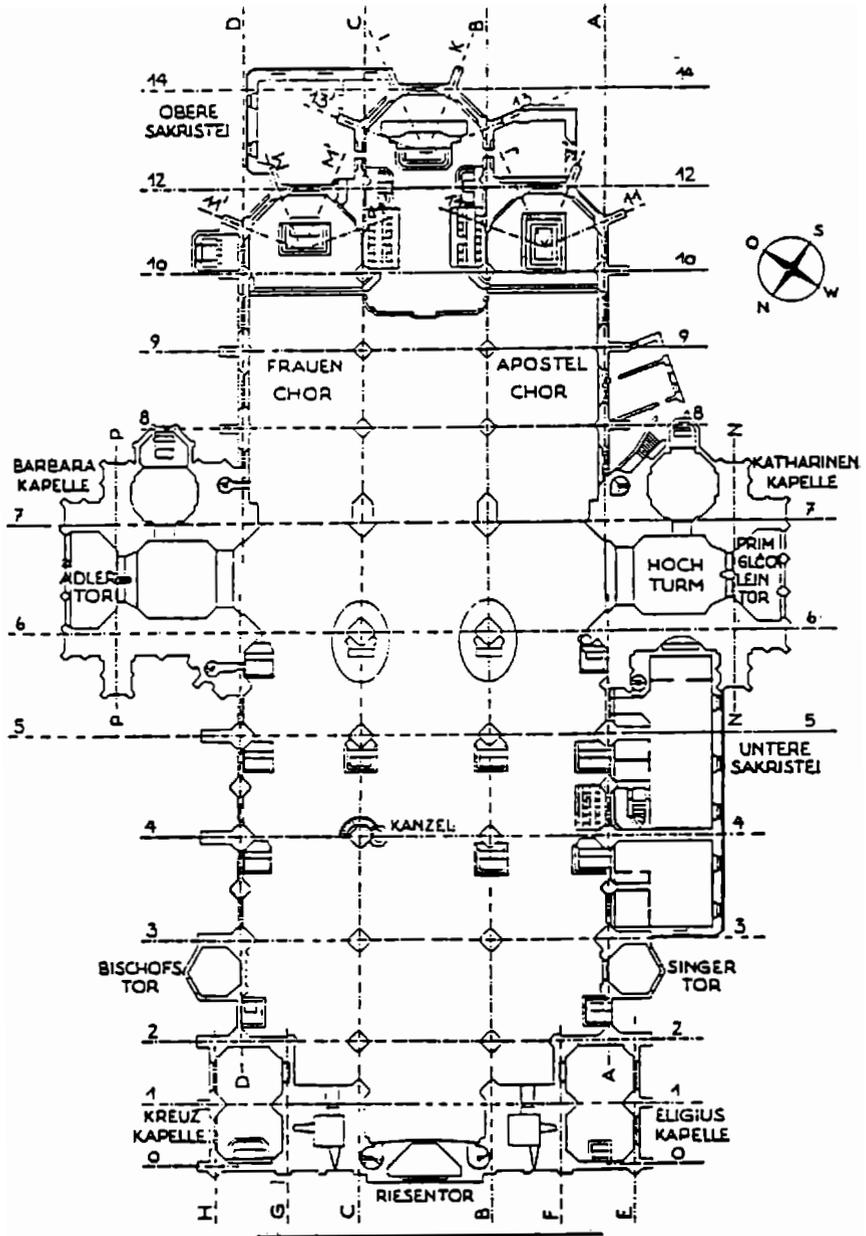


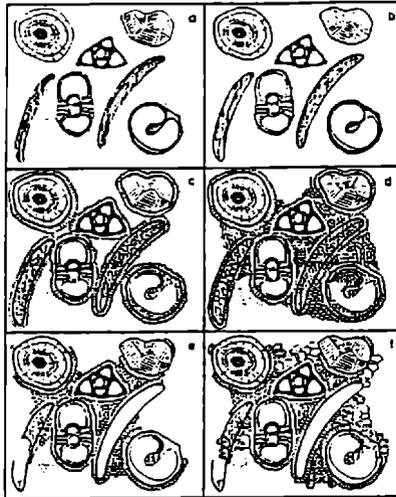
Abb.4: Grundriß des Stephansdomes mit Koordinatensystem (aus KIESLINGER, 1949).

Sie dienten nicht nur der Verrechnung, sondern auch, gleichsam als Marken- und Qualitätszeichen, dem hohen Berufsethos der Steinmetzmeister und Gesellen, die ihre Zeichen nach abgedienter Lehrzeit verliehen bekamen. In der Bundesrepublik Deutschland wurde in jüngster Zeit eine Steinmetzzeichensammlung des Regensburger Domes angelegt (MORSBACH, 1989). Diese Sammlung beinhaltet an die 10.000 Steinmetzzeichen, deren historische Bedeutung, Vorkommen und ihre Häufigkeit in bestimmten Bauphasen mit EDV-Unterstützung ausgewertet werden sollen. Diese Auswertung wird sicherlich noch einige Jahre in Anspruch nehmen, sodaß bis jetzt noch keine konkreten Ergebnisse vorliegen.

Eine grundlegende, wichtige Publikation wurde im vorigen Jahrhundert von Franz RZIHA (1883) verfaßt. Sie gibt Auskunft über Geschichte, Vorkommen, Bedeutung und Konstruktion von Steinmetzzeichen und behandelt auch zusammenfassend die Geschichte von einigen für Mitteleuropa wichtigen Dombauhütten (Straßburg, Regensburg, Wien, etc.). Sehr deutlich streicht er Verbindungen und Beziehungen zum Freimaurertum hervor. Generell unterscheidet RZIHA vierzehn General-Schlüssel der Steinmetzzeichen, die zu vier Hauptgruppen zusammengefaßt werden. Erstens vier Schlüssel der Quadratur, denen, wie man sich leicht vorstellen kann, die geometrische Figur des Quadrates zugrunde liegt, zweitens vier Schlüssel der Triangulatur (verschiedene Konstruktionen von gleichseitigen Dreiecken), drittens vier Schlüssel des Vierpasses (Kombination von Quadraten und Kreisen) und viertens zwei Schlüssel des Dreipasses (Kombination von gleichseitigen Dreiecken und Kreisen). Die Schlüssel innerhalb einer Hauptgruppe steigern ("potenzieren") sich von einfachen geometrischen Figuren zu kompliziert aufgebauten geometrischen Mustern (RZIHA, 1883, Taf. 68). Diese geometrischen Beziehungen stellen außerdem die wichtigsten Konstruktionsgrundlagen der gotischen Baukunst dar (z.B. Konstruktion des Maßwerkes).

Interessante Hinweise für Beziehungen zu anderen Dombauhütten könnten sich bei eingehenden Untersuchungen an anderen Kirchen ergeben. Aufgrund der statistischen Verteilungen von Schlüsselsystemen postuliert F. RZIHA (1883, S. 48) unter anderem enge Beziehungen zwischen Wien, Prag und Brünn. Die Studien der geometrischen Beziehungen einer Vielzahl von Steinmetzzeichen zu diesen Generalschlüsseln wurde von F. RZIHA sicherlich korrekt durchgeführt, nur bleibt es zweifelhaft, ob tatsächlich alle Zeichen nach diesen Konstruktionsgrundlagen angefertigt wurden, da immer wieder Zeichen beobachtet werden konnten, die sich nicht ohne weiteres in einen derartigen Schlüssel einfügen lassen. Ebenso ist die Hypothese, daß jeder Steinmetz ein einmalig vorkommendes "personenbezogenes" Zeichen erhielt, zumindest fragwürdig. Problematisch bei dieser Annahme ist auch die

Vielzahl von überaus ähnlichen Steinmetzzeichen (siehe auch JAXTHEIMER, 1990, S. 66 ff.). Um diese offenen Fragen zu klären, bedarf es noch einer Vielzahl von bauhistorischen Untersuchungen, Steinmetzzeichenaufnahmen und internationalen Vergleichen.



**Abb. 5: Diageneseschema "Atzgersdorfer Stein"**

**a:** Kalkige Barrensande in flachem, bewegtem Warmwasser mit Schrägschichtungen und Strömungsrippeln; bereichsweise mikritischer Kalkschlamm; aktiv "marin" phreatisch;

**b:** verringerte Wasserzirkulation in den Porenräumen; Mikritisierung der Komponenten, ansonsten keine Veränderung; passiv "marin" phreatisch;

**c:** Verstärkung der Wasserzirkulation; feinkörniger, radialer, kurzsäuliger Kalzit (FeO-Gehalt < 0.3 Gew.-%) um alle Partikel; Porenräume bleiben im wesentlichen noch offen; Auswaschung des feinkörnigen Kalkschlammes;

**d:** fein- bis grobkörnige, blockige Kalzite (FeO-Gehalt < 0.3 Gew.-%) um den feinkörnigen Kalzitsaum des dritten Stadiums und Verfüllung der Poren;

**e:** Lösungsstadium unter Süßwassereinfluß und phreatischen Bedingungen; der Beginn des fünften Stadiums stellt den Wechsel von "marin" phreatischen zu meteorisch phreatischen Verhältnissen dar;

**f:** Zonierte große Kalzite; Wechsel in der chemischen Zusammensetzung des Porenwassers von FeO-Gehalt 1.5 - > 2.5 Gew.-% , zu einer Lösung mit einem FeO-Gehalt < 0.3 Gew.-%. Hinweise auf vadose Bedingungen in Form von Meniskuszement in den Oolithen von Hauskirchen und Wolfsthal.

Weitere für Baugeschichte und Bautechnik wichtige Beobachtungen können aus den Bearbeitungsspuren an Quaderoberflächen und Architekturelementen abgelesen werden. Die Deutung dieser Spuren läßt Schlüsse auf verwendete Werkzeuge und die Methodik der Steinbearbeitung zu. Da gewisse Werkzeuge (z.B. Scharriereisen, Peckhammer, Stockhammer; etc.) erst zu bestimmten Zeiten in Gebrauch kamen, kann zur Unterstützung auch über die Bearbeitungstechnik eine relative Chronologie erarbeitet werden und sei es nur der eindeutige Nachweis einer überarbeitenden Restaurierung.

Daß aber auch Neuerkenntnisse und Beiträge zum geologischen Wissen erarbeitet werden können, zeigt als ein ausgewähltes Beispiel die Darstellung zur diagenetischen Geschichte des sarmatischen "Atzgersdorfer Steines" (Abb. 5). Die in der Literatur angeführten Daten zu diesen palökologisch und faziell sehr bedeutenden Karbonatplattformen im Randbereich des Wiener Beckens sind meist sehr dürftig. Dies ist sicher zum Teil auf die relativ schlechten Aufschlußverhältnisse zurückzuführen. In diesem speziellen Fall hat der Mensch aufgrund seiner Bautätigkeit geologisch verändernd gewirkt, Variationsbreiten dieser eigenständigen, sarmatischen Karbonatentwicklung können fast nur mehr an Bauwerken studiert werden. Im Zuge der gesteinskundlichen Aufnahmen an historischen Bauwerken Wiens und Niederösterreichs sowie in den noch vorhandenen Steinbrüchen konnte für den "Atzgersdorfer Stein", neben palökologischen Gesichtspunkten (ROHATSCH, 1993 in Druck) auch die Diagenesegeschichte erfaßt werden (ROHATSCH, 1991).

## 2.1 Westfassade und Riesentor

Im Jahr 1992 konnte der untere Bereich der Westfassade mit dem Riesentor gesteinskundlich aufgenommen werden. Hierfür wurde von der Firma WIBEBA ein mobiles Baugerüst mit einer Höhe von 11 Metern kostenlos zur Verfügung gestellt. Im Jahr 1993 stellte die Wiener Feuerwehr eine Hebebühne für die Aufnahmearbeiten bereit, sodaß auch der noch fehlende obere Bereich der Westfassade bearbeitet werden konnte. Durch die detaillierte gesteinskundliche Aufnahme konnte für bauhistorische Fragestellungen eine wichtige Grundlage erarbeitet werden. Die bau- und kunsthistorische Aufnahme und Beurteilung wurde durch Mitarbeiter von Herrn Univ.Prof.Dr. H. FILLITZ (Akad. d. Wiss.), nämlich Herrn Dr. R. KOCH und Herrn Dr. F. DAHM (jetzt Bundesdenkmalamt) durchgeführt.

Eine besondere Schwierigkeit bei der Beurteilung der Gesteine war hier die zum Teil sehr starke Versinterung großflächiger Fassadenbereiche mit durch Rußpartikel

schwarz gefärbtem Gipssinter, sodaß eine punktuelle Reinigung an verschiedenen Quadern unumgänglich war. Für diesen Zweck wurde ein kleines, tragbares Sandstrahlgerät mit einem Arbeitsdruck von 6 Bar verwendet, welches sich für diese Arbeiten gut eignete, da die Steinoberfläche besonders schonend freigelegt werden konnte. Eine Probenahme war aufgrund der Eindeutigkeit der Befunde nicht notwendig und wegen der Einsehbarkeit der Fassade und der besonderen historischen Bedeutung dieses Bauteiles auch nicht durchführbar.

Im Bereich der Westfassade befinden sich noch große geschlossene Teile von romanischer Bausubstanz (13. Jhdt.), an die im 14. und 15. Jahrhundert die nördlichen und südlichen Kapellen angebaut wurden und in deren oberem Bereich das dominierende Spitzbogenfenster eingebaut wurde. Dieser Fenstereinbau ging mit einer Erhöhung der Fassade im mittleren Bereich zwischen den Heidentürmen einher, um die Türme statisch zu entlasten. Die zum Teil schon bekannten Baufugen konnten auch gesteinskundlich eindeutig festgelegt werden.

Der romanische Bereich der Westfassade mit dem Vorbau des Riesentores und der spitzbogigen Laibung besteht, bis auf geringe Ausbesserungen mit St. Margarethener Kalkarenit, aus geröllführenden Corallinaceenkalkareniten und -ruditen vom Westrand des Wiener Beckens, sogenanntes Badanium Wien-Süd.

Zwischen dem Vorbau des Riesentores und der Fassade sowie zwischen der spitzbogigen Laibung und dem Vorbau konnten keine Baufugen, mit Ausnahme jener, die durch Restaurierungsmaßnahmen erzeugt wurden; festgestellt werden. Aufgrund der homogenen lithologischen Zusammensetzung konnte die purifizierende Rekonstruktion des Riesentores (Abb. 6) von F. v. SCHMIDT widerlegt werden.

Im Norden schließt mit einer deutlichen, oben bis zu 5 Zentimeter vorkragenden Baufuge die Tirnakapelle an, die sich auch in ihrer lithologischen Zusammensetzung von der romanischen Westanlage deutlich unterscheidet. Hier dominieren mittelharte, homogene Corallinaceenkalkrudite aus Mannersdorf neben Kalkareniten aus dem Steinbruchrevier Au am Leithagebirge. Im Bereich des Rundfensters bis vier Steinscharen über dem horizontalen Gesimse wurde ausschließlich "Badanium Wien-Süd" verwendet. Hierbei handelt es sich um wiederverwendetes romanisches Baumaterial, das beim Abbruch eines romanischen Bauteiles gewonnen und einer weiteren Nutzung zugeführt wurde. Der sehr filigrane, abschließende Blattfries besteht aus feinkörnigem "Breitenbrunner Stein".

Auch die südliche Eligiuskapelle schließt mit einer deutlichen, oben vorkragenden Baufuge an die romanische Bausubstanz an. Der hier gewonnene Befund bezüglich der Gesteinszusammensetzung unterscheidet sich von der nördlichen Tirnakapelle durch das Vorkommen von sarmatischem "Atzgersdorfer Stein". Auch hier finden sich wiederverwendete romanische Quader (Badenium Wien-Süd) sowie mittelharter Corallinaceenkalkrudite aus Mannersdorf am Leithagebirge. Ein Element des bekrönenden Blattfrieses besteht noch aus Corallinaceenkalkarenit vom Typ Au am Leithagebirge.

Als differentialdiagnostische Merkmale aus gesteinskundlicher Sicht für die kunsthistorische Datierung könnten hier die Blattfrieze herangezogen werden. Breitenbrunner Bildhauerstein kommt im Wiener Raum erst relativ spät zum Einsatz (ca. ab dem 15. Jhdt.).

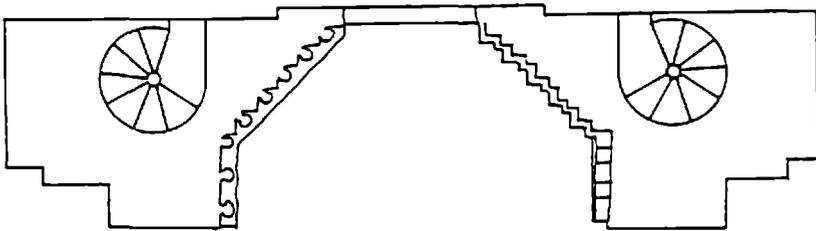
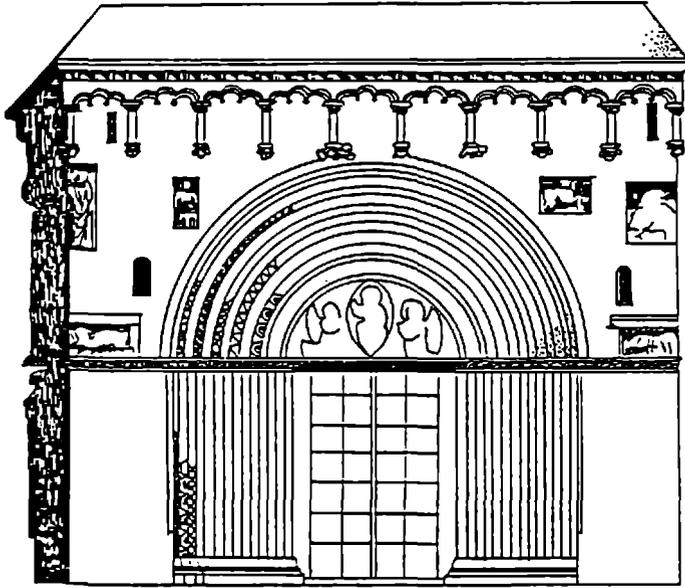


Abb.6: Purifizierende Rekonstruktion des Riesentores von Dombaumeister F. v. Schmidt (aus FEUCHTMÜLLER & KODERA, 1978).

Im 14. Jahrhundert war in Wien der beliebteste Werkstein für Plastiken der Kalksandstein von Au am Leithagebirge, wie die Untersuchungen an der plastischen Ausstattung des Albertinischen Chores und an den Fürstenfiguren des Domes, die derzeit im Historischen Museum der Stadt Wien ausgestellt sind, belegten (MÜLLER & ROHATSCH, 1993, in Druck). Erst ab der Jahrhundertwende wird dieses Gestein vom Breitenbrunner Stein abgelöst. Ein interessantes Beispiel für die außerordentliche Beliebtheit und Bekanntheit dieses Materials ist nicht nur die Kanzel des Meister Pilgram in St. Stephan, sondern auch eine Hl. Dorothea (um 1410) aus der Stadtpfarrkirche in Steyr (OÖ), die derzeit in den Werkstätten des Bundesdenkmalamtes restauriert wird.

Im 13. Jahrhundert wurden in Wien sowohl architektonische Elemente als auch Plastiken aus den geröllführenden Leithakalken vom Westrand des Wiener Beckens angefertigt (z.B. Bauplastik von St. Stephan und St. Michael, Gnadenmadonna der Schottenkirche).

Die Baufuge im Bereich des Spitzbogenfensters konnte auch gesteinskundlich bestätigt werden. Die Laibung des Fensters und die umgebenden, den angelegten Ausbruch füllenden Quader bestehen durchwegs aus mittelhartem Mannersdorfer Leithakalk. Die romanische Altsubstanz besteht, wie erwähnt, aus Gesteinen des Badenium Wien-Süd.

Der äußere Figurenschmuck und das Blattfries des Portalvorbaues besteht mit Ausnahme des spätgotischen St. Stephanus durchwegs aus Badenium Wien-Süd. Der heilige Stephanus und die Stabkapitelle bestehen aus homogenem Corallineenkalkarenit aus Au am Leithagebirge. Auch die beiden auf den Kapitellen sitzenden Plastiken bestehen aus Badenium Wien-Süd und wurden mit den Anläufern des Spitzbogens aus einem Block gearbeitet.

In den Laibungen der romanischen Rundfenster sind noch originale Teile aus Badenium Wien-Süd vorhanden. Auch in den gotischen Rundfenstern der Kapellenzubauten konnten noch originale Teile aus "Auerstein" nachgewiesen werden. Die untere waagrechte Gliederung der romanischen Westfassade links und rechts des Riesentores durch ein Gesimse, mit darunter liegendem Zahnschnitt und dreiteiligem Bogenfries mit hängenden figuralen und ornamentalen Konsolsteinen, weist zum Teil noch romanischen Altbestand auf. Das Gesimse selbst ist durchwegs in St. Margarethener Kalkarenit erneuert, Teile des Zahnschnittes, der Bögen und einiger Konsolsteine bestehen aus Badenium Wien-Süd, wurden aber im Zuge einer Restaurierung mit dem Stockhammer überarbeitet; nur an den dazwischenliegenden

Quaderflächen sind hin und wieder originale Bearbeitungsspuren in Form von Hackspuren zu beobachten.

Die gesamte aufgenommene Fassade wurde bei einer Restaurierung, vor allem in den unteren Bereichen, steinmetzmäßig überarbeitet, sodaß - nur mehr sehr wenige Steinmetzzeichen erhalten sind, und von der originalen Oberfläche mindestens 5mm abgearbeitet wurden. Eine ausführliche Publikation mit der -baugeschichtlichen Auswertung der gesteinskundlichen Befunde befindet sich in Vorbereitung.

## 2.2 Albertinischer Chor

Die detaillierte gesteinskundliche Bearbeitung erfolgte im Rahmen einer Dissertation an der Abt. Baugeologie der Universität für Bodenkultur Wien (ROHATSCH, 1991). Der gestaffelte Albertinische Hallenchor, benannt nach Herzog Albrecht II., gliedert sich in drei Bereiche: den nordöstlichen Frauenchor, den südwestlichen Apostelchor und den mittleren Chor, der vermutlich dem Hl. Stephanus geweiht wurde. Der Mittelchor ragt über die beiden Seitenchöre hinaus. Jeder der drei Chöre endet mit einem 5/8 Schluß.

Errichtet wurde der Chor in den Jahren von 1304 bis 1340, nachdem oder währenddessen der romanische Vorgängerbau des 13. Jahrhunderts abgetragen wurde, weil er den räumlichen, architektonischen und kirchenpolitischen Ansprüchen und Vorstellungen der Gotik nicht mehr entsprach. Unter Albrecht I. wurden erste Vorbereitungen, wie zum Beispiel die Beschaffung des Bauplatzes, getroffen. Der Bau des Chores nimmt nach ZYKAN (1981, S. 42 ff.) erst ab 1323 ein umfangreicheres Ausmaß an, vorher bestand vermutlich eine längere Bauunterbrechung. Die Chorweihe fand am 23. April 1340 unter Herzog Albrecht II. statt.

Die Fundamente wurden als Gußmauerwerk zwischen Steinschalen aus Bruchsteinmauerwerk aufgeführt. Das aufgehende Mauerwerk ist ebenfalls Guß- oder Füllmauerwerk mit Quaderverblendung an den sichtbaren Bereichen. An den nicht einsehbaren Bereichen, zum Beispiel innen über den Gewölben, besteht die Mauerschale aus Bruchsteinen.

Im aufgehenden Mauerwerk lassen sich zumindest vier Phasen der Naturbausteinverwendung beobachten. Im untersten Bereich, etwa bis zu den Sohlbänken der Fenster bzw. den untersten Wasserschlägen der Strebepfeiler, wurden vor allem Quader aus geröllführenden Kalkareniten und Kalkruditen des

Badenium Wien-Süd verwendet. Hierbei handelt es sich um das wiederverwendete Abbruchmaterial von romanischer Bausubstanz.

Darüber folgen "Atzgersdorfer" Kalkarenite und Kalkrudite sowie "Götzendorfer" Arenite aus Götzendorf-Velm bei Dürnkrot (ROHATSCH, 1991). Die "Götzendorfer" Sandsteine wurden mit Vorliebe an den Kanten der Strebepfeiler versetzt, da sie offensichtlich als das besser haltbare Material angesehen wurden. Man kann davon ausgehen, daß ein hoher Prozentsatz der durch St. Margarethener Kalkarenit ersetzten Quader aus diesen Sandsteinen bestand. Warum die "Götzendorfer" Sandsteine verwendet wurden, bei denen man eine Transportweite von rund 45 km (Luftlinie), die Überquerung zahlreicher Bäche und des damals noch nicht regulierten Donaustromes in Kauf nehmen mußte, ist noch eine ungeklärte Frage.

In den obersten Bereichen, über den Archivoltten der Fenster, wurden, aus bis jetzt unbekanntem Gründen, bis auf wenige Ausnahmen nur mehr Kalkarenite der Region Au am Leithagebirge verwendet. Diese deutliche Zäsur, angezeigt durch den Materialwechsel (ROHATSCH, 1991), ist mit einer Planänderung in Verbindung zu bringen und stellt mit einem Rückbau im Bereich der Fenstergewände und einer, für den Bauhistoriker (mündl. Mitt. G. SEEBACH) erkennbaren, Änderung im Gewölbeansatz eine Bauphase dar.

Als vierte Phase der Gesteinsverwendung folgen jene Bauteile, die im Zuge der Restaurierungen seit dem vorigen Jahrhundert und nach den Zerstörungen des Zweiten Weltkrieges ersetzt wurden (z.B. Fialen mit Kreuzblumen und Krabben, Wasserspeier, Maßwerk Galerie, aber auch Quader und Teile des Maßwerkes). Das Restaurierungsmaterial wird seit der Mitte des 19. Jahrhunderts im wesentlichen aus St. Margarethen (Ruster Hügelland, Burgenland) bezogen.

Die plastische Ausstattung der Außenfassaden des Chores, Blattfries, Wasserspeier und Konsolfiguren besteht im Altbestand aus homogenen Corallinaceenkalkareniten aus Au am Leithagebirge. Die Neuaufnahme und stilistische Bewertung erfolgte durch WLATTNIG im Rahmen einer Dissertation (in Vorbereitung; Landesmuseum f. Kärnten, Kunsthistorische Abt.). Ein Großteil der Konsolfiguren ist noch im Original (um 1340) erhalten; von den wesentlich ungeschützteren darüber befindlichen Wasserspeiern sind nur mehr fünf gotische Originale im Verschneidungsbereich zwischen nordöstlichem und mittlerem Chor überliefert.

## 2.3 Die Restaurierung des Domes

Die Restaurierungsmaßnahmen seit der Mitte des 19. Jahrhunderts werden vom Standpunkt der Erneuerung bestimmt. Diese Ideologie kommt aber immer mehr mit der Philosophie des Denkmalschutzes und der Denkmalpflege in Konflikt, da es in erster Linie darum geht, historische Substanz mit allen Mitteln zu bewahren und nur wenn es unbedingt nötig ist, diese durch Kopien zu ersetzen. Dies ist bei einem derart großen und komplexen Bauwerk natürlich nicht ganz einfach, da eine Anzahl von Architektur- und Bauteilen einen sehr schlechten Erhaltungszustand aufweisen. Nach eigenen Beobachtungen wurde aber auch die Auswechslung sehr vieler, nur in geringem Maße geschädigter Quader festgestellt. Eine Reinigung mit Drahtbürste und Spachtel, die weder auf historische Oberflächen noch auf Steinmetzzeichen Rücksicht nahm, konnte noch im Jahre 1990 beobachtet werden.

Ein erster Ansatz für Steinkonservierung erfolgte nach Zustimmung von Dombaumeister K. STÖGERER durch die Werkstätten des Bundesdenkmalamtes und der Firma REMMERS an Probeflächen eines Strebebeylers (Pf. 9) des Albertinischen Chores mit Steinfestigern auf Kieselsäureesterbasis. Die Untersuchung der physikalischen Parameter (Porenradienverteilungen, Wasseraufnahme, etc.) von Gesteinsbohrkernen wurde von einem deutschen Geologen (G. HILBERT, FH-Münster) durchgeführt. Soviel mir bekannt ist, kam im Zuge der Voruntersuchungen für die Steinfestigung erstmals in Österreich auch ein Bohrhärteprüfgerät zur direkten, nahezu zerstörungsfreien Erfassung von Verwitterungsprofilen zum Einsatz. Mit Hilfe dieses Gerätes können aufgrund des Bohrfortschrittes in der Zeit Inhomogenitäten im Gestein, wie zum Beispiel verhärtete Schalen und darunter liegende mürbe Zonen, festgestellt werden. Da der Bohrfortschritt kontinuierlich mitaufgezeichnet wird, läßt sich auch die Tiefe der einzelnen Verwitterungserscheinungen exakt erfassen. Für die praktischen Anforderungen im Denkmalschutz ist ein vorsichtiges Abklopfen der Fassaden und Architekturteile mit einem kleinen Hammer zur Erfassung von Schalen und Krusten völlig ausreichend.

Die oben erwähnte plastische Ausstattung des Albertinischen Chores wurde durch die Werkstätten des Bundesdenkmalamtes (Doz.Dr. KOLLER, Mag. NIMMRICHTER), nach einer Vorfestigung mit Paralloid, sorgsam mit dem Skalpell von Krusten und Sinter befreit. Danach wurden die Objekte zur Entsalzung mit feuchten Zellstoffkompressen verpackt, die zuerst die wasserlöslichen Salze mobilisieren und danach beim langsamen Austrocknen diese in sich aufnehmen. Fehlende Teile wurden mit Restauriermörtel angetragen und abschließend erfolgte die Schlämmung

mit einer Kalk-Sand-Porenschlämme, welche die Aufgabe der sogenannten "Opferschicht" erfüllt.

Eine besondere Problematik stellt die Verwendung von St. Margarethener Kalksandstein für Ergänzungen und Kopien dar. Es hat sich durch die Aufnahmemarbeiten am Dom gezeigt, daß die Lebensdauer dieses Kalksandsteines ziemlich eingeschränkt ist. Erneuerungen, die nach der Zerstörungsphase im Zweiten Weltkrieg erfolgten, befinden sich knapp fünfzig Jahre später wieder in einem sehr bedenklichen Zustand. Viele Teile der den Chor oben umlaufenden Maßwerkgalerie mußten während der Restaurierungsmaßnahmen im Jahre 1991 neu angefertigt und versetzt werden.

Die sehr hohe Porosität (28-34% Gesamtporenvolumen) in Verbindung mit bereichsweiser sehr feinkörniger Zementation führen, der aggressiven Verwitterung ausgesetzt, zu starken Lösungserscheinungen und Inkrustationen, wobei die Lösungsverwitterung in homogenen Gesteinsbereichen in Form von Mulden und Grübchen, einer Erhöhung der Rauigkeit und Verschleifung von Konturen kein besonderes Problem darstellt. In Bereichen von Inhomogenitäten hingegen, die beispielsweise durch lagenförmig eingeregelter Rhodolithen- oder Ostreenpflaster hervorgerufen werden, äußert sich auch die Lösungsverwitterung in Kombination mit Frostsprengung in gravierenden Schadensbildern. Die bis jetzt erwähnten Schäden treten in jenen Bereichen eines Objektes auf, die der direkten Beregnung ausgesetzt sind. In geschützten Winkeln, Unterseiten und der Regenseite abgewandten Bereichen kommen zur Lösungsverwitterung noch einige zusätzliche sehr schädigende Faktoren hinzu. Die Lösungsprodukte des durch die im Regen enthaltenen schwachen Säuren gelösten Kalzites, die an der Regenseite sofort abgewaschen werden, konzentrieren sich nahe der Oberfläche des Steinobjektes und kristallisieren im kontaminierten Großstadtbereich meist in Form von Gips. Je nach Exposition sind zäpchen- oder plattenförmige Sinter, aber auch bis zu 1cm lange, stengelige Gipskristalle (z.B. Pfarrkirche in Maria Enzersdorf, in den Profilen der Portallaibung der Türe zur Sakristei) zu beobachten.

Durch den Kristallisationsdruck schreitet die Zermürbung im Inneren des Steines voran, an der Oberfläche beginnt sich eine durch Rußpartikel schwarzgefärbte Gipskruste abzuschneiden. Diese Kruste dichtet in weiterer Folge den Stein nach außen hin ab, unterbindet die Zirkulation und Verbindung mit der Außenwelt und verhindert so ein Ab- oder Austrocknen. Hinter einer oft planen, festen, allerdings schwarz gefärbten Oberfläche verrichten Feuchtigkeit, Organismen, usw. weiterhin ihr Zerstörungswerk, das zu einer völligen Zermürbung der Steinsubstanz hinter einer

scheinbar festen Oberfläche führt, die eines Tages, wenn die Haftung zu gering wird, abfällt. Die schwarze Oberfläche des Steines bewirkt zusätzlich eine wesentlich höhere Aufheizung (z.B. KRAUS 1988, 183 ff.) durch die Sonneneinstrahlung. MENTLER (1985) stellte Temperaturen um die 60°C an dunkelgefärbten Verwitterungskrusten der Maßwerkgalerien des Stephansdomes fest.

MENTLER (1985, S. 64) wies in unverwitterten Kalkareniten des St. Margarethener Steinbruches ca. 120 ppm SO<sub>4</sub> und in den verwitterten des Stephansdomes eine Anreicherung von 466.500 ppm SO<sub>4</sub> nach. Diese Tatsache erklärt auch den Umstand, daß am Stephansdom vorwiegend Gipsinter- und im Steinbruch vorwiegend Kalksinterverwitterungskrusten gebildet werden. Auf die Abhängigkeit zwischen Verwitterung und Porengröße weist auch MENTLER (1985, S. 42 ff.) hin. So findet er beträchtliche Unterschiede bezüglich der Dimensionen der Porenräume zwischen der hellen Varietät und der dunklen, "leberbraunen" Varietät. Der dunklere, härtere Gesteinstyp, der von der Dombauhütte für die Restaurierungen herangezogen wird, weist im Mittelporenbereich (Durchmesser 10 - 0.2µ) einen Anteil von 30.17% auf, im Gegensatz zur hellen weicheren Varietät, die im Mittelporenbereich nur 11.87% aufweist. Die hellere Varietät zeichnet sich nach MENTLER (1985) auch durch einen wesentlich höheren Anteil an Grobporen aus. Der Porendurchmesser steht in engem Zusammenhang mit der kapillaren Steighöhe.

Während der kalten Jahreszeit gefriert das Wasser, das die Poren erfüllt. Da Wasser beim Gefrieren eine Volumenzunahme erfährt, wird der sich aufbauende Druck auf die Porenwandungen übertragen. CORRENS (1981, S. 168 Abb. 287) gibt als höchsten vorkommenden Druck 2200 kg/cm<sup>2</sup> an, bei einer entsprechenden Temperatur von -22°C. Dies ist sicher ein extremes Beispiel, doch treten bei nur -5°C Drücke um die 600 kg/cm<sup>2</sup> auf. Voraussetzung dafür ist aber, daß der Druck auf die Porenwand übertragen werden kann, die Porenräume also nahezu vollständig mit Wasser gefüllt sind. Dies erklärt auch zum Teil den sehr guten Erhaltungszustand der sogenannten "Atzgersdorfer" Kalkarenite und der Corallinaceenkalkrudite des Badanium, da diese vorwiegend große Porenräume aufweisen, die selten vollständig von Wasser erfüllt werden.

Weil in den geschützten Bereichen der "Waschmechanismus" und der trocknende Wind fehlen, bildet sich unter der schwarzen Sinterkruste eine Art "Treibhaus"-Mikroklima, welches wiederum eine Ansiedlung von Bakterienkulturen, Algen und Pilzen begünstigt, deren Stoffwechselprodukte den Stein zusätzlich zerstören.

Zusätzlich zur Gipsbildung befinden sich in diesen geschützten Bereichen oft auch Anreicherungen von wasserlöslichen Salzen, meist Magnesiumsulfate, die während trockener Perioden pelzartige Überzüge ausbilden.

Alles in allem ist der St. Margarethener Kalksandstein ein relativ schlechtes, allerdings sehr beliebtes und mittlerweile auch schon historisches Restaurierungsmaterial (man erinnere sich an eine Aussage, die selbst von bedeutenden Geologen getroffen wurde: *"Der Stephansdom besteht aus St. Margarethener Sandstein"*.), das durch besser geeignetes, dauerhafteres Material ersetzt werden müßte; vor allem, wenn man die sehr hohen finanziellen Mittel berücksichtigt, die durch großzügige Spenden jährlich bereitgestellt werden müssen. Sollte man sich zukünftig doch für besser geeignetes Gesteinsmaterial entscheiden, könnte an der "ewigen Baustelle" Stephansdom ein nicht geringes Volksvermögen eingespart werden!

Da derzeit nur wenig geeignetes Material in noch aktiven Steinbrüchen abgebaut wird, wäre auch, nach detaillierter geologischer Vorerkundung, die Wiedereröffnung eines historischen Abbaues in Erwägung zu ziehen, der ausschließlich für Restaurierungen herangezogen wird. Als Alternative kämen nach sorgsamer Prüfung folgende Vorkommen in Betracht (in alphabetischer Reihenfolge): Bad Deutsch Altenburg Hundsheim, Lindabrunn (feinkörnige Varietäten), Kaisersteinbruch, Mannersdorf, Wolfsthal (Oolithe);

All diese Gesteine sind aufgrund ihrer Härte im Vergleich zu den St. Margarethener Kalksandsteinen natürlich nicht so einfach und mühelos zu bearbeiten wie dieser, haben aber aufgrund ihrer technischen Eigenschaften den Vorteil einer wesentlich besseren Haltbarkeit; weisen doch zum Beispiel barocke Grabsteine aus "Kaiserstein" noch jeden Hieb des Peckhammers auf. Der mögliche Einwand, daß es sich hierbei nicht um authentisches Material handelt, ist insofern unberechtigt, da auch der Kalksandstein aus St. Margarethen diese Forderung nicht erfüllt. Es werden zwar für die Jahre 1423 1430 zwei Eisenstädter Steinmetzen bezeugt, die mit St. Margarethener Stein am Turm von St. Stephan in Wien arbeiteten (SCHMELLER, 1965, S. 17), jedoch wurde daneben sehr viel anderes, auch sehr schwierig zu bearbeitendes, aber dauerhaftes Material verwendet. Als Beispiel mögen die vorgeblendeten Kreuzblumen am Nordturm aus sarmatischen, geröllführenden Kalkareniten und Konglomeraten aus dem Bereich Atzgersdorf-Liesing dienen (sichtbar von der Maßwerkalerie des Albertinischen Chores).

Außerdem sollte ein öffentlich verwaltetes, für Denkmalpfleger zugängliches Depot für historische Gesteine errichtet werden, die bei diversen Abbrüchen von Bauwerken zu Tage treten und meist auf eine Deponie verführt werden, da zum Beispiel die Vorkommen der hervorragend geeigneten und im Osten Österreichs weit verbreiteten Baugesteine vom Typ "Atzgersdorfer Stein" praktisch erschöpft sind, obwohl gerade dieses Gestein im gesamten Randbereich des Wiener Beckens einst weite Verbreitung hatte. Eventuell wären entsprechende Gesteinsvorkommen der Slowakei und Ungarns in dieser Hinsicht zu überprüfen.

### 3 Klosterneuburg Stiftskirche

An der Stiftskirche in Klosterneuburg werden seit dem Jahre 1991 umfangreiche Restaurierungsarbeiten durchgeführt. Diese Gelegenheit konnte für eine gesteinskundliche Aufnahme und Dokumentation des Verwitterungszustandes benutzt werden. Die derzeit in der Stiftskirche ausgestellten gesteinskundlichen Fassadenpläne wurden nach vergrößertem Photomaterial sowie nach photogrammetrischen Aufnahmen angefertigt, die freundlicherweise vom Bundesdenkmalamt (HR Dr. KITLITSCHKA LK Niederösterreich) zur Verfügung gestellt wurden.

Der Südturm sowie ein großer Teil des Langhauses wurden unter Dombaumeister F. SCHMIDT in den Jahren 1887 - 1892 (DEHIO, 1976, S. 151) weitgehend verändert und ausgebaut. An Gesteinen für Quader wurde für diese Umbauten hauptsächlich Zogelsdorfer Kalkarenit, Süßwasserkalk aus Duna-Almas (Nord-Ungarn bei Komorn a.d. Donau), für Sockel, Tür- und Fenstergewände Wöllersdorfer und Mannersdorfer Leithakalk verwendet. Die Steinbrüche von Duna-Almas wurden im Jahre 1600 eröffnet und befanden sich bis 1944 im Eigentum des Chorherrenstiftes Klosterneuburg (KIESLINGER, 1972, S. 64). Auffällig sind die sehr einheitlichen Quaderdimensionen aus dieser Bauphase, man könnte von Normierung sprechen, ganz im Gegensatz zur historischen Bausubstanz mit den sehr unterschiedlichen Quaderformaten.

Der Südturm sowie seine Fialen bestehen vorwiegend aus Zogelsdorfer Kalksandstein. Auffällig ist bei diesen Gesteinen die Schichtung, die durch lagenweise zusammengeschwemmte, härtere Bryozoenlagen verdeutlicht wird. Diese härteren Bryozoenlagen weisen senkrecht zur Schichtung verlaufende Klüfte auf, die im umgebenden Gestein nicht beobachtet werden können. Komponenten des Zogelsdorfer Kalkarenites bis -rudites, die mit freiem Auge zu erkennen sind: Bryozoen, Corallinaceen (Ästchen und Rhodolithen), diverse Bivalven und

Foraminiferen. Für das Maßwerk der Fenster wurde gelbbrauner Corallinaceenkalkkrudit verwendet, der sich von den "Zogelsdorfer" Quadern durch die Dominanz von Corallinaceen unterscheidet. Für die Gesimse unter der Balustrade fand ein feinkörniger, sparitischer Kalk aus Istrien Verwendung, der auch nach Untersuchungen von Dünnschliffen keine Fossilreste erkennen läßt. Die Brüstung der Maßwerk Galerie sowie die Schäfte der Fialen, die an den Ecken des Achteckes emporragen, bestehen überwiegend aus feinkörnigen Corallinaceenkalkareniten vom Typ Au am Leithagebirge.

Die in romanischem Stil erneuerte Langhaussüdfassade besteht in ihrem unteren Teil aus Zogelsdorfer Kalksandstein, der Lichtgaden aus Süßwasserkalk von Duna-Almas. Die architektonische Gliederung der Fassade durch halbrunde Wandvorlagen, Kapitelle und Gesimse wird durch regelmäßige, symmetrische Abwechslung dieser beiden farblich deutlich unterschiedlichen Gesteinsvarietäten auch optisch aufgelockert.

Im Verschneidungsbereich zwischen Langhausfassade und Südturm befindet sich noch ein Rest von originalem Quadermauerwerk aus braunem, mittel- bis grobkörnigem Quarzsandstein (Flyschzone, Greifensteiner Teildecke), an dessen Oberflächen noch Zangenlöcher und originale Bearbeitungsspuren in Form von Randschlag und Scharrierung zu beobachten sind.

Das Quadermauerwerk des Nordturmes besteht mit Ausnahme des Turmhelmes (Zogelsdorfer) durchwegs aus braunem Quarzsandstein (Flyschzone, Greifensteiner Teildecke). Auch hier sind noch Zangenlöcher und originale Bearbeitungsspuren zu beobachten. An Verwitterungserscheinungen sind vor allem oberflächenparallele Abplatzungen zu erkennen.

Aufgrund von Übersichtsbegehungen zeigte sich, daß in der historischen Bausubstanz des Stiftsbereiches Flyschsandsteine dominieren, aber für diverse qualitativere Arbeiten auch diverse Kalkarenite und Kalkrudite der neogenen Randfazies zum Einsatz gelangten (diverse spätgotische Portale aus Zogelsdorfer Kalksandstein, Kapitelle aus grobkörnigem detritischem Leithakalk vermutlich aus Nußdorf, etc.). Eine detaillierte gesteinskundliche Untersuchung dieser Bereiche und der Steinobjekte des Lapidariums steht noch aus.

Der Erhaltungszustand der jetzt etwa hundertjährigen Bau- und Architekturteile ist gut, außerhalb der "Dunstglocke" der Großstadt Wien liegen auch stärker verwitterungsanfällige Gesteine, wie zum Beispiel die Flyschsandsteinquadern des Nordturmes, in einem wesentlich besseren Erhaltungszustand vor. In den geschützten Bereichen des Südturmes (E und SE) traten durch Rußpartikel schwarz gefärbte Gipsinterbildungen auf, die während der Restaurierung (1991) entfernt wurden. Die Oberflächen der Quadern und Architekturteile weisen oberflächliche Lösungserscheinungen auf. Weichere Gesteine (Typ "Auerstein" und Corallinaceenkalkrudite des Maßwerkes) haben durch Lösungsmulden und Lösungsgrübchen eine leicht wellige, unregelmäßigere Oberfläche erhalten, härtere Gesteine (Zogelsdorfer Quadern) eine aufgerauhte, aber glatte Oberfläche. Abplatzungen, die auf die Einwirkung von Feuchtigkeit zurückzuführen sind, können an den feinkörnigen Gesteinen (Typ "Auerstein") der Fialen auf der Balustrade beobachtet werden. Auffällig ist die Häufung von Schäden (Lösungsverwitterung) in einer Höhe von 10 bis 16 Metern über dem Stiftsplatz. Hierfür könnte mit Schadstoffen belasteter Herbstnebel, der in dieser Höhenlage auftritt, verantwortlich sein.

Relativ häufig kommen in den harten Leithakalken aus Wöllersdorf, vor allem in den Abdachungen der Strebeböden, Risse vor, die als Frostschäden zu interpretieren sind. In diesen bis zu 5mm offenen Rissen siedelten sich diverse Pflanzen an (div. Moose, Weiden), die entfernt werden mußten.

Im ersten Zug der Sanierungsmaßnahmen wurden die Fassaden mit dem JOS-System, einem sehr schonenden Sandstrahlverfahren, gereinigt. Danach wurden fehlende Teile von Kreuzblumen und Krabben mit einem hellen fein- bis mittelkörnigen italienischen Kalksandstein ("Palladio" von St. Gottardo bei Vicenza) ergänzt. Eine Neuverfugung und abschließende Hydrophobierung beendete diese mustergültige Restaurierung.



## 4 St. Michael (Wien I)

KIESLINGER (1979, S. 57 ff.) hatte in den fünfziger Jahren die Möglichkeit, die Grundmauern der Michaelerkirche und das aufgehende Mauerwerk der Innenfassaden zu untersuchen. Nach seinen Beobachtungen ist in den Fundamenten des Hauptschiffes (Streifenfundamente) "urtümlich" erscheinendes, aus unförmigen Steinblöcken zusammengefügtes Bruchsteinmauerwerk vorhanden, in welchem lageweise die Steine schräg geschichtet wurden, sodaß gleichsam ein halbes "opus spicatum" entstanden ist. Zwischen den Steinen klaffen große Löcher und in den Stoßfugen befindet sich kein Mörtel. Mörtel wurde nur zwischen den einzelnen Steinscharen verwendet. An Gesteinen wurden Sarmatsandsteine vom Typus Türkenschanze und grüne Flyschsandsteine beobachtet.

Im aufgehenden Mauerwerk des Langhauses und des Querhauses bestimmte KIESLINGER geröllführende Corallinaceenkalkrudite ("*Torton Wien-Süd*").

Die im Zuge der Restaurierungen des Jahres 1990 zugänglichen romanischen und gotischen Bereiche der Südfassade, wurden übersichtsmäßig beprobt und photographisch dokumentiert. Im wesentlichen kann im romanischen Altbestand Badenum Wien-Süd beobachtet werden. Daneben finden sich in den Strebebfeilern (gotische Zubauten), Sandsteine und fossilreiche ("Cerithien") sarmatische Kalkarenite und -rudite vom Typ "Atzgersdorf" oder "Türkenschanze". Die fossilfreien Sandsteine sind feinkörnig ausgebildet und weisen Schrägschichtungen auf. An den Strebebfeilern finden sich außerdem helle, detritäre "Leithakalke" (Corallinaceenkalke) mit Quarzgeröllern unsicherer Herkunft (Hainburger Berge oder Leithagebirge).

Die Fortsetzung der Restaurierungsarbeiten im Jahre 1991 (Oktober November) erfolgte an den nördlichen Bauteilen, dem romanischen Querschiff und dem gotischen Chor. An Gesteinen wurden im romanischen Querschiff vorwiegend geröllführende Leithakalke vom Westrand des Wiener Beckens aus dem Süden von Wien verwendet, daneben kommen aber auch sarmatische, fossilreiche, geröllführende Atzgersdorfer Kalkarenite vor. Am gotischen Chor wurden vorwiegend Kalksandsteine vom Typ "Atzgersdorf" verwendet und zwar fein- und grobkörnige Lumachellen, Oolithe, "Cerithien"-reicher Kalkrudit und gelbliche, feinkörnige, quarzreiche Arenite. Für die Fenstergewände der Spitzbogenfenster des gotischen Chores wurden mittelharte, weiße Mannersdorfer Corallinaceenkalke verwendet. Als Datum für die Errichtung des Chores wird der Zeitraum zwischen 1327 und 1340 in Betracht gezogen, aber auch ein Datum um 1416 erwogen. Die Verwendung des mittelharten Mannersdorfer

Corallinaceenkalkes für die Fenstergewände würde eher für dieses spätere Datum (1416) sprechen.

Aufgrund des späten Redaktionsschlusses für diesen Artikel können hier noch die neuesten Beobachtungen an der nördlichen romanischen Langhausfassade miteinfließen. Es ergaben sich deutliche Unterschiede in der lithologischen Zusammensetzung im Vergleich mit dem Querhaus, die sich wie folgt äußern. Schon von ferne sind diverse Störungen im Quadermauerwerk zu beobachten, die sich aus der Nähe betrachtet auch gesteinskundlich festgelegt werden können. Einerseits dominiert Atzgersdorfer Stein mit Zangenlöchern (I) und andererseits kommen homogene, nicht geschichtete Corallinaceenkalkrudite noch unbekannter Herkunft (Leithagebirge ?) in größeren Mengen ebenfalls mit Zangenlöchern vor. Auch die Rundbogenfriese weisen in den entsprechenden Fassadenabschnitten diese Gesteinsverwendung auf. Diese ersten Beobachtungen zeigen, daß im nördlichen Langhaus mit einer differenzierten Baugeschichte, etwaigen Um- oder Neubauten zu rechnen ist, die nur durch eine detaillierte Aufnahme und Diskussion mit dem Bauhistoriker geklärt werden kann.

#### Restaurierungskritik

Die erste Kritik trifft den Zeitpunkt der Restaurierung. Derartige Maßnahmen im Spätherbst mit schon beachtlichen Nachtfrösten anzusetzen, sodaß die Libelle in der Wasserwaage gefriert, sind dem Abbindeverhalten von diversen Antragungen mit Sicherheit abträglich (nach einer mündl. Mitt. des zuständigen Restaurators gab es Nächte mit  $-11^{\circ}\text{C}$ !).

Fragwürdig ist außerdem warum die Zangenlöcher an den gotischen Quadern geschlossen wurden, die Zeugnis von einer historischen Arbeitstechnik ablegen. Das Argument der Verkleinerung der Angriffsfläche für die Verwitterung ist in diesem Fall nicht schlüssig, da diese Spuren doch immerhin einen Zeitraum von über einem halben Jahrtausend unbeschadet überstanden haben. Außerdem werden diese Antragungen ohnehin meist zu hart und in einer unpassenden Farbe hergestellt, sodaß sie einerseits in kurzer Zeit wieder abfallen oder als unschöne graue Flecken den optischen Eindruck eines Bauwerkes stören.

Lobend muß hingegen erwähnt werden, daß als Ersatzmaterial der auch in Teilen der gotischen Substanz vorhandene, mittelharte Mannersdorfer Stein für die Ausbesserung dieser Bauteile verwendet wurde. Negativ muß jedoch vermerkt

werden, daß dieses sehr helle Gestein auch für die Bereiche mit Atzgersdorfer Stein und Badanium Wien-Süd verwendet wurde; Gesteine, die eine wesentlich dunklere ins bräunliche und rotbraune gehende Farbe aufweisen. Die danach erfolgte Patinierung dieser Neuteile gleicht diese Unregelmäßigkeiten für eine gewisse Zeit sicher aus.

## **5 Steinverwendung in Wien vom 13. - 15. Jahrhundert**

Aufgrund dieser Untersuchungen sowie weiterer Beobachtungen an verschiedenen anderen Kirchen (Maria am Gestade, Minoritenkirche, Burgkapelle, Ruprechtskirche, Kirche am Hof, Schottenkirche) kann für Wien folgende Chronologie in der Gesteinsverwendung im Sakralbau erstellt werden. Eine ausführliche Darstellung findet sich bei KIESLINGER (1979).

Im 12/13. Jahrhundert war das bedeutendste Baugestein, das auch für plastische Darstellungen verwendet wurde, ein geröllführender Leithakalk vom Westrand des Wiener Beckens aus der Region zwischen Baden und Wöllersdorf (Badanium Wien-Süd). Die genaue Lage dieser historischen Steinbrüche ist nicht bekannt, sie müssen sich aber aufgrund der Flyschsandsteingerölle und kalkalpinen Komponenten in diesem Bereich befunden haben. Am ehesten vergleichbar ist noch die geröllführende Corallinaceenkalkfazies aus dem unteren Bruch der Steinbrüche des Rauchstallbrunngrabens bei Baden. Wegen seiner Schichtung, Geröllführung, Härte und Inhomogenität war dieses Gestein mit den damaligen, recht bescheidenen Mitteln (Zweispitz, Bossierhacke, Spitzeisen, Beizeisen, etc.) relativ schwierig zu bearbeiten. An Bearbeitungsspuren auf Quadern finden sich vorwiegend Randschlag und Hackspuren (Steinhacke, Bossierhacke); Steinmetzzeichen sind eher selten zu beobachten. Zangenlöcher fehlen, da zu dieser Zeit noch der Steinwolf in Gebrauch war und sich die Wolflöcher an der Quaderoberseite, dem "Lager" befinden. Untergeordnet kamen vorwiegend für Bruchsteinmauerwerk und Fundamente sarmatischer Atzgersdorfer Stein vermutlich von der Türkenschanze (Wien XVIII) und Flyschsandstein zur Verwendung.

Im 14. Jahrhundert scheinen die Vorkommen des Badanium Wien-Süd aufgegeben worden zu sein, da sich dieser Gesteinstyp nur mehr in Zweitverwendung und hier auch nur am Stephansdom nachweisen läßt. Das Hauptbaumaterial dieser Zeit war der sarmatische Atzgersdorfer Stein, der an fast allen sakralen Bauwerken der Wiener Gotik eine Vorrangstellung besitzt. Daneben finden sich am Stephansdom die "Götzendorfer Sandsteine", die bis jetzt nur an diesem Bauwerk nachgewiesen

werden konnten. Für plastische Arbeiten gewinnt der Kalksandstein von Au am Leithagebirge eine unübertroffene Bedeutung. Die Quader am Albertinischen Chor aus "Auerstein" nehmen eine Sonderstellung ein und konnten als Baumaterial in dieser Größenordnung ebenfalls nur am Stephansdom nachgewiesen werden. An Bearbeitungsspuren auf Quadern sind nach wie vor Randschlag und Hackspuren zu erkennen. Dazu kommen nun Zangenlöcher, die auf den Gebrauch der Steinzange als Hebewerkzeug zurückzuführen sind, Steinmetzzeichen werden sehr häufig.

Gegen Ende des 14. und dann im 15. Jahrhundert übernehmen die Gesteinsvorkommen des Leithagebirges die Führung im Bauwesen und verdrängen die bis dahin verwendeten sarmatischen Atzgersdorfer Kalksandsteine, obwohl diese im näheren Einzugsbereich der Brüche nach wie vor verwendet werden (Spitalskirche in Mödling, Pfarrkirche in Maria Enzersdorf, etc.). Für Quader wurden vor allem die Brüche von Mannersdorf und Au am Leithagebirge herangezogen. Bei plastischen Arbeiten setzte sich immer mehr der "*Bildhauerstein*" von Breitenbrunn durch. Bei den Bearbeitungsspuren auf Quaderoberflächen werden die Hackspuren durch Spuren des Scharriereisens abgelöst. Der in der Literatur immer wieder erwähnte Zogelsdorfer ("Eggenburger") Stein kann in Bauwerken und Plastiken dieser Zeit noch nicht nachgewiesen werden.

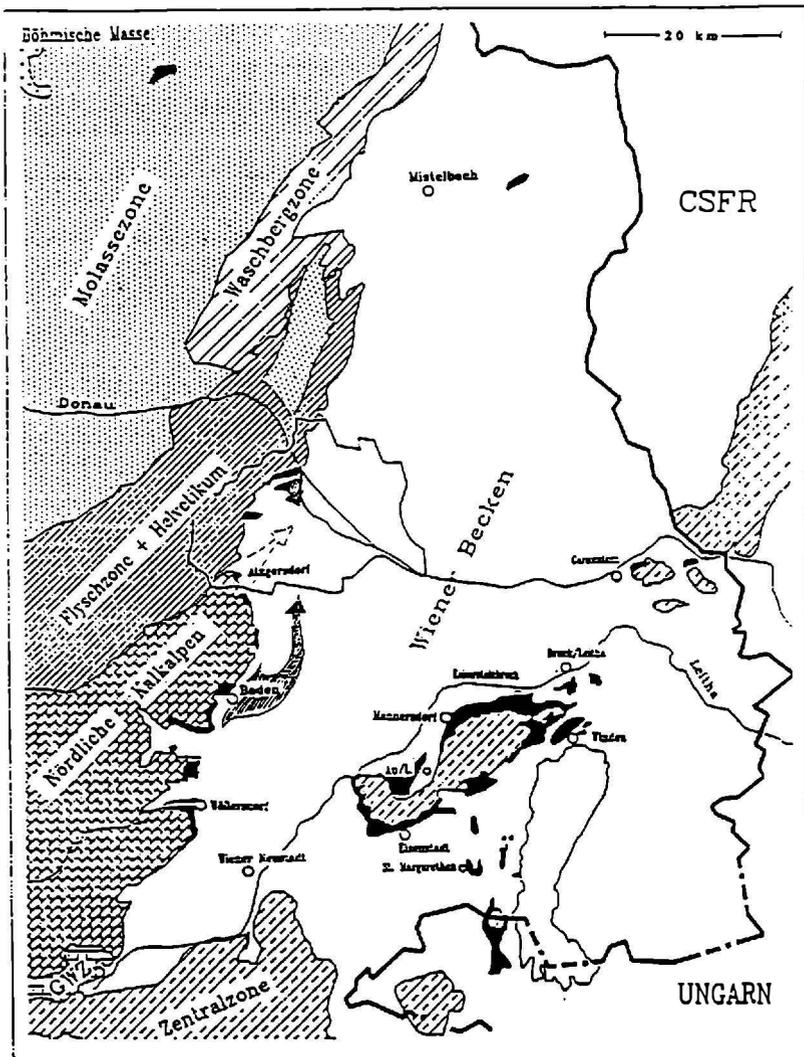


Abb. 8: Steinlieferungen nach Wien im 13. Jahrhundert

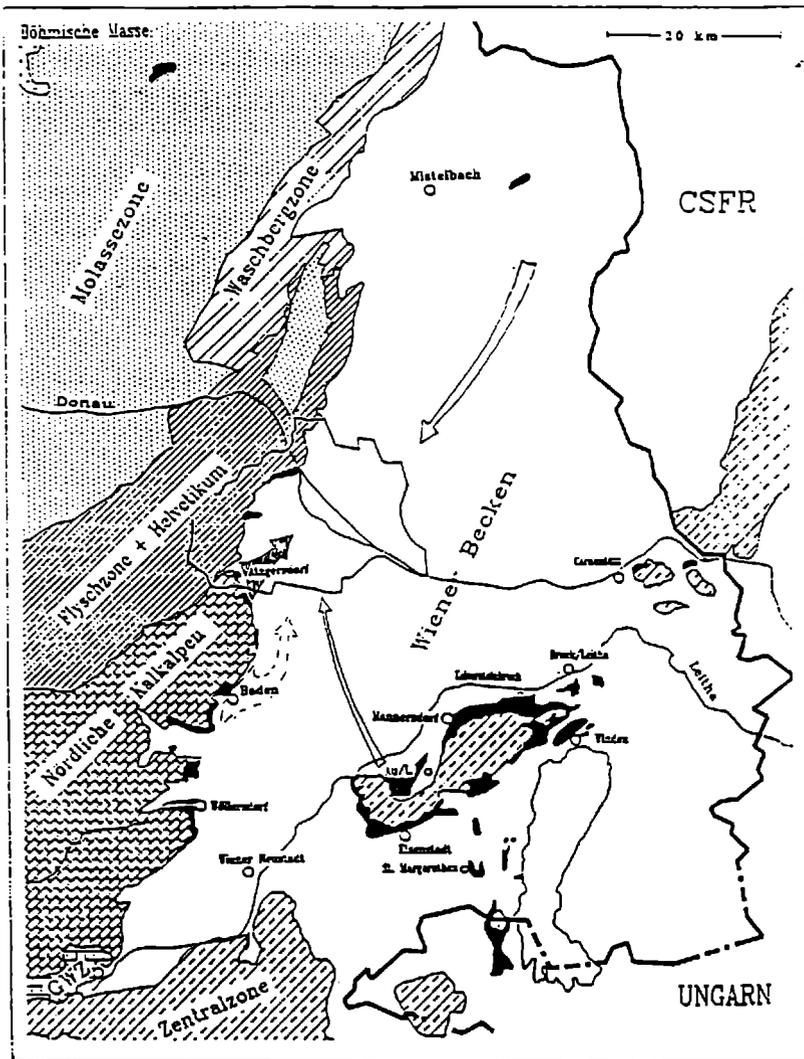


Abb. 9: Steinlieferungen nach Wien im 14. Jahrhundert

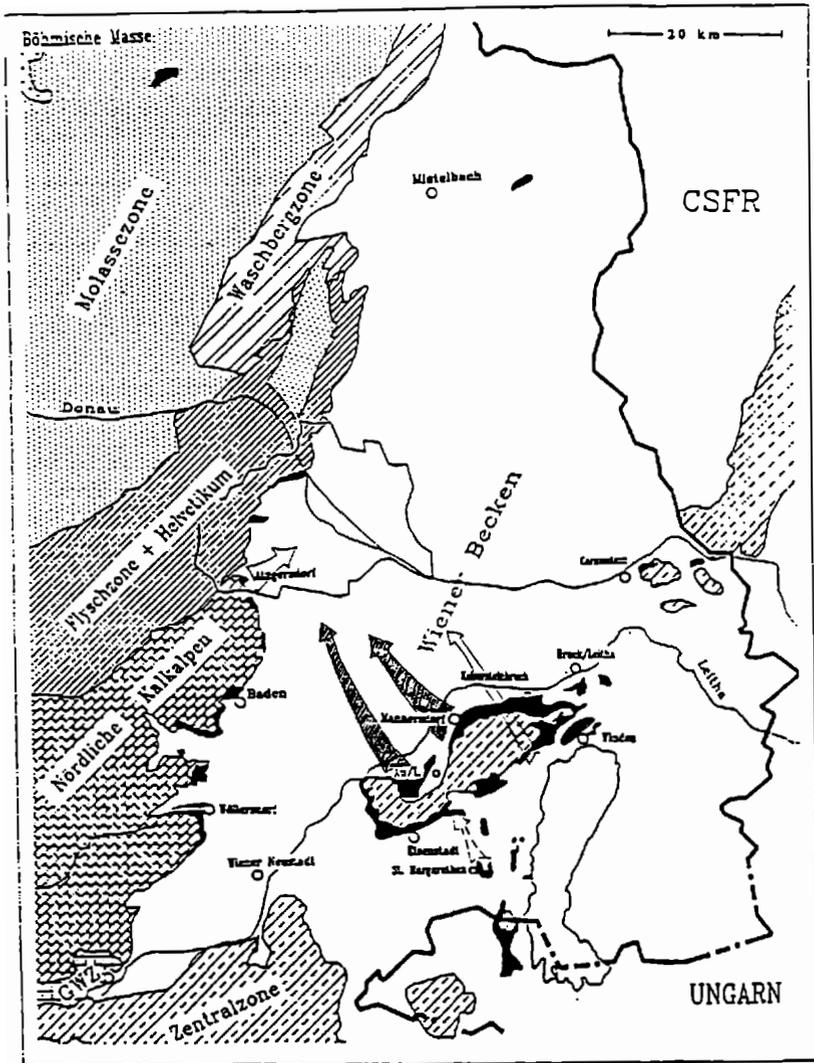


Abb. 10: Steinlieferungen nach Wien Ende 14. Anfang 15 Jahrhundert.

## 6 Literatur

BUNDESDENKMALAMT (Hrsg.; 1973): DEHIO Handbuch. Die Kunstdenkmäler Österreichs. Wien. - 6. Aufl., 218 S., 4 Übersichtskarten, Wien (Anton Schroll & Co.).

BUNDESDENKMALAMT (Hrsg.; 1976): DEHIO Handbuch. Die Kunstdenkmäler Österreichs. Niederösterreich. - 5. Aufl., 416 S., 3 Übersichtskarten, Wien (Anton Schroll & Co.).

BUNDESDENKMALAMT (Hrsg.; 1980): DEHIO Handbuch. Die Kunstdenkmäler Österreichs. Burgenland. - 2. Aufl., 346 S., Wien (Anton Schroll & Co.).

BUNDESDENKMALAMT (Hrsg.; 1990): DEHIO Handbuch. Die Kunstdenkmäler Österreichs. Niederösterreich nördlich der Donau. 1415 S., 6 Übersichtskarten, Wien (Anton Schroll & Co.).

CORRENS, C. W. (1981): Einführung in die Mineralogie. - 485 S., 391 Abb., 1 Taf., Berlin-Heidelberg-New York (Springer).

FEUCHTMÜLLER, R. & P. KODERA (1978): Der Wiener Stephansdom. - 420 S., 356 Abb., 28 Fig., Wien (Wiener Dom-Verlag).

HARL, O. (1990): Archäologische Beiträge zur Baugeschichte des Westwerkes von St. Stephan in Wien. - Österr. Zeitschrift f. Kunst und Denkmalpflege, XLIV/90, Heft 1/2, 39 - 47, Wien.

JAXTHEIMER, B. W. (1990): Die Baukunst - Stilkunde - Gotik. - 416 S., 350 Abb., Eltville am Rhein (Bechtermünz Verlag).

KALMAN, W. (1993): Photogrammetrische Aufnahme des Stephansdomes als Grundlage einer Dokumentation der petrographischen Zusammensetzung und des Verwitterungszustandes der Fassaden. unveröff. Diplomarbeit am Inst. f. Vermessungswesen und Fernerkundung d. Univ. f. Bodenkultur Wien, 51 S. Wien.

KIESLINGER A. (1930): Überblick über die Ursachen der Verwitterung an Bauwerken. - Wiener Bauhütte, 24, Wien.

KIESLINGER, A. (1932): Zerstörungen an Steinbauten, ihre Ursachen und ihre Abwehr. - Leipzig/Wien (Deuticke).

KIESLINGER, A. (1938): Zur Geschichte des Wiener Sandsteins. - Unsere Heimat N. F., 11, 151 - 200, Wien.

KIESLINGER, A. (1949): Die Steine von St. Stephan. 486 S., 207 Abb., Wien (Herold).

KIESLINGER, A. (1952): Bericht über die Führung in den Stephansdom 16. Juni 1951. - Verh. d. Geol. B.-A., 1951/C, 130 - 132, Wien.

KIESLINGER, A. (1952): Neue Forschungsergebnisse an mittelalterlichen Bauten in Wien. - Mitt. d. Ges. f. vergleichende Kunstforschung, 4, Nr. 3, 27 - 28, Wien.

KIESLINGER, A. (1953): Der Bau von St. Michael in Wien und seine Geschichte. - Jb. d. Ver. f. Geschichte d. Stadt Wien, 10, 1 - 74, Wien.

KIESLINGER, A. (1958): Gesteinskunde im Dienste der Baugeschichtsforschung. Anz. d. Österr. Akad. d. Wiss. phil.-hist. Kl., Jahrgang 1957, Nr. 25, 399 - 404, Wien.

KIESLINGER, A.(1964): Bausteine Wiens. - Mitt. d. Geol. Ges. in Wien, 57/1, 217 - 224, Wien.

KIESLINGER, A. (1964): Zur Geschichte der Steinverfrachtung auf der Donau. Österr. Ingenieur Zeitschrift (Zeitschrift des Österr. Ingenieur- und Architekten-Vereines), 8/7, 109. Jahrgang, 253 - 260, Wien.

KIESLINGER, A.(1972): Die Steine der Wiener Ringstraße. Ihre technische und künstlerische Bedeutung. - 665 S., Wiesbaden (Franz Steiner Verlag).

KIESLINGER, A.(1979): Wiener Baustoffe bis um 1600.- Restauratorenblätter, 3, Steinkonservierung und Steinrestaurierung, 26 - 107, Wien.

KRAUS, Karin (1988): Verwitterung von Naturwerksteinen. - Z. f. Bauinstandhaltung u. Denkmalpflege, 5, Jg. 11, 143 - 149, Köln.

MENTLER, A. & H.W. MÜLLER (1984): Biogene Verwitterung von Naturbausteinen an historischen Baudenkmalern in Wien. - Wiener Ber. über Naturwiss. i. d. Kunst, 1, 228 - 238, Wien.

MENTLER, A., W.E. KRUMBEIN, H.W. MÜLLER & B. SCHWAIGHOFER (1984): Mikrobiologie von Gesteinen der Hofburg und des Stephansdomes. - 4. Koll. über Steinkonservierung, 183 - 192, Münster.

MENTLER, A. (1985): Untersuchungen zur biologischen Verwitterung von Naturbausteinen im Wiener Stadtgebiet. - Diss., Inst. f. Bodenforsch. u. Baugeol. d. Univ. f. Bodenkultur Wien, 211 S., Wien.

MENTLER, A., H.W. MÜLLER & B. SCHWAIGHOFER (1985): Zur biogenen Verwitterung des Kalksandsteines am Stephansdom in Wien. Wiener Ber. über Naturwiss. i. d. Kunst, 2/3, 212 -229, Wien.

MEYER, D.E. (1992): Geowissenschaftliche Forschung auf dem Natursteinsektor. Aufgaben und Herausforderungen für ein interdisziplinäres Berufsfeld. Die Geowissenschaften. Forschung und Praxis, Organ der Alfred Wegener Stiftung, 9/10, 246 - 250, Weinheim (VCH Verlagsges.).

MORSBACH, P. (Hrsg., 1989): Der Dom zu Regensburg. Ausgrabung, Restaurierung, Forschung. - Kataloge und Schriften/Kunstsammlungen des Bistums Regensburg, 294 S., München-Zürich (Schnell & Steiner).

MÜLLER, H. W., B. SCHWAIGHOFER, W. KALMAN, F. OTTNER & W. SCHNEIDER (1990): A photogrammetric survey of St. Stephen's Cathedral in Vienna as a basis for the mapping of petrological composition and the state of weathering. - (In: P.G. MARINOS & G.C. KOUKIS (eds.): The Engineering Geology of Ancient Works, Monuments and Historical Sites. - proc. of an int. symposium organized by the greek national group of IAEG/Athens/19. - 23. September 1988), 4, 2031 - 2042, A.A. Balkema/Rotterdam/Brookfield.

MÜLLER, H. & ROHATSCH, A. (1993, in Druck): Gesteinskundliche Untersuchungen an historischen Plastiken am Beispiel der "Blanche de Valois". - Mitt. Ges. Geol. u. Bergbaustud. Österr., 39, Wien.

ROHATSCH, A. & H. W. MÜLLER (1990): Gesteinskundliche Untersuchungen und Dokumentation des Verwitterungszustandes der Fassaden des Wiener Stephansdomes. (In: H. LICHTENEGGER et al. (Hrsg.): Kulturgut - Dokumentation und Forschung.) Mitt. d. geodätischen Institute der Technischen Universität Graz, 69, 183 - 184, Graz.

ROHATSCH, A. (1991): St. Stephan - Herkunft, Petrographie und Verwitterung der Baugesteine des Albertinischen Chores. Diss. Inst. f. Bodenforsch. u. Bauecol., Univ. f. Bodenkultur Wien, 180 S., 83 Abb., 4 Tab., 6 Taf., Wien.

ROHATSCH, A. & H. W. MÜLLER (1991): Zur Herkunft der sogenannten "Flyschsandsteine" des Stephansdomes. - Mitt. Ges. Geol. Bergbaustud. Österr., 37, 119 - 125, Wien.

ROHATSCH, A. (1991): St. Stephan - Herkunft, Petrographie und Verwitterung der Baugesteine des Albertinischen Chores. - Mitt. Ges. Geol. Bergbaustud. Österr., 37, 141 - 155, 4 Abb., 1 Beil. Wien.

ROHATSCH, A. (1993, in Druck): Ökologische Aspekte bei Foraminiferenfaunen des Sarmatium aus den Randbereichen des Wiener Beckens. Mitt. Ges. Geol. u. Bergbaustud. Österr., 39, Wien.

RZIHA, F. (1989): Studien über Steinmetzzeichen. Reprint d. Orig.-Ausg. (Wien) 1883. - 57 S., 68 Taf., Wiesbaden-Berlin (Bauverlag).

SCHMELLER, A. (1965): Das Burgenland. Seine Kunstwerke, Historischen Lebens- und Siedlungsformen. - 244 S., Salzburg (Verlag St. Peter).

UHLIRZ, K. (1902): Die Rechnungen des Kirchenmeisteramtes von St. Stephan zu Wien. - Wien (Verlag Braumüller).

VITRUVIUS, P. M. (1991): Vitruvii De architectura libri decem = Zehn Bücher über Architektur. - Übers. mit Anmerk. versehen v. Curt FENSTERBUSCH, 5. Aufl., Wiss. Buchgesellschaft Darmstadt (Bibliothek klassischer Texte), Darmstadt.

WEBER, J., A. VENDL, H. PASENINGER & H. RICHARD (1984): Untersuchungen über den Einfluß von Luftschadstoffen auf die chemische Verwitterung von Naturbausteinen. - Wiener Ber. über Naturwiss. i. d. Kunst, 1, 239 - 257, Wien.

**WEBER, J. (1985/86): Der Wiener Stephansdom - Baugeschichte und Bausubstanz. Messungen zur Ermittlung des Zusammenhanges zwischen Schadstoffimmissionen und der Korrosion von Naturstein. Wiener Ber. über Naturwiss. i. d. Kunst, 2/3, 193 - 199,.**

**WINKLER, E. M. (1973): "Stone: Properties, Durability in Man's Environment". Wien/New York (Springer).**

**ZYKAN, M. (1981) Der Stephansdom. "Wiener Geschichtsbücher", 26/27, Wien/Hamburg (Paul Zsolnay).**

**ZYKAN, M. (1990): Der Westbau von St. Stephan. Zur Forschungslage und aktuellen Problematik. - Österr. Zeitschrift f. Kunst und Denkmalpflege, XLIV/90, Heft 1/2, 47 - 52, Wien.**

**Autor: Mag.Dr. Andreas Rohatsch  
Institut für Geologie  
TU-Wien  
Karlsplatz 13  
1040 Wien**



# Massenbewegungen - Standsicherheitsprobleme ober und unter Tage

Univ.Doz.Dipl.Ing.Dr. R.Poisel

Massenbewegungen sind ein Thema, das zwangsläufig an Aktualität gewinnen wird, weil wir auf unserer Suche nach Raum für Siedlungen, Verkehrswege, wasserwirtschaftliche Maßnahmen usw. mehr und mehr in Bereiche vorstoßen, die früher aus guten Gründen gemieden wurden. Einer der Gründe, warum in bestimmten Bereichen früher nicht gebaut wurde, sind Massenbewegungen, also gravitative Ausgleichsbewegungen übersteilter Talflanken, ausgelöst durch den Tiefenschurf des Wassers oder des Eises. Das Referat behandelt Auswirkungen von Massenbewegungen ober und unter Tage.

## STANDSICHERHEITSPROBLEME OBER TAGE

Standsicherheitsprobleme ober Tage in Zusammenhang mit Massenbewegungen sollen am Beispiel von Systemen demonstriert werden, bei denen harte, spröde Felsmassen auf einem weichen, fließenden Sockel liegen. Im Fall des Reißkofels (Kärntner Gältal, Abb.1) besteht der nachgiebige (inkompetente) Sockel aus diaphthoritischem Kristallin (tektonisch stark beanspruchte Glimmerschiefer), permoskythischen Sandsteinen sowie Werfener Schichten (Schiefertone und Sandsteine). Der harte (kompetente) Teil des Systems besteht aus Muschelkalk an der Basis, Partnach-Plattenkalken und darüber mächtigen Wettersteinkalken.

Die Südflanke des Reißkofels ist von Massenbewegungen geprägt, bei denen sich Großluftkörper der spröden Felsmassen mit einer Kubatur von mehreren Millionen Kubikmetern zufolge des Nachgebens der Sockelmaterialien talwärts bewegen. Beobachtungen in der Natur (z.B. in-situ-Messungen, Abb. 2), Berechnungen und Modellversuche (Abb. 3) zeigen, daß diese Großluftkörper einerseits zufolge eines Muschelbruches im Sockel abgleiten können, damit zu einer Versiegelung des Sockels führen und die Stabilitätsverhältnisse verbessern (Abb. 4).

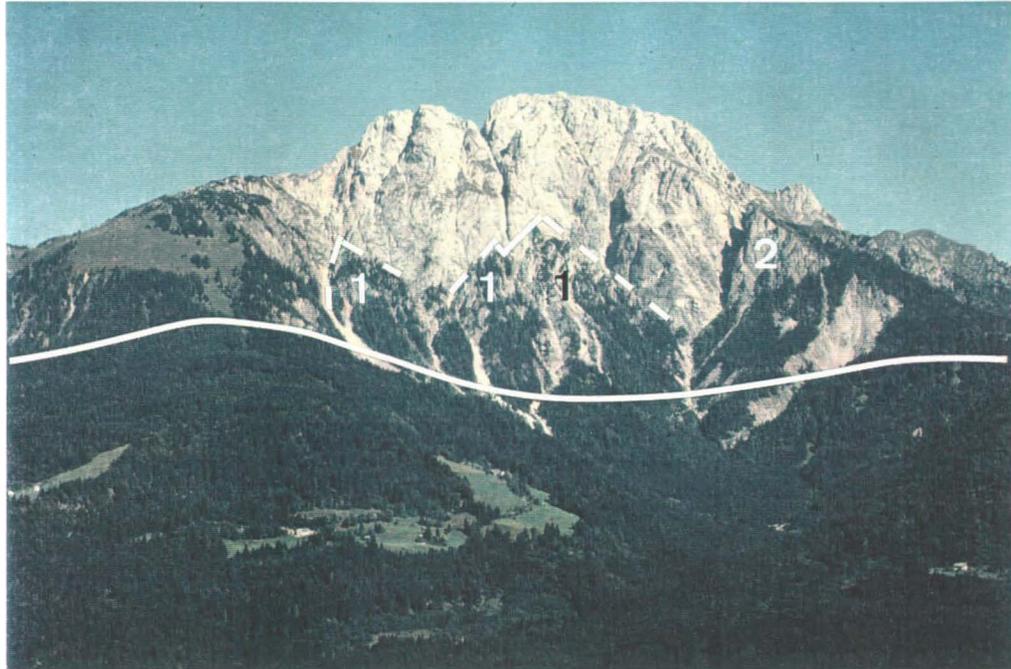


Abb.1: Reißkofel Südflanke

- Grenze zwischen kompetenten und inkompetenten Gesteinen
- 1 abgeglittene Großkluftkörper
- 2 kippender Großkluftkörper (Alplspitz)

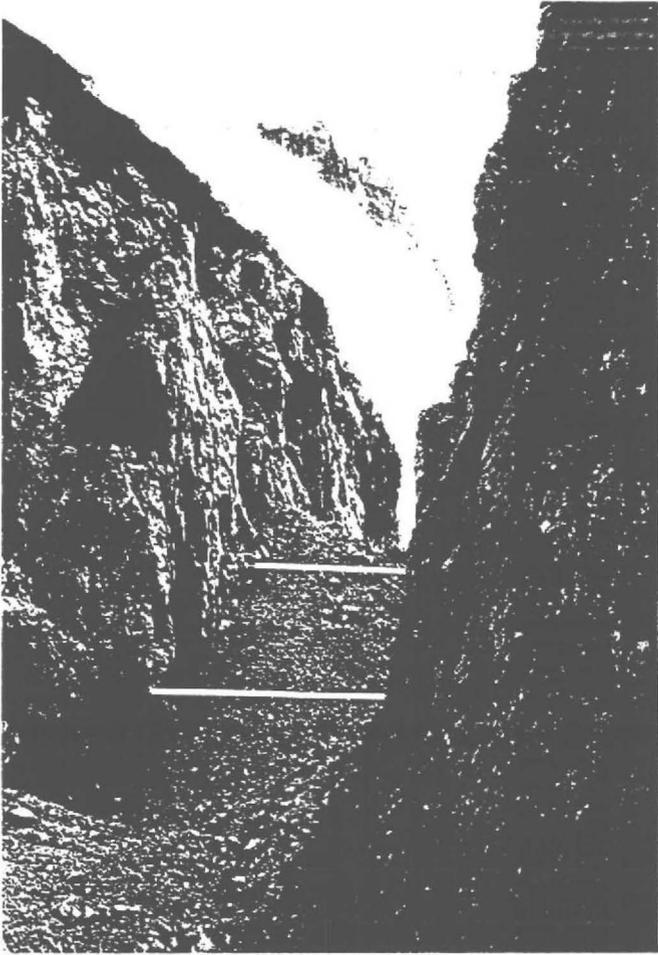
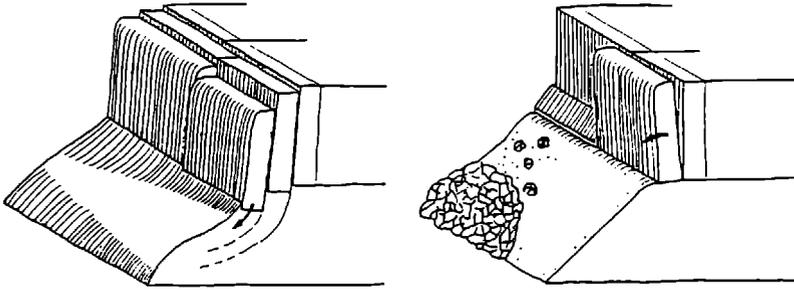


Abb.2: Großluftgasse in der Reißkofel  
Südflanke,  
rechts kippender Großluftkörper  
—— Meßstrecke



Abb.3: Modellversuch, Talwärtsskippen  
eines Großluftkörpers  
Sockel: Silikonkautschuk  
"kompetentes" Material: feuchter  
Fein- bzw. Mittelsand



**Abb.4: Bewegungsmöglichkeiten von Großkluftkörpern aus kompetentem Fels auf einem inkompetenten Sockel**

links: Abgleiten von Großkluftkörpern

rechts: Talwärtskippen eines Großkluftkörpers

Andererseits gibt es aber auch Hinweise auf das Talwärtskippen von Großkluftkörpern (Abb. 5). Dieser Mechanismus läßt in hohen Flanken große Bergstürze befürchten, d.h. er stellt eine wesentlich größere Gefahr dar als das Abgleiten. Talflanken, bei denen harter Fels auf einem weichen Sockel liegt, bedürfen daher mehr als andere einer Überwachung, wenn eine Gefahr für Menschenleben oder für Sachwerte besteht.



Abb.5: V-förmige Großkluftgasse zwischen Reibkofel - Hauptmasse und Alplspitz, die auf das Kippen hinweist

## STANDSICHERHEITSPROBLEME UNTER TAGE

Obwohl es immer wieder bei Tunnelvortrieben und auch bei in Betrieb befindlichen Tunneln Hinweise auf Standsicherheitsprobleme unter Tage in Zusammenhang mit Massenbewegungen gibt, gibt es kaum Beispiele in der Praxis, bei denen dieses Problem einer adäquaten Lösung zugeführt wurde. Ein Grund dafür ist, daß Massenbewegungen auch für manche Geologen noch immer die Ausnahme und nicht - wie in Wirklichkeit - die Regel sind. Die Natur leistet sich keine großen Sicherheiten und daher sind Massenbewegungen wesentlich häufiger als angenommen. Wenn nicht bereits im Projektstadium der Geologe auf die Gefahr einer Massenbewegung und auf die damit verbundenen Schwierigkeiten beim Vortrieb und bei der Erhaltung eines Tunnels hinweist und dieser Hinweis auch aufgegriffen wird, dann bestehen meist kaum mehr Chancen, daß es zur Suche nach Alternativen kommt (außer vielleicht hinterher). Solche Fälle werden daher die Quelle enormer Erhaltungskosten werden.

In numerischen Modellen wurde die Beanspruchung der Stützmittel von Lehnentunneln in Massenbewegungen untersucht, deren Bewegungsrichtung normal auf die Tunnelachse verläuft (Abb. 6).

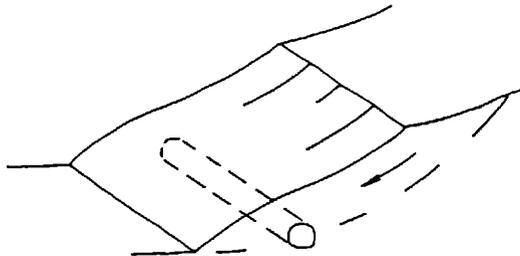


Abb.6: Lehnentunnel in einer Massenbewegung;  
Bewegungsrichtung normal auf die Tunnelachse

Abb. 7 zeigt die für einen Tunnel in einer Massenbewegung typischen Verformungen des Querschnittes zufolge der Kriechbewegungen des Gebirges.

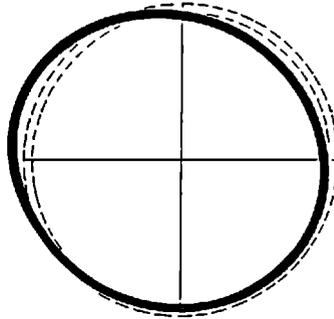


Abb.7: Zufolge Massenbewegung verformter, ursprünglich kreisförmiger Tunnelquerschnitt (Böschungfuß links)

Die daraus resultierenden Tangentialspannungen im Auskleidungsbeton, die mit der Zeit zunehmen, zeigt Abb. 8.

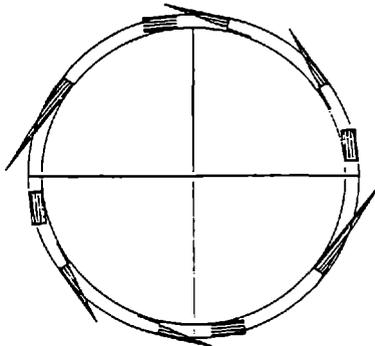


Abb.8: Tangentialspannungsverteilung im Betonausbau eines Tunnels in einer Massenbewegung  
schwarz: Zugspannungen  
schraffiert: Druckspannungen  
(Böschungfuß links)

Sie reichen von Zug- bis zu hohen Druckspannungen. Besonders charakteristisch für die Beanspruchung der Auskleidung eines Lehnentunnels in einer Massenbewegung sind positive Biegemomente im bergseitigen First- und talseitigen Sohlbereich sowie negative Biegemomente in der oberen talseitigen Ulme und in der unteren bergseitigen Ulme. Diese Beanspruchungen nehmen mit der Zeit zu. Abb. 9 zeigt aus dieser Beanspruchung resultierende Brucherscheinungen in einem Stollen der 2. Wiener Hochquellenleitung.

Positive Biegemomente haben zu Biegezugrissen, negative zu Abplatzungen und Scherbrüchen an der Leibung geführt. Dies ist ein besonders gutes Beispiel dafür, daß die Asymmetrie des Rißbildes im Auskleidungsbeton eines Tunnels ein wichtiges Unterscheidungsmerkmal zwischen Rissen zufolge betontechnologischer Mängel (z.B. Schwindrisse) und Rissen zufolge geomechanischer Schadensursachen darstellt.

Charakteristisch für die Ankerbeanspruchungen sind besonders hohe Ankerkräfte in den Ulmen und Druckbeanspruchungen der Anker in der bergseitigen Firste und der talseitigen Sohle, sofern es eine Sohlankerung gibt. Eine Sohlankerung wirkt sich jedenfalls insofern günstig aus, als sie die Extremwerte der Betonspannungen herabsetzt. Die Druckbeanspruchungen der Anker wirken sich in der Praxis dadurch aus, daß Anker in diesen Positionen in den Tunnel gedrückt bzw. Ankerplatten locker werden.

Diese ungünstigen Verformungstendenzen sowie die ungünstigen Beanspruchungen des Betonausbaues und der Anker sollten zur Suche nach Alternativen führen. Die Alternative, in einer Massenbewegung keinen Tunnel zu bauen oder die Massenbewegung zu stabilisieren, ist zweifellos die beste. Bei Verdacht auf eine Massenbewegung sind jedenfalls Investitionen in ein Drainagesystem zur Entwässerung der Talflanke oder auch nur in eine sorgfältige Ableitung der Oberflächenwässer eine außerordentlich wirtschaftliche Baumaßnahme und senken die Erhaltungskosten.

Wo eine Verlegung der Trasse oder Maßnahmen zur Stabilisierung des Hanges nicht möglich sind, bietet sich das Tieferlegen des Tunnels in Bereiche an, die von der Massenbewegung nur mehr gering oder überhaupt nicht mehr beeinflußt werden. Dort sind zwar die in situ-Spannungen höher, der Betonring wird aber wesentlich weniger auf Momente beansprucht und es fällt vor allem die Entwicklung von Zugspannungen in der Auskleidung weg.



Abb.9: Brucherscheinungen in einem Stollen der 2.Wiener Hochquellenleitung zufolge einer Massenbewegung (Böschungsfuß links) Foto: W.Eppensteiner

Im Gegensatz zur Variante, den Tunnel tiefer in den Berg zu legen, führt eine Verstärkung des Ausbaues zwangsläufig zu höheren Spannungen im Ausbau, vor allem zu höheren Zugspannungen, weil ein steiferer Ausbau Spannungen anzieht. In einer dickeren Auskleidung gibt es eine sehr rasche Entwicklung zu hohen Zugspannungen.

Einen speziell für Lehnentunnel in Sackungen gestalteten Querschnitt in Form einer geneigten Ellipse schlug z.B. IMHOF vor. In Massenbewegungen ist die Achse der größten lokalen (in bezug auf die Bewegungszone) in situ - Spannung unter etwa  $45^\circ$  gegen die Horizontale geneigt. Es wurde daher ein Querschnitt in Form einer Ellipse, deren Hauptachse unter  $45^\circ$  gegen die Horizontale geneigt ist, mit etwa demselben nutzbaren Lichtraumprofil untersucht (Abb. 10).

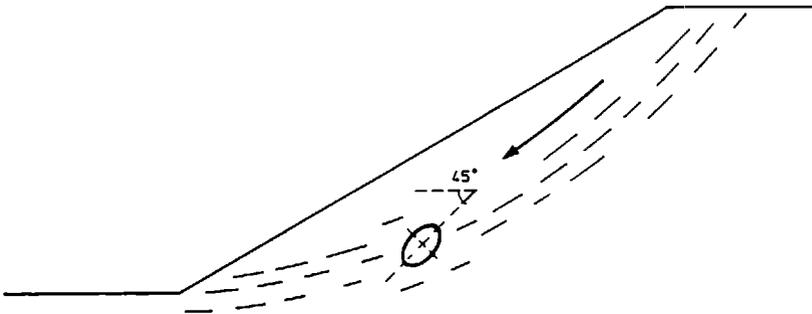


Abb.10: Alternative "ellipsenförmiger Tunnelquerschnitt in einer Massenbewegung"

Es ergab sich eine wesentlich günstigere Spannungsverteilung (vor allem keine Entwicklung von Zugspannungen) in der Auskleidung als beim Kreisprofil. Auch das Verformungsverhalten und die Verformungsgeschwindigkeiten sind beim ellipsenförmigen Querschnitt wesentlich günstiger als beim kreisförmigen. Ein gravierender Nachteil des ellipsenförmigen Querschnittes ist allerdings die wesentlich ungünstigere Beanspruchung der Auskleidung im stabilen Hang. Überlegungen in bezug auf die Trassenführung oder die konstruktive Gestaltung eines Tunnels im Zusammenhang mit einer Massenbewegung können daher nur auf der Basis von Voruntersuchungen angestellt werden, die z.B. die geologischen Verhältnisse, die Ausdehnung, die Kinematik und die Verschiebungsgeschwindigkeiten der Massenbewegung erfassen.

**Autor:** Univ.Doz.Dipl.-Ing.  
Dr.techn.R.Poisel, TU Wien  
Inst. f. Geologie  
Karlsplatz 13  
1040 Wien

# **Labor- und Geländeparameter der Schwermetallmigration in natürlichen Tonbarrieren**

**Prof.Dr.Jean-Frank Wagner**

## **Kurzfassung**

Die Migration von Schwermetallen aus verschiedenen Altablagerungen (Gichtstaub-, Erzflotationsschlamm- und Sondermülldeponie) in natürliche Tonbarrieren wurde sowohl in Labor- als auch in Geländeuntersuchungen studiert.

Die Größe der Sorptionskapazität und die Art bzw. Stärke der Schwermetallfestlegung wird in den Laboruntersuchungen (Batch-, Diffusions- und Perkolationsversuche), neben verschiedenen Versuchsbedingungen wie Feststoff/Lösungs-Verhältnis, pH/Eh-Einstellung, Lösungsmittel, Temperatur, etc., in erster Linie vom pH des Tones, der Schwermetallkonzentration des Sickerwassers und der Kontaktzeit zwischen Festphase und Schwermetalllösung gesteuert.

Die Geländestudien zeigen eine generell sehr hohe Retardation der Schwermetalle in Tonen und Tongesteinen. Unter natürlichen Bedingungen liegt die maximale Eindringtiefe der Schwermetalle nach einigen Jahrzehnten bei nur wenigen cm.

## **1. LABORUNTERSUCHUNGEN**

Laboruntersuchungen dienen in erster Linie der Ermittlung der Sorptionskapazität bzw. der Schadstoffretardation (Batch-, Diffusions- und Perkolationsversuch), der mittleren Porenwassergeschwindigkeit (Perkolationsversuch) und der Tortuosität (Diffusionsversuch).

## 1.1. Schüttelversuche (Batch)

Zur Ableitung einer mathematischen Beziehung zwischen den Konzentrationen der gelösten und der sorbierten Phase (Verteilungskoeffizient  $K_d$ ), werden Sorptionsversuche durchgeführt. Diese Beziehung, welche ganz allgemein das Sorptionsverhalten beschreibt, läßt sich durch Adsorptionsisothermen darstellen. Für die Ermittlung von Adsorptionsisothermen wurden Schwermetalllösungen unterschiedlicher Konzentrationen mit dem Tonmaterial in Suspension gebracht und in einem abgeschlossenen Gefäß (Zentrifugenröhrchen) geschüttelt (Schüttel- bzw. "Batch"-Versuch). Sofern sich bei der gewählten Schütteldauer ein Verteilungsgleichgewicht zwischen fester und flüssiger Phase einstellen kann, wird die maximale Sorptionsfähigkeit des Tons gegenüber dem verwendeten Schwermetall bestimmt. Dabei spielen folgende Einflußgrößen eine wichtige Rolle:

- \* verschiedene Gesteinsparameter (z.B. Mineralogie, Korngrößenverteilung)
- \* Schwermetallkonzentration der Angebotslösung
- \* Ton/Lösungs-Verhältnis
- \* pH-Wert
- \* Lösungsmittel
- \* Schütteldauer (Kontaktzeit)
- \* Temperatur, etc.

Eine fehlende Berücksichtigung dieser Parameter bei Modellrechnungen zur Schadstoffmigration führt zwangsläufig zu falschen Ergebnissen. Um die Vergleichbarkeit von ermittelten Verteilungsgleichgewichten zu gewährleisten, müssen daher immer die gewählten Versuchs-Rahmenbedingungen angegeben werden.

Mit einigen Tonproben wurden Versuche mit einem konditionierten, sogenannten "Tonwasser" gefahren, das durch Schütteln des Tonmaterials mit destilliertem Wasser bei einem hohen Ton/Lösungs-Verhältnis gewonnen wurde, und in seiner Zusammensetzung einem natürlichen Porenwasser sicher näher kommt als aqua dest. In Abb. 1 sind Versuchsergebnisse mit diesem konditionierten Lösungsmittel dargestellt. Es ist zwar ein Unterschied in der Steigung der Adsorptionsisotherme für Schüttelversuche mit Tonwasser gegenüber denen mit aqua dest. festzustellen, es ergibt sich hieraus aber kein eindeutiger Trend, da die Adsorptionsisotherme mit Tonwasser bei Zink steiler, bei Cadmium flacher ist als diejenige mit aqua dest. Eine etwas niedrigere Sorption bei Verwendung von Tonwasser wie dies z.B. für Zink bei niedrigen Konzentrationen bzw. Cadmium bei höheren Konzentrationen gemessen

wurde (Abb. 1), läßt sich damit erklären, daß in diesen Konzentrationsbereichen durch die Bildung von löslichen Metallkomplexen möglicherweise mehr Cadmium bzw. Zink in Lösung gehalten wird. Eine höhere Sorption, wie sie z.B. für Zink bei hohen Konzentrationen vorliegt, deutet auf durch Anwesenheit von Fremdionen ausgelöste Oberflächenfällungen hin.

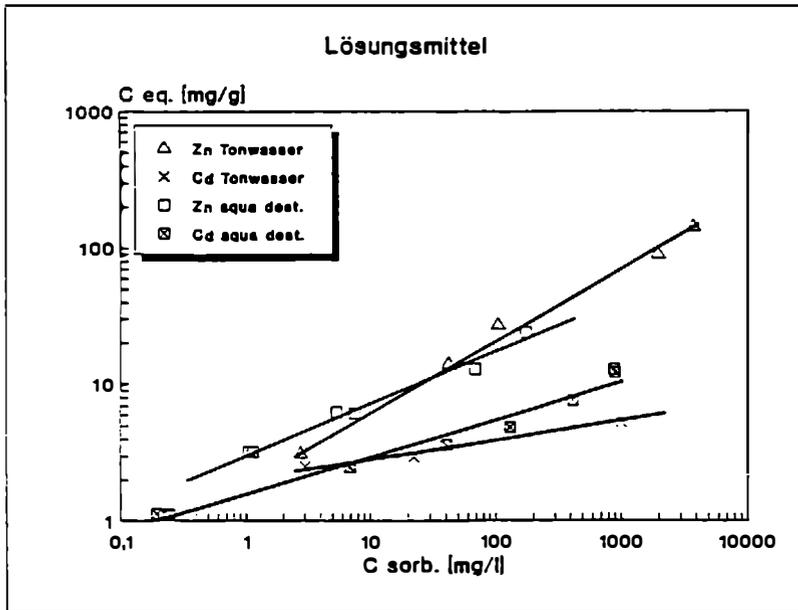


Abb.1: Sorptionsisothermen mit verschiedenen Lösungsmittel für einen kaolinitischen Tonmergel CKQ (Batchlösung mit "Tonwasser" und aqua dest.; aus WAGNER 1992).

Die zeitliche Einstellung eines Verteilungsgleichgewichtes hängt sehr stark von der ablaufenden Reaktionskinetik ab. Einige Versuche zeigen, daß der Verteilungskoeffizient ( $K_d$ -Wert) in den ersten Sekunden bzw. Minuten nach Kontakt der Schwermetallösung mit der Tonprobe zunächst rasch ansteigt, dann stark abflacht, aber trotzdem weiterhin einen Anstieg zeigt, der u.U. noch mehrere Tage,

Wochen und länger anhalten kann. Dieser zeitliche Sorptionsverlauf weist auf mindestens zwei unterschiedliche Sorptionsmechanismen hin. Der steile Anstieg zu Beginn der Versuche kann als eine schnelle Adsorption der Kationen an äußeren Tonmineraloberflächen (unspezifische Adsorption) interpretiert werden, während der flachere Verlauf der Kurve einer langsamen Diffusion der Kationen in die Zwischenschichträume von quellbaren Tonmineralen oder einem Einbau in das Kristallgitter entspricht.

Zeigt die Darstellung der sorbierten Schwermetallmenge in Abhängigkeit von der Quadratwurzel der Versuchszeit einen linearen Verlauf, so weist das auf Diffusionsprozesse hin. Für den illitisch-smektitischen Tonmergel CQI erkennt man bei obiger Darstellungsform in Abb. 2 zwei lineare Abschnitte mit unterschiedlicher Steigung.

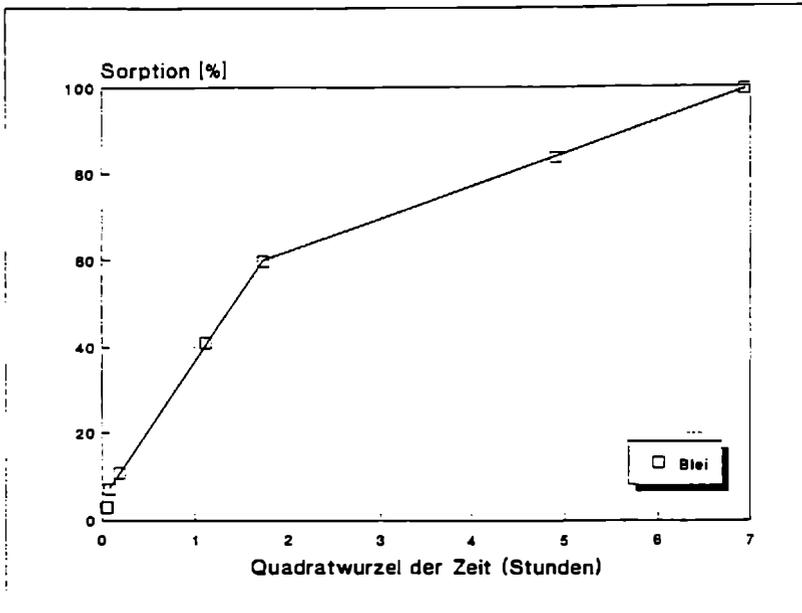


Abb.2: Beziehung zwischen dem adsorbierten Schwermetallanteil (in %) und der Quadratwurzel der Reaktionszeit für einen illitisch-smektitischen tonmergel CQI (Ton/Lösungsverhältnis = 1/1000;  $C_0 = 621$  ppm Pb; nach Daten aus ROEHL 1990).

Nach Versuchsende wurden zur Bestimmung der Bindungsstärke der festgelegten Schwermetalle 5 verschiedene Extraktionsschritte durchgeführt. Abb. 3 zeigt die unterschiedlichen Bindungsformen der Schwermetalle Cd, Cr, Pb und Zn in einem illitisch-kaolinitischen Ton und einem kaolinitischen Mergel bei relativ hoher Ausgangskonzentration ( $10^{-2}$  M).

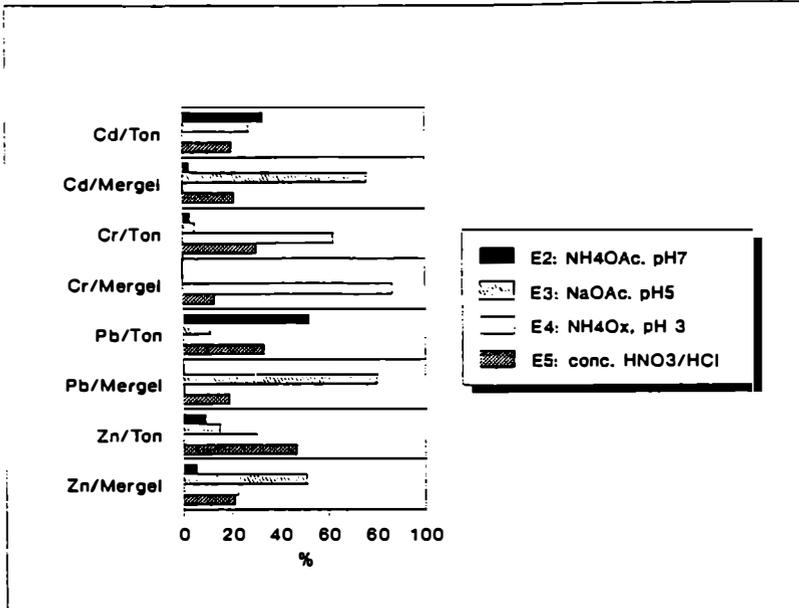


Abb.3: Bindungsformen an einem illitisch - kaolinitischen Ton (IKQ) und einem kaolinitischen Tonmergel (CKQ) nach einem Batchversuch ( $C_0 = 10^{-2}$  M; Ton/Lösungsverhältnis = 1/10; aus WAGNER 1992).

Chrom wird deutlich stärker festgelegt als die anderen Schwermetalle. Es überwiegt sowohl beim Ton als auch beim Mergel eine Festlegung in einer leicht bis mäßig reduzierbaren Form. Die leichter extrahierbaren Formen (austauschbar und karbonatisch) treten bei Cr stark zurück, während diese vor allem bei Cd und Pb die Hauptbindungsformen darstellen. Außerdem ist festzustellen, daß die Bindungsform

am Mergel generell etwas fester ist als am karbonatfreien Ton. Es überwiegt beim Mergel, wie zu erwarten, die karbonatische Bindungsform gegenüber der austauschbaren. Allerdings bedeutet die Bestimmung einer karbonatischen Bindungsform nicht unbedingt eine Festlegung an Karbonate, da diese Bindung auch in karbonatfreien Tönen auftreten kann (s. z.B. 30% für Cd/Ton in Abb. 3). Dies sagt lediglich aus, daß eine mit der Extraktionsstufe E3 freisetzbare Bindung vorliegt. Diese Feststellung gilt in ähnlicher Weise für die anderen Bindungsformen.

## 1.2. Säulenversuche (Diffusions- und Perkolationsversuche)

Zur Bestimmung der Durchlässigkeitsbeiwerte ( $k_f$ ) wurden in bestimmten Zeiträumen vor, während und nach der Durchströmung mit Schwermetallösungen die aus den Durchströmungssäulen austretenden Wassermengen gemessen. Aus dem eingestellten Druckgradienten, der Querschnittsfläche der Säule und der gemessenen Wassermenge pro Zeiteinheit läßt sich der  $k_f$ -Wert nach dem Darcy-Gesetz berechnen.

Einige ausdrücklich zur Frage der Gültigkeit des Darcy-Gesetzes bei feinkörnigen Gesteinen durchgeführte Versuche (Bestimmung des  $k_f$ -Wertes bei abnehmendem Druckgradienten  $I$ ) zeigen folgende Resultate. Bei einem kaolinitisch-smektitischen Tonmergel (CKQ), welcher bei hohen Druckgradienten einen annähernd konstanten  $k_f$ -Wert von  $10^{-9}$  m/s aufweist, tritt ein prälinearer Strömungsbereich etwa ab einem Druckgradienten kleiner 10 auf. Ein strömungsloser Bereich scheint hier nicht vorzuliegen. Bei 4 Proben eines illitisch-smektitischen Tonmergels (SQC) wurde prälineare Strömung unterhalb  $I = 25 - 75$  gemessen (Abb. 4). Hier scheint ein strömungsloser Bereich unterhalb von  $I = 15 - 40$  aufzutreten. Auch wird in Abb. 4 angedeutet, daß der kritische bzw. Übergangsgradient  $I_{krit}$ , bei welchem der lineare in den prälinearen Strömungsbereich umschwenkt, mit abnehmendem  $k_f$ -Wert ansteigt. Bei einem nahezu rein kaolinitischen Ton (KIQ) gibt es hingegen weder Anzeichen für einen prälinearen noch für einen strömungslosen Bereich. Demnach scheint auch die Art der im Ton vorliegenden Tonminerale einen wesentlichen Einfluß auf die Durchströmung zu haben (s. WAGNER 1992).

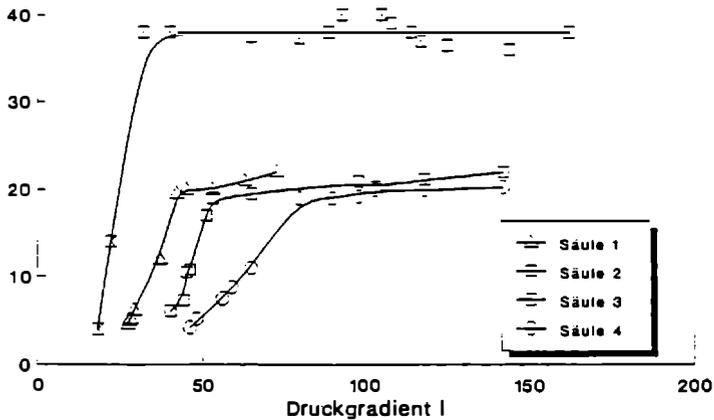


Abb.4: Durchlässigkeitsbeiwert  $k_f$  in Abhängigkeit vom Druckgradienten  $I$  für einen illitisch - smektitischen Tonmergel (SQC) (aus WAGNER 1992).

Da, wie in Abb. 4 gezeigt wird, die Durchlässigkeit in Tonen in vielen Fällen mit abnehmendem Druckgradienten abnimmt, sollte der im Durchströmungsversuch angelegte Druckgradient annähernd dem unter natürlichen Verhältnissen (z.B. in der Deponie) zu erwartenden Gefälle entsprechen.

Neben der Bestimmung des Durchlässigkeitsbeiwertes werden Säulenversuche auch zur Ermittlung der Sorptionskapazität bzw. des Retardationsfaktors  $R$ , welcher die Transportverzögerung reaktiver Stoffe gegenüber einem nicht reaktiven Stoff beschreibt, durchgeführt.

Zerlegt man eine Tonsäule nach einem Perkolationsversuch in einzelne Scheiben, so sieht man in Abb. 5 bei Blei und Zink, für welche im Perkolat ein nahezu vollständiger Durchbruch beobachtet wurde, eine mehr oder weniger vollständige Pb- bzw. Zn-Sättigung, zumindest im unteren Säulenabschnitt. Beim wesentlich langsamer eindringenden Chrom deutet sich hingegen lediglich in den obersten mm eine Sättigung an.

Abb. 5 zeigt im oberen Säulenabschnitt sehr eindrucksvoll das Konkurrenzverhalten der einzelnen Schwermetalle um die vorhandenen Adsorptionsplätze, da hier eine deutliche Desorption von Blei und in geringerem Maße auch von Zink bei gleichzeitiger Adsorption von Chrom stattfindet, d.h. ein Großteil des bereits sorbierten Bleis wird gegen das langsamere Chrom ausgetauscht.

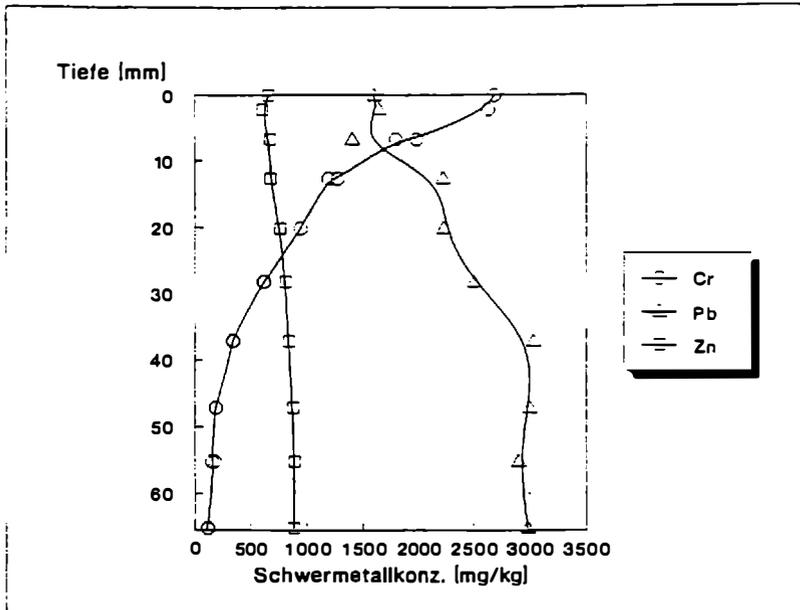


Abb.5: Schwermetallverteilung in der Tonsäule nach Ende eines Perkulationsversuchs mit Cr, Pb und Zn (Ton: KIQ; aus WAGNER 1992).

Wie die Batchversuche zur Sorptionskinetik zeigten, findet man in Tonen neben sehr schnell ablaufenden Festlegungsprozessen auch sehr langsame, zeitabhängige Vorgänge, welche erheblich länger als in normalen Laborversuchen üblich bis zur Gleichgewichtseinstellung brauchen. Daher ist auch in Perkolationsversuchen eine Abhängigkeit der Sorptionskapazität von der Kontaktzeit zu erwarten. Die Kontaktzeit hängt in Perkolationsversuchen in erster Linie von der Durchströmungsgeschwindigkeit und diese wiederum vom eingestellten Druckgradienten ab.

Einige Perkolationsversuche wurden mit einem illitisch-kaolinitischen Ton (IKQ) und Zink zur Abklärung der Abhängigkeit der Sorptionskapazität bzw. des Retardationsfaktors  $R$  von der Durchströmungsgeschwindigkeit bzw. vom Druckgradienten  $I$  durchgeführt. Abb. 6 zeigt eine deutliche Abnahme des Retardationsfaktors mit einer Zunahme des Druckgradienten.

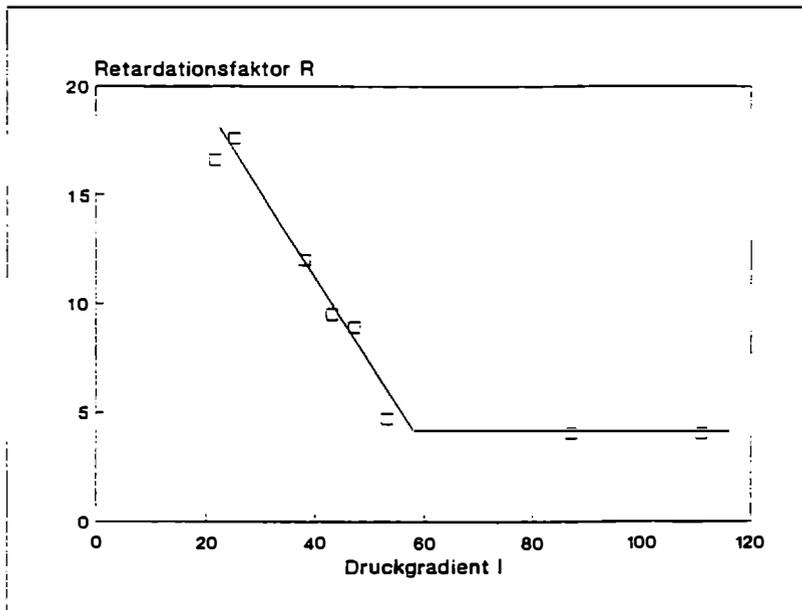


Abb.6: Beispiel für die Abhängigkeit des Retardationsfaktors  $R$  vom Druckgradienten  $I$  (Ton: IKQ; Schwermetall: Zink; aus WAGNER 1992).

Der steile Anstieg des Retardationsfaktors bei Druckgradienten kleiner 55 läßt die Vermutung zu, daß für jedes Tongestein oberhalb eines charakteristischen Druckgradienten ausschließlich schnell ablaufende Sorptionsprozesse während der Durchströmung auftreten. Eine kontinuierlich zunehmende Beteiligung von zeitabhängigen Festlegungsmechanismen (langsam ablaufende chemische Reaktionen, diffusionsgesteuerte Sorptionsprozesse, etc.) an der gemessenen Retardation findet erst unterhalb dieses Druckgradienten statt.

Der ebenfalls in den Batchversuchen nachgewiesene, starke Einfluß des pH-Wertes auf die Sorptionskapazität konnte auch in Säulenversuchen, in denen Schwermetallösungen mit verschiedenem Ausgangs-pH verwendet wurden, beobachtet werden. Abb. 7 zeigt eine Abnahme der Migrationsgeschwindigkeit bzw. eine Zunahme der Retardation mit höherem Ausgangs-pH. Eine Cäsium-Lösung migriert bei pH 3,5 schneller bzw. wird weniger stark sorbiert als bei einem pH von 6,5 bzw. 7,0.

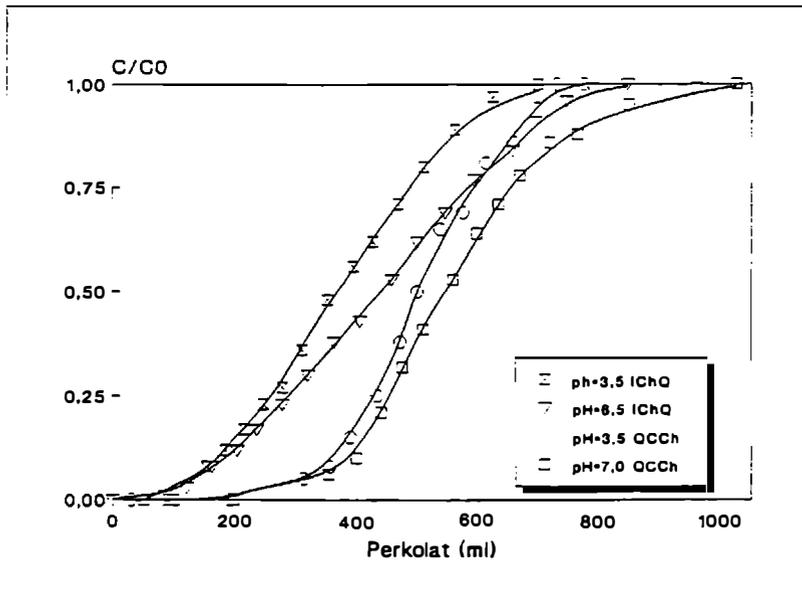


Abb.7: Abhängigkeit der Migrationsgeschwindigkeit von Cäsium vom pH-wert der Schwermetallösung (nach WAGNER & CZURDA 1990).

Ein ebenfalls wichtiger gesteinspezifischer Parameter, welcher die Stoffperkolation in Sedimenten beeinflussen kann, ist die Schichtung.

Abb. 8 zeigt die Migration von Strontium, Cäsium und Kobalt in einem illitisch-smektitischen Tonmergel. Der Durchbruch erfolgt schneller parallel ss als senkrecht dazu, da die Sorptionskapazität bei Durchströmung parallel zu den Schichtflächen, infolge der kürzeren Kontaktzeit, wesentlich niedriger ist.

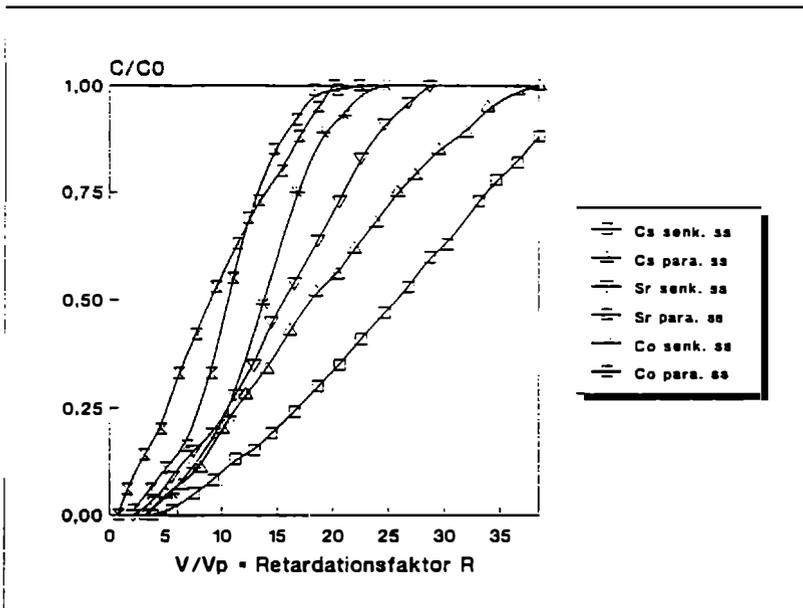


Abb.8: Abhängigkeit des Retardationsfaktors R für Cäsium, Strontium und Kobalt von der Durchströmungsrichtung (parallel bzw. senkrecht zur Schichtung) (Ton: ICS; nach WAGNER & CZURDA 1990).

## 2. GELÄNDEUNTERSUCHUNGEN

### 2.1. Gichtstaubdeponie auf verwittertem Posidonienschiefer

Abb. 9 zeigt, daß Blei und Zink sehr stark in den obersten 2-3 cm unterhalb der Ton/Deponie-grenzfläche zurückgehalten wurden. Darunter gehen die Schwermetallkonzentrationen sehr schnell zurück und erreichen bei 5-6 cm die natürlichen Belastungswerte. Bei Cadmium, dessen Meßwerte sehr stark schwanken, wurde ein ähnlicher Trend beobachtet (s. WAGNER 1991a).

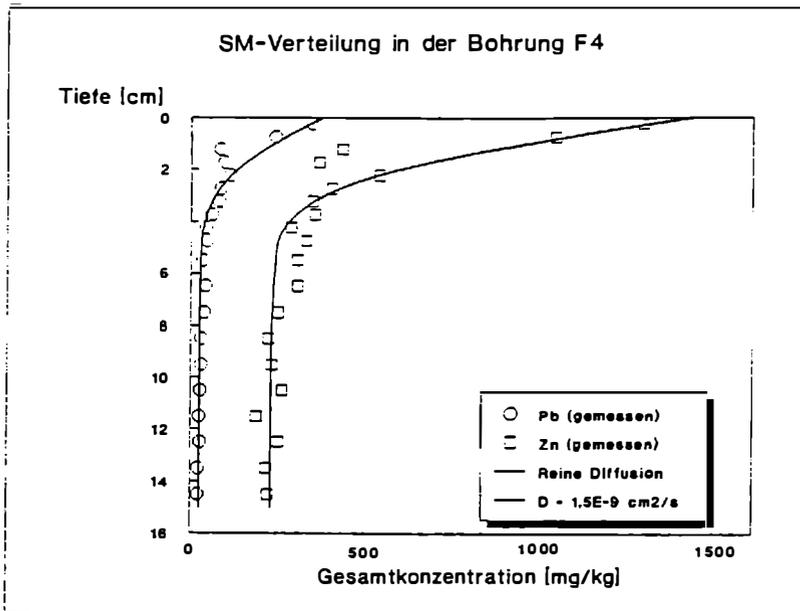


Abb.9: Blei- und Zinkkonzentration im Ton unterhalb der Gichtstaubdeponie (Kernbohrung F4), gemessen und berechnet für einen rein diffusiven Transport mit  $t = 40$  a (aus WAGNER 1991b).

## 2.2. Erzflotationsrückstände auf einem Auelehm

Dieses Untersuchungsobjekt befindet sich in Freiburg-Kappel. Es handelt es sich um das Gelände der ehemaligen Erzgrube "Schaunsland". Hier befindet sich eine Deponie aus aufgehaldeten und aufgeschwemmten Erzflotationsrückständen mit z.T. sehr hohen Schwermetallgehalten.

Eine Geländestudie über die Verteilung der Schwermetalle im Untergrund dieser Deponie in Verbindung mit einer Laborstudie (UPMEIER 1991, WAGNER 1991c) zeigte, daß Schwermetalle, welche aus der Deponie in den Untergrund austreten, in einer tonigen Auelehmschicht sehr stark zurückgehalten werden. Die Blei-, Cadmium- und Zinkverteilung unmittelbar unter den Erzflotationsteichen zeigt Abb. 10.

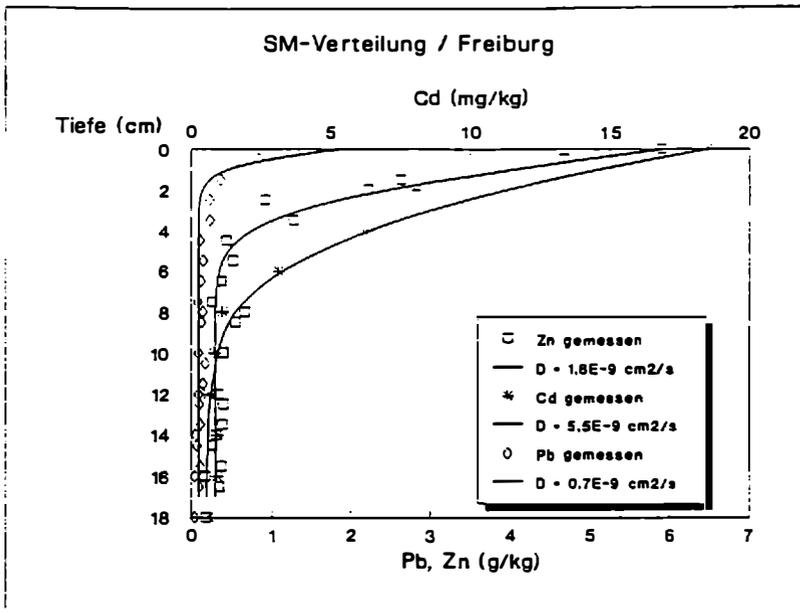
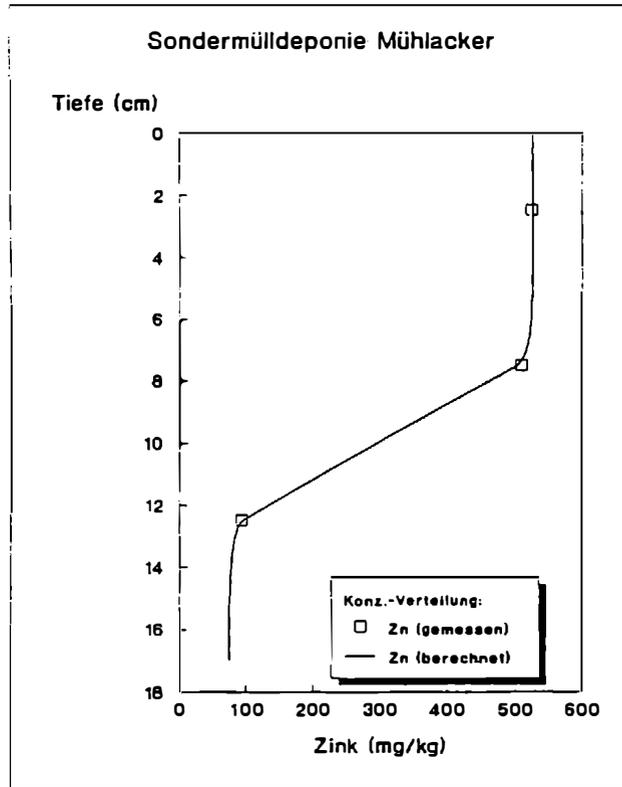


Abb.10: Schwermetallkonzentrationen im Untergrund der Flotationsteiche in Freiburg-Kappel. Berechnung der Diffusionskoeffizienten D mit einer Migrationszeit von 40 Jahren (aus WAGNER 1992).

Der Gehalt an Zink und Cadmium geht im Auelehm innerhalb der obersten 10-15 cm unterhalb der Deponiegrenze auf natürliche Untergrundkonzentrationen zurück. Blei erreicht bereits nach etwa 4 cm die natürlichen Belastungswerte. Aus den berechneten und an die Meßwerte angepaßten Kurven geht hervor, daß die Verlagerung von Zink etwa dreimal schneller bzw. tiefer erfolgte als die von Blei, und Cadmium sogar dreimal schneller in den Untergrund migrierte als Zink (Abb. 10). Die Zeit, welche den Schwermetallen zur Migration aus dem Flotationsteich in den Untergrund zur Verfügung stand, wurde zwischen 40 und 50 Jahren festgesetzt.

### 2.3. Sondermülldeponie auf Verwitterungsprodukten des Gipskeupers

Einige Bodenproben des unmittelbaren Untergrundes dieser Galvanikschlammdeponie wurden eher zufällig aus einer Greiferbohrung, welche etwa 15 cm ins Liegende hineinreichte, gewonnen. Die Verteilung von Zink im natürlichen Untergrund, einer tonig-mergeligen Verwitterungsschicht, unmittelbar unterhalb der Deponie ist in Abb. 11 dargestellt. Die Messung weiterer Schwermetalle zeigte, daß eigentlich nur Zink in den Untergrund eingedrungen war. Blei scheint hingegen nicht in den Untergrund verlagert worden zu sein, ein leichter Anstieg der Bleiwerte mit der Tiefe (wie in WAGNER 1988 und 1989 dargestellt) entspricht noch durchaus der Schwankungsbreite der natürlichen Untergrundwerte. In etwa 10 cm Tiefe geht Zink auf die natürliche Untergrundbelastung zurück. Eine Modellierung des Zinktransports unter Annahme einer Darcy-Geschwindigkeit  $v = 5 \cdot 10^{-8}$  m/s (im Labor ermittelte Gesteinsdurchlässigkeit  $k_f = 1 \cdot 10^{-8}$  m/s), eines Diffusionskoeffizienten  $D = 0,006$  m<sup>2</sup>/a, eines Verteilungskoeffizienten  $K_d = 128$  ml/g und einer Migrationszeit  $t = 20$  Jahre ergibt die ebenfalls in Abb. 11 dargestellte Verteilungskurve.



**Abb.11: Zinkkonzentration im Untergrund der Sondermülldeponie "Eckenweiher Hof" bei Mühlacker, gemessen und berechnet für einen konvektiv-diffusiven Transport ( $t = 20a$ ) (aus WAGNER 1992).**

### 3. SCHLUßFOLGERUNGEN

Die Gegenüberstellung von Labor- und Geländedaten dient der Weiterentwicklung und Eichung diverser Laborversuche, welche nicht nur als Eignungsuntersuchungen bei der Deponiestandortwahl auf oder in Tonen durchgeführt werden, sondern vor allem auch bei Altlasten eine Aussage über Notwendigkeit und Dringlichkeit einer Sanierung ermöglichen. Der Vergleich der unter Geländebedingungen und in Laborversuchen ermittelten Retardationsfaktoren ergibt, daß ein Säulenversuch ohne hydraulischen Druckgradienten (Diffusionsversuch) und mit einer im natürlichen Gesteinsverband eingebauten Probe die unter natürlichen Bedingungen ablaufenden Transport- und Festlegungsmechanismen am besten wiedergibt.

Da der Stofftransport unter Geländebedingungen in den meisten Fällen rein diffusiv erfolgte, ist zum einen die maximale Schwermetallkonzentration gegenüber den Laborversuchen stark reduziert, zum anderen liegt eine optimale Festlegung vor (s. WAGNER 1992), da auch langsam ablaufende Sorptionsprozesse (z.B. Diffusion ins Mineralinnere oder chemische Reaktionen mit langsamer Gleichgewichtseinstellung) möglich sind.

Nach den Erkenntnissen dieser Studie sind für eine Ablagerung ausschließlich schwermetallhaltiger Abfälle viele natürliche Tone und Tonböden geeignet, wenn in diesen ein matrixdominierter, vorwiegend diffusiver Stofftransport stattfindet. Die Umweltgefährdung, welche von Schwermetalldeponien auf einem solchen Untergrund mit generell hohem Sorptionsvermögen ausgeht, läßt sich durch angemessene Eignungsuntersuchungen und einfache Modellrechnungen durchaus vernünftig beurteilen.

### SCHRIFTENVERZEICHNIS

- ROEHL, K.E. (1990): Laboruntersuchungen zur Sorption von Blei und Zink an Tonen (Talauelem, Posidonienschiefer) aus dem Untergrund einer Gichtstaubdeponie. - Diplomarbeit Univ. Karlsruhe, 115 S.
- UPMEIER, M. (1991): Migration der Schwermetalle Zink, Blei und Cadmium in einem natürlichen Auelem - Vergleich von Labor und Geländestudien. - Diplomarbeit Univ. Karlsruhe, 82 S.
- WAGNER, J.-F. (1988): Migration of lead and zinc in different clay rocks. Int. Symp. Hydrogeology and safety of radioactive and industrial hazardous waste disposal / IAH, Orléans, Doc. B.R.G.M., n. 160, 617-628, Orléans.

- WAGNER, J.-F. (1989): Heavy Metal Transfer and Retention Processes in Clay Rocks. - Proc. 7<sup>th</sup> Int. Conf. Heavy Metals in the Environment, Geneva, 1, 292-295, CEP Consultants Ltd, Edinburgh.
- WAGNER, J.-F. (1991a): Transport und Festlegung von Schwermetallen in tonigen Deponiebasisabdichtungen. - In: B. SCHWAIGHOFER & H.W. MÜLLER (Hrsg.): DTTG-Tagung "Tonmineralogie und Geotechnik", Wien 1990. Mitt. Inst. Bodenforschung und Baugewologie, Reihe: Angewandte Geowissenschaften, Heft 1, 106-122, Universität für Bodenkultur, Wien.
- WAGNER, J.-F. (1991b): Retention of heavy metals from blast-furnace dedusting sludges by a clayey subsoil. - Water, Air and Soil Pollution, 57-58, 351-357.
- WAGNER, J.-F. (1991c): Disposal of Heavy Metal Sludges on Clayey Subsoils. Proc. 8<sup>th</sup> Int. Conf. Heavy Metals in the Environment, Edinburgh, 1, 387-390, CEP Consultants Ltd, Edinburgh.
- WAGNER, J.-F. (1992): Verlagerung und Festlegung von Schwermetallen in tonigen Deponieabdichtungen. Ein Vergleich von Labor- und Geländestudien. - Schr. Angew. Geol. Karlsruhe, Bd. 22, 246 p., Karlsruhe.
- WAGNER, J.-F. & CZURDA, K.A. (1990): Sorption of Radionuclides by Tertiary Clays. - Sci. Géol., Mém., 87, 149-158, Strasbourg.

**Autor:** Univ.Prof.  
Dr. Jean-Frank Wagner  
Fach Geologie  
Universität Trier  
D-54286 Trier



# PROGNOSE UND BAUDURCHFÜHRUNG DES INNTALTUNNELS AUS GEOLOGISCHER SICHT

Dr. M. Köhler & Dr. W. Leimser

## 1. ÜBERSICHT

Der 13 km lange Inntaltunnel verläuft in der Inntalterrasse südlich von Innsbruck, und verbindet das Inntal bei Baumkirchen mit dem Wipptal bei Gärberbach. Er ist Teil einer neuen leistungsfähigen Eisenbahnlinie zwischen München und Verona.

Der Inntaltunnel durchörtert den sogenannten Innsbrucker Quarzphyllit, der vor allem im östlichen Tunnelbereich von mächtigem, quartärem Lockermaterial überlagert wird.

## 2. PROGNOSE UND AUFSCHLUSSARBEITEN

Die Prognose der Gebirgsverhältnisse wurde durch die mächtige Lockermaterialbedeckung erschwert. Im Ostabschnitt des Tunnels war eine geologische und baugelogeologische Geländekartierung daher allein nicht ausreichend, den Gebirgsbau auf Tunnelniveau zu klären.

Zur Trassenfestlegung wurden 14 Kernbohrungen mit Tiefen bis 220 m abgeteuft. Dabei traten im Lockermaterial erhebliche bohrtechnische Schwierigkeiten auf, die vor allem durch grundwasserführende Schichten und Konglomeratlagen bedingt waren. Dazu kamen noch witterungsbedingte Erschwernisse hinzu, da die Bohrarbeiten in den Wintermonaten durchgeführt werden mußten.

Hauptziel dieser Aufschlußarbeiten war das Erkennen des Felsreliefs unterhalb des Lockermaterials. Um eine wirtschaftliche Durchführung des Bohrprogrammes zu gewährleisten, wurden von Beginn an die Bohrarbeiten durch geoseismische Untersuchungen ergänzt.

Als erste Aufschließungsmaßnahme wurden zunächst Nord Süd verlaufende seismische Profile durch die Fa. Geosalzburg (Interfels) aufgenommen. An vermuteten Schlüsselstellen wurden dann die ersten Tiefbohrungen abgeteuft, mit deren Hilfe die seismischen Profile geeicht werden konnten. Damit wurde es möglich, relativ rasch den großräumigen Felsverlauf erkennen zu können.

Nach Abschluß dieser ersten Erkundungsphase wurde der generelle Trassenverlauf des Tunnels festgelegt. Die weit in die Bergflanke zurückspringende Felslinie erforderte ein starkes Abrücken des Tunnels von der Talflanke gegen Süden. Der Tunnel verläuft somit rund zwei Kilometer weiter südlich als die ersten Planungen vorsahen. Damit wurde auch das ursprüngliche Konzept eines Zwischenangriffspunktes über einen Zugangstollen, der im Betrieb als Sicherheitsstollen Verwendung gefunden hätte, fallen gelassen.

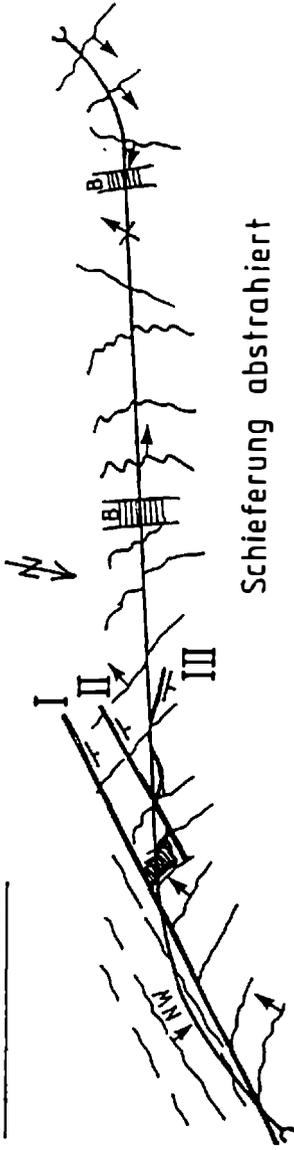
In der zweiten Erkundungsphase wurden die Bohrarbeiten und die seismischen Untersuchungen in der festgelegten Trasse verdichtet.

Der Schwerpunkt der seismischen Erkundung lag dabei im Ostabschnitt des Tunnels. Neben der reflexions- und refraktionsseismischen Methode wurden auch Bohrlochmessungen durchgeführt. Neben dem Untergrundaufbau, insbesondere der Lage der Felsoberfläche, wurden auch die seismischen Wellengeschwindigkeiten im Fels analysiert, um ein gewisses qualitatives Maß für die Beurteilung der Felsqualität zu gewinnen.

Die Ergebnisse der seismischen Erkundungen haben mit den Bohraufschlüssen sehr gut übereingestimmt. Schwierigkeiten gab es anfänglich nur bei der Interpretation von Laufzeiten im Nahbereich von steil abfallenden Felsflanken, wobei dieser Umstand in den geometrischen Schnitteffekten begründet ist.

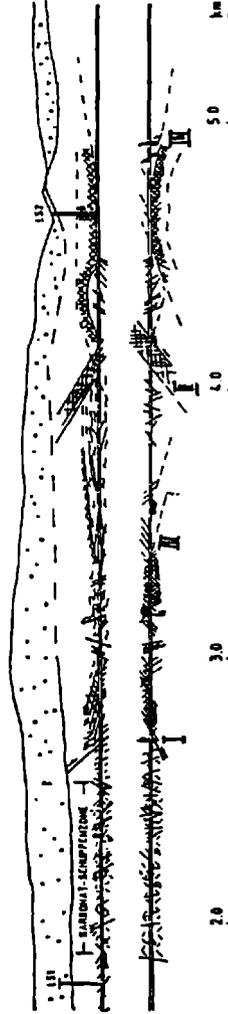
Trotz aller Erkundungsmaßnahmen war die Prognostizierbarkeit der geotechnischen Verhältnisse für den Ost- und Westabschnitt des Tunnels verschieden. Im Ostabschnitt war auf fünf Kilometer Länge die Prognose nur mittels indirekter Beobachtungsmethoden möglich. Auf diesen Umstand wurde in der geologischen Prognose mehrfach hingewiesen.

Übersichtsskizze

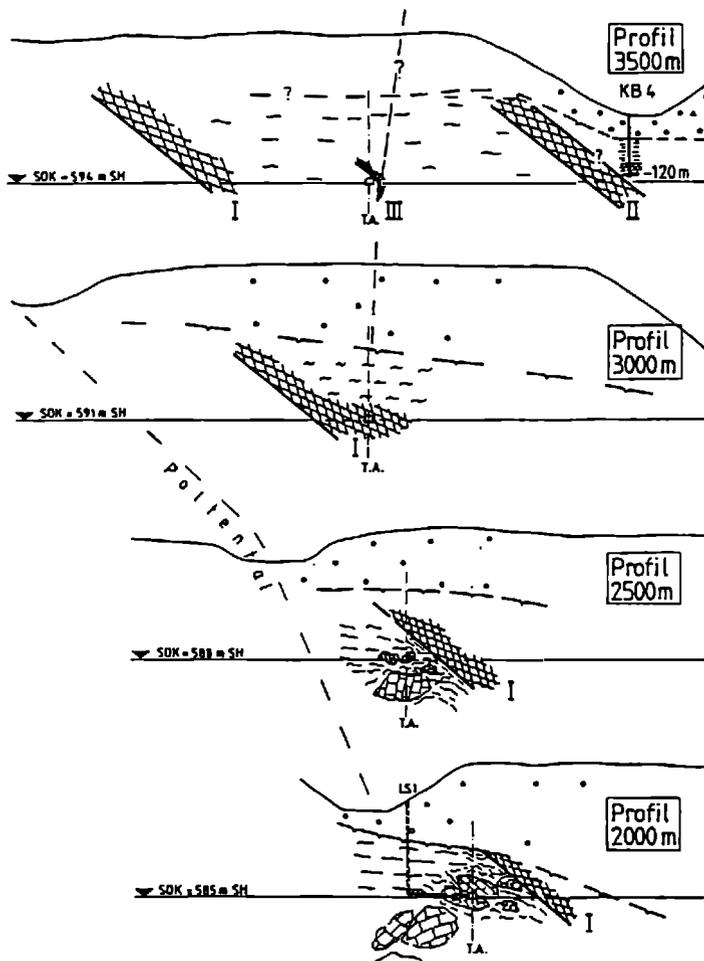


Schieferung abstrahiert

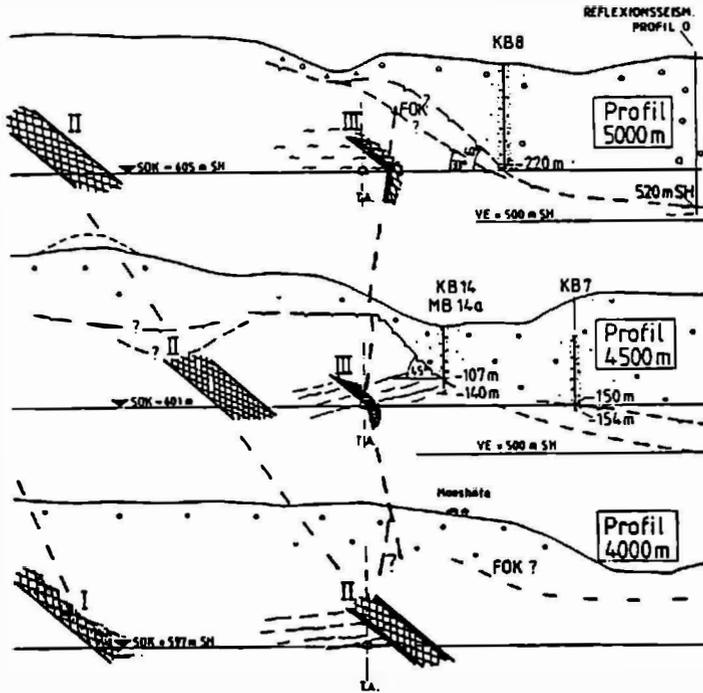
STÖRUNGSBEREICH NORD  
SCHNITT UND PLAN



# QUERPROFILE / INNTALTUNNEL - BAULOS NORD



# QUERPROFILE / INNTALTUNNEL - BAULOS NORD



### 3. BAUDURCHFÜHRUNG

#### 3.1. Lockermaterial:

Der Portalbereich Nord liegt in einem sackungsempfindlichen, ziemlich durchfeuchteten Lockergesteinbereich (Moräne).

Während des Vortriebes zeigte sich, daß ein rascher Sohlschluß erforderlich ist. Demnach wurde die Strosse in kurzem Abstand zur Kalotte und weiterhin in sehr kurzem Abstand das Sohlgewölbe eingebaut. Besonders im Sohlbereich traten stärker wasserführende Sand/Kieslagen (ausgeschwemmte Moränen) auf. Hier gab es Wasserzutritte bis zu 2 l/sec.

Im Kalottenvortrieb waren die Moränen bereichsweise sehr hart und mußten entlang des Kranzes und in den Kalottenfüßen mittels einigen Sprengladungen aufgelockert werden. Von 108 bis 178 m ist ein Teil der Moränen in der Kalotte durch eine Sandlage, die vermutlich eine Rinnenfüllung darstellt, ersetzt. Diese bis 3,0 m mächtige Sandlage erwies sich als ein schwierig zu durchörternder Bereich. Es handelte sich um einen fast einkörnigen Fein/Mittelsand, der wassergesättigt war. Hier mußte die Kalotte weiter unterteilt werden in eine obere und untere Kalotte. Der Vortrieb der oberen Kalotte erfolgte mit sogenannten "Eseln" ca. 3 Ringe vor der Gesamtkalotte. Zur Druckentlastung im Sand wurden in zwei Abschnitten bis 30 m lange Entwässerungsbohrungen mittels eines Schraubenbohrers und eingehämmerten Entwässerungsrohren durchgeführt. Bei Erfordernis wurde zuletzt auch ein Vakuumsystem angewendet. Mit Annäherung an die Felsoberfläche war die Grundmoräne wieder sehr hart, etwas verwittert und teils auch geklüftet.

Von 792 m bis 947 m ebenfalls im First wurde eine mit Moränen gefüllte Senke angetroffen. Die Füllung bestand aus stark gepreßter und harter Grundmoräne, die bereichsweise gesprengt werden mußte und daher zum Teil in einer Felsklasse (V) aufgefahren wurde. Ab 870 m traten darin schluffige und kiesige Lagen auf, die wasserführend waren. Dort mußte voraussichernd mit Dielen gearbeitet werden. Die Klassifizierung erfolgte deshalb in L II. Das Lockermaterial reichte bis etwa 1 m unter die Nivellette. Dieser Lockergesteinsbereich hatte sich durch die seismischen Erkundungen angekündigt.

### 3.2. Karbonate:

Ab Station 1100 traten erstmals Karbonatlagen schieferungsparallel in den Phylliten auf, ab 1700 m dann die ersten größeren Karbonatkörper in massigerer Ausbildung. Zwischen 1800 und 1900 m nimmt die Zerlegung des Gebirges zu, bis bei 1890 m im Sohlbereich ein großer Dolomitkörper aufsteigt und nach 1900 m das gesamte Profil ausfüllt. Von 1900 bis 2530 m erstreckt sich eine Karbonatschuppenzone. Bautechnisch erwiesen sich die ungestörten Karbonate als die günstigste Gesteinsart. Hier wurden die größten Abschlagslängen mit 4 m Abschlagstiefe und nur geringen Ausbaumaßnahmen erzielt (Gebirgsgüteklasse II).

### 3.3. Großstörung:

Ab 2680 m verschlechterte sich das Gebirge rasch. Es traten zahlreiche mylonitische Bewegungsbahnen mit größeren Mächtigkeiten auf. Die dominierende Richtung ist eine schleifend zum Tunnel verlaufende mit rd.  $45^\circ$  nach NW fallende Abschiebungsbahn, die den Tunnel bei 2720 m von rechts betritt und bei 2775 m nach links verläßt. An sie angelehnt traten bis 3 m mächtige Scher- und Kataklasithorizonte mit sehr geringem Einfallen auf. Diese flach liegenden Störungen, die ebenfalls als Abschiebungen nach NW bis NNW ausgebildet sind, erstrecken sich bis etwa 2900 m. Danach ist das Gebirge zwar in seiner Verbandsfestigkeit etwas konsolidiert, jedoch durch zahlreiche stets zersetzte Bewegungsbahnen hoch durchtrennt. Vor einer 3 m mächtigen, E-fallenden Störung (3060 m) nimmt die Zerlegung des gesamten Gebirges erneut zu. Bei 3165 m geht dieses bereits stark zerlegte Phyllitgebirge in eine völlig zertrümmerte und stark durchbewegte schwarzgraue Masse mit deutlicher Kohäsion über. Diese Zone hält bis 3280 m an. Sie ist gekennzeichnet durch das Fehlen von deutlichen und geregelten Bewegungsbahnen. Das Material ist stark durchbewegt und kleinräumig bis im m-Bereich verfaultet. Beobachtungen im Strossenausbruch ergaben keine scharfe Abgrenzung gegen das weniger gestörte Gesteins- und Gebirgsgefüge, sondern einen stufenlosen, wenn auch recht raschen Übergang in diesen Totalmylonit. Eine weitere Zone mit ersten erkennbaren Bewegungsbahnen, jedoch noch völliger Gesteinszertrümmerung reicht bis 3350 m am rechten Ulm. Danach ist das Gebirge durch zahlreiche, auch mehrere m-mächtige, verbreitet jedoch bis 20 cm starke mylonitische Bewegungsbahnen zertrennt. Das Restgefüge ist häufig verfaultet und allgemein sehr stark deformiert. Die Kernzone mit plastischer Verformung reicht somit von 3165 - 3350 m (geologische Abgrenzung).

Von 3350 3680 m ist das Gebirge gekennzeichnet durch Scharen von mylonitischen Störungen, die von 3350 - 3500 schleifend von rechts nach links und bis 3680 m von links nach rechts den Tunnel queren. Das Gebirge ist hier durchgehend stark zerlegt. Die Ursache für die hohe tektonische Beanspruchung liegt vermutlich in der geringen Entfernung der Hauptstörung vom Tunnel.

Nach 3680 bis etwa 3900 m konsolidierte sich das Gebirge zwar etwas, es ist aber nach wie vor stark zerlegt, alle Trennflächen sind schmierig, tonig-graphitisch belegt, die Phyllite sind dünnblättrig/dünnschiefrig. Die Beanspruchung hat etwas nachgelassen und die völlige Mylonitisierung oder Kataklyse sind hier ausgeblieben. Nach 3900 m nimmt die Zerlegung wieder zu und bei Station 4050 m bilden sich wieder größere Kataklysezonen aus dem Zusammenwachsen von dünneren und durch das Eindringen von rechts bis zu 2 m mächtigen Myloniten. Diese Zone, die rund 150 m dauert, zeigt in ihrem Zentrum eine echte tektonische Melange aus Quarzphyllit, Chloritphyllit und gneisigen Gesteinen mit allen Übergängen von Fels bis Feinbreccie. Das Ende dieser Zone ist ein bis 3 m mächtiger mylonitischer Kataklysit. Das Gebirge nach dieser Störung entspricht dem vor der Störung, es kommt wieder zur Durchtrennung durch Einzel- und Scharen von Scherflächen und geringmächtigen Störungen. Das Gebirge ist zumindest ein Sprengfels. Diese Zone zieht sich bis 4450 m, von wo die Zerlegung wieder zunimmt, bis bei 4500 m ein bis 5 m mächtiger Mylonit den Tunnel erreicht. Diese Störung entspricht in der Ausbildung der zuletzt genannten bei 4150 m. Sie zieht zuerst schräg über den Tunnel und erreicht bei 4560 m den linken Ulm und dreht ab dort in die Achsrichtung ein und verläßt den Tunnel bei 4700 m auf der rechten Seite wieder, tritt bei 4730 m in den Tunnel wieder ein und verläßt diesen wieder nach rechts bei 4800 m endgültig.

Die besonderen Probleme, die hier auf dieser über 2 km langen, besonders schlechten Gebirgsstrecke auftraten, sind folgende:

1. eine unregelmäßige Beanspruchung des Ausbauwiderstandes
2. verbreitet auftretende Druckerscheinungen in der Ortsbrust und im Profil
3. nachträgliche Zerstörungen des Ausbauwiderstandes
4. überbeanspruchte Anker
5. Die Erfordernis von örtlichen Lockerungspregungen trotz eines mechanisch stark zerstörten Gebirges, sehr wechselhafte Bedingungen im Ortsbrustbereich (hart/weich)

6. aus geologischer Sicht die häufige massive Brustversiegelung und -ankerung, die gleichzeitigen Arbeiten wie mechanischer Ausbruch und Brustversiegelung, sodaß häufig nur m2-weise das Gebirge zu sehen war.

Die geologische Aufnahme war vollständig von den bautechnischen Maßnahmen abhängig. Dies bedeutete die völlige Angleichung der Aufnahmetätigkeit an die Vortriebsbedingungen im Tunnel. Die Anzahl der Abschlüge pro Tag im Durchlaufbetrieb variierte von zwei bis vier. Der Zeitraum, in dem sich der Vortrieb in diesen äußerst schwierigen Verhältnissen bewegte, betrug 1 1/2 Jahre.

Obwohl sich zwischen den besonders schlechten Zonen etwas bessere Gesteinsbereiche befanden, war auch in diesen Bereichen eine systematische Brustankerung erforderlich, um dem Ausgleiten von größeren Felskeilen, die aufgrund der zahlreichen großen Trennflächen möglich waren, vorzubeugen. Ebenso mußte der Sohlschluß in möglichst kurzem Abstand hinter der Strosse erreicht werden., um die Deformationen hintanzuhalten.

#### 3.4. Aufweitung:

Im Südbaulos wurde eine Abzweigung für den späteren Brenner-Basistunnel errichtet. Die letzten 100 m vor der Aufweitung wurden in GGKL V aufgefahren, da sich ein nur wenige mdicker Felspeiler zwischen dem Haupttunnel und dem sogenannten Stichtunnel befindet. Während des Ausbruches des Stichtunnels zeigte sich im hinteren Teil ein Grünschieferkomplex, der im Haupttunnel eine starke Verfaltung bewirkte.

Der Aufweitungs- oder Abzweigungsbereich erstreckt sich von Station Süd 4566 bis 5112 m. Hier trennt sich der Tunnel in 2 Tunnelröhren, von denen die südliche das Anschlußstück an den geplanten Brennerbasistunnel und die nördliche den Anschluß an die bestehende Brennerstrecke darstellt. Dabei verändert sich der Hohlraumquerschnitt von einem Maximalquerschnitt von 325 m<sup>2</sup> bei Station 4566 m stufenweise in 5 Abschnitten bis zum Normalprofil bei 5112 m. Der Südulm geht dabei geradlinig durch, während der Nordulm stufenweise in Vortriebsrichtung in den Hohlraum hereinspringt.

Der größte Abschnitt wird mit E, der kleinste mit A bezeichnet. Der Abschnitt E ist 66 m lang, alle nachfolgenden Abschnitte D, C, B, A jeweils 120 m lang.

Wegen der großen horizontalen und vertikalen Dimensionen des Hohlraumes wurden die Vortriebsarbeiten auf mehrere, parallel verlaufende Vortriebsbereiche unterteilt. So kamen in E und D 3 Kalottenvortriebe und eine zweifach unterteilte Strosse zur Anwendung. Der Kalottenvortrieb 1A verlief entlang dem Nordulm, 1B nahm den Mittelteil um die Achse des Hohlraumes heraus, 1C lief dem Südulm entlang.

Um möglichen oder zu erwartenden größeren Deformationen entgegenwirken oder vorbeugen zu können, mußten die größeren und vor allem ungünstig gelagerten Trennflächen im Gebirge (Störungen, Scherflächen, Großklüfte) rechtzeitig erkannt und in ihrer Lage zum Hohlraum sehr genau bestimmt werden. Um dies zu ermöglichen, mußten die geologischen Aufnahmen völlig auf das bautechnische Programm mit den 3 Kalottenvortrieben abgestimmt werden. Es erfolgte mit der örtlichen Bauüberwachung eine enge Kooperation, um sofort auf auftretende Problembereiche hinweisen zu können. Die örtliche Bauüberwachung stimmte ihre Maßnahmen, im besonderen die Systemankerung und die Zusatzankerungen, gezielt auf die geologischen Daten ab.

Im Bereich 4566 bis 4770 m querten den großen Hohlraum diagonal bis schweifend 5 große Trennflächensysteme. Sie wurden fortlaufend mit 1 bis 5 nummeriert. Die ersten 3 stellen weit durchreichende Scherflächen in mäßig mylonitischer bis maximal 1,5 m mächtiger kataklastischer Ausbildung dar. Sie sind hauptsächlich glatt und etwas gebogen. Die Trennfläche 1 ist innerhalb des Quarzphyllites gelegen, die Trennflächensysteme 2 und 3 sind vorwiegend als Begrenzungen eines Grünschieferkomplexes zu Quarzphyllit ausgebildet. An ihnen haben vor allem Abschiebungen nach Süden stattgefunden.

Die Störung 4 ist eine Abschiebungszone zusätzlich mit einem dextralen Bewegungssinn. Sie grenzt den Grünschieferkörper im Süden ab von einer Zone von Quarzphyllit, Chlorit- und Biotitgneisen bis Schiefergneisen im Norden.

Sie ist maximal 6 m breit kataklastisch und innerhalb dieser Zone bis 2 m mächtig mylonitisch ausgebildet.

Die Störung 5 besitzt ebenfalls einen dextralen Bewegungssinn und fällt vermutlich nach Norden ein. Diese Zone ist maximal 10 m breit mit zahlreichen Parallelstörungen, die Kernzone ist ein 2 - 4 m mächtiger Kataklastit.

Nach der Durchörterung der Störung 5 im Grenzbereich D zu C ist das Gebirge ein normaler Quarzphyllit mit einer gleichbleibenderen Ausbildung. Es treten auch hier noch Scherzonen, teilweise mit graphitischer Gesteinsausbildung, auf. Es handelt sich

stets um Einzelbahnen oder kleinere Scharen von Scherflächen, die keine besonderen Probleme bereiteten.

Die Gebirgsgüteklasse im Aufweitungsbereich war vorwiegend die Klasse V mit Abschlagslänge 1,5 m. Sie entspricht mehr einer Ausbruchsklasse, die bei einem kleineren Querschnitt einer Klasse IV entsprochen hätte. Die Klasse V wurde bis zum Abschnitt C/B bei 4872 m durchgezogen und danach wurde auf die Klasse IV mit Abschlagslängen mit 2,20 m umgestellt. Die Sohle wurde im großen Querschnitt als eine verstärkte Sohlplatte ausgebildet.

Die Bergwasserführung war vom Beginn der Aufweitung bis zu Störung 5 gering, in der Regel mit leichtem bis mäßigem Tropfwasser. An und nach der Störung 5 traten verstärkt kleine Quellen und stärkeres Tropfwasser auf, mit Schüttmengen bis 0,1 l/sec. Die Wassertemperatur dieses Bereiches ist 12,9° C.

#### **4. AUSBLICK**

In unserem Vortrag haben wir die wichtigsten geologischen Erkenntnisse kurz beschrieben. Sie sind über den aktuellen Anlaß des Baus des Inntaltunnel hinaus auch für die Planung und den späteren Bau des Brenner-Basistunnel aufschlußreich:

- Großstörungen, wie im Inntaltunnel, werden bei einem alpenquerenden Basistunnel sicher kein Einzelfall sein.

Die neue österreichische Tunnelbauweise hat sich auch in den schwierigsten geotechnischen Gebirgsverhältnissen, wie sie im Inntaltunnel auftraten, wiederum bewährt.

Trotz Konvergenzen in der Größenordnung von 100 cm (I) wurde ein geregelter Vortriebsablauf erzielt, ohne daß es zu größeren Stillständen gekommen ist.

Bereits 1978 haben wir anläßlich der ersten Studien für den Brenner-Basistunnel darauf hingewiesen, daß bei Trassenvergleichen die Prognostizierbarkeit ein wichtiger Bewertungsfaktor ist. Der Ostabschnitt des Inntaltunnels wird auf 5 km Länge von Lockermaterial verdeckt. Er ist damit ein gutes Beispiel für einen Tunnelvortrieb "unter der Decke", wie er bei einem Basistunnel auf lange Strecken zu erwarten ist.

**Autoren:** Dr.M.Köhler &  
Dr.W.Leimser  
ILF  
Framsweg 16  
6020 Innsbruck

# HL-AG EISENBAHTUNNEL LAMBACH EIN BEISPIEL FÜR TUNNELBAU IN LOCKERGESTEINEN UNTER GERINGER ÜBERLAGERUNG - ERFAHRUNGEN BEIM BAU

.Dr.W.Fürlinger & Dr.M.Bergmalr

## 1. Einleitung

Im Zuge des Ausbaues der Eisenbahn - Hochleistungsstrecke Wien-Salzburg wurde eine Umfahrung des Marktes Lambach (ÖÖ) notwendig. Die bestehende Strecke stellt mit einer 80 km/h - Schleife um den Kalvarienberg ein "Nadelöhr" im Abschnitt Linz - Attnang Puchheim der Westbahn dar. Zur Umfahrung des Marktes Lambach entschloß man sich, eine Hochfläche NE von Lambach mit einem zweigleisigen Eisenbahntunnel zu durchörteren. Die Errichtung des neuen Strckenabschnittes mit einer Bauloslänge von ca. 3,9 km und einer Tunnellänge von 1410 m bringt eine Streckenverkürzung von ca. 300 m und eine Fahrzeitverkürzung in diesem Abschnitt der Westbahn von rund 2 Minuten. Die Überlagerung des seichtliegenden Tunnels beträgt abgesehen von den Portalbereichen maximal 35 m, die geringste Überlagerung beträgt ca. 17 m.

## 2. Geologischer Überblick

Die vom Tunnel der Umfahrung Lambach durchörterte Hochfläche wird von quartären Sedimenten aufgebaut, die auf einem tertiären Schliersockel ruhen (siehe Abb. 1). Die Schichtenfolge stellt sich folgendermaßen dar (vom Liegenden ins Hangende):

- Schlier (Vöcklaschichten, Tertiär)
- Deckenschotter (Quartär, Prä-Riß)
- Löß, bzw. Lößleim (quartär, wahrscheinlich Riß - Würm)

Bei den Deckenschottern handelt es sich um die Reste der mächtigen Schotterkörper einer alten Vereisung (Prä-Riß), die in der Art von Sanderflächen vom Rand der Vereisung ins Alpenvorland geschüttet wurden. Das Ablagerungsmilieu wurde von starken, jahreszeitlichen Schwankungen in der Wasserführung geprägt, es entspricht demjenigen von verflochtenen (verwilderten) Flüssen ("braided river enviroment").

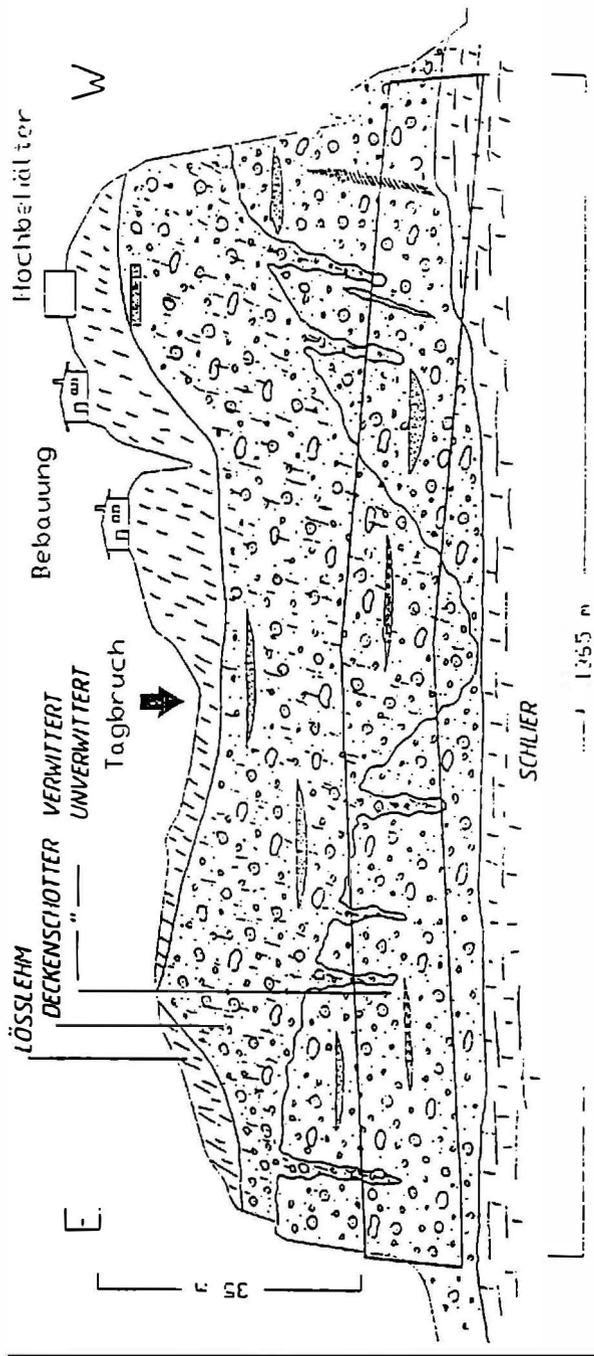


Abb.1: Geologischer Längsschnitt durch den Tunnel Lambach.  
 Stark vereinfacht und überhöht.

Im Tunnel Lambach wurden, entsprechend dem Sedimentationsmilieu, vorwiegend zum Teil steinige, sandige Kiesbänke, in Wechsellagerung mit Sandbänken und Rollkieslinsen ausgefahren.

Der Gesteinsinhalt der polymikten Kieskörper besteht überwiegend aus Quarzgeröllen mit Anteilen von Kristallingeröllen und kalkalpinen Komponenten. Untergeordnet beobachtet man Flyschgerölle.

Insbesondere die hangenden Partien der Deckenschotter sind seit ihrer Ablagerung den Einflüssen der Verwitterung ausgesetzt. Begünstigt durch die Oberflächengestalt der Deckenschotterhochfläche greift die Verwitterungsschicht in Abschnitten des Tunnels bis in den Bereich des Tunnelquerschnittes ein. Die Verwitterung äußert sich insbesondere durch eine Zunahme von entfestigten Kieskomponenten ("Geschiebeleichen"), einer damit verbundenen Steigerung des bindigen Anteils am Sediment und einer allgemeinen Abnahme der Lagerungsdichte.

Weitere, markante Verwitterungserscheinungen treten in Form von "geologischen Orgeln" auf. Es handelt sich dabei um unregelmäßig begrenzte, schlauchförmig in die Tiefe greifende Verwitterungszonen. Der Durchmesser der im Tunnelquerschnitt beobachteten Erscheinungen betrug meist 5 bis 7 m. Die Füllung dieser "Verwitterungsschlotten" besteht aus stark verwitterten, jedoch trockenem, meist sehr locker gelagerten sandigen Kiesen, die beim Tunnelvortrieb oft eine starke Neigung zum "Ausfließen" zeigten. Genetisch dürften diese Verwitterungserscheinungen in einem engen Zusammenhang mit ebenfalls beobachteten "Zerrklüften" in dicht gelagerten Deckenschottern stehen. Dabei scheinen die geologischen Orgeln insbesondere an Scharungen von Klufsystemen gebunden zu sein, die eine erhöhte Wegsamkeit für Verwitterungslösungen bilden.

### **3. Bauweise und Vortrieb**

Der bergmännisch vorgetriebene Teil des Tunnels (ca. 1320 m) wurde nach den Grundsätzen der Neuen Österreichischen Tunnelbauweise (NÖT) vorgetrieben. Der Ausbruchsquerschnitt von ca. 120 m<sup>2</sup> wurde in drei Teilquerschnitten mit vorauseilender Kalotte (ca. 100 - 180 m Vorlauf), Strosse und kurz nacheilender Sohle vorgetrieben. Der Ringschluß mit einem Spritzbetonsohlengewölbe erfolgte maximal 8 m, minimal 3 m hinter der Strossenbrust. Der Kalottenvortrieb fand im "Inselbetrieb" statt, d.h. es gab keinen halbseitigen Stossenbau und damit auch keine befahrbare Rampe um auf das Kalottenniveau zu gelangen. Die Kalotte wurde mit

einem temporären Sohlgewölbe ausgestattet, das unmittelbar hinter der Ortsbrust eingebaut wurde.

Der Ausbruch in der Kalotte erfolgte mechanisch in mehreren Teilflächen mit einem Tunnelbagger. Die Anzahl der Teilflächen richtete sich nach den Erfordernissen des Gebirges. Zur Sicherung des Ausbruchsrandes beim Kalottenvortrieb wurden vorauseilend Vorpfänddielen eingebracht. Die Abschlagslänge betrug maximal 1,2 m, im Minimum 0,8 m. In besonders kritischen Vortriebsabschnitten, wie der Unterfahrung der Ortschaft Ziegelstadt und des Hochbehälters "Mariahilf" wurde das Gebirge am Ausbruchrand durch einen HDBV Schirm (Hochdruckbodenvermörtelung) vergütet.

Zur Erfassung der Hohlraumverformung und der Oberflächensetzungen wurde ein umfangreiches geotechnisches Meßprogramm durchgeführt, dessen Kernstück die berührungslose Messung der Bewegungen der Tunnelschale darstellte.

#### 4. Geologisch bedingte Probleme beim Vortrieb

Der Vortrieb hatte besonders in der Anfangsphase mit größeren, durch das Gebirge bedingten Problem zu kämpfen, die bei weiterem Vortrieb durch eine besser angepasste Vortriebstechnik und für geologische Schwierigkeiten sensibilisierte Vortriebsmannschaft gemeistert wurden.

Grob lassen sich die geologisch bedingten Probleme beim Vortrieb in zwei Kategorien unterteilen:

- A. Durch das Sedimentationsmilieu bedingte Probleme, wie das Auftreten von Sandbänken und Rollkieslinsen ("washouts")
- B. Schwierigkeiten, die durch supergene Prozesse bedingt sind, wie "Geologische Orgeln", verwitterte Deckenschotter, die Ausbildung von Zerrklüften und eine allgemeine Auflockerung des Kornverbandes in Hangnähe.

Im allgemeinen lassen sich diese Probleme beim konventionellen Vortrieb (mit Vorpfänddielen) durch den Einsatz von gezielten Maßnahmen beherrschen:

- \* Verringerung der offenen Stützweite (Bogenabstand)
- \* Verkleinerung der Teilflächen beim Öffnen der Brust

- Verringerung des Abstandes der Vorpfänddielen bis hin zur vollflächigen Verdielung
- Verstärkung der vorseilenden Sicherung mit IBO-Spießen
- Brustverzug mit Spritzbeton, ggf. auch mit Baustahlgitter
- Einbringung von Brustspießen
- Ausschließliche Verwendung von schnellfesten Zement (z.B.: PSZ 400) bei vorseilender Sicherung, Ankerung und bei Injektionen zur Gebirgsverbesserung.

## 5. Der Tagbruch bei Stat. 645,8 m - 655,5 m

In den Abendstunden des 30.6.92 ereignete sich beim Strossenvortrieb im Tunnel Lambach ein folgenschwerer Verbruch. Dem Betrachter bot sich damals folgendes Bild: Die Tunnelröhre war auf rund 10 m Länge teilweise zerstört, praktisch der gesamte Tunnelquerschnitt von rund 120 m<sup>2</sup> war mit Verbruchmaterial gefüllt. In der vorseilenden Kalotte (Vorlauf ca. 185 m) war die dort arbeitende Vortriebsmannschaft eingeschlossen (siehe Abb.2.). Zum Glück blieben im rechten Kämpferbereich die Versorgungsleitungen für Strom, Wasser und Torkret intakt, sodaß ein Sprechkontakt und die Versorgung der eingeschlossenen Mineure hergestellt werden konnte. Obertage befand sich an der Unglücksstelle ein annähernd kreisrunder Verbruchtrichter mit einem Durchmesser von ca. 20.

Die Bergung der eingeschlossenen Mannschaften von Obertage aus wurde noch in den Nachtstunden begonnen und konnte ca. 24 Stunden nach dem Ereignis glücklich abgeschlossen werden.

Als mögliche, beim Verbruchgeschehen wirksame Faktoren können aus geologischer Sicht genannt werden:

- Der Tunnelvortrieb befand sich mit der Strosse zum Verbruchszeitpunkt in verwitterten Deckenschottern. Verwittertes Gebirge bedingt höhere Bewegungsbeträge beim Vortrieb; entfestigte Gesteinskomponenten und Verwitterungslehm beeinflussen das geomechanische Verhalten des Gebirges.
- Asymmetrisch ablaufende Verformungen indizieren zudem eine außerhalb des Tunnelquerschnittes gelegene Schwächezone im linken Kalottenfußbereich.

- Der Strossenvortrieb befand sich im Abschnitt mit der geringsten Überlagerung (ca. 17 m)
- eine Betriebsnische beeinflusste das Tunnelprofil ungünstig.

Die Sanierung des Tagbruches erfolgte durch ein Bündel von Maßnahmen, die sowohl von Obertage, als auch von Tunnel aus ansetzen. Die wesentlichen Sanierungsschritte waren:

- Herstellung einer aufgelockerten Bohrpfehlwand im Bereich des Tagbruches an der linken und rechten Ulme des Tunnels von Obertage her.
- Zusätzlich Herstellung eines Injektionsschirmes von Obertage.
- Herstellung von insgesamt 2 Rohrschirmen vom Tunnel aus, über die gesamte Länge des Verbruchs.

Als Reaktion auf das Verbruchgeschehen wurden für den weiteren Vortrieb schwerpunktmäßig folgende Maßnahmen getroffen:

- Verkürzung der Ringschlußdistanz, d.h. Verkleinerung des Abstandes zwischen Stossenbrust und Ringschluß,
- verstärkte Systemankerung
- Verstärkung der Spritzbetonschale,
- setzungsabhängige Unterfangung der Kalotte und
- Abbau der Strosse in Teilflächen.

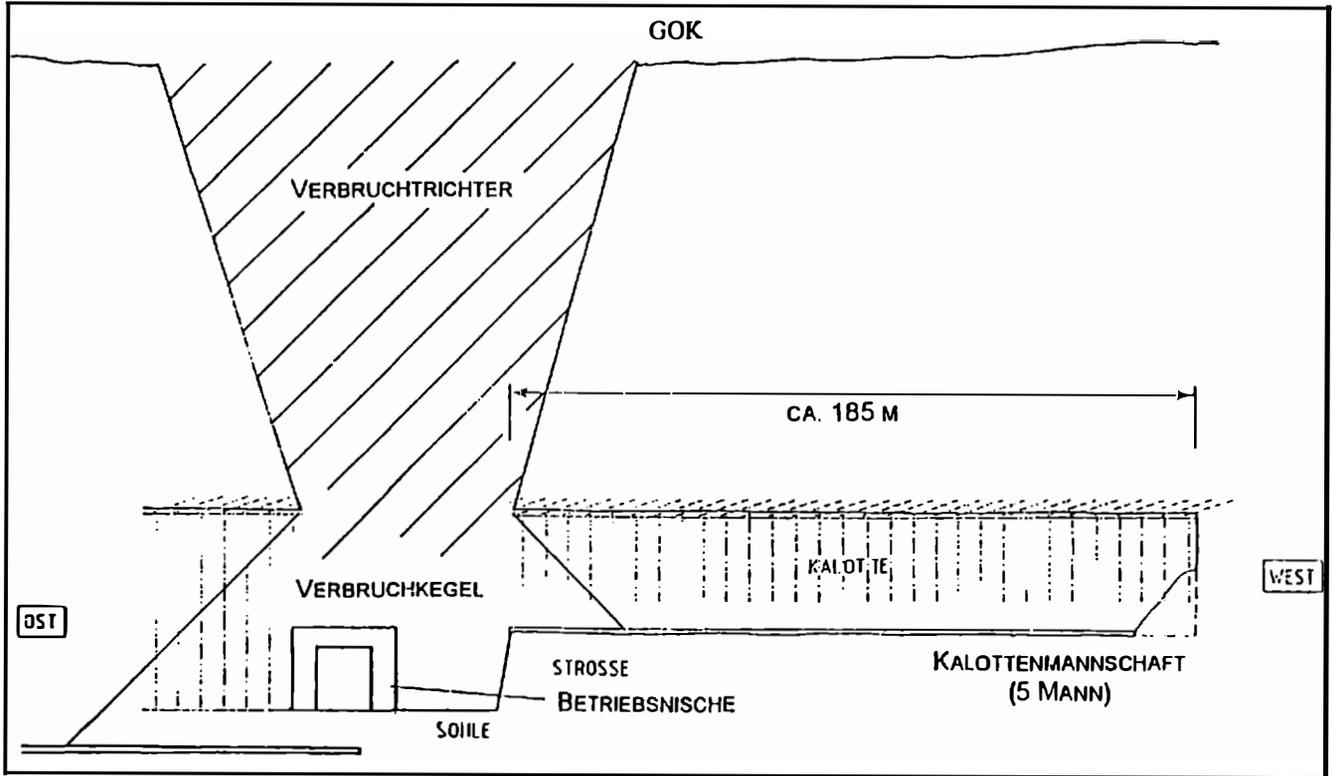


Abb.2: Vortriebsituation im Tunnel Lambach zum Verbruchzeitpunkt

## 6. Schlußfolgerungen

Gerade das für jeden Tunnelbauer schmerzliche Ereignis beim Bau des Tunnels Lambach hat deutlich vor Augen geführt, daß der Vortrieb von seichtliegenden Tunneln - insbesondere im Lockermaterial - ein Höchstmaß an Sensibilität von allen am Bau beteiligten verlangt. Jeder Aktion des Gebirges muß von dem, mit der Vortriebssteuerung befaßten Team rechtzeitig mit den richtigen tunnelbautechnischen Mitteln entgegengetreten werden.

Als Grundvoraussetzung zum Ergreifen zielführender Reaktionen muß das rechtzeitige Erkennen und Interpretieren der Vorgänge im Gebirge gelten. Um dies zu gewährleisten wird von den Verfassern die Installation eines "Regelkreises" Geologe - Geotechniker - Bautechniker vorgeschlagen (siehe Abb. 3).

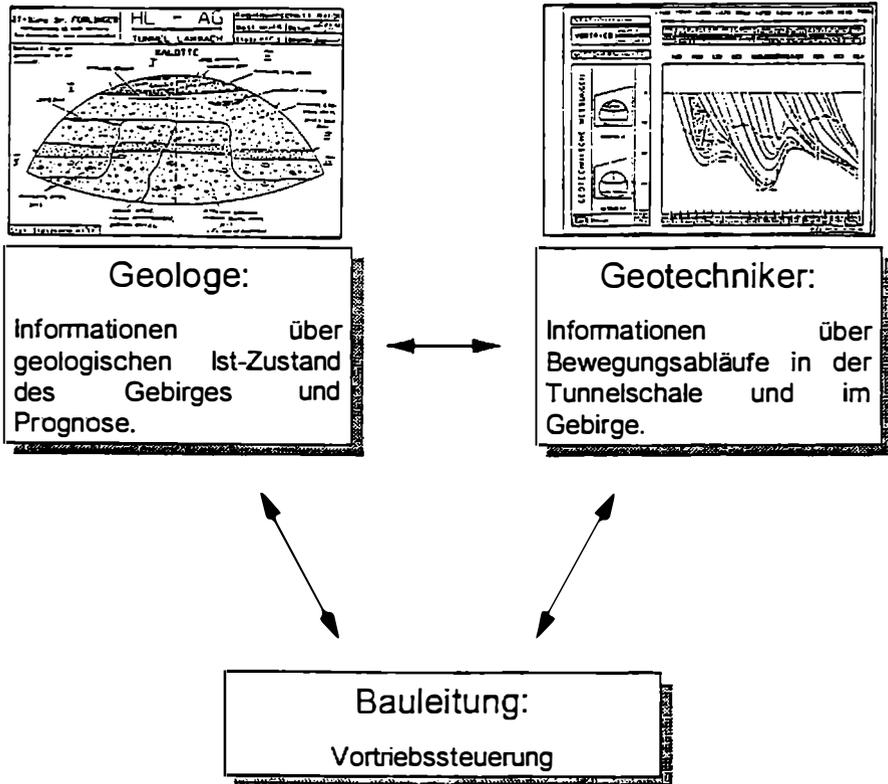


Abb.3: Der Regelkreis Geologe-Geotechniker-Bautechniker

Nur durch eine intensive, institutionalisierte Zusammenarbeit der am Regelkreis Beteiligten können die für den Tunnelbau entscheidenden Bewegungsabläufe im Gebirge richtig gedeutet werden. Mit diesem "Basiswissen" und dessen technischer Umsetzung, kann ein Vortrieb nach den Grundsätzen der NÖT auch im Lockermaterial effizient gestaltet und ein möglicher Schaden vom Tunnelbauwerk ferngehalten werden.

#### **7. Hinweis:**

Über das Verbruchgeschehen beim Bau des Tunnel Lambach aus geomechanischer Sicht wurde am 25. Mai 1993 vom Generaldirektor der HL-AG, Herrn Dr.G.M.VAVROVSKY anlässlich des L. V. RABCEWICZ SYMPOSIUM an der MONTANUNIVERSITÄT LEOBEN berichtet.

**Autoren:** Dr.W.Fürlinger &  
Dr.M Bergmair  
ZT-Büro  
Karlbauernweg 12  
5020 Salzburg



# **INJIZIEREN IM FELS**

## **Gedanken über grundlegende Zusammenhänge**

**Dipl.-Ing.Dr.mont.Gert STADLER**

**Erfolgreiche Injektionen im Fels enden mit einem hohen Verfüllungsgrad aller Klüfte, Risse und zusammenhängender Porenräume.**

**In der großen Mehrheit der Fälle wird versucht, diese Verfüllung mit Zementsuspensionen als Injektionsgut zu erreichen. Damit das auch möglichst homogen und mit dauerhafter Wirkung stattfindet, müssen diese Suspensionen**

**"leicht eindringen, weit reichen und dauerhaft verbleiben".**

**1. "Leicht eindringen" hängt u.a. von folgenden Faktoren ab:**

**der wirksamen Öffnungsweite des Risses, und Transmissivität des mit ihm verbundenen Systems von Strömungsquerschnitten,**

**- der Fließgrenze (steigend gemessen), Viskosität und Partikelgrößenverteilung in der Suspension zum Zeitpunkt der Verarbeitung (besonders: max. Teilchenabmessung, Agglomerationsneigung, Oberflächenspannung und Filterstabilität).**

**Verformbarkeit der Rißflanken, Erodierbarkeit von Kluffüllungen und Durchlässigkeitsveränderungen um den Bohrlochrand.**

**2. Hinter dem Wort "weit reichen" verbirgt sich eine ganze Liste von Parametern und Eigenschaften sowohl der Kluft als auch der Injektionsflüssigkeit und Ihrer Verarbeitung, die u.a. aus folgendem bestehen:**

- dem wirksamen Injektionsdruck;
- den wirksamen Strömungsquerschnitten - Hauptabmessungen;
- der Fließgrenze (fallend gemessen), sie bestimmt den Stagnationsgradient als Summe der benetzten Kluftoberflächen, bezogen auf die Eintrittsquerschnitte durch die Bohrlochwand und die Reichweite;
- Filterstabilität, Affinität.

**3. Und schließlich, wenn der bestmögliche Füllungsgrad erreicht ist, die Dauerhaftigkeit und Beständigkeit der Maßnahme. Sie bedarf einer gewissen**

- **Mindestdurchlässigkeit des abgebundenen Injektionsgutes, sowie**
- **Mindestfestigkeiten (einachsig, Haftzugfestigkeit, Extrusions- und Erosionswiderstände),**
- **Eluations- und Lösungswiderstände,**
- **Schwindfreiheit,**
- **Widerstand gegen Verseifung,**
- **Alterung o.ä.,**
- **unzulässiger Materialveränderung mit veränderlicher Wassersättigung.**

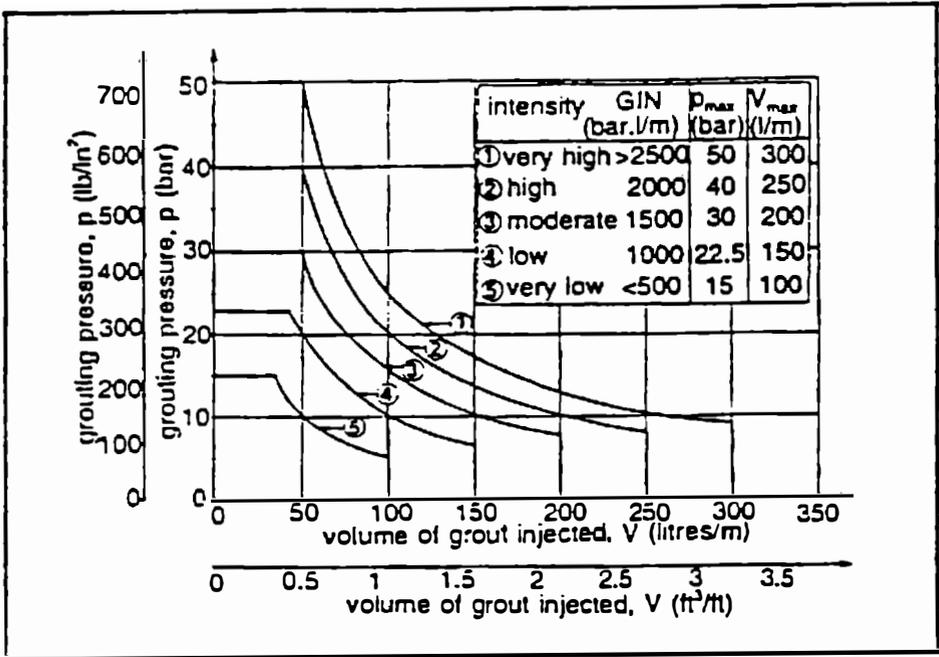
**Cambefort hat, in der Literatur der letzten 40 Jahre, früh zu einigen dieser Fragen Stellung genommen. Von ihm stammt auch nachstehende Tabelle über eine vergleichende Betrachtung von Rißweiten und ihrer Anzahl je lfm Bohrung bei gleichen Transmissivitäten, ausgedrückt in Lugeon.**

Nombre d'unités Lugeon	Longueur de la passe	Ouverture d'une fissure		
		1 fissure	10 fissures	100 fissures
100	m	mm	mm	mm
	6 3	0,484 0,385	0,225 0,178	0,106 0,083
10	6 3	0,225 0,178	0,106 0,083	0,048 0,038
	6 3	0,106 0,083	0,048 0,038	0,022 0,018

Er kommt darauf über die Anwendung der Dupuit'schen Gleichung für radiales Fließen. Einer groben Vereinfachung zwar; aber Vereinfachungen sind notwendig, wenn man mit den vielen Einflußfaktoren modellhaft in Berechnungen einsteigen will. Wesentlich sind mathematische Darstellungen für radiales Fließen vom Bohrloch weg; sieht bei modernen Autoren "äußerlich" sehr unterschiedlich aus, nämlich je nachdem welche Einflüsse berücksichtigt wurden.

Im Kern der Aussage lassen sich aber tatsächlich alle Formulierungen auf die Dupuit'sche Gleichung zurückführen. Die Vielfalt der Randbedingungen, und die Unmöglichkeit auch nur die wesentlichsten richtig zu berücksichtigen, macht es verständlich, wenn Injektionsanweisungen für die Feldpraxis eine "ganz andere Sprache" sprechen.

Auch Lombardi, beispielsweise, formuliert sein Intensitätskriterium ("GIN") ganz und gar ohne Bezug auf eine von ihm formulierte Strömungsgleichung; er geht vielmehr auf eine spezifische Energiebegrenzung je Passe über. Eine "Integrale" Lösung, die er in seinem Artikel "Grouting design and control using the GIN principle" (*Water Power & Dam Construction*, Juni 1993) eingehend beschreibt.



***Proposed limiting envelopes for grouting.***

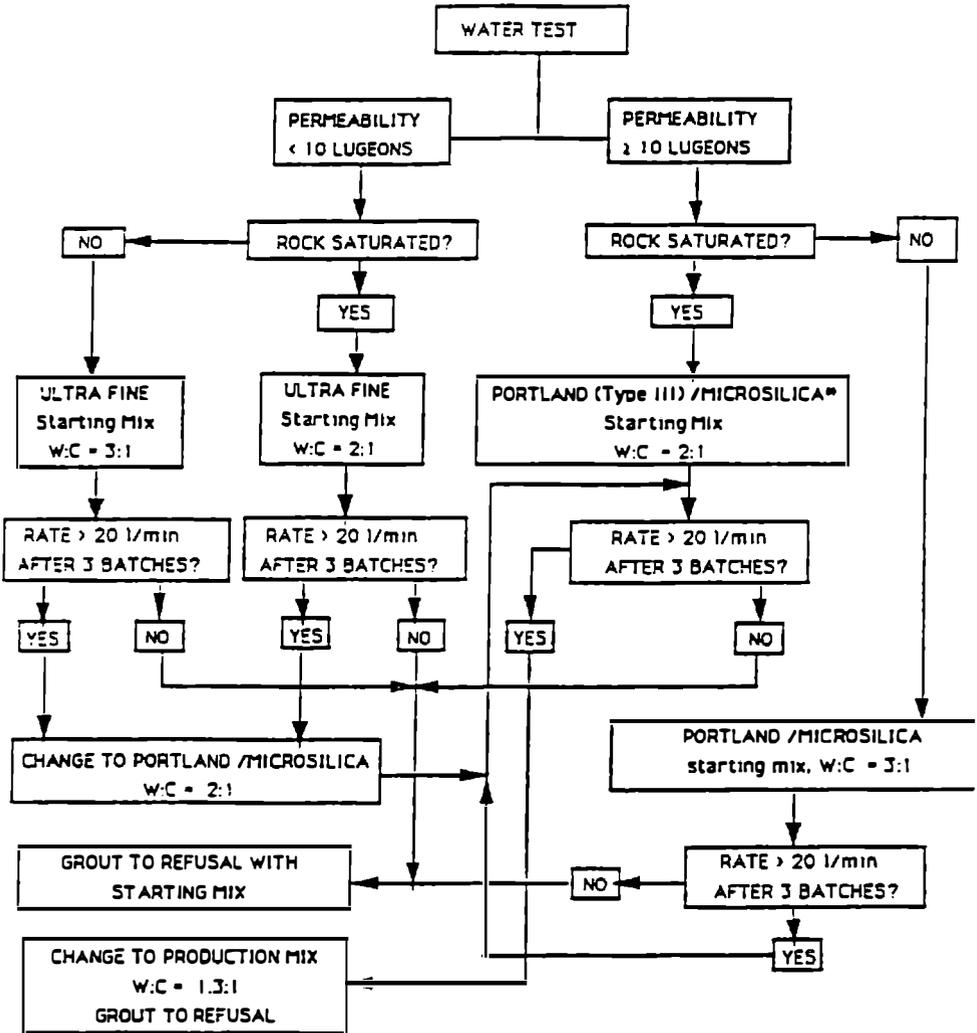
Man kann diese Lösung natürlich kritisch diskutieren, aber sie hat einen großartigen Vorteil: sie ist ihrem Grunde nach plausibel und in hohem Maße praktikabel.

Wenn man ihr noch einige quantitative Ergänzungen hinzufügt, über die Bestimmung des Injektionsdruckes, (z.B. auf dem Weg des Bohrlocheinschließens nach Stadler & Kiss), oder Injektionsgutmengen berücksichtigt, die bis zum Aufbau eines eigentlichen Injektionswiderstandes verpreßt werden, dann erhöht sich die Zielsicherheit in der Anwendung dieser Methode und die Ökonomie der Reichweiten noch um einiges mehr.

Jedenfalls ist sie eine herausragende Neuerung im Vergleich zu herkömmlichen Vorgangsweisen, wo entweder nach Lugeon-Kriterien der W/Z-Wert der Suspensionen festgelegt wird; oder nach arbiträr bestimmten Aufnahmegrenzen,

- Mischungen eingedickt werden,
- die Injektion unterbrochen wird,
- oder andere Abbruchkriterien festgelegt wurden.

Aus vielen praktischen Erfahrungen entstand in dieser Weise auch der "Mischungsfahrplan" von Weaver.



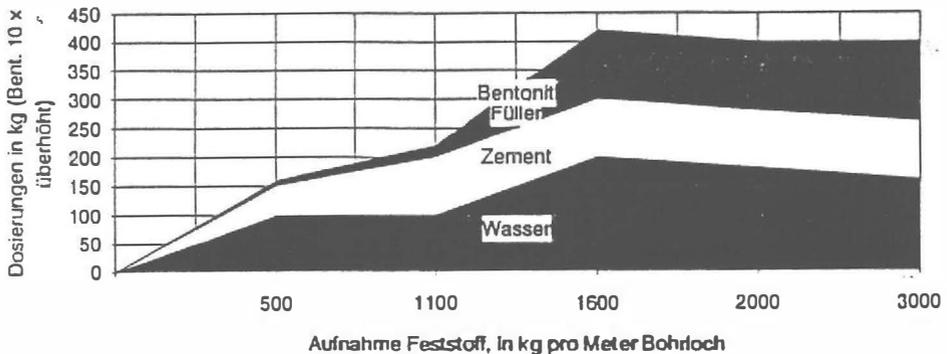
\* Microsilica in proportion of 5% by weight of cement:

Preliminary flow chart for selection of grout mixes.

Er stellt darin sehr plausible Entscheidungshilfen zur Verfügung - interessanterweise läßt er aber den Druck ganz außer Betracht.

Der Druck ist andererseits wesentlich mitverantwortlich für die Reichweite und damit den Bohrlochabstand. Er wird in der Literatur meist nur in Bezug zur Tiefe der Packerstellung gebracht, was in manchen Ländern zu Regeln wie: 1 psi/ft depth, oder 1 bar/Meter Tiefe geführt hat. Der Unterschied zwischen beiden "Daumenregeln" ist der 4-fache!, und es läßt sich leicht zeigen, daß eine der beiden Regeln zu einer mangelhaften Verfüllung oder zu zu kleinen Bohrlochabständen führen muß.

Anhand einer aktuellen Injektionsausschreibung stellt sich, als weiteres Beispiel, das Druckstufen- und Mengenprogramm wie folgt dar;



Es geht nur indirekt und in groben Vereinfachungen auf die wirksamen Querschnitte durchströmter Klüfte ein. Verformungen und die Feststellung der Grenze zwischen notwendigen und schädlichen Drücken bleibt unberücksichtigt. Diese Grenze ist für jedes Projekt aber eine höchst individuelle, wichtige Größe! Eine Verbindung von Druckverhalten und Mengenbegrenzung geben solche Anweisungen jedenfalls nicht.

Hier ist das Lombardi'sche "GIN-Prinzip" bei weitem das realistischere Konzept. In seinen Beispielen zum Injektionsverlauf innerhalb der Intensitätsgrenzlinie zeigt er, wie sich unterschiedlich offene Klüfte auf die Entwicklung der Injektion auswirken. Auch er gibt aber keine weiteren Klärungen zum, auf der Y-Achse aufgetragenen, "Injektionsdruck"; und stellt damit einen Druck, der von Anfang an hoch ist, weil die Kluft kleine Abmessungen hat, gleich mit einem Druck, der sich nach weitreichender Füllung einer mäßig weiten Kluft ergibt.

Auch die Anzahl der Klüfte bestimmt die Mengenbegrenzung nicht eindeutig mit. Das Energiekriterium in der Ein-Riß-Injektion versteht sich aber sicher anders als in einer Mehr-Riß-Injektion.

Seit der Einführung dieses "GIN"-Injektionskriteriums haben sich zum Thema "Druck" zwei interessante Neuerungen ergeben.

Der "Ansprechdruck", erstmals 1989 definiert, und in der Folge durch Feder für ÖDK in wissenschaftlichen Versuchen recherchiert, zeigt, daß herkömmliche Suspensionen und hochviskose Harze bei kleinen Kluftweiten bedeutende Eintrittsverluste überwinden müssen. Diese sind oft größer als die vorgegebene Druckbegrenzung!

Die zweite Überlegung (Stadler/Kiss) bezieht sich auf die Möglichkeit, aus der Druckentwicklung Rückschlüsse auf

- die tatsächlichen Belastungen in der Rißstruktur,
- die tatsächlichen, relativ zur Mischung herrschenden Durchlässigkeiten, und
- die tatsächlich sich entwickelnden Sättigungen zu ziehen.

Quelle für diese Information ist die "Transiente Druckanalyse" (TPA), welche aus dem Druckabfall nach einem Bohrlocheinschluß in der ersten Zeit nach Pumpenstopp abgeleitet wird.

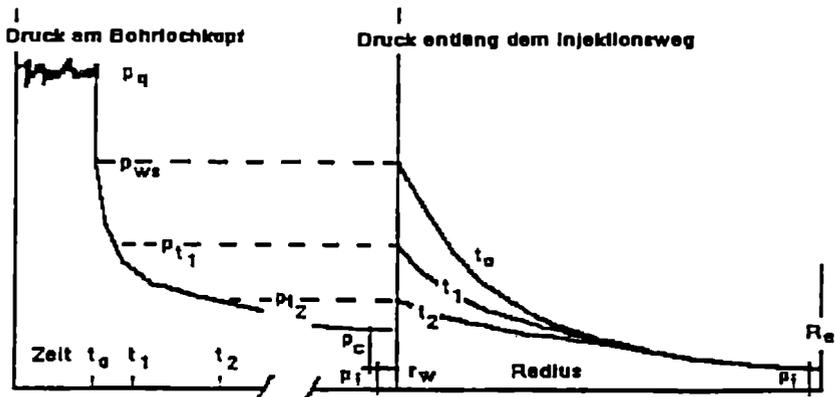
Horner hat die theoretische Grundlage für diese Interpretation schon in den 50er Jahren gelegt; wenn man sie vom porösen Medium auf geklüftete Durchlässigkeiten überträgt, erhält man qualitativ die gleiche Information über die aktuelle Transmissivität der getesteten Formation. Bezogen auf die vorangegangene Pumpzeit ist sie begrenzt auf den injektionstechnischen Einflußbereich der Bohrlochpasse. Bei genügender, zeitlicher Länge der Beaufschlagung hingegen können Informationen über die Durchlässigkeit der System-Ränder gewonnen werden.

Wenn man diese beiden Informations-Elemente auf die nach Lombardi zitierten Injektionsanweisungen "überstulpt", wird die vorgegebene Druckbegrenzung

- um Strömungs- und Eintrittsverluste entkleidet,
- Reichweiten- effektiv gemacht, und
- spiegelt plötzlich das, immer so sehr gewünschte, Bild der wahren Druckbelastung der Rißflanken wider.

Dieses neue Druckbild hat in den wenigsten Fällen zwar mit dem alten Begriff "Injektionsdruck" etwas zu tun, erhöht aber die Umsetzung von seiner Festlegung zur Wirkung ganz wesentlich.

Die rechnerische Beziehung zwischen der "Transienten Druckanalyse" und der Druckausbreitung gegen den Radius ist für den Plattenspalt theoretisch formulierbar, und stellt sich im Diagramm qualitativ wie folgt dar:



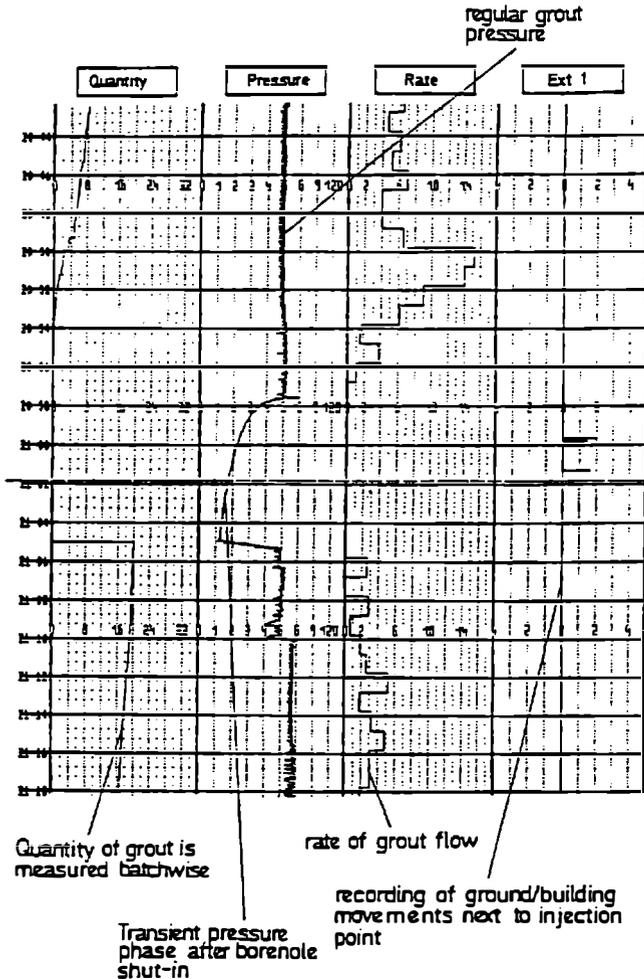
Druckabfall nach Injektionsunterbrechung,  
 gegenübergestellt dem Druckabfall über den  
 Radius der Entfernung vom Bohrloch

Die mit Kerngewinn hergestellte Injektionsbohrung liefert nach diesem Modell des "Druckföhigen Injizierens" (PSI) einerseits die Anzahl möglicher wirksamer Klüfte, andererseits über die TPA die hydraulisch wirksamen Klüftweiten.

Sie ist insoferne eine mögliche Antwort auf die Rißweitendarstellung von Cambefort; und ergänzt damit auch jedes moderne Entwurfs-, Kontroll- und Steuerkriterium für Injektionen.

Cambefort hat ja damals einfach nur die Dupuit'sche Gleichung mit einem Gradient von 0,1 auf die angenommene Rißanzahl angewendet, um zu zeigen, wie sensibel das "cubic law" auf die Weite der Risse reagiert.

Moderne, EDV-unterstützte Injektions-Prozeßkontrolle erweitert den Informationswert über die Abläufe wesentlich (AIDEK, Kölnbrein), und macht die zitierten Analysen für das "Druckföhliche Injizieren" erst möglich.



## ZUSAMMENFASSUNG:

Eine Übersicht über den Stand der Technik, gespiegelt in Injektionsanweisungen zu aktuellen Projekten, zeigt, daß Weaver's "Fahrplan", Lombardi's "GIN-Prinzip" und das hier vorgestellte "Druckfähige Injizieren" neuartige Optimierungen zulassen.

Der Stand des Wissens über Injektionen hat sich in den letzten zehn Jahren offenbar verdichtet. Praxisnahe Forschung hat den Schleier um die "Kunst" des Injizierens etwas gelüftet.

Die Phantasie im Modellieren ist aber nach wie vor gefragtes Instrument für den erfahrenen Injekteur; und er muß sie weiterhin gebrauchen, wenn er nicht mißverständlich durch EDV-gewappnete "Vereinfacher" oder bloße Administratoren überwältigt werden will.

Die Nähe zur "natürlichen Wirklichkeit", in welche sich die theoretisch begründete Methodik beim Injizieren entwickelt, gibt Hoffnung auf weitere Verfeinerungen.

So versteht Lombardi auch sein "GIN-Prinzip", und in gleicher Weise sehen Forscher in der ISRM unter Dr. Widmann zukünftige Entwicklungen.

Das "Druckfähige Injizieren" ist eine solche Verfeinerung. Sie nützt die Möglichkeiten der EDV, macht Erfahrung verarbeitbar, und ermöglicht so, das Ziel einer wirtschaftlichen Injektionslösung nie aus den Augen zu verlieren.

**Autor: Dip.-Ing.Dr.G.Stadler  
Insond Ges.m.b.H.  
Bahnhofstr. 45  
5202 Neumarkt**



# Photogrammetrische Aufnahme des Stephansdomes als Grundlage einer Dokumentation der petrographischen Zusammensetzung und des Verwitterungszustandes der Fassaden

Dip.Ing. W. Kalman

## Zusammenfassung:

Für die Erhebung der petrographischen Zusammensetzung sowie einer Dokumentation des Verwitterungszustandes der Fassaden des Wiener Stephansdomes wurde eine photogrammetrische Aufnahme notwendig, da keine dafür geeigneten Pläne vorhanden waren. Diese wurde vom Institut für Vermessungswesen und Fernerkundung der Universität für Bodenkultur Wien in Zusammenarbeit mit der Abteilung Baugeologie durchgeführt. Die Planung der Aufnahme dieses komplexen Großobjekts und die Erstellung der bislang vorliegenden Pläne wird erläutert.

## 1. Einleitung

Die Sanierung und Erhaltung großer Baudenkmäler wie des Wiener Stephansdomes ist im Lauf der letzten Jahre zu einem Problem geworden, dessen Lösung sowohl finanziell als auch technisch erhebliche Schwierigkeiten bereitet. Obwohl die komplexen Zusammenhänge zwischen den chemischen, physikalischen und biologischen Prozessen, die bei der Zerstörung von Naturbausteinen eine Rolle spielen, heute weitgehend bekannt sind, ist derzeit keine befriedigende Lösung in Sicht.

Die Anforderungen an den Schutz wertvoller Bauten stehen den derzeitigen Möglichkeiten in vielen Fällen beinahe diametral gegenüber. Der Einsatz von Steinfestigern ist bisher in vielen Fällen fehlgeschlagen, sodaß der Austausch von zerstörtem Material für einen längeren Zeitraum die einzige Alternative bleiben wird. Dadurch geht früher oder später die gesamte ursprüngliche Bausubstanz verloren. Beim derzeitigen Verwitterungsfortschritt zeichnet sich möglicherweise ein Totalaustausch im Lauf der nächsten hundert Jahre ab, sollte es nicht gelingen die verbliebene Altsubstanz vor Verwitterung zu schützen. Es kann kaum noch von einer

organischen Veränderung der Altsubstanz gesprochen werden, sondern es handelt sich um die Erstellung einer Kopie bei gleichzeitigem Verlust des Originals. Ob es dabei sinnvoll wäre, alte Bearbeitungsspuren zu imitieren und Steinmetzzeichen zu übertragen, bleibt dahingestellt. Da heute jede Form der Sanierung und Bestandserhaltung mit einer häufig irreversiblen Veränderung des Originalbestandes verbunden ist, sollte die Erfassung des Originalbestandes am Anfang jedes Sanierungskonzeptes stehen.

Abgesehen vom Problem des fortschreitenden Substanzverlustes bei wichtigen Baudenkmalern werden minder bedeutende Bauwerke voraussichtlich wegen fehlender Mittel nicht erhalten werden können. Diese Kulturgüter, die früher oder später unwiederbringlich verloren gehen werden, sollten zumindest in möglichst objektiven und umfassenden Dokumentationen für die Nachwelt erhalten werden.

Sowohl für wissenschaftliche Zwecke als auch als Beweissicherung für Schadenserkenkung und Schadensbehebung sowie als Bestandsdokument ist eine möglichst ungeneralisierte Istformerfassung unerlässlich (H.FORAMITTI, 1976). Diese kann heute nur durch die Photogrammetrie in wirtschaftlicher Form erfüllt werden. Die Photogrammetrie ist derzeit das einzige Verfahren für eine rasche, umfassende und objektive Formdokumentation in Bauforschung und Denkmalpflege.

Die photogrammetrische Aufnahme des Stephansdomes wurde notwendig, da die wenigen vorhandenen Pläne nicht steingerecht waren und es abgesehen von einigen Probeaufnahmen durch H. FORAMITTI keine auswertbaren Meßbilder für gesteinskundliche Aufnahmen und Verwitterungskartierung gab.

## **2.Aufnahmeplanung**

Ein sehr wesentlicher Punkt bei der photogrammetrischen Aufnahme eines Großobjektes wie des Wiener Stephansdomes ist die sorgfältige Planung der Aufnahmestandpunkte. Anzahl und Lage dieser Punkte werden von den apparativen Möglichkeiten bei Aufnahme und Auswertung, von der baulichen Beschaffenheit des Objektes und seiner Umgebung sowie vor allem vom geforderten Ergebnis, speziell hinsichtlich Genauigkeit, bestimmt.

Die wesentliche Anforderung an die Pläne für die petrographische Bestandsaufnahme war die eindeutige Identifizierbarkeit der Quader und damit die Möglichkeit der

eindeutigen Zuordnung der einzelnen Steine an den Fassaden. Die Pläne mußten also steingerecht sein, die Genauigkeitsansprüche waren allerdings relativ gering.

Da es aber bis zu diesem Zeitpunkt, abgesehen von einigen Probeaufnahmen durch H.FORAMITTI, keine Meßbilder vom Stephansdom gab und eine Aufnahme des Domes durch andere Institutionen zu diesem Zeitpunkt nicht in Sicht war, wurden höhere Genauigkeitsanforderungen an die Meßbilder gestellt. Einige der nachfolgenden Überlegungen, die unter anderem der Aufnahmeplanung zugrunde lagen, waren für den Zweck der petrographischen Kartierung unerheblich.

Für die photographische Aufnahme stand die große Hebebühne der Wiener Feuerwehr mit einer Maximalhöhe von 35m nur fallweise zur Verfügung. Daher mußte es unter anderem Ziel der Aufnahmeplanung sein, die Aufnahmestandpunkte so festzulegen, daß ein rascher Ablauf des Aufnahmevorganges gewährleistet war. Aufgenommen wurde mit einer Meßbildkamera des Typs UMK (Universalmeßkamera) der Firma Jenoptik, Jena, (Bildformat 13cm x 18cm, Kammerkonstante 99,82mm). Da bei einer großen Ausladung der Hebebühne mit Bewegungsunschärfen zu rechnen war, wurde ein relativ lichtempfindlicher Film (Kodak Tri-X-Pan Professional) verwendet.

Die Planung erfolgte an einem Papiermodell des Stephansdomes (Maßstab 1:220) unter Berücksichtigung des horizontalen bzw. vertikalen Aufnahmewinkels der Kamera. Dabei waren folgende Punkte zu beachten:

Minimierung der Abweichung der Aufnahmeachse zur Flächennormalen des aufzunehmenden Objektes, um Schwierigkeiten bei einer photogrammetrischen Entzerrung zu vermeiden,

Vermeidung von Abbildungsverlusten in stark gegliederten Fassadenabschnitten durch Verdecken,

Einhaltung eines geeigneten Basis-Abstands-Verhältnisses in Bereichen, in denen eine stereoskopische Auswertung vorgesehen war,

Berücksichtigung der Möglichkeiten der Hebebühne bezüglich Reichweite, Ausladung und Manövrierbarkeit,

Einhaltung einer Aufnahmeentfernung kleiner als 30m aus Bildmaßstabs- und Genauigkeitsüberlegungen.

Zur eindeutigen Festlegung und zur genauen Bezeichnung der aufzunehmenden Fassadenabschnitte wurde das von der Dombauhütte für den Wiederaufbau eingeführte Koordinatensystem verwendet. Für die Aufnahmen wurden Detailskizzen (siehe Abb.1) angefertigt, auf denen die Standpunkte des Feuerwehrgagens, die geplanten Aufnahmepositionen und die Aufnahmerichtungen eingezeichnet sind.

Neben der Aufnahmerichtung wurde die Höhe der Hebebühne in Metern und in Bezug zu markanten Punkten am Dom sowie der aufzunehmende Fassadenabschnitt vermerkt. In diese Skizzen wurde während der Aufnahme zu den einzelnen Aufnahmepositionen die laufende Bildnummer der Kamera eingetragen. Daneben wurde ein Protokoll geführt, in dem Bildnummer, eingestellte Entfernung, Blende, Belichtungsdauer und aufgenommenes Detail einzutragen waren.

Die Aufnahmetage wurden neben der Verfügbarkeit des Feuerwehrgagens vor allem von Licht- und Wetterverhältnissen bestimmt. Optimale Verhältnisse sind an windstillen Tagen mit bedecktem Himmel gegeben. Dadurch werden Bewegungsunschärfen und Schatten vermieden. Durch ungünstige Wetterverhältnisse ergaben sich Wartezeiten von mehreren Wochen. Es konnten durchschnittlich 40 Aufnahmen pro Aufnahmetag gemacht werden. Im Rahmen der gegenständlichen Arbeit wurden ca.95% der Fassade und die Türme bis in eine Höhe von 56m mit ca.200 Aufnahmen photographisch erfaßt.

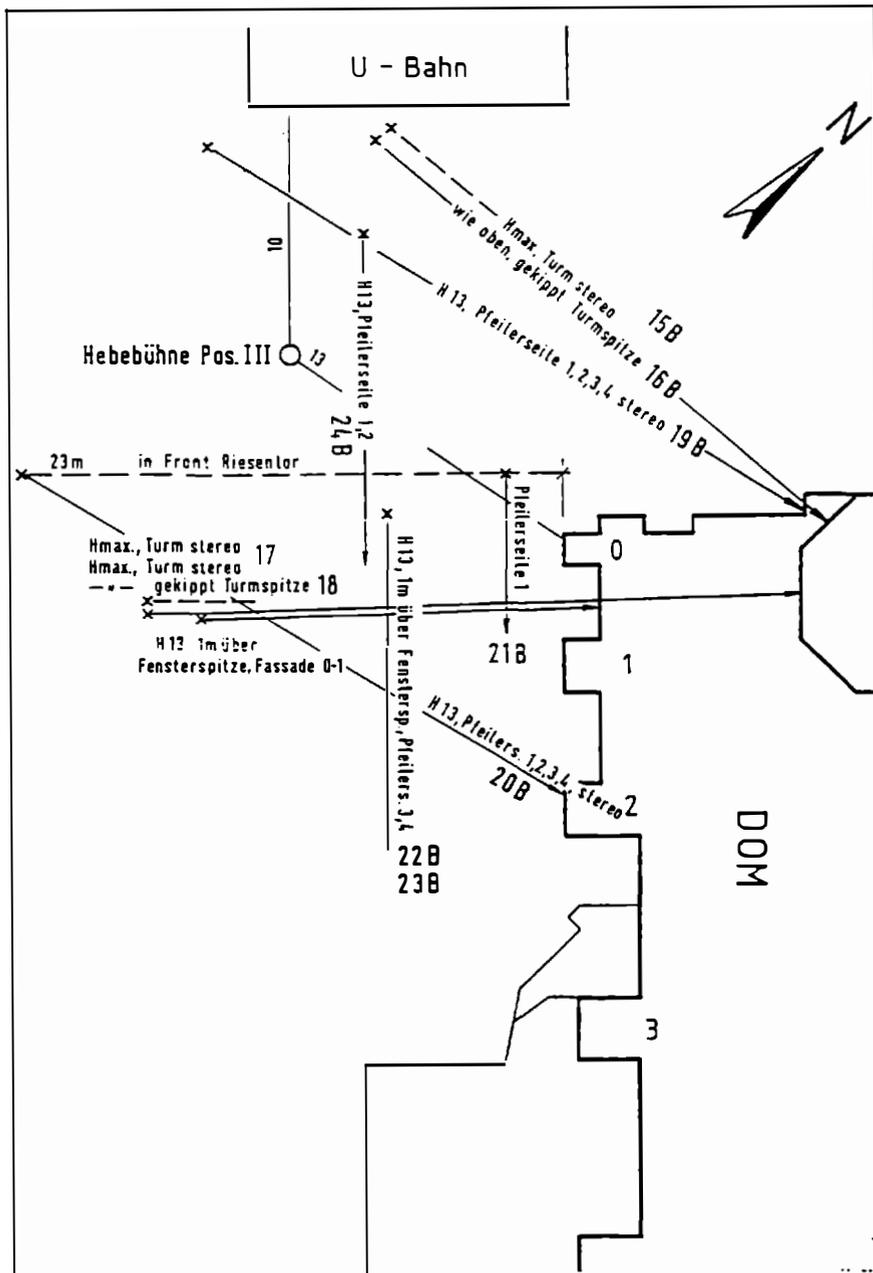


Abb. 1 Detailplan für die Aufnahmendisposition

### 3. Photogrammetrische Auswertung und Planerstellung

Da bei den Aufnahmen eine ausreichende Stabilität der Hebebühne nicht gegeben war, konnte die äußere Orientierung nicht exakt eingestellt werden. Außerdem war ein rascher Aufnahmeablauf notwendig, da die Hebebühne - wie bereits erwähnt - nur begrenzte Zeit zur Verfügung stand. Daher erfolgte die Bestimmung der Elemente der äußeren Orientierung durch Paßpunktmessung. Die Auswahl der Paßpunkte wurde anhand der von den Bildnegativen angefertigten Kontaktkopien (siehe Abb.2) vorgenommen.

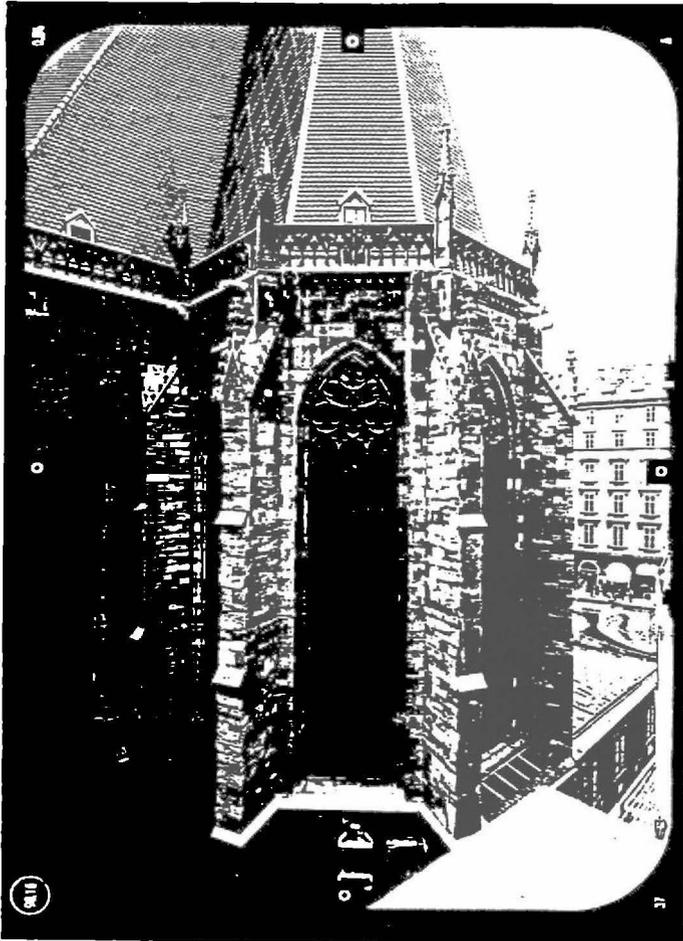


Abb.2: Kontaktkopie

Die Paßpunktmessung wurde nur an der Westfassade durchgeführt, da nur dieser Fassadenabschnitt photogrammetrisch ausgewertet wurde. Die Messung der Paßpunkte erfolgte mittels Vorwärtseinschnitt aus 5 Polygonpunkten. Als Meßinstrument stand der mit einem Steilsichtprisma ausgestattete Theodolit ELTA 3 der-Fa. Carl ZEISS, Oberkochen zur Verfügung.

Von den einzelnen Polygon- bzw. Paßpunkten wurden Lageskizzen gezeichnet, die mit einer Punktbeschreibung versehen sind. Diese Punktskizzen beinhalten auch die Koordinaten im Gauß-Krüger System, bei den Paßpunkten auch im transformierten Koordinatensystem. Um die Auffindung der einzelnen Paßpunkte zu erleichtern, wurde eine Übersichtsskizze der Paßpunkte gezeichnet.

Ursprünglich bestand die Absicht, die Fassaden abschnittsweise zu entzerren, fallweise unterstützt durch stereoskopische Auswertung. Diese Vorgangsweise wurde nur für die Westfassade beibehalten. Für die Entzerrung wurde ein Lageplan der Paßpunkte bezüglich der transformierten X- und Z-Achse im Maßstab 1:50 gezeichnet. Daneben wurde mittels stereoskopischer Auswertung ein Lineament der Fassade erstellt, um nichtebene Objektteile unverzerrt darstellen zu können. Anhand dieses Lineaments und der Paßpunkte wurden die Entzerrungen durchgeführt. Die entzerrten Positive bzw. das Lineament wurden einer Transparentfolie unterlegt und der Plan hochgezeichnet.

Im weiteren Verlauf wurde das Verfahren aus Zeit- und Kostengründen vereinfacht. Für den Plan des Albertinischen Chores wurden nicht entzerrte Positive im ungefähren Maßstab 1:50 verwendet. Für die Vergrößerungen wurden Sperrmaße mittels Stahlband gemessen. Diese Pläne erwiesen sich für die petrographische Aufnahme und Verwitterungskartierung als vollkommen ausreichend. Erforderlichenfalls kann eine photogrammetrische Auswertung zu einem späteren Zeitpunkt nachgeholt werden.

#### 4.Schluß

Für die petrographische Aufnahme des Wiener Stephansdomes konnten durch den Einsatz der Photogrammetrie kostengünstige Arbeitsunterlagen geschaffen werden. Die flexiblen Auswertemöglichkeiten der Meßbilder erwiesen sich als wesentlicher Vorteil für die Erstellung der Pläne, da die Vorgangsweise im Verlauf der Arbeiten geändert werden konnte und dadurch sowohl der Aufwand als auch die Kosten erheblich reduziert werden konnten. Da bis zu diesem Zeitpunkt praktisch keine

Meßbilder vom Stephansdom vorhanden waren, wurden an die photogrammetrische Aufnahme höhere Anforderungen gestellt als für diesen Zweck erforderlich war. Die geringen finanziellen Mittel machten jedoch eine exakte Auswertung im Sinne einer Bauaufnahme unmöglich. Darüber hinaus wäre für eine Bauaufnahme die Hinzuziehung eines Bauforschers unerlässlich gewesen, da sowohl eine stereoskopische Auswertung als auch das Hochzeichnen der Pläne bereits durch die Auswahl der aufzunehmenden Linien und Details eine Interpretation darstellt.

Die bisher erstellten Pläne haben nicht nur ihre Eignung für die petrographische Aufnahme und Schadbildkartierung bereits unter Beweis gestellt, sie dürften auch die Dombauleitung überzeugt haben, daß eine steingerechte Aufnahme des Wiener Stephansdomes nicht nur als Dokument des Denkmalschutzes wertvoll und notwendig ist, sondern daß steingerechte Pläne auch praktische Bedeutung als Ausschreibungsgrundlage für die Vergabe und Durchführung der laufenden Renovierungsarbeiten besitzen. Die Dombauleitung hat daher ein privates Unternehmen mit einer nochmaligen Aufnahme des Stephansdomes beauftragt, die im Jahr 1992 auch durchgeführt wurde. Dabei wurden nicht nur die Außenfassaden, sondern auch der Innenraum des Domes photogrammetrisch aufgenommen und stereoskopisch ausgewertet. Der ungleich höhere apparative und personelle Aufwand hatte allerdings Kosten in Millionenhöhe zur Folge. Diese konnten aus der Spendenaktion für den Stephansdom finanziert werden. So begrüßenswert die umfassende Dokumentation eines derartigen Baudenkmales ist, so stellt sich doch die Frage nach der Verhältnismäßigkeit der eingesetzten Mittel zum Ergebnis. Der Stephansdom stellt hier eine Ausnahme dar, da die Bauaufnahme durch private Spenden finanziert wurde. Ein ähnlicher Aufwand für andere Bauwerke wie z.B. Schönbrunn, die Hofburg oder die Ringstraßenbauten wäre nicht finanzierbar. Es ist aber sehr wohl möglich, unsere wichtigsten Baudenkmäler photogrammetrisch zu erfassen und die Auswertung nur im Bedarfsfall durchzuführen.

Ob die angefertigten Meßbilder für die 1992 durchgeführte Bauaufnahme geeignet gewesen wären, kann nicht beurteilt werden, da keine Angaben hinsichtlich Genauigkeitsanforderungen vorliegen. Seitens der Dombauleitung erfolgte auch keine Kontaktnahme in dieser Richtung, obwohl das Vorhandensein von Meßbildern bekannt sein mußte.

Für eine nochmalige photogrammetrische Aufnahme jener Teile, die 1987/88 bereits aufgenommen wurden, sprechen allerdings mehrere Gründe. Durch eine Erfassung des gesamten Domes mit einheitlichen Mitteln und Punktsignalisierung wird eine homogene Genauigkeit für die Pläne ermöglicht. Da zwischen den beiden Aufnahmen

ein Zeitraum von ungefähr 5 Jahren liegt, dokumentieren sie den Zustand des Domes zu unterschiedlichen Zeitpunkten. Es ist anzunehmen, daß in diesem Zeitraum vor allem infolge der laufenden Renovierungsarbeiten einige Veränderungen am Dom erfolgten. Im Sinne des Denkmalschutzes ist es außerdem durchaus wünschenswert, wenn bedeutende Objekte in gewissen Zeitintervallen neu aufgenommen werden, um die Veränderungen im Lauf der Zeit dokumentieren zu können. Ob ein Zeitraum von 5 Jahren allerdings bereits ausreichend ist, um z.B den Verwitterungsfortschritt beobachten zu können, kann nicht gesagt werden. Prinzipiell wäre es aber auf diese Weise möglich, den Verwitterungsfortschritt flächenhaft und quantitativ zu erfassen. Da überdies die Kosten der photogrammetrischen Außenaufnahmen im Verhältniss zur stereoskopischen Auswertung gering sind, wird die nochmalige Aufnahme verständlich.

## 5. Literatur

FORAMITTI, H., 1976: Der Wert moderner photogrammetrischer Kulturgüterarchive. Architektur - Photogrammetrie I, Landeskonservator Rheinland, Bonn.

JÄNSCH, R. D., 1976: Genauigkeitsansprüche bei der photogrammetrischen Bauaufnahme. Architektur - Photogrammetrie II, Landeskonservator Rheinland, Bonn.

KALMAN, W.; 1993: Photogrammetrische Aufnahme des Wiener Stephansdomes als Grundlage einer Dokumentation der petrographischen Zusammensetzung und des Verwitterungszustandes der Fassaden; unveröffentlichte Diplomarbeit, Univ. für Bodenkultur, Wien.

KALMAN, W.; MÜLLER, H. W.; OTTNER, F.; SCHNEIDER, W.; SCHWAIGHOFER, B., 1990: A photogrammetric survey of St. Stephens Cathedral in Vienna as a basis for the mapping of petrological composition and the state of weathering. -[In: P. G. Marinos & G.C. Koukis (eds.): The Engineering Geology of Ancient Works, Monuments and Historical Sites. - Proc. Intern. Symposium organized by the Greek National Group of IAEG/Athens/19.-23.Sept 1988, Bd.4], A.A. Balkema/Rotterdam/Brookfield.

KIESLINGER, A., 1949: Die Steine von Sankt Stephan. Verl. Herold, Wien.

ROHATSCH, A.; MÜLLER, H.W.; 1990: Gesteinskundliche Untersuchungen und Dokumentation des Verwitterungszustandes der Fassaden des Wiener

Stephansdomes. [In: H. Lichtenegger et al.(Hrsg.): Kulturgut Dokumentation und Forschung.] Mitt. d. geodätischen Institute der Technischen Universität Graz, Bd. 69, S. 183 - 184; Graz

ROHATSCH, A.; 1991: St. Stephan - Herkunft, Petrographie und Verwitterung der Bausteine des Albertinischen Chores. Diss. Inst. f. Bodenforschung und Baugologie, Univ. f. Bodenkultur

ROHATSCH, A.; 1991: St. Stephan - Herkunft, Petrographie und Verwitterung der Bausteine des Albertinischen Chores. Mitt. Ges. Geol. Bergbaustudenten, Bd. 37, S. 141 - 155, Wien

**Autor:** Dipl.-Ing. W.KALMAN  
Institut für Geotechnik  
Universität für Bodenkultur Wien  
Gregor-Mendelstr. 33  
1180 Wien

# Tone als Barrieregesteine bei Mülldeponien

## Mineralogische und geochemische Untersuchungen an Tonen aus Mannersdorf, Göllersdorf und Hennersdorf

Dipl.Ing. Beata KNAAK

### 1. Problemstellung

Die Projektierung und der Bau von Müllentsorgungsanlagen zählen zu den umwelttechnisch wichtigsten Aufgaben auf dem Gebiet der Abfallwirtschaft. Die Mißachtung der Gefahren, die von unzulänglich oder überhaupt nicht abgedichteten Deponien ausgehen, bewirkte besonders in der jüngeren Vergangenheit katastrophale Kontaminationen der Biosphäre, vor allem des Grundwassers.

Das gesteigerte Umweltbewußtsein in der Bevölkerung, Konzepte für Müllsortierung, Wiederverwertung bzw. Müllvermeidung vermochten die in unserer Gesellschaft anfallenden Müllmengen bisher nicht annähernd einzuschränken. Es steht fest, daß zur Deponierung von Abfällen jetzt und in nächster Zukunft keine Alternativen existieren.

Der Bau und der Betrieb von Mülldeponien werden in Österreich durch Richtlinien und ÖNORMEN geregelt. Danach ist die heute bestmögliche Isolierung der Abfallstoffe von der Biosphäre durch das zum Standard gewordene Multibarrierensystem für Mülldeponien sicherzustellen. Darin kommen Tone bei zwei wesentlichen Dichtungselementen zum Einsatz: Als natürliche geologische Barriere und als mineralische Dichtschicht, die langfristig den Austritt von Deponiesickerwässern verhindern soll.

Die natürliche geologische Barriere soll einerseits den Schadstoffaustritt soweit verhindern, daß eine Kontamination der Umgebung unterbleibt und andererseits, bei Versagen der Basisabdichtung sinnvolle Sanierungsmaßnahmen (wie die Umschließung des betroffenen Bereiches mittels Dichtwand, die Umlagerung der Abfälle in eine neue, ausreichend abgedichtete Deponie o.a.) zeitlich und technisch ermöglicht werden.

## 2. Herkunft und geologische Beschreibung des Probenmaterials

### Ton aus Mannersdorf

Die Tongrube Mannersdorf liegt am Ostrand des Wiener Beckens am FuÙe des Leithagebirges. Nach dem Einbruch des Wiener Beckens im Miozän - vor etwa 15 Mio Jahren wurden die absinkenden Landmassen vom Meer überflutet. Während am Rande des Leithagebirges, das als Insel aus diesem Meer herausragte, Rifffalke aus Korallen und Rotalgen entstanden, wurden im Inneren des Beckens feinklastische Sedimente - Tone - abgelagert. Die Tone der Lagerstätte Mannersdorf stammen aus dem Pannon (ca.10 Mio Jahre)

Der Gesamtmineralbestand des Tons aus Mannersdorf wurde an drei Materialproben mittels Röntgendiffraktometeranalyse ermittelt. Etwa zwei Drittel des Materials werden von Schichtsilikaten gebildet.

Die Tonmineralzusammensetzung wurde ebenfalls an drei Materialproben bestimmt. Es dominieren Illit und Smektit; Chlorit und Kaolinit treten stark zurück. Ein hoher Smektitgehalt wirkt sich üblicherweise positiv auf die Dichtungseigenschaften von Barrieregesteinen aus.

Die Feststoffdichte des Mannersdorfer Tons beträgt  $q_s = 2,75 \text{ g/cm}^3$ .

Die Korngrößenverteilung ist in der folgenden Tabelle zusammengestellt:

Kies 0%	Sand 1,7-3,0%	Schluff 29,5-32,1%	Ton 65,3-67,5%
---------	---------------	--------------------	----------------

Das Material hat eine spezifische Oberfläche von  $178 \text{ m}^2/\text{g}$ .

### Ton aus Göllersdorf

Die Tonlagerstätte Göllersdorf liegt in der niederösterreichischen Molassezone. Der Ton von Göllersdorf gehört zu den Laaer Schichten. Die Ablagerung erfolgte im Karpat - vor etwa 17 Millionen Jahren.

Auch der Gesamtmineralbestand des Tons aus Göllersdorf wurde an drei Materialproben bestimmt. Die Proben bestehen etwa zur Hälfte aus Schichtsilikaten.

Die Tonmineralzusammensetzung: auch beim Göllersdorfer Ton dominieren Illit und Smektit gegenüber Chlorit und Kaolinit.

Die Feststoffdichte beträgt  $q_s = 2,78 \text{ g/cm}^3$ .

Bei der Korngrößenverteilung überwiegt beim Göllersdorfer Ton die Schluffraktion:

Kies 0%	Sand 1,8-2,1%	Schluff 60,1-61,0%	Ton 37,2-39,7%
---------	---------------	--------------------	----------------

Die Spezifische Oberfläche ist mit  $128 \text{ m}^2/\text{g}$  kleiner als beim Ton aus Mannersdorf.

### **Ton aus Hennersdorf**

Die Tongrube Hennersdorf befindet sich im Zentrum des südlichen Wiener Beckens und wurde so wie der Ton aus Mannersdorf im Pannon gebildet.

Im Gesamtmineralbestand ist hier der Chloritgehalt höher als bei den Tönen aus Mannersdorf und Göllersdorf. Die Proben bestehen etwa zur Hälfte aus Schichtsilikaten.

Charakteristisch für die Tonmineralzusammensetzung ist der höhere Gehalt an Smektit (bis zu 60%) und Chlorit:

Der Ton aus Hennersdorf hat eine Feststoffdichte von  $q_s = 2,75 \text{ g/cm}^3$ .

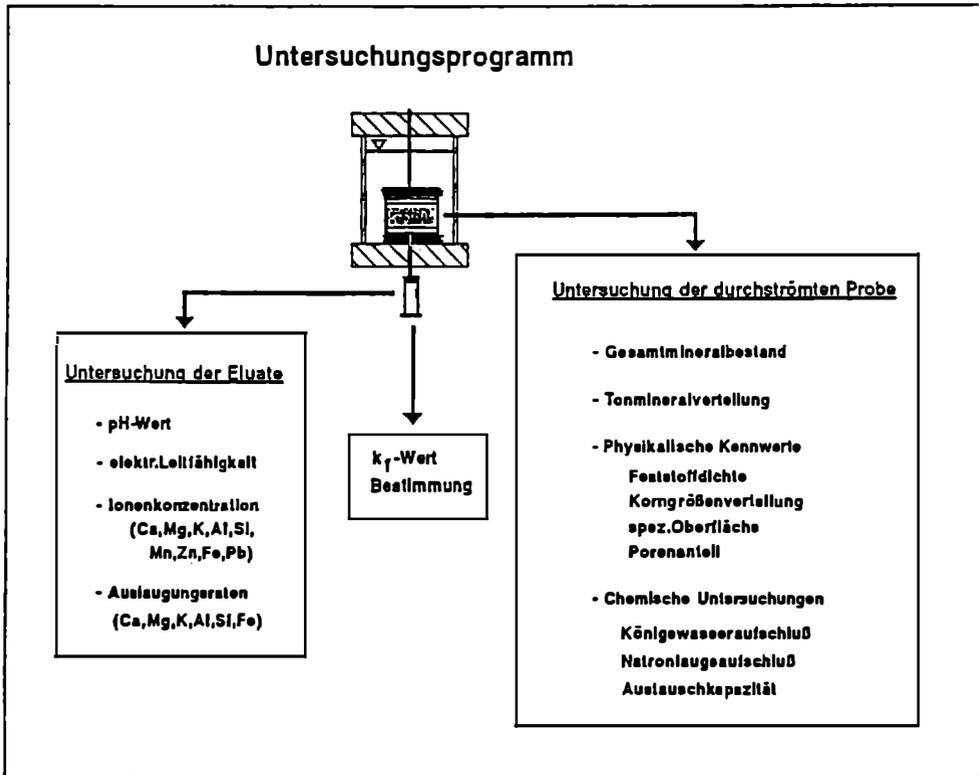
Auch bei der Korngrößenverteilung des Hennersdorfer Tons überwiegt die Schluffraktion:

Kies 0%	Sand 0,5-0,7%	Schluff 61,2-62,0%	Ton 37,3-38,2%
---------	---------------	--------------------	----------------

Die Spezifische Oberfläche beträgt  $128 \text{ m}^2/\text{g}$ .

### 3. Durchführung und Ergebnisse der Perkolationsversuche

Ein Schema der durchgeführten Analysen zeigt die folgende Abbildung:



## Prüfflüssigkeiten

Als Prüfflüssigkeiten wurden folgende Lösungen verwendet:

- Salzsäure 1 molar
- Natronlauge 1 molar
- Bleichloridlösung 0,005 molar
- Sickerwasser synthetisch (SIWA), nach folgender Rezeptur:

Natriumazetat	0,150 mol
Eisessig	0,150 mol
Glycin	0,050 mol
Salicylsäure	0,007 mol

Diese Rezeptur stellt die für längere Zeit haltbare Modifikation der in den Richtlinien für Mülldeponien .I.(LECHNER, P. und PAVLICK, R., 1988, S.40) angegebenen Zusammensetzung dar.

Die durch die Tone durchgesickerten Perkolate wurden zumindest einmal pro Woche beprobt und folgende Parameter ermittelt:

- Durchflußmenge pro Woche
- k-Wert
- pH-Wert der Perkolate
- Leitfähigkeit der Perkolate
- Konzentration einzelner Ionen in den Perkolaten
- Auslaugungsraten einzelner Ionen aus dem Ton

Weiters wurde der jeweilige hydraulische Gradient  $i$  (= hydraulische Druckhöhe/Probenhöhe) vermerkt.

Für die Langzeitversuche (Perkulationszeit....) wurden nur ungestörte Proben benützt, die senkrecht zur sedimentären Schichtung durchströmt wurden.

## Probenmaterial

Durch die chemischen Analysen der Perkolate bekommt man bereits einen guten Einblick in die Wechselwirkungen zwischen Prüfflüssigkeiten und untersuchten Tonen. Durchlässigkeitsveränderungen, Gleichgewichtsreaktionen, Auslaugungsraten, Durchbrüche der Prüfflüssigkeiten usw. können gut erfaßt werden. Trotz der

beträchtlichen Aussagekraft dieser Untersuchungen ist aber nicht zu vergessen, daß es sich dabei immer um indirekte Methoden handelt. Es werden über Veränderungen in der flüssigen Phase (Prüfflüssigkeit: Perkolat) Aussagen über Veränderungen in der festen Phase (Ton) getroffen. Zur Kontrolle bzw. Kalibrierung der zuvor genannten Methoden ist daher eine Analytik der Tone nach Versuchsende unerlässlich. Aus Kosten- und Zeitgründen wird aber in den meisten Untersuchungen darauf verzichtet.

Die oben genannten Überlegungen waren Anlaß, den Nachuntersuchungen der behandelten Tone im laufenden Forschungsprojekt einen breiteren Raum einzuräumen.

Nachuntersuchungen wurden an folgenden Proben durchgeführt:

Ton aus Mannersdorf nach Langzeitversuch mit HCl,  
Ton aus Mannersdorf nach Langzeitversuch mit SIWA,  
Ton aus Mannersdorf nach Langzeitversuch mit NaOH;

Ton aus Göllersdorf nach Langzeitversuch mit HCl,  
Ton aus Göllersdorf nach Langzeitversuch mit SIWA,  
Ton aus Göllersdorf nach Langzeitversuch mit NaOH;

Ton aus Hengersdorf nach Langzeitversuch mit HCl,  
Ton aus Hengersdorf nach Langzeitversuch mit PbCl<sub>2</sub>;

Am Versuchsende wurde die Zufuhr der jeweiligen Prüfflüssigkeit gestoppt und diese durch destilliertes Wasser ersetzt. Die Tonzylinder sollten dadurch "gewaschen" werden, d.h. die hohen Konzentrationen der Prüfflüssigkeiten sollten verringert werden. Nach vier Wochen Spülzeit wurden die Tonzylinder ausgebaut und in Scheiben von 1 cm zerschnitten. Zum Teil reichte die einmonatige Spülung mit Wasser nicht aus, um die Prüfflüssigkeit auszuwaschen. So mußte die Einzelprobe nochmals, z.T. mehrmals gewaschen und zentrifugiert werden. Erst nach der Trocknung konnten die Untersuchungen weitergeführt werden.

Sämtliche Probezylinder hatten beim Einbau in die Versuchsanlage eine homogene Färbung. Auch waren nur solche Proben für die Langzeitversuche ausgewählt worden, an denen keine Risse bemerkbar waren. Im Zuge der mehrjährigen Durchströmung mit den verschiedenen Prüfflüssigkeiten kam es bei allen Zylindern zu

Veränderungen der Färbung, sowie zu  
- unterschiedlich ausgeprägten - Rißbildungen.

Das selektive Herauslösen bestimmter Minerale durch verschiedene Prüfflüssigkeiten oder Bildung von neuen Mineralen hinterläßt auch Spuren im strukturellen Aufbau, physikalische Kennwerte (wie zB. Feststoffdichte) werden verändert .

#### **4. Zusammenstellung der Untersuchungsergebnisse und Schlußfolgerung**

Bei den untersuchten Proben konnte während der Langzeit-Durchlässigkeitsversuche keine signifikante Änderung des k-Wertes festgestellt werden. Dementgegen wurden nach Versuchsabschluß an den Probenmaterialien eine Reihe von chemischen und mineralogischen Veränderungen nachgewiesen und dokumentiert. Dies zeigt neben der hervorragenden Eignung der Tone als Barrieregesteine aber auch, daß bei der Untersuchung dieser Materialien der langen Versuchs- und Beobachtungsdauer eine wesentliche Bedeutung zukommt.

**TABELLE: Untersuchungsergebnisse**  
**Zusammenstellung der Endergebnisse**

**k-Wert der untersuchten Proben,**  
**pH-Wert und elektr. Leitfähigkeit des Eluates**

	<b>k-Wert [m/s]</b>	<b>pH-Wert [mS/cm]</b>	<b>Leitfähigkeit</b>
<b><u>Prüfflüssigkeit</u></b>			
Salzsäure		0,7	350
Sickerwasser		4,6	10
Natronlauge		14	183
<b><u>Ton aus Mannersdorf</u></b>			
mit Salzsäure perkoliert	3,0.10 <sup>-11</sup>	1,0	80
mit Sickerwasser perkoliert	2,0.10 <sup>-11</sup>	7,8	16
mit Natronlauge perkoliert	6,0.10 <sup>-12</sup>	13,5	100
<b><u>Ton aus Göllersdorf</u></b>			
mit Salzsäure perkoliert	1,0.10 <sup>-11</sup>	3,8	75
mit Sickerwasser perkoliert	1,0.10 <sup>-11</sup>	8,0	13
mit Natronlauge perkoliert	8,0.10 <sup>-12</sup>	13,5	100
<b><u>Ton aus Hennersdorf</u></b>			
mit Salzsäure perkoliert	3,5.10 <sup>-10</sup>	0,7	300
mit Bleichlorid perkoliert	1,0.10 <sup>-10</sup>	8,0	1,2

Gesamtmineralbestand

Probe	Quarz	Sch.Sil.	Chlorit	Kalzit	Dolomit	Feldspat	gelöst
cm	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]
Ton aus Mannersdorf unbehandelt	24	57-63	3-8	5	5	1	
mit Salzsäure perkoliert	3-4 24	63	2			2	9
mit Sickerwasser perkoliert	0-1 24	61	5			3	7
	1-2 24	61	4		3	3	5
	3-4 24	61	6		3	2	4
mit Natronlauge perkoliert	2-3 24	57	5	8		2	4
	3-4 24	57	5	8		2	4
Ton aus Göllersdorf unbehandelt	18	47	5	21	7	2	
mit Salzsäure perkoliert	0-1 18	48	4	3	1	3	23
	1-2 18	48	3	13	3	3	12
	2-3 18	48	3	13	3	3	12
	3-4 18	48	2			3	29
mit Sickerwasser perkoliert	0-1 18	48	5	17	7	3	2
mit Natronlauge perkoliert	0-1 18	47	5	15	1	3	11
	3-4 18	47	5	15	1	3	11
Ton aus Hennersdorf unbehandelt	26	53	5	6	7	3	
mit Salzsäure perkoliert	2-3 26	53				3	18
	3-4 26	54				3	17
mit Bleichlorid perkoliert	0-1 26	54	6	3	4	3	4
	1-2 26	53	5	6	7	3	

## Tonmineralbestand

Probe	cm	Illit [%]	Smektit [%]	Chlorit [%]	Kaolinit [%]	Fireclay [%]
<b>Ton aus Mannersdorf</b> unbehandelt		16	66	6	7	5
mit Salzsäure	0-1	15	68		12	5
perkoliert	1-2	15	65		14	5
	3-4	14	69	4	8	5
mit Sickerwasser	0-1	17	60	8	10	5
perkoliert	3-4	14	65	8	8	5
mit Natonlauge	0-1	14	65	7	9	5
perkoliert	3-4	14	70	3	8	5
<b>Ton aus Göllersdorf</b> unbehandelt		24	54	10	6	6
mit Salzsäure	0-1	18	52	13	7	10
perkoliert	1-2	24	56	11	5	4
	3-4	27	63	2	4	4
mit Sickerwasser	0-1	31	41	14	6	7
perkoliert	3-4	28	53	10	6	3
mit Natonlauge	0-1	27	54	10	3	6
perkoliert	3-4	24	56	9	4	7
<b>Ton aus Hennersdorf</b> unbehandelt		13	66	7	6	7
mit Salzsäure	0-1	23	57		13	9
perkoliert	1-2	18	64		10	8
	3-4	18	64		10	8
mit Bleichlorid	0-1	14	56	9	13	8
perkoliert	3-4	15	65	6	6	8

## Literatur

**KNAAK, B., 1992** Tone als Barrieregesteine bei Mülldeponien, mineralogische und geochemische Untersuchungen an Tonen aus Mannersdorf, Göllersdorf und Hengersdorf Diplomarbeit, Inst.f.Bodenforschung und Baugeologie, Univ.f.Bodenkultur, Wien.

**LECHNER, P., R. PAVLICK, 1988:** Richtlinien für Mülldeponien einschließlich Erläuterungen. Hrsg.: Bundesministerium für Land- u.Forstwirtschaft, Wasserwirtschaftskataster, Wien.

**OTTNER, F., 1991:** Mineralogische und geochemische Untersuchungen an tonigen Barrieregesteinen von Deponieanlagen Dissertation, Inst.f.Bodenforschung und Baugeologie , Univ.f.Bodenkultur, Wien.

**Autor:** Dipl.-Ing. Beata KNAAK  
Institut für Bodenforschung und Baugeologie  
Abt. Baugeologie  
Universität für Bodenkultur  
Gregor Mendelstr. 33  
1180 Wien



# **Tone als Barrieregesteine bei Mülldeponien Geotechnische Untersuchungen an Tonen aus Göllersdorf und Hennersdorf**

Dipl.Ing.-A.R.KNAAK

## **1. Allgemeines und Aufgabenstellung**

Es sollte anhand ausgewählter Tongesteine untersucht werden, inwieweit die Durchströmung des Barrieregesteins mit verschiedenen Prüflüssigkeiten eine Veränderung der geotechnischen, geochemischen sowie mineralogischen Eigenschaften desselben bewirken kann.

Um anhand der erhaltenen Ergebnisse ein umfassendes Bild von der behandelten Problematik zeichnen zu können, ist es jedoch unerlässlich, die Resultate der geotechnischen Versuche in Zusammenhang mit denen der geochemischen und mineralogischen Analysen zu betrachten. Letztgenannte wurden am Institut für Bodenforschung und Baugeologie der Universität für Bodenkultur erstellt und sind in den betreffenden Arbeiten von F.Ottner (1990) und B.Knaak (1992) dokumentiert.

Die erwähnten "ausgewählten Tongesteine", die in diesem Projekt untersucht wurden, stammen aus Göllersdorf, Hennersdorf, Mannersdorf und Freydegg (alle vier Standorte befinden sich in Niederösterreich). Die Versuche mit den Materialien aus Mannersdorf und Freydegg wurden in der Diplomarbeit von R.Rohrhofer abgehandelt. In der vorliegenden Arbeit stehen die Standorte Göllersdorf und Hennersdorf im Vordergrund.

## **2. Versuchsprogramm**

Die Problematik der geotechnischen Eigenschaften eines Barrieregesteins und deren Veränderungen im Zuge der Durchströmung mit verschiedenen relevanten Prüf- oder Sickerflüssigkeiten wurde anhand eines Versuchsprogrammes aufgearbeitet, das folgende Punkte umfaßt:

**A) Bestimmung der wesentlichen geotechnischen Parameter des Ausgangsmaterials;**

es sind dies:

- die Kornverteilungskurve,
- die Atterbergschen Zustandsgrenzen,
- die Trockendichte und der Wassergehalt,
- die Feststoffdichte, sowie
- die Proctorwerte.

**B) Bestimmung der Wasserdurchlässigkeit**

- von ungestörten Proben bei einer *normal* auf die geologische Schichtung gerichteten Durchströmung,
- von ungestörten Proben bei Durchströmung *parallel* zur geologischen Schichtung und
- von künstlich verdichteten Proben.

**C) Langzeit-Durchlässigkeitsversuche mit ungestörten Proben zur Bestimmung und Beobachtung der Durchlässigkeit mit verschiedenen Prüfflüssigkeiten, nämlich**

- entionisiertem Wasser ( $H_2O$ )
- 1 normale Salzsäure (HCl)
- 1 normale Natronlauge (NaOH)
- synthetischem Sickerwasser (SIWA)
- 0,05 molare Bleichloridlösung ( $PbCl_2$ )

Die Eluate dieser Versuche wurden am Institut für Bodenforschung und Baugeologie hinsichtlich ihrer Leitfähigkeit, ihres pH-Wertes, sowie verschiedener Ionenkonzentrationen und Auslaugungsraten untersucht.

Eine genaue Beschreibung der Prüfflüssigkeiten ist ebenfalls in der Arbeit von Ottner (1990) enthalten.

### 3. Untersuchungsergebnisse

#### 3.1. Ton aus Göllersdorf

#### Bodenklassifizierung nach ÖNORM B 4400

Mittelplastischer Ton (TM)

#### Kornverteilung

Fein-Sand 1,3%

Schlufffraktion 64,4%

Tonfraktion 33,0%

#### Atterbergsche Zustandsgrenzen

Fließgrenze  $w_L = 49,1\%$

Ausrollgrenze  $w_P = 20,8\%$

Bildsamkeitszahl  $I_P = 28,4\%$

#### Bodenbezeichnung

Stark bildsamer Ton im halbfesten Zustand (bT,ha)

#### Feststoffdichte, Trockendichte und Wassergehalt

Feststoffdichte  $\rho_{s_0} = 2,76 \text{ g/cm}^3$

Trockendichte  $\rho_d = 1,94 \text{ g/cm}^3$

Wassergehalt  $w = 14,6 \%$

Zustandszahl  $I_C = 1,22$

#### Proctorwerte

Proctordichte  $\rho_{p_r} = 1,705 \text{ g/cm}^3$

Proctorwassergehalt  $w_{p_r} = 18,9 \%$

## Durchlässigkeit der ungestörten Proben

### a) Durchlässigkeit bei Durchströmung mit Wasser:

#### Durchlässigkeitsbeiwert bei Durchströmung

normal zur Schichtung  $k_v = 4,5 \cdot 10^{-11}$  m/s

parallel zur Schichtung  $k_h = 3,7 \cdot 10^{-11}$  m/s

Aus den Ergebnissen läßt sich kein signifikanter Unterschied zwischen der Durchlässigkeit vertikal und parallel zur sedimentären Schichtung des Materials ableiten.

### b) Durchlässigkeit bei Durchströmung mit verschiedenen Prüfflüssigkeiten:

Es wurden Langzeitversuche (teilweise 2 Parallelversuche; die angegebenen Werte sind dann gemittelt) mit ungestörten Proben durchgeführt. Die Durchströmung erfolgte jeweils normal zur Schichtung.

H<sub>2</sub>O (entlüftetes und entionisiertes Wasser)  $k = 4,5 \cdot 10^{-11}$  m/s

NaOH (1 normale Natronlauge)  $k = 8,4 \cdot 10^{-12}$  m/s

HCl (1 normale Salzsäure)  $k = 1,4 \cdot 10^{-11}$  m/s

PbCl<sub>2</sub> (0,005 molare Bleichloridlösung)  $k = 4,7 \cdot 10^{-11}$  m/s

SIWA (synthetisches Sickerwasser)  $k = 5,7 \cdot 10^{-12}$  m/s

## Durchlässigkeit der künstlich verdichteten Proben

Bei einem Teil der künstlich verdichteten Proben lag der Einbauwassergehalt entweder in der Größenordnung des Proctor-Wassergehaltes, oder variierte mit  $w = w_{p_r} \pm 3$  %. Innerhalb dieser Gruppen wurden wiederum Proben mit unterschiedlichen relativen Dichten  $D_{p_r}$  hergestellt.

Eine Auswertung mit der Beziehung

$$\log (k/v_b) = \log (k_0/v_b) + b_D \cdot (D_{Pr} - 1)$$

$k_0$ .....Durchlässigkeitsbeiwert bei einer relativen Dichte von  $D_{Pr} = 100 \%$

$v_b$ .....Bezugsgeschwindigkeit (hier: 1 m/s)

$b_D$  ....Beiwert zur Charakterisierung des Einflusses der Verdichtung auf die Durchlässigkeit

ergibt für  $w = w_{Pr}$  :

$$k_0 = 3,4 \cdot 10^{-11}$$

$$b_D = - 2,5$$

Der geringe Wert (absolut) von  $b_D$  zeigt, daß beim Ton die Abhängigkeit der Durchlässigkeit von der Verdichtung sehr schwach ausgeprägt ist; wesentlich schwächer als dies bei Schluffen und gemischtkörnigen Böden der Fall ist.

### 3.2. Ton aus Hennersdorf

#### Bodenklassifizierung nach ÖNORM B 4400

Ausgeprägt plastischer Ton (TA)

#### Kornverteilung

Fein-Sand 2,6 %

Schlufffraktion 61,3 %

Tonfraktion 36,5 %

## Atterbergsche Zustandsgrenzen

Fließgrenze  $w_L = 57,3\%$

Ausrollgrenze  $w_P = 25,6\%$

Bildsamkeitszahl  $I_P = 31,7\%$

## Bodenbezeichnung

Stark bildsamer Ton im halbfesten Zustand (bT,ha)

## Feststoffdichte, Trockendichte und Wassergehalt

Feststoffdichte  $\rho_{os} = 2,77 \text{ g/cm}^3$

Trockendichte  $\rho_d = 1,76 \text{ g/cm}^3$

Wassergehalt  $w = 17,5 \%$

Zustandszahl  $I_C = 1,15$

## Proctorwerte

Proctordichte  $\rho_{Pr} = 1,608 \text{ g/cm}^3$

Proctorwassergehalt  $w_{Pr} = 21,9 \%$

## Durchlässigkeit (der ungestörten Proben) bei Durchströmung mit verschiedenen Prüfflüssigkeiten:

Es wurde mit jeder der folgenden Prüfflüssigkeiten je ein Langzeit-Durchlässigkeitsversuch durchgeführt. Die Durchströmung der Proben erfolgte ausnahmslos schicht-normal (nSS).

H<sub>2</sub>O (entlüftetes und entionisiertes Wasser)  $k = 5,3 \cdot 10^{-11} \text{ m/s}$

HCl (1 normale Salzsäure)  $k = 1,5 \cdot 10^{-11} \text{ m/s}$

PbCl<sub>2</sub> (0,005 molare Bleichloridlösung)  $k = 1,5 \cdot 10^{-10} \text{ m/s}$

SIWA (synthetisches Sickerwasser)  $k = 5,8 \cdot 10^{-11} \text{ m/s}$

### 3.3. Gegenüberstellung der Versuchsergebnisse

Der Ton aus Göllersdorf ist ein mittelplastischer Ton (TM), das Material aus Hennersdorf ist ein Ton von ausgeprägter Plastizität (TA). Damit hängen auch Unterschiede in den Ergebnissen der geotechnischen Versuche zusammen; eine Gegenüberstellung der Durchlässigkeitsbeiwerte ist in der folgenden Tabelle enthalten:

Bodenkennwert	Einheit	Ton aus Göllersdorf	Ton aus Hennersdorf	Verhältnis $k_{\text{Hennersdorf}}/k_{\text{Göllersdorf}}$
Ungestörte Proben				
Durchl.-Beiwert für				
H <sub>2</sub> O	k (m/s)	4,5 · 10 <sup>-11</sup>	5,3 · 10 <sup>-11</sup>	1,2
NaOH	k (m/s)	8,4 · 10 <sup>-12</sup>		
HCl	k (m/s)	1,4 · 10 <sup>-11</sup>	1,5 · 10 <sup>-11</sup>	1,1
PbCl <sub>2</sub>	k (m/s)	4,7 · 10 <sup>-11</sup>	1,5 · 10 <sup>-10</sup>	3,2
SIWA	k (m/s)	5,7 · 10 <sup>-12</sup>	5,8 · 10 <sup>-11</sup>	10,2

Die größte Differenz zeigen die Ergebnisse der Durchlässigkeitsversuche an ungestörten Proben mit synthetischem Sickerwasser als Prüfflüssigkeit. Bei den übrigen Versuchen weisen die Ergebnisse keine nennenswerten Unterschiede auf.

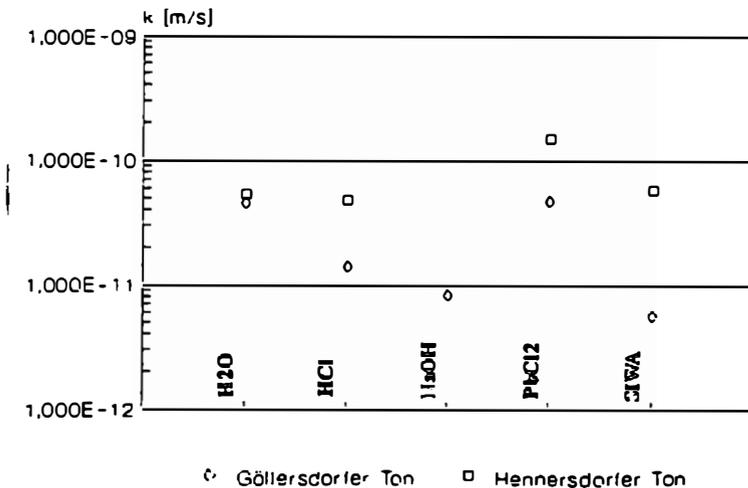
Die Ergebnisse der Langzeit-Durchlässigkeitsversuche mit verschiedenen Prüfflüssigkeiten liefern keinen Hinweis auf einen Zusammenhang zwischen deren Chemismus und der Entwicklung des k-Wertes. Auch unterscheiden sich die Ergebnisse der Versuche mit den Flüssigkeiten NaOH, HCl, PbCl<sub>2</sub> und SIWA nicht wesentlich von den Parallelversuchen mit entionisiertem Wasser (der Vergleichsfaktor liegt bei ± 10). Das Verhältnis  $k_{\text{Hennersdorf}} : k_{\text{Göllersdorf}}$  ist relativ klein (1,2 bis 10,2).

Die hohe Beständigkeit des Durchlässigkeitsbeiwertes des Göllersdorfer Tons gegenüber dem Angriff durch Säuren und Laugen zeichnet dieses Material als besonders geeignet aus was seine Qualität als Barrieregestein angeht. Auch zur Herstellung einer mineralischen Basisabdichtung ist der Göllersdorfer Ton gut geeignet: Der geltende Höchstwert für die Durchlässigkeit einer mineralischen Basisabdichtung von  $k \leq 10^{-09}$  m/s wird bei allen Proben mit einer relativen Dichte von  $D_{pr} \geq 97\%$  unterschritten. Besonders hervorzuheben ist, daß der

Einbauwassergehalt des Materials dabei innerhalb der untersuchten Grenzen von  $w_{\text{Einbau}} = w_{Pr} \pm 3\%$  keinen feststellbaren Einfluß auf das Durchlässigkeitsverhalten des Tones hat.

Der Ton aus Hennersdorf weist bei den Langzeit-Durchlässigkeitsversuchen ebenfalls einen sehr kleinen k-Wert auf und erfüllt mit allen vier Prüfflüssigkeiten die Forderung von  $k \leq 10^{-9}$  m/s.

In Bild 1 sind die Ergebnisse der Langzeit-Durchlässigkeitsversuche bezogen auf die verwendeten Prüfflüssigkeiten graphisch dargestellt.



#### 4. Zusammenfassende Bemerkungen

Die aus den Tongruben Göllersdorf und Hennersdorf entnommenen Proben waren relativ homogen, da sie aus jeweils einer Entnahmestelle (Fläche ca. 2,0 m<sup>2</sup>) entnommen wurden. Die für die geotechnischen Standardversuche ermittelten Streuungen geben somit nicht die In-situ-Streuung (inhärente Variabilität) im Bereich der gesamten Tongrube wieder.

Um die chemische Analyse der durch die Probe sickernden Prüfflüssigkeit ohne deren Verfälschung durch Kontakt mit Metallteilen zu ermöglichen, wurden die Versuche in Dreiaxialzellen durchgeführt. Dafür wurden an den ursprünglichen Zellen alle Metallteile (Hähne, Tüllen u.a.) durch Kunststoffelemente ersetzt. Die Verwendung der Dreiaxialzellen ergibt nun aber eine Beeinträchtigung der Aussagekraft der erhaltenen Durchlässigkeit der Proben. Bei einem Feststoffaustrag aus der Probe ergibt sich eine Verringerung der Dichte und damit zusammenhängend eine - zwar nicht genau bestimmbare, aber sicher vorhandene - Vergrößerung der Zusammendrückbarkeit des Korngerüsts. Da der Seitendruck (Zellendruck  $\sigma_3$ ) konstant bleibt, wird das Korngerüst deshalb im Zuge des Feststoffaustrages vertikal und horizontal zusammengedrückt.

Diese Verhältnisse entsprechen nicht jenen im Feld, da dort durch einen Feststoffaustrag keine seitliche, sondern nur eine vertikale Zusammendrückung erfolgt.

Ein weiterer Unterschied zwischen den Versuchsbedingungen und den Verhältnissen in situ ergibt sich aus der Anwendung eines hohen Versuchsgradienten, dem in der Regel nur ein sehr kleiner Gradient in situ gegenübersteht. Durch den hohen Gradienten ergibt sich eine zusätzliche vertikale Zusammendrückung. Für künftige Untersuchungen wäre daher zu überlegen, diese in Form von Kompressionsversuchen auszuführen. Wählt man dabei eine sehr kleine Normalspannung so liegt man auf der sicheren Seite.

Bei einer Bewertung der Ergebnisse der verschiedenen Langzeitversuche ist der erwähnte Einfluß der Versuchsrandbedingungen (Zellendruck  $\sigma_3$  und Gradient  $i$ ) zu berücksichtigen.

Neben dem Einfluß der Kompression infolge des Feststoffaustrages durch die verschiedenen Prüfflüssigkeiten können aber auch Ausfällungen und Feststoffumlagerungen im Probekörper die Durchlässigkeit stark beeinflussen.

Die im Zeitverlauf an einigen Stellen ersichtlichen kurzfristigen Veränderungen sind auf versuchstechnische Ursachen oder auch auf Meßungenauigkeiten (Ablesefehler) zurückzuführen.

Bei den untersuchten Tonen aus Göllersdorf und Hengersdorf zeigte sich im Verlauf der Versuche keine signifikante Änderung der Durchlässigkeit.

## **5.Literatur**

**KNAAK, A.R. 1991: Tone als Barrieregesteine bei Mülldeponien, Geotechnische Untersuchungen an Tonen Göllersdorf und Hennersdorf; Flugasche und REA-Produkt des Wärmekraftwerks Dürnrrohr als Dichtschichtmaterial bei Mülldeponien - Diplomarbeit, Institut für Geotechnik, Univ.für Bodenkultur, Wien.**

**OTTNER, F., 1991: Mineralogische und geochemische Untersuchungen an tonigen Barrieregesteinen von Deponieanlagen Dissertation, Inst.f.Bodenforschung und Baugeologie , Univ.f.Bodenkultur, Wien.**

**PREGL, O. 1989: Handbuch der Geotechnik Bd. 19/1, Abfall und Umweltschutz, Institut für Geotechnik, Univ.für Bodenkultur, Wien.**

**Autor: Dipl. -Ing. A.Rüdiger KNAAK  
Institut für Geotechnik  
Universität für Bodenkultur  
Gregor Mendelstr. 33  
1180 WIEN**

WIR SIND

DIE ARGE SÄUSENSTEINTUNNEL

**ILBAU**

**MAYREDER**

**DOMA**

**Stettin**

**universale  
BAU**

**STUAG**

**BM**

**TIEFBAU**  
Ges.m.b.H.



Gruppe

Proterra Umwelttechnik

Für die Lösung Ihrer Umweltprobleme...



...wählen Sie einen kompetenten Partner!

Von der Behördenvertretung bis zum Sanierungsabschluß vertreten wir Ihre Interessen.

**Proterra  
Umwelttechnik**

Tel. 0222/40 440-3300  
Gerasdorfer Straße 151  
A-1210 Wien

Koupon an obige  
Adresse  
senden!

Name: Hr./Fr. \_\_\_\_\_

Firma: \_\_\_\_\_

Adresse: \_\_\_\_\_

Telefon: \_\_\_\_\_

Ja, informieren Sie mich über folgende Dienstleistungen:

Tankstellensanierung

Mikrobiologische Sanierung (Bodenluftabsaugung)

Sanierung von CKW-Schäden

Grundstücksbewertung

Soforthilfe bei Ölunfällen

Grundwasserseisnerung