

Mitt. österr. geol. Ges.	76 1983	S. 141—160 5 Abb.	Wien, 15. Dezember 1983
--------------------------	------------	----------------------	-------------------------

Quellverhalten der Molassemergel im Pfänderstock bei Bregenz, Österreich

Expansion Behaviour of Molasse-Marls of the Pfänder near Bregenz/Austria

Von K. A. CZURDA und G. GINTHER¹⁾

Mit 5 Abbildungen

Zusammenfassung

Im Jahre 1980 wurde durch den Pfänderstock bei Bregenz der 6,7 km lange Autobahntunnel fertiggestellt. Schon während des Vollaubruches und auch noch nach der Sicherung durch Anker und Spritzbeton traten in bestimmten Mergel-Abschnitten Sohlhebungen bis zu 30 cm auf. Der Tunnel führt durch die Obere Meeresmolasse und durch untere Teile der Oberen Süßwassermolasse, den Zeitabschnitt vom „Burdigal“ (Eggenburgien) bis ins untere „Torton“ (Badenien) innerhalb des Miozäns umfassend.

Für die erhöhte Quellneigung bestimmter Mergelzonen sind vor allem zwei Parameter verantwortlich zu machen: der erhöhte Gehalt an Montmorilloniten (bis zu 30 %) und die gute Wasserwegigkeit durch Zerklüftung in Störungsbereichen. Quelldrucke über 2000 kN/m² treten auf.

Die Quellhebung wurde an ungestörten Proben senkrecht ss und an gestört eingebauten Proben (Presspillen) in einem Heraeus Dilatometer gemessen und der Quelldruck aus der Spannungs/Dehnungs-Kurve extrapoliert. Exorbitant hohe Quelldrucke an Proben aus den Störungsbereichen sind eher das Ergebnis der in hohen Druckbereichen unzureichend dimensionierten Versuchseinrichtung, zeigen aber sicher Quelldruckwerte an, die nicht nur den Gehalten an schwellbaren Tonmineralphasen zuzuschreiben sind.

Summary

In 1980 a highway tunnel, length 6,7 km, through the Pfänder mountain range near Bregenz/Austria was completed. The construction activities have begun with a pilot tunnel, excavated by a tunnelling machine. Already during excavating the full diameter

¹⁾ Adresse der Verfasser: Univ.-Doz. DDr. Kurt A. CZURDA, Dr. Gerold GINTHER, Geologisches Institut der Universität Innsbruck, A-6020 Innsbruck, Universitätsstraße 4.

by means of the NATM (New Austrian Tunnelling Method) and still lasting after anchoring and shotcrete lining, considerable swell heave, up to 30 cm, of the tunnel floor within certain marl sections, took place. The tunnel leads through the Upper Marine Molasse and lower parts of the Upper Freshwater Molasse, belonging to the "Burdigalian" (Eggenburgian), "Helvetian" (Ottningian and Karpatian) and lower "Tortonian" (Badenian) of the Miocene.

Responsible for the intensified swelling tendency of certain marl layers are two parameters: the higher montmorillonite contents (up to 30%) and the excellent drainage system through a net of fine fissures within fault regions. Swelling pressures higher than 2000 kN/m² are to be measured respectively calculated.

The swell heave was measured by means of an Heraeus dilatometer, using undisturbed samples, σ_1 vertical bedding planes or disturbed samples (pressed powder pills). From the strain/heave curves the final swelling pressures could be calculated. Unusual high swelling pressure values from samples out of the fault regions are rather due to the insufficient dimensions within higher strain rates of the testing machine, but prove for sure pressure values which are not solely attributed to swelling clays but to a fissure system as well.

Inhalt

Vorwort	142
1. Geologischer Überblick	143
2. Sedimentationsphase der Molassegesteine in Vorarlberg	144
2.1. Untere Meeresmolasse	144
2.2. Untere Süßwassermolasse	146
2.3. Obere Meeresmolasse	147
2.4. Obere Süßwassermolasse	148
3. Zur Frage der Entstehung der Montmorillonit-Horizonte	149
4. Petrographie der Molassemergel am Pfänder	150
5. Quellverhalten	152
5.1. Versuchsdurchführung	152
5.2. Berechnung der Quelldrucke	156
6. Diskussion der Ergebnisse	158
Literatur	160

Vorwort

Im Zuge des Ausbaues der Rheintalautobahn A 14 wurde nach langen Jahren der Planung und Entwicklung zahlreicher Trassenführungsvorschläge 1973 eine Entscheidung zugunsten eines Basistunnels durch den Pfänderstock gefällt. Das Südportal wurde in Bregenz-Weidach und das Nordportal in Lochau-Hofen lokalisiert. Zwischen diesen beiden Punkten durchörtert nun der zweispurige Tunnel in einem weiten Bogen alle Schichten der Molassegesteine des Pfänderstockes, da sie mehr oder weniger flach gegen NW einfallen.

Der gefräste Richtstollen erbrachte erste Untertage-Aufschlüsse über die geologischen Verhältnisse. In einer zweiten Ausbauphase wurde auf konventionelle Weise das Tunnelprofil auf den notwendigen Durchmesser erweitert. Der 6,7 km lange Tunnel wurde 1980 dem Verkehr übergeben. Der Tunnel wurde nach der sogenannten „Neuen Österreichischen Tunnelbaumethode (NÖTM)“ ausgebaut, d. h. vornehmlich durch Ankerung und Spritzbetonierung auf Baustahlgitter, gesichert.

Der Pfänderstock wird aufgebaut von Einheiten der Unteren Süßwassermolasse (USM), der Oberen Meeresmolasse (OMM) und der Oberen Süßwassermolasse (OSM), alles Schichtglieder, die der Stufe des Miozän innerhalb des Tertiärs angehören. Es handelt sich durchwegs um klastische Sedimente jeglicher Korngrößenzusammensetzung: Nagelfluhbänke wechsellagern mit Sandsteinen, Silten und Mergeln bzw. Tonen. Letztere, also feinkörnigen Einheiten, bereiteten nach dem Ausbau besondere Schwierigkeiten. Sie quollen bei Feuchtigkeitsaufnahme, d. h. sie vergrößerten ihr Volumen und bewirkten beträchtliche Sohlhebungen und Verbrüche von der Firste.

Mergel- und Sandsteinproben aus dem Tunnelprofil und Proben aus den Bohrkernen, die aus der Sohle der besonders aufquellenden Streckenabschnitte gewonnen wurden, sind petrographisch analysiert und auf Dilatometrie und Quelldruck getestet worden. Die Richtung der maximalen Quelldruckentwicklung steht im Einklang mit der Basalflächeneinregelung der Tonplättchen.

Vorliegende Arbeit wurde durch Mittel des Österreichischen Fonds zur Förderung der wissenschaftlichen Forschung, Projekt Nr. 3910, ermöglicht.

1. Geologischer Überblick

Vom frühen Oligozän an setzt aus den bereits herausgehobenen Alpen die Anlieferung großer Abtragungsschuttmassen durch die Alpenflüsse ein. Die Sedimentation erfolgte in eine Exogeosynklinale, die sich aus dem Restmeer der vorangegangenen Flyschperiode entwickelte und deren Trogachse ständig epirogentisch nach Norden wanderte.

Der Pfänderstock gehört dieser langgestreckten, ost-west-orientierten nordalpinen Molasse an, die ca. 50 km südlich Genf beginnt und über die Schweiz, Vorarlberg, Süddeutschland und Oberösterreich bis in den Raum nördlich Wien hineinreicht.

Die Sedimentationsgeschichte der Molasse begann vor etwa 30 Millionen Jahren zu einer Zeit, in der ältere Orogenphasen die eigentlichen Alpen bereits herausgehoben, gefaltet und z. T. deckenförmig überschoben haben. Damit war aber die Gebirgsbildung noch nicht zu Ende. Das erwähnte Wandern der Trogachse nach Norden gehört natürlich noch zur alpinen Orogenese. Dabei lag die Achse der Hauptsubsidenz stets näher den Alpen und verlieh so dem Molassestrog einen unsymmetrischen Querschnitt. Während im Miozän die Gesteine des Pfänderstockes sedimentierten, wurden die bereits im Oligozän weiter südlich gebildeten Molasse-Sedimente in die Pyrenäische Orogenphase mit einbezogen und aufgefaltet. Die jüngeren Schichtglieder entgingen zwar der Faltung, erfuhren jedoch eine Heraushebung und Schrägstellung.

Da die stratigraphische Stellung gemäß der Gliederung in der zentralen Paratethys auf Vorarlberg nur bedingt übertragbar ist, wurden, in Anlehnung an die Schweizer Geologen, die alten Stufenbezeichnungen beibehalten, jedoch unter Anführungszeichen gesetzt. Die neuere stratigraphische Bearbeitung gemäß STEININGER, F., et al., 1982

(Biostratigraphische Gliederungsmöglichkeiten im Oligozän und Miozän der Molasse-Zone Vorarlbergs, Docum. Lab. Géol. Lyon, H. S. 7, S. 77—85), ist erst nach Einreichen des Manuskriptes erschienen und konnte daher nicht mehr berücksichtigt werden.

Die Molasse in Vorarlberg teilt sich, je nach dem Grad der tektonischen Beanspruchung und daher auch nach dem Alter, in die ungefaltete Vorlandmolasse und die gefaltete subalpine Molasse. Die Grenze verläuft etwa von Bildstein nach NE über Doren nach Sulzberg und weiter ins Allgäu. Der Pfänderstock gehört somit der aufgerichteten aber ungefalteten Vorlandmolasse an.

Verschiedene Tiefbohrungen, in Österreich z. B. Perwang I und Urmannsau, haben eindeutig ergeben, daß die Molasse-Zone tektonisch von den verschiedensten Einheiten überlagert ist, z. T. direkt auf dem moldanubischen Kristallin aufliegt und zweifellos liegt der gesamte Flysch und das Helvetikum tektonisch auf der Molasse (KOLLMANN, K., 1977). Intensive Verfaltung und Überschiebungstektonik in der subalpinen Molasse Vorarlbergs hat auch die Tiefbohrung Dornbirn I erwiesen: unter einer 340 m mächtigen Quartärverfüllung des Rheintales wurden bis zur Endteufe von 2920,60 m zuerst steilstehende, dann flacher einfallende Schichten der unteren Meeressmolasse erbohrt.

Die Molasse-Serien im Gebhardsberg-Fluh-Bereich fallen steiler gegen NW ein als die weiter nördlich, d. h. durch das Aufbiegen der Schichtpakete gegen Süden versteilt sich der Fallwinkel von etwa 5° im Bereich Eichenberg—Möggers auf 25° am Gebhardsberg. Durch die Starrheit der Nagelfluhbänke kam es bei der Hebung zur Ausbildung etwa WSW streichender, steilstehender Brüche, die sich durch tiefeingeschnittene Bachläufe an der Oberfläche, plötzliche Änderung des Schichteinfallens und schlechteste Gebirgs-*güte*klassen im Autobahntunnel bemerkbar machen.

2. Sedimentationsphase der Molassegesteine in Vorarlberg

Der Begriff Molasse ist als geologisch-fazieller Terminus zu verstehen, nämlich als überwiegend klastische Sedimentserie, deren Sedimentationsphase zudem auf die Zeit nach der Heraushebung im Zuge einer Deckengebirgsorogenese einzuengen ist. Für den Fall der nordalpinen Molasse, von der hier die Rede ist, erfolgte die Einschüttung der Erosionsprodukte aus den bereits fertigen Alpen in der Zeit zwischen frühem Oligozän und älterem Pliozän in jenes Subsidenzbecken, das ca. 50 km südlich Genf beginnt und bis in den Raum nördlich Wien hineinreicht.

2.1. Untere Meeressmolasse (UMM)

Es handelt sich bei der UMM um Bildungen des Flyschrestmeeres, dessen Südküste entlang der aufsteigenden Alpen verlief, und die, bedingt durch die unterschiedlichen Hebungs- und Senkungstendenzen, teilweise fjordartig weit in die Alpen hineinreichte. Das Häringer Tertiär im Tiroler Unterinntal ist ein Beispiel dafür.

In den südlichen Beckenteilen wurde die Molasse in normaler stratigraphischer Abfolge über dem Flysch, der der Molasse vorangehenden synorogenen Tiefseebildung der Kreidezeit, sedimentiert. Nach TRÜMPY (1960) zeigt der alpine Flysch vier typische Merkmale: normal-marines Ablagerungsmilieu, turbidite Sedimentation, reichlich Lebensspuren in den Schichtgrenzen zwischen Sandsteinbänken und die typische Zusammensetzung der Sandsteine aus vorwiegend Kristallinkomponenten, detriti-

schem Karbonat, vulkanischen Gesteinsbruchstücken und aufgearbeiteten Großforaminiferen. Ganz allgemein ist dem Flysch ein viel eintönigerer Wechsel von bankigen bis plattigen Sandsteinen und Mergeln eigen. Auch gradierte Schichtung und Sedimentationsmarken auf den Schichtflächen sind im Flysch deutlich häufiger (BÜCHI & SCHLANKE, 1977).

Die UMM ist in Vorarlberg durch folgende Schichtglieder vertreten (RICHTER, M., 1978):

Oligozän	Chatt		UMM
	Rupel	Baustein-Schichten Tonmergel-Schichten	
	Lattorf	Deutenhausener Schichten	

Deutenhausener Schichten: Sie sind am Südrand der Molasse stellenweise und in geringer Mächtigkeit vorhanden. Graue Mergel, Sandsteine und gelegentlich eine Konglomeratzwischenschaltung sind zu erkennen. Die feinkörnigen Schichten sind reich an Sedimentationsmarken und bilden ein Äquivalent zum Flysch.

Tonmergel-Schichten: Es sind dunkelgraue Mergel mit Zwischenschaltungen von harten Kalkareniten. Die Mergel führen nur vereinzelte Makrofossilien. An Mikro-fossilien treten häufig Ostrakoden, seltener Foraminiferen auf. Sowohl aus der Fauna als auch aus den Sedimentationsverhältnissen kann auf das Ablagerungsmilieu geschlossen werden: flache Gewässer mit küstennaher Bildung der Kalkarenite. Besonders die Mergel lassen auf nur geringe Strömung schließen. Die vereinzelt auftretenden Konglomerat-schüttungen sind offensichtlich fluviatile Einflüsse, die, zusammen mit denen aus den Deutenhausener Schichten, den eigentlichen Beginn der Molasseschüttung darstellen.

Baustein-Schichten: Typisch sind die zähen, dickbankigen, groben Kalksandsteine von blaugrauer Farbe. Im unteren Abschnitt führen sie Konglomerate. Die Baustein-Schichten kündigen die Meeresregression an, die etwa westlich von München, also auch im Vorarlberger und Schweizer Anteil, schon im unteren Chatt einsetzt, während sie östlich München erst mit der Wende „Helvet/Torton“ deutlich wird.

Während des Rupel bestand über die sogenannte raurachische Senke bzw. das Rhône-Tal eine Meeresverbindung zwischen Molasse-See und Mittelmeer und auch zum pannonisch-pontischen Meer war eine Meeresverbindung geschaffen.

Zur Zeit des UMM-Meeres herrschte in den Vorarlberger und Schweizer Molasse-Anteilen ein deutlicher west-ost-gerichteter Materialtransport. In Süddeutschland entwickeln sich drei starke radiale Schüttungszentren aus den Alpen heraus: die Nagel-fluhschuttfächer Hochgrat, Nesselburg und Leitzach. Da sich alle drei östlich des Bodensees befinden, ist ihr Material infolge der nach Osten gerichteten Hauptströmung am Aufbau der Vorarlberger Molasse nicht beteiligt (LEMCKE et al., 1953).

2.2. Untere Süßwassermolasse (USM)

Der lithologische Aufbau der chattischen Schichten der USM ist lateral sowohl in West-Ost- wie auch in Nord-Süd-Richtung starken Schwankungen unterworfen.

Während in der süddeutschen Molasse die unteren Cyrenenschichten, die das unterste Chatt repräsentieren, noch in brackischem Milieu abgelagert wurden, hat sich östlich des Bodensees, also auch im Vorarlberger Raum, der Umschwung zur Süßwasserfazies bereits vollzogen. Ablagerungen limno-fluvioterrestrischen Charakters prägen die Schichtglieder. Sicher befindet sich der Ablagerungsraum der chattisch-aquitane Sedimente der Vorarlberger Molasse südlich der Achse der Hauptsubsidenz, also näher dem Alpenrand im Süden. Der tiefste Beckenteil hat sich nördlich im süddeutschen Raum befunden. Die Nordküste, die zur Zeit der Ablagerung der Baustein-Schichten (s. o.) noch quer über den Bodensee verlaufend, in Vorarlberg nach NE ausbiegend, dann deutlich südlich der Donau und parallel zu dieser befand, ist weiter nach N gewandert und verläuft nördlich des Bodensees, vom Rhein herüber streichend, nördlich der Donau (BÜCHI & SCHLANKE, 1977).

Die Weißach-Schichten, Steigbach-Schichten und die Granitische Molasse sind die Schichtkomplexe der USM in Vorarlberg. Sie verteilen sich altersmäßig wie folgt (RICHTER, M., 1978).

Miozän	Aquitane	Granitische Molasse Kojen-Schichten	USM
Oligozän	Chatt	Steigbach-Schichten Weißach-Schichten	

Typisch ist die Häufigkeit roter Farbtöne, vor allem bei den mergeligen Serien und im Bindemittel der Nagelfluhbänke.

Die roten Weißach-Schichten sind in ihren nördlichen Teilen als Mergel und Sandsteine ausgebildet. Im Süden stellen sich in steigendem Umfang Nagelfluhbänke ein. Der Hochgrat-Schüttungsfächer reicht mit seinem Westrand bis zur Subersach.

Die Steigbach-Schichten mit großen Nagelfluh-Mächtigkeiten im erwähnten Hochgrat-Fächer treten im östlichen Vorarlberg auf. Auch sie sind im Süden mit zunehmender Nagelfluhfazies rot gefärbt, während sie im Norden graue Farben zeigen.

Mit dem Aquitan wird die Schüttung aus dem Hochgratbereich besonders aktiv und es lagern sich grobe Nagelfluhbänke ab: die Kojen-Schichten. Auch diese sind im Süden rot gefärbt, während im Norden die Grautöne überwiegen und in die Granitische Molasse übergehen. Sie verdankt ihren Namen der reichlichen Feldspatführung, die Bestandteil der mächtigen Sandschüttung darstellt. Nur an ihrem Südrand hat die Granitische Molasse einige Nagelfluhbänke zwischengeschaltet.

Die Grenze Chatt/Aquitane bildet in der alpinen Orogenese jene Phase (savische Phase), während der die ersten Überschiebungen der Alpen über die südlichen Molasse-teile erfolgten. Z.B. erbohrte in Oberösterreich Perwang I unter alpinen Eingleit-

schollen chattische Molasse und in den Bohrungen Urmansau 1 und Berndorf 1 wurde diese Molasse des Egerien (Chatt-Aquitain) unter den Kalkalpen durchörtert.

2.3. Obere Meeresmolasse (OMM)

Das Binnengewässer wandelt sich erneut zum vollmarinen Milieu: das Meer transgredierte über das Rhône-Tal von Westen her in das Molassebecken. Von Osten drang es aus dem pannonisch-pontischen Binnenmeer gegen Westen. Das Verzahnungsgebiet der verschiedenen Transgressionen liegt in der Ostschweiz und im anschließenden Vorarlberg-süddeutschen Raum. Diese Transgressionen sind Ausdruck akzentuierter Senkungsbewegungen des Molassetroges an der Wende Aquitan-„Burdigal“ (Eggenburgien).

Die Schichtfolge der OMM in Vorarlberg ist von Geröllschüttungen und Sandeinschwemmungen beherrscht. Die Sequenzen sind insgesamt als marine, küstennahe Flachwasserbildungen anzusprechen. Terrestrische Bildungen, d.h. die Ausbildung geringmächtiger Kohlenflöze unterbrechen die grobklastischen Meeresablagerungen (RICHTER, 1978).

Miozän	„Helvet“ (Otnang-Karpat)	Nagelfluh und Sandstein Wirtatobel-Kohleflöz	OMM
	„Burdigal“ (Eggenburg)	Gebhardsberg-Nagelfluh Kanzelfelsnagelfluh Glaukonitsandstein Basisnagelfluh	

Da im „Burdigal“ (Eggenburgien) erstmals ein eigener Pfänderschuttfächer aktiv wird, muß auch schon die geringmächtige (bis 2 m) Basisnagelfluh, eine fossil belegte marine Bildung, diesem Schuttfächer zugeschrieben werden.

Die verhältnismäßig mächtige Glaukonitsandstein-Folge (bis 150 m) deutet auf ein leichtes Wandern des Schuttfächers hin, belegt aber durch den Glaukonitgehalt normal marine Ablagerungsverhältnisse. Typisch für diese Sandsteine ist auch ihre Epidot-Führung. Durch den Feldspatgehalt im unteren Abschnitt können Verwechslungen der Granitischen Molasse vorkommen. Überall im Stadtgebiet von Bregenz treten die Glaukonitsandsteine zu Tage. Auch das Südportal des Pfändertunnels wurde in ihm angeschlagen.

Die am „Känzele“, östlich des Gebhardsberges in Bregenz, wandbildende Konglomeratbank ist, als Kanzelfelsnagelfluh bezeichnet, durch das ganze nördliche Vorarlberg verfolgbar. Ihre Komponenten entstammen dem Pfänderfächer, doch sicher ist auch das Geröllspektrum der Hörnlischüttung im Osten mitbeteiligt. Generell sind häufiger wechselnde E- und W-gerichtete Lateralströmungen für den Sedimenttransport verantwortlich zu machen. Die fehlende Dominanz einer Lateralströmungsrichtung ist auf Kippungsbewegungen der Längsachse des Molassetroges zurückzuführen.

Die Kanzelfelsnagelfluh wird von Sandsteinen und geringmächtigen Mergeln überlagert, denen als nächstjüngere Konglomeratbank, ebenfalls Abbild der Aktivität des Pfänder-Schuttdeltas, die bis zu 30 m mächtige Gebhardsbergnagelfluh folgt. So wie schon Basisnagelfluh und Kanzelfelsnagelfluh ist auch das Gebhardsbergkonglomerat hauptsächlich von Flyschgeröllen geprägt. Typisch und seit langem bekannt ist am Gebhardsberg die Austernbank aus *Ostrea gryphoides*, die Steilküstenfazies mit starker Brandung anzeigt. Auch andere Ostreen sind in den Konglomeratbänken immer wieder zu finden: *Ostrea crassissima* und *Ostrea gingensis*.

Hangend der Gebhardsbergnagelfluh finden die vorher wirkenden akzentuierten Senkungsbewegungen und weiträumige Transgressionen eine Unterbrechung, wobei durch kurzfristige Regressionen abgeschlossene Lagunen entstehen. Diese süßten zeitweilig völlig aus bzw. verlandeten. Für die Uferzonen ist üppiger Pflanzenwuchs anzunehmen und der Schluß auf warmes, feuchtes, subtropisches Klima liegt nahe. Das Wirtatobel-Pechkohlenflöz fand in diesem Milieu seine Ausgangsmaterialien. Der Süßwassercharakter wird durch eine begleitende Süßwasser- und Landschneckenfauna unterstrichen: *Planorbis*, *Helix*, *Clausilia*.

Über dem Flöz folgen wiederum marine Schichten, und zwar graublau und gelbe Mergel, eine Nagelfluhbank, schwarze Mergel, plattige Sandsteine und erneut eine Nagelfluhlage, besonders die Mergel führen eine reiche Mikrofossilfauna. Die Zeitstufe des „Helvet“ (Ottngangien-Karpatien) ist belegbar. Diese Flöz-Hangendschichten stehen knapp über der „Fluh“ an, die Verebnung der Fluh selbst wird durch die gegen Osten ansteigende Gebhardsbergnagelfluh gebildet (CZURDA, 1977).

2.4. Obere Süßwassermolasse (OSM)

Die OSM umfaßt das „Torton“ (Badenien), Sarmat und tiefere Teile des Pannon. In Vorarlberg, und zwar am Pfänderstock ist nur das „Torton“ (Baden) vertreten. Es wird hier bis zu 700 m mächtig und baut die Hauptmasse des Pfänders und seiner NW-Abhänge auf.

An der Wende „Helvet“—„Torton“ (Karpat-Baden) kommt es zu einem Rückzug des OMM-Meeres, die Verbindungen zu den Weltmeeren werden erneut unterbrochen und die Reliefdifferenzen zwischen Alpenkörper und Vorlandtrogl sind nicht mehr so deutlich ausgebildet. Dadurch kommt es zu einer Drosselung der Schüttungen aus den Alpen. Die Zufuhr von Glimmersanden aus dem Osten überwog. Doch in den höheren Anteilen zeichnen sich dann bald wieder Geröllabfuhrungen aus dem Alpenkörper ab; insbesondere die aus der Flyschrandkette kommende sogenannte Bodenseeschüttung und auch die Hochgratschüttung, mit einem Einzugsgebiet weiter innerhalb der Alpen, werden aktiv. Über den Mergeln und Sandsteinen entwickeln sich erneut mächtige Nagelfluhbänke (BÜCHI, 1958). Die mächtigen Konglomeratlagen des Pfänders, die der OSM angehören, zeigen deutlich die zunehmende Tendenz der Geröllschüttungen, die die endgültige Verlandung der nördlichen Alpenvortiefe eingeleitet haben (CZURDA, 1977).

Miozän	„Torton“ (Baden)	Süßwassermergel Sandsteine Nagelfluh	OSM
--------	---------------------	--	-----

Bei von Osten nach Westen vorherrschenden Materialströmen kommt es zu einer Korngrößen-sortierung, die schon im Bodenseeraum, verstärkt noch in der Ostschweiz, vorherrschend Silte und Tone anliefert und absetzt. Nur sporadisch wirken sich die Flußschüttungen vor allem des Hochgrat-, Bodensee-, Hörnli- und Napf-Schuttfächer aus. Die feinklastische Sedimentation überwiegt. Eine stratigraphische Untergliederung der OSM des Pfänderbereiches ist noch nicht gelungen. Allerdings erbrachten die vorliegenden Untersuchungen Leithorizonte in den Mergeln, die sich durch besonderen Reichtum an Montmorilloniten, einem expandierenden, ultrafeinen Tonmineral, auszeichnen.

3. Zur Frage der Entstehung der Montmorillonit-Horizonte

Montmorillonite können als Verwitterungsprodukte aus Kristallingesteinen oder Tonschiefern entstehen, indem die Schichtsilikate dieser Gesteine in ihre Gitterbestandteile „zerfallen“ und sich zu diversen Tonmineralen, eben auch zu Montmorilloniten, neu aufbauen. Vielfach aber sind Montmorillonite Produkte umgewandelter vulkanischer Aschen und bei höheren Anteilen an schwellbaren Tonmineralen ist jedenfalls eine mögliche vulkanogene Abstammung zu überlegen.

Ein gut nachweisbarer Bentonit-Horizont (zu mehr als 80 % aus Montmorillonit bestehend) ist in der Schweiz und im süddeutschen Raum zu verfolgen. Im westlichen Schweizer Jura ist es der Bentonit der Tertiärmulde von Le Locle, im Hegau ein entsprechender Horizont hangend der Öhninger Schichten s. str., der sich bis Niederbayern durchverfolgen läßt, und schließlich weiter südlich, in der Schweizer mittelländischen Molasse hangend des sog. „Appenzeller Granits“, derselbe Horizont nachzuweisen. Für diese Bentonit-Zone ist die Wende „Torton“/Sarmat nachgewiesen (BÜCHI, 1958).

Die Entstehung ist eindeutig vulkanischen Aschenauswürfen zuzuschreiben und für den Hegau-Bentonit sind die zugehörigen Vulkane und ihre Aktivität ja genau bekannt (SCHREINER, 1974). Weiter entfernt von der Hegau-Aktivität, sowohl westlich wie östlich, können windvertrifete Aschenregen altersgleiche Aschenlagen entstehen, doch sind auch petrographisch abweichende Horizonte bekannt, die von viel weiter her stammen müssen. Eifel, Königstuhl oder Auvergne bieten sich als Ausbruchsorte an. Auch in der oberösterreichischen Molasse sind altersgleiche Montmorillonithorizonte nachgewiesen (CZURDA, 1978).

Ob nun die Montmorillonit-reichen Mergellagen der OSM des Pfänderstockes vulkanischen Aschenregen zuzuschreiben sind, wäre petrographisch und altersmäßig zu belegen. Der Montmorillonitgehalt geht in den untersuchten Proben, die den am stärksten aufquellenden Horizonten entnommen sind, nicht über 30 % hinaus (semi-quantitativ bestimmt nach der Methylenblau-Adsorptionsmethode), was bei weitem nicht einem Bentonit entspricht. Vulkanische Glaspartikel konnten nicht gefunden werden. Der vielfach hangend den eigentlichen Bentonit begleitende Glastuffhorizont (besonders bei Bischofszell) ist auch andeutungsweise nicht nachzuweisen. Aufgrund der Mächtigkeitsverhältnisse, allerdings noch nicht fossil belegt, müssen diese Mergel eher dem unteren Torton zugerechnet werden, wodurch auch eine Gleichaltrigkeit mit dem

Hegau-Vulkanismus oder mit dem vulkanischen Ereignis von Bischofzell nicht rekonstruiert werden kann.

Allerdings soll, gerade wegen der nicht gesicherten Altersfrage, noch nicht andgültig über die Genese der Montmorillonitlagen am Pfänder geurteilt werden. Immer noch bleibt die Möglichkeit einer vulkanischen Entstehung offen, die, wegen der Lage des Pfänders in der Knickungsfurche zwischen Ostalpenbogen und Schweizer Alpenbogen, immer noch auf der Hand zu liegen scheint. Diese Trennungsfurche, die von der venetianischen Tiefebene durch Alpenrheintal und Bodensee bis zum Hegau reicht, hat eine Häufung vulkanischer Erscheinungen hervorgebracht: die Jungtertiären Vulkane der Colle Euganei, die mesozoischen Eisenerze des Gonzen, die Fluorit-Gänge im Säntisgebirge, der erwähnte Bentonit-Aschenregen der Ostschweiz, die Thermen von Bad Ragaz und die Mineralquellen von Schuls-Tarasp.

4. Petrographie der Molasse-Mergel am Pfänder

Die gegenständliche Untersuchung umfaßt Mergel-Proben entlang der gesamten Tunnelstrecke, so daß sowohl die OMM als auch die OSM erfaßt wurde.

Die etwa 630 m mächtige Abfolge der OMM entlang der Tunnelstrecke vom Südportal bis etwa km 4,0 setzt sich überwiegend aus Grobklastika zusammen: Glaukonit-sandstein und die diversen Nagelfluhabfolgen. Das Wirtatobel Kohleflöz bei km 2,25 und die weitere Kohlelage bei km 2,9 ist von Mergeln überlagert und in den hangendsten 30 m des Helvet (falls man sich an der vermuteten „Helvet“/„Torton“-Grenze bei km 4,0 orientieren will) treten in ständigem Wechsel zwischen Sandsteinbänken und dünnen Konglomeratlagen gehäuft Mergelschichten auf. Erhöhte Montmorillonit-Gehalte, nämlich zwischen 20 und 26 % (Gew.-% am Gesamtgestein) konnten in den Proben der Bohrung bei km 3,40 und 3,85 festgestellt werden. Unter Berücksichtigung des Einfallens kommen diese Mergel ins Liegende der Wirtatobel Kohle. In der Bohrung bei km 3,4 reichen die erhöhten Montmorillonit-Gehalte bis zur Endteufe bei 11 m. In diesem Bereich dürfte es zu Versetzungen infolge einer Bruchstörung gekommen sein. Dieselben Schichten trifft man in der Bohrung bei km 5,75 in einer Teufe von 5—6 m und bei km 6,21 bei der Endteufe von 7 m wieder an. Sie sind also noch ins oberste „Helvet“ zu stellen, ihre Quellfähigkeit dürfte sich an der Tunnelsohle wegen der zu großen Überlagerung nicht mehr auswirken.

Wegen des flachen Einfallens ($\pm 5^\circ$) der OSM-Schichten am Rücken nördlich des Pfändergipfels — im Tunnel etwa von km 4,0 bis zum Nordportal bei 6718 m — und nicht wegen eventueller großer Mächtigkeiten verläuft die Tunneltrasse — abgesehen von kürzeren Mergelstrecken um km 4,5 bzw. km 4,8 — zwischen km 5,23 und km 6,5 in Mergeln bzw. Mergelsandsteinen. Diese Zone, die einer Mächtigkeit senkrecht ss von höchstens 20 m entspricht (gesamte vom Tunnel durchhörte Mächtigkeit senkrecht ss der OSM ca. 40 m) hat Montmorillonit-Gehalte zwischen 15 und 25 %. In diesem Bereich kommt es auch zu erhöhter Schwellbereitschaft. Zusätzlich dürfte etwa um km 5,6 noch eine \pm vertikale Verwerfung zur erhöhten Schwellung beitragen.

Die Mergel-Sedimentation hat sich in den jüngeren Ablagerungen, entsprechend dem Pfänderabhang nördlich Schloß Hofen bis über die Staatsgrenze hinaus fortgesetzt, doch sind diese Mergel noch nicht untersucht. Jedenfalls stellt die beschriebene nörd-

Tunnel km	Mächtigkeit	Säulenprofil	Gesteinstype	Zeitstufe	Molasse-Milieu
-----------	-------------	--------------	--------------	-----------	----------------

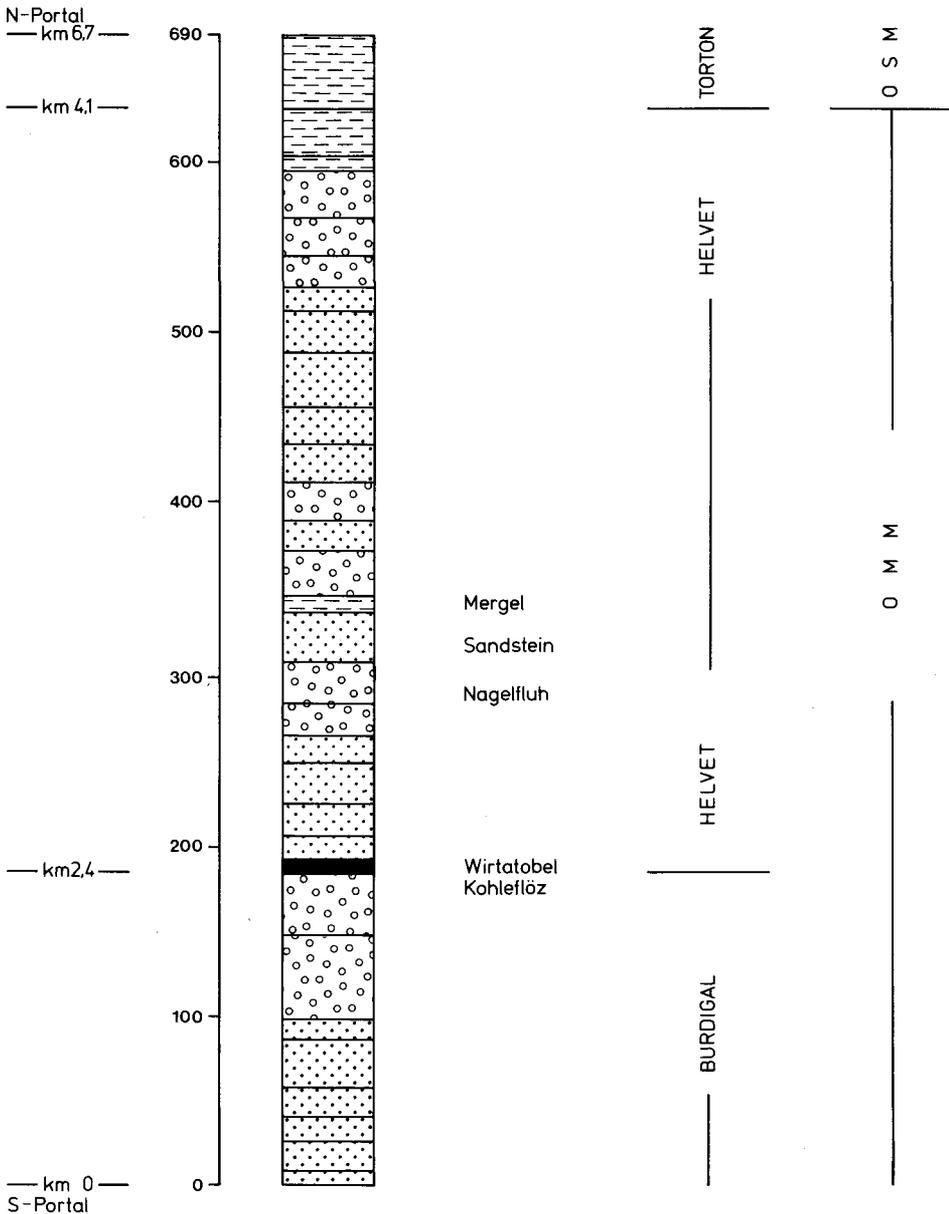


Abb. 1: Idealisiertes Säulenprofil der Serien der OMM und OSM (Eggenburg bis Baden) entlang der Pfändertunnel-Strecke.

Fig. 1: Idealized column section of the Upper Marine- and the Upper Freshwater Molasse units through the Pfänder tunnel (Eggenburgian to Badenian).

lichste Mergelstrecke bis zum Nordportal bei Lochau-Hofen das älteste „Torton“ (OSM) dar, und von der Grenze zum Sarmat ist man am Nordportal des Pfändertunnels noch weit entfernt: mindestens 600 m Mächtigkeit senkrecht ss, wenn man der Gesamtmächtigkeitsangabe von 700 m nach M. RICHTER (1978) folgt.

Außer den oben behandelten Montmorilloniten bestehen die Mergel, abgesehen von der Hangendschichte des Kohleflözes, zu höchstens 60 %, im Schnitt jedoch um nur 40 % aus Tonmineralen. Illit, Kaolinit und Montmorillonit sind die Haupttonmineralphasen, Chlorit tritt in einigen wenigen Schichten mit geringen %-Anteilen hinzu. Die restlichen Mineralphasen setzen sich aus Kalzit, Dolomit, Quarz und Feldspat (vorwiegend Plagioklas) zusammen.

In Abb. 1 ist ein idealisiertes Säulenprofil der wahren Mächtigkeiten der OMM und OSM entlang der Pfändertunnelstrecke dargestellt.

5. Quellverhalten

Aus aktuellem Anlaß, d.h. wegen beträchtlicher Sohlhebungen (bis 30 cm) und stellenweiser Verbrüche von der Firste, sind an Proben aus dem Pfändertunnel, z. T. Proben aus Kernbohrungen in der Sohle, von verschiedener Seite Quellhebungs- und Quelldruckmessungen bzw. Quelldruck-Berechnungen angestellt worden: F. T. MADSEN (frdl. mündl. Mittlg.), PREGL et al. (1980), E. H. WEISS et al. (1980).

Die Methodik der drei unabhängig voneinander arbeitenden Teams (MADSEN, PREGL-WEISS und CZURDA-GINTHER) war unterschiedlich. Größenordnungsmäßig konnte für die Quelldrucke jedoch gute Übereinstimmung erzielt werden, wenn auch einzelne von uns getestete Proben, die wir Störungsbereichen zuordnen, deutlich höhere Werte gemessen bzw. extrapoliert wurden.

5.1. Versuchsdurchführung

(GINTHER, G., 1982). Die Versuche zur Bestimmung der Quelldehnung wurden an einem Dilatometer, TMA 500, der Firma Heraeus durchgeführt, die Steuerung und Aufzeichnung erfolgte am Steuergerät TA 500 S/2. Untersucht wurden ungestörte Proben in Form von kleinen Bohrkernen (Probenlokalitäten siehe Abb. 2, Pfänder-Tunnelprofil), mit einem Durchmesser von 5 mm bei verschiedenen Belastungen: 0–300 kN/m² (Abb. 3), sowie gemahlene und zu Pillen verpreßte Proben und daneben eine Reihe von verschiedenen Standards (z. T. in Mischreihen mit Quarz). Die zylinderförmigen Proben wurden an den Basalflächen plan geschliffen und dann mehrere Stunden bei 50–60°C im Ofen getrocknet. Die trockenen Proben wurden auf einem Filterstein im Dilatometer eingebaut und zwischen 16 und 144 Stunden (6 Tage) der Wasserzufuhr bei einer konstanten Temperatur von 25°C ausgesetzt. Die großen Zeitunterschiede in der Versuchsdauer rühren daher, daß die Größe der Probenkörper variierte, und daß die Dehnung abhängt von der Korngrößenverteilung der Proben, somit die Dehnung bei kleinen, grobkörnigen Proben schon nach wenigen Stunden abgeschlossen war. 4–6 Stunden nach Abklingen der Quellung wurde der Versuch beendet. Die konstante Temperatur wurde gewählt, da große Temperaturschwankungen in einem Tunnel nicht angenommen werden können. Zur Quellung wurde

Abb. 2: TUNNELPROFIL 1 10000 mit PROBELOKALITÄTEN

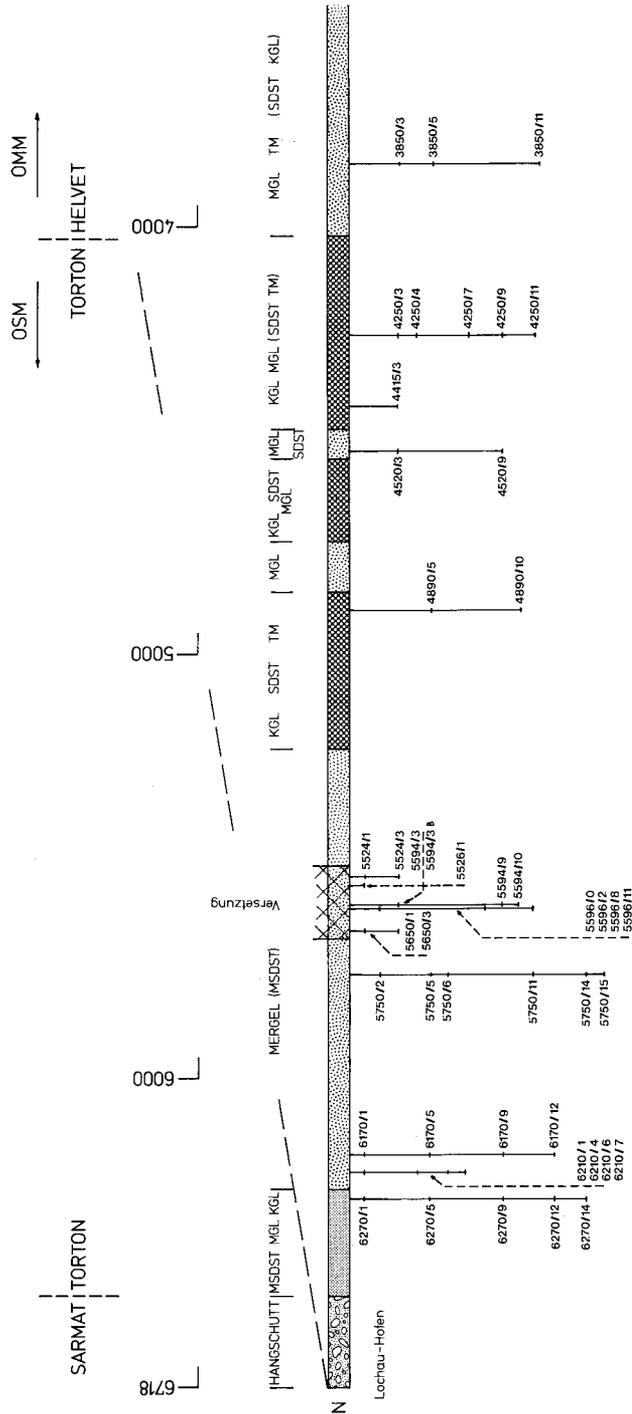


Abb. 2: Pfänder-Tunnelprofil 1: 10.000 mit Probelokalität der Kernbohrungen.

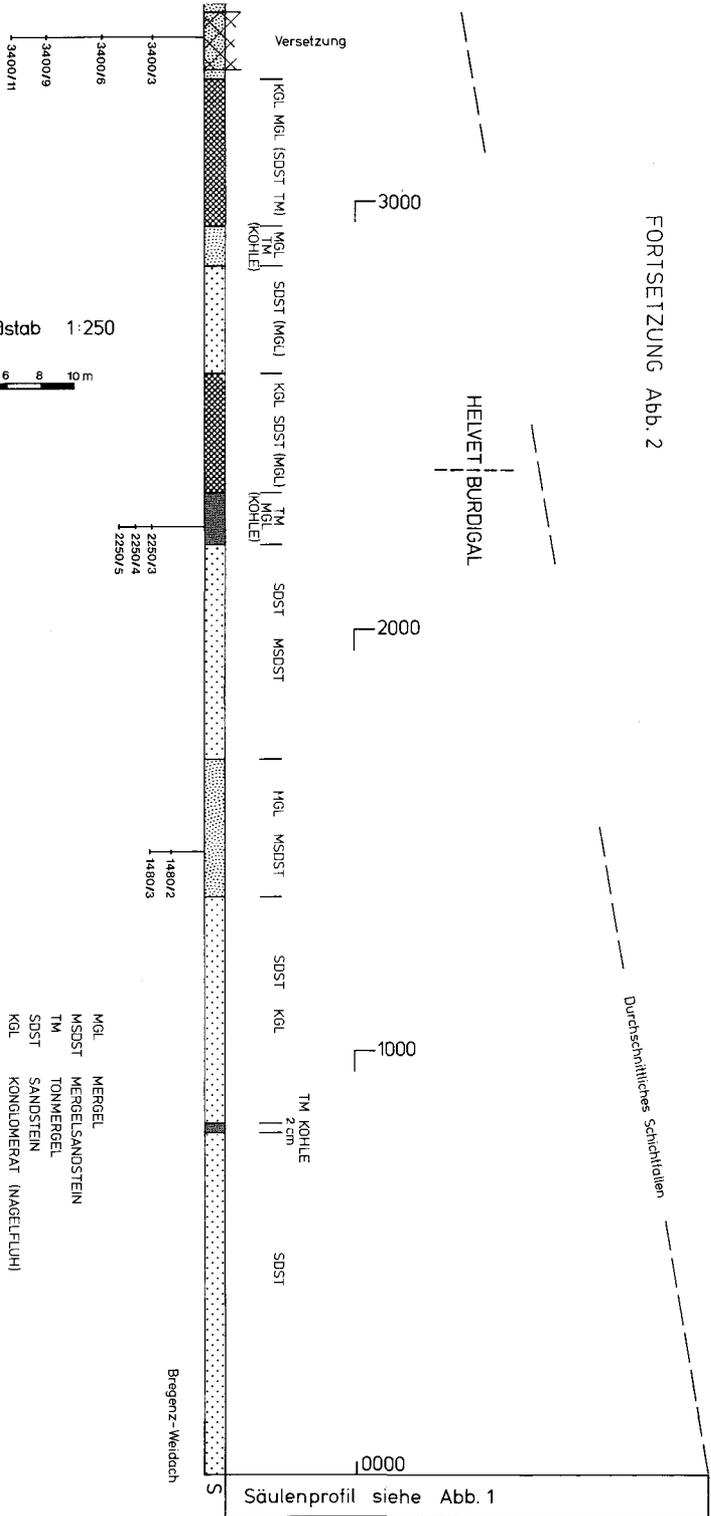
Fig. 2: Geological section through the Pfänder tunnel showing petrographical units and sample localities within boreholes. Scale 1: 10.000.

FORTSETZUNG Abb. 2

HELVET | BURDIGAL

Durchschnittliches Schichttafeln

Vertikalmaßstab 1:250



destilliertes Wasser verwendet. Versuche mit Lösungen verschiedener Salze (MgCl, NaCl, KCl) erbrachten keine befriedigenden Ergebnisse und wurden daher nicht weiter verfolgt. Das heißt nicht, daß kein Unterschied besteht, wenn die Proben mit verschiedenen Lösungen behandelt werden, aber die Unterschiede sind so gering, daß sie innerhalb der Fehlergrenze der Versuchsdurchführung liegen. Um den Quelldruck zu ermitteln, wurden die Proben bei verschiedenen Belastungen zur Quellung gebracht. Aus den daraus resultierenden unterschiedlichen Dehnungen wurden die Quelldrucke über die Kurven Belastung/Dehnung errechnet. Eine experimentelle Bestimmung der Quelldrucke konnte mit dem TMA 500 nicht erreicht werden, da das Gerät nur eine Belastung der Proben bis $\pm 300 \text{ kN/m}^2$ zuläßt, und damit eine vollständige Unterdrückung der Quellung nicht möglich ist. Aus dem Verlauf der Kurven in Abb. 4 ergibt sich ein sehr starkes Abnehmen des Quelldruckes in den ersten Bereichen der Quellung, d. h. es sind relativ hohe Drucke notwendig, um eine vollständige Unterdrückung der Dehnung zu erreichen; läßt man jedoch eine geringe Dehnung von ca. 1—2 % zu, so kann die weitere Dehnung mit wesentlich kleineren Spannungen verhindert werden. Diese Beobachtung wurde auch von HUDER & AMBERG (1970) u. a. gemacht und mit der bekannten Erscheinung, daß die innerste Wasserhülle (etwa eine Molekülschicht dick) am stärksten gebunden ist, begründet. Aus Abb. 4 geht auch ganz klar die Abhängigkeit der Dehnung vom Montmorillonit-Gehalt hervor. Die Proben mit wenig Montmorillonit verlaufen dichter am Ursprung als diejenigen mit höherem Montmorillonit-Gehalt. Diese Abhängigkeit wurde auch mit einem Bentonitstandard (Bentonit von

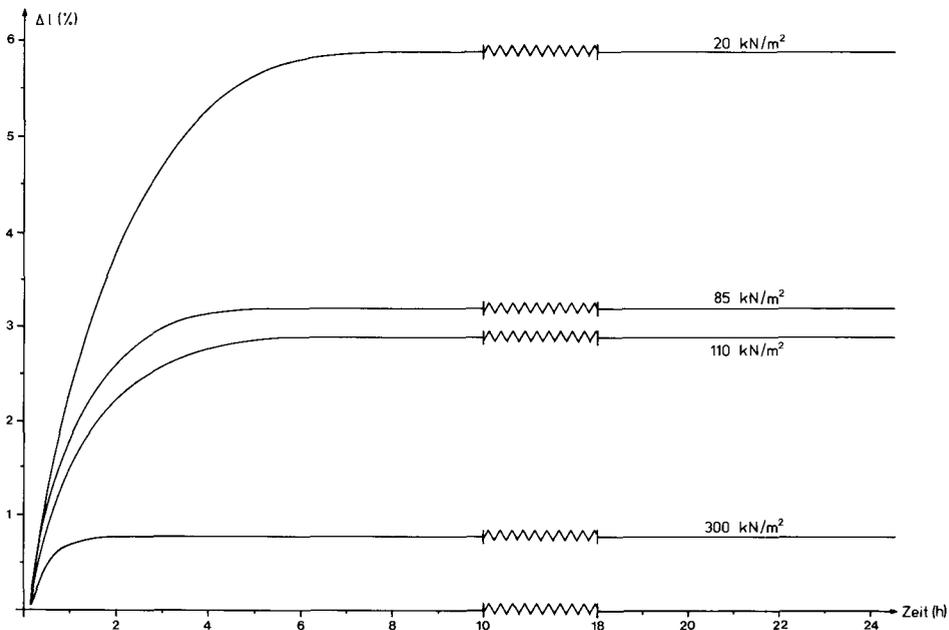


Abb. 3: Quelldehnung einer Probe aus den OSM-Mergeln bei km 5,65 bei verschiedener Belastung.

Fig. 3: Swell heave of a sample from the Upper freshwater Molasse at km 5,65 at different normal stresses.

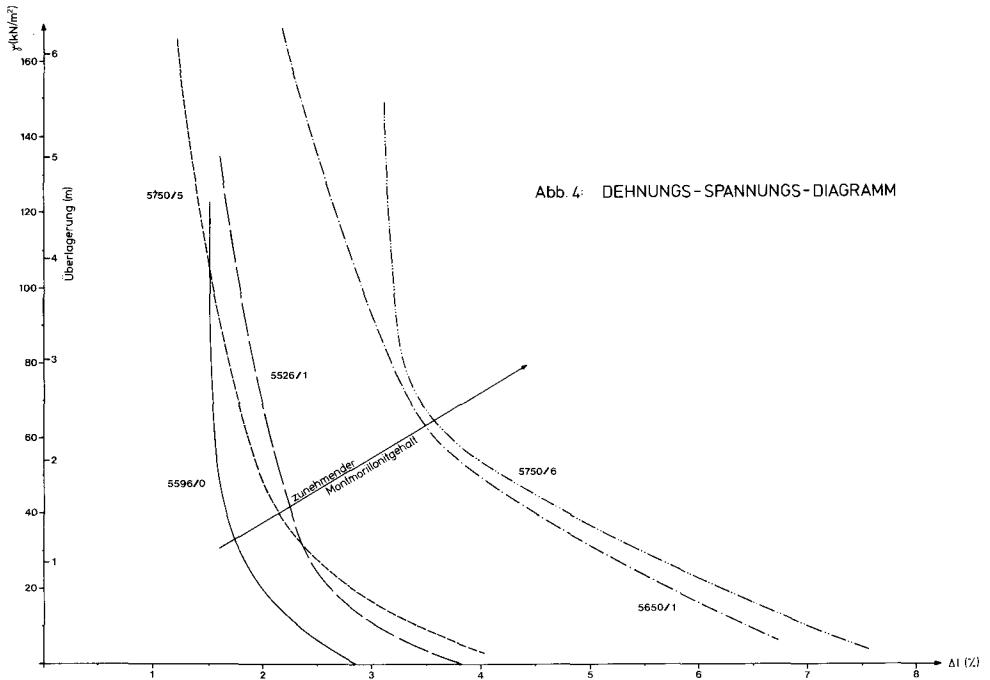


Abb. 4: Abhängigkeit der Quelldehnung von Belastung und Montmorillonit-Gehalt.

Fig. 4: Dependence of the swell heave from normal stress and montmorillonite content.

Wyoming) mit Quarzzusatz nachgewiesen. Der Standard wurde in verschiedenen Verhältnissen mit Quarz vermischt und dann der Wasserzufuhr im Dilatometer ausgesetzt. Dabei konnte festgestellt werden, daß reiner Bentonit (84% Montmorillonit) eine Dehnung von ca. 70% (Mittelwert aus drei Messungen) aufweist. Dieser Wert ging bei steigendem Zusatz von Quarz bis auf 14% bei einer Zusammensetzung von 10% Bentonit und 90% Quarz zurück.

5.2. Berechnung der Quelldrucke

(GINTHER, G., 1982). Die Höhe des Quelldruckes bzw. das Ausmaß der Quelldehnung wird natürlich vom Überlagerungsdruck kontrolliert. Im Versuch wird dies durch unterschiedliche Auflasten simuliert. Durch die Begrenzung des Gerätes bezüglich Auflast konnte eine komplette Unterdrückung der Quellung und somit eine experimentelle Bestimmung des Quelldruckes nicht erreicht werden. Die semilogarithmische Darstellung im Dehnungs/Spannungs-Diagramm (Abb. 5) wurde gewählt, da auf diese Weise ein Vergleichen der Proben leichter möglich ist als bei einer Darstellung mittels hyperbolischer Kurven (vgl. Abb. 4), die sich ergibt, wenn Druck und Dehnung linear aufgetragen werden. Die errechneten Geradengleichungen stellen die lineare Regression der experimentell bestimmten Punkte (Druck/Dehnung) dar. In Abb. 5 sind durch verschiedene Steigungswinkel klar zwei Scharen von Geraden zu unterscheiden. Die ungewöhnlich hohe Quellung der Proben der Gruppe B bedarf einer Interpretation.

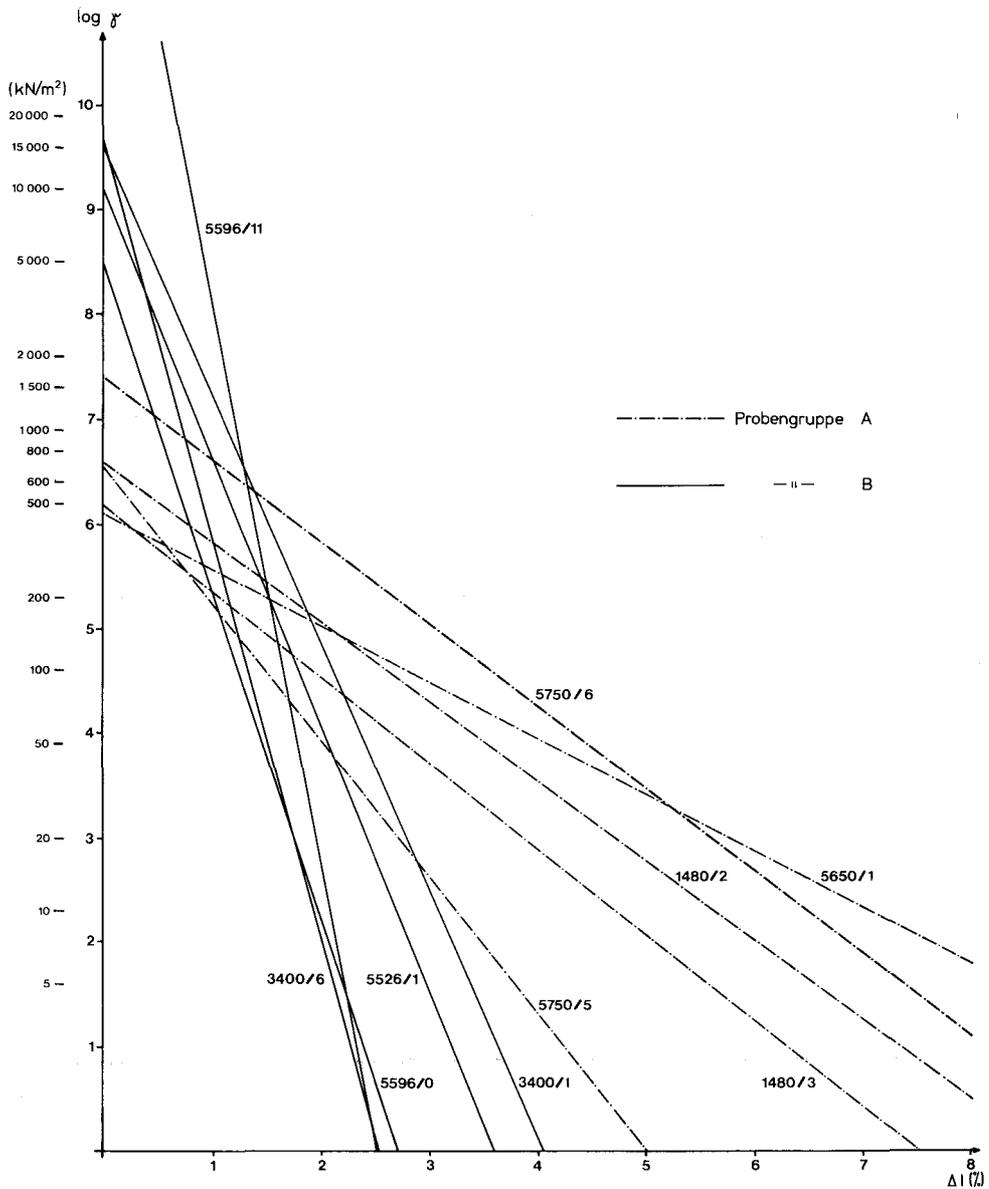


Abb. 5: Dehnungs/Spannungs-Diagramm. Abhängigkeit der Quelldehnung von der im Versuch aufgebrauchten Normalspannung.

Fig. 5: Stress/strain-diagram. Dependence of swell heave from normal stresses under dilatometric test conditions.

Die Quellung setzt sich aus zwei Mechanismen zusammen: H_2O -Einbau ins Zwischengitter der Montmorillonite und H_2O -Adsorption an den Kornoberflächen. Als gesichert kann gelten, daß die Quellung mit der H_2O -Adsorption im Porenraum ihren Anfang nimmt, da dadurch ja auch erst die Wasserzufuhr für den Einbau ins Zwischengitter gegeben ist. Diese Wasseradsorption ermöglicht und beschleunigt die von HUDER & AMBERG beschriebene Entlastungsdeformation, die um so stärker ist, je größer die Vorbelastung war, und erst dann unterbleibt, wenn es zu direktem Kornkontakt und damit zur Ausbildung von chemischen Bindungen kommt. Um einen Korn-an-Korn-Kontakt von Tonmineralen zu erreichen, bedarf es aber eines Druckes von $\geq 550 \text{ MN/m}^2$ (LAMBE & WHITMAN, 1979), der im Pfänder sicher nie erreicht wurde. D.h. also, daß es bei allen Proben sicher zu einer Entlastungsdeformation kommen konnte. Diese Entlastungsdeformation ist natürlich dann größer, wenn die Proben vor dem Versuch mit der TMA 500 einer stärkeren Wasserzufuhr ausgesetzt waren. Die Proben der Gruppe B entstammen den beiden Störungszonen, die sich vor Ort durch stärkere Zerrüttung und Versetzungen und durch erhöhte Sohlhebung ausgezeichnet haben. Die Proben mit den deutlich höheren Quelldruckbeträgen (aber nicht auffallend höheren Montmorillonit-Anteilen) entstammen den Bereichen mit stärkerer Zerklüftung und damit besserer Wasserwegigkeit und Wasserzufuhr. Das heißt weiter, daß bei den Proben der Gruppe B die Quellung durch die H_2O -Adsorption an den Kornoberflächen im Dilatometerversuch relativ geringer war als bei den Proben A. Der zweite Anteil an der Quellung, der Wassereinbau ins Zwischengitter, ist bei beiden Gruppen ähnlich (siehe auch Mineralbestand) und konnte zudem bei beiden Gruppen im Experiment mit dem Dilatometer nur zum Teil unterdrückt werden.

Durch die geringere Entlastungsdeformation der Gruppe B-Proben (ein Teil der Entlastungsdeformation spielte sich schon vor der Probenentnahme im Tunnel ab), aber die ähnlich starke Quellung durch den Wassereinbau ins Schichtgitter, kommt es bei der Berechnung der linearen Regression zur Ausbildung von sehr steilen Geraden, die einen viel zu hohen theoretischen Quelldruck vortäuschen. Bei den Geraden dieser Gruppe muß mit an Sicherheit grenzender Wahrscheinlichkeit mit einem Knickpunkt bei einer Dehnung von 1—2 % und Drucken von ca. 1500 kN/m^2 gerechnet werden. Die restliche Dehnung von eben jenen 1—2 % kann nach Meinung der Autoren sicher mit Drucken von $1500\text{—}200 \text{ kN/m}^2$ unterdrückt werden.

6. Diskussion der Ergebnisse

Eine Abhängigkeit der Quellung von Mergeln von verschiedenen Parametern konnte festgestellt werden. Diese Parameter, z. T. von MIELENZ & KING (1955) u. a. ebenfalls beschrieben oder vorgeschlagen, sind:

A. Gesamtgehalt und Art der Tonminerale:

Ganz allgemein gilt, daß das Maß der Quelldehnung und des Quelldruckes mit steigendem Gehalt an Tonmineralen zunimmt. Diese Zunahme ist um so größer, je größer der Anteil an Montmorillonit oder anderen quellbaren Phasen, wie z. B. Vermiculit, ist (Abb. 4). Die große Bedeutung des Montmorillonits gründet sich auf die mineralspezifischen Eigenschaften dieses Tones, der einmal H_2O ins Zwischengitter ein-

zubauen vermag, und zum zweiten durch die riesige spezifische Oberfläche von zirka $800 \text{ m}^2/\text{g}$ sehr viel Wasser adsorbieren kann, und damit eine große Volumszunahme bewirkt.

B. Textur

Wie der Gehalt an Tonmineralen spielt auch deren Verteilung und Orientierung im Raum eine entscheidende Rolle für das Ausmaß von Dehnung und maximalem Quelldruck. An mehreren Proben konnte gezeigt werden, daß die maximale Dehnung senkrecht ss auftritt, und damit auch in dieser Richtung die größten Quelldrucke zu erwarten sind. Eine Ausdehnung in b-Richtung der Schichtsilikate kann vernachlässigt werden (RAVINA & LOW, 1977). Da die in den Mergeln auftretenden Schichtsilikate gut eingeregelt sind, ist hier mit einer starken Anisotropie zu rechnen.

D. Diagenesegrad

Ein schwer abzuschätzendes, doch sicherlich das Quellverhalten stark beeinflussendes Kriterium ist der Grad der Diagenese durch die Überlagerung. Die von HUDER & AMBERG (1970) angeführte Entlastungsdeformation hängt ab von der Vorbelastung, d. h. je größer die Vorbelastung, desto größer die Entlastungsdeformation. Auf die Diagenese übertragen heißt dies, daß bis zu einem bestimmten Überlagerungsdruck (etwa jene von LAMBE & WHITMAN beschriebenen $550 \text{ MN}/\text{m}^2$) die Quellung bei gleichem Mineralgehalt, gleicher Korngrößenverteilung, gleicher Zementation usw. stets zunimmt, bis ein Grenzwert erreicht wird, ab dem es zur Ausbildung von Korn-an-Korn-Kontakten mit den zugehörigen chemischen Bindungen und damit einem Kleinerwerden (oder totem Unterbleiben) der Quellung kommt.

E. Wasserwegigkeit, Zusammensetzung der Wässer:

Die von MIELENZ & KING beschriebene Abhängigkeit der Quellung vom Elektrolytgehalt der Porenwässer konnte mit dem Dilatometer nicht nachgewiesen werden, da die Unterschiede in der Dehnung bei Verwendung verschiedener Lösungen zu gering waren, um definitive Aussagen treffen zu können.

Eine Abhängigkeit der Dehnung von der Wasserwegigkeit hingegen kann als sicher gelten, und zwar in der Weise, daß der zeitliche Ablauf der Dehnung von der Geschwindigkeit der Wasserzufuhr beeinflusst wird. Das heißt, daß zwar das absolute Quellausmaß, sofern es zu einer Wassersättigung kommt, nicht von der Geschwindigkeit der Wasserzufuhr abhängt, daß aber das Langzeitverhalten stark davon beeinflusst wird (Klüftung, Wasserdurchlässigkeit). Diese banal erscheinende Feststellung gewinnt an Berechtigung, wenn man bedenkt, daß das Langzeitverhalten eines Gebirges in der angewandten Geologie von größtem Interesse ist. Nimmt man einen maximalen Quelldruck von $1000 \text{ kN}/\text{m}^2$ an und ein durchschnittliches spezifisches Gewicht von $2,5/\text{cm}^3$, so ergibt sich eine 40 m mächtige Gesteinsschicht, die zur Quellung beiträgt, d. h. bei einer Wasserdurchlässigkeit von 10^{-3} bis $10^{-7} \text{ cm}/\text{sec}$ (Werte für Mergel nach CASAGRANDE & FADUM, 1940) dauert die Quellung zwischen 0,1 und 1000 a. Das heißt, ein auf solchen Mergeln gegründetes Bauwerk kann noch nach Jahren von ständig steigenden Quelldrucken beansprucht werden. Tatsächlich traten im Pfändertunnel auch nach Fertigstellung noch Schäden, verursacht durch die Quellung, auf. Außerdem hängt von der Geschwindigkeit der Wasserzufuhr die Größe der Entlastungsdeformation, die schon vor der Probenentnahme und der Versuchsdurchführung stattfindet, ab, was dann die Hochrechnung des maximalen Quelldruckes erschwert.

Literatur

- AMT DER VORARLBERGER LANDESREGIERUNG, Abt. VIIIb, Straßenbau (1980): Rheintal-Autobahn A 14, Pfändertunnel. — Bregenz.
- BÜCHI, U. P. & SCHLANKE, S. (1977): Zur Paläogeographie der Schweizerischen Molasse. — Erdöl-Erdgas-Z., 93, Sonderausgabe, Hamburg—Wien.
- BÜCHI, U. P. (1958): Zur Geologie der Oberen Süßwassermolasse (OSM) zwischen Töss- und Glattal. — Ecl. geol. Helv., 51, Basel.
- CZURDA, K. A. (1977): Zur Geologie des Pfänderstockes. — Festschrift „50 Jahre Pfänderbahn“, Bregenz.
- CZURDA, K. A. (1978): Sedimentologische Analyse und Ablagerungsmodell der miozänen Kohlenmulden der OÖ Molasse. — Jb. geol. B.-A., 121, Heft 1, Wien.
- GINTHER, G. (1982): Geotechnische Kartierung des Pfänder-NW-Hanges und Analyse der Quelleigenschaften der Molasse-Mergel. — Unveröff. Diss. Innsbruck.
- HUDER, J. & AMBERG, G. (1970): Quellung im Mergel, Opalinuston und Anhydrit. — Schweiz. Bauzeitung, 83, Zürich.
- KOLLMANN, K. (1977): Die Öl- und Gasexploration der Molassezone Oberösterreichs und Salzburgs aus regional-geologischer Sicht. — Erdöl-Erdgas-Z., 93, Sonderausgabe, Hamburg—Wien.
- LEMCKE, K., VON ENGELHARDT, W., & FÜCHTBAUER, H. (1953): Geologische und sedimentpetrographische Untersuchungen im Westteil der ungefalteten Molasse des deutschen Alpenvorlandes. — Beitr. geol. Jahrb., 11, Hannover.
- LAMBE, T. W., & WHITMAN, R. V. (1979): Soil Mechanics, Si-Version. — John Wiley & Sons, New York.
- MADSEN, F. T. (1979): Determination of Swelling Pressure of Claystones and Marlstones Using Mineralogical Data. — Proc. Int. Congr. Rock Mech., Montreux.
- MIELENZ, R. C., & KING, M. E. (1955): Physical-Chemical Properties and Engineering Performance of Clays. — Bull. Calif. Div. Mines, 169.
- PREGI, O., FUCHS, M., MÜLLER, H., PETSCHL, G., RIEDMÜLLER, G., & SCHWAIGHOFER, B. (1980): Dreiaxiale Schwellversuche an Tongesteinen. — Geotechnik, 1, Aachen.
- RAVINA, I., & LOW, P. F. (1977): Change of b-Dimension with Swelling of Montmorillonite. — Clays and Clay Minerals, 25.
- RICHTER, M. (1978): Vorarlberger Alpen, 2. Auflage. — Sammlg. Geol. Führer, 49, Borntraeger, Berlin.
- SCHREINER, A. (1974): Erläuterungen zur geologischen Karte des Landkreises Konstanz mit Umgebung, 1:50.000. — Geol. Landesamt Baden-Württemberg, Freiburg i. Br.
- TRÜMPY, R. (1960): Hypothesen über die Ausbildung von Trias, Lias und Dogger im Untergrund des schweizerischen Molassebeckens. — Ecl. geol. Helv., 52, Basel.
- WEISS, E. H., MÜLLER, H. W., RIEDMÜLLER, G. & SCHWAIGHOFER, B. (1980): Zum Problem quellfähiger Gesteine im Tunnelbau. — Geol. paläont. Mitt. Innsbruck, 10, H. 5, Innsbruck.

Bei der Schriftleitung eingelangt am 23. September 1982.