

BEITRÄGE ZUR GEOLOGIE DER SCHWEIZ
GEOTECHNISCHE SERIE

herausgegeben von der
Schweizerischen Geotechnischen Kommission
(Organ der Schweizerischen Akademie der Naturwissenschaften)

MATERIAUX POUR LA GEOLOGIE DE LA SUISSE
SERIE GEOTECHNIQUE

publiés par la
Commission Géotechnique Suisse
(Organe de l'Académie Suisse des Sciences Naturelles)

Lieferung 80

Geotechnische und hydrochemische Folgen der Verwitterung sulfathaltiger Gesteine (Gipskeuper des Schweizer Jura)

B. Rick

1991

In Kommission bei Kümmerly & Frey AG, Geographischer Verlag, Bern

Dissertationsschrift, Diss ETH Nr. 9257
Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, 1990
Referent: Prof. Dr. C. Schindler
Korreferenten: Dr. L. Hauber, Prof. Dr. M. Müller-Vonmoos

Redaktion und Satz: Schweizerische Geotechnische Kommission
Lithos und Druck: Vontobel Druck AG, Feldmeilen

ISBN 3-907997 13 1

VORWORT DER SCHWEIZERISCHEN GEOTECHNISCHEN KOMMISSION

INHALTSVERZEICHNIS

Die Arbeit von B. Rick über die Verwitterung sulfathaltiger Gesteine und die geotechnischen und hydrochemischen Folgen daraus, stellt einen weiteren interessanten Aspekt der Sulfatgesteine dar. 1991 ist ja bereits die Arbeit von Th. Widmer, über die *Stratigraphie und Sedimentologie der Anhydritgruppe in der Region Liestal-Arisdorf* in der geotechnischen Serie der Beiträge zur Geologie der Schweiz erschienenen (Lieferung 79). Die hier nun vorliegende Arbeit behandelt einerseits die für Ingenieure wichtigen Aspekte des Quellverhaltens sulfathaltiger Gesteine sowie Instabilitäten infolge der Sulfatauslaugung, andererseits wird die Geologie und Stratigraphie des Gipskeupers des Schweizer Jura sehr schön miteingebaut. Die Arbeit dient somit nicht nur den "Theoretikern" unter den Geologen, vielmehr sind durch die stark praxisorientierte Thematik der Arbeit Feldgeologen, Bodenmechaniker und Hydrogeologen angesprochen. Auf anschauliche Weise wird unter anderem eine phänomenologische Beschreibung der Verwitterungserscheinungen im Gelände in einem Klassifikationsschema erläutert. Die Verwitterungsböden und insbesondere deren Restscherfestigkeiten sind hier in Bezug zum Verwitterungszustand und zur tonmineralogischen Zusammensetzung gebracht worden, wobei auf letztere speziell eingegangen wird, da sie für die geotechnischen Eigenschaften der Böden in verwittertem Gipskeuper eine wesentliche Rolle spielen. Abgerundet wird das Werk durch

die hydrochemischen Untersuchungen der Sulfatwässer, wobei deren Kennwerte gut dokumentiert sind und gezeigt wird, wie die stabilen Isotopen (Sauerstoff und Schwefel) zu formationsspezifischen Aussagen herangezogen werden können. Im besonderen wird auf die durch die sulfatführenden Poren- und Grundwässer ausgelösten Korrosionserscheinungen an Beton-Bauteilen eingegangen und auf die Frage, wie sulfatresistent Beton sein kann.

Die Schweizerische Geotechnische Kommission freut sich, diese aktuelle Publikation in der Reihe *Beiträge zur Geologie der Schweiz, Geotechnische Serie* aufnehmen zu können und dankt dem Autor für seine wertvolle und sorgfältige Arbeit. Ebenfalls grossen Dank gebührt dem Bundesamt für Strassenbau, dank dessen grosszügiger finanzieller Unterstützung der Druck dieser Arbeit ermöglicht wurde.

Für den Inhalt von Text und Figuren ist der Autor allein verantwortlich.

Zürich, Dezember 1991

Der Präsident der Schweizerischen
Geotechnischen Kommission

C. Schindler

VORWORT DES VERFASSERS

Die vorliegende Arbeit in angewandter Geologie entstand auf Anregung und unter Leitung von Prof. Dr. C. Schindler, dem ich für das entgegengebrachte Interesse und die Unterstützung herzlich danke. Im Herbst 1985 begann ich mit den ersten Feldarbeiten im Gebiet von Ennetbaden (Kt. Aargau), die durch die Ausführung eines grösseren Bauwerkes im verwitterten Gipskeuper ermöglicht wurden. Die bis Ende 1986 erzielten Vorresultate ermutigten uns, diese Untersuchungen als Teil des ETH-Forschungsprojektes „Geotechnisch problematische Locker- und Festgesteine“ weiterzuführen.

All jenen, die durch ihre Mithilfe, ihre Diskussionsbereitschaft und ihre Anregungen für das Gelingen dieser Arbeit mitverantwortlich sind, gehört mein aufrichtiger Dank. Für die Zeit der Datensammlung und Auswertung konnte ich auf die Unterstützung verschiedener Amtsstellen, Institute und Geologischer Büros zählen. So ermöglichte mir das Geotechnische Büro Dr. von Moos AG in grosszügiger Weise Einsicht in sein Archiv und stellte mir unveröffentlichte Daten zur Verfügung. Herrn Dr. A. Gautschi, Nagra Baden, verdanke ich die Erlaubnis zur Benutzung hydrochemischer Basisdaten aus dem Regionalprogramm Nordschweiz. Das Kantonale Tiefbauamt des Kt. Aargau überliess mir diverse ältere Kernabschnitte von Bohrungen im verwitterten Gipskeuper bei Ennetbaden. Die Jura-

Cement-Fabriken gewährten mir freundlicherweise freien Zugang zum Gipsbruch Riepel. Ferner schulde ich Dank all jenen Personen, die mit fachlichen Ratschlägen und aufbauender Kritik einzelne Themen dieser Arbeit bereicherten, wobei ich hier besonders Dr. W. Balderer, Prof. Dr. H. Böhni, Prof. Dr. P. Fritz, Dr. L. Hauber, Dr. G. Kahr, Dr. H. Krause, Dr. F. Matousek, Prof. Dr. M. Müller-Vonmoos und Dr. A. Wildberger erwähnen möchte. Mit Dr. Ch. Schlüchter verbinden mich unvergessliche Feldtage bei der Profilaufnahme im Gipsbruch Riepel sowie viele wertvolle Diskussionen. Dr. B. Ayranci beriet mich bei analytischen Problemen der Strontium-Bestimmung, während mich Frau B. Suter in die Geheimnisse der Anionenchromatographie einweihte. Die Abfassung des französischen Résumé verdanke ich B. Grobéty.

Ein besonderer Dank gilt schliesslich meinen Eltern, die mir das Studium ermöglichten. Meinen grössten Dank jedoch schulde ich meiner Frau Silvia, die in den Jahren des Studiums und der Dissertation stets viel Verständnis für meine Arbeit aufbrachte und manches eigene Ziel zurückstecken musste.

Die Drucklegung dieser Arbeit wurde durch einen grosszügigen Beitrag des Bundesamtes für Strassenbau ermöglicht.

Beat Rick

INHALTSVERZEICHNIS

VORWORT DER SCHWEIZERISCHEN GEOTECHNISCHEN KOMMISSION	III	2.3 Das Verwitterungsprofil	16
VORWORT DES VERFASSERS	IV	2.3.1 Klassifikation der Verwitterungserscheinungen	16
INHALTSVERZEICHNIS	V	2.3.2 Ausbildung des Verwitterungsprofils im Gipskeuper	17
ZUSAMMENFASSUNG	VII	2.4 Beispiele aus dem Gipskeuper des Aargauer Jura	18
ABSTRACT	VIII	2.4.1 Verwitterungsprofil in Ennetbaden	18
RESUME	IX	a) Lockergesteine und Auffüllungen	20
		b) Felsuntergrund	20
		2.4.2 Verwitterungstiefe im Gipskeuper bei Ennet- baden	23
		2.4.3 Verwitterungsprofil westlich der Habsburg	23
1 EINLEITUNG	1	3 DIE SEDIMENTE DES VERWITTERTEN GIPSKEUPERS	29
1.1 Problemstellung	1	3.1 Untersuchungsmethodik	29
1.2 Untersuchungsgebiete und Methodik	2	3.2 Mineralogie	29
1.2.1 Geographischer Rahmen	2	3.2.1 Mineralogie der Gesamtgesteinsprobe	29
1.2.2 Begriffe	2	3.2.2 Tonmineralogische Untersuchungen	30
1.2.3 Untersuchungsmethodik	2	3.2.2.1 Untersuchungsmethoden	30
1.3 Zur Stratigraphie des Gipskeupers	4	3.2.2.2 Tonmineralogie	30
1.3.1 Vorbemerkung	4	a) Illit	30
1.3.2 Die Sedimente des Keupers	4	b) Chlorit	31
1.3.3 Stratigraphisches Profil im Gipskeuper	5	c) Vermiculit	31
1.3.3.1 Profilaufnahme	5	d) Smectite	31
1.3.3.2 Vergleich mit weiteren Gipskeuper-Profilen	9	e) Wechsellagerungen	31
1.4 Bekannte geotechnische Probleme in Sulfat- gesteinen	10	f) Tonmineral-Spektrum	34
1.4.1 Quelldrücke	10	3.2.2.3 Tonmineral-Verteilung im Verwitterungsprofil	35
1.4.2 Karsthohlräume	10	3.3 Bodenmechanik	36
1.4.3 Betonaggressive Karstwässer	12	3.3.1 Korngrößenverteilung	36
1.4.4 Rutschungen	12	3.3.1.1 Grundlagen	36
2 VERWITTERUNG	13	3.3.1.2 Einfluss der Probenaufbereitung	36
2.1 Einleitung	13	3.3.2 Kenngrößen des Naturzustandes	39
2.2 Verwitterung von gipshaltigen Gesteinen	15	3.3.2.1 Wassergehalt	39
2.2.1 Zur Frage des Gipskarstes	15	3.3.2.2 Raumgewicht	39
2.2.2 Löslichkeit der Sulfate	15	a) Probenentnahme	39
2.2.2.1 Die Umwandlung zwischen den verschiedenen Phasen	15	b) Raumgewichtsbestimmungen im Gipskeuper	39
2.2.2.2 Gips-Löslichkeit	15	c) Lagerungsdichte	40
		3.3.3 Plastizitätseigenschaften	41
		3.3.3.1 Allgemeines	41
		3.3.3.2 Diskussion der Resultate aus dem Gipskeuper	41
		3.3.4 Scherfestigkeit des verwitterten Gipskeupers	43
		3.3.4.1 Grundlagen	43
		3.3.4.2 Scherversuche im verwitterten Gipskeuper	44

3.3.4.3 Diskussion der Restscherfestigkeit im verwitterten Gipskeuper	46	4.2.1.2 Ziel der Untersuchungen	66
a) Abhängigkeit vom Tongehalt	46	4.2.2 Untersuchungen im Gipskeuper	66
b) Abhängigkeit von der Mineralogie	46	4.2.3 Diskussion der Resultate	68
3.4 Zur Durchlässigkeit des Gipskeupers	47	4.2.3.1 Zusammensetzung der Schwefel-Isotopen im Sulfat des Gipskeupers	68
3.4.1 Unverwitterter Gipskeuper	47	4.2.3.2 Zusammensetzung der Sauerstoff-Isotopen im Sulfat des Gipskeupers	68
3.4.2 Verwitterter Gipskeuper	48	4.2.3.3 Vergleich mit den Evaporiten der Mittleren Trias	69
4 MINERALISIERTE WÄSSER AUS DER SULFATAUSLAUGUNG	49	4.3 Bautechnische Aspekte der Sulfatwässer	70
4.1 Hydrochemie der Gipskeuper-Wässer	49	4.3.1 Ziel der Untersuchungen	70
4.1.1 Einleitung	49	4.3.2 Grundlagen der Beton-Korrosion	70
4.1.2 Hydrochemische Klassifikation	49	4.3.3 Untersuchungsprogramm	71
4.1.2.1 Resultate sämtlicher Verwitterungsstufen	49	4.3.4 Ergebnisse der Langzeituntersuchungen	72
4.1.2.2 Gipskarst-Wässer aus den Triassischen Evaporiten	51	4.3.5 Würdigung der Resultate	77
4.1.3 Charakteristika der Sulfatwässer	55	5 BEDEUTUNG FÜR DIE PRAXIS	79
4.1.3.1 Datensatz und Methodik	55	LITERATURVERZEICHNIS	81
4.1.3.2 Generelle Verteilung der hydrochemischen Parameter	55	ANHANG	89
4.1.3.3 Verteilungsmuster ausgewählter Parameter	57	A 1 Verzeichnis der verwendeten Normen zur Untersuchung von Lockergesteins- und Betonproben	89
4.1.3.4 Beziehungen zwischen hydrochemischen Parametern	59	A 2 Verzeichnis der verwendeten hydrochemischen Untersuchungsmethoden	89
4.1.3.5 Differenzierung unter den Sulfatwässern	65		
4.2. Stabile Isotopen im Sulfat	65		
4.2.1 Einführung	65		
4.2.1.1 Grundlagen	65		

ZUSAMMENFASSUNG

Sulfathaltige Gesteine treten je nach ihrem Verwitterungszustand unterschiedlich in Erscheinung. Meist sind sie wegen ihrer Verwitterungsanfälligkeit für den kartierenden Geologen schlecht aufgeschlossen und werden von Ingenieuren infolge ihres Quellverhaltens und der Neigung zu Instabilitäten nach der Sulfatauslaugung gefürchtet. Diese praxisorientierte Arbeit befasst sich deshalb mit *ingenieur-geologischen Aspekten der Verwitterung* von sulfathaltigen Gesteinen, wobei die Prozesse und ihre Auswirkungen primär am Beispiel des Gipskeupers im Schweizer Jura aufgezeigt werden. Die geotechnischen und hydrochemischen Folgen der Verwitterung werden diskutiert und ihre Bedeutung für den praxisorientierten Geologen, Hydrogeologen und Bodenmechaniker dargelegt. Ausserdem präsentieren wir ein beinahe vollständig aufgeschlossenes stratigraphisches Profil im Gipskeuper des Aargauer Faltenjura, das in das Umfeld der bisherigen Erkenntnisse aus dem Gipskeuper integriert wird.

Für die geologische Beschreibung der *Verwitterungsercheinungen* im Gelände, in Aufschlüssen und in Bohrungen, sowie zur Einteilung der Verwitterungszustände innerhalb des Verwitterungsprofils wird ein Klassifikationsschema definiert. Mit dessen Hilfe können Beobachtungen an unterschiedlichen Verwitterungsprofilen zueinander in Beziehung gesetzt werden.

Die Lithologie des Gipskeupers erfährt mit fortschreitender Verwitterung neben der Auflösung der Sulfate auch eine zunehmende Entfestigung und Zerbröckelung. In der vorliegenden Arbeit wird versucht, die Grösse dieser Gesteinsbröckchen (Aggregate) in den verschiedenen Verwitterungsstufen durch die Bestimmung der Korngrössenverteilung zu charakterisieren. Mit zunehmender Verwitterung nehmen die Grobfractionen durch den Zerfall der Aggregate ab und die Feinanteile (Silt und Ton) treten stärker in Erscheinung. Die Problematik der Entnahme von sog. ungestörten Proben im Grenzbereich zwischen Fest- und Lockergestein wird diskutiert.

Der verwitterte Gipskeuper ist mineralogisch mit der unverwitterten Lithologie mit Ausnahme des entfernten Sulfats - gut vergleichbar: Dolomit überwiegt Calcit und die Nichtkarbonate betragen, bezogen auf die Sulfat-freie Probe, durchschnittlich 62 Gewichtsprozent. Für das Verständnis der *geotechnischen Eigenschaften* der Böden im verwitterten Gipskeuper ist die Kenntnis der Art und Zusammensetzung der Tonminerale im Verwitterungsprofil von grosser Bedeutung. Wie in der unverwitterten Lithologie so ist auch im verwitterten Gipskeuper Illit das dominante Tonmineral, das von Chlorit und der typischen Wechsellagerung Corrensit begleitet wird. Publierte Tonmineraldaten von Corrensit in Triassischen Sedimenten werden unter dem Gesichtspunkt der Regelmässigkeit dieser Wechsellagerung kritisch

beleuchtet. *Quellfähige Tonminerale* können in allen Verwitterungsstufen des Gipskeupers auftreten und erreichen teilweise Anteile >20%. Sie üben einen entscheidenden Einfluss auf das Plastizitätsverhalten der Gipskeuper-Böden aus: Auf dem Plastizitätsdiagramm können die Proben aus dem angewitterten und dem mässig verwitterten Gipskeuper nicht auseinandergehalten werden. Ausserdem zeigt eine Veränderung des Tongehaltes alleine keinen starken Einfluss auf die Grösse der Plastizitätszahl I_p , die jedoch auf die tonmineralogische Zusammensetzung und insbesondere den Anteil an quellfähigen Tonmineralien reagiert.

In den Verwitterungsböden des Gipskeupers können niedrige Restscherfestigkeiten nachgewiesen werden, die keine direkte Abhängigkeit vom Verwitterungszustand aufweisen. Jedoch zeigt sich auch bei diesem Parameter die enge Verknüpfung der geotechnischen Eigenschaften mit der tonmineralogischen Zusammensetzung der Probe.

Bei der Verwitterung sulfathaltiger Gesteine entstehen durch die Gips-Auslaugung charakteristische *Poren- und Grundwässer*, die aufgrund der Haupt- und Nebenbestandteile hydrochemisch klassiert werden können. Eine statistische Untersuchung der Verteilungsmuster der hydrochemischen Kennwerte in den Sulfatwässern des östlichen Jura dokumentiert die besonderen, durch die Gipsauflösung beeinflussten Merkmale dieser Wässer. Beispielsweise weisen sie grosse Gesamthärten auf (bis 189°f), bei kleinen Karbonathärten (Mittelwert um 15°f). Mit fortschreitender Verwitterung, d.h. bei zunehmender Auslaugung des Gesteins, tritt die Sulfatlösung zurück und die Gesamthärte wird mehr und mehr durch die Karbonathärte, d.h. durch die Auflösung von Calcit und Dolomit bestimmt.

Die hydrochemischen Untersuchungen liefern ausserdem interessante Ansatzpunkte zur Unterscheidung der Sulfatwässer des Gipskeupers von denjenigen des Mittleren Muschelkalk. Als besonders formationsspezifisch hat sich auch die Verteilung der *stabilen Isotopen im Sulfat* erwiesen. In dieser Arbeit wird ein Satz an Referenzdaten für die Zusammensetzung der stabilen Isotopen in den Evaporiten des Gipskeupers vorgestellt, der im Zusammenhang mit verfügbaren Isotopendaten an Grundwässern aus dem Gipskeuper und dem Mittleren Muschelkalk diskutiert wird.

In sulfathaltigen Lösungen, wie sie aus der Verwitterung des Gipskeupers entstehen, wurden Langzeituntersuchungen an Betonproben durchgeführt. Die Ergebnisse zeigen auf, dass die Poren- und Grundwässer der sulfatführenden Gesteine an Beton-Bauteilen *Korrosionserscheinungen* hervorrufen, die langfristig zur Verminderung der Festigkeit und schliesslich auch zu einem Zerfall des Betons führen können.

ABSTRACT

Gypsiferous marls and shales are rarely visible in natural outcrops due to their susceptibility to weathering. Nevertheless, geotechnical problems related to weathering of sulphate bearing rocks - such as (1) swelling and induced damages to tunnel constructions, (2) leaching of sulphate causing open cavities and sinkholes as well as (3) instabilities and landslides in the weathered rock - occur frequently. This study, therefore, deals with *geotechnical and hydrochemical aspects of the weathering* in the Triassic sulphate bearing marls and shales. These rock units are concentrated in the Swiss Jura Mountains in the formations of Middle Muschelkalk and Gipskeuper, where sulphate minerals occur mainly as anhydrite, transformed to gypsum near surface. The examples discussed are essentially from the Gipskeuper. The results presented are assumed to be applicable also to other sulphate bearing formations. A stratigraphic section of the Swiss Gipskeuper is presented.

A classification model has been developed in which the weathering profile is subdivided into 5 weathering stages in order to study the *weathering phenomena* at various localities and in view of a comparison of the observations. The mineralogical, geotechnical and hydrochemical changes as observed are discussed in context of the weathering profile.

Various mineralogical changes such as the transformation from anhydrite to gypsum, the dissolution of sulphate as well as leaching of carbonate have been observed in relation to a considerably deep local weathering. Also, a gradual disintegration of the claystone has been studied. The bulk mass of the Gipskeuper with its changing properties related to the weathering processes is a critical medium between a soil and a rock. Geotechnically it is classified as a „weak rock“. In drill holes we tend to classify the weathered lithology as a soil, where in pits and shafts the primary structures are still visible. Disintegration promotes the plastifying of the clay aggregates and the sand- and silt-sized particles decay gradually already after a short exposure at an artificial outcrop. Ambiguities in the interpretation of „undisturbed“ samples from boreholes in the weathered Gipskeuper are discussed.

Apart from the leached sulphate, the weathered Gipskeuper resembles mineralogically closely the unweathered lithology: Dolomite dominates over calcite; non-carbonatic minerals amount to about 62 mass-percent. Clay minerals consist of illite, chlorite and mixed-layers (corrensite). Swelling clay minerals - of an amount >20% sometimes - occur in all weathering stages and are of importance to the *geotechnical properties* of the weathered Gipskeuper: Plasticity as well as shear strength are directly related to the mineralogical composition of the soil, especially to clay mineralogy.

Leaching of sulphate bearing rocks contributes to *groundwater* with a specific hydrochemical composition. Statistical investigations on sulphate mineralized groundwaters from the Swiss Jura Mountains allow estimations on the water-rock interactions during the chemical weathering of sulphate rocks. Also, these investigations emphasize formation specific components for the discrimination of Gipskeuper and Middle Muschelkalk sulphate mineral water, respectively. Here, strontium content, F/Sr-equivalent ratio as well as *stable isotopes in the sulphate composition* are of interest. In attempting such a correlation for the dissolved salts of sulphate-mineralized groundwater in Northern Switzerland with the source rock, based on isotopic compositions, new isotope data on sulphur and oxygen in the sulphate from evaporite minerals of the Swiss Gipskeuper are presented.

The waters percolating in the weathered Gipskeuper show sulphate contents up to 1.5 g/l. They cause *corrosion of concrete* by loss of strength and by deterioration of the cement structure. This has been investigated by long-term studies on different concretes which have been stored in brines with various sulphate contents for 33 months.

Some recommendations for practical projects in engineering geology are presented based on the geotechnical and hydrochemical studies.

RESUME

L'aspect et le comportement mécanique des roches contenant des sulfates varient fortement selon leurs degrés d'altération. Le plus souvent la qualité des affleurements est très mauvaise, ce qui rend leur cartographie plus difficile. Leur expansibilité au contact avec l'eau et leur friabilité en font un ennemi redoutable des ingénieurs géologues. Le travail ci présent traite les *aspects géotechniques et hydro-chimiques* de l'altération des roches à sulfates à l'exemple de la formation du Gipskeuper dans la région du Jura suisse.

Ce travail a permis d'établir un profil stratigraphique complet du Gipskeuper dans le Jura Argovien. Ce nouveau profil est discuté à l'aide de profils voisins déjà publiés.

Des réalisations de génie civil dans telles régions dépendent donc fortement du degré d'altération du sous-sol. La dissolution des sulfates est accompagnée d'un effritement de la roche, ce qui entraîne une diminution de sa résistance mécanique.

L'état des roches est décrit à l'aide d'une *classification* établie sur des critères granulométriques et minéralogiques. Ce schéma facilite la comparaison des données provenant de différents profils d'altération. La quantité de gros agrégats diminue progressivement avec l'altération, et la répartition granulométrique est déplacée vers les fractions fines (sils et argiles). La phase critique de telles analyses est le prélèvement d'échantillons intacts dans ces roches faiblement solidifiées. Les problèmes correspondants sont discutés dans ce travail.

A part la dissolution des sulfates, la composition minéralogique du Gipskeuper n'est guère affectée par l'altération: La dolomie est plus abondante que la calcite et les minéraux non-carbonatés représentent en moyenne 62% relatif au poids de l'échantillon après déduction du contenu de sulfate.

La *mécanique des sols* dans le Gipskeuper est fortement influencée par la minéralogie des argiles. Indépendant du degré d'altération, l'illite constitue la partie dominante des minéraux argileux, la chlorite et la corrensite, un

phyllosilicate composé de couches alternatives de chlorite et de smectite, représentent le reste. La cristallographie de ces derniers, surtout la régularité de l'alternance est comparée avec des données de corrensites provenant de sédiments triassiques. Des *argiles expansibles* apparaissent tout au long des profils d'altération et atteignent parfois plus de 20% (poids) de la roche totale.

La plasticité, exprimée par le nombre de plasticité I_p , et la résistance au cisaillement des sols du Gipskeuper sont étroitement corrélées avec la présence et la composition de ces argiles expansibles; la quantité totale des argiles et le degré d'altération par contre ne contribuent que faiblement au comportement plastique du sol.

La dissolution du gypse donne naissance à des *fluides* très caractéristiques. Des analyses statistiques des données hydrochimiques, relevées dans la partie orientale du Jura, documentent cette influence des roches à sulfates sur le réseau hydrologique. Les eaux, qui ont été en contact avec des sulfates révèlent une importante dureté totale (jusqu'à 189°f) malgré une faible dureté carbonatique (15°f en moyenne). Dans les régions, où la dissolution du gypse est déjà très avancée, la dureté totale de l'eau est de plus en plus donnée par la dureté carbonatique c.à.d. par la dissolution des minéraux carbonatés. Les analyses hydrochimiques aident à distinguer les eaux ayant été en contact avec le Gipskeuper de celles originaires du Muschelkalk moyen. L'analyse des *isotopes stables* se sont avérées très utiles pour cette différenciation. Des valeurs de références pour différents isotopes stables dans les sulfates provenant des évaporites du Gipskeuper ont été établies et comparées avec des données isotopiques des eaux de formation du Gipskeuper et du Muschelkalk moyen.

Des expériences de longue durée ont été effectuées pour déterminer le comportement du béton exposé à des solutions comparables aux eaux de formation rencontrées dans le Gipskeuper. Les résultats démontrent, que ces solutions sont hautement corrosives et entraînent une sérieuse dégradation du comportement mécanique du béton.

1 EINLEITUNG

1.1 Problemstellung

Sulfathaltige Gesteine haben schon immer die Aufmerksamkeit von Geologen und Ingenieuren auf sich gezogen. Oft stehen sie in einer ambivalenten Beziehung zum Menschen und seiner Umwelt.

Zum einen sind sie bei genügend hohem Sulfatanteil interessant als Rohstofflieferant (vgl. DE QUERVAIN, 1969). Gips wird in der Bauindustrie als Baustoff verwendet, sowie als Zuschlag zum Portlandzement zur Regulierung der Abbindegeschwindigkeit. Früher wurde Gipsgestein, da es wegen seiner geringen Härte leicht zu bearbeiten ist, zudem direkt als Bau- oder Dekorationsmaterial verwendet (Alabaster). Als weiterer Abnehmer für Gips tritt die chemische Industrie auf.

Die Strukturgeologen - insbesondere jene, die sich mit der Kinematik der Juraüberschiebung beschäftigen (u.a. MÜLLER et al., 1981; LAUBSCHER, 1984; JORDAN & NÜESCH, 1989) - untersuchen die Evaporite wegen ihres besonderen rheologischen Verhaltens: Sulfathorizonte spielen infolge ihres duktilen Verhaltens z.B. als Gleitschichten bei Scherhorizonten eine wesentliche Rolle. Ausserdem kann es wie beim Steinsalz auch bei Sulfaten zu Diapirismus kommen (vgl. BAUMANN, 1984).

Werden gipsführende Schichten durch das Grundwasser ausgelaugt, so entstehen sulfathaltige Wässer. Erhöhte Sulfatgehalte führen jedoch primär zu einer geschmacklichen Beeinträchtigung des Grundwassers, sodass für Trinkwasser in der Schweiz normalerweise ein Toleranzwert von 200 mg/l SO_4^{2-} gilt. Vom technischen Standpunkt her betrachtet sind Wässer mit Sulfatgehalten über 200 mg/l unangenehm, da sie als betonaggressiv einzustufen sind. Andererseits werden Sulfatwässer als Tafel- und Mineralwässer, sowie bei gleichzeitig auftretender erhöhter Temperatur auch als Heilquellen genutzt (HÖGL, 1980). Als Beispiele seien hier das Tafelwasser Eptingen und die Thermalquellen von Baden angeführt.

Mancher Tunnelbau-Ingenieur empfindet ein Unbehagen bei der Vorstellung, mit seinem Bauwerk sulfathaltige Schichten durchqueren zu müssen: Vielerorts haben quellende Anhydrit-Ton-Wechselagerungen durch beträchtliche Quelldrücke zu entsprechenden Beschädigungen des Bauwerkes geführt. Als geradezu international bekannt

gewordenes Beispiel können hier die Deformationen und Bauwerkbeschädigungen am Belchentunnel genannt werden (vgl. GROB, 1972).

Sulfathaltige Gesteine können jedoch auch in Oberflächen-nähe als Baugrund problematisch sein (SCHINDLER, 1988). Die durch die Gipsauslaugung entfestigten Gesteine neigen naturgemäss zu Kriech- und Rutschbewegungen, welche durch menschliche Eingriffe (Baugruben, Hanganschnitte etc.) noch akzentuiert werden können.

Neuerdings möchte man sich die geringe Durchlässigkeit der Ton-Evaporit-Wechselagerungen noch für folgendes zunutze machen: Diese Sedimente werden diskutiert als mögliche Wirtgesteine für Endlager (NAGRA, 1988), bzw. als Untergrund für Deponien, wobei die Sulfate als geologische Barrieren gegen die Freisetzung unerwünschter Inhaltsstoffe dienen sollen.

Alle diese Nutzungsmöglichkeiten bzw. -einschränkungen der sulfathaltigen Gesteine stehen in einem engen Zusammenhang mit der Veränderlichkeit dieser Lithologie während der Verwitterung. Als Aufgabe für unsere Untersuchungen stellte sich deshalb die Frage, inwiefern die *Auswirkungen der Verwitterung auf die Sulfatgesteine* qualitativ und quantitativ beschrieben werden können. Ausgeklammert wurde das komplexe Thema der Anhydrit/Gips-Umwandlung, das bereits mehrfach untersucht worden ist (vgl. Kapitel 2.2.2). Diese Mineralumwandlung findet noch in der unverwitterten (d.h. felsartigen) Lithologie statt, wobei die damit verbundene Beanspruchung des Gesteinsverbandes (Volumenveränderungen, Deformationen) auch die Wasserwegsamkeit beeinflusst.

Infolge der relativ leichten Löslichkeit der Evaporite entstehen bei der Auslaugung sulfathaltiger Gesteine 2 Typen von Verwitterungsprodukten: Einerseits bleibt ein je nach Verwitterungszustand unterschiedlich entfestigtes, vom Festzum Lockergestein verändertes Residuum zurück. Andererseits entstehen mineralisierte Wässer, die in ihrer hydrochemischen Zusammensetzung stark von der ausgelaugten Gesteinsserie geprägt sind. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit sollen deshalb beide Auslaugungsprodukte charakterisiert und sowohl geotechnische wie hydrochemische Aspekte der Verwitterung behandelt werden. Als Beispiel einer sulfathaltigen Lithologie wurde der Gipskeuper des Schweizer Jura gewählt.

1.2 Untersuchungsgebiete und Methodik

1.2.1 Geographischer Rahmen

Gesteinsbildendes Sulfat ist in der Schweiz zur Hauptsache an die Formationen der Trias gebunden. Dies trifft sowohl für die unmetamorphen Sulfate im Jura wie auch für die teilweise metamorph überprägten Sulfate und Rauhwacken der nördlichen Kalkalpen und der penninischen und ostalpinen Decken zu. Gips im Perm und im Obersten Malm haben nach DE QUERVAIN (1969) keine praktische Bedeutung. In der oligozänen Molasse der Westschweiz tritt ausserdem Gips auf, der lokal ausgebeutet wurde.

Als Beispiele besprechen wir im Rahmen dieser Arbeit vornehmlich die Phänomene, wie sie im Gipskeuper des Ostjura beobachtet werden können. Die Resultate der vorliegenden Untersuchung lassen sich jedoch auch auf andere unmetamorphe Sulfatgesteine (z.B. des Mittleren Muschelkalk) übertragen. Wohl können die Auswirkungen der Verwitterung aufgrund geologisch/stratigraphischer Unterschiede (u.a. Anteil und Verteilung der Sulfate, Vorkommen von Steinsalz) lokal sehr differenziert in Erscheinung treten. Die beobachtbaren Phänomene lassen sich jedoch infolge vergleichbarer Verwitterungsprozesse ähnlich klassifizieren, wie wir dies für den Gipskeuper in dieser Arbeit getan haben. Eine Differenzierung zwischen den Verwitterungsprodukten des Gipskeupers und des Mittleren Muschelkalk wird insbesondere bei der hydrochemischen Charakterisierung der mineralisierten Wässer aus der Sulfat-Auslaugung angestrebt (vgl. Kapitel 4.1-4.2).

Eine Karte der Verbreitung der sulfatführenden Formationen im Gebiet des Schweizer Jura (Mittlerer Muschelkalk und Gipskeuper) ist in Figur 1.1 wiedergegeben. Darauf sind auch die wichtigsten Abbaustellen sowie bedeutende Mineralquellen vermerkt, die ihre Sulfat-Mineralisation aus den erwähnten beiden Formationen beziehen. Diese Karte dient zugleich als geographische Übersicht des Untersuchungsgebietes, das sich auf Gebiete mit Vorkommen von sulfatführenden Mergelserien im Schweizer Jura beschränkt. Situationen der im Detail untersuchten Lokaltäten werden jeweils in den diesbezüglichen Kapiteln gegeben (vgl. Figuren 1.2, 2.5, 2.9, 4.3).

1.2.2 Begriffe

In der vorliegenden Arbeit werden soweit möglich die vereinheitlichten Begriffe der Bodenmechanik und Hydrochemie verwendet, die den Vereinbarungen der SI (Système International d'Unités) und der ISSMFE (International Society for Soil Mechanics and Foundation Engineering) entsprechen. Auf die Definition von Spezialausdrücken wird an Ort und Stelle eingegangen.

Der Begriff *Boden* wird in der vorliegenden Arbeit im geotechnischen Sinn verwendet (PRINZ, 1982): Darunter verstehen wir den zum Lockergestein veränderten Unter-

grund, der auch die Kulturschichten umfasst, jedoch vom unverwitterten Festgestein (Fels) unterschieden werden kann.

1.2.3 Untersuchungsmethodik




Für die Bedürfnisse der praxisorientierten Ingenieurgeologie sind die meisten Labor- und Feldmethoden zur Untersuchung von Wasser- und Gesteinsproben bereits mehrfach ausführlich beschrieben und in Normenwerken standardisiert worden. Eine entsprechende Zusammenstellung im Anhang gibt darüber detaillierten Aufschluss, weshalb wir hier darauf verzichten, diese Methoden ausführlich darzulegen. Soweit dies möglich war, haben wir uns an die erwähnten, standardisierten Methoden gehalten, um die gewonnenen Daten reproduzierbar präsentieren zu können. Dadurch ist auch ein besserer Vergleich mit Resultaten von Untersuchungen aus der Praxis gewährleistet. Soweit es das Verständnis erfordert, wird auf die Methodik der einzelnen Untersuchungsschritte in den jeweiligen Kapiteln näher eingegangen. Hier möchten wir das generelle Vorgehen bei unserer Arbeit skizzieren.

Vorerst mussten die Verwitterungsprozesse abgegrenzt und ein Klassifikationsschema für die Beschreibung der verwitterungsbedingten Auswirkungen auf sulfatführende Gesteine definiert werden. Das Schema wurde sodann bei der Beschreibung von natürlichen und künstlichen Aufschlüssen im Gipskeuper angewendet. Dieses Vorgehen ermöglichte eine Bestandesaufnahme der Erscheinungsformen des Gesteins im Feld und eine Zuordnung des Zustandes zu Verwitterungsstufen. Den unterschiedlichen Verwitterungszuständen wurden Proben entnommen, die mineralogisch, bodenmechanisch und hydrochemisch im Labor untersucht werden konnten. Die Resultate werden in der vorliegenden Arbeit in Bezug zur Verwitterung diskutiert und ihre Bedeutung für den praxisorientierten Geologen, Hydrogeologen und Bodenmechaniker dargelegt.

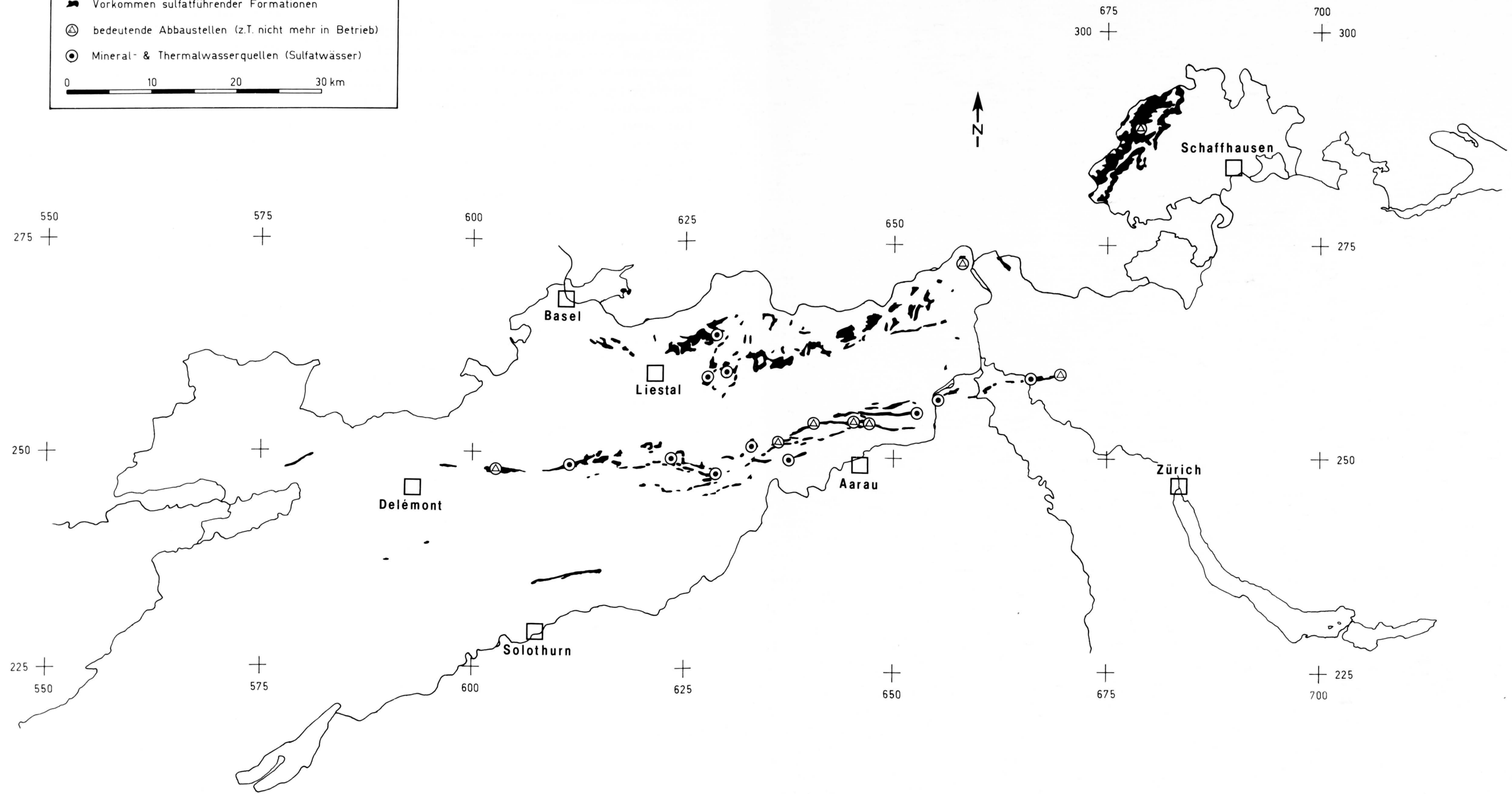
Figur 1.1 Karte der Verbreitung sulfatführender Mergelserien (Gipskeuper, Mittlerer Muschelkalk) im Schweizer Jura mit Mineral- und Thermalwasservorkommen, die bedeutende Anteile ihrer Mineralisation aus diesen Formationen beziehen.

Quellen: Geotechn. Karte der Schweiz 1:200'000 (1967); Geol. Karte der zentralen Nordschweiz 1:100'000 (1984); Geol. Atlas 1:25'000, Blätter 40 St. Ursanne (1963), 59 Basel (1970), 74 Neunkirch (1981) und 80 Arlesheim (1984).

LEGENDE

-  Vorkommen sulfatführender Formationen
-  bedeutende Abbaustellen (z.T. nicht mehr in Betrieb)
-  Mineral- & Thermalwasserquellen (Sulfatwässer)

0 10 20 30 km



1.3 Zur Stratigraphie des Gipskeupers

1.3.1 Vorbemerkung

Da die Keuper-Ablagerungen infolge ihrer Verwitterungsanfälligkeit selten gut aufgeschlossen sind, fand ihre stratigraphische Untersuchung lange Zeit wenig Interesse bei den geologischen Bearbeitern des Jura. Erst in jüngster Zeit, im Zusammenhang mit den intensiven geologischen Untersuchungen der Nagra in der Nordschweiz wurden diese Sedimente - und mit ihnen die Formation des Gipskeupers - sedimentologisch eingehend untersucht und beschrieben (NAGRA, 1984; PETERS et al., 1987; MATTER et al., 1988 a&b; NAGRA, 1988). Um eine Grundlage für das Verständnis der stratigraphischen Stellung des Gipskeupers zu schaffen, wollen wir im folgenden Kapitel einen kurzen Ueberblick über die Schichtglieder der Keuperablagerungen geben.

1.3.2 Die Sedimente des Keupers

Nach EMMERT (1985) entstammt das Wort „Keuper“ der fränkischen Sprache: Unabhängig vom Ausgangsmaterial und der Gesteinsfarbe werden mit dem ähnlichen Ausdruck Kipper/Keiper/Keuper/Kieber/Kiefer jeweils bröcklig zerfallende Gesteinsablagerungen bezeichnet. Dieser Begriff scheint uns insbesondere für die Verwitterungsböden des Gipskeupers treffend gewählt!

Die Gesamt-Mächtigkeit der Sedimente des Keupers variiert in der Nordschweiz zwischen ca 80 Meter im Raume Zürich und ca 160 Meter im Aargauer Jura (MÜLLER et al., 1984). In den Salzbohrungen der Rheinsalinen wurden im Tafeljura vollständige Keuperprofile bis 185 m Mächtigkeit durchfahren (HAUBER, 1971).

Die Keuper-Ablagerungen werden in der Schweiz in 3 Abschnitte unterteilt, die den Zeitraum von ca 230-208 Millionen Jahre vor heute umfassen:

a) Der *Obere Keuper*, das sog. Rhät, ist nur im Klettgau und westlich des Aargaus vorhanden. Praktisch im ganzen Aargauer Jura grenzt der Mittlere Keuper direkt mit einer Schichtlücke gegen den überlagernden Lias. Nach TRÜMPY (1980) existierte im Oberen Keuper eine zwischen Schwarzwald und Aar-Massif N-S verlaufende Hochzone, die von der Rhätischen Transgression nicht überflutet wurde.

b) Der *Mittlere Keuper* ist durch bunte Farben seiner Sedimente charakterisiert, die mehrheitlich unter kontinentalen Verhältnissen abgelagert wurden. Er besteht zur Hauptsache aus Evaporiten, siltigen Tonen, Mergeln und Sandsteinen, sowie aus Dolomiten. Er umfasst von oben nach unten folgende stratigraphische Einheiten:

- *Knollenmergel - Obere Bunte Mergel*

Wo der trennende *Stubensandstein* fehlt, sind die beiden mergeligen Schichtglieder (oben: Knollenmergel; unten: Obere Bunte Mergel) nicht auseinanderzuhalten. Im

Aargauer Jura wurde der Stubensandstein bisher nicht gefunden (MATTER et al., 1988a). Er ist in Süddeutschland sehr mächtig - Raum Stuttgart ca 80 m - und nimmt gegen Südwesten sukzessive ab (BRENNER, 1973). Im Gebiet der Wutach beträgt seine Mächtigkeit 0 bis 4 Meter (PAUL, 1971), in der Bohrung Weiach noch 0.4 m (MATTER et al., 1988a). Sulfat wird vereinzelt beobachtet (z.B. Bohrung Schafisheim; MATTER et al., 1988b).

- *Gansinger Dolomit*

Meistens tritt dieses Schichtglied, das aus harten Dolomitbänken besteht, im Gelände innerhalb der leicht verwitterbaren, sandigen Mergel als Kante hervor. Der Gansinger Dolomit stellt deshalb im Jura für die Lithostratigraphie des Keupers die beste korrelier- und kartierbare Einheit dar. Seine Mächtigkeit nimmt von wenigen Metern im Osten gegen Westen allmählich zu (8.9 m in der Umgebung von Frick nach GSELL, 1968).

- *Schilfsandstein s.l.*

(Untere Bunte Mergel - Schilfsandstein)

In lückenlosen Profilen der Nagra-Bohrungen Schafisheim, Weiach und Riniken konnte der Schilfsandstein nicht als Liegendes von den Unteren Bunten Mergeln getrennt werden (MATTER et al., 1988a&b). Dieser Autor fasst deshalb aufgrund sedimentologischer und tonmineralogischer Kriterien die beiden Lithologien gemeinsam zum Schilfsandstein s.l. zusammen. Dieses Schichtglied besteht demnach aus bunten Tonen und Mergeln, Silt- und Sandsteinen und kann zudem Landpflanzen und Kohleflöze enthalten (vgl. Keuper-Profil von Neue Welt; SCHMASSMANN, 1953). Zuweilen tritt auch Sulfat in kleinen Knollen und als Kluftfüllung auf.

- *Gipskeuper*

Da es an natürlichen Aufschlüssen mangelt und der Gipskeuper auch in künstlichen Anschnitten schnell zerfällt, war diese Lithologie langezeit sehr schlecht bekannt. Erst die vollständig gekernten Profile aus den Bohrungen Böttstein, Weiach und Schafisheim der Nagra sowie der NOK-Bohrung Beznau erlaubten eine detaillierte Gliederung des Gipskeupers aufgrund sedimentologischer Kriterien. Generell werden diese Sedimente als Ablagerungen einer Küstenebene interpretiert, die während einer Regressionsphase mehr und mehr zu einer kontinentalen Sabkha wird (MATTER et al., 1988a). Der Gipskeuper wird in wechselnden Anteilen aufgebaut aus:

- Anhydrit, der oberflächlich zu Gips hydratisiert wird

- bunten Dolomit-Mergeln

- dolomitischen Tonen

- wenigen sandigen Lagen

Karbonat liegt hauptsächlich als Dolomit und nur untergeordnet als Calcit vor. Ausserdem wird von Magnesit (MATTER et al., 1988b) und von Hinweisen auf die eisenreichen Karbonate Siderit und Ankerit berichtet (MATTER et al., 1988a).

Folgende lithostratigraphische Einteilung des Gipskeupers von DRONKERT (1987) liess sich in den Nagra-

Bohrungen gut korrelieren (von oben nach unten):

- Einheit I: Tone mit Anhydritknollen
- Einheit II: Zyklische Serie: Abfolge von Zyklen mit Anhydrit im unteren Teil und zunehmendem Tongehalt gegen oben
- Einheit III: Feingeschichtete Serie aus Tonen und Anhydritlagen
- Einheit IV: Gebänderter massiger Anhydrit
- Einheit V: Dolomit-Anhydrit-Wechsellagerungen

In der Westschweiz (westlich einer Linie Pruntrut-Biel) enthält der Gipskeuper auch Salzlagen (vgl. BITTERLI, 1972). Diese können beträchtliche Mächtigkeiten erreichen (in der Erdölbohrung Essertines 1 total 80-90 m; BÜCHI et al., 1965), ihre lithostratigraphische Position in obigem Schema von DRONKERT (1987) ist aber noch unklar (NAGRA, 1988).

Die Mächtigkeit des Gipskeupers beträgt im Aargauer Tafeljura in den Bohrungen Weiach 74.5 m, Böttstein 74.8 m und Beznau 85.2 m. In der Bohrung Schafisheim wurden unter dem Molassebecken 85 Meter Gipskeuper erbohrt. In nicht vollständig gekernteten Bohrungen im Baselbieter Tafeljura sind nach HAUBER (1971) bis zu 127 m Gipskeuper durchfahren worden. Diese hohen Mächtigkeiten könnten jedoch auch tektonisch beeinflusst sein.

c) Der *Untere Keuper*, der auch „Lettenkohle“ genannt wird, zeigt einen hauptsächlich flachmarin-brackisch beeinflussten Charakter. Er weist damit auf seine Übergangsstellung vom marinen Muschelkalk in den mehrheitlich kontinental beeinflussten Keuper hin. Typisch sind im Untersuchungsgebiet poröse, teilweise auch rauhwackenartig ausgebildete Dolomite und feinsandige Schiefertone, die Fischschuppen, Pflanzen- und zusammengeschwemmte Wirbeltierreste (bonebeds) enthalten können. Die Gesamtmächtigkeit beträgt in der Nordschweiz nach MÜLLER et al. (1984) bis zu 8 Meter.

Die stratigraphische Zuordnung der Lettenkohle zum Keuper ist umstritten. In Frankreich wird sie - in vorwiegend mariner Ausbildung - in den Oberen Muschelkalk gestellt. In Deutschland dagegen wird sie, da sie in ihrer faziellen Ausbildung mit sandigen, dunklen Schiefern an den kontinentalen Oberen Keuper erinnert, zum Keuper gerechnet. Doch sprechen die Verhältnisse in Süddeutschland ebenso gut für eine Zuordnung zum Muschelkalk (PAUL, 1971). In der Schweiz sprach sich MERKI (1961:206) deutlich für eine Zuweisung der Lettenkohle, die lithofaziell und faunistisch mit dem Trigonodusdolomit verwandt ist, zum Oberen Muschelkalk aus. GSELL (1968) hat diese Einteilung übernommen. Palynostratigraphische Untersuchungen von SCHEURING (1970) weisen darauf hin, dass die Lettenkohle - ungeachtet ihrer faziellen Ausbildung - mikrofloristisch dem Oberen Muschelkalk näher steht als dem Keuper. In den Untersuchungen der Nagra wird die Lettenkohle stratigraphisch jedoch vorerst noch in den Keuper gestellt.

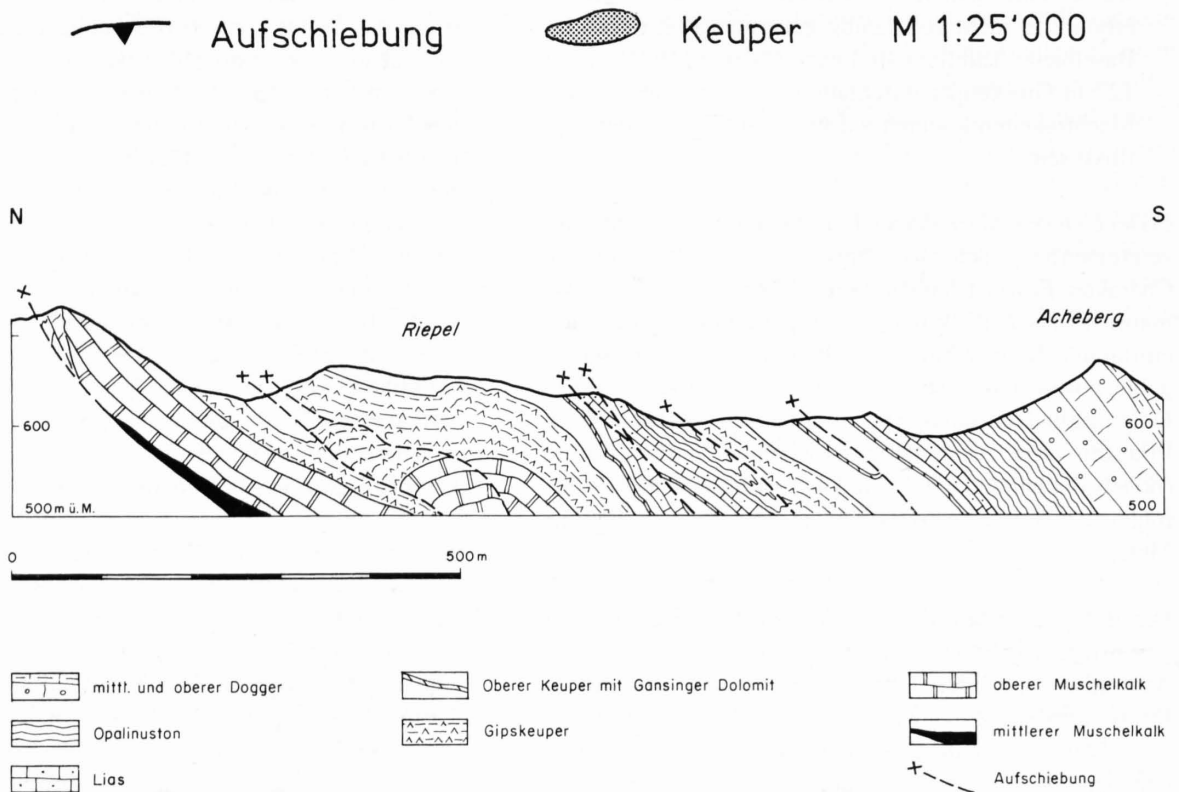
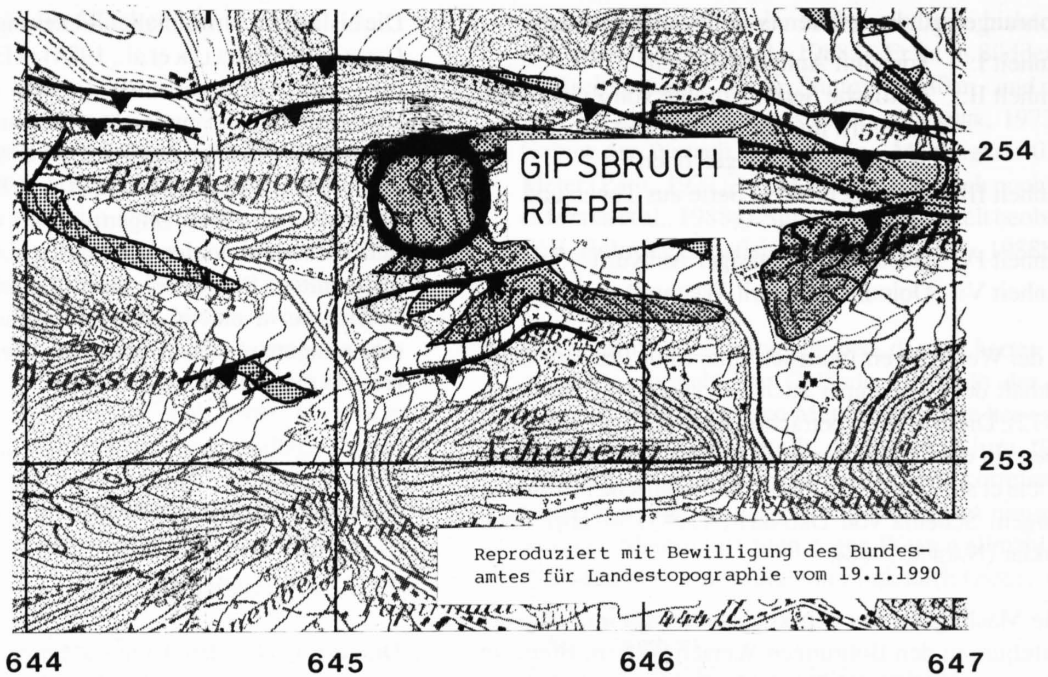
Die bislang im Jura übliche Gliederung (u.a. in MERKI, 1961; GSELL, 1968; MÜLLER et al., 1984) in Estherienschiefer (unten) und Grenzdolomit (oben) erscheint aber im stratigraphischen Sinne nicht mehr sinnvoll. Die lückenlosen Bohrprofile von Beznau (NAGRA, 1984), Böttstein (PETERS et al., 1987), Weiach (MATTER et al., 1988a) und Schafisheim (MATTER et al., 1988b) zeigen nämlich, dass sich die Dolomite und Estherienschiefer über das ganze Lettenkohle-Profil verzahnen. Sie bezeichnen faziell unterschiedliche Sedimente in einem Ablagerungsraum zwischen seichtmarin-lagunären bis kontinental beeinflussten Küstenbereichen (MATTER et al., 1988a&b).

1.3.3 Stratigraphisches Profil im Gipskeuper

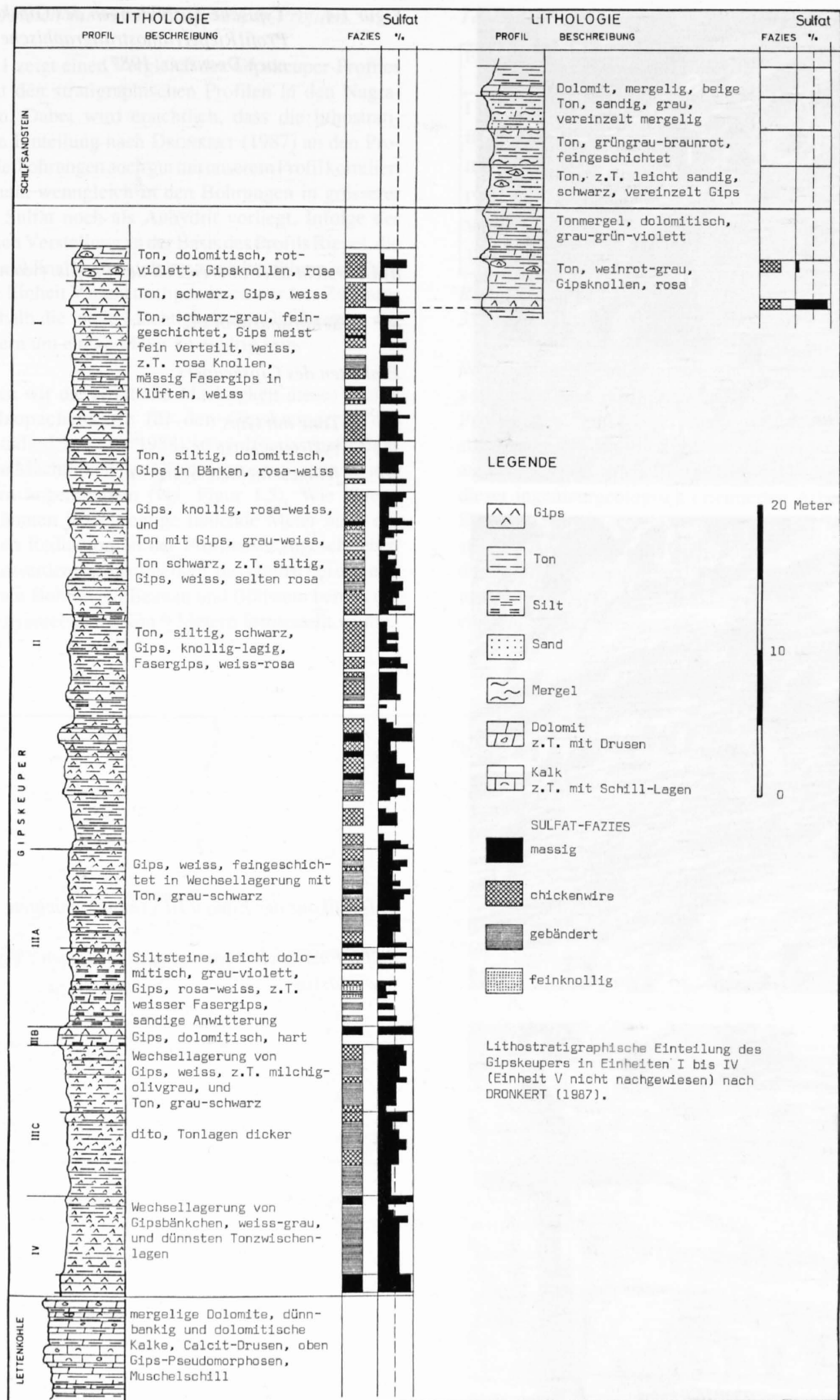
1.3.3.1 Profilaufnahme

Die vergleichenden Untersuchungen an sulfatführenden Gesteinen in unterschiedlichem Verwitterungszustand erforderten auch das Studium der unverwitterten Lithologie, in der das Sulfat - in Oberflächennähe zumeist als Gips vorliegend - noch vorhanden ist. Deshalb haben wir ein Profil im Gipskeuper der Gipsgrube Riepel (Kt. Aargau) untersucht. Eine Situation und ein geologisches Längenprofil in N-S-Richtung sind auf Figur 1.2 dargestellt. Die Abbaustelle liegt südlich des Bänkerjochs in einer Antiklinalstruktur des Aargauer Faltenjura. Die tektonischen Verhältnisse dieser Schuppenzone südlich der Hauptüberschiebung des Falten- auf den Tafeljura sind von GSELL (1968) eingehend beschrieben worden. Auch wenn seine Profilkonstruktionen unter dem Lichte moderner, kinematischer Ansätze (z.B. LAUBSCHER, 1987; JORDAN & NÜESCH, 1989) in den tieferen Partien einige Modifikationen erfahren dürften, so können doch die oberflächennahen Verhältnisse für die Bedürfnisse der vorliegenden Arbeit übernommen werden.

Im Vordergrund unserer Profilaufnahme standen zwar detaillierte Beobachtungen der Verwitterungserscheinungen und der Sulfatverteilung im Sediment. Da sich aber zeigte, dass in dieser Gipsgrube ein beinahe vollständig aufgeschlossenes stratigraphisches Profil vorliegt, wird das ganze Profil hier vorgestellt. Die Profilaufnahme ist in Figur 1.3 aufgezeichnet. Der Übergang in den hangenden Schilfsandstein s.l. und der Gansingerdolomit sind aufgeschlossen. Der direkte Übergang aus der Lettenkohle in den Gipskeuper kann ebenfalls beobachtet werden, jedoch ist dieser Teil der Profilaufnahme durch eine tektonische Verstellung vom Rest des Profils getrennt. Die totale Mächtigkeit von 73.8 Meter ist deshalb mit einer Unsicherheit behaftet. Bei der makroskopischen Beschreibung haben wir den Sulfatgehalt abgeschätzt und die sedimentär/diagenetisch erzeugten Erscheinungsformen des Sulfats verschiedenen Lithofazies-Typen zugeordnet, wie sie von DRONKERT (1987) detailliert beschrieben worden sind. In Figur 1.4 sind typische Ausbildungen des Gipskeupers abgebildet, wie wir sie in der Grube Riepel beobachten konnten.



Figur 1.2 Situation der Grube Riepel (Gipsabbau im Gipskeuper)
 oben: Situation mit den wichtigsten tektonischen Elementen und Verbreitung der Keuper-Sedimente
 (nach GSELL, 1968; MERKI, 1958; MÜLLER et al., 1984; MÜRI, 1959; ZIEGLER, 1959).
 unten: Geologisches Profil nach SCHINDLER (unpubl. in: DR. VON MOOS AG, 1962); leicht verändert



Figur 1.3 Stratigraphisches Detailprofil im Gipskeuper der Grube Riepel (Situation vgl. Fig. 1.2)

Figur 1.4 Typische Ausbildungen des Gipskeupers im Profil Riepel (lithostratigraphische Einheiten nach DRONKERT, 1987)



a) Übersicht über oberen Teil des Profils. (v.o.n.u.)

S Schilfsandstein s.l.

Einheiten des Gipskeupers:

- I Tone mit Gips
- II zyklische Serie
- III feingeschichtete Serie



b) Detail aus der Einheit IIIA (feingeschichtete Serie)

Sulfat-Fazies: chickenwire, einzelne Lagen z.T. gebändert, bzw. massig



c) Detail aus Einheit IIIA (unterster Teil)

Sulfat-Fazies: gebändert

1.3.3.2 Vergleich mit weiteren Gipskeuper-Profilen

Tabelle 1.1 zeigt einen Vergleich des Gipskeuper-Profiles Riepel mit den stratigraphischen Profilen in den Nagra-Bohrungen. Dabei wird ersichtlich, dass die lithostratigraphische Einteilung nach DRONKERT (1987) an den Profilen der Tiefbohrungen auch gut mit unserem Profil korreliert werden kann, wenngleich in den Bohrungen in grösserer Tiefe das Sulfat noch als Anhydrit vorliegt. Infolge der tektonischen Verstellung an der Basis des Profils Riepel, die auf eine Antiklinalüberschiebung zurückzuführen ist, kann erstens die Einheit V nicht nachgewiesen werden. Zweitens dürfte deshalb die totale Mächtigkeit des Gipskeupers mit ca 74 Metern um einige Meter zu niedrig sein.

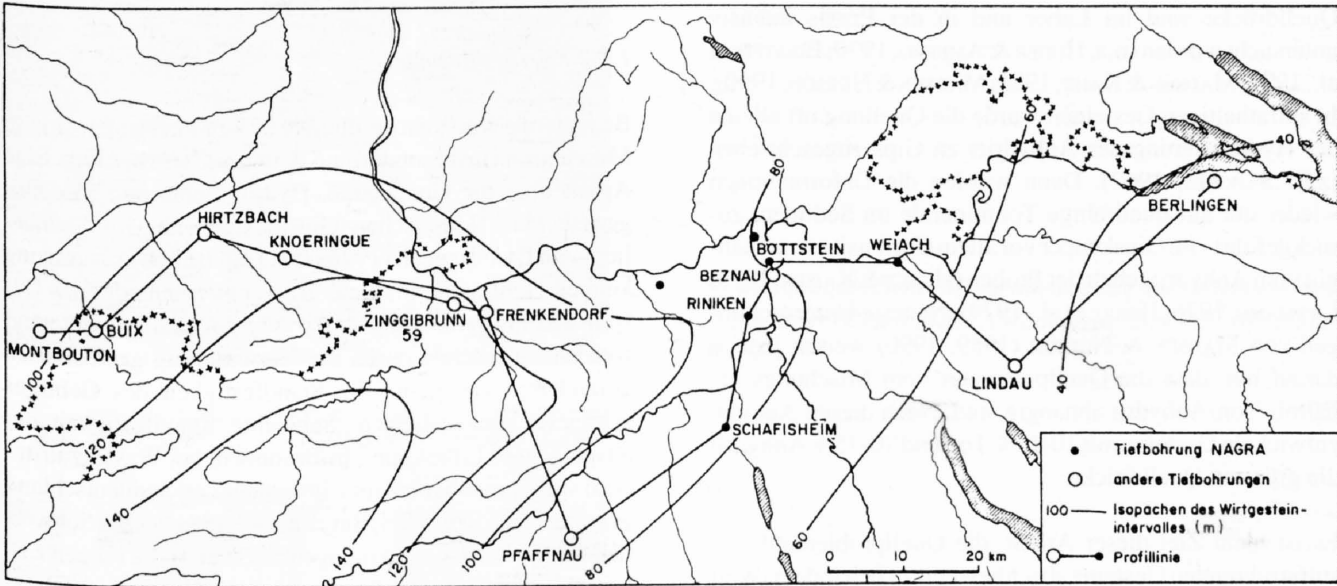
Vergleichen wir die ermittelte Mächtigkeit dieses Profils mit der Isopachenkarte für den Gipskeuper in der Sedimentstudie der NAGRA (1988), so wird für das Staffelegg-Gebiet eine Mächtigkeit des Gipskeupers zwischen 80 und 100 Metern angenommen (vgl. Figur 1.5). Wie bereits erwähnt könnten jedoch einige fehlende Meter noch der tektonischen Reduktion an der Profilbasis zugeschrieben werden. Ausserdem ist anzumerken, dass selbst bei den eng benachbarten Bohrungen Beznau und Böttstein bereits ein Mächtigkeitsunterschied von 9 Metern festgestellt wurde.

Tabelle 1.1 Gipskeuper-Mächtigkeiten (Angaben in Meter)

Einheit	Weiach 1*	Böttstein 2*	Beznau 3*	Schafisheim 4*	Riepel
I	20.95	18.30	15.20	16.46	15.80
II	20.40	19.40	28.88	27.50	27.80
III	22.45	25.45	29.12	27.35	23.40
IV	07.28	07.50	08.00	11.26	06.80
V	03.45	04.12	03.96	02.39	?
Total	74.53	74.77	85.16	84.96	73.80

Referenzen: 1* MATTET et al., 1988a; 2* PETERS et al., 1987; 3* NAGRA, 1984; 4* MATTET et al., 1988b

Weil demnach das stratigraphische Profil Riepel nicht ganz vollständig sein dürfte und ausserdem die vollständigen Profile der Nagra-Bohrungen sedimentologisch und stratigraphisch detailliert untersucht worden sind, wurde auf eine weitergehende Bearbeitung des Profils im Rahmen dieser ingenieurgeologisch orientierten Arbeit verzichtet. Einzig an 5 Sulfatgesteinsproben wurde die Verteilung der stabilen Isotope im Sulfat untersucht. Über die Ergebnisse dieser Untersuchungen und ihre Bedeutung für die Interpretation der Herkunft sulfathaltiger Wässer wird in einem eigenen Kapitel berichtet (Kap. 4.2).



Figur 1.5 Mächtigkeitsverteilung des Gipskeupers in der Nordschweiz (aus: NAGRA, 1988; Fig. 5.8; als Wirtgsteinintervall wird der Gipskeuper bezeichnet)

1.4 Bekannte geotechnische Probleme in Sulfatgesteinen

1.4.1 Quelldrücke

Tonsteine und anhydrithaltige Wechsellagerungen haben die Eigenschaft, ihr Volumen durch Aufnahme von Wasser zu vergrössern. Diese Volumenzunahme ist zeitabhängig und beruht auf einer physikalisch-chemischen Reaktion mit Wasser. Man spricht dann vom Quellen dieser Gesteine, das sich beim Tunnelbau durch Deformationen des Querschnitts und in besonderem Masse durch Sohlhebungen - bzw. bei deren Behinderung durch den Sohl Druck auf das Sohlgewölbe - unliebsam bemerkbar macht. In vielen Fällen vermag das Gewölbe diesem Druck nicht standzuhalten, sodass es zu Bauwerkzerstörungen kommt. Bekannt geworden sind Quellerscheinungen im Gipskeuper des Belchentunnels (GROB, 1972), die auch 18 Jahre nach Fertigstellung des Tunnels noch nicht abgeklungen waren (KOVARI, 1987). Sohlhebungen als Folge von Quellerscheinungen in sulfatführenden Formationen (Mittlerer Muschelkalk, Gipskeuper) sind im Schweizer Jura ausserdem bekannt aus den Eisenbahn-Tunneln Oberer und Unterer Hauenstein sowie aus dem Bözberg (GROB, 1976). Von verschiedenen Strassen- und Eisenbahntunneln in Baden-Württemberg werden kräftige Sohlhebungen berichtet (KRAUSE, 1977).

Der Quellvorgang von Tonen und die resultierenden Quelldrücke sind im Labor und in der Praxis intensiv untersucht worden (u.a. HUDER & AMBERG, 1970; EINSTEIN et al., 1972; MADSEN & KAHR, 1985; MADSEN & NÜESCH, 1990). In sulfathaltigen Gesteinen wurde die Quellung oft alleine der Hydratisierung des Anhydrits zu Gips zugeschrieben (z.B. SAHORES, 1962). Dann wurden die Deformationen wieder nur auf quellfähige Tonminerale im Sediment zurückgeführt - im Gipskeuper vor allem Corrensit -, unabhängig vom Anhydritgehalt der Proben (HENKE & KAISER, 1975; LIPPMANN, 1976; HENKE et al., 1979). Neueste Untersuchungen von MADSEN & NÜESCH (1989, 1990) weisen jedoch darauf hin, dass die Quellparameter vom Mischungsverhältnis Ton/Anhydrit abhängig sind. Nach diesen Autoren entwickeln Gesteine mit 10-15% Ton und 70-75% Anhydrit die grössten Quelldrücke.

Es ist nicht Ziel dieser Arbeit, die Quellproblematik der sulfatführenden Gesteine abschliessend zu behandeln. Weil jedoch anzunehmen ist, dass auch künftig in quellfähigen Formationen Untertagebauten erstellt werden und - insbesondere bei Tunnelprojekten im Jura - dabei auch der Gipskeuper unter die kritischen Lithologien gezählt werden muss, wollen wir hier aus der umfangreichen Literatur zum Thema ein paar, uns wichtig erscheinende Erkenntnisse für die Praxis zusammenfassen:

- Das *Quellpotential* eines Gesteins kann an Proben im Labor abgeschätzt werden. Dabei sind insbesondere das Ton/Anhydrit-Verhältnis sowie Art und Menge der Tonminerale von Interesse (MADSEN & NÜESCH, 1989). Bei Tongesteinen lässt sich der Quelldruck auch aus tonmineralogischen Parametern berechnen (MADSEN &

MÜLLER-VONMOOS, 1985).

- Die *Auswirkungen* des Quellens auf das Bauwerk können in den meisten Fällen durch Nivellement- und Konvergenzmessungen verfolgt werden. Zur Untersuchung des Quellvorganges in der Umgebung eines Hohlraumes eignen sich Messungen in Bohrungen, die mit Extensometern oder Gleitmikrometern instrumentiert sind.
- Der sich entwickelnde *Quelldruck* ist abhängig von der mineralogischen Zusammensetzung des Gesteins, der Verfügbarkeit und dem Chemismus von Wasser, sowie vom Ueberlagerungsdruck, bzw. dem Ausbauwiderstand.
- Im *Gipskeuper gemessene Quelldrücke*:
Beim Bau des Belchentunnels eingebaute Druckdosen zeigten lokal starke Streuungen, aber maximale Quelldrücke von 3.5 MN/m^2 (SCHILLINGER, 1970). Mit Schlitzpressen konnten in der Auskleidung des Hauensteinbasis-Tunnels die Spannungen im Gewölbe gemessen und daraus die Quelldrücke im Gipskeuper-Abschnitt zurückgerechnet werden (STEINER, 1989). So wurden Quelldruck-Mittelwerte von 1.6 MN/m^2 und obere Grenzwerte von $2.5\text{-}3.0 \text{ MN/m}^2$ ermittelt. Langzeitmessungen der Quelldrücke und -verformungen im Wagenburgtunnel (Stuttgart, BRD) ergaben im durch Bewässerung zum Quellen gebrachten Gipskeuper Spannungen unter der Sohle bis zu 3.4 MN/m^2 (WICHTER, 1985).

1.4.2 Karsthohlräume

Bedeutende Karsterscheinungen in Sulfatgesteinen sind in Mitteleuropa insbesondere aus dem Zechstein bekannt. Eine Arbeit über die Geochemie, Hydrographie und Morphogenese eines klassischen Gipskarstgebietes im Südharz liegt von BRANDT et al. (1976) vor. Durch Gips-Auslaugung können Hohlräume im Untergrund entstehen oder das Gestein kann in grösserer Masse aufgelockert und entfestigt werden. In solchen durch die Verwitterung geotechnisch veränderten Zonen ist die Standfestigkeit des Gebirges schwierig einzuschätzen. Schlechte Standfestigkeit der ausgelaugten Lithologie - insbesondere bei Wasserzutritt - wird von Tunnelbauten im Gipskeuper von Süddeutschland gemeldet (BRUDER, 1974; BRUDER et al., 1981). In der Schweiz haben Gipskarst-Erscheinungen bautechnische Folgen z.B. beim Vernier-Tunnel in Genf verursacht (HAMBACH & ODIER, 1988): Gipsbänke der sog. Molasse grise waren örtlich aufgelöst und verlangten nach zusätzlichen Sicherungsmassnahmen.

Verkarstungserscheinungen des Mittleren Muschelkalk wurden im Bergwerk Felsenau von BAUMANN & STUCKY (1984) beobachtet. In den Erläuterungen zur hydrogeologischen Karte Bözberg-Beromünster meldet SCHMASSMANN (1972) Gipskarst im Mittleren Muschelkalk bei Kaiseraugst, nachgewiesen durch die Bohrung Rinau. Nach seiner Meinung ist auch im Gipskeuper der Gipskarst in Oberflächennähe und unter den Schottern der Jura-Täler weitverbreitet. Dies wird bestätigt durch gipsreiche Auslaugungs-Wässer



Figur 1.6 Instabilitäten im Gipskeuper.

a) angeschnittene Doline im oberen Teil der Gipsgrube Riepel (lithostratigraphische Einheit I)
unten: unverwitterter Gipskeuper (lithostratigraphische Einheit II)



b) murgangähnliche Massenbewegung im umgelagerten Gipskeuper (Deponie des Abraums randlich der Gipsgrube Riepel)



c) Doline im verwitterten Gipskeuper (W3) der Baugrube Adler, Ennetbaden
Ansicht der Baugrubenrückwand zwischen den Pfählen PF22 und PF24, Doline zwischen PF23 und PF24 angeschnitten (Bauplanum ca 355.50 m.ü.M.)

einerseits und durch Bohrungen im Gipskeuper, die Hohlräume bis über 1 Meter - teilweise mit artesisch gespanntem Wasser angefahren haben. Auch Senkungstrichter und Dolinen sind aus dem Gipskeuper des Schweizer Jura bekannt und bei verschiedenen kleinmassstäblichen Kartierungen dargestellt worden. Bereits GOLDSCHMID (1964) merkt an, dass in 2 Bohrungen für die Mineralwasserfabrik Eptingen Trichter bis zu 40 Meter unter die Oberfläche nachgewiesen wurden. Im Rahmen der geotechnischen Vorabklärungen für den Habsburg-Nationalstrassentunnel (DR. VON MOOS AG) wurde eine mindestens 12 Meter unter die Felsoberfläche reichende, von Lockergesteinen verfüllte und überdeckte Doline erbohrt. Ebenso wurde bei Baugrunduntersuchungen (DR. VON MOOS AG) für eine tiefe Baugrube in Ennetbaden eine Doline im verwitterten Gipskeuper entdeckt. Beim Aushub der Baugrube wurde dieser Karsthohlraum dann angeschnitten (vgl. Figur 1.6c). Auf die geologischen Verhältnisse dieser Lokalitäten, die wir im Detail untersuchen konnten, werden wir in Kapitel 2.4 noch eingehen.

Da in der Schweiz die sulfatführenden Formationen meist nicht in dicht besiedelten Gebieten auftreten, sind auch praktisch keine Folgen von durch Auslaugung entstandenen Senkungstrichtern und Dolinen bekannt. Dagegen werden vom Ausland Folgen der Gipsauflösung - insbesondere wenn sie durch künstlich beeinflusste Grundwasserspiegelschwankungen noch akzentuiert werden - berichtet: In Paris mussten in 2 Bezirken als Folge von Gipslösung instabil gewordene bzw. potentiell gefährdete Gebiete ausgeschieden werden (DEVEUGHELE & POLATERA, 1979; THORIN, 1986). Verkarstung miocäner Gipslagen unter der spanischen Stadt Zaragoza (Ebro-Becken), führt zu einer grossen Zahl von Dolinen, deren Grösste einige 100 Meter Durchmesser aufweisen können (BENITO & GUTIERREZ, 1988). Die Häufigkeit von Dolinen und Einsturztrichtern in Sulfat-Gebieten Ostdeutschlands hat dort zu intensiven ingenieurgeologischen Studien geführt. Im Vordergrund stand die Abschätzung des Einsturzrisikos mit Hilfe von Häufigkeitsanalysen (REUTER et al., 1983).

1.4.3 Betonaggressive Karstwässer

Bereits SCHILLINGER (1970) hat darauf hingewiesen, dass häufig Schäden an den Tunnelauskleidungen auf die Betonzerstörung durch aggressive, sulfathaltige Wässer zurückzuführen sind. Im Bözberg-Bahntunnel mussten 1963-67 viele Stellen des 1903-05 erstellten Sohlgewölbes repariert werden, da sie nach BECK & GOLTA (1972) durch sulfathaltige Wässer total zerstört worden waren.

In einem speziellen Untersuchungsprogramm haben wir versucht, Aspekte des Langzeitverhaltens von Beton in einer sulfathaltigen Umgebung aufzuzeigen, wie sie für Bauten im Gipskeuper typisch ist. Auf die Ergebnisse dieser Untersuchungen wird in Kapitel 4.3 eingegangen.

1.4.4 Rutschungen

Verrutschte oder im Kriechen begriffene Gipskeuperhänge können im Schweizer Jura vielerorts beobachtet werden. Glücklicherweise hat noch keine Rutschung in verwitterten sulfathaltigen Gesteinen Ausmasse erreicht, dass sie in der Literatur gross beachtet worden wäre. In einer generellen Betrachtung der möglichen instabilen Gebiete der Schweiz stuft jedoch SCHINDLER (1988) die gipsführenden Ton- und Mergelgesteine wegen ihrer Neigung zu Verkarstung als speziell kritisch ein: Der Jura ist deshalb charakterisiert durch häufige bis sehr häufige Instabilitäten als Folge der Gipsauflösung. In Figur 1.6 haben wir einige Beispiele von Instabilitäten abgebildet, die durch die Auslaugung im Gipskeuper hervorgerufen wurden.

Aus den französischen Alpen werden von PILOT & DURVILLE (1988) einige Rutschungen in Sulfatgesteinen von ökonomischer Bedeutung gemeldet. FABRE & DAYRE (1982) weisen darauf hin, dass in den Savoyer Alpen trotz einiger Rutschungen in den gipsführenden Trias-Ablagerungen das Problem der Massenbewegungen von verwitterten, durch Gipsauslaugung geschwächten Sedimenten von projektierenden Ingenieuren noch oft unterschätzt wird.

2 VERWITTERUNG

2.1 Einleitung

Die Verwitterungsprozesse entstehen durch eine Wechselwirkung zwischen dem Gestein und seiner Umgebung. Wenn Gesteine und Mineralien an oder nahe der Erdoberfläche den herrschenden Umwelteinflüssen ausgesetzt sind, so unterscheiden sich diese meistens stark von den ursprünglichen Bildungsbedingungen. Naturgemäss streben die Minerale einem energetisch möglichst stabilen Zustand zu. So betrachtet kann unter der Verwitterung die Gesamtheit der gesteins- und mineralverändernden Prozesse zusammengefasst werden, die unter den jeweils herrschenden Bedingungen (Feuchtigkeit, Temperatur, biologische Aktivität) zu einem stabileren Zustand führen (BIRKELAND, 1984). Diese Prozesse können von ihrem Mechanismus her in zwei Hauptgruppen eingeteilt werden:

- a) Die Prozesse, die der *physikalischen Verwitterung* und
- b) diejenigen, die der *chemischen Verwitterung* zugeordnet werden.

Die Wirkung der biologischen Verwitterung soll hier keineswegs unterschätzt werden, doch lassen sich ihre Beiträge wiederum auf die erwähnten 2 Gruppen aufteilen. Neuere Forschungsarbeiten zeigen, dass die Aktivität z.B. von Bakterien, Pilzen, Algen und Flechten wesentlich zur Auflockerung des Gesteinsverbandes und insbesondere zum chemischen Angriff von Mineralien beiträgt (KRUMBEIN & DYER, 1985). Besonders wichtig ist die Rolle dieser Lebewesen bei chemischen Prozessen, in denen sie die Reaktionskinetik beeinflussen, als Katalysatoren agieren, durch Reduktion oder Oxidation von Elementen die Minerale direkt angreifen oder durch Freisetzung von Metaboliten die pH-Bedingungen entscheidend beeinflussen (ECKHARDT, 1985). Im Gelände lassen sich die einzelnen Prozesse jedoch oft nur schwer auseinanderhalten.

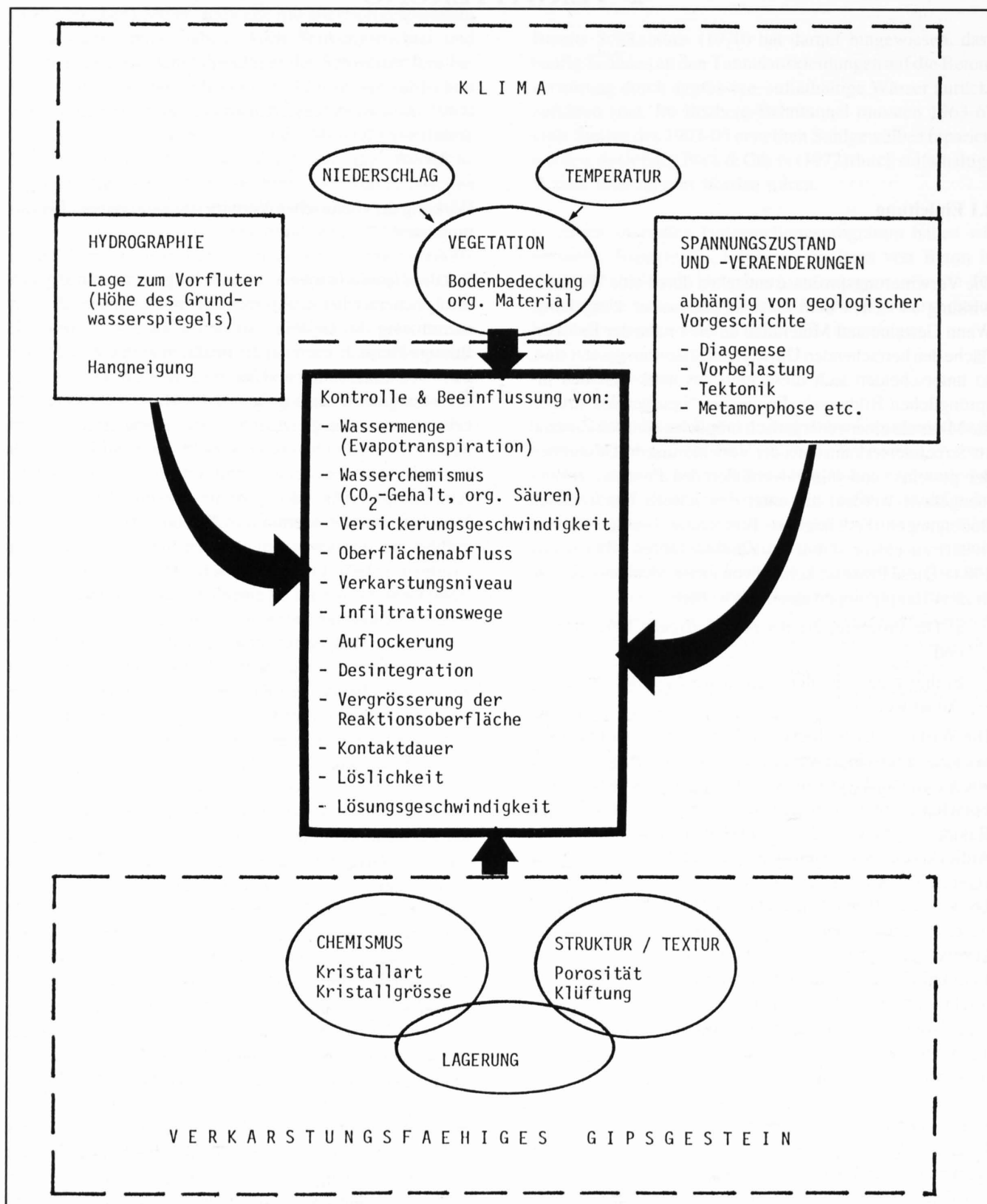
Bei der *physikalischen Verwitterung* finden keine mineralogischen Veränderungen des Gesteins statt. Das Hauptmerkmal dieser Prozesse zeigt sich in der Desintegration, d.h. dem Aufbrechen und Zerfallen des Gesteinsverbandes in immer kleinere Einheiten. Damit verbunden ist eine Zunahme der „reaktionsfähigen“ Oberfläche, was für die

Wirkung der chemischen Verwitterung von grosser Bedeutung ist.

Bei der *chemischen Verwitterung* hingegen verändert sich infolge chemischer Reaktionen die mineralogische Zusammensetzung des Gesteins, sowie die als Agens wirkende flüssige Phase. Je nach Art der Reaktion wird unterschieden zwischen kongruenter und inkongruenter Lösung. Beispiele für kongruente Lösung, bei der das Mineral vollständig in Lösung geht ohne gleichzeitige Ausfällung eines anderen Minerals, sind die chemische Verwitterung (Auflösung) der löslichen Salze wie Steinsalz und Gips sowie der Karbonate. Als Beispiel für inkongruente Lösung sei hier die Verwitterung von Aluminiumsilikaten (z.B. Feldspat) angeführt, bei der neben den gelösten Ionen als feste Phase Tonmineralien zurückbleiben. Die verschiedenen Reaktionsschritte sind im einzelnen komplex und mineral-spezifisch, daneben auch stark abhängig von den herrschenden Druck-, Temperatur- und pH-Bedingungen. Für einen vertieften Einblick in diese Problematik verweisen wir auf BIRKELAND (1984). Die Kinetik der Mineralverwitterung und eine Diskussion der Verwitterungsraten in unterschiedlichem Klima wurde unlängst von COLMAN & DETHIER (1986) beschrieben.

Die quantitative Bestimmung von Verwitterungsraten im Feld ist schwierig, da nicht nur die Stoffumsetzung, z.B. durch chemische Veränderung, sondern auch die Stoffumlagerung z.B. durch mechanische Denudation (Wind) und „fluvial“ durch Schwebstofftransport des abfliessenden Niederschlags berücksichtigt werden müsste. Eine qualitative Beurteilung der ablaufenden Prozesse ist jedoch möglich: Einerseits erlaubt die Untersuchung des perkolierenden Wassers Rückschlüsse auf die chemische Verwitterung, andererseits geben strukturelle und vergleichende Beobachtungen der Verwitterungsprodukte mit dem Ausgangsgestein Hinweise auf die physikalische Verwitterung.

Wir wollen uns hier auf die Besprechung der Phänomene in Sulfatgesteinen beschränken, die für das Verständnis der Wechselbeziehungen Verwitterung/geotechnisches Verhalten dieser Gesteine von Bedeutung sind. In Fig. 2.1 sind die wichtigsten Faktoren zusammengestellt, die die Verwitterung sulfatführender Gesteine speziell beeinflussen.



Figur 2.1 *Hauptfaktoren der Verwitterung und ihr Einfluss auf die Gipsverkarstung. Unberücksichtigt ist der Faktor Zeit, der jedoch für die Tiefenentwicklung und die Maturität eines Bodenprofils wesentlich ist.*

2.2 Verwitterung von gipshaltigen Gesteinen

2.2.1 Zur Frage des Gipskarstes

In einer grundlegenden Arbeit über die verschiedenen Lösungsformen konnte PRIESNITZ (1969) darlegen, dass eine prinzipielle Unterscheidung von „Verkarstung“ des Kalksteins und „Auslaugung“ der Salz- und Sulfatgesteine nicht angezeigt ist. Die morphologisch kartierbaren Lösungsformen wie Karren, Dolinen etc. sollen demnach als genetische Formen erfasst werden. Ihre Bildungsgeschwindigkeit ist jedoch durch die unterschiedliche Löslichkeit bzw. Lösungsgeschwindigkeit des jeweiligen chemischen Sedimentes geprägt. So gesehen ist die Verkarstung ein Spezialfall der Verwitterung, der bei löslichen Gesteinen auftritt. Mit Auslaugung könnte man allenfalls die chemische Komponente der Verwitterung bezeichnen, das Entfernen der Evaporite durch Lösung. KOCKERT (1972), der in seiner Arbeit über Höhlenbildungen in den Sulfaten des Zechsteins dargelegt hat, dass Hohlraumbildungen auch unterhalb des Gipsspiegels auftreten können, verdanken wir eine Definition der Verkarstung, die sowohl mechanische wie chemische Aspekte der Verwitterung miteinbezieht: „Verkarstung ist der kontinuierlich oder phasenhaft verlaufende natürliche Auflösungs- oder Zersetzungsprozess von leichtlöslichen Gesteinen durch Wasser, unterstützt durch mechanische Vorgänge wie Erosion und Versturz“ (KOCKERT, 1972:261). Wie beim Karbonatkarst, so ist auch beim Gipskarst die Höhlenbildung an Kluftsysteme gebunden, die eine Wasserzirkulation erlauben. Auch Schichtgrenzen (z.B. schwerer lösliche Dolomit- oder dolomitische Mergelagen) mit wasserstauer Wirkung haben einen Einfluss auf die Anlage der Lösungsformen.

2.2.2 Löslichkeit der Sulfate

2.2.2.1 Die Umwandlung zwischen den verschiedenen Phasen

Die Löslichkeit von Anhydrit (CaSO_4) und Gips ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), sowie die Stabilität der verschiedenen Phasen im CaSO_4 - $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ -System sind Themen einer grossen Anzahl von Publikationen. Es sollen hier nur die wichtigsten Erkenntnisse zusammengefasst werden. Eine Zusammenstellung der Literatur präsentierte unlängst BAUMANN (1984) im Rahmen seiner Dissertation über das rheologische Verhalten von Trias-Evaporiten. Im interessierenden Temperatur-Druck-Bereich der natürlichen Verwitterung sind nur das Dihydrat (Calciumsulfat) und der sog. Anhydrit II (natürlicher Anhydrit) stabil. Daneben haben die metastabilen Phasen wie das Halbhydrat (Bassanit, bzw. der technisch hergestellte Stuckgips) und der Hochtemperatur-Anhydrit (Anhydrit I, stabil bei $T > 1180^\circ\text{C}$) eine gewisse technische oder struktureologische Bedeutung.

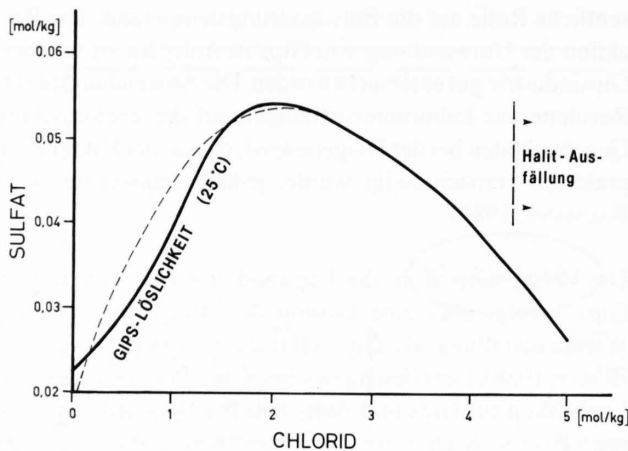
Bei der Entwässerung des Dihydrates (Gips) zum Anhydrit spielen die Kristallform und die Kornverteilung eine we-

sentliche Rolle auf die Entwässerungstemperatur. Die Reaktion der Umwandlung von Gips in Anhydrit ist von der Gipsindustrie gut untersucht worden. Die Anwendung dieser Resultate aus Laboruntersuchungen auf die geologischen Gegebenheiten bei der Diagenese ist, da u.a. der Faktor Zeit praktisch vernachlässigt wurde, jedoch fragwürdig (vgl. BAUMANN, 1984).

Die *Vergipsung*, d. h. die Umwandlung von Anhydrit in Gips, erfolgt über eine Lösung des Anhydrits und eine Wiederausfällung als Gips (BAUMANN, 1984; CONLEY & BUNDY, 1958). Der Gleichgewichtspunkt (Punkt mit gleicher Löslichkeit für Gips und Anhydrit) bei Normaldruck liegt nach BLOUNT & DICKSON (1973) bei $56 \pm 3^\circ\text{C}$, wobei die Löslichkeit an diesem Punkt in reinem Wasser 2.04 g/l beträgt. Daneben wird die Umwandlung von Anhydrit in Gips - und umgekehrt - auch durch die Aktivität der Lösung, d.h. Art und Menge der gelösten Ionen beeinflusst. Denkbar ist, dass die Hydratationsfähigkeit des Anhydrits auch von seiner Entstehungsgeschichte abhängig ist. BAUMANN (1984) merkt an, dass die Reaktivität des Anhydrits verkleinert ist, je grösser die Dehydratationstemperatur ursprünglich war. Vermutlich dürfte dafür ein Sinterungsprozess verantwortlich sein, bei dem die Korngrösse mit steigender Bildungstemperatur (bzw. Metamorphosetemperatur) zunimmt. Parallel dazu schwindet die reaktionsfähige Oberfläche, was eine Erklärung wäre für die verkleinerte Reaktivität. Dass die Umwandlung von Anhydrit in Gips abhängig ist von der Korngrösse, bzw. der zugänglichen Oberfläche, konnten MADSEN & NÜESCH (1989) experimentell zeigen: In einem 6 Jahre dauernden Quellversuch an massigem Anhydrit (1-2% Ton) wandelte sich nur 13% des Anhydrits in Gips um. Ein Parallelversuch mit gleichem, jedoch auf die Korngrösse $< 0.063 \text{ mm}$ gemahlenem Material ergab eine Vergipsung von 80% des Anhydrits.

2.2.2.2 Gips-Löslichkeit

Die Löslichkeit von Gips in Wasser ist bei atmosphärischem Druck im Temperaturbereich von $0-40^\circ\text{C}$ praktisch konstant. Sie beträgt nach HARDIE (1967) $1.8-2.1 \text{ g/l}$ Sulfat. Hingegen wird sie stark durch die Aktivität der Lösung beeinflusst, d.h. durch die Konzentration an fremdionigen Salzen (u.a. SHTERNINA, 1960; BRAITSCHE, 1962; KINSMAN, 1974). Wie in Figur 2.2 schön zu sehen ist, erreicht die Löslichkeit ungefähr bei einer 2-molaren Chlorid-Lösung ein ausgeprägtes Maximum. Steigt die Konzentration der Lösung weiter an in Richtung der Salz-Sättigung, so sinkt die Löslichkeit bezüglich Gips wieder ab. Aus diesem Grunde ist es möglich, dass beim Zusammentreffen von zwei an Gips gesättigten Lösungen mit unterschiedlichem Salzgehalt (z.B. Aufsteigen von salinaren Tiefengrundwässern) die Mischung entsprechend ihrem neuen Salzgehalt an Gips untersättigt ist. Es kommt dann, ähnlich wie beim Karbonatkarst, zu einer Mischungskorrosion.



Figur 2.2 Gips-Löslichkeit in Meerwasser (25°C, 1 atm) in Abhängigkeit von der Salinität. (nach KINSMAN, 1974; gestrichelte Kurve: Laborversuche zur Löslichkeit von Gips im System $\text{CaSO}_4\text{-NaCl-CO}_2\text{-H}_2\text{O}$ bei 25 °C von SHTERNINA, 1960).

2.3 Das Verwitterungsprofil

2.3.1 Klassifikation der Verwitterungserscheinungen

Oberflächennahe Veränderungen der Gesteinsschichten durch Auflockerung und Verwitterung üben einen entscheidenden Einfluss aus auf den Teil des Untergrundes, der bei ingenieurgeologischen Fragestellungen detailliert auf sein mechanisches Verhalten hin untersucht werden soll. Viele Ingenieurgeologen müssen sich deshalb mit der Thematik der Verwitterungserscheinungen auseinandersetzen. Dem Wunsch des Ingenieurs nach einer qualitativen Klassifikation, die den verschiedenen Verwitterungszuständen auch gleich die geotechnischen Eigenschaften zuordnen würde, versuchten einige Ansätze entgegenzukommen (z.B. LITTLE, 1969). Meistens befriedigten die vorgeschlagenen Klassifikationen in verschiedener Hinsicht nicht:

- Zum einen waren sie oft zu stark an eine bestimmte Lithologie gebunden.
- Zum anderen wurden diagnostische Merkmale direkt mit genetischen Überlegungen verknüpft - ein Vorgehen, das die Übertragbarkeit einer Klassifikation auf unterschiedliche Lithologien stark einschränkt.

Eine Diskussion verschiedener Klassifikationen gibt DEARMAN (1976). Auch auf internationaler Ebene wurde versucht, ein einheitliches und in der Ingenieurgeologie allgemein anwendbares Klassifikationsschema für die Ansprache der Übergangsformen vom Fest- zum Lockergestein

zu schaffen (vgl. ISRM, 1981). Eine volle Übereinstimmung zwischen den verschiedenen Vorschlägen konnte aber noch nicht gefunden werden. Es bleibt zu berücksichtigen, dass die Verwitterungsprozesse stark klimaabhängig sind und der Tiefgang der Verwitterung und damit die Ausbildung bestimmter Verwitterungsprofile zudem vom Relief und der geologischen Vorgeschichte des Gebietes gesteuert werden. Deshalb sollte ein deskriptives, einfaches Verwitterungsschema angewandt werden, das im Einzelfall um für die zu beschreibende Lithologie relevante Beobachtungen ergänzt werden kann.

Der Sinn eines Klassifikationsschemas liegt in der standardisierten und im Gelände praktikablen Methode zur Aufnahme und Charakterisierung von *Verwitterungsprofilen*, d.h. von Gesteinen im Grenzbereich zwischen Fest- und Lockergestein. Die Verwitterungs- und Auflockerungszone ist bei den meisten Ingenieurarbeiten wie Baugruben, Böschungen im Fels, Hanganschnitte etc. von grosser Bedeutung. Mit den herkömmlichen boden- und felsmechanischen Untersuchungsmethoden kann dieser Bereich meist nur schwer erfasst werden, weil der Felsverband schon zu sehr aufgelockert ist. Andererseits ist die Entnahme von repräsentativen Proben, die wir im bodenmechanischen Labor untersuchen können, auf die mehrheitlich grobkornfreie Verwitterungsschicht beschränkt. Aufwendige Feldversuche und in-situ Messungen sind in der Praxis nur ausnahmsweise möglich. Damit jedoch Boden- und Felskennwerte aufgrund von Erfahrungen anderenorts übertragen werden können, ist gewissermassen ein Vergleichsmassstab erforderlich. Dazu bietet sich die Einteilung des Verwitterungsprofils in *Verwitterungsstufen* an, die nach überprüfbaren Kriterien beurteilt werden können. Einer deutschen Arbeitsgruppe kommt das Verdienst zu, für mitteleuropäische Klimaverhältnisse und ausseralpine Gebiete ein Klassifikationsschema entworfen zu haben, das auf verschiedene Gesteinsgruppen angewendet werden kann. Die Ergebnisse dieser Arbeitsgruppe sind zusammen mit Fallbeispielen durch HEITFELD (1985) herausgegeben worden.

Wir wollen hier die wichtigsten Voraussetzungen für diese Klassifikation zusammenfassen:

Wenn diagenetisch veränderte und überkonsolidierte Gesteine wieder in Oberflächennähe gelangen, so haben sie die Tendenz, sich mechanisch zu entspannen, wobei die diagenetisch erworbenen Kornbindungen ganz oder teilweise verloren gehen. Dabei entstehen neben den tektonisch angelegten Klüften auch neue Trennflächen, die das Gestein in *Kluftkörper* zerlegen. Mit fortschreitender Verwitterung haben auch die Kluftkörper die Tendenz sich weiter aufzuteilen und zu zerfallen.

Parallel zu dieser „Zerbröckelung“ finden chemische Prozesse statt wie Lösung und Mineral-Umbildung. In den unzähligen Klüftchen und der durch die Zerteilung des Gesteins stetig vergrösserten Reaktionsoberfläche findet die chemische Verwitterung dazu ideale Voraussetzungen. Bei der Entwicklung von Kornbindungen wie auch bei

der sekundären Zerstörung spielen Tonminerale eine grosse Rolle. Je nach Art der Tonminerale und deren Beeinflussung durch Diagenese und ev. Metamorphose können die Bindungen unterschiedlich „verwitterungsresistent“ sein. Sind jedoch die diagenetisch erworbenen Kornbindungen nicht ausreichend stark, so werden die Tonminerale im Verlauf des Verwitterungsprozesses reaktiviert. Von besonderer Bedeutung sind dabei quell- und schrumpffähige Tonminerale, da sie den Verlauf der Entfestigung entscheidend mitbeeinflussen.

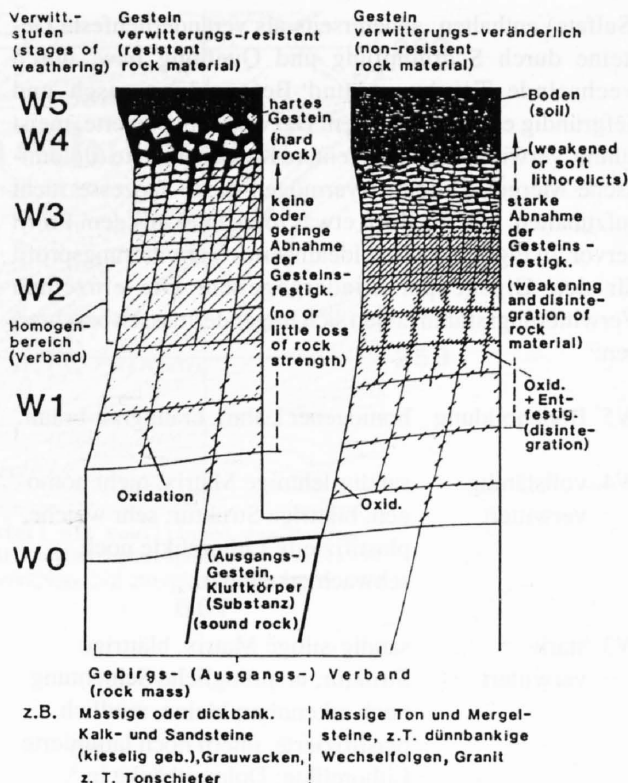
Die *Verwitterbarkeit* eines Gesteins wird deshalb im Wesentlichen beeinflusst durch folgende Faktoren:

- Art und Menge der Tonmineralien
- Festigkeit der Kornbindung
- Haupt-Mineralien (Korngrösse, Löslichkeit)
- Verhalten unter ständiger Wasserbedeckung, bzw. Schrumpffähigkeit bei Trocknungs/Befeuchtungs-Wechseln
- Gesteinsporosität

Prinzipiell lassen sich nach EINSELE et al. (1985) 2 Arten von *Verwitterungsprofilen* unterscheiden (vgl. Figur 2.3):

- gesteins-resistentes Verwitterungsprofil
in Gesteinen, deren Kluftkörper weitgehend ihre Festigkeit bewahren und nur randlich verwittern bzw. aufgelöst werden oder die trotz Verkarstung im Innern noch lange rel. stabile Kluftkörper behalten.
Beispiele: kieselige Sandsteine, massige Karbonate
- gesteins-veränderliches Verwitterungsprofil
in Gesteinen, deren Kluftkörper relativ rasch und tiefgründig entfestigt werden.
Beispiele: kristalline Schiefer, Ton- und Mergelsteine, Evaporite

Im Grunde genommen handelt es sich dabei um 2 Grenzfälle. In der Natur findet sich oft ein unregelmässiges Verwitterungsprofil in einer Wechsellagerung von sog. gesteins-resistentem und -veränderlichem Material. Ähnlich verhält es sich auch mit wasserleitenden Schichten, wo das zirkulierende Grundwasser durch Oxidations- und Lösungsvorgänge das Gestein verändert. Tektonische Störungszonen oder fazielle Variationen können zudem einen lateralen Wechsel des Verwitterungszustandes hervorrufen. Dennoch lassen sich schon bei der Aufnahme im Gelände innerhalb des Verwitterungsprofils aufgrund des sich ändernden Trennflächengefüges und der anderen fortschreitenden Verwitterungsprozesse (Oxidation, Entkarbonatisierung, etc.) „Homogenbereiche“ ausscheiden. Diese wurden von EINSELE et al. (1985) in Anlehnung an die englischsprachige Literatur mit *Verwitterungsstufen* (weathering stages) bezeichnet und mit W0 (unverwittertes Ausgangsgestein) bis W5 (Bodenbildung) abgekürzt. Entscheidend für diese Art der Klassifikation ist, dass sie ohne Labormethoden auskommt und sich auf qualitativ



Figur 2.3 Idealisierte, oberflächenorientierte Verwitterungsprofile von homogenem, massigem Ausgangsgestein für die beiden Grenzfälle gesteins-resistentes und gesteins-veränderliches Ausgangsmaterial (aus: EINSELE et al., 1985; Fig. 3).

beschreibbare Phänomene abstützt:

- Bankstärke, Schichtdicke
- Kluftabstände, Trennflächengefüge (Kluftkörpergrösse)
- relative Gesteinsfestigkeit (hart, halbfest, weich, plastisch)
- farbliche Veränderungen
- Form der Gesteinsrelikte
- kohäsiv / nicht kohäsiv

Der Begriff *Verwitterungsgrad*, der in der Literatur noch häufig anzutreffen ist (vgl. WALLRAUCH, 1969), sollte nur noch für genauere, quantitative Charakterisierung verwendet werden (z.B. Wasserdurchlässigkeit, Festigkeitseigenschaften, chemisch-mineralogische Veränderungen).

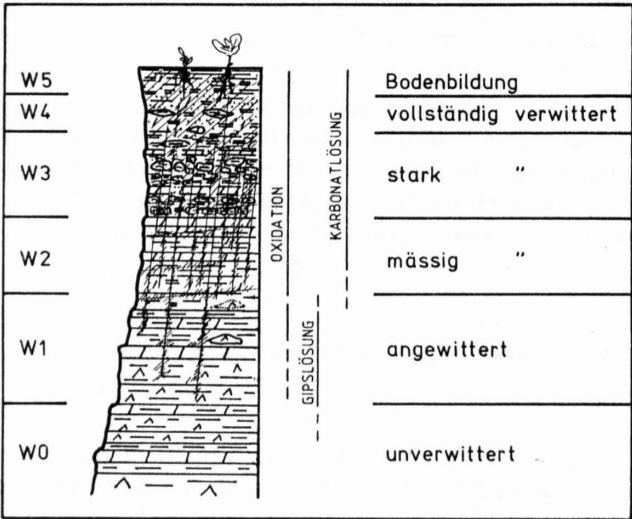
2.3.2 Ausbildung des Verwitterungsprofils im Gipskeuper

Analog den vorgängig diskutierten Verwitterungsprofilen wollen wir hier auch für den Gipskeuper ein Verwitterungsprofil skizzieren.

Die Hauptmasse dieser Gesteine besteht aus sulfatführenden Ton- und Mergelsteinen, die einerseits hochlösliche Minerale

(Sulfate) enthalten, andererseits als veränderlichste Gesteine durch Schrumpfung und Quellung bzw. durch wechselnde Trocknung und Befeuchtung rasch und tiefgründig entfestigt werden. Dazwischengelagerte, meist dünne, verwitterungs-resistentere Karbonatbänke (dolomitische Mergel, Dolomit) vermögen diese Prozesse nicht aufzuhalten, treten jedoch etwas markanter aus dem Profil hervor. In Figur 2.4 ist ein idealisiertes Verwitterungsprofil für den Gipskeuper wiedergegeben. Die einzelnen Verwitterungsstufen lassen sich folgendermassen beschreiben:

W5 Bodenbildung	homogener Lehm, braungrau-braun.
W4 vollständig verwittert	sandig-lehmige Matrix, nicht homogen, blättrige Struktur; sehr weiche, plastifizierte Lithorelikte noch schwach erkennbar.
W3 stark verwittert	sandig-siltige Matrix, blättrige Struktur, ursprüngliche Schichtung noch erkennbar; kleine, randlich plastifizierte, intern noch laminierte Lithorelikte; Dolomitbänke in Bruchstücke aufgelöst.
W2 mässig verwittert	Gips total weggelöst, Karbonat lösung, Mergel oxidiert und verfärbt; Schichtung noch erkennbar, engstehende Kluftflächen.
W1 angewittert	Gipsauflösung. Beginn der Entfestigung, Oxidation entlang von Klüften, Schichtverband noch mehrheitlich intakt.
W0 unverwittert	frisches Gestein mit intakten Gipsbänken (in grösserer Tiefe Sulfat auch als Anhydrit).



Figur 2.4 Idealisiertes Verwitterungsprofil im Gipskeuper.

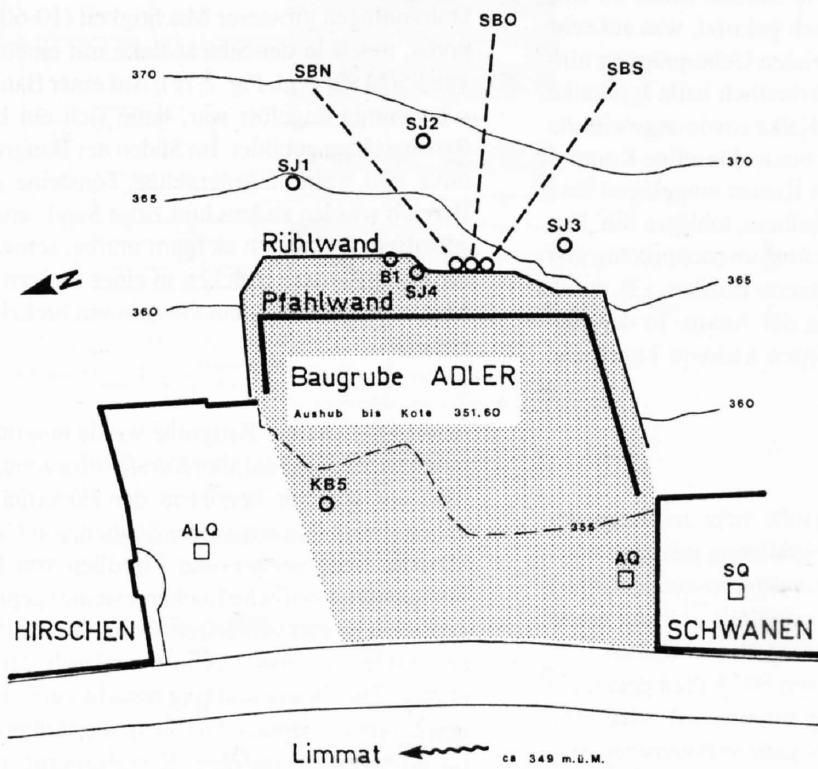
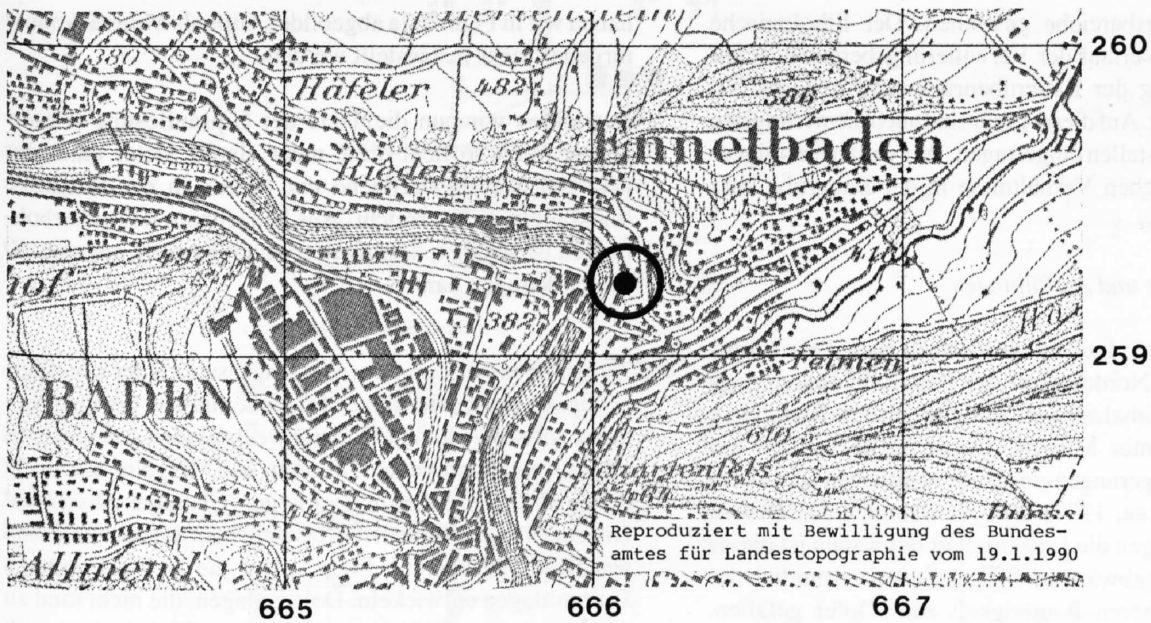
Das vorliegende Klassifikationsschema hat sich bei der Beschreibung von Aufschlüssen im Gipskeuper des Ostjura bewährt (RICK, 1988). Dabei konnten die für Laboruntersuchungen entnommenen Gesteins- und Wasserproben einem definierten Verwitterungsbereich zugeordnet werden. Damit war die Grundlage für die Diskussion von Beobachtungen und Laborresultaten an vergleichbaren Verwitterungszuständen gegeben, unabhängig vom Ort, der absoluten Entnahmetiefe, der Maturität oder dem Alter des Verwitterungsprofils.

2.4 Beispiele aus dem Gipskeuper des Aargauer Jura

2.4.1 Verwitterungsprofil in Ennetbaden

Die geologischen Verhältnisse in der Region Baden haben schon früh das Interesse der Naturwissenschaftler auf sich gezogen. Anlass zu geologischen Kartierungen und Untersuchungen gaben das Auftreten der Thermalquellen und die Frage der Herkunft ihres Thermalwassers ebenso wie die Frage der Bildung des Badener Hausberges, der Lägern. Diese Studien fanden ihren Niederschlag in einer grossen Zahl von Publikationen. An Arbeiten mit zusammenfassenden Kapiteln über die regionale Geologie können u.a. MÜHLBERG (1902), SENFTLEBEN (1923), HABERBOSCH (1943) und SCHINDLER (1977) erwähnt werden. Auf die Literatur, in der speziell die Thermalquellen von Baden beleuchtet werden, wird in Kapitel 4.1.2 eingegangen.

Durch eine Vielzahl von Bohrungen in den Städten Baden und Ennetbaden beidseits der Limmat wurde bekannt, dass der Gipskeuper im Bereich der hier aufgebrochenen Lägernstruktur meist tiefgründig verwittert ist. 1985/86 wurde im Bäderquartier von Ennetbaden für einen Neubau anstelle des alten Hotels Adler eine tiefe Baugrube im Gipskeuper ausgehoben. Eine Situation ist in Figur 2.5 wiedergegeben. Die hangseitige Baugrubenumschliessung musste über eine Höhe von ca. 12 Metern im verwitterten Gipskeuper bewerkstelligt werden. Der Aushub erfolgte deshalb im hinteren Bereich im Schutze einer verankerten Rühlwand, die gegen unten durch eine leicht nach vorne versetzte, dichte Pfahlwand mit Fusseinspannung abgelöst wurde. Auf die rechtlichen Fragen, die komplizierte Bewilligungspraxis und die damit verbundenen Auflagen für ein Bauwerk im Bäderquartier in unmittelbarer Nähe von Thermalwasseraustritten (mit einem Aushub bis knapp über die Fassungstiefe der Schwanenquelle) kann hier nicht eingegangen werden. Jedenfalls eröffnete uns dieses in ingenieurmässiger wie geologischer und hydrogeologischer Hinsicht anspruchsvolle Unterfangen einen einmaligen Einblick in den verwitterten Gipskeuper, der hier im Bereich der Lägernüberschiebung extrem zerschert und verfaltet ist. Aus den Sondierungen und den flächenhaften Aufschlüssen über die auf 70 m' abgewinkelte Baugrubenrückwand konnten wir interessante Beobachtungen über den Verlauf



Legende:

○ SJ1 Sondierbohrungen

□ sq gefasste Thermalquellen

0 10 20 30 m

Figur 2.5 Situation der Baugrube Adler in Ennetbaden.
oben: Ausschnitt aus der Landeskarte 1:25'000
unten: Umgebung der Baugrube (gerastert) im Massstab 1:750

der Verwitterungsbereiche gewinnen. Der lithologische Aufbau und der Verlauf der Verwitterungsbereiche ist auf einer Abwicklung der Baugrubenrückwand in Figur 2.6 zusammengestellt. Auf dieser Figur sind auch die wichtigsten Probenentnahmestellen eingetragen. Wir wollen im folgenden die geologischen Verhältnisse in der Baugrube kurz beschreiben.

a) Lockergesteine und Auffüllungen

Über verwittertem, lockergesteinsähnlichem Fels (Gipskeuper) liegt im Nordost-Teil der Baugrube eine geringmächtige, bis maximal auf Kote 354.00 reichende Bedeckung von verschwemmter Moräne. Dabei dürfte es sich um randglaziale Ablagerungen eines risseiszeitlichen Gletschers handeln (SCHINDLER, 1977). Mit Ausnahme eines kleinen Restes im SW gegen die Liegenschaft Schwanen ist dieses Schichtglied hangabwärts und gegen Süden vermutlich der Erosion und früheren Bautätigkeit zum Opfer gefallen. Geotechnisch handelt es sich um mässig siltigen, leicht tonigen Kies mit mässig Sand. Die Gerölle (max. 30 cm) sind angerundet-gerundet, z.T. auch gekritzelt, was auf sehr kurze Transportwege seit der glazialen Ueberprägung hindeutet. Das Spektrum enthält mehrheitlich helle Jurakalke und untergeordnet dunkle, alpine Kalke sowie angewitterte Kalksandsteine. Vereinzelt treten bunte, kieselige Komponenten auf (Verrucano). In diesen Kiesen eingelagert sind verschwemmte Pakete von ockergelbem, tonigem Silt. Der Gesteinsverband zeigte sich beim Aushub nachbrüchig und die siltreichen Partien neigten zu innerer Erosion, z.B. durch Ausschwemmungen beim Bohren der Anker. In der NE- und SW-Ecke der Baugrube wurden kleinere künstliche Auffüllungen angeschnitten.

b) Felsuntergrund

Der Felsuntergrund dieser Baugrube liegt im Kern der Lägerstruktur. Das bei der Gebirgsbildung inkompetente, plastische Verhalten des hier anstehenden Gipskeupers führte dazu, dass das Gestein intensiv verfäلتelt und die etwas kompetenteren Dolomitlagen dabei stark zerbrochen wurden. Daneben tritt eine Klüftung mit 80° Fallen gegen die Limmat auf, die als Talkklüftung interpretiert wird. Die Sedimente des Gipskeupers sind im ganzen Baugrubenareal Adler verwittert. Sie müssen - zumindest wenn sie stark verwittert sind - geotechnisch bereits als Lockergesteine angesprochen werden.

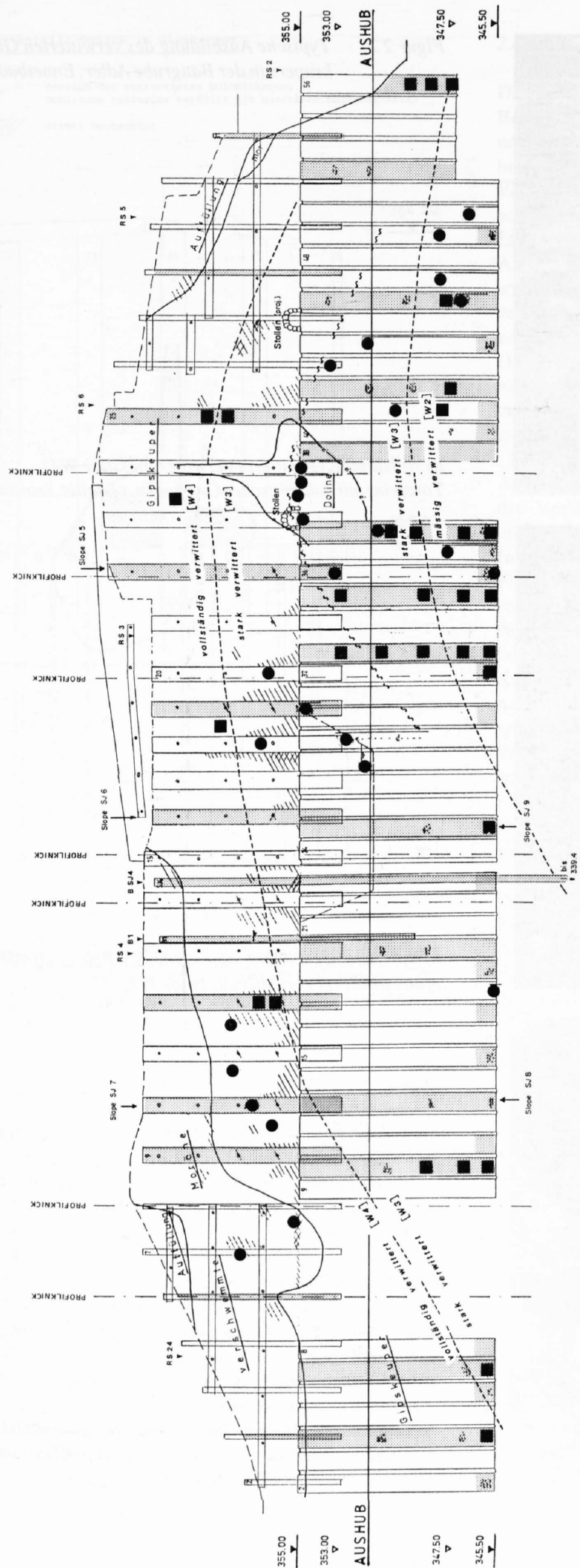
Die Verwitterungsbereiche können aufgrund der Entfestigung und der chemisch-mineralogischen Veränderungen (Oxidation, Gips- & Karbonatlösung) gut eingegrenzt werden (vgl. Figur 2.6). Die Grenze stark/mässig verwittert (W3/W2) reicht im Süden maximal bis auf Kote 350.00 hinauf. Mit zunehmender Verwitterung nimmt die Kies-Fraktion (Tonsteinreste, Mergelbröckchen etc.) zu Gunsten der Sand- bzw. Siltfraktion ab. Die Schichtung und die Verfäلتung sind jedoch auch im verwitterten Gipskeuper trotz der Auflockerung meistens noch gut erhalten. Ein schönes Beispiel aus der vollständig verwitterten Lithologie (W4)

haben wir in Figur 2.7a abgebildet. Gips als Mineral konnte nirgends mehr festgestellt werden.

Betrachten wir nun die Tiefe der Gipsauflösung (Untergrenze W2), so liegt diese mehr als 20 Meter unter der heutigen Terrainoberfläche und wurde in der Baugrube selbst nicht mehr erreicht. Aus benachbarten Sondierbohrungen ist bekannt, dass die Verwitterungstiefe mehr als 30 Meter betragen kann.

Aufgrund seiner Zusammensetzung lässt sich der verwitterte Gipskeuper geotechnisch folgendermassen beschreiben: graue-grauolive tonige Silte mit wechselnden Anteilen von eckigen bis angerundeten Dolomit- und Mergelresten, die in der Sand- und Kiesfraktion vorliegen. Charakteristisch sind Höfe und Lagen von weissem bis rötlichem Silt oder Feinsand aus Dolomitgrus (vgl. Figur 2.7b), die sich aus dünnen Dolomitlagen entwickeln. Dolomitlagen, die nicht total zu Grus umgewandelt sind (meist ab 2 cm Dicke), sind stark zerbrochen und führen meistens etwas Wasser. Harte Dolomitlagen grösserer Mächtigkeit (10-60 cm), teilweise porös, treten in der Südost-Ecke mit einem Schichtfallen von 95/44 auf (vgl. Fig. 2.7c). Auf einer Bank, die teilweise schwammig angelöst war, hatte sich ein hydrothermaler Pyritbeschlag gebildet. Im Süden der Baugrube treten auch olive und weinrote, mergelige Tonsteine auf. Im selben Bereich wurden zudem brekziöse Sand- und Siltsteine angetroffen. Es handelt sich um mürbe, schwarze Siltsteine, die als cm-grosse Brocken in einer tonigen, leicht siltigen Matrix eingebettet, dem Gestein ein brekziöses Aussehen verleihen.

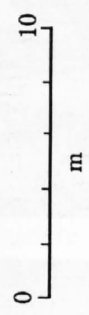
In der SE-Ecke der Baugrube wurde innerhalb des verwitterten Gipskeupers ein alter *Karsthohlraum* angetroffen (Fig. 2.8), auf den wir bereits in der Einleitung hingewiesen haben. Er ist durch mehrere Stadien von Calcitauflösung, Lösung, Nachbrechen und Einfüllen von Lockermaterial (hangende eiszeitliche Lockergesteine) geprägt. Eine stark zerbrochene und verkarstete Dolomitbank (Mächtigkeit 50 cm) bildet ein erstes Gerüst im Dach der steilwandigen Doline. Die Dolinenfüllung besteht zum einen aus gerundeten, bunten, alpinen Geröllen, die stellenweise zu einem feinkörnigen, sandigen Konglomerat verkittet sind, andernorts als unverfestigtes Lockermaterial zusammen mit gradierten Sanden alte Hohlräume verfüllen. Es können auch offene, bis auf 10 cm aufgeweitete Hohlräume beobachtet werden, die mit einer feuchten, lehmigen Eisenhydroxidschicht überzogen sind. Sie gehen gegen unten in mit Lehm verfüllte Spalten über, auf denen etwas Wasser fliesst. Zwischen diesen Füllungen treten angelöste und stark zersetzte Lagen eines mürben, schwarzen Siltsteins auf. Diese teilweise verfüllte Doline reicht bis mindestens Kote 355.00 hinunter, was einer Tiefe von min. 10 Meter unter die Felsoberfläche entspricht. Die grösste Ausdehnung erreicht der verkarstete Bereich auf Höhe des heutigen Hangwasserspiegels. Dieser stellt sich mit einem sanften Gefälle von N nach S innerhalb des stark verwitterten Gipskeupers (W3) auf Kote ca 355 m.ü.M. ein.



LEGENDE:

- Lithologiegrenze
- Feuchtestellen in der Baugrubenrückwand (Sickerbeton)
 - temporär
 - permanent stärker feucht
- feuchte Bodenprobe
- Bereich mit Wasser höherer Gesamtmineralisation (Leitfähigkeit >1000 µS/cm)

- RS, B Rammsondierung, Bohrung
- Geologische Profilaufnahme
- Gesteinsprobe
- Wasserprobe



Figur 2.6

Baugrube Adler (Ennetbaden).
Eingetragen auf die Abwicklung der Baugrubenrückwand (Pfahlwand orthogonal projiziert) sind der geologische Befund mit den verschiedenen Verwitterungsstufen im Gipskeuper sowie die wichtigsten Entnahmestellen von Gesteins- und Wasserproben.



Figur 2.7 Typische Ausbildung des verwitterten Gipskeupers in der Baugrube Adler, Ennetbaden.

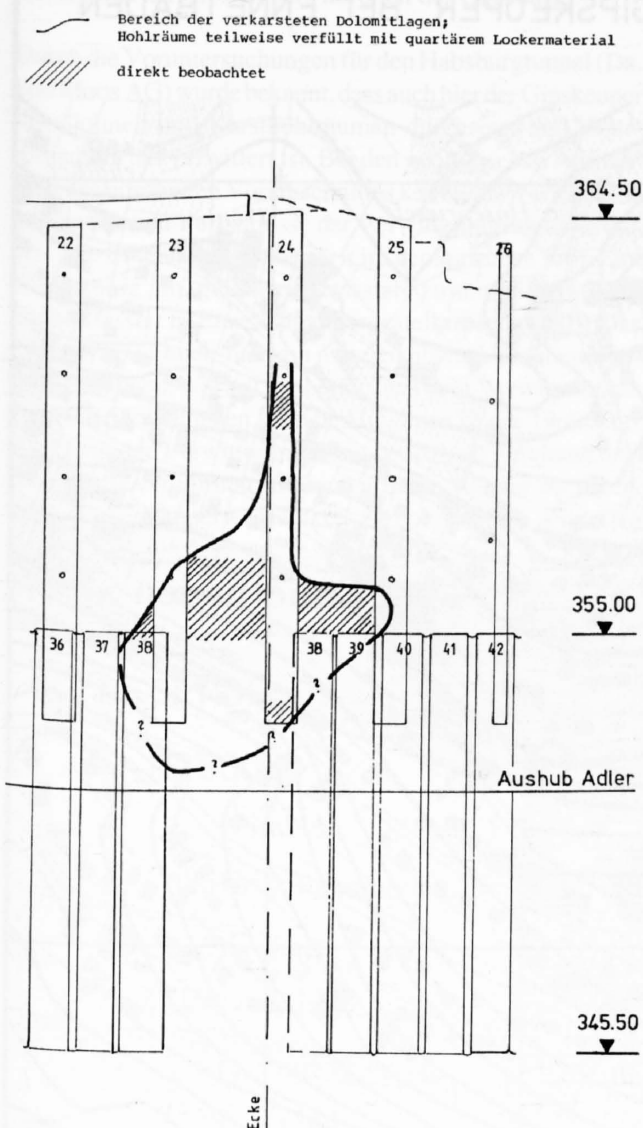
a) vollständig verwittert (Verwitterungsstufe W4)
Tonsteine mit dolomitischen Gruslagen, verfaltet, kein Sulfat



b) typische Lage von Dolomitgrus der Silt Feinsandfraktion, etwas oxidiert (Verwitterungsstufe W3)



c) kompaktere Dolomitlage zwischen dolomitischen Tonsteinen, zerbrochen, rostige Oxidation auf Kluftflächen, teilweise verkarstet (Verwitterungsstufe W3)



Figur 2.8 Karsthohlraum im verwitterten Gipskeuper (teilweise verfüllte Doline). Situation in der Baugrubenrückwand (vgl. auch Fig. 2.6).

2.4.2 Verwitterungstiefe im Gipskeuper bei Ennetbaden

Die Erkenntnisse aus den Bohrungen in Ennetbaden in Bezug auf das Vorkommen von verwittertem und unverwittertem (d.h. noch gipsführendem) Gipskeuper haben wir in Figur 2.9 zusammengetragen. Das Bild der *Verwitterungstiefe* unter der heutigen Felsoberfläche erscheint komplex. Einerseits ist bereits die Untergrenze der Lockergesteinsbedeckung in Ennetbaden stark reliefiert. An der Modellierung der *Felsoberfläche* in Ennetbaden waren nach SCHINDLER (1977) fluviale wie auch risseiszeitliche, glaziale Kräfte beteiligt. Das in Figur 3.9 wiedergegebene Felsrelief entspricht den von SCHINDLER (1977) in der Baugrundkarte von Baden publizierten Verhältnissen. Es konnte jedoch im Bereich von Ennetbaden dank neuerer Bohrungen, die SCHINDLER (1977) noch nicht zur Verfügung standen, etwas modifiziert werden.

Andererseits paust sich dieses Relief nicht automatisch auf die Verwitterungstiefe durch. Die Obergrenze des unverwitterten Gipskeupers zeigt - wenngleich die erbohrten Informationen spärlicher sind - ein unabhängiges Relief. Für die lokal über 30 m mächtige Verwitterungszone müssen demzufolge neben dem Verlauf der Oberfläche noch weitere Faktoren verantwortlich sein. Besonders hervorzuheben ist hier die tektonische Situation in Ennetbaden. Im Kern der überschobenen Lägern-Antiform dürfte die je nach Ort unterschiedlich deformierte Schichtlagerung, tektonische Klüftung und Zerschierung vielerorts die Wasserwegsamkeit auch in grössere Tiefen entscheidend beeinflussen.

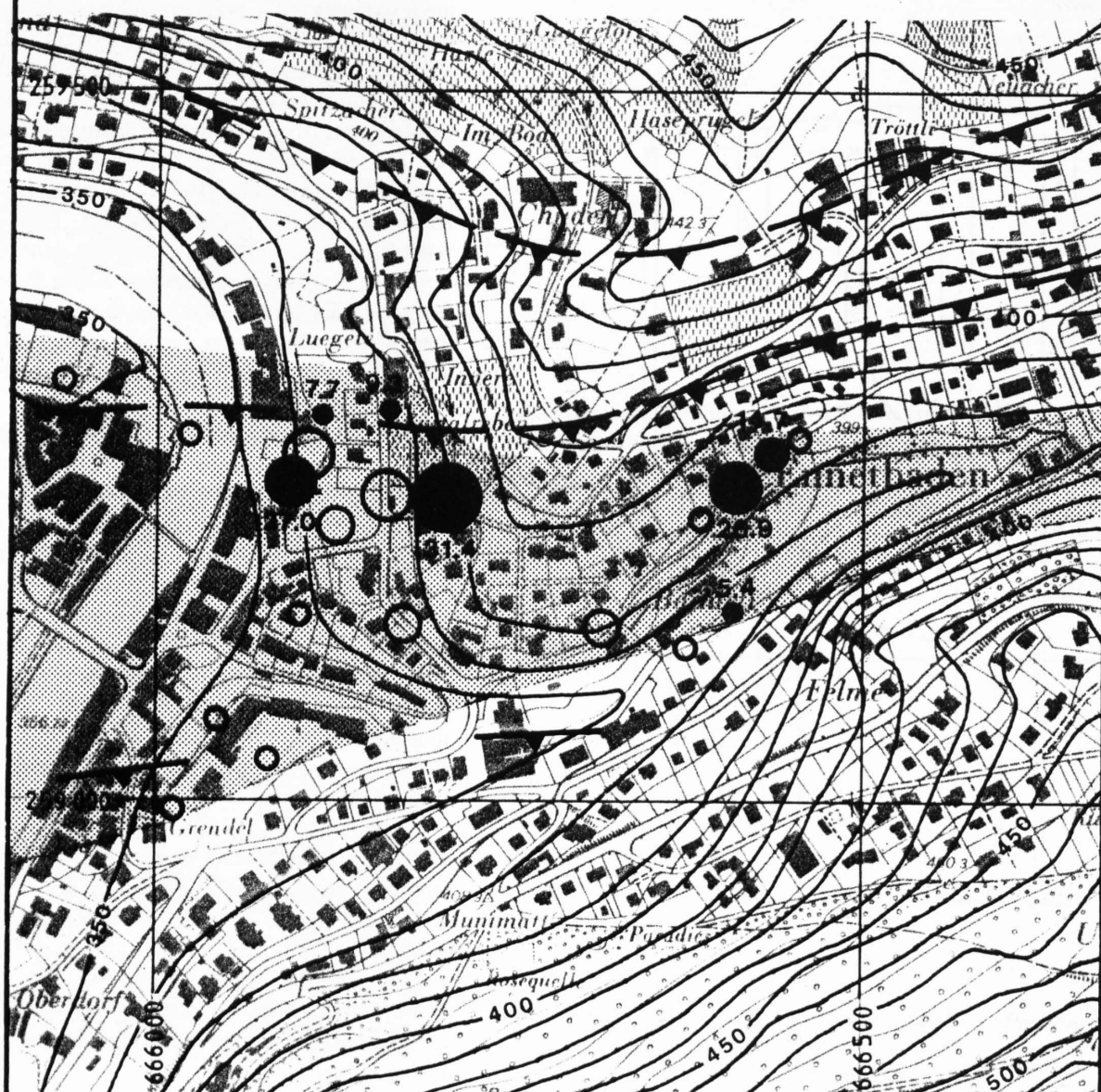
Denkbar wäre auch, dass lokal aufsteigende Thermalwässer in ihrer Umgebung die Gipslösung begünstigen, sei dies indirekt durch die Temperaturerhöhung oder direkt dank ihrer hohen Chloridgehalte (vgl. Kapitel 2.2.2). Die hydrochemische Charakterisierung der bei der Verwitterung des Gipskeupers - infolge der Sulfatauslaugung - entstehenden Poren- und Grundwässer ist Thema des 4. Kapitels dieser Arbeit.

2.4.3 Verwitterungsprofil westlich der Habsburg

Der Wülpsberg nordöstlich von Schinznach-Bad, auf dem die stolze Habsburg thront, hat einen geologisch interessanten Aufbau. Eine Situation ist in Figur 2.10 wiedergegeben. Figur 2.11 zeigt ein Profil entlang des im Bau befindlichen Habsburg-Nationalstrassentunnels. Wir befinden uns hier im Bereich des Aargauer Jura, wo der Faltenjura auf den Tafeljura aufgeschoben wurde. Dabei ist die an der Habsburg anstehende, kompetente Muschelkalk-Platte über die sich inkompetent verhaltenden mergeligen und sulfatführenden Schichten der "Kernzone" geschoben worden. In dieser "Kernzone" können Pakete der Anhydritgruppe ebenso wie Scherben von verschürftem Gipskeuper enthalten sein. An der Nordflanke jedoch wurden die Keuperschichten als Folge der Überschiebung etwas steilgestellt. Alte Gips-

Unmittelbar nördlich dieser Doline wurde beim Aushub auf Kote 355.50 m ü. M. ein 50 cm breiter Stollen angefahren, der mit Jurakalken, Ziegeln und Keramikplatten ausgekleidet war und in das alte Hotel Adler einmündete. Nach Auskunft des Archäologischen Archivs der Stadt Zürich (mündl. Mitt. Herren Dr. Schneider und Hanser) handelt es sich bei der Auskleidung um wiederverwendete Biberschwanzziegel aus dem 17. oder 18. Jahrhundert, bzw. um Keramik aus der Zeit der letzten Jahrhundertwende. Auf den Mauersteinen und entlang Schichtfugen im südlich angrenzenden Gestein fanden wir häufig braunrote-orange Hydroxidausfällungen. Wir schliessen daraus, dass der Stollen vermutlich Ende des 19. Jahrhunderts, als die Bäderkuren eine Renaissance erfuhren, in der Hoffnung auf einen ergiebigen Thermalwasseraustritt angelegt wurde.

VERWITTERUNGSTIEFE IM GIPSKEUPER BEI ENNETBADEN M 1:5000



LEGENDE:

— 400 — Felsisohypsen
 Gipskeuper

Verwitterungstiefe 4.0 ● unverwitterter Fels erbohrt nach 4m

○ 0-10m ○ 10-20m ○ 20-30m ○ >30m

Reproduziert mit Bewilligung
 vom KVA Aarau "29.1.1990"

— T — Aufschiebung

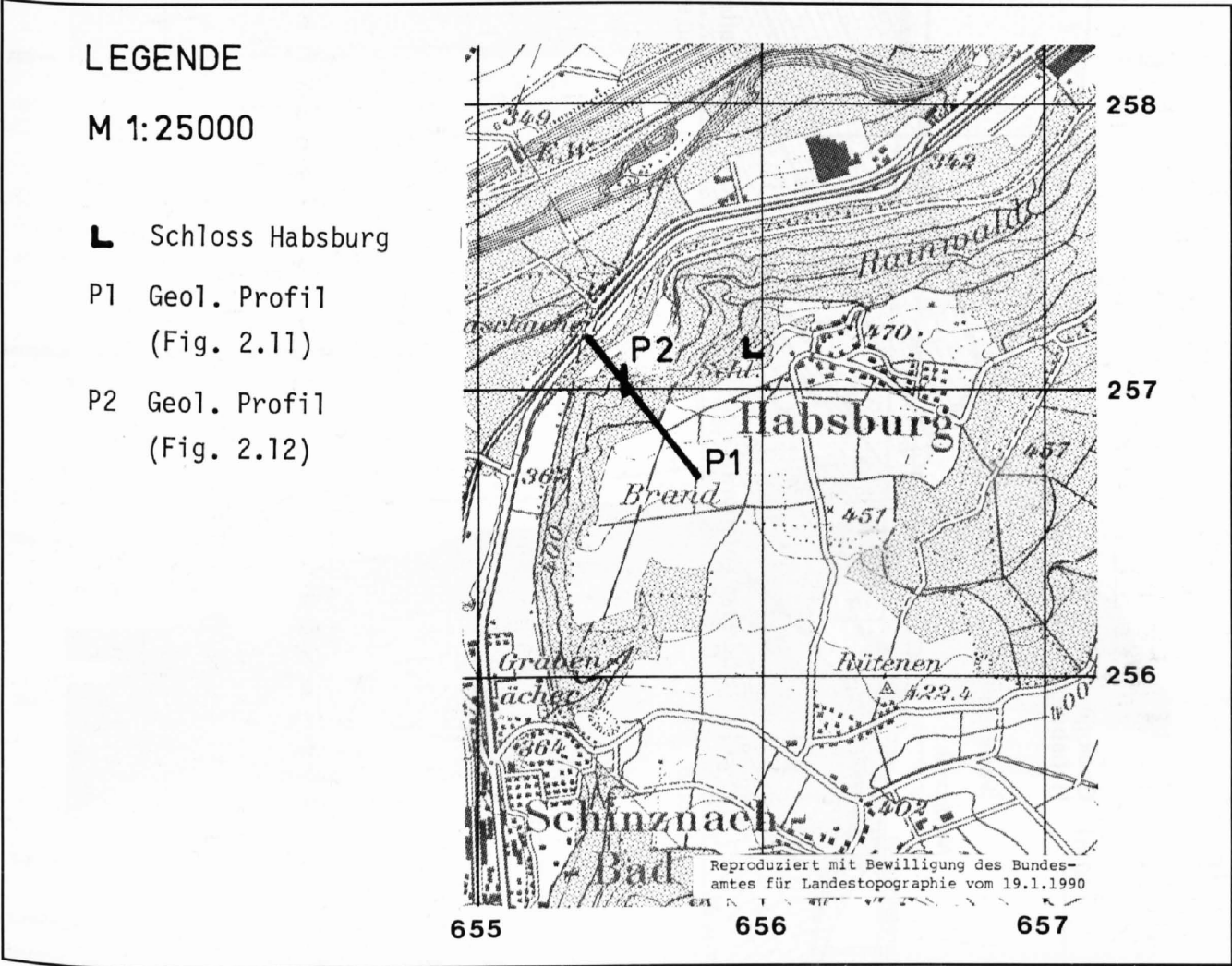
Figur 2.9 Karte der Verwitterungstiefe unter der Felsoberfläche im Gipskeuper von Ennetbaden (Felsisohypsen nach SCHINDLER, 1977, ergänzt).

gruben zeugen vom Abbau des stellenweise nur wenig bis unverwitterten Gipskeupers nördlich der Habsburg.

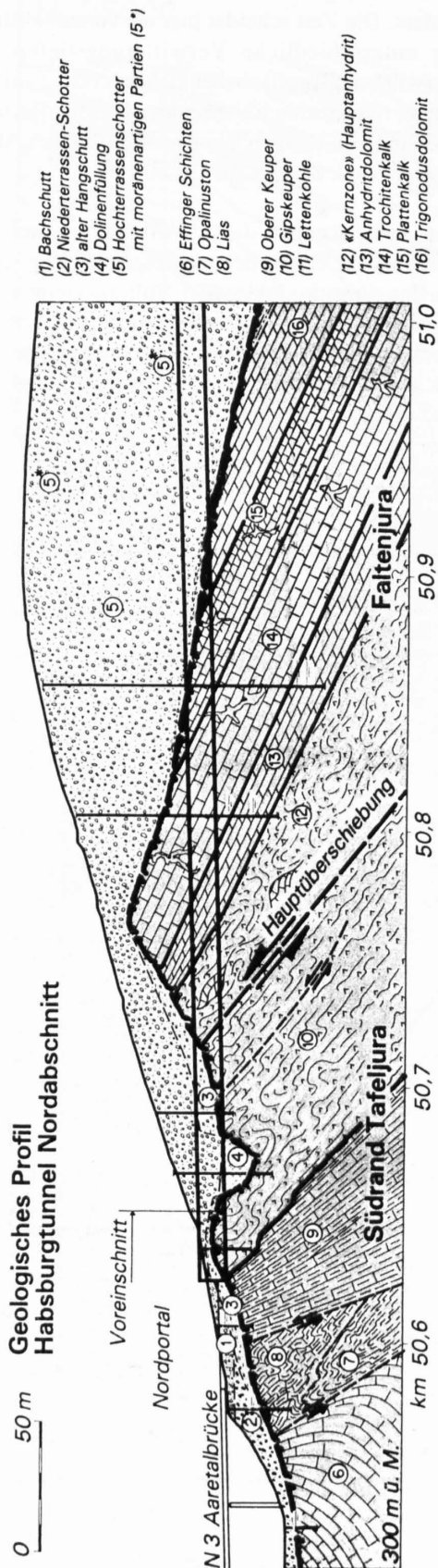
Durch die Voruntersuchungen für den Habsburgtunnel (Dr. VON MOOS AG) wurde bekannt, dass auch hier der Gipskeuper mit Dolinen und Karsthohlräumen durchsetzt und unterschiedlich tief verwittert ist. Bei den geologischen Aufnahmen des nördlichen Voreinschnittes konnten wir wieder die geometrischen Verhältnisse der Verwitterungszonen erfassen. Die Erkenntnisse haben wir im geologischen Profil am Wülpisberg im gleichen Massstab zusammen mit den Verhältnissen in Ennetbaden dargestellt (Figur 2.12). Das Gestein zeigt auch hier gut vergleichbare Verwitterungserscheinungen, wie wir sie bereits aus dem Verwitterungsprofil von Ennetbaden kennen. Hingegen ist die Tiefenentwicklung der Verwitterungszone bedeutend bescheidener. Dies dürfte vermutlich zu einem grossen Teil auf die unterschiedliche Wasserwegsamkeit zurückzuführen sein: Der

Tafeljura nördlich der Habsburg wurde tektonisch weit weniger strapaziert und deshalb weniger geklüftet als der Kern der Lägerstruktur, des östlichsten Faltenjura-Ausläufers. Die Zeit scheidet hier als verantwortlicher Faktor für unterschiedliche Verwitterungstiefen aus: Beide Verwitterungsprofile haben sich unter einer - im klassischen Sinne - risseszeitlich überprägten Felsoberfläche entwickelt und sind von entsprechenden randglazialen Ablagerungen bedeckt (vgl. SCHINDLER, 1977).

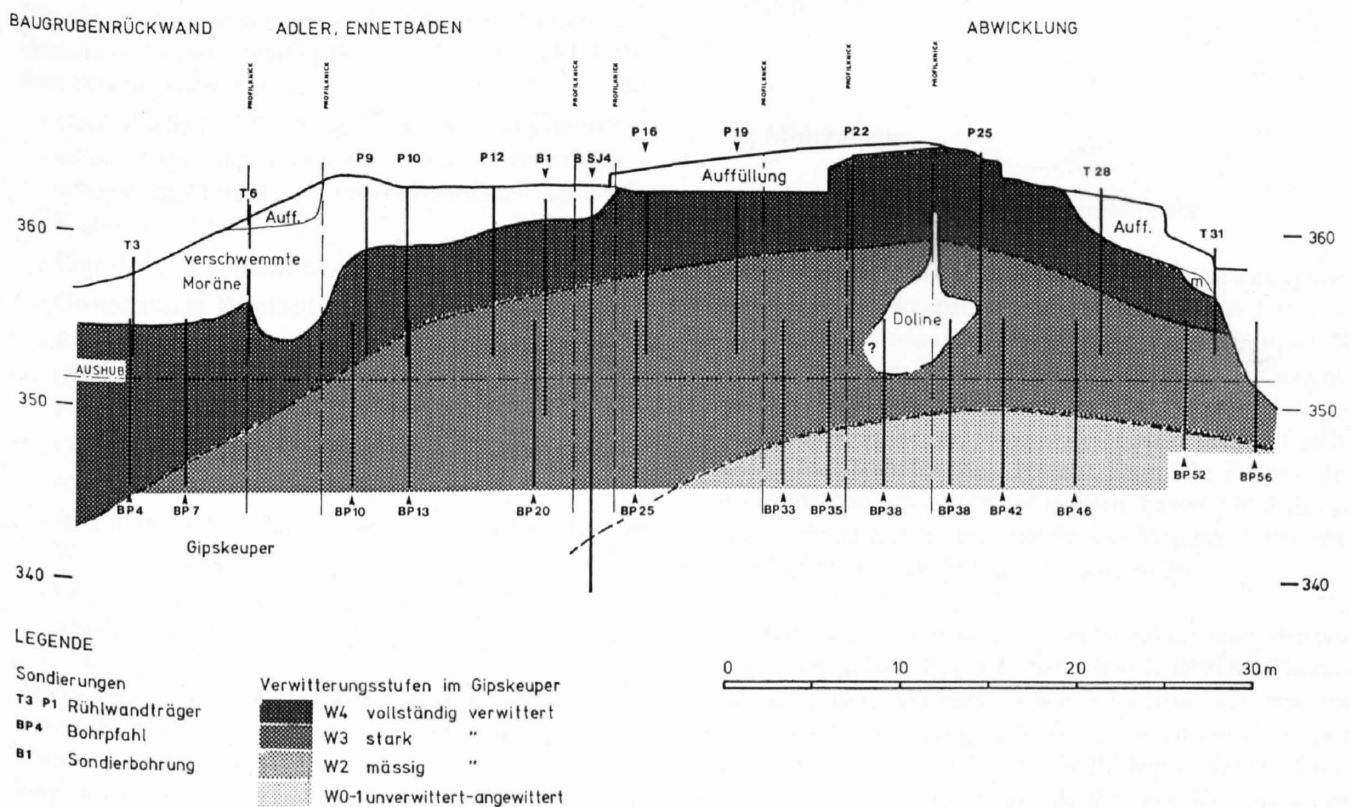
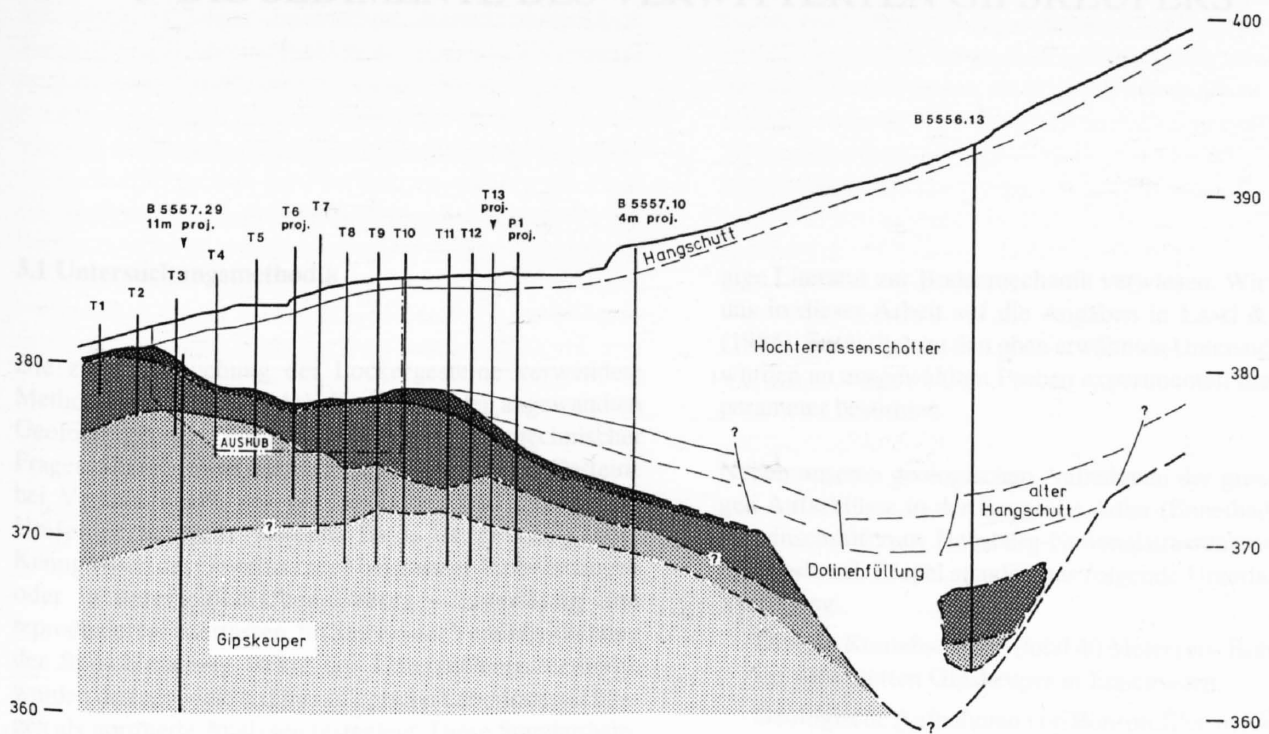
Die Auswirkungen dieser Verwitterung auf das Gestein wird nun das Thema der nachfolgenden Kapitel sein. Da als Auslaugungsprodukte von Sulfatgesteinen sowohl ein mineralisiertes Wasser als auch ein vom Fest- zum Lockergestein verändertes Sediment anfallen, soll die Entwicklung während der Verwitterung bei beiden untersucht und diskutiert werden.



Figur 2.10 Situation der besprochenen Profile entlang des Habsburg-Nationalstrassentunnels (P1; Figur 2.11) und am westlichen Wülpisberg (P2; Fig. 2.12).



Figur 2.11 Geologisches Profil entlang des nördlichen Teils des Habsburg-Nationalstrassentunnels (aus: Informationsschrift des Kt. Aargau, Nr.5, 1989; leicht verändert).



Figur 2.12 Vergleich der Verwitterungstiefen am Wülpisberg und im Kern der Lägern-Antiklinale (Ennetbaden). Beide Profile sind nicht überhöht und im selben Massstab dargestellt.

3 DIE SEDIMENTE DES VERWITTERTEN GIPSKEUPERS

3.1 Untersuchungsmethodik

Die zur Untersuchung der Lockergesteine verwendete Methodik ist durch die Arbeitsweise in der angewandten Geologie geprägt. Für die Beantwortung geotechnischer Fragestellungen muss das technische Verhalten der Gesteine bei Veränderungen des physikalischen und chemischen Umfeldes beurteilt werden. Dazu ist es nötig, sog. Kenngrössen des Gesteins - auch bei grossen Probenmengen oder in unterschiedlichen Labors - zuverlässig und reproduzierbar zu erfassen. Im Sinne einer Vereinheitlichung der Sprachregelung sowie der Untersuchungsmethodik wurden deshalb viele sedimentologische Laboruntersuchungen als normierte Analysen festgelegt. Diese Standardisierung wird in Deutschland durch die DIN-Normen, in der Schweiz durch eine Reihe von SNV-Normen (Schweizerische Normenvereinigung) geregelt. Wo für einzelne Untersuchungsschritte solche Normen bestehen, haben wir uns möglichst an dieselben gehalten. Wo dies nicht möglich bzw. nicht angezeigt war, wird auf die abweichende Methodik im Detail eingegangen.

Für die *geologisch-geotechnische Charakterisierung* der Gesteine des verwitterten Gipskeupers sind wir nach folgendem Schema vorgegangen:

- Geologische Beschreibung des Verwitterungsprofiles unter Anwendung eines deskriptiven Verwitterungsschemas in Aufschlüssen und in Bohrungen (vgl. Kapitel 2.3-2.5)
- Entnahme von möglichst repräsentativen Proben
- Geotechnische Beschreibung der Probe (SNV 670005)
- Ermittlung der mineralogischen Zusammensetzung (Röntgendiffraktometrie, Karbonatbestimmung mit Passon-Methode)
- Quantitative Erfassung der Korngrössenzusammensetzung (SNV 670810c, 670816)
- Bestimmung der Kenngrössen des Naturzustandes wie Wassergehalt und Raumgewicht
- Feststellen der Konsistenzgrenzen (SNV 670345) und Ableitung der Plastizitätseigenschaften

Aus den gemessenen Parametern konnten weitere charakteristische Materialkennwerte berechnet werden. Speziell erwähnt sei hier die Plastizitätszahl I_p , die für die Darstellung der Zusammenhänge im Plastizitätsdiagramm nach Atterberg benötigt wird. Für die Definition der Kenngrössen und ihre mathematische Berechnung wird auf die einschlä-

gige Literatur zur Bodenmechanik verwiesen. Wir stützen uns in dieser Arbeit auf die Angaben in LANG & HUDER (1985). Zusätzlich zu den oben erwähnten Untersuchungen wurden an ausgewählten Proben experimentell die Scherparameter bestimmt.

Neben unseren geologischen Aufnahmen der grossflächigen Aufschlüsse in der Baugrube Adler (Ennetbaden), im Voreinschnitt zum Habsburg-Nationalstrassentunnel und im Gipsbruch Riepel standen uns folgende Unterlagen zur Verfügung:

- Diverse Kernabschnitte (total 40 Meter) aus Bohrungen im verwitterten Gipskeuper in Ennetbaden.
- Geologische Aufnahmen von Bohrprofilen im Gipskeuper (total 540 Bohrmeter), die für verschiedene unveröffentlichte, bautechnische Gutachten erstellt worden waren.

Im Vordergrund aller Untersuchungen stand die Frage nach der Entwicklung der bestimmaren Kennwerte während der fortschreitenden Verwitterung. Die Ergebnisse dieser Betrachtungen sollen in den folgenden Kapiteln diskutiert werden.

3.2 Mineralogie

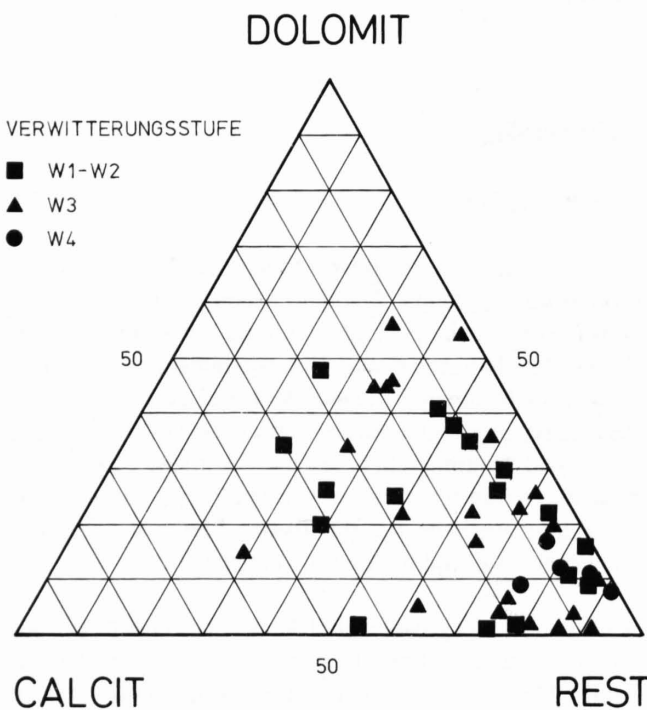
3.2.1 Mineralogie der Gesamtgesteinsprobe

Wie wir schon bei der Beschreibung des Verwitterungsprofils im Gipskeuper angeführt haben (Kapitel 2.3.2), ist Gips infolge Auslaugung oberhalb der Verwitterungsstufe W2 nicht mehr nachweisbar. Untersuchungen des Gesamtgesteins im Röntgendiffraktometer haben gezeigt, dass der verwitterte Gipskeuper mineralogisch aus Dolomit, Calcit, Quarz und Tonmineralien besteht. Sämtliche Proben, die bodenmechanisch untersucht wurden, haben wir auch auf die Karbonatgehalte mit der Passon-Methode überprüft. Die Ergebnisse sind in Figur 3.1 dargestellt.

Auffallend ist der grosse Anteil der Nichtkarbonate, den wir hier mit Rest bezeichnen. Es handelt sich dabei um Tonminerale, Quarz, Akzessorien wie Schwerminerale und im Falle der Verwitterungsstufe W1 ev. noch um Gips. Der hohe Anteil ist zum Teil durch die Probenauswahl bedingt: Reine Dolomitbänken wurden aus Gründen der schlechteren Verwendbarkeit für bodenmechanische Untersuchungen nur untergeordnet beprobt.

Vergleichen wir die Karbonatwerte mit den Untersuchungen an den Gipskeuper-Bohrkernen der Nagra-Tiefbohrungen, so sind die Verhältnisse durchaus ähnlich: Voranzustellen ist die Bemerkung, dass die einzelnen Mineralgehalte bereits in der unverwitterten Lithologie - bedingt durch die heterogene Ausbildung des Gipskeupers (vgl. Kapitel 1.3) - grosse Variationsbreiten aufweisen. So streuen z.B. die Dolomitwerte in 40 untersuchten Gipskeuper-Proben aus der Bohrung Weiach zwischen 0 und 75 Gewichts-% (MATTER ET AL., 1988a). Eine ähnlich grosse Streuung ist auch im verwitterten Gipskeuper festzustellen (vgl. Figur 3.1). Die mittlere mineralogische Zusammensetzung des unverwitterten Gipskeupers, errechnet aus den Daten der Bohrungen Weiach, Schafisheim und Böttstein (NAGRA, 1988), ergibt in Gewichtsprozent für Tonminerale und Akzessorien 40%, Sulfat 37%, Dolomit 20%, Calcit 2% und Quarz 1%. Im Mittel von 10 Proben aus dem Gipskeuper der Bohrung Beznau (NAGRA, 1984) betragen die Mineralgehalte in Gewichtsprozent bezogen auf die sulfatfreie Probe 67% für Nichtkarbonate (Tonminerale, Quarz, Akzessorien), 28% für Dolomit und 5% für Calcit. Die entsprechenden Mittelwerte im verwitterten Gipskeuper (unsere Untersuchungen an 44 Proben) betragen 16% für Calcit, 22% für Dolomit und 62% für Nichtkarbonate.

Eine systematische Abhängigkeit der Karbonatgehalte von der Verwitterungsstufe ist anhand unseres Datenmaterials nicht ersichtlich. Wohl zeigen die Sedimente des vollständig verwitterten Gipskeupers (W4) markant erniedrigte Karbonatgehalte <30%. In den anderen Verwitterungsstufen streuen die Werte jedoch stark.



Figur 3.1 Verteilung der Karbonatgehalte und -phasen in den Sedimenten des verwitterten Gipskeupers. Mit Rest werden die Nichtkarbonate bezeichnet (Tonminerale, Quarz, Akzessorien).

Auf Figur 3.1 ist ausserdem deutlich zu sehen, dass unter den Karbonatphasen der Dolomit statistisch überwiegt. Einesteils liegt er, wie wir aus den Daten der Nagra-Bohrungen wissen, schon primär im unverwitterten Gestein häufiger vor. Andererseits dürfte eine Dolomit-Vorherrschaft durch die Verwitterung (Calcitlösung) noch akzentuiert werden.

An 17 Proben konnten wir den Tonmineralanteil in der Gesamtprobe quantitativ ermitteln. Die Resultate ergaben zwischen 8 und 31 Gewichtsprozent Tonminerale im verwitterten Gipskeuper. In diskreten Lagen (z.B. verwitterte Tonsteine) könnte der Tongehalt jedoch noch markant höher sein. Im unverwitterten Gipskeuper der Bohrung Böttstein (PETERS ET AL., 1987) belegt eine Mineralbestimmung an einer dolomitischen Tonlage einen Tonmineralgehalt von 72 Gewichtsprozent. Auf dieses Potential an eventuell mobilisierbaren Tonteilchen wird in den Kapiteln zur Plastizität (Kap. 3.3.3) und der Schereigenschaften (Kap. 3.3.4) noch näher eingegangen.

3.2.2 Tonmineralogische Untersuchungen

3.2.2.1 Untersuchungsmethoden

Für die tonmineralogischen Untersuchungen wurden die Proben mit 1 N Ameisensäure entkarbonatisiert und im Ultraschall dispergiert. In Atterbergzylindern fand die quantitative Abtrennung der Fraktion <2µ statt. Da zur röntgenographischen Identifizierung der Tonminerale die Basisreflexe (001) besonders aussagekräftig sind, haben wir orientierte Präparate hergestellt. Dies liess sich durch die Herstellung von Schmierpräparaten leicht bewerkstelligen. Von allen Proben wurden je ein Präparat luftgetrocknet, mit Glycerin gesättigt, mit Alkylammonium verschiedener Kettenlänge (C-8, C-12) eingelagert, beziehungsweise während 1 Stunde auf 550 °C erhitzt. Alle Präparate wurden in einem Philipps-Röntgendiffraktometer (CuKα-Strahlung, 40 kV, 22 mA) über den Winkelbereich 2 Theta = 2-40° aufgenommen. Durch Vergleich der Basisreflexe, nach den verschiedenen Vorbehandlungen, konnten wir die Tonminerale qualitativ bestimmen. Die prozentualen Tonmineralanteile wurden semiquantitativ nach JOHNS ET AL. (1954) ermittelt.

3.2.2.2 Tonmineralogie

a) Illit

Illit ist das wichtigste Tonmineral in den Tonen und dolomitischen Mergeln des Gipskeupers. Er wird durch den Basisreflex (001) bei 1Nm erkannt, der auch bei Glycerin- und Alkylammonium-Behandlung kaum Veränderungen zeigt. An wenigen Proben konnten anhand der Intensitätsverhältnisse der Nichtbasisreflexe (hk-Reflexe) bei 0.280Nm bzw 0.258Nm die Anteile der Illit-Modifikationen bestimmt werden (Methode von MAXWELL & HOWER, 1967).

Mehrheitlich handelt es sich um einen Md-Illit mit max. 30% 2M1-Illit. Auch FREY (1969) stellte im Profil Frick im unteren Mittelkeuper beide Modifikationen fest. Dort nimmt der Anteil der Md-Modifikation gegen das Hangende zu.

Verschiedenstarke Aufweitung des Zwischenschichttraumes durch K-Entzug bei der Verwitterung führt zu einer zonenartigen Wechsellagerung, die sich in asymmetrischen Peaks bei (001) gegen grössere und bei (003) gegen kleinere d-Werte anzeigt. Die Anteile der quellfähigen Schichten wurden nach WEAVER (1956) abgeschätzt: Diese illitischen Wechsellagerungen überschreiten jedoch 10% nicht.

Illit-Kristallinität

Bei allen Proben wurde nach der Methode von KÜBLER (1967) die Illit-Kristallinität bestimmt (vgl. Tabelle 3.3). Wenn auch die Werte lokal stark schwanken, liegt doch der Durchschnitt mit $IK=10$ in dem für die Diagenese typischen Bereich ($IK>7.5$). Unterschiede in der Illit-Kristallinität, gemessen an der normalen sowie der glycolgesättigten Probe, sind auf die zonenartigen Wechsellagerungen und damit verbundene Randaufweitungen zurückzuführen.

b) Chlorit

Der Chlorit lässt sich an der Reihe seiner Basisreflexe (001) bei 1.4Nm, (002) bei 0.7Nm, (003) bei 0.47Nm und (004) bei 0.35Nm in allen Proben nachweisen. Er zeigt keine Veränderung bei der Glycerin-Behandlung und ist auch gegen Erhitzen resistent. Nach dem Erhitzen auf 550 °C sind zuweilen starke (004)- und verstärkte (001)-Reflexe sichtbar, was Fe-reichen Chlorit anzeigt (LUCAS, 1962; BREIT-SCHMID, 1982).

Als quellfähiger Chlorit wird nach LUCAS (1962) ein Chlorit bezeichnet, dessen Basisreflex sich bei Glycerin-Sättigung von 1.4 auf 1.7Nm verschiebt, wobei meistens nur der (001)-Reflex beobachtet werden kann. Nach dem Erhitzen auf 550 °C geht der Basisabstand mit verminderter Intensität auf 1.4Nm zurück. An 2 Proben im Gipskeuper konnten Anzeichen von quellfähigem Chlorit beobachtet werden.

c) Vermiculit

Vermiculit in der Mg-Form zeigt einen ersten Basisreflex bei 1.4Nm, der bedeutend stärker als die nachfolgenden ist, sich bei Glycerin-Behandlung nicht verändert und erst bei Erhitzen über 300 °C auf 1.0Nm zurückgeht. Durch Einlagerung von Alkylammonium kommt es zu einer unbegrenzten Quellung. Er lässt sich somit durch das Verhalten beim Erhitzen einerseits vom Chlorit und andererseits durch das unterschiedliche Quellverhalten auch von Smectiten röntgenographisch unterscheiden. MILLOT & CAMEZ (1961) stellten fest, dass Vermiculit in der Tonfraktion im Verlaufe des Bodenbildungsprozesses sowohl aus Illit, wie auch aus

Chlorit durch K-Entzug entsteht, oft über ein Zwischenstadium mit unregelmässigen Wechsellagerungen. Bei den in 2 Keuperproben festgestellten Vermiculit-Anteilen, die mengenmässig weniger als 10% der Tonfraktion ausmachen, könnte es sich um Reste von Chlorit-Vermiculit-Wechsellagerungen handeln.

d) Smectite

Bei dieser Gruppe, deren häufigster Vertreter Montmorillonit ist, handelt es sich um Tonmineralien mit innerkristalliner Quellung. Der erste Basisreflex bei ungefähr 1.4-1.5Nm (1.2Nm bei partiell dehydratisiertem Montmorillonit) verschiebt sich durch Einlagerung von Glycerin nach 1.70-1.78Nm und geht beim Erhitzen auf 1.0Nm zurück. In unserem Probenmaterial haben wir in einigen corrensitfreien Proben in kleinen Mengen Smectite gefunden (vgl. Tabelle 3.3).

e) Wechsellagerungen

Tonminerale neigen zu Wechsellagerungen, weil ihre Elementarschichten bezüglich Aufbau und Abmessungen einander sehr ähnlich sind. In einer Untersuchung an mehr als 6000 Proben aus kambrischen bis rezenten Sedimenten stellte WEAVER (1956) in über 70% der Proben Wechsellagerungen fest. Aber nur regelmässige Wechsellagerungen erhalten eigene Mineral-Namen. Kriterien zur Bestimmung der Regelmässigkeit und eine diesbezügliche Diskussion der vorgeschlagenen Namen publizierte BAILEY (1982). Bei der häufigsten Wechsellagerung im Gipskeuper wollen wir diesem Problem der Namengebung im Folgenden etwas nachgehen.

Corrensit

Ursprünglich wurde dieses Mineral erstmals von LIPPMANN (1954) als regelmässige 1:1 Wechsellagerung von trioktaedrischem Chlorit mit quellfähigem Chlorit beschrieben. In der Folge gab die Natur der quellfähigen Schichten wiederholt zu Diskussionen Anlass und wurde einerseits Smectit (Montmorillonit) andererseits auch wieder Vermiculit zugesprochen. Die Röntgendiffraktogramme beider Möglichkeiten zeigen sehr kleine Intensitäten für alle 00l-Reflexe ungerader Ordnungen. In Übereinstimmung mit dem AIPEA Nomenclature Committee schlägt BAILEY (1982: 246) eine umfassende Definition vor: „The definition of corrensite should be changed to a 1:1 regular interstratification of trioctahedral chlorite with either trioctahedral smectite or trioctahedral vermiculite, the former constituting low-charge corrensite and the latter high-charge corrensite.“ Damit eine Wechsellagerung als regelmässig bezeichnet werden darf, muss gemäss demselben Autor der Variationskoeffizient CV der d(00l)-Werte <0.75 sein.

Von publizierten Corrensit-Röntgendaten aus triassischen Sedimenten haben wir deshalb den mittleren Basisabstand und den Variationskoeffizienten (CV) der $d(001)$ -Werte berechnet. Die Resultate sind in Tabelle 3.1 zusammengestellt. Die Berechnungen zeigen, dass die wenigsten dieser mit Corrensit bezeichneten Minerale der Einschränkung von BAILEY (1982) genügen! Sie müssten streng genommen als chloritisch-smectitische Wechsellagerungen angesprochen werden. Wie in Tabelle 3.1 zu sehen ist, hängt der berechnete Variationskoeffizient auch etwas von der Vorbehandlung der Probe ab: Oft zeigen mit Glycerin gesättigte Proben eine regelmässigeren Serie der Basisreflexe, doch sind in der Literatur auch konträre Beispiele zu finden (z.B. Tab. 3.1: Probe B9-8 aus dem Mittleren Muschelkalk). Röntgendaten einer regelmässigen Wechsellagerung des Typus Corrensit aus dem Gipskeuper findet man in SCHLENKER (1971) und - zumindest an Proben aus dem unteren Gipskeuper (Proben G1, G5) - auch in LIPPMANN & SAVASCIN (1969).

Erwähnenswert finden wir den Umstand, dass die Daten des von LIPPMANN (1954) erstmals als Corrensit beschriebenen Minerals mit einem Variationskoeffizienten CV von nur 0.2 die grösste Regelmässigkeit unter den hier besprochenen Daten aufweisen.

Da jedoch „Corrensit-ähnliche“ Wechsellagerungen ($0.75 < CV < 2$) in den Sedimenten der Trias häufig auftreten und daneben als Index-Minerale für die Diagenese-Zonen vorgeschlagen worden sind (KÜBLER, 1973), wird sich der Name Corrensit wohl auch in Zukunft in der geologischen Literatur für die genannten, nicht absolut regelmässigen Wechsellagerungen halten.

Die Tatsache, dass Corrensit aus der Trias häufig gemeldet wird, hängt damit zusammen, dass dieses Mineral an 3 Faziesbereiche gebunden ist (KÜBLER, 1973):

- evaporitische Fazies
- karbonatisch/dolomitische Fazies
- detritische Fazies basischer Ursprungsgesteine

Im Gipskeuper finden wir nun evaporitische und dolomitische Fazies gleichermaßen vertreten. Zur diagenetischen Bildung von Corrensit braucht es neben genügend Magnesium, welches in evaporitischem wie dolomitischem Milieu ausreichend vorhanden ist, auch etwas erhöhte Temperatur (100°C , Diagenese). Gemäss KÜBLER (1973) wird Corrensit bei $250\text{--}300^{\circ}\text{C}$ instabil (Anchi-Epizone der Metamorphose). Das bei der Umwandlung von Illit (bzw. detritischem Glimmer) zu Corrensit frei werdende Kalium könnte wohl zur Bildung von authigenem Kalifeldspat geführt haben (LIPPMANN & SAVASCIN, 1969). Andererseits wäre auch denkbar, dass illitische Wechsellagerungen (Kalium-Mangel im Zwischenschichttraum) damit quasi „repariert“ werden (SCHLENKER, 1971). Unsere Untersuchungen könnten diese 2. Hypothese stützen: Im Gegensatz zu corrensitfreien, liegen in corrensithaltigen Proben praktisch keine quellfähigen Schichten im Illit vor.

Bei der röntgenographischen Untersuchung zeigt Corrensit - als regelmässige Wechsellagerung Chlorit-Vermiculit/Smectit - eine integrale Serie der Basisreflexe, wobei der Abstand der quellfähigen Schichten von der Vorbehandlung abhängig ist (vgl. auch Tab. 3.1). Im unbehandelten, d.h. lufttrockenen Zustand liegen die Basisinterferenzen um 2.9nm ; im Wesentlichen treten nur Reflexe der geradzahligen Ordnungen auf. Nach Behandlung mit Äthylenglycol oder Glycerin ergibt sich ein Basisabstand von 3.1 bzw. 3.2nm . Dabei werden nun auch Basisreflexe ungerader Ordnungen sichtbar. Der gleiche Effekt wird durch Einlagerung von Alkylammonium erzielt, wobei die Aufweitung abhängig von der Kettenlänge des Einlagerungsmoleküls ist. Nach Erhitzen auf 550°C kollabieren die quellfähigen Schichten auf 1.0nm und der Chlorit auf 1.4nm , was sich in einem Basisabstand von 2.4nm abzeichnet. Meist sind nur die ersten 3 Basisreflexe sichtbar, wobei der (002) -Reflex bei 1.2nm besonders hervortritt. Gelegentlich lässt sich auch ein Reflex der 8. Ordnung bei 0.298nm beobachten. Durch das Erhitzen stellt sich jedoch nur eine unregelmässige Wechsellagerung ein, was sich in hohen Variationskoeffizienten anzeigt (Tab. 3.1). Die in unserem Probenmaterial aus dem verwitterten Gipskeuper nachgewiesenen „Corrensit-ähnlichen“ Tonminerale weisen Variationskoeffizienten zwischen 0.48 und 2.12 auf. In Anlehnung an die in der Literatur als Corrensit bezeichneten Minerale aus dem Gipskeuper, die - wie wir gesehen haben - ebenfalls nicht immer einer absolut regelmässigen $1:1$ Wechsellagerung entsprechen, werden wir im Folgenden sämtliche „Corrensit-ähnlichen“ Wechsellagerungen in unseren Proben mit Corrensit ansprechen. Die Daten der Röntgendiffraktometraufnahmen dieser „Corrensit-ähnlichen“ Minerale sind in Tabelle 3.2 zusammengestellt.

Tabelle 3.1 Röntgendaten von Corrensit aus der Literatur (Angabe der Daten in Å; 10Å = 1Nm). Überprüfung der Regelmässigkeit der Wechsellagerung durch Berechnung des Variationskoeffizienten (CV) nach BAILEY (1982).

Stratigraphie	Referenz	Probe	Behandlung	Basisreflexe (001)								mittlerer Basisabstand	CV
Oberer Keuper	ECHLE, W. (1961)	E13-E1	LT	dA-01	dA-02	dA-03	dA-04	dA-05	dA-06	dA-07	dA-08	29,14	,48
			G	29,40	14,60	9,70	7,27	5,80	4,87	4,16	3,62		
			H-400	31,10	15,44	7,74	6,19	5,15	4,41	3,86		30,93	,26
			H-550	22,90	12,50	8,11	6,03	4,81	3,94	3,41	2,98	23,97	2,49
Gips-keuper	LIPPMANN, F. (1954)	Zai	LT	22,90	12,10	8,00		4,78				23,74	2,12
			G	28,30	14,20	7,08			4,72		3,53	28,32	,20
	SCHLENKER, B. (1971)	A10	LT	32,50	16,20	8,10	6,51	5,40	4,65			32,47	,23
			H-550	28,00	13,50							27,50	2,57
	LIPPMANN, F. & SAVASCIN, M.Y. (1969)	G1	LT	29,40	14,60	9,60	7,26	4,85	4,17	3,63		29,11	,63
			G	31,50	15,50	7,76	6,24	5,16	4,42	3,87		31,09	,65
		G5	LT	12,40	8,15	6,03	4,84		3,42	2,97		24,21	1,53
			H-550	23,50	12,10	8,04				2,96		23,88	1,42
		G6-2	LT	29,40	14,70	9,51						29,11	1,73
			G	30,50	15,50	7,76		5,16	4,43	3,86		30,90	,66
		G8-SP	LT	29,40	14,50	7,24		4,87				29,15	,70
			G	31,55	15,50	7,76		5,15	4,41	3,86		31,04	,83
Mittlerer Muschelkalk	FREY, M. (1969)	G10-WKS	LT	29,40	14,30	9,31		5,90	4,84	3,68		28,99	2,13
			G	31,55	15,50	7,70		5,12	4,43	3,93		31,09	1,09
		G8-5SH	H-500	12,45	8,11	6,06	4,82		3,45			24,34	1,33
			LT	29,40	14,40	9,40	7,25	4,82				28,92	1,42
		G10-WKS	G	31,55	15,50	7,70		5,15	4,48			31,12	1,03
			H-500	12,45	8,15	6,10	4,82		3,41	3,10		24,42	1,62
		L29	LT	28,50	13,80	9,02	6,86	4,60	3,86			27,46	1,93
			G	30,50	15,24	7,76		5,40	4,46	3,88		31,03	1,50
		B9-8	H-500	12,62	8,19	4,82		6,37	5,18	3,00		24,38	2,18
			LT	29,40	14,25	7,31	5,79	4,96	3,43	3,66		29,19	1,46
Buntsandstein	LIPPMANN, F. & PANKAU, H.-G. (1988)	4	G	32,70	15,80	7,82	6,30	5,18	4,46	3,88		31,49	1,82
			H-550	11,95	7,97	5,90	4,82	3,98	3,40			23,87	,68
		L29	LT	29,40	14,20							28,90	2,45
			Mg-Form	30,40	14,60							29,80	2,85
Buntsandstein	LIPPMANN, F. (1956)	B9-8	G	33,50	15,90							32,65	3,68
			H-550	23,60	13,00							24,80	6,84
		4	LT	28,50	14,50	9,80	7,38	5,87	4,93	4,23	3,68	29,30	1,28
			G	30,00	15,40	9,80	7,76	6,19	5,18	4,44	3,87	30,66	2,03
Buntsandstein	LIPPMANN, F. (1956)	4	H-550	23,20	12,00	8,00	6,03	4,77	3,97	3,40	2,99	23,84	1,17
			K-Form	29,00	14,50	7,18		4,79				28,87	,54
		4	Mg-Form	29,00	14,50	7,16		4,77				28,82	,74
			Ca-Form	29,50	14,60	7,25	5,86	4,87			3,59	29,16	,92
Buntsandstein	LIPPMANN, F. (1956)	4	G	31,50	15,60	7,75	6,45	5,15	4,45	3,85		31,26	1,58
		4											

Variationskoeffizient (CV) berechnet nach BAILEY (1982)
 $CV = \frac{100 \cdot s}{\bar{x}}$
s Standardabweichung

Behandlung: LT Luftgetrocknet
G gesättigt mit Glycerin / Aethylenglycol
H-400 geheizt bei 400 °C

Tabelle 3.2 Röntgendaten der „Corrensit-ähnlichen“ Minerale in unseren Proben (Angaben in Å; 10Å = 1 Nm).

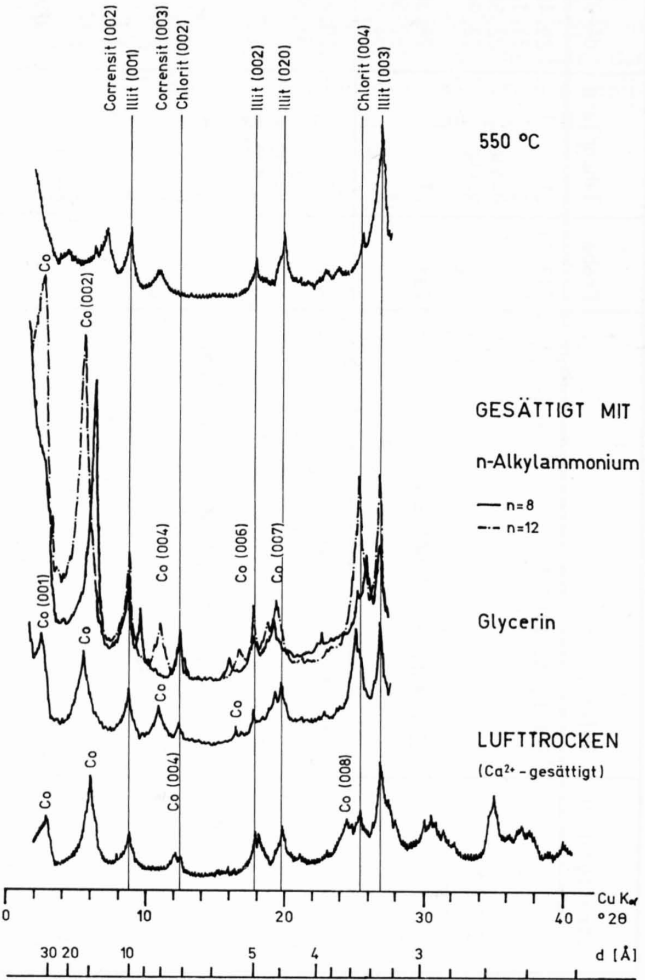
Verwitterungsstufe	Probe	Behandlung	Basisreflexe (001)								mittlerer Basisabstand	CV
			dA-01	dA-02	dA-03	dA-04	dA-05	dA-06	dA-07	dA-08		
W4	7	G H-550	31,33	15,55		8,10			4,48		31,55	1,84
			22,22	12,30	8,08						23,69	5,42
	8	LT G A-8 A-12 H-550	29,88	14,66		7,44					29,65	1,00
			32,10	15,76		8,09			4,47		31,82	1,56
			28,05		9,26		5,54	4,62		3,47	27,79	,54
W3	2	G A-12 H-550	31,70	15,17					4,49	3,95	31,25	1,97
			31,67						3,96		31,65	,06
	9	LT G A-8 H-550			8,26						24,77	
			30,68	14,82						3,70	29,96	2,07
			31,39	16,05		8,00			4,48		31,71	1,27
W1	11	LT G A-8 A-12 H-550	28,92		9,28		5,49		4,60		29,10	7,37
				12,31	8,12						24,48	,75
			29,26	14,52		7,33				3,65	29,20	,39
			32,25	15,87		8,07		5,39			32,16	,88
			28,57	13,82	9,17		5,53	4,61		3,45	27,77	1,42
			31,19	15,73		7,96		5,31	4,53		31,60	,87
				12,32	8,13						24,51	,76

Behandlung: LT luftgetrocknet
G gesättigt mit Glycerin
A-8 gesättigt mit Al_cylammonium (Kettenlänge C-8, C-12)
H-550 geheizt bei 550 °C

Variationskoeffizient (CV) berechnet nach BAILEY (1982) aus mittlerem Basisabstand (\bar{x}) und dessen Standardabweichung (s):
$$CV = \frac{100 \cdot s}{\bar{x}}$$

f) Tonmineral-Spektrum

Grundsätzlich können wir im verwitterten Gipskeuper dasselbe Tonmineral-Spektrum nachweisen, wie es auch in der unverwitterten Lithologie aus den Nagra-Bohrungen bekannt ist (u.a. NAGRA, 1988): Illit ist das dominante Tonmineral, das von Chlorit und der typischen Wechsellagerung Corrensit begleitet wird. Der in 2 Proben festgestellte Vermiculit wird als Verwitterungsprodukt gedeutet. In Figur 3.2 haben wir typische Röntgendiffraktogramme einer Probe aus dem Gipskeuper aufgezeichnet. Deutlich ist die Verschiebung der Basisreflexe (00l) nach verschiedenen Vorbehandlungen beim Corrensit zu sehen, während Illit und Chlorit praktisch keine Veränderungen zeigen.



Figur 3.2 Typische Röntgendiffraktogramme der Tonfraktion einer Probe aus dem Gipskeuper (Probe Nr. 11) nach verschiedenen Vorbehandlungen. Deutlich zu sehen ist die Verschiebung der Basisreflexe beim Corrensit (Co) als Folge der Aufweitung des Zwischenschichtabstandes.

3.2.2.3 Tonmineral-Verteilung im Verwitterungsprofil

Die Anteile der verschiedenen Tonmineralien in den untersuchten 17 Proben aus dem Gipskeuper sind in Tabelle 3.3 aufgelistet. Eine klare Abhängigkeit des Tonmineralspektrums vom Verwitterungszustand ist anhand der kleinen Probenserie natürlich nicht auszumachen. Trotzdem möchten wir einige interessante Beobachtungen festhalten:

- Illit ist das mengenmässig wichtigste Tonmineral in den Sedimenten des Gipskeupers. Ausserdem treten Chlorit und quellfähige Tonminerale auf (Smectit, Vermiculit, Corrensit).

- Corrensit kann auch im verwitterten Gipskeuper vorhanden sein.
- Quellfähige Tonmineralien können in allen Verwitterungsstufen des Gipskeupers auftreten und erreichen teilweise beträchtliche Anteile (>20%).
- Verwitterungserscheinungen an Tonmineralien im Gipskeuper lassen sich durch randliche Aufweitung des Illits und durch sog. „quellfähigen“ Chlorit röntgenographisch nachweisen.

Tabelle 3.3 Identifizierte Tonminerale in den Sedimenten des Gipskeupers unterschiedlicher Verwitterungsstufe (W1: angewittert; W4: vollständig verwittert).

Verwitterungsstufe	Probe	Illit-Kristallinität		Tongehalt	Illit	Chlorit	Smectit	Vermiculit	Corrensit
		normal	glycol	Gew.-%	%	%	%	%	%
W4	7	13.0	9.1	19	40	40			20
	8	7.8	7.8	19	45	30			25
W3	2	14.3	10.4	11	75	20			5
	3	13.0	13.0	13	75	25			
	5	10.7	13.0	8	60	20	20		
	6	14.3		9	75	25			Sp.?
	9	10.4	9.1	22	50	35			15
	10	15.7	11.7	29	75	20	5		
W2	1	11.7	9.1	29	80	20			
	4		7.8	9	75	15	10		
	21	18.2	13.0	28	75	20		5	
	22	19.5	11.7	30	85	15			
	23	19.5	13.0	22	75	25			
W1	11	10.4	7.8	18	50	30			20
	12	16.9	11.7	9	75	25			
	13	9.1	7.8	15	90	10			
	24	18.2	11.7	31	50	25		25	

3.3 Bodenmechanik

3.3.1 Korngrößenverteilung

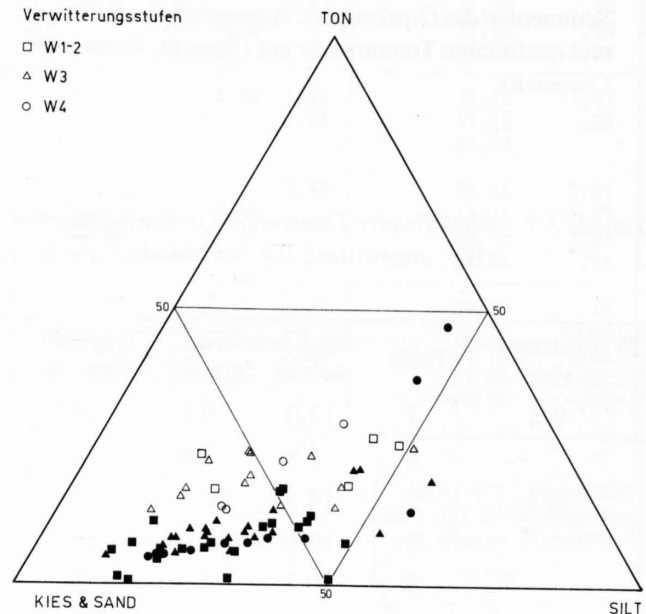
3.3.1.1 Grundlagen

Ton-, Silt- und Mergelgesteine, wie sie für die Keuper- und Juraformationen des Schweizer Jura typisch sind, zeigen eine ausgeprägte Verwitterungsanfälligkeit. In Baugruben, bei Strasseneinschnitten, Böschungen etc. reagieren sie schnell auf die neuen „Klimaeinflüsse“. Die Folgen der physikalischen Verwitterung sind besonders deutlich in der Auflockerung und Desintegration zu sehen (vgl. Kapitel 2.1). Diese Prozesse wurden in überkonsolidierten Tongesteinen Süddeutschlands eingehend durch LEMPP (1979) untersucht: Durch eine Entspannung des Korngefüges zerfallen Kluftkörper rasch in kleinere Aggregate (Bröckchen). Als Folge mehrerer Wechsel von Befeuchtung und Austrocknung tritt eine Schwächung oder Zerstörung der diagenetischen Kornbindungen ein. Sichtbar wird diese Entfestigung des Gesteins durch ein zunehmendes Zerbröckeln und Auseinanderfallen der Aggregate. LEMPP & EINSELE (1981) stellten bei Verwitterungsversuchen im Labor fest, dass durch wiederholte Trocknungs-Befeuchtungs-Wechsel ein fortschreitender Bröckchenzerfall erzielt werden kann. Dies bedeutet, dass mit zunehmender Verwitterung durch diesen Bröckchenzerfall eine Kornzerkleinerung stattfindet, die sich in der Korngrößenverteilung nachweisen lassen sollte.

Für die Bedürfnisse der angewandten Geologie in der Praxis ist nun am Beispiel des Gipskeupers zu zeigen, inwiefern sich die Verwitterung durch die einfache Bestimmung der Korngrößenverteilung charakterisieren lässt. Bei dieser Methode wird die angelieferte Probe normalerweise durch eine Nass-Siebung in Korngrössengruppen unterteilt. Dabei können je nach Zustand der diagenetischen Bindungen und Art des Zementes intern kompliziert zusammengesetzte Aggregate als Gesteinsbröckchen erfasst werden. Es handelt sich hier also nicht um eine Beschreibung der sedimentologischen Korngrösse, sondern im weitesten Sinne um eine Aggregats-Beschreibung.

Figur 3.3 zeigt die Verteilung der Korngrößenfraktionen in Proben aus dem unterschiedlich verwitterten Gipskeuper. Mit ausgefüllten Symbolen haben wir eigene Analysen an Proben aus der Baugrube Adler in Ennetbaden bezeichnet. Leere Symbole stehen für Laboruntersuchungen aus geotechnischen Gutachten im Gipskeuper von Ennetbaden (DR. VON MOOS AG). Diese Proben waren aus Kernbohrungen entnommen worden, was die durchwegs etwas höheren Feinanteile erklärt: Durch den Bohrvorgang findet bereits eine Störung der ursprünglichen Korngrössenzusammensetzung statt, die sich in der Erhöhung der Feinanteile auswirkt. Auf dieser Darstellung sind die Korngrößenfraktionen als Gewichtsprozent eingetragen. Dabei wird ersichtlich, dass bis zur starken Verwitterung (W3) der Zerfall in Bröckchen der Silt- und Tonfraktion (d.h. <0.06

mm) mengenmässig noch von untergeordneter Bedeutung ist. Einzig einige Proben aus dem vollständig verwitterten Gipskeuper (W4) weisen höhere Feinanteile auf. Auch LEMPP & EINSELE (1981) stellten an Proben aus dem Gipskeuper, die nach kurzer Zeit (4 Wochen) unter natürlichen Bedingungen zerfallen waren, eine eng gestufte Bröckchenverteilung in der Feinsand-Feinkies-Fraktion fest.



Figur 3.3 Korngrössenzusammensetzung (Gewichts-%) in Proben aus dem unterschiedlich verwitterten Gipskeuper des Schweizer Jura. Ausgefüllte Symbole stehen für eigene Analysen.

3.3.1.2 Einfluss der Probenaufbereitung

Die Nass-Siebung der Lockergesteinsprobe, wie sie in SNV-Norm 670810c vorgeschrieben ist, stellt eine zusätzliche mechanische Einwirkung auf die Probe dar, welche die durch die Verwitterung bedingte Aggregats-Zerlegung verfälschen könnte. Um diesen Einfluss abschätzen zu können, wurde eine Anzahl von Proben vorerst trocken gesiebt und eine Korngrößenverteilung aufgenommen. Anschliessend wurde dieselbe Probe „normgemäss“ behandelt. Beim Vergleich der beiden Kornverteilungen zeigen sich interessante Unterschiede in den einzelnen Korngrößenfraktionen, die in Figur 3.4 dargestellt sind:

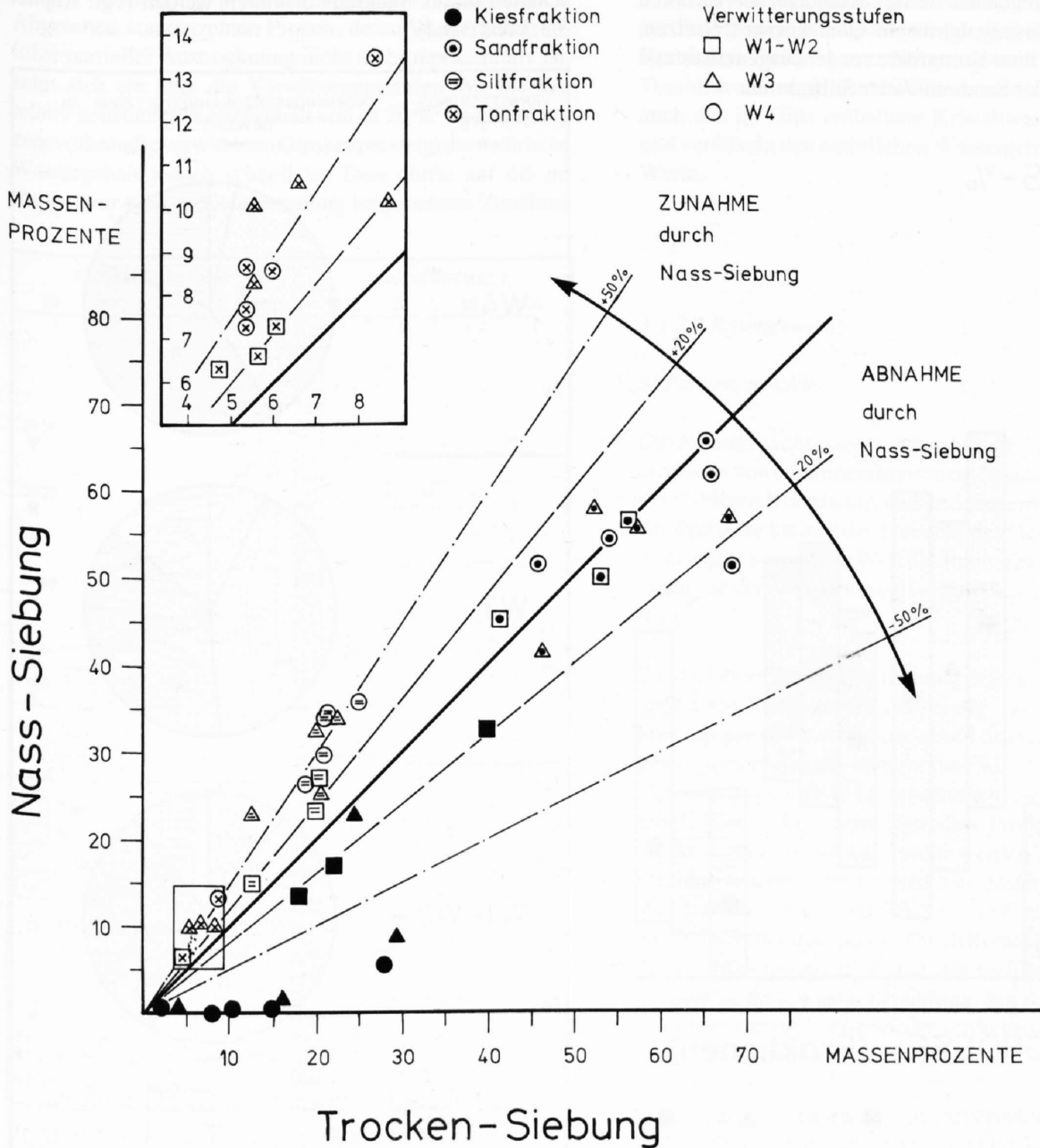
- Bei Nass-Siebung findet in allen Verwitterungsstufen erwartungsgemäss eine Abnahme der Grobfraction (Kies) zugunsten der Feinfraktionen (Silt und Ton) statt. Bei der Sandfraktion halten sich Zu- und Abnahme in etwa die Waage. Dies ist auf den Umstand zurückzuführen, dass aus dem Zerfall von Aggregaten der Kiesfraktion u.a. Komponenten zwischen 0.06 und 2 mm (Sand-Fraktion) entstehen, während andererseits bereits

in dieser Korngrösse vorliegende Aggregate in noch feinere Krümel zerfallen können.

- Je weiter fortgeschritten die Verwitterung, desto grösser ist die Auswirkung der Aufschlammung auf die Aggregat-auflösung: Die Nass-Siebung führt praktisch zu einem Verlust der Kiesfraktion bei den vollständig verwitterten Proben (W4).
- Bei den Feianteilen führt die Nass-Siebung zu einer Verdoppelung des Anteils der Tonfraktion an der Gesamtzusammensetzung.

Die Resultate zeigen, dass es sich bei den natürlichen, d.h. verwitterungsbedingten Aggregaten um fragile Korngebilde

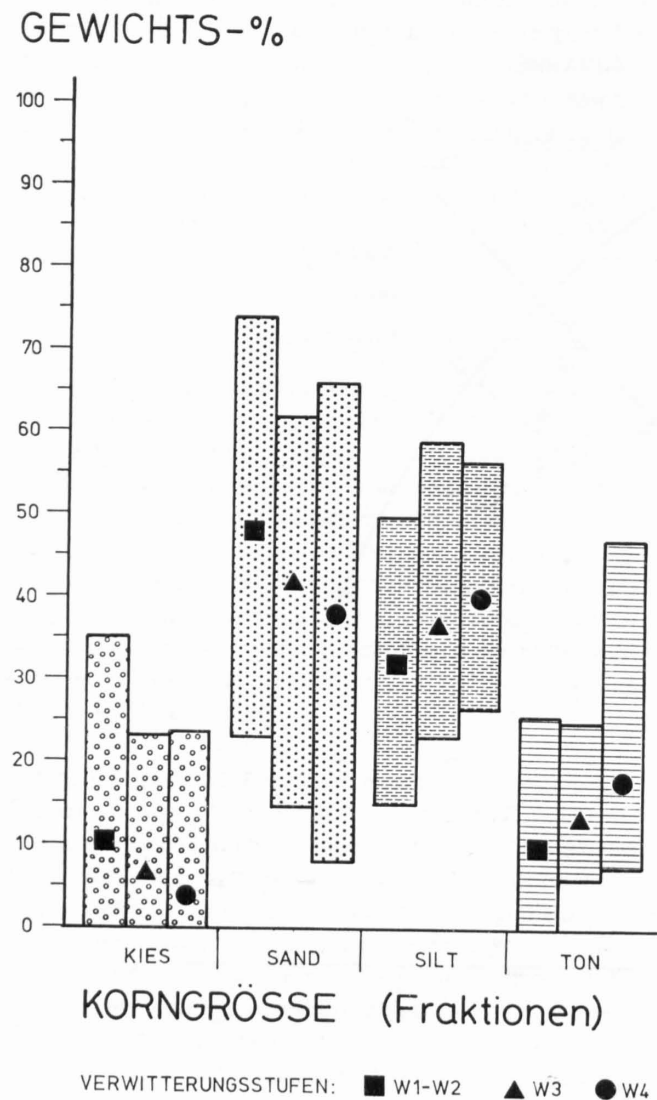
handelt, deren effektive Korngrösse nur bedingt mit der normierten Methode der Korngrössenanalyse erfasst werden kann. In diesem speziellen Fall eignet sich die Korngrössenverteilung zwar als Vergleichsmassstab zur Beschreibung der Aggregat-Bindungen, jedoch nicht als Basisdatensatz für bodenmechanische Berechnungen. Für einen Vergleich verschiedener Siebanalysen ist es deshalb wichtig zu beachten, dass bei allen Proben eine gleichmässige Beanspruchung der Aggregats-Kontaktpunkte gegeben ist. Da in der Praxis normalerweise die Bodenproben nass gesiebt und die Feianteile ohnehin für die Aerometeranalyse geschlämmt werden, haben wir uns entschieden, im folgenden nur Resultate von Nass-Siebungen zu diskutieren.



Figur 3.4 Vergleich der Korngrössenzusammensetzung bei unterschiedlicher Behandlung.

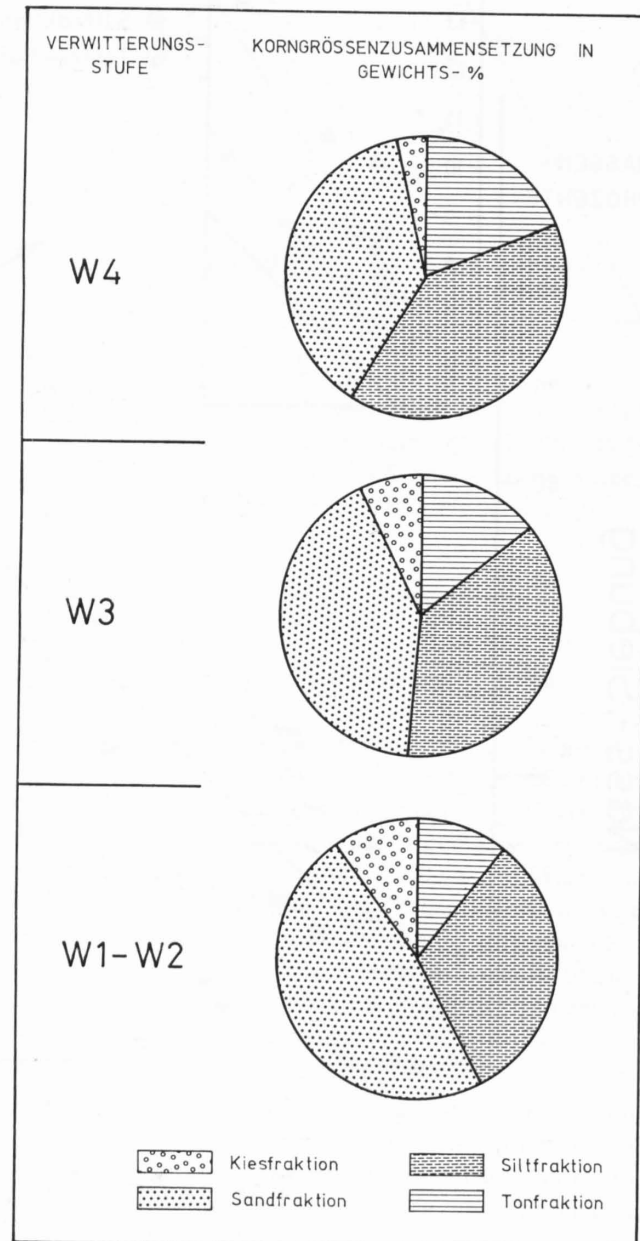
3.3.1.3 Statistische Korngrößenverteilung im Verwitterungsprofil

Die statistische Verteilung der Korngrößenzusammensetzung in den unterschiedlichen Verwitterungsstufen geht aus Figur 3.5 hervor. Hier sind für jede Kornfraktion die Bandbreiten und Mittelwerte in den einzelnen Verwitterungsstufen einander gegenübergestellt. Zumeist sind die Sand- und Siltfraktionen vorherrschend. Die absoluten Anteile der Kornfraktionen überschneiden sich jedoch stark, da die sedimentologische Ausgangssituation (Schichtung, Mineralogie etc.) wesentlichen Einfluss auf die „produzierbare“ Korngrösse ausübt: Ein reiner Tonstein kann bei vollständiger Verwitterung durch die Desintegration erwartungsgemäss zu 100 Prozent in die Tonfraktion übergehen. Demgegenüber dürfte ein sandiger Mergel durch die Karbonatauflösung detritische Quarzkörner freisetzen, die entsprechend ihrer Korngrösse vor der Diagenese erfasst werden, z.B. in der Sand- und/oder Siltfraktion.



Figur 3.5 Statistische Verteilung der Kornfraktionen (Bandbreite und Mittelwert) in Abhängigkeit von der Verwitterungsstufe (Anzahl Proben: W1-W2 n=27; W3 n=30; W4 n=12).

Anhand unseres Datenmaterials kann gesagt werden, dass die Grobfractionen mit fortschreitender Verwitterung zugunsten der Feinfractionen abnehmen. Die tendenziellen Veränderungen der Korngrößenzusammensetzung über das Verwitterungsprofil haben wir in Figur 3.6 dargestellt. Entscheidend für die geotechnische Beurteilung der Verwitterungsböden im Gipskeuper ist dabei, dass die Feianteile mit fortschreitender Verwitterung immer stärker in Erscheinung treten. Aber auch in den gröberen Kornfraktionen sind noch Potentiale für feinkörnige Verwitterungsprodukte „gespeichert“, die zwar zur Zeit (z.B. Tonminerale 30 Gewichts-% in einer Probe aus W2) noch als Aggregate vorliegen, bei fortschreitender Verwitterung jedoch zunehmend freigesetzt werden. Damit muss auch ihr Einfluss auf die Plastizitäts- und Stabilitätseigenschaften dieses Materials diskutiert werden (vgl. Kapitel 3.3.3 und 3.3.4).



Figur 3.6 Tendenzielle Veränderungen der Korngrößenzusammensetzung über das Verwitterungsprofil im Gipskeuper.

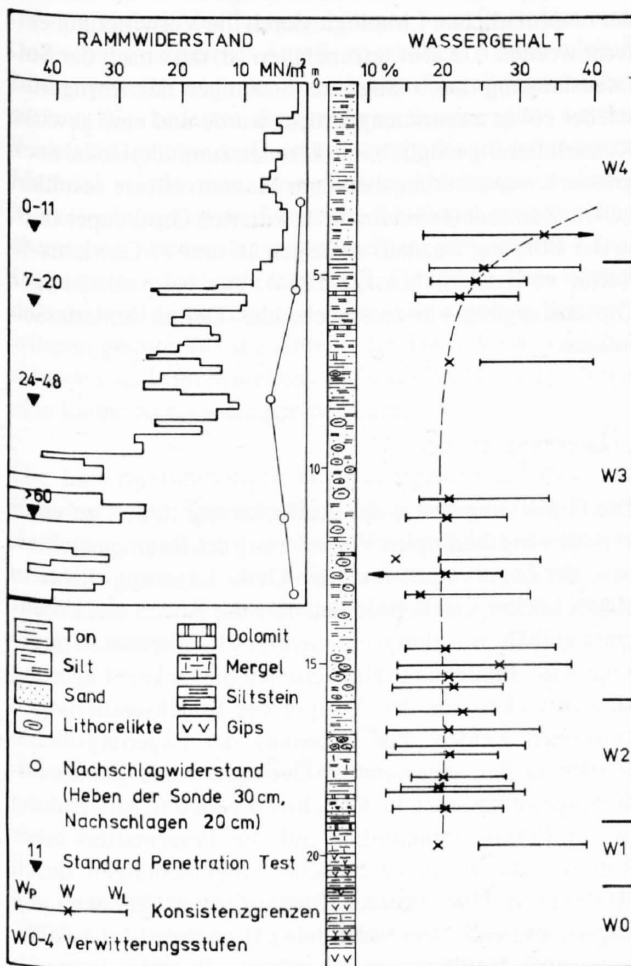
3.3.2 Kenngrößen des Naturzustandes

3.3.2.1 Wassergehalt

Auf die Problematik bei der Entnahme von sog. ungestörten Proben im Verwitterungsprofil wurde bereits in Kapitel 2.3.1 eingegangen. Die Erfassung der Kenngrößen des Naturzustandes erfordert darüber hinaus eine schnelle Probenauswertung oder zumindest eine sehr gute Konservierung. Im Falle des natürlichen Wassergehaltes war es uns möglich, diesen an Proben aus unterschiedlichen Verwitterungsstufen des Gipskeupers zu bestimmen. Die Entwicklung des natürlichen Wassergehaltes und seiner Relation bezüglich der Konsistenzgrenzen sind in Figur 3.7 dargestellt. Es handelt sich hier um eine Darstellung im synthetischen Verwitterungsprofil des Gipskeupers in Ennetbaden. Abgesehen von einzelnen Proben, deren Wassergehalt infolge partieller Austrocknung nicht mehr repräsentativ ist, zeigt sich ein über die Verwitterungsstufen W1 bis W3 relativ konstanter Wassergehalt von ca 20 %. Im Übergang zum vollständig verwitterten Gipskeuper steigt der natürliche Wassergehalt jedoch schnell an. Dies dürfte auf die im Kapitel zur Korngrößenverteilung besprochene Zunahme

der Tonfraktion zurückzuführen sein, die zum grössten Teil aus Tonmineralien besteht, unter denen die quellfähigen beträchtliche Mengen Wasser aufnehmen können. Solange diese jedoch noch in Sand- und Silt-Aggregaten vorliegen (z.B. in W2), ist die reaktionsfähige Oberfläche eingeschränkt und das Wasser dürfte zu einem grossen Teil intergranular gespeichert werden.

In der unverwitterten Lithologie (W0) sind aufgrund der kleineren Porosität - in den Nagra-Bohrungen erreichte die offene Porosität in Tonmergeln maximal 8% (vgl. Kapitel 3.4) - je nach Ausbildung der Klüftung (Lage, Dichte, Verheilung) natürliche Wassergehalte unter 10 % zu erwarten. Für den Fall des unverwitterten Gipskeupers, wo Sulfat in Form von Gips vorliegt, ist zudem zu berücksichtigen, dass die "normgemässe" Anwendung der Ofentrocknung für die Wassergehaltsbestimmung zu keinen befriedigenden Resultaten führen kann: Neben dem in Klüften und an Tonmineralen angelagerten Wasser wird bei dieser Methode auch das im Gips enthaltene Kristallwasser ausgetrieben und verfälscht den natürlichen Wassergehalt durch zu hohe Werte.



Figur 3.7 Synthetisches Verwitterungsprofil des Gipskeupers in Ennetbaden mit Verteilung des natürlichen Wassergehaltes und der Konsistenzgrenzen, sowie der Rammwiderstände als Indikatoren der Lagerungsdichte.

3.3.2.2 Raumgewicht

a) Probenentnahme

Das Raumgewicht eines Gesteinskörpers ist direkt abhängig einerseits von der mineralogischen Zusammensetzung, d.h. der mittleren Korndichte, und andererseits vom Porenraum der Probe. Je kleiner die Porosität des Gesteinskörpers ist, desto näher kommt der Wert des Raumgewichtes (Gesteinsdichte) an den Wert des spezifischen Gewichts (Korndichte) heran.

Für die labormässige Bestimmung des Raumgewichtes sind ungestörte Bodenproben notwendig. Diese konnten nicht über das ganze Verwitterungsprofil des Gipskeupers in der gewünschten Anzahl entnommen werden. Einzig in der Verwitterungsstufe W4 (vollständig verwittert) war es uns möglich, mit Hilfe eines Zylinders Proben auszusteichen, die im Labor weiter untersucht werden konnten. In den weniger stark verwitterten Bereichen des Gipskeupers wirkte sich der hohe Anteil an Bröckchen der Kiesfraktion negativ auf die Probenentnahme aus: Durch Rotation und Translation der Grobkomponenten wurde das Gefüge der Lithologie nachhaltig gestört. Die Ermittlung des Raumgewichtes an solchermassen teilweise wieder verdichteten Proben schien uns deshalb nicht mehr opportun.

b) Raumgewichtsbestimmungen im Gipskeuper

Die Resultate unserer Raumgewichtsbestimmungen im vollständig verwitterten Gipskeuper sind in Tabelle 3.4a zusammengestellt.

Tabelle 3.4 Raumgewichte im Gipskeuper:
a) eigene Untersuchungen

Verw. stufe	Intern Nr.	w %	γ KN/m ³	γ_d KN/m ³	γ_s g/cm ³	n %
W4	960	25.2	19.5	15.6	2.76	43.5
W4	961-1	21.8	17.9	14.7	2.75	46.6
W4	961-2	25.3	19.9	15.9	2.75	42.2
W4	962-1	24.2	20.4	16.4	2.76	40.5
W4	962-2	22.6	20.1	16.4	2.76	40.6
W4	009-1	43.4	18.0	12.6	2.78	54.8
W4	009-2	32.9	18.6	14.0	2.78	49.6
Durchschnitt (\bar{x})			19.2	15.1	2.76	

- w Natürlicher Wassergehalt
- γ Feuchtraumgewicht
- γ_d Trockenraumgewicht
- γ_s Korndichte
- n Porosität

b) Vergleich mit Proben aus Sondierbohrungen

Verwitterungsstufe	Probenanzahl	$\bar{x} \gamma$ KN/m ³	$\bar{x} \gamma_d$ KN/m ³	$\bar{x} \gamma_s$ g/cm ³
W4	3	19.8	16.0	-
W3	11	21.1	17.5	-
W2	2	21.4	17.8	-
aus unverwitterten Proben (W0) der Sondierbohrungen:				
Beznau	7	-	26.8	2.83
Böttstein	5	-	25.8	2.82
Schafisheim	9	-	28.1	2.85

In Anbetracht der vorher erwähnten Problematik bei der Probenentnahme sind die Resultate an sog. „ungestörten“ Proben aus den Kernbohrungen mit grosser Vorsicht zu interpretieren. Trotzdem haben wir in Tabelle 3.4b Resultate aus der Sondierbohrung SJ1 für die Baugrube Adler zusammengestellt und den entsprechenden Verwitterungsstufen zugeordnet. Eine tendenzielle Auflockerung vom mässig verwitterten (W2) zum vollständig verwitterten Gipskeuper (W4) könnte aus einer Erniedrigung des Raumgewichtes abgeleitet werden. Inwiefern jedoch die höheren Raumgewichte repräsentativ ermittelt werden konnten, kann hier nicht abschliessend beurteilt werden.

An unverwittertem, massivem Gipskeuper aus den Bohrungen Beznau, Böttstein und Schafisheim wurden *Trockenraumgewichte* γ_d von 22.6-29.5 KN/m³ gemessen (NAGRA, 1984; PETERS ET AL., 1987; MATTER ET AL., 1988b). Mittelwerte für die verschiedenen Bohrungen haben wir in Tabelle 3.4b zusammengestellt. Die einzelnen Werte streuen entsprechend den unterschiedlichen mineralogischen

Gesteinszusammensetzungen: So weist ein Dolomitmergel aus der Bohrung Schafisheim bei einer Porosität von 2.2% eine Gesteinsdichte von 27.5 KN/m³ auf (MATTER ET AL., 1988b). Dagegen wurde an einem laminierten Anhydrit aus der Bohrung Beznau bei vergleichbarer Porosität (2.3%) ein Trockenraumgewicht von 29.5 KN/m³ gemessen (NAGRA, 1984).

Die *Korndichte* der Proben aus dem verwitterten Gipskeuper beträgt im Mittel 2.80 g/cm³. Sie ist somit um wenige Prozente kleiner als in der unverwitterten Lithologie (2.82-2.85 g/cm³; vgl. Tabelle 3.4b), was auf das verwitterungsbedingte Verschwinden des Sulfats (Anhydrit) zurückgeführt wird. Dieses Mineral mit einem spez. Gewicht von 2.96 g/cm³ ist für die hohen Gesteinsdichten im unverwitterten Gipskeuper verantwortlich.

Vergleichen wir nun das Raumgewicht des verwitterten mit demjenigen des unverwitterten Gipskeupers, so stellen wir fest, dass das heutige Raumgewicht noch ca. 60% des ursprünglichen Wertes einnimmt. Unter der Voraussetzung eines konstanten Volumens - d.h. unter Ausschluss von Setzungen, bzw. von Volumenvergrösserungen durch Quellung der Tone - wären demzufolge ca. 40 Gewichts-% der ursprünglichen Lithologie durch die Verwitterung entfernt worden. Da aber anzunehmen ist, dass nach der Sulfatauslaugung durch langsame Setzungen das Korngerüst wieder etwas zusammengedrückt wurde und eine gewisse Konsolidierung möglich war, könnten zumindest lokal noch grössere, verwitterungsbedingte Massenverluste resultiert haben. Zumindest sind im unverwitterten Gipskeuper (z.B. in der Bohrung Beznau) zwischen 18 und 97 Gewichts-% Sulfat vorhanden (NAGRA, 1984), das bei vollständiger Gipsauslaugung ein entsprechendes Defizit hinterlassen müsste.

c) Lagerungsdichte

Die Gipslösung sowie die Auflockerung führen zu einer verwitterungsbedingten Veränderung des Raumgewichtes, bzw. der *Lagerungsdichte*. Eine kleine Lagerungsdichte in einem Lockergestein bedeutet, dass der Boden viel Porenraum enthält, was durch ein niedriges Raumgewicht angezeigt wird. Interessante Hinweise auf die lockere Lagerung können zudem aus der Analyse der Bodensondierungen gewonnen werden. Zur Erfassung der Lagerungsdichte werden in der angewandten Geologie gerne Rammsondierungen eingesetzt. In der Schweiz geht ihre Anwendung in der Praxis vornehmlich auf die Präsentation einer Rammsonde für geotechnische Untersuchungen durch HÄFELI ET AL. (1951) zurück. Eine weitere Möglichkeit, die Lagerungsdichte einer Lithologie z.B. während der Ausführung einer Kernbohrung zu erfassen, besteht darin, im Bohrloch in verschiedenen Tiefen unter normierten Bedingungen eine Sonde in den Boden zu pressen: Die resultierenden Widerstandswerte beziehen sich auf den sog. Standard Penetration Test (SPT-Werte). Eine Beschreibung der verschiedenen Rammsonden und ein Vergleich mit der

SPT-Sonde findet sich in PRINZ (1982). Aus der Baugrunduntersuchung für die Baugrube Adler in Ennetbaden standen uns auch Rammprogramme zur Verfügung. Während des Aushubs war es dann möglich, die Sondierungen (bzw. die ermittelten Widerstände) direkt mit der durchschlagenen Lithologie zu vergleichen. Wir haben deshalb exemplarisch ein typisches Rammprogramm sowie vergleichbare SPT-Werte aus benachbarten Sondierbohrungen dem synthetischen Verwitterungsprofil im Gipskeuper in Ennetbaden (Figur 3.7) gegenübergestellt. Deutlich ist zu sehen, dass die Rammsonde praktisch ohne bemerkenswerte Widerstände durch den vollständig und stark verwitterten Gipskeuper (Verwitterungsstufen W4 und W3) gleitet. Die tiefen SPT-Werte stimmen gut mit diesen Beobachtungen überein. Einzig etwas kompaktere Dolomitbänkchen bieten der Sonde vorerst etwas Widerstand, bis die Schicht durchschlagen ist. Hier zeigt sich der Vorteil der Rammsondierung, wo die schwankenden Widerstände den inhomogenen Aufbau der Lithologie erraten lassen, währenddem die punktförmig erfassten SPT-Werte schlechter dem Gesamtgesteinsverband zugeordnet werden können.

In kohäsiven Böden wird bei der Bestimmung des Rammwiderstandes normalerweise auch der Anteil der Mantelreibung entlang des Rammgestänges miteingerechnet. Um eine Grössenordnung dieses Anteils zu erhalten, wird in solchen Böden jeweils auch der sog. Nachschlagwiderstand bestimmt. Dies bedeutet, dass bei freier Sondierspitze nur der Widerstand entlang des Gestänges ermittelt wird. In bindigem Material würde man eine direkte Abhängigkeit dieser Mantelreibung von der Länge des Gestänges erwarten. Die ermittelten Nachschlagwiderstände im verwitterten Gipskeuper sind jedoch sehr klein (vgl. Figur 3.7). Dies könnte dahingehend interpretiert werden, dass vorab in der Verwitterungsstufe W3 die Anteile der Tonfraktion noch bescheiden sind (im Mittel um 14 Gewichts-%) und sich nur eine kleine Kohäsion ausbilden kann.

Die Laborbestimmungen des Raumgewichtes sowie die Resultate der Rammsondierungen belegen die starke Auflockerung des Gesteinsverbandes durch die Verwitterung - sei dies chemisch durch die Auflösung der Sulfate und Karbonate, und/oder mechanisch durch die Entspannung in Oberflächennähe.

3.3.3 Plastizitätseigenschaften

3.3.3.1 Allgemeines

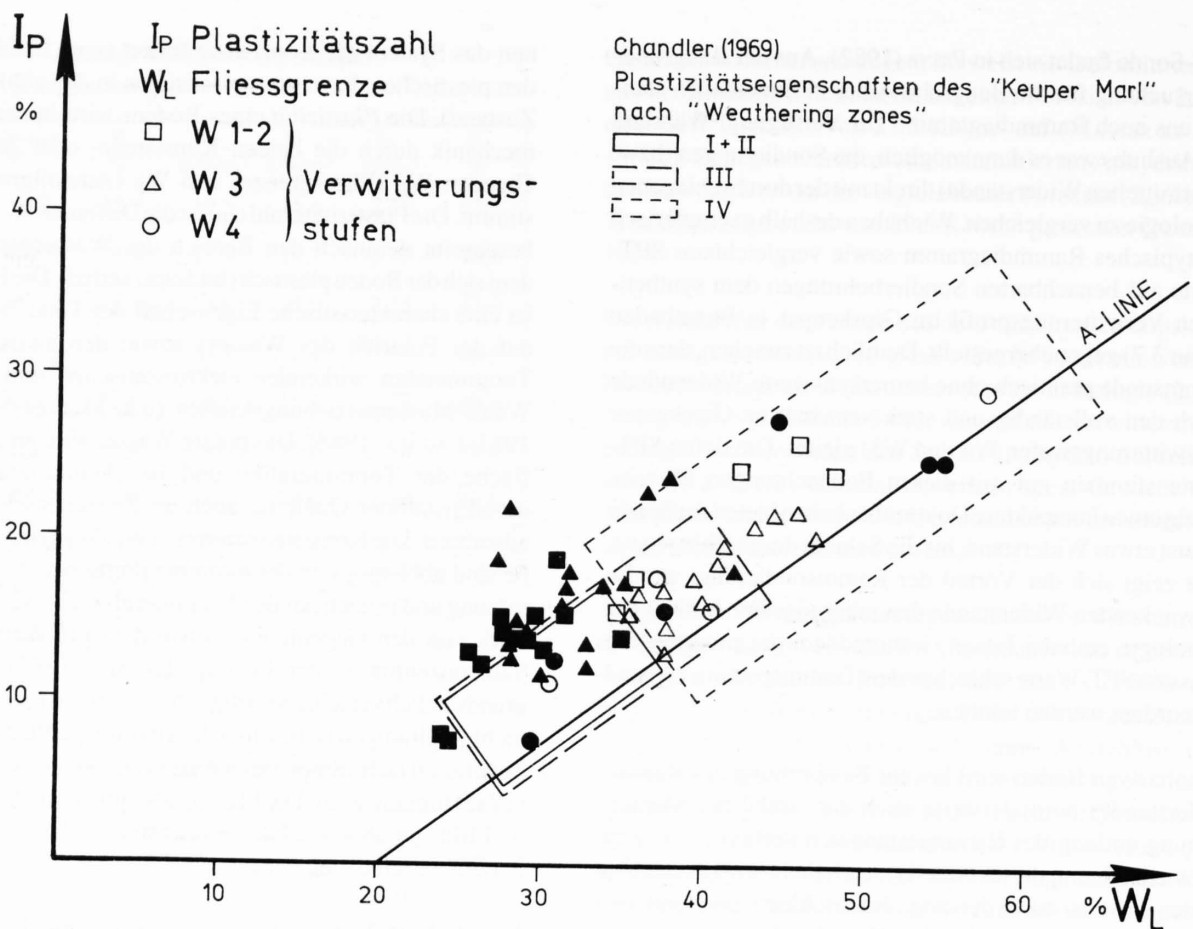
Die Bestimmung der Atterberg-Grenzen dient als Grundlage für die geotechnische Klassifikation der feinkörnigen Sedimente. Gemischtkörnige Böden enthalten neben den Grobkomponenten auch bindige, d.h. feinkörnige Anteile. Entsprechend werden in diesen Böden, denen auch die verwitterten Sedimente des Gipskeupers zuzurechnen sind, die Plastizitätseigenschaften des Feinanteiles untersucht. Im Wesentlichen werden Wassergehalte ermittelt, bei de-

nen das System die Konsistenz ändert (vom halbfesten in den plastischen, bzw. vom plastischen in den zähflüssigen Zustand). Die *Plastizität* eines Bodens wird in der Bodenmechanik durch die beiden Konsistenz- oder Atterberg-Grenzen W_L (Flie遝grenze) und W_P (Ausrollgrenze) bestimmt. Die Plastizitätszahl (I_P) ist die Differenz $W_L - W_P$. Sie beschreibt demnach den Bereich des Wassergehaltes, in dem sich der Boden plastisch (bildsam) verhält. Die Plastizität ist eine charakteristische Eigenschaft der Tone. Sie beruht auf der Polarität des Wassers sowie den zwischen den Tonmineralen wirkenden elektrostatischen und van der Waals-Massenanziehungskräften (u.a. MÜLLER-VONMOOS, 1983; LAGALY, 1988). Das polare Wasser wird an der Oberfläche der Tonmineralien und bei Tonmineralien mit innerkristalliner Quellung auch im Zwischenschichtraum adsorbiert. Die Konsistenzgrenzen (W_L , W_P) einer Tonprobe sind abhängig von der tonmineralogischen Zusammensetzung und je nach Art des Tonminerals mehr oder weniger stark von den Gegenionen, sowie dem pH-Wert und der Salzkonzentration der Lösung (LAGALY, 1988). Auf das grundsätzlich verschiedenartige Verhalten von innerkristallin nichtquellfähigen (z.B. Illit, Chlorit) und quellfähigen Tonmineralien (z.B. Smectite) haben MÜLLER-VONMOOS ET AL. (1985) hingewiesen: Die Plastizitätszahl nimmt für Kaolinit und Illit mit abnehmender Wertigkeit der Gegenionen ab, bei Smectiten dagegen zu.

Natürliche Böden stellen in den wenigsten Fällen reine Tone dar, sondern bilden ein Mineralgemisch mit wechselnden Anteilen an Tonmineralien. Es darf angenommen werden, dass in tonigen Böden der Schweiz die Calcium- und Magnesiumform der Tone überwiegt (MÜLLER-VONMOOS ET AL., 1985). In der Calciumform ist die Plastizität des Montmorillonits jedoch wesentlich höher als die des Illits. Folglich werden bereits wenige Prozente von Montmorillonit bei mässigem Einfluss auf die Ausrollgrenze die Flie遝grenze stark erhöhen und die Plastizitätszahl steigt dementsprechend (LAGALY, 1988). Für bodenmechanische Untersuchungen ist deshalb in entsprechender Weise auf geringe Anteile von Smectiten und quellfähigen Wechsellagerungen zu achten!

3.3.3.2 Diskussion der Resultate aus dem Gipskeuper

Zur Diskussion der Plastizitätseigenschaften eignet sich die Darstellung der Resultate im Plastizitätsdiagramm nach Atterberg. In Figur 3.8 sind unsere diesbezüglichen Daten aus dem verwitterten Gipskeuper zusammengestellt. Mit ausgefüllten Symbolen werden eigene Untersuchungen an Proben aus der Baugrube Adler (Ennetbaden) bezeichnet. Unausgefüllte Symbole stehen für Analysen an Gipskeuper-Proben, deren Resultate wir geotechnischen Berichten (Dr. von Moos AG) entnommen haben. Basierend auf der Beschreibung im Bohrprofil konnten wir sie jedoch den Verwitterungsstufen zuordnen. Aufgrund dieses Verfahrens sind solche Daten natürlich mit einer Unsicherheit behaftet.

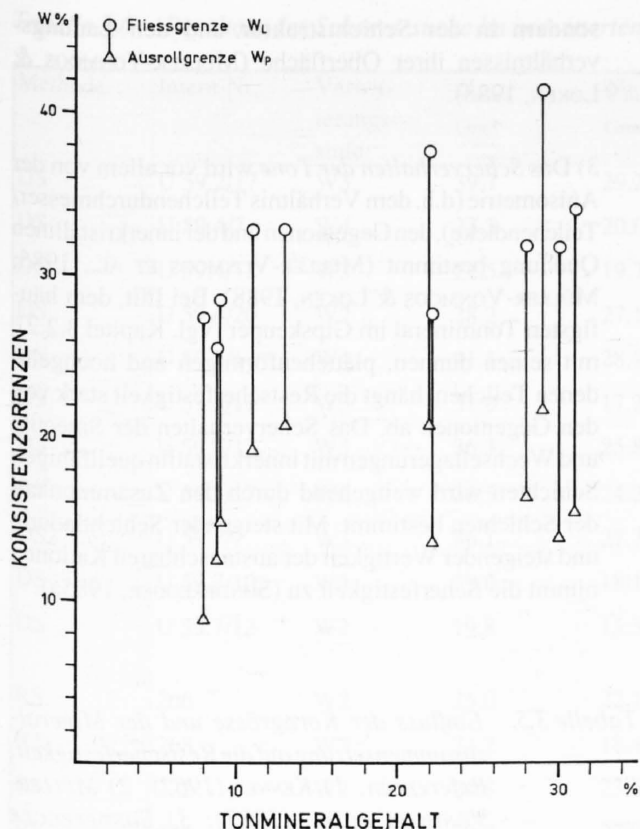


Figur 3.8 Plastizitätsdiagramm für den verwitterten Gipskeuper. Ausgefüllte Symbole stehen für eigene Untersuchungen an Proben aus der Baugrube Adler, Ennetbaden.

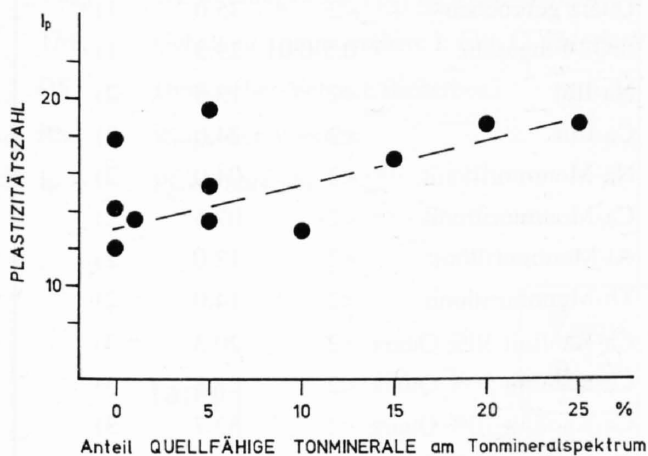
In Übereinstimmung mit den Untersuchungen von CHANDLER (1969), der Verwitterungsprofile im „Keuper Marl“ in England studierte, können die Proben aus dem angewitterten (W1) und aus dem mässig verwitterten Gipskeuper (W2) auf dem Plastizitätsdiagramm nicht auseinandergehalten werden. Der Übergang von der stark verwitterten (W3) zur vollständig verwitterten (W4) Lithologie scheint sich jedoch - zumindest was unsere eigenen Untersuchungen betrifft - in einem veränderten Plastizitätsverhalten des Bodens auszuwirken. Hier beginnen sich nun die mobilisierten Tonminerale einzuschalten, die in weniger verwitterten Proben noch durch diagenetische Bindungen gehemmt waren. MACK (1981) bezeichnet diesen Übergang diagenetisch verfestigter Tonmineralaggregate in den Zustand dispers verteilter Tonpartikel mit „Aggregatauflösung“. Auch er stellte bei seinen Untersuchungen an tonreichen Sedimenten Süddeutschlands (u.a. auch im Gipskeuper) eine mit der Verwitterung verknüpfte Zunahme des Wassergehaltes und der Plastizität fest. Jedoch können wir seine Ansicht, der Verwitterungsgrad des Gipskeupers bleibe nach der Gipsauslaugung bis in die obersten Bodenschichten konstant, aufgrund unserer Beobachtungen nicht teilen.

Wir wollen nun der Frage nachgehen, welchen Einfluss der Tonmineralgehalt der Proben aus dem verwitterten Gipskeuper auf die Konsistenzgrenzen ausübt. Wir können dies anhand der Figur 3.9 diskutieren:

- Eine Abhängigkeit der *Ausrollgrenze* vom Tonmineralgehalt ist nicht auszumachen.
- Bezüglich der Veränderung der *Fliessgrenze* mit zunehmendem Tongehalt können 2 Tendenzen beobachtet werden:
 - a) Eine Gruppe fällt durch hohe Fliessgrenzen bei erhöhtem Tongehalt auf. Die tonmineralogischen Untersuchungen haben ergeben (vgl. Kapitel 3.2.2), dass diese Proben quellfähige Tonminerale (Smectite, Corrensit) enthalten. Die Erhöhung der Fliessgrenze bei Anwesenheit von quellfähigen Tonmineralien deckt sich mit den bereits weiter vorne zitierten Beobachtungen von LAGALY (1988).
 - b) Die 2. Gruppe weist niedrigere Fliessgrenzen als die soeben besprochene auf, die zudem keine starken Veränderungen durch die Zunahme des Tonanteils erfährt. Als Tonminerale enthalten diese Proben nur Illit und Chlorit, in zwei Fällen zudem etwas Vermiculit.
- Eine Veränderung des *Tongehaltes* scheint direkt auf die Grösse der Plastizitätszahl I_p keinen Einfluss zu haben. Bei einer Probe mit einem Tongehalt von 8% bestimmten wir ein I_p von 18.6, während eine andere Probe mit 30% Tonanteil ein I_p von 17.9 aufwies.



Figur 3.9 Abhängigkeit der Konsistenzgrenzen vom Tonmineralgehalt in Proben aus dem verwitterten Gipskeuper.



Figur 3.10 Abhängigkeit der Plastizitätszahl I_p von der tonmineralogischen Zusammensetzung der Proben aus dem verwitterten Gipskeuper.

Vergleichen wir jedoch die Grösse der Plastizitätszahl I_p mit der tonmineralogischen Zusammensetzung der Probe, so stellen wir folgendes fest (vgl. Figur 3.10):

- Bei den Verwitterungsböden des Gipskeupers nimmt die Plastizitätszahl tendenziell zu bei erhöhten Anteilen an quellfähigen Tonmineralien.
- Differierende Plastizitätszahlen bei gleichen Anteilen an quellfähigen Tonmineralien können verschiedene

Ursachen haben:

a) unterschiedliche Tonminerale:

5% Smectite (entspricht 1.5% der Gesamtprobe),

$I_p=19.5$

5% Vermiculit (entspricht 1.4% der Gesamtprobe),

$I_p=15.3$

b) unterschiedliche Tonanteile an der Gesamtprobe:

30% Illit & Chlorit, $I_p=17.9$

22% Illit & Chlorit, $I_p=14.2$

13% Illit & Chlorit, $I_p=12.1$

Die Resultate unserer Untersuchung zeigen, dass die Plastizität des Gipskeupers durch die tonmineralogische Zusammensetzung gesteuert wird. Sie demonstrieren eindrücklich die Bedeutung der mineralogischen Untersuchungen für das geotechnische Verständnis der bindigen Lockergesteine: Die Aussage von MÜLLER-VONMOOS (1983), dass für das bodenmechanische Verhalten der feinkörnigen Böden nicht nur der Tongehalt, sondern auch die Art der Tonminerale von grosser Bedeutung ist, wird durch die vorliegende Untersuchung unterstrichen.

3.3.4 Scherfestigkeit des verwitterten Gipskeupers

3.3.4.1 Grundlagen

Für die mathematische Behandlung diverser grundbaulicher Probleme (z.B. Tragfähigkeit, Stabilität) ist es nötig, die Scherfestigkeit des Baugrundes zu kennen. Allgemein kann die Scherfestigkeit mit den Grössen der effektiven Kohäsion c' und des effektiven Winkels der inneren Reibung ϕ' ausgedrückt werden. Die Scherfestigkeit τ_f wird dabei durch die Mohr-Coulomb'sche Bruchbedingung erfasst (σ' : effektive Normalspannung):

$$\tau_f = c' + \sigma' \cdot \tan \phi'$$

Zur Ermittlung der Scherfestigkeit eines Bodens können drainierte oder undrainierte Versuche durchgeführt werden. Wird jedoch eine Probe im undrainierten Zustand abgeschert, so sind zusätzlich die Porenwasserspannungen zu berücksichtigen. Beim drainierten Scherversuch sind diese nach der Konsolidation der Probe auf Null abgesunken und es muss so langsam geschert werden, dass dabei keine Porenwasserspannungen auftreten können. Wir beziehen uns in dieser Arbeit vor allem auf Ergebnisse von drainierten Scherversuchen.

Im Zusammenhang mit Rutschungen und kriechenden Hängen stellt sich in der Praxis immer wieder die Frage der Stabilität des Baugrundes. Zur Behandlung dieser Frage ist jedoch nicht nur die Kenntnis der maximalen Scherfestigkeit, sondern insbesondere die Grösse des Scherwiderstandes nach dem Bruch (Restscherfestigkeit) von grosser Bedeutung. Eine Zusammenfassung der verschiedenen Möglichkeiten, die Restscherfestigkeit natürlicher Böden zu ermitteln, gibt BUCHER (1975). Dieser Autor hat in seiner Arbeit auch die Einflüsse experimenteller Parameter auf die Rest-

scherfestigkeit untersucht: Dabei erwiesen sich die Normalspannung und die Schergeschwindigkeit von untergeordneter, die Temperatur von vernachlässigbarer Bedeutung. Einen grossen Einfluss kann jedoch die Aufbereitung des Probenmaterials haben. Bei homogen aufgebauten Böden erzielte BUCHER (1975) gute Übereinstimmung der Resultate an aufbereiteten (d.h. "gestörten") und nicht aufbereiteten ("ungestörten") Proben. Grössere Abweichungen ergeben sich bei geschichteten Böden, bei denen durch die Aufbereitung der Probe die einzelnen, materialmässig verschiedenen Schichten über die ganze Probe gleichmässig verteilt werden. Dies führt nun im Experiment dazu, dass die Restscherfestigkeit mit Versuchen an aufbereiteten Proben teilweise zu hoch eingeschätzt wird.

Das Phänomen der minimalen, konstanten Scherfestigkeit (Restscherfestigkeit) wurde vorab von Bodenmechanikern und Tonmineralogen in den letzten Jahren intensiv untersucht (u.a. SKEMPTON, 1964, 1985; BUCHER, 1975; LUPINI ET AL., 1981; SONDEREGGER, 1985a&b; MÜLLER-VONMOOS ET AL., 1985, MÜLLER-VONMOOS & LØKEN, 1988). Eine Zusammenstellung der Literatur, die sich mit der Korrelation zwischen Restscherfestigkeit und Zustandsgrössen des Bodens befasste, wird durch COLOTTA ET AL. (1989) gegeben. Zum besseren Verständnis dieser vielfältigen Thematik wurden jedoch oft nur reine Tone untersucht, oder es fehlen wie bei BUCHER (1975) Angaben über die mineralogische Zusammensetzung der untersuchten Proben.

Einige interessante Resultate aus der Literatur haben wir in Tabelle 3.5 zusammengetragen. Die wichtigsten Zusammenhänge sollen hier kurz kommentiert werden:

1) Die Restscherfestigkeit wird stark beeinflusst durch die *mineralogische Zusammensetzung* des Bodens. Insbesondere spielt der Tonanteil eine entscheidende Rolle (SKEMPTON, 1964). Übersteigt der Anteil an Tonmineralien 50%, so ist die Scherfestigkeit im Wesentlichen eine Funktion der Tonmineralart. Ist der Tonmineralgehalt jedoch kleiner als 20 %, so wird das Scherverhalten der Probe durch die Sand- und Siltpartikel kontrolliert (SKEMPTON, 1985). In diesem Fall stellten LUPINI ET AL. (1981) ein turbulentes Verhalten der Tonpartikel und hohe Reibungswinkel fest, währenddem sich bei höherem Tonmineralgehalt die Reorientierung und flächige Einregelung der Tonmineralplättchen während des Schervorganges in einer Verminderung des Scherwiderstandes auswirkte. SONDEREGGER (1985a) stellte bei Ca-Kaolinit und Montmorillonit, denen bis zu 30 Trockengewichts-% Quarz beigemischt wurde, nur eine relativ kleine Erhöhung der Scherfestigkeit fest. Demgegenüber zeigten geringe Beimengungen von Tonmineralien zu Quarz bereits einen deutlichen Einfluss auf die Scherfestigkeit in Form einer Erniedrigung.

2) Die *Korngrösse* hat auf die Restscherfestigkeit von Quarz keinen Einfluss. Das andere bodenmechanische Verhalten der Tonmineralien (bez. Plastizität und Schereigenschaften) liegt also nicht primär in der Korngrösse,

sondern in der Schichtstruktur und den Ladungsverhältnissen ihrer Oberfläche (MÜLLER-VONMOOS & LØKEN, 1988).

3) Das *Scherverhalten der Tone* wird vor allem von der Anisotropie (d.h. dem Verhältnis Teilchendurchmesser/Teilchendicke), den Gegenionen und der innerkristallinen Quellung bestimmt (MÜLLER-VONMOOS ET AL., 1985; MÜLLER-VONMOOS & LØKEN, 1988): Bei Illit, dem häufigsten Tonmineral im Gipskeuper (vgl. Kapitel 3.2.2), mit seinen dünnen, plättchenförmigen und hochgeladenen Teilchen, hängt die Restscherfestigkeit stark von den Gegenionen ab. Das Scherverhalten der Smectite und Wechsellagerungen mit innerkristallin quellfähigen Schichten wird weitgehend durch den Zusammenhalt der Schichten bestimmt. Mit steigender Schichtladung und steigender Wertigkeit der austauschbaren Kationen nimmt die Scherfestigkeit zu (SONDEREGGER, 1985a).

Tabelle 3.5 Einfluss der Korngrösse und der Mineralzusammensetzung auf die Restscherfestigkeit. Referenzen: 1) KENNEY (1967); 2) MÜLLER-VONMOOS ET AL. (1985); 3) SONDEREGGER (1985a)

Material	Korngrösse µm	Restscherfestigkeit φ _r	Referenz
Quarz gebrochen	60-2	34.6	1)
Quarz gebrochen	<2	35.0	1)
SiO ₂ -Flugasche	0.5-0.01	29.3	1)
Na-Illit	<2	13.5	2)
Ca-Illit	<2	24.0	2)
Na-Montmorillonit	<2	04.0	2)
Ca-Montmorillonit	<2	07.5	2)
Al-Montmorillonit	<2	12.0	2)
Th-Montmorillonit	<2	14.0	2)
Ca-Kaolinit 30% Quarz	<2	20.3	3)
Ca-Kaolinit 50% Quarz	<2	23.8	3)
Ca-Kaolinit 70% Quarz	<2	33.7	3)
Ca-Montm. 30% Quarz	<2	13.5	3)
Ca-Montm. 50% Quarz	<2	16.2	3)
Ca-Montm. 70% Quarz	<2	26.1	3)

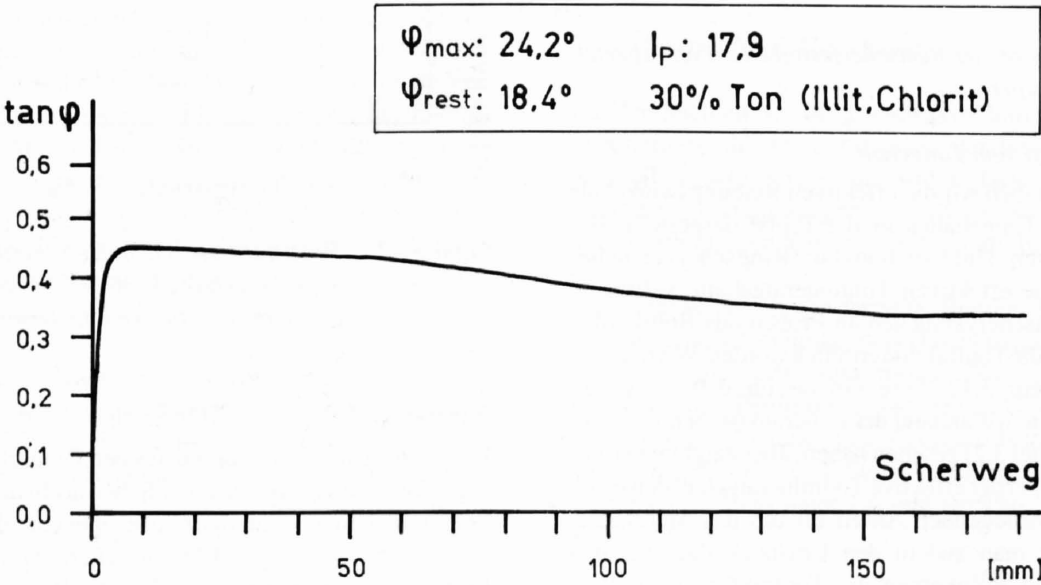
3.3.4.2 Scherversuche im verwitterten Gipskeuper

Im Rahmen der bodenmechanischen Untersuchungen an Sedimenten des verwitterten Gipskeupers konnten wir an einigen Proben im Labor auch die Scherfestigkeiten bestimmen. Dabei wurden gestörte Proben aus dem verwitterten Gipskeuper im GEONOR-Ringscherapparat des IGB-ETH unter drainierten Bedingungen mit unbeschränktem Scher-

Tabelle 3.6 Resultate der Scherversuche im verwitterten Gipskeuper.

Methode	Intern-Nr.	Verwitterungsstufe	ϕ'_{\max} Grad	ϕ'_{\min} Grad	I_p	TM %	<0.002 mm %	Tonminerale
DS	U 59.2/17	W3	39.7	29.2	20.1	-	22.5	-
DS	U 59.4/7	W4	23.3	20.0	15.6	-	22.7	-
DS	U 59.4/12	W3	21.5	19.7	16.4	-	17.7	-
DS	U 59.4/20	W2	28.2	27.1	13.0	-	20.2	-
DS	U 59.5/6	W4	41.1	28.9	11.1	-	13.5	-
DS	U 59.5/11	W3	31.0	17.2	20.7	-	13.4	-
DS	U 59.5/13	W3	36.3	25.8	17.4	-	16.0	-
DS	U 59.5/17	W2	36.5	24.2	15.6	-	17.3	-
DS	U 59.7/7	W3	36.1	27.7	15.2	-	14.6	-
DS	U 59.7/10	W3	29.0	18.1	19.4	-	18.7	-
DS	U 59.7/12	W2	19.8	15.3	23.9	-	23.8	-
RS	266	W2	25.0	22.1	15.3	28	16.7	I, C, V
RS	268	W2	24.2	18.4	17.9	30	17.2	I, C
RS	272	W2	24.8	23.5	14.2	22	5.8	I, C
RS	625	W3	30.2	27.9	18.6	31	9.1	I, C, V
RS	962	W4	27.7	24.0	12.6	-	7.2	-

- ϕ'_{\max} eff. Reibungswinkel bei max. Scherfestigkeit
- ϕ'_{\min} eff. Reibungswinkel bei Restscherfestigkeit
- TM Gehalt an Tonmineralien; I: Illit, C: Chlorit, V: Vermiculit
- DS Direktscher-Versuch (Scherbox)
- RS Ringscher-Versuch
- I_p Plastizitätszahl



Figur 3.11 Scherkurve einer Probe aus dem verwitterten Gipskeuper (W2). Tonmineralgehalt 30% (Illit:Chlorit=85:15).

weg abgeschert. Die Versuchsanordnung und die experimentellen Randbedingungen sind in SONDEREGGER (1985a) beschrieben. Ausserdem standen uns Resultate von Direktscherversuchen an Proben aus Kernbohrungen im verwitterten Gipskeuper von Ennetbaden zur Verfügung. Alle Resultate sind in Tabelle 3.6 zusammengestellt. Einen typischen Verlauf der Scherkurve im Ringscherversuch einer Probe aus dem verwitterten Gipskeuper gibt Figur 3.11 wieder.

Die Scherkurven der Ringscherversuche entsprechen dem Typ A) in SONDEREGGER (1985b), der für Kaolinit- und Illit-Proben typisch ist. Tatsächlich ist ja in den untersuchten Gipskeuper-Proben Illit auch das vorherrschende Tonmineral (vgl. Kap. 3.2.2.3). Bezüglich der Teilchenbewegung während des Schervorganges in diesem Typ A) stellte Sonderegger in Strukturaufnahmen fest, dass eine Entregelung der Tonpartikel während des Abscherens stattfindet, dass also die Partikel während der Deformation rotieren. Die Scherebene hätte dementsprechend die Partikel zu „umfliessen“. Gemäss dieser Autorin entspricht der konstante Verlauf der Scherkurve nach dem Bruch einem konstanten Reibungswiderstand an einer oder mehreren Scherflächen.

Eine Einregelung der Tonteilchen in der Scherebene würde demgegenüber die Ausbildung einer diskreten Scherebene fördern. Daraus würde ein starker Abfall der Scherfestigkeit zur Restscherfestigkeit resultieren durch interkristallines Korngleiten (SONDEREGGER, 1985b) oder Elementarschichtgleiten (MÜLLER-VONMOOS ET AL., 1985).

In den untersuchten Proben aus dem verwitterten Gipskeuper können Restscherfestigkeiten nachgewiesen werden, die einem Winkel der inneren Reibung $\phi'_r < 20^\circ$ entsprechen. Diese niedrigen Reibungswinkel erklären, weshalb Jura-hänge, deren Unterlage der verwitterte Gipskeuper bildet, oft verrutscht sind.

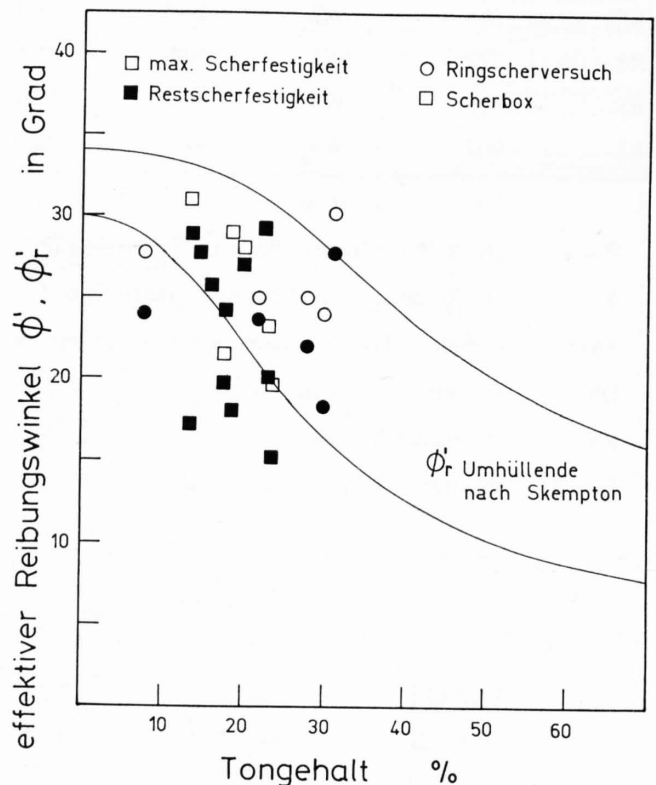
3.3.4.3 Diskussion der Restscherfestigkeit im verwitterten Gipskeuper

a) Abhängigkeit vom Tongehalt

In Figur 3.12 haben wir die effektiven Reibungswinkel als Funktion des Tongehaltes in der Probe dargestellt. Bei unseren eigenen Untersuchungen (Ringscherversuche) konnten wir die effektiven Tonmineralgehalte auftragen. Bei den Direktscherversuchen an Proben aus Bohrkernen war jedoch nur die Tonfraktion ermittelt worden. Wir mussten deshalb in Figur 3.12 diese Grösse für den Tongehalt verwenden. Wie wir anhand der mineralogischen Untersuchungen (Kapitel 3.2) gesehen haben, übersteigt im verwitterten Gipskeuper der effektive Tonmineralgehalt den in der Tonfraktion vorliegenden Anteil oft um das Mehrfache. Berücksichtigt man zudem den Umstand, dass bei den Proben aus den Bohrkernen die Tonfraktion vermutlich durch den Bohrvorgang erhöht wurde, so können diese

Gewichtsanteile als minimale Tongehalte angesehen werden. Könnte bei diesen Proben der effektive Gehalt an Tonmineralien aufgetragen werden, so würden die Datenpunkte - insbesondere die z.T. niedrigen Reibungswinkel der Restscherfestigkeit - auf diesem Diagramm nach rechts in Richtung höherer Tongehalte verschoben. Somit fügen sich unsere Resultate gut in die generelle Beziehung von SKEMPTON (1964) ein: Mit zunehmendem Tongehalt vermindert sich die Restscherfestigkeit des Bodens.

Darüber hinaus machen die Resultate jedoch deutlich, dass bei dieser sehr generellen Beziehung nicht die Tonfraktion, d.h. nicht der Anteil der Körner in der kleinsten Korngrösse, sondern der effektive Gehalt an Tonmineralien von Bedeutung ist. Nur aufgrund des Anteils der Tonfraktion, d.h. nach der Erfassung einer einfachen Korngrössenverteilung, lässt sich in den Sedimenten des verwitterten Gipskeupers demnach keine eindeutige Aussage über die Höhe der Restscherfestigkeit machen.



Figur 3.12 Beziehung zwischen der Scherfestigkeit und dem Tongehalt (Tonfraktion) in den Proben aus dem verwitterten Gipskeuper.

b) Abhängigkeit von der Mineralogie

Die Analyse der Scherkurven aus den Ringscherversuchen (vgl. Figur 3.11) zeigt, dass der Schermechanismus bei den Proben aus dem verwitterten Gipskeuper vornehmlich durch das Scherverhalten des Illits gesteuert wird. Bei keiner Probe wurde ein massiver Abfall der Restscherfestigkeit gegenüber der maximalen Scherfestigkeit festgestellt. Aus-

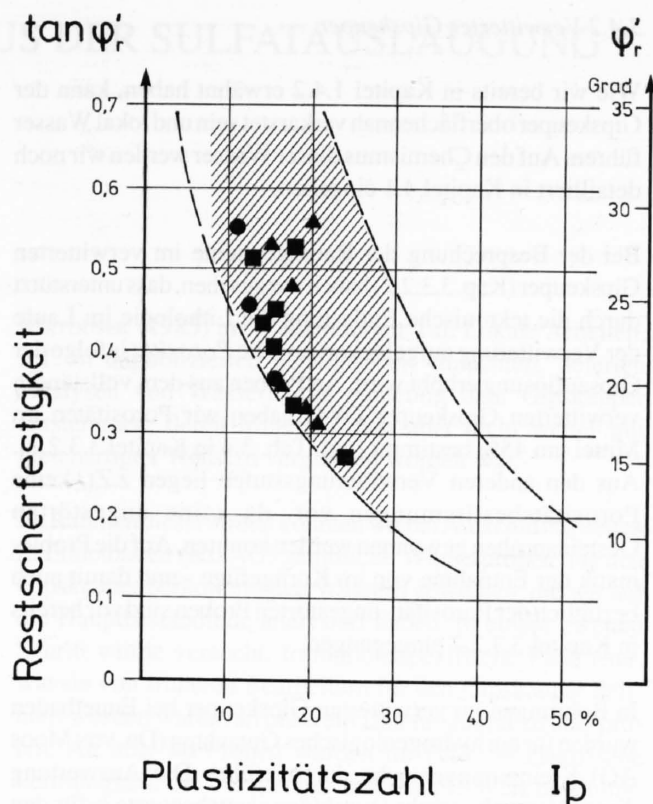
serdem konnten bei den Ringscherproben nach dem Ausbau keine schönen, diskreten Scherflächen beobachtet werden, wie sie aufgrund einer Einregelung von Tonteilchen erwartet würden. Auch dies spricht für den Schermechanismus der illitischen Proben.

In Kapitel 3.3.3.2 haben wir dargelegt, dass hohe Plastizitätszahlen I_p mit dem Auftreten von smectitischen, bzw. quellfähigen Tonmineralien verknüpft sein können. Diese Tone können jedoch auch für niedrige Restscherfestigkeiten verantwortlich sein (vgl. Tabelle 3.5).

Die Abhängigkeit der Restscherfestigkeit von der Plastizität in der Form, wie dies BUCHER (1975) postulierte, ist umstritten. MÜLLER-VONMOOS ET AL. (1985) beobachteten bei Illit mit steigender Plastizitätszahl I_p eine Zunahme, bei Montmorillonit jedoch eine Abnahme der Restscherfestigkeit. Berücksichtigt man nun den Umstand, dass in tonigen Böden der Schweiz die Tonminerale zumeist in der Calcium- und Magnesiumform vorliegen, so ist eine Abnahme der Restscherfestigkeit gemäss diesen Autoren auf Montmorillonit bzw. Wechsellagerungen mit smectitischen Schichten zurückzuführen. Zumindest könnte in den Böden des verwitterten Gipskeupers eine Zunahme des Smectit-Anteils (bzw. des Anteils an Corrensit-ähnlichen, quellfähigen Tonmineralen) die Restscherfestigkeit der Gesamtprobe erniedrigen. Wir haben deshalb die Resultate aus dem Gipskeuper auch in einem Diagramm ϕ'_r vs. Plastizitätszahl I_p dargestellt (Fig. 3.13). Wie wir eingangs dieses Kapitels dargelegt haben, ist zu berücksichtigen, dass als Folge der Homogenisierung bei der Probenaufbereitung eher zu hohe Restscherfestigkeiten gemessen werden.

Aus Figur 3.13 geht hervor, dass keine direkte Abhängigkeit der Restscherfestigkeit von der Verwitterungsstufe besteht. Selbst wenig verwitterte Proben weisen einerseits hohe, zuweilen jedoch auch sehr niedrige Restscherfestigkeiten auf. Ausserdem ist zu sehen, dass sich die gemessenen Restscherfestigkeiten gut in den von BUCHER (1975) empirisch definierten Bereich einfügen. Zumindest für die Sedimente des verwitterten Gipskeupers scheint eine Zunahme der Plastizitätszahl mit einer Verminderung der Restscherfestigkeit einherzugehen: Die Ursache für beide Veränderungen dürfte in unterschiedlichen Anteilen quellfähiger Tonminerale liegen. Für die angewandte Geologie scheint uns wichtig, dass mit diesem Diagramm die Tendenz zu niedrigen Restscherwinkeln erkannt werden kann; absolute Werte lassen sich jedoch für diese Böden nicht aus Tabellen ablesen, sondern müssen durch gezielte Laboruntersuchungen im Einzelfall verifiziert werden.

Bei praxisorientierten geologischen Untersuchungen im Gipskeuper erlaubt die relativ einfache und kostengünstige Laboruntersuchung der Konsistenzgrenzen die für die Stabilität kritischen Bereiche einzugrenzen. Dadurch können Proben für die zeitaufwendigen und kostenintensiven Scherversuche gezielt ausgewählt werden.



VERWITTERUNGSSTUFE

- W1-W2
 - ▲ W3
 - W4
- Restscherfestigkeit - Plastizitäts-Bereich (nach Bucher, 1975)
- Plastizitätsbereich des Gipskeupers

Figur 3.13 Beziehung zwischen der Restscherfestigkeit und der Plastizität in den Proben aus dem verwitterten Gipskeuper.

3.4 Zur Durchlässigkeit des Gipskeupers

3.4.1 Unverwitterter Gipskeuper

Im Vergleich zu den oft grundwasserführenden quartären Schottern ist die *Durchlässigkeit* der tonigen Evaporite generell als sehr gering einzustufen. Deshalb werden die Sedimente des Gipskeupers normalerweise - z.B. auch auf hydrogeologischen Karten - als Aquitard bezeichnet.

Aus Abpressversuchen in der NOK-Bohrung Beznau wurden für den Bereich des Gipskeupers Durchlässigkeiten zwischen 7×10^{-8} m/s und 2×10^{-7} m/s errechnet (NAGRA, 1984). Labor-messungen der Permeabilität ergaben an Gipskeuperproben aus den Nagra-Bohrungen im Maximum 3×10^{-8} m/s (NAGRA, 1988). Die *offene Porosität* dieser Proben lag bei anhydritischen Gesteinen meistens unter 1% und erreichte in Tonmergeln maximal 8%.

3.4.2 Verwitterter Gipskeuper

Wie wir bereits in Kapitel 1.4.2 erwähnt haben, kann der Gipskeuper oberflächennah verkarstet sein und lokal Wasser führen. Auf den Chemismus dieser Wässer werden wir noch detailliert in Kapitel 4.1 eingehen.

Bei der Besprechung der Raumgewichte im verwitterten Gipskeuper (Kap. 3.3.2.2) haben wir gesehen, dass unterstützt durch die tektonische Entlastung die Lithologie im Laufe der Verwitterung aufgelockert und die Porosität infolge der Gipsauflösung erhöht wird. An Proben aus dem vollständig verwitterten Gipskeuper (W4) haben wir Porositäten im Mittel um 45% bestimmt (vgl. Tab. 3.4 in Kapitel 3.3.2.2). Aus den anderen Verwitterungsstufen liegen z.Zt. keine Porositätsbestimmungen vor, da keine ungestörten Gesteinsproben gewonnen werden konnten. Auf die Problematik der Entnahme von im Korngefüge - und damit auch bezüglich der Porosität - ungestörten Proben sind wir bereits in Kapitel 3.3.2.2 eingegangen.

In Bohrungen im verwitterten Gipskeuper bei Ennetbaden wurden für ein hydrogeologisches Gutachten (DR. VON MOOS AG) Kleinpumpversuche durchgeführt. Die Auswertung dieser Versuche ergibt *Durchlässigkeitsbeiwerte* k_f für den

verwitterten Gipskeuper um 10^{-7} m/s. Von einer permeablen Schicht des Gipskeupers (mergeliger, brecciöser Sandstein), in der während des Bohrens bereits ein totaler Bohrwasser- verlust festgestellt worden war, wird in diesem Gutachten von einem maximalen Durchlässigkeitsbeiwert in der Größenordnung von 10^{-5} m/s berichtet.

Unsere geologischen Feldbeobachtungen haben gezeigt, dass im verwitterten Gipskeuper dolomitische Lagen bevorzugt zerbrochen, verkarstet und zu einem Feinsand aus Dolomitgrus umgewandelt werden; damit einher geht eine Erhöhung der Permeabilität. Oft erweisen sie sich deshalb als lokal wasserführende Schichten (vgl. auch Kapitel 2.4.1). Zudem ist anzunehmen, dass nach der Auslaugung gipsführender Lagen - trotz einer teilweisen Konsolidation - im Lockergestein des verwitterten Gipskeupers bezüglich der Durchlässigkeit anisotropische Verhältnisse vorliegen. So dürften sich feine Unterschiede in den Gipslagen bez. der Mächtigkeit und/oder dem Grad der Verunreinigungen später im Residuum in im Detail differenzierten Permeabilitäten auswirken. Die Durchlässigkeit der Gipskeuper-Lithologie ist demnach - auch wenn sie verwittert ist - als recht heterogen einzustufen. Meist ist sie gering. Sie kann jedoch durch Verkarstung und/oder Zerkleinerung von Dolomitlagen lokal auch wesentlich erhöht sein.

4 MINERALISIERTE WÄSSER AUS DER SULFATAUSLAUGUNG

4.1 Hydrochemie der Gipskeuper-Wässer

4.1.1 Einleitung

Eine geohydrochemische Typisierung der Grundwässer nach ihren Inhaltsstoffen ist in zweierlei Hinsicht interessant: Zum einen lassen sich bei bekannter geologischer Herkunft einer Wasserprobe Aussagen über die geochemische Zusammensetzung des durchflossenen Gesteins machen. Zum anderen können die Analysen aus Quellen und Grundwässern, sofern sie formationsspezifische Inhaltsstoffe enthalten, Hinweise geben auf die Herkunft des Wassers oder zumindest von einzelnen Mischungsanteilen. Bei der Auslaugung verkarstungsfähiger Gesteine durch perkolierende Wässer entstehen charakteristische Grundwässer, deren chemische Zusammensetzung stark von der durchflossenen Gesteinsserie geprägt ist. Art und Gehalt der gelösten Stoffe hängt dabei vom spezifischen Angebot in der verkarstungsfähigen Formation ab.

In der Hydrogeologie werden die Wässer üblicherweise nach den relativen Konzentrationen (mval% bzw. c(eq)%) klassiert (vgl. JÄCKLI, 1970). Die prozentualen Äquivalentkonzentrationen werden für Kationen und Anionen separat ermittelt. Für die Klassifikation werden nur Komponenten erwähnt, deren relative Konzentration 10 mval% übersteigt; Ionen mit mehr als 50 mval% werden dabei unterstrichen, mit weniger als 20 mval% in Klammern gesetzt.

Eine Klassifizierung und Typisierung der oberflächennahen wie auch der tieferen Grundwässer der Nordschweiz erfolgte unlängst durch SCHMASSMANN et al. (1984), der den *Sulfatwässern* des Keupers und des Mittleren Muschelkalk einen eigenen Wassertyp zuordnete. Die Wässer dieser Gruppe (Typ III) sind bezüglich ihrer hauptsächlichen Ionen wie folgt charakterisiert:

$\text{Na}^+ < 20 \text{ mval\%}$, $\text{HCO}_3^- < 20 \text{ mval\%}$, $\text{Cl}^- < 50 \text{ mval\%}$, $\text{SO}_4^{2-} > 50 \text{ mval\%}$.

Daraus ergeben sich zumeist Wassertypen entsprechend der Klassifikation wie $\text{Ca-Mg-SO}_4\text{-(HCO}_3\text{)}$ und $\text{Ca-(Mg)-SO}_4\text{-(HCO}_3\text{)}$. Nach der Beurteilung der Hauptbestandteile gehören zu diesem Wassertyp ausserdem Wässer des Oberen Muschelkalk, die unter dem Einfluss des Gipskeupers oder des Mittleren Muschelkalk stehen (SCHMASSMANN et al., 1984:170). Auch in regionalen Arbeiten wurden im Jura Gipskeuper-Wässer beobachtet und charakterisiert, z.B. von HÖHN (1979) im Gebiet westlich von Frick und von

MATOUSEK (1985) im Waldenburger Tal. Lokale Arbeiten, z.T. in unpublizierten geologischen Gutachten, lieferten Analysen von Wässern, die eindeutig dem Gipskeuper entstammen, deren Mineralisation aber nicht weiter mit gleichartigen Wässern verglichen worden war.

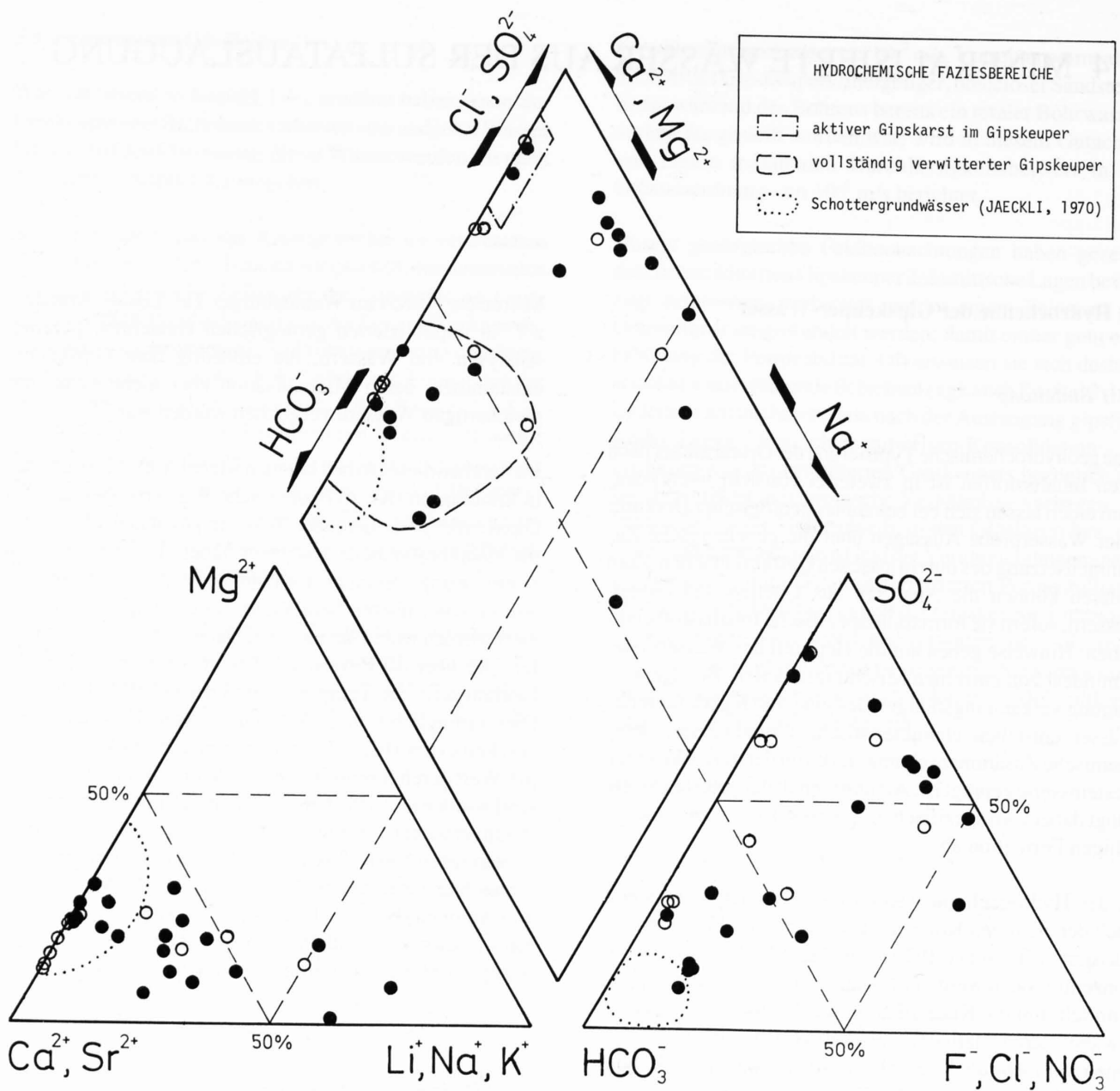
Im Rahmen dieser Arbeit konnten wir bei Aufschlussarbeiten in Ennetbaden (Kt. AG) zahlreiche Wasserproben aus den Gipskeuper perkolierenden Wässern gewinnen, die wir auf die Hauptbestandteile analysiert haben. In einem zweiten Schritt wurde versucht, formationsspezifische Parameter, wie sie von früheren Bearbeitern für den Gipskeuper definiert worden waren, an unserem Datenmaterial zu überprüfen. An über 40 Proben wurden im Feld die elektrische Leitfähigkeit, die Temperatur und der pH-Wert bestimmt. Dies ermöglichte eine Abtrennung von durch die Bautätigkeit extrem beeinflussten Proben (z.B. stark alkalischer pH-Wert durch Beimischung von Betonwasser). Anschliessend wurden an 18 Proben, zu denen sich noch 4 Proben aus Pumpversuchen in Ennetbaden und 2 Proben aus dem stratigraphischen Referenzprofil Riepel gesellten, im Labor die wichtigsten Kationen (Li^+ , Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Sr^{2+}) und Anionen (F^- , Cl^- , J^- , SO_4^{2-} , NO_3^- , HCO_3^-) sowie Gesamt-, Karbonat- und Permanente Härte bestimmt. Die Analysen-Methodik wird im Anhang beschrieben.

4.1.2 Hydrochemische Klassifikation

4.1.2.1 Resultate sämtlicher Verwitterungsstufen

Die im Rahmen dieser Arbeit analysierten Wasserproben aus unterschiedlichen Verwitterungsstufen des Gipskeupers sollen im folgenden hydrochemisch klassiert und mit den verfügbaren Literaturdaten verglichen werden.

Aufgrund der hydrochemischen Klassifikation nach Hauptbestandteilen gehören die meisten der untersuchten Wässer in die Gruppe der typischen Gipskeuper-Wässer nach SCHMASSMANN et al. (1984). In unseren Proben sind die Typen $\text{Ca-Mg-SO}_4\text{-(HCO}_3\text{)}$ und $\text{Ca-(Mg)-SO}_4\text{-(HCO}_3\text{)}$ häufig vertreten. Auch die von MATOUSEK (1985) im Waldenburger Tal (Baselbieter Jura) und von HÖHN (1979) im Gebiet westlich von Frick untersuchten Gipskeuper-Wässer gehören zu diesen beiden Grundwassertypen. Daneben hat - insbesondere im vollständig verwitterten Gipskeuper - auch der sulfatarme Typus $\text{Ca-Mg-HCO}_3\text{-(SO}_4\text{)}$ eine gewisse Bedeutung.



Figur 4.1 Ionenkonzentrationen der untersuchten Wässer aus dem Gipskeuper unterschiedlicher Verwitterungsstufe. Darstellung im kombinierten Dreiecksdiagramm nach PIPER in mval% (ausgefüllte Punkte bedeuten eigene Analyse).

Die Beziehung unter den Kationen und Anionen ist im kombinierten Dreiecksdiagramm nach PIPER gut ersichtlich (Fig. 4.1). Hier haben wir die relativen Ionenkonzentrationen (mval%) der analysierten Gipskeuper-Wässer eingetragen. Dabei fällt auf, dass sich die Wässer in 3 Gruppen gliedern lassen:

- Normalerdalkalische, hydrogenkarbonatische Süßwässer
- Normalerdalkalisch-sulfatische Wässer
- Erdalkalisch-sulfatische Wässer mit höherem Alkaligehalt

Bei Gruppe a) handelt es sich vornehmlich um Wässer, die im total verwitterten Gipskeuper (W3-W4) perkolieren. Da in dieser Verwitterungsstufe der Gips praktisch vollständig ausgelaugt ist, zeigen diese Wässer einen entsprechend kleinen Sulfatgehalt. Sie zeichnen sich ausserdem durch markant kleinere elektrische Leitfähigkeiten aus (um 500 mS/cm bei 20 °C), als die Wässer der anderen beiden

Gruppen (>1000 mS/cm bei 20 °C). In der Kationen-Zusammensetzung unterscheiden sie sich jedoch nicht wesentlich von den Wässern aus dem unverwitterten bzw. angewitterten Gipskeuper.

Gruppe b) entspricht dabei den typischen Gipskeuper-Wässern in SCHMASSMANN et al. (1984). Die Wässer dieser Gruppe entstammen dem unverwitterten bis angewitterten Gipskeuper (W0-W1). Wie wir bei der Besprechung des Verwitterungsprofils im Gipskeuper gesehen haben (vgl. Kap. 3.2.3), ist in diesen Verwitterungsstufen der Gips noch präsent. Er kann demnach von perkolierenden Wässern ausgelaugt werden und erscheint in Form hoher Sulfatkonzentrationen in den Wässern wieder. Diese Wässer werden deshalb als Zeugen eines aktiven Gipskarstes angesehen.

Gruppe c) setzt sich von typischen Gipskeuper-Wässern (Gruppe b)) durch erhöhte Alkaligehalte ab. Der Frage, ob es sich bei dieser Gruppe um eine Misch-„Fazies“ handelt, soll im folgenden etwas nachgegangen werden.

Da die Wasserproben in Ennetbaden dem Gipskeuper zwar auf höherem Niveau, jedoch in unmittelbarer geographischer Nähe von Thermalwasseraufstößen entnommen wurden, wäre eine Beeinflussung durch dieses Wasser denkbar. Über den Chemismus und die mögliche Herkunft des *Thermalwassers* wurde schon lange diskutiert und publiziert. Zusammenfassende Arbeiten liegen u.a. vor von HARTMANN (1937, 1943), MÜNZEL (1947), SCHMASSMANN (1980), VUATAZ (1982), NEFF (1984), SCHMASSMANN et al. (1984) und GORHAN & GRIESSER (1988). Wir wollen hier kurz die wichtigsten Merkmale dieses Thermalwasservorkommens in Erinnerung rufen:

- Beidseits der Limmat treten mindestens 19 Quellen auf, wovon 3 am rechten Ufer in Ennetbaden. Auch Wasser-
austritte direkt in die Limmat sind bekannt.
- Die Badener Thermalquellen liefern zusammen durchschnittlich 750 l/min Wasser, das mit einer Temperatur von ungefähr 48 °C artesisch austritt.
- Die erschlossenen Quellen hängen hydraulisch sehr eng zusammen, was auf eindrückliche Weise bei der Wiederherstellung der Schwanenquelle-Fassung im Jahr 1943 illustriert wurde: Aus Unachtsamkeit war die Fassung tiefer gelegt worden, wobei wahrscheinlich der Trigonodolomit des Oberen Muschelkalk angebohrt wurde (HARTMANN 1943:28). Dadurch erhöhte sich der Erguss an der Schwanenquelle um das siebenfache auf 420 l/min, was bei den anderen Quellen sofort in einem dramatischen Rückgang der Ergiebigkeit vermerkt wurde. Ein Schieber an der Schwanenquelle gestattet heute, die Thermalwasser-Entnahme künstlich zu regulieren. Die Pegelablesungen an der am tiefsten gefassten Schwanenquelle in Ennetbaden eignen sich zur Beurteilung des allgemeinen Druckniveaus der Badener Thermalwasserquellen. Dabei ist jedoch zu beachten, dass die Ablesungen bei laufender Quelle erfolgen und somit ein etwas zu tiefes Niveau angezeigt wird. Das Druckniveau schwankt um Kote 359 m.ü.M.
- Hydrochemisch handelt es sich beim Badener Thermalwasser um einen Wassertyp der Zusammensetzung Na-Ca-(Mg)-Cl-SO₄-(HCO₃). Typisch sind auch die gelösten Gase Schwefelwasserstoff (H₂S bis 1.60 mg/l) und Methan (CH₄ bis 0.3 mg/l).
- SCHMASSMANN et al. (1984:289) erklärt das Badener Thermalwasser mit einer Mischung aus einem schwach salinen Muschelkalkwasser zusammen mit aufsteigendem Kohlensäure-Gas und einem salinen Wasser aus einer tieferen Formation, z.B. Bundsandstein-Perm.

Für unsere Arbeit ist von Bedeutung, dass die Gruppe c) unserer Wässer aus dem Gipskeuper von Ennetbaden dem Chemismus des Badener Thermalwassers z.T. sehr ähnlich ist. Aufgrund der Zusammensetzung der Hauptbestandteile könnte man versucht sein, diese Gruppe auch durch eine Mischung von typischen Gipskeuperwässern - Typus Grup-

pe b)- mit Anteilen von aufsteigenden Muschelkalkwässern des Thermalwasser-Typus zu erklären. Deshalb haben wir verschiedene Mischungen berechnet und einige interessante Beispiele in Tabelle 4.1 aufgelistet. Als Thermalwasser diente die Zusammensetzung der Schwanenquelle (Angaben in VUATAZ, 1982), die auf der Ennetbadener Limmatseite nahe unserer Probenahmestellen gefasst ist. Als Gipskeuperwasser verwendeten wir ein Wasser, das in der Grube Riepel den oberen Teil des Gipskeupers perkolierte und als ein von Fremdformationen unbeeinflusstes Gips-Karstwasser gelten darf. In Figur 4.1 gehört dieses Wasser zur Gruppe b) der typischen Gipskeuper-Wässer mit einem normalerdalkalisch-sulfatischen Chemismus. Daneben wurde noch das Bitterwasser Birmo aus dem Gipskeuper von Birmensdorf in die Berechnungen miteinbezogen. Detailliertere chemische Angaben über dieses erdalkalisch-sulfatische Wasser mit erhöhtem Alkaligehalt sind in SCHMASSMANN et al. (1984:245) zu finden.

Die kalkulierten Mischungen aus Anteilen von Badener Thermalwasser und dem Wasser mit typischem Gipskeuper-Chemismus zeigen jedoch auf, dass die Mineralisation allein durch diese Mischung nicht erklärt werden kann. Im Vergleich mit den berechneten Daten liegen die Analysenwerte für Calcium und Magnesium gegenüber den Erdalkali-Werten viel zu tief. Beimischung eines Wassers des Typus Birmo, das in den Evaporiten enthaltene Bittersalzlagen ausgelaugt hätte, ergibt zwar eine Korrektur in diese Richtung. Die relative Zusammensetzung der Äquivalentkonzentrationen lässt sich damit erklären. Eine befriedigende Übereinstimmung der absoluten Konzentrationen ist jedoch durch einfache Mischungen nicht erreichbar. Für die verbleibenden „Diskrepanzen“ könnten einerseits Austauschvorgänge an den Tonmineralien und andererseits Verdünnungseffekte durch meteorisches Wasser verantwortlich sein.

4.1.2.2 Gipskarst-Wässer aus den Triassischen Evaporiten

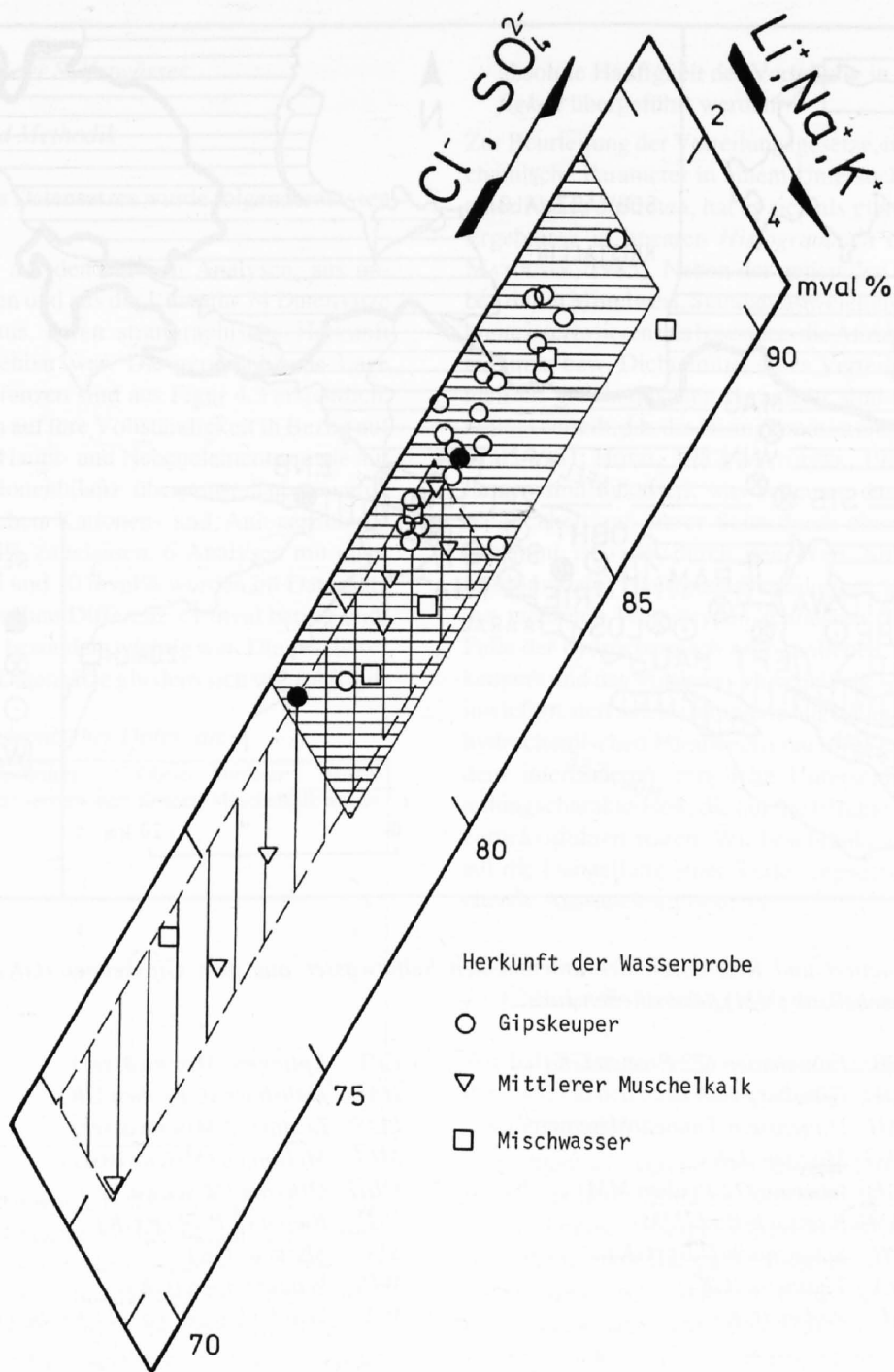
Die Gruppe b) der normalerdalkalisch-sulfatischen Wässer aus dem Gipskeuper haben wir als Ausschnitt des Piper-Diagrammes (vgl. Fig. 4.1) in Figur 4.2 vergrößert dargestellt. In diese Graphik wurden auch alle verfügbaren Daten aus der Literatur über den Gipskeuper und den Mittleren Muschelkalk integriert (Referenz-Nachweis siehe Figur 4.3). Auf dieser Darstellung wird ersichtlich, dass sich die Bereiche der hydrochemischen Fazies des Gipskeupers und des Mittleren Muschelkalk stark überlappen. Sie bilden demnach aufgrund der Hauptbestandteile eine hydrochemisch eng verwandte Gruppe. Anhand der gesammelten hydrochemischen Daten aus dem Gipskeuper unterschiedlichen Verwitterungsgrades und den Literaturdaten aus dem Mittleren Muschelkalk soll nun im weiteren versucht werden, die Merkmale dieser Gruppe der Sulfatwässer näher zu charakterisieren. Dabei interessiert uns auch, inwiefern sich die Wässer aus der Formation des Gipskeupers von solchen aus dem Mittleren Muschelkalk unterscheiden. Wir wollen

dies anhand einer statistischen Datenauswertung der uns zur Verfügung stehenden Analysendaten aus Grundwässern und Quellen darlegen.

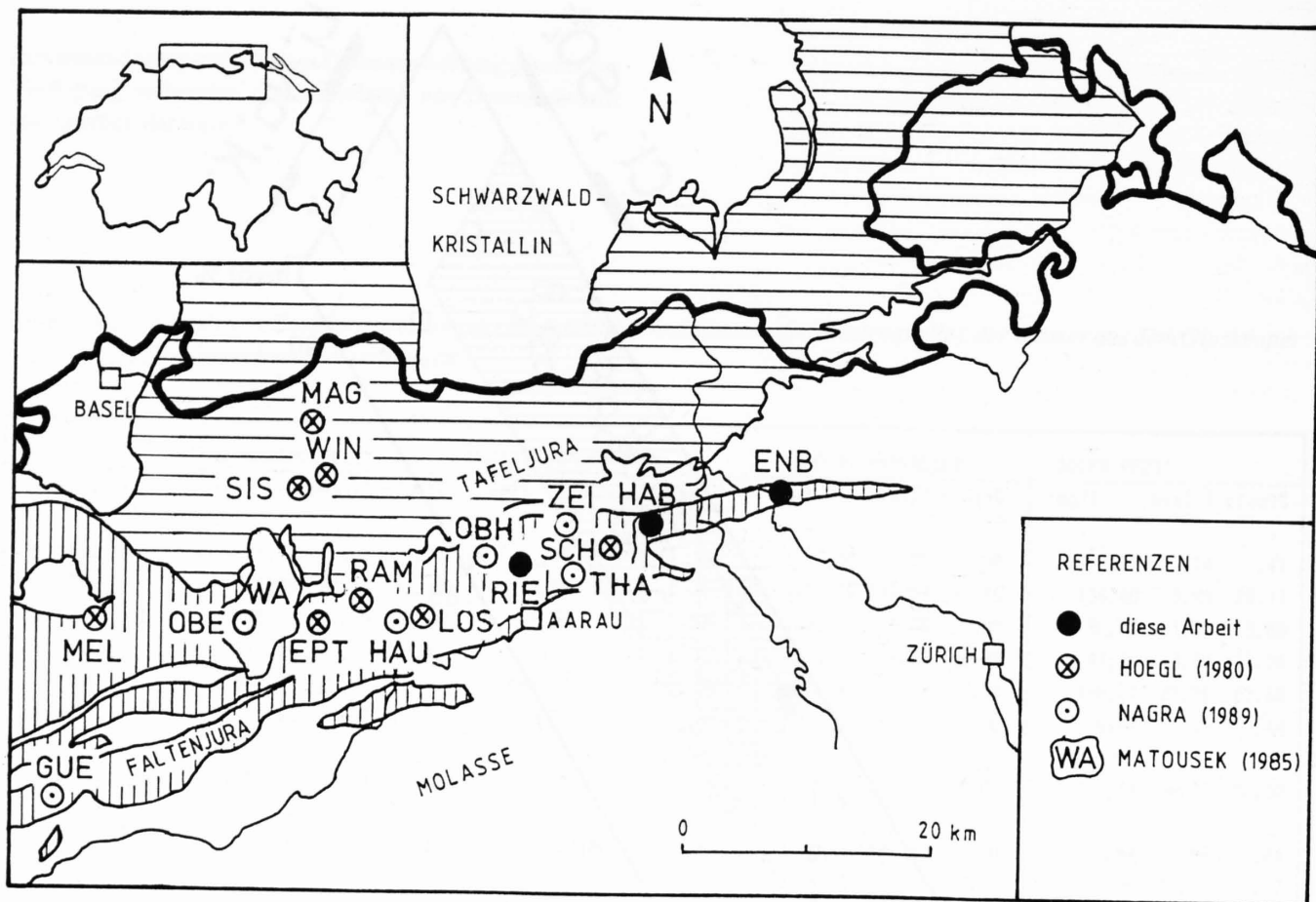
Tabelle 4.1 Chemische Zusammensetzung des Badener Thermalwassers (Schwanenquelle), der Wässer aus dem Gipskeuper und berechneter Mischungen.

Parameter	SCHWANENQUELLE			GIPSKEUPER RIEPEL			BIRMO BITTERWASSER			ADLER PF23		
	mg/l	mval/l	c(eq)%	mg/l	mval/l	c(eq)%	mg/l	mval/l	c(eq)%	mg/l	mval/l	c(eq)%
Lithium	4,72	,68	,91	,07	,01	,03	,00	,00	,00	,97	,14	,41
Natrium	754,99	32,84	43,97	3,22	,14	,44	3910,27	170,09	32,26	158,40	6,89	20,13
Kalium	68,82	1,76	2,36	1,96	,05	,16	190,90	4,88	,93	50,83	1,30	3,80
Magnesium	113,05	9,30	12,45	86,31	7,10	22,31	4030,08	331,53	62,87	47,29	3,89	11,36
Calcium	600,00	29,94	40,09	485,97	24,25	76,19	416,83	20,80	3,94	438,07	21,86	63,86
Strontium	7,45	,17	,23	12,27	,28	,88	,00	,00	,00	6,57	,15	,44
Total Kationen	1549,02	74,69	100,00	589,79	31,83	100,00	8548,07	527,30	100,00	702,14	34,23	100,00
Fluorid	2,85	,15	,21	3,23	,17	,53	,00	,00	,00	1,52	,08	,24
Chlorid	1124,92	31,73	43,88	1,42	,04	,12	582,24	16,42	3,11	380,06	10,72	32,07
Sulfat	1549,96	32,27	44,63	1199,81	24,98	77,60	24192,64	503,69	95,52	950,05	19,78	59,17
Hydrogenkarbonat	497,90	8,16	11,28	427,12	7,00	21,75	438,59	7,19	1,36	173,90	2,85	8,53
Total Anionen	3175,63	72,31	100,00	1631,58	32,19	100,00	25213,47	527,30	100,00	1505,53	33,43	100,00

MISCHUNGEN	(Schwanenquelle-%/Riepel-%/Birmo-%)											
	(24/75/01)			(25/70/05)			(25/75/00)			(50/50/00)		
	mg/l	mval/l	c(eq)%	mg/l	mval/l	c(eq)%	mg/l	mval/l	c(eq)%	mg/l	mval/l	c(eq)%
Lithium	1,18	,17	,36	1,23	,18	,26	1,23	,18	,42	2,39	,35	,65
Natrium	222,71	9,69	20,58	386,51	16,81	24,97	191,16	8,32	19,54	379,10	16,49	30,96
Kalium	19,89	,51	1,08	28,12	,72	1,07	18,67	,48	1,12	35,39	,91	1,70
Magnesium	132,16	10,87	23,10	290,18	23,87	35,46	92,99	7,65	17,98	99,68	8,20	15,40
Calcium	512,65	25,58	54,35	511,02	25,50	37,88	514,48	25,67	60,34	542,98	27,10	50,87
Strontium	10,99	,25	,53	10,45	,24	,35	11,06	,25	,59	9,86	,23	,42
Total Kationen	899,59	47,07	100,00	1227,51	67,32	100,00	829,60	42,55	100,00	1069,40	53,26	100,00
Fluorid	3,11	,16	,35	2,97	,16	,23	3,13	,17	,39	3,04	,16	,31
Chlorid	276,87	7,81	16,70	311,34	8,78	13,11	282,29	7,96	18,86	563,17	15,89	30,40
Sulfat	1513,78	31,52	67,39	2436,99	50,74	75,76	1287,35	26,80	63,48	1374,89	28,63	54,78
Hydrogenkarbonat	444,22	7,28	15,57	445,39	7,30	10,90	444,81	7,29	17,27	462,51	7,58	14,51
Total Anionen	2237,97	46,77	100,00	3196,69	66,98	100,00	2017,59	42,22	100,00	2403,61	52,25	100,00



Figur 4.2 Ausschnitt aus dem Piper-Diagramm (Fig. 4.1): Ionenbeziehung der Triassischen Sulfatwässer. Unterschiedlich schraffiert sind die hydrochemischen Faziesbereiche des Gipskeupers (waagrecht) und des Mittleren Muschelkalk (senkrecht).



Figur 4.3 Situation und Referenzen der untersuchten Sulfatwässer aus dem Gipskeuper (GK) und dem Mittleren Muschelkalk (MM) des östlichen Jura.

ENB	Ennetbaden (22 Proben GK)	EPT	Eptingen (Mischwasser)
GUE	Günsberg (GK)	HAB	Habsburg (6 Proben GK)
HAU	Hauenstein-Tunnel (Mischw.)	LOS	Lostorf (2 Mischwässer)
MAG	Magden (GK)	MEL	Meltingen (Mischwasser)
OBE	Oberdorf (2 Proben MM)	OBH	Oberhof (Mischwasser)
RAM	Ramsach-Bad (MM)	RIE	Riepel (2 Proben GK)
SCH	Schinznach-Dorf (GK)	SIS	Sissach (GK)
THA	Thalheim (GK)	WIN	Wintersingen (GK)
ZEI	Zeihen (GK)	WA	Waldenburger Tal (11 Proben GK, 5 Proben MM)

4.1.3 Charakteristika der Sulfatwässer

4.1.3.1 Datensatz und Methodik

Bei der Erstellung des Datensatzes wurde folgendermassen vorgegangen:

Vorerst wählten wir aus den eigenen Analysen, aus unpublizierten Gutachten und aus der Literatur 74 Datensätze von Sulfatwässern aus, deren stratigraphische Herkunft eindeutig nachvollziehbar war. Die geographische Lage und die Literaturreferenzen sind aus Figur 4.3 ersichtlich. Die Analysen wurden auf ihre Vollständigkeit in Bezug auf die Bestimmung der Haupt- und Nebenelemente sowie auf eine ausgeglichene Ionenbilanz überprüft. Dabei wurde eine Differenz zwischen Kationen- und Anionensumme von maximal 5 mval% zugelassen. 6 Analysen mit einer Differenz zwischen 5 und 10 mval% wurden im Datensatz belassen, weil die absolute Differenz <1 mval betrug und/oder weil die Analyse besonders wichtig war. Die aus dieser Triage erhaltenen 65 Datensätze gliedern sich wie folgt auf:

Tabelle 4.2 Hydrochemischer Datensatz

Referenz	Gipskeuper verwittert	Gipskeuper unverwittert	Oberer Keuper	Mittlerer Muschelkalk	Misch- wasser
Eigene Analysen	17	2	1		
MATOUSEK (1985)		11		5	
HÖGL (1980)		4		1	4
NAGRA (1989)		3		2	2
Habsburg Tunnel	6		2		
Adler Fremd-Analysen	5				
TOTAL	28	20	3	8	6

Dieser Satz an Rohdaten wurde im Hinblick auf interessante Zusammenhänge zwischen hydrochemischen Kennwerten, bzw. deren Verteilung statistisch untersucht. Auf eine ausführliche thermodynamische Bearbeitung dieses Datensatzes haben wir wegen teilweise unvollständiger Erfassung von dazu notwendigen Rohdaten (meist keine Gasgehalts-Bestimmungen, pH/Eh-Bedingungen oft unbekannt) verzichtet. Bei der Besprechung des Sulfat-Gehaltes wird jedoch auch auf die Frage der Gips-Sättigung näher eingegangen.

Für die statistische Auswertung hydrochemischer Daten gibt es verschiedene Methoden je nach Problemstellung und Grösse der Datenmenge. Solche Methoden sind z.B. von HÖTZL (1982) detailliert beschrieben worden. Im vorliegenden Fall sind 2 Randbedingungen zu beachten:

- A) Wenn die Gesamtzahl der Beobachtungen relativ klein ist, so ist die Häufigkeit der Einzelwerte noch sehr stark von zufälligen Schwankungen abhängig. Es empfiehlt sich deshalb, die Daten in Gruppen oder Klassen zusammenzufassen und das Verteilungsmuster durch die Häufigkeit der Klasse zu beschreiben.
- B) Für einen besseren Vergleich verschiedener Datensätze (z.B. auch unterschiedlicher Datenmengen) sollte die

absolute Häufigkeit der Verteilung in die relative Häufigkeit übergeführt werden.

Zur Beurteilung der Verteilungsgesetze, nach denen hydrochemische Parameter in einem Untersuchungsgebiet bzw. einer Fazies auftreten, hat es sich als günstig erwiesen, die Ergebnisse in linearen Histogrammen darzustellen (vgl. MATOUSEK, 1985). Neben der generellen Verteilung gegeben durch Mittelwert, Standardabweichung und Variationsbreite interessieren uns besonders die Anzahl der Häufigkeitsmaxima, bzw. Dichtemittel eines Verteilungsmusters. Die meisten geochemischen Parameter sind normal oder log-normal verteilt, d.h. das Histogramm ist eingipflig (GUNDLACH et al., 1981; HÖTZL, 1982; MATOUSEK, 1985). Viele Verteilungen sind linkssteil; was bedeutet, dass die Variationsmöglichkeit auf dieser Seite durch einen Schrankenwert gehemmt ist (z.B. durch den Wert Null). Mehrgipflige (multimodale) Häufigkeitsverteilungen lassen auf Proben aus mehreren Wassertypen schliessen (HÖTZL, 1982). Im Falle der hydrochemisch sehr ähnlichen Wässer des Gipskeupers und des Mittleren Muschelkalk war nun zu prüfen, inwiefern sich solche bimodale Verteilungen bei einzelnen hydrochemischen Parametern nachweisen lassen. Ausserdem interessierten mögliche Unterschiede in der Verteilungscharakteristik, die auf die Effekte der Verwitterung zurückzuführen wären. Wir beschränken uns deshalb hier auf die Darstellung jener Verteilungsgesetze, die entsprechende Aussagekraft besitzen.

4.1.3.2 Generelle Verteilung der hydrochemischen Parameter

Wir haben die generelle Verteilung der hydrochemischen Parameter in den untersuchten Sulfatwässern in Tabelle 4.3 zusammengestellt.

Betrachten wir vorerst den ganzen Datensatz, der auch Werte aus dem Mittleren Muschelkalk und dem Oberen Keuper umfasst. Hierbei wird deutlich, dass bei praktisch allen Parametern die ganze Bandbreite durch Werte des Gipskeupers repräsentiert wird. Ausnahmen bilden Strontium, woder Maximalwert (Sr^{2+} 13.9 mg/l) von einem Wasser aus dem Oberen Keuper stammt, sowie die Minimalwerte von Magnesium (Mg^{2+} 0.30 mg/l) aus dem Oberen Keuper und Natrium (Na^+ 2.60 mg/l) der Quelle Oberhof. Dieses Wasser entspringt dem Oberen Muschelkalk, dürfte aber aufgrund von Spurenstoffen (Fluorid, Strontium, Brom) eine beigemischte Komponente aus dem Mittleren Muschelkalk enthalten (SCHMASSMANN et al., 1984: 187).

Aus Tabelle 4.3 geht hervor, dass die meisten Parameter grosse Variationsbreiten besitzen. Dies gilt sowohl für Proben aus dem unverwitterten, wie auch aus dem verwitterten Gipskeuper. Die Werte aus dem verwitterten Gipskeuper weisen z.B. bei Ca^{2+} , Mg^{2+} , Sr^{2+} , SO_4^{2-} und HCO_3^- eine noch grössere Bandbreite auf, als dies ohnehin schon im unverwitterten Gipskeuper der Fall ist. Zudem sind die Mittelwerte bei extrem stark gestreuten Werten wenig aussagekräftig, wie die grossen Standardabweichungen demonstrieren. Besseren Aufschluss über die Verteilungs-

charakteristik liefert hier die Betrachtung der Histogramme. Von den mehrgipflig verteilten Parametern sollen nachfolgend diejenigen besprochen werden, die sich eventuell im Hinblick auf eine hydrochemische Unterscheidung der Sul-

fatwässer des Mittleren Muschelkalk von denjenigen des Gipskeupers eignen oder die den Verwitterungseinfluss dokumentieren.

Tabelle 4.3 Generelle Verteilung der hydrochemischen Parameter in den untersuchten Triassischen Sulfatwässern.

Parameter	Einheit	ALLE DATEN					UNVERMITTERTER GIPSKEUPER					VERMITTERTER GIPSKEUPER				
		n	\bar{x}	σ	min	max	n	\bar{x}	σ	min	max	n	\bar{x}	σ	min	max
Lithium	mg/l	43	.4	.8	n.n.	4.2	17	.1	.1	.0	.3	14	1.0	1.3	n.n.	4.2
Natrium	c(eq)%	43	.2	.3	.0	1.2	17	.0	.0	.0	.1	14	.5	.4	.0	1.2
	mg/l	56	76.4	162.2	2.6	687.0	20	6.6	3.5	3.2	18.4	21	179.0	225.0	7.1	687.0
Kalium	c(eq)%	56	10.6	17.5	.4	85.8	20	.8	.4	.4	2.3	21	22.6	15.8	1.6	56.0
	mg/l	56	15.1	23.7	1.0	110.0	20	2.8	.9	1.4	4.5	21	34.6	29.5	1.0	110.0
Calcium	c(eq)%	56	2.2	6.4	.1	46.3	20	.2	.1	.1	.3	21	5.2	9.8	.2	46.3
	mg/l	63	367.0	186.0	18.0	618.0	20	540.0	76.0	287.0	618.0	26	262.0	178.0	18.0	594.0
Magnesium	c(eq)%	63	70.7	16.3	6.9	93.5	20	79.2	5.1	68.4	86.1	26	62.8	17.3	22.7	87.7
	mg/l	63	55.9	32.6	.3	132.6	20	77.8	21.1	50.0	132.6	26	40.1	31.5	3.9	130.7
Strontium	c(eq)%	63	18.2	6.4	.2	31.2	20	19.0	5.1	11.7	29.9	26	16.4	6.1	1.1	25.8
	mg/l	57	6.5	4.1	.7	13.9	20	10.0	2.4	6.0	13.6	21	4.5	3.6	.7	12.4
Gesamthärte	c(eq)%	57	.6	.3	.1	2.2	20	.7	.2	.4	.9	21	.5	.3	.1	1.5
	o _f	61	117.0	56.7	6.2	189.0	20	168.0	19.7	104.0	189.0	24	84.9	56.2	6.2	183.0
Fluorid	mg/l	51	1.0	.8	n.n.	3.3	20	.6	.9	.2	3.3	16	1.2	.7	n.n.	2.3
Chlorid	c(eq)%	51	.3	.3	.0	1.7	20	.1	.2	.0	.7	16	.4	.4	.0	1.7
	mg/l	65	108.0	256.0	1.5	1190.0	20	3.8	2.2	1.5	10.6	28	243.0	349.0	4.8	1190.0
Sulfat	c(eq)%	65	9.2	15.2	.1	57.7	20	.3	.2	.1	.9	28	20.3	17.9	.9	57.7
	mg/l	65	878.0	532.0	39.0	1593.0	20	1360.0	163.0	900.0	1593.0	28	599.0	543.0	39.0	1510.0
Nitrat	c(eq)%	65	62.5	24.8	8.8	91.0	20	83.2	2.6	77.5	87.0	28	43.7	23.0	8.8	91.0
	mg/l	57	4.4	5.3	n.n.	22.0	20	6.4	5.4	.5	22.0	20	2.9	4.8	n.n.	14.0
Hydrogenkarbonat	c(eq)%	57	.3	.4	.0	1.9	20	.3	.3	.0	1.0	20	.3	.5	.0	1.9
	mg/l	65	307.0	101.0	36.6	558.0	20	332.0	54.6	221.0	427.0	28	285.0	132.0	36.6	558.0
Mg/Ca	c(eq)%	65	27.7	22.0	2.2	77.1	20	16.1	2.5	11.6	21.7	28	35.5	28.1	2.2	77.1
	%	62	26.7	10.0	2.9	52.1	20	24.5	8.4	13.8	43.7	26	27.3	11.2	2.9	52.1
F/Sr	%	50	.6	.8	.0	3.6	20	.2	.3	.0	1.1	16	1.0	1.0	.0	3.6
F/(Ca+Mg)	‰	47	4.7	16.7	.4	115.8	20	1.1	1.9	.4	7.7	14	8.8	14.0	1.4	56.0
	‰	56	6.1	3.4	1.0	15.7	20	6.9	1.5	3.9	9.1	19	6.6	4.5	1.9	15.7
Li/Na	%	42	3.5	3.8	.1	18.5	17	3.6	3.0	.6	11.6	14	1.9	1.1	.0	4.4

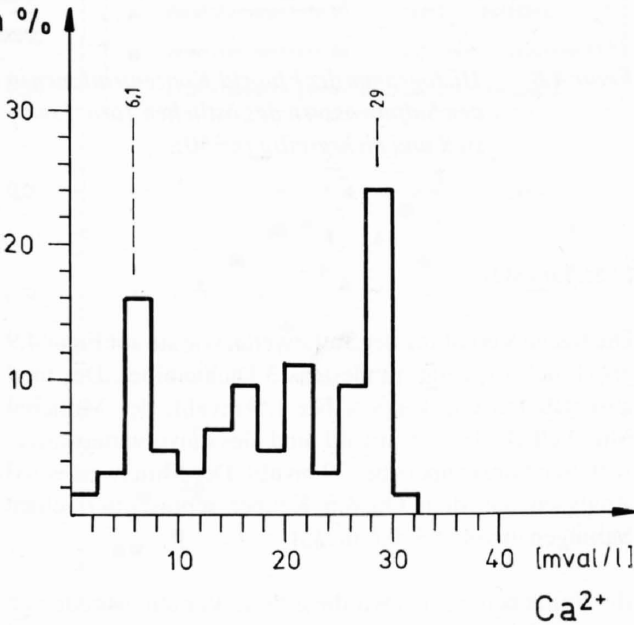
n Anzahl Analysen
 \bar{x} Durchschnitt
 σ Standardabweichung
min kleinster Wert
max grösster Wert

4.1.3.3 Verteilungsmuster ausgewählter Parameter

a) Calcium (Ca^{2+})

Die Verteilung der Calciumgehalte in den untersuchten Sulfatwässern ist flach und mehrgipflig (Fig. 4.4). Neben dem relativ hohen Mittelwert (18.3 mval/l Ca^{2+}) zeigt dieser Parameter die grösste Bandbreite innerhalb der Kationen (0.90-30.81 mval/l). Die Modalwerte liegen bei 6.1 mval/l für verwitterten und bei 29 mval/l für unverwitterten Gipskeuper. Die Calciumgehalte des Mittleren Muschelkalk gruppieren sich um einen Mittelwert bei 18 mval/l, diejenigen des Oberen Keuper um einen Mittelwert bei 5.3 mval/l.

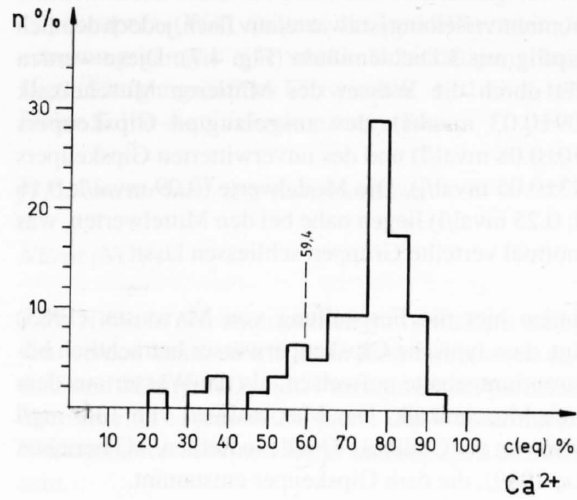
Die Calcium-Äquivalentkonzentrationen (in Prozenten der Kationensumme) der Wässer aus dem Gipskeuper und dem Mittleren Muschelkalk zeigen eine bimodale Verteilung (vgl. Fig. 4.5) mit einem niedrigen Modalwert bei 59%, um den sich die Werte aus dem verwitterten Gipskeuper scharen. Das höhere Dichtemittel bei ca 80% erklärt sich als Superposition zweier Normalverteilungen: Der Wertgruppen des Mittleren Muschelkalk ($\bar{x}=80.1\%$) und des unverwitterten Gipskeupers ($\bar{x}=79.2\%$).



Figur 4.4 Histogramm der Calcium-Konzentrationen in den Sulfatwässern des östlichen Jura. Mehrgipflig mit 2-3 Dichtemitteln ($n=62$).

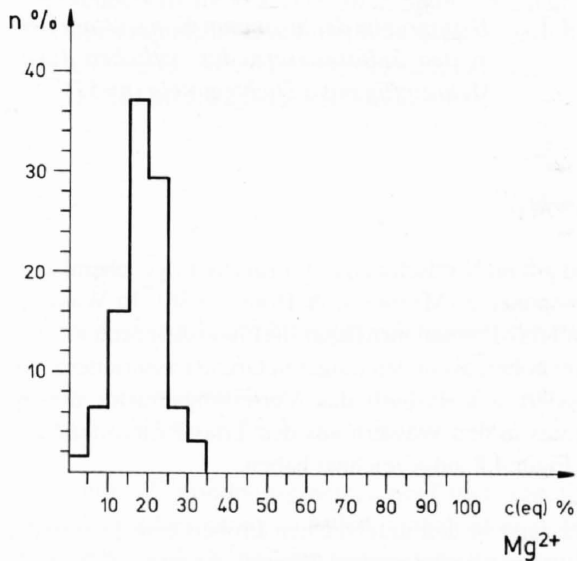
b) Magnesium (Mg^{2+})

Die Verteilung der Magnesiumgehalte in den Sulfatwässern ist flachgipflig und zeigt eine annähernd so grosse Variationsbreite wie diejenige der Calciumgehalte. Die flache Verteilung dürfte einer Überlagerung mehrerer Normalverteilungen entsprechen, deren Modalwerte nahe



Figur 4.5 Histogramm der Calcium-Äquivalentkonzentrationen in den Sulfatwässern des östlichen Jura. Mehrgipflig mit 2 Dichtemitteln ($n=62$).

beieinander liegen. Eine Unterscheidung der Gipskeuper von den Muschelkalk-Sulfatwässern ist hier also nicht so deutlich wie bei Calcium. Dies gilt insbesondere für die Magnesium-Äquivalentkonzentrationen (Fig. 4.6). Die Gipskeuper-Wässer folgen einer schönen Normalverteilung mit einem Dichtemittel bei 17.9 c(eq)%. Dieser Wert ist deckungsgleich mit dem Mittelwert der Wässer aus dem Mittleren Muschelkalk ($\bar{x}=18\pm5.3$). 2 Analysen von Wässern aus dem Oberen Keuper ergaben Magnesium-Äquivalentkonzentrationen von 21.6 und 23.9 c(eq)%.

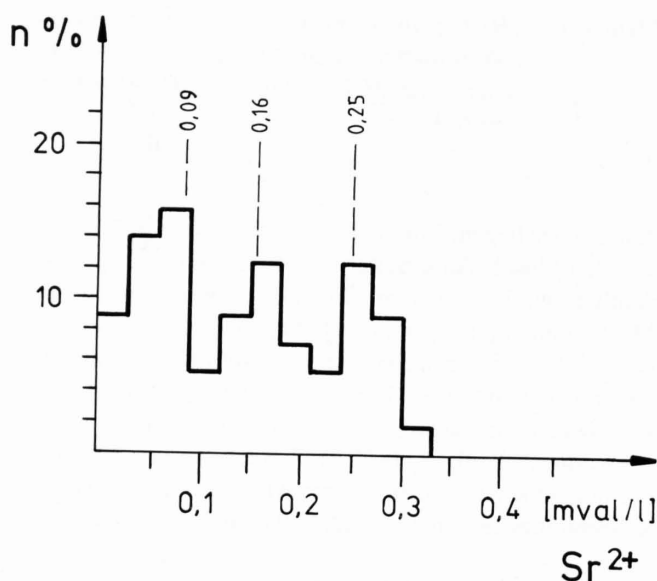


Figur 4.6 Histogramm der Magnesium-Äquivalentkonzentrationen in den Sulfatwässern des östlichen Jura. Steilgipflig, \pm normalverteilt ($n=62$).

c) Strontium (Sr^{2+})

Die Strontiumverteilung ist zwar relativ flach, jedoch deutlich mehrgipflig mit 3 Dichtemitteln (Fig. 4.7). Diese werden gebildet durch die Wässer des Mittleren Muschelkalk ($x=0.09\pm0.03$ mval/l), des ausgelaugten Gipskeupers ($x=0.10\pm0.08$ mval/l) und des unverwitterten Gipskeupers ($x=0.23\pm0.05$ mval/l). Die Modalwerte (0.09 mval/l; 0.16 mval/l; 0.25 mval/l) liegen nahe bei den Mittelwerten, was auf \pm normal verteilte Gruppen schliessen lässt.

Wir finden hier die Feststellung von MATOUSEK (1985) bestätigt, dass typische Gipskeuperwässer beträchtlich höhere Strontiumgehalte aufweisen, als die Wässer aus dem Mittleren Muschelkalk. Der Maximalwert von 13.6 mg/l Sr^{2+} wird von der Chillholz-Quelle in Zeihen/AG berichtet (NAGRA, 1989), die dem Gipskeuper entstammt.



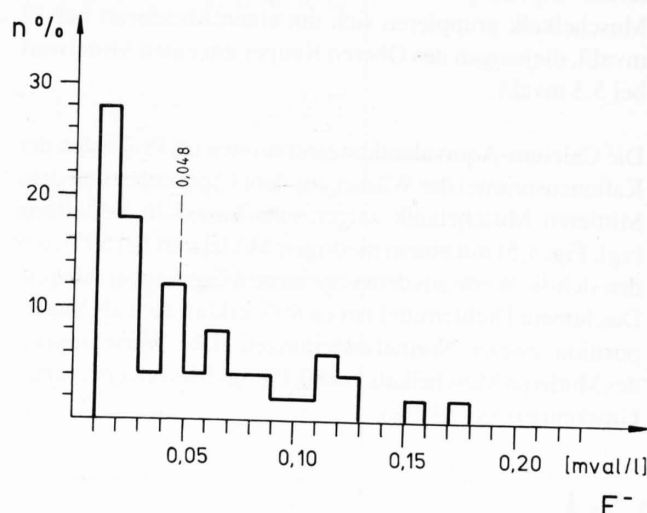
Figur 4.7 Histogramm der Strontium-Konzentrationen in den Sulfatwässern des östlichen Jura. Mehrgipflig mit 3 Dichtemitteln ($n=57$).

d) Fluorid (F^-)

Fluorid gilt im Nordschweizer Jura als hydrogeochemische Leitkomponente (MATOUSEK & HÖHN, 1986): In Wässern aus den Trias-Formationen liegen die Fluoridkonzentrationen markant höher, als in den jüngeren Grundwasserleitern. Es interessiert uns deshalb das Verteilungsmuster dieses Elementes in den Wässern aus den Trias-Evaporiten, das wir in Figur 4.8 aufgezeichnet haben.

Fluorid zeigt in den untersuchten Proben eine linkssteile Verteilung mit einem unteren Schrankenwert bei 0.23 mg/l F^- (0.012 mval/l). Der Mittelwert für die Wässer aus dem Mittleren Muschelkalk von 0.048 ± 0.016 mval/l (0.92 mg/l F^-) hebt sich nur wenig aus der Gesamtverteilung ab. Der Mittelwert des unverwitterten Gipskeupers beträgt 0.03 ± 0.05 mval/l (0.62 mg/l F^-).

Eine so deutliche Trennung der triassischen Grundwasserleiter allein aufgrund der Fluoridgehalte, wie sie MATOUSEK (1985) für das Gebiet des Waldenburger Tales durchführen konnte, ist in unserem Falle an den über den gesamten Ostjura verstreuten Proben nicht möglich. Vielmehr scheinen die Bereiche zu überlappen, wie dies auch bei den Fluoridwerten aus dem Fricktal (MATOUSEK & HÖHN, 1986) bezüglich den Bereichen von Gipskeuper und Oberem Muschelkalk angedeutet ist.

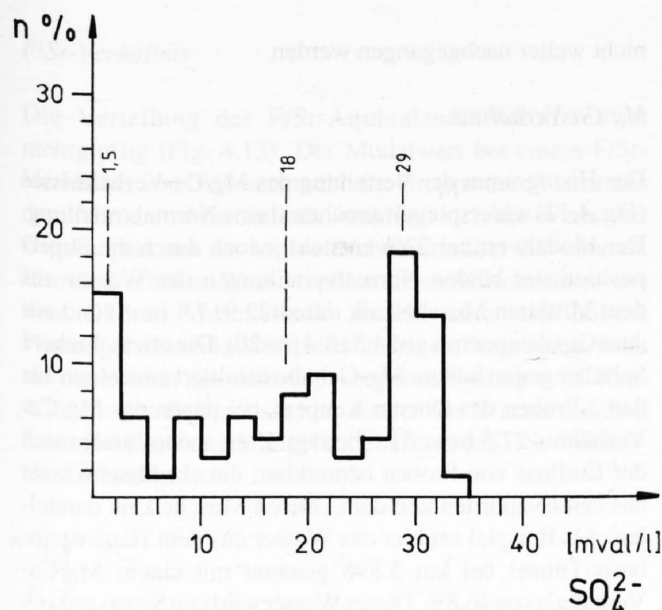


Figur 4.8 Histogramm der Fluorid-Konzentrationen in den Sulfatwässern des östlichen Jura. Linkssteil und mehrgipflig ($n=50$).

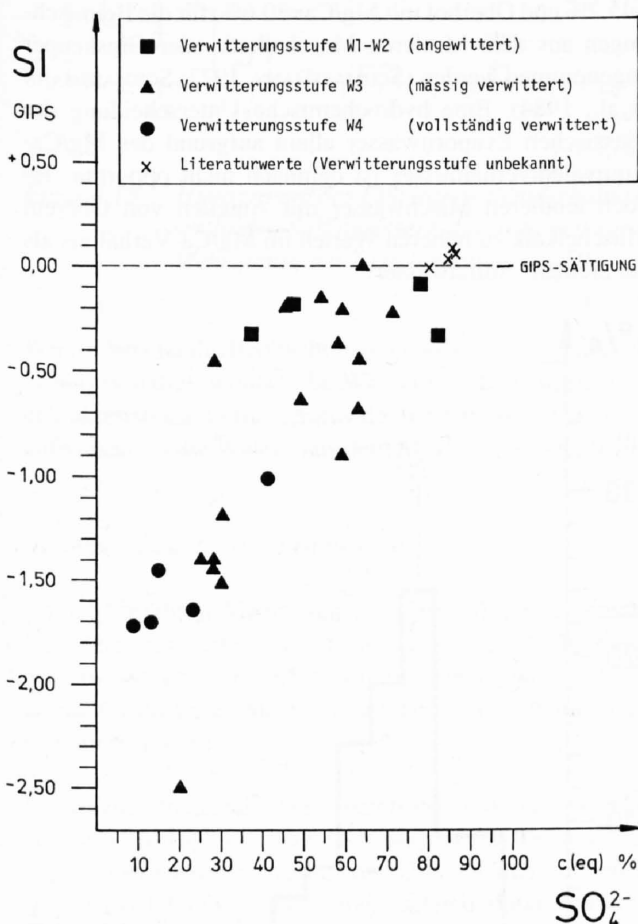
e) Sulfat (SO_4^{2-})

Die flache Verteilung der Sulfatwerte, wie sie auf Figur 4.9 ersichtlich ist, zeigt mindestens 3 Dichtemittel: Des total ausgelaugten Gipskeupers bei 1.5 mval/l, des Mittleren Muschelkalk bei 18 mval/l und des unverwittert-angewitterten Gipskeupers bei 29 mval/l. Der Mittelwert von 3 Analysen aus dem Oberen Keuper repräsentiert einen Sulfatgehalt von 3.5 ± 0.6 mval/l.

Bei Sulfat beobachten wir die grösste Variationsbreite von minimal 39 mg/l bis zu maximal 1593 mg/l SO_4^{2-} . Auffallend ist auch die grosse Spanne bei den Äquivalentkonzentrationen: Nach Calcium zeigt Sulfat die zweitgrösste Bandbreite von 9-91%! Diese Beobachtung erklärt sich zwanglos aus dem unterschiedlichen Angebot an löslichem Gips, je nach Verwitterungsgrad des durchflossenen Gesteins. Dies wird besonders deutlich, wenn wir die Sättigungsindices bezüglich Gips in den Wässern unterschiedlicher Verwitterungsstufe betrachten (vgl. Fig. 4.10): Die bekannten Keuper-Mineralwässer und die Wässer aus dem angewitterten Gipskeuper sind bezüglich Gips praktisch gesättigt bis leicht übersättigt. Ausserdem weisen sie hohe Sulfat-Äquivalentkonzentrationen auf. Die Proben aus dem unverwitterten Gipskeuper sind dagegen meist untersättigt, weil der Gips bereits ausgelaugt ist. In dieser Gruppe streuen die



Figur 4.9 Histogramm der Sulfat-Konzentrationen in den Sulfatwässern des östlichen Jura. Mehrgipflig mit 3 Dichtemitteln ($n=65$).



Figur 4.10 Beziehung zwischen dem Sättigungsindex SI bezüglich Gips und dem Sulfatgehalt in den Sulfatwässern des Gipskeupers unterschiedlicher Verwitterungsstufe.

Werte für den Sättigungsindex wie auch die Äquivalentkonzentration stark. Im Falle des vollständig verwitterten Gipskeupers (W4) zeigen die perkolierenden Wässer erwartungsgemäss eine starke Untersättigung bezüglich Gips (Sättigungsindices SI zwischen -1.01 und -1.72) und kleine Sulfat-Äquivalentkonzentrationen.

f) Parameter niedriger Konzentration

Nitrat (NO_3^-)

Falls Nitrat in den untersuchten Sulfatwässern nachgewiesen werden kann, so tritt es in Konzentrationen zwischen 0.05 und $22 \text{ mg/l } NO_3^-$ auf. Prozentual zur Anionensumme überschreitet es jedoch 2% nicht. Die Wässer mit höheren Nitratgehalten scheinen leicht anthropogen beeinflusst zu sein.

Jodid (J^-), Bromid (Br^-)

Die Wasserproben aus dem angewitterten bis verwitterten Gipskeuper von Ennetbaden wurden auch auf Jodid und Bromid untersucht. Bedingt durch die Analysetechnik können im Ionenchromatographen kleine Bromidkonzentrationen im Bereich der Nachweisgrenze von $0.5 \text{ ppm } Br^-$ durch gleichzeitig anwesende hohe Chloridkonzentrationen verdeckt werden. Dieser Umstand war bei einigen Proben gegeben: Die Bandbreite der gemessenen Chloridkonzentrationen im verwitterten Gipskeuper geht von 4.8 bis $1190 \text{ mg/l Chlorid}$. Bei 3 von insgesamt 17 auf Bromid analysierten Proben wurden Spuren (0.5 - $0.6 \text{ ppm } Br^-$) dieses Parameters festgestellt.

Jodid wurde nur bei 2 von 14 Proben aus dem verwitterten Gipskeuper nachgewiesen. Die bestimmten Konzentrationen betragen 0.8 und $1.3 \text{ mg/l } J^-$. Aus den Sulfatwässern des Gipskeupers ist Jodid als Gehalt in Spuren bekannt z.B. in den Mineralquellen Sissach und Wintersingen. Jodidgehalte von $0.03 \text{ mg/l } J^-$ werden aus Schinznach-Dorf und von $0.09 \text{ mg/l } J^-$ aus Magden berichtet (HÖGL, 1980).

4.1.3.4 Beziehungen zwischen hydrochemischen Parametern

a) Äquivalentverhältnisse

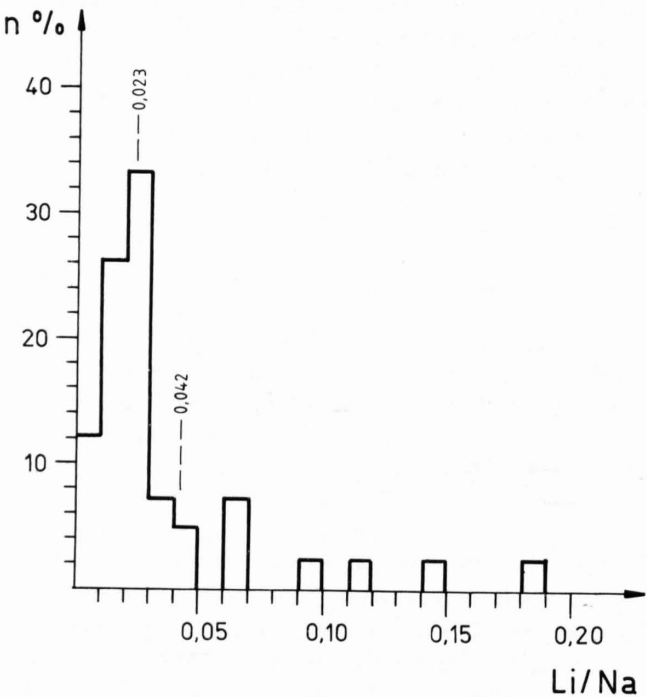
$$(Li/Na, Mg/Ca, F/Sr, Sr/(Ca+Mg))$$

Nicht nur die Verteilungsgesetze eines Parameters, sondern auch dessen Beziehung zu anderen Inhaltsstoffen sind von Bedeutung bei der Klassifizierung von Grundwässern. Neben dem Verhältnis Mg/Ca , das oft zur Charakterisierung der Grundwässer und Unterscheidung verschiedener Quelltypen beigezogen wird (Beispiele in WILDBERGER, 1981; SCHMASSMANN et al. 1984), interessieren uns auch die Verhältnisse Li/Na und F/Sr .

Lithium (Li+) verhält sich im gelösten Zustand wie Natrium. Im festen Zustand ist es insbesondere an Tonminerale und Glimmer gebunden (HORSTMANN, 1957; OHRDORF, 1968; WIRTH, 1974). Bei der Evaporation von Meerwasser reichert sich Lithium in der Restlösung an und wird nach OHRDORF (1968) bevorzugt in die Tonminerale in den Evaporit-Zyklen eingebaut. Der gleiche Autor berichtet von Lithiumgehalten in den Salztonen des Zechsteins bis 91 ppm Li⁺ (im Gestein). Bei der Verwitterung der Evaporit-Sedimente dürfte demnach auch das vorhandene Lithium wieder freigesetzt werden.

In normalen Schottergrundwässern liegen die Lithiumgehalte meist unterhalb der Nachweisgrenze. MATOUSEK (1985) fand im Waldenburger Tal nur in Wässern aus dem Mittleren und Oberen Muschelkalk, dem Gipskeuper und in Mischwässern mit Anteilen aus dieser Fazies Lithiumgehalte über 0.01 mg/l. Das Histogramm der Lithiumkonzentrationen in 42 Sulfatwasser-Proben ist mehrgipflig mit 2 Dichtemitteln.

Die Verteilung des Li/Na-Stoffmengenverhältnisses (Fig. 4.11) ist ähnlich demjenigen des Lithium. Durch die Gewichtung mit dem Natrium werden aber die Modalwerte, die durch die Proben aus dem Gipskeuper bei 0.023 und aus dem Mittleren Muschelkalk bei 0.042 gebildet werden, etwas besser getrennt. Theoretisch wäre denkbar, dass analog den hohen Lithiumwerten im Zechstein-Salz entsprechend der oben erwähnten Deutung, die leicht höheren Lithiumgehalte der Muschelkalk-Evaporitwässer in einem Zusammenhang mit möglichen Salzlagern in dieser Formation stehen. Da aber nur 5 Werte aus dem Mittleren Muschelkalk zur Verfügung stehen, die ausserdem eine grosse Bandbreite von 0.01-0.14 abdecken, kann dieser Frage hier

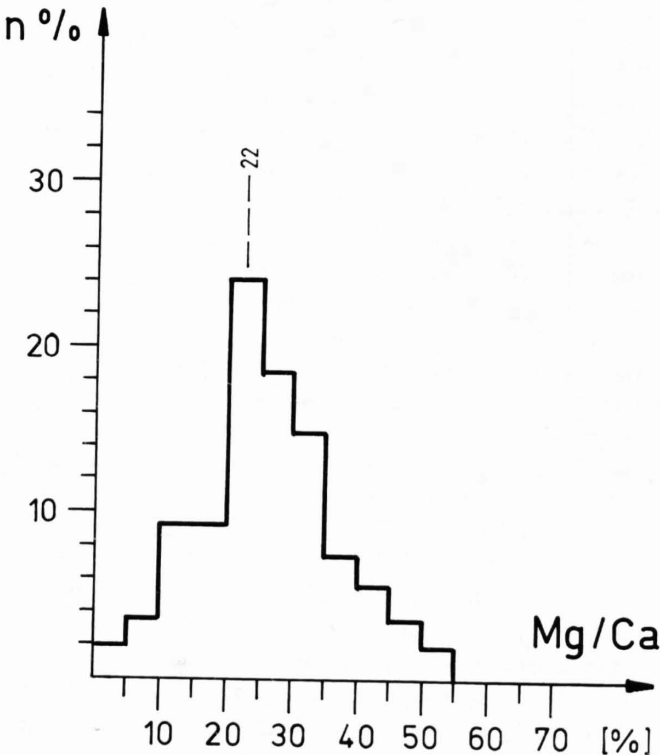


Figur 4.11 Histogramm des Li/Na-Äquivalentverhältnisses in den Sulfatwässern des östlichen Jura. Mehrgipflig mit 2 Dichtemitteln (n=42).

nicht weiter nachgegangen werden.

Mg/Ca-Verhältnis

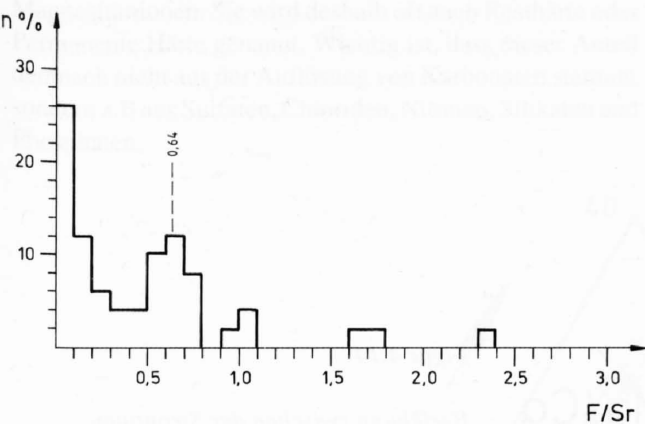
Das Histogramm der Verteilung des Mg/Ca-Verhältnisses (Fig. 4.12) widerspiegelt annähernd eine Normalverteilung. Der Modalwert bei 22% entsteht jedoch durch die Superposition der beiden Normalverteilungen der Wässer aus dem Mittleren Muschelkalk mit $x=22.9\pm7.4$ (n=8) und aus dem Gipskeuper mit $x=24.5\pm8.4$ (n=20). Die etwas flächere Schulter gegen höhere Mg-Gehalte resultiert zum einen aus den 2 Proben des Oberen Keupers, bei denen das Mg/Ca-Verhältnis 27.5 bzw. 31.6 beträgt. Zum andern macht sich der Einfluss von Proben bemerkbar, die ein Mischwasser aus den Evaporiten und dem Oberen Muschelkalk darstellen. Als Beispiel sei hier das Wasser aus dem Hauensteinbasis-Tunnel bei km 5.896 genannt mit einem Mg/Ca-Verhältnis von 46.8%. Dieses Wasser wird von SCHMASSMANN et al. (1984:186) zwar dem Oberen Muschelkalk zugerechnet. Derselbe Autor vermutet jedoch Gipskeuper-Einflüsse, die für die hohe Gesamtmineralisation verantwortlich gemacht werden. Ähnlich verhält es sich mit den Wässern aus dem Oberen Muschelkalk Bad Lostorf 4 (Bohrung 3) mit Mg/Ca=45.2% und Oberhof mit Mg/Ca=30.6%, für die Beimischungen aus dem Mittleren Muschelkalk oder Gipskeuper angenommen werden (SCHMASSMANN, 1977; SCHMASSMANN et al., 1984). Eine hydrochemische Unterscheidung der triassischen Evaporitwässer allein aufgrund des Mg/Ca-Äquivalentverhältnisses ist demnach nicht opportun. Jedoch tendieren Mischwässer mit Anteilen von Oberem Muschelkalk zu höheren Werten im Mg/Ca-Verhältnis als die „reinen“ Sulfatwässer.



Figur 4.12 Histogramm des Mg/Ca-Äquivalentverhältnisses in den Sulfatwässern des östlichen Jura. Schwach linkssteil, \pm normalverteilt (n=62).

F/Sr-Verhältnis

Die Verteilung des F/Sr-Äquivalentverhältnisses ist mehrgipflig (Fig. 4.13). Der Modalwert bei einem F/Sr-Verhältnis von 0.64 entspricht der Gruppe der Wässer aus dem Mittleren Muschelkalk, während sich die Werte des Gipskeupers um das untere Dichtemittel bei 0.2 scharen. Einzelne erhöhte Werte repräsentieren Mischwässer aus dem Oberen Muschelkalk, welche einerseits höhere Fluoridgehalte und andererseits niedrigere Strontiumgehalte als die Wässer aus dem Gipskeuper aufweisen (vgl. Kap. 4.1.3.3). Als Beispiel sei hier wieder das Wasser aus Bad Lostorf 4 (Bohrung 3) angeführt, bei dem das F/Sr-Verhältnis 2.3 beträgt.



Figur 4.13 Histogramm des F/Sr-Äquivalentverhältnisses in den Sulfatwässern des östlichen Jura. Mehrgipflig mit 2 Dichtemitteln (n=50).

Wir finden hier die Beobachtungen von SCHMASSMANN et al. (1984) bestätigt, wonach die Wässer aus dem Gipskeuper charakteristisch tiefere Äquivalentverhältnisse von F/Sr aufweisen als die Wässer aus dem Mittleren Muschelkalk.

Beziehungen unter den Erdalkalien

Da sich Strontium, Magnesium und Calcium als interessante Parameter zur verfeinerten Unterscheidung innerhalb der Sulfatwässer erwiesen haben, sollen nun im folgenden einige Beziehungen unter diesen hydrochemischen Parametern diskutiert werden.

Im Bezugsdiagramm für Strontium und das Mg/Ca-Äquivalentverhältnis ist deutlich wieder die Tendenz der Gipskeuperwässer zu hohen Strontiumgehalten zu sehen (Fig. 4.14). Gleichzeitig fällt aber auch die grosse Streuung im Mg/Ca-Verhältnis auf. Hohe Strontiumgehalte resultieren demnach im Gipskeuper nicht aus der Karbonatfazies (ausgedrückt durch das Mg/Ca-Verhältnis) sondern vermutlich aus der Auflösung der Sulfatlagen. Das Strontium wäre in diesem Fall ursprünglich im Gips als Ca-Ersatz oder in Form von Cölestin (SrSO₄) enthalten. Diese Schlussfolgerung entspricht auch den Beobachtungen von MATOUSEK (1985) an seinen Lösungsversuchen von Karbonat- und

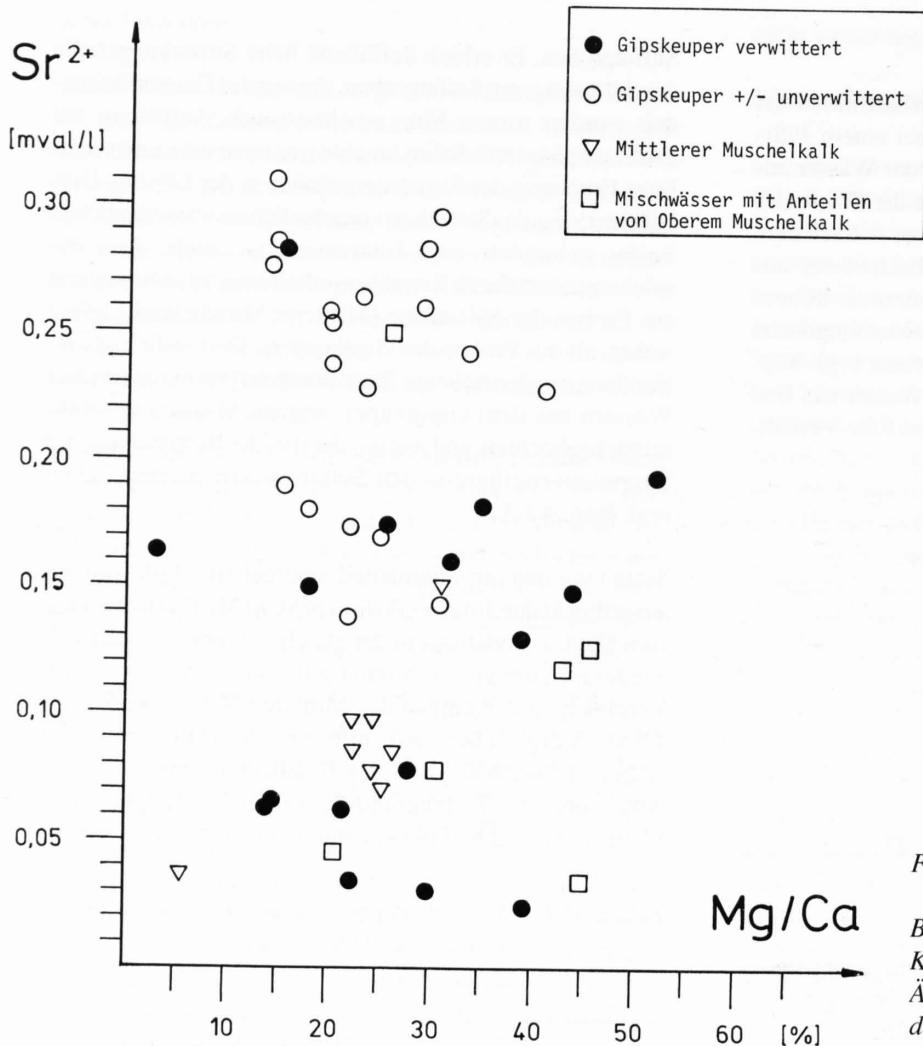
Sulfatproben. Er erhielt auffallend hohe Strontiumgehalte durch Lösung von Sulfatproben, die nur mit Deionat behandelt worden waren. Eine anschliessende Auflösung der Karbonatphase mit Säure brachte nur noch eine unwesentliche Erhöhung des Strontiumgehaltes in der Lösung. Dies bedeutet, dass das Strontium vornehmlich im wasserlöslichen Sulfat gebunden war. Interessant ist auch, dass die solchermassen durch Extraktion erhaltenen Strontiumwerte aus Proben der Sulfatzone (Mittlerer Muschelkalk) höher waren, als aus Proben des Gipskeupers. Dies steht nicht im Einklang mit den höheren Strontiumgehalten in natürlichen Wässern aus dem Gipskeuper, wie sie MATOUSEK (1985) selber beobachtete und wie wir dies bei der Besprechung der Strontiumverteilung in den Sulfatwässern gesehen haben (vgl. Kap. 4.1.3.3).

Setzen wir den Strontiumanteil innerhalb der Erdalkalien - ausgedrückt durch das Verhältnis Sr/(Ca+Mg) - in Beziehung zum Mg/Ca-Verhältnis in der gleichen Probe, so zeigt sich wiederum eine grosse Streuung der Gipskeuperwerte im Vergleich zu denjenigen des Mittleren Muschelkalk (Fig. 4.15). Vergleichen wir nun unsere Daten mit den Äquivalentverhältnissen der Erdalkalien, wie sie in der Arbeit über die Tiefengrundwässer der Nordschweiz von SCHMASSMANN et al. (1984) gefunden wurden (Tab. 4.4):

Tabelle 4.4 Äquivalentverhältnisse der Erdalkalien. Referenzen: 1) SCHMASSMANN et al., (1984); 2) diese Arbeit

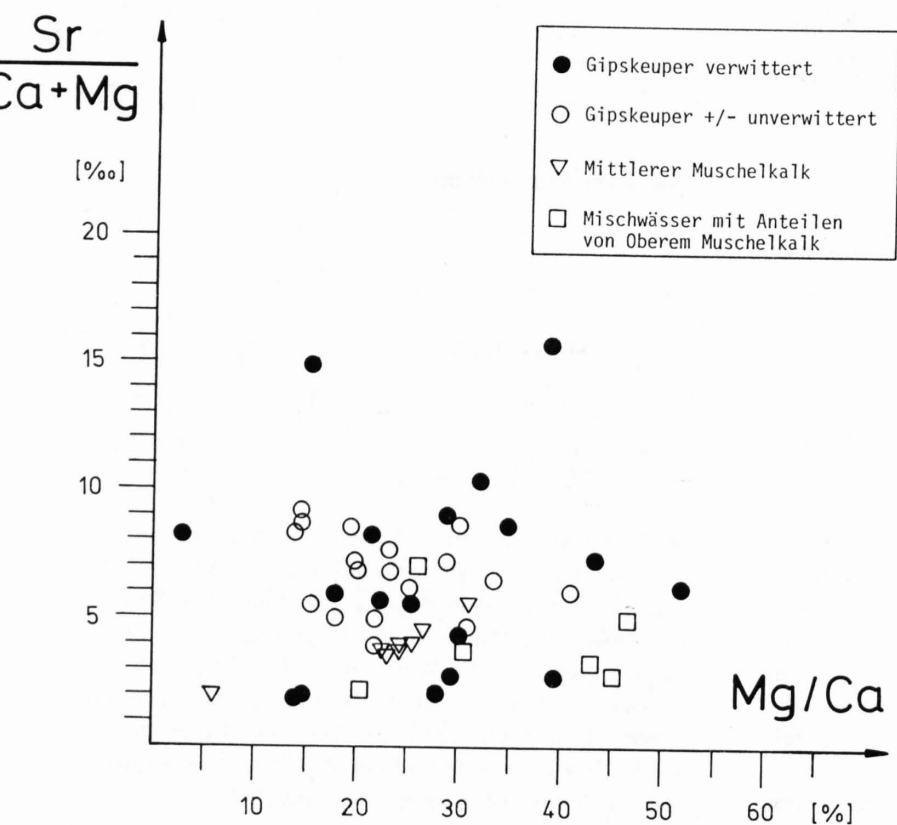
	Mg/Ca (%)	Sr/Ca+Mg (‰)
Gipskeuper		
1)	14-35	5.0-9.4
unverwittert 2)	14-44	3.9-9.1
verwittert 2)	3-52	1.0-15.7
Mittlerer Muschelkalk		
1)	11-30	3.7-7.5
2)	6-31	2.0-5.6
Oberer Muschelkalk		
oberflächennah 1)	27-46	3.4-4.7
Mischung 1)	28-51	1.4-5.1

Die Bereiche der einzelnen Formations-Wässer überschneiden sehr stark. Dies gilt sowohl für das Mg/Ca-Verhältnis als auch in Bezug auf das Äquivalentverhältnis von Strontium zur Summe der Calcium- und Magnesium-Ionen. Zudem können praktisch alle Werte dieser Bereiche auch durch Wässer aus dem verwitterten Gipskeuper eingenommen werden. Eine eindeutige hydrochemische Unterscheidung der Sulfatwässer aufgrund der Äquivalentverhältnisse in den Erdalkalien ist demnach nicht möglich.



Figur 4.14

Beziehung zwischen der Strontium-Konzentration und dem Mg/Ca-Äquivalentverhältnis in den Sulfatwässern des östlichen Jura.



Figur 4.15

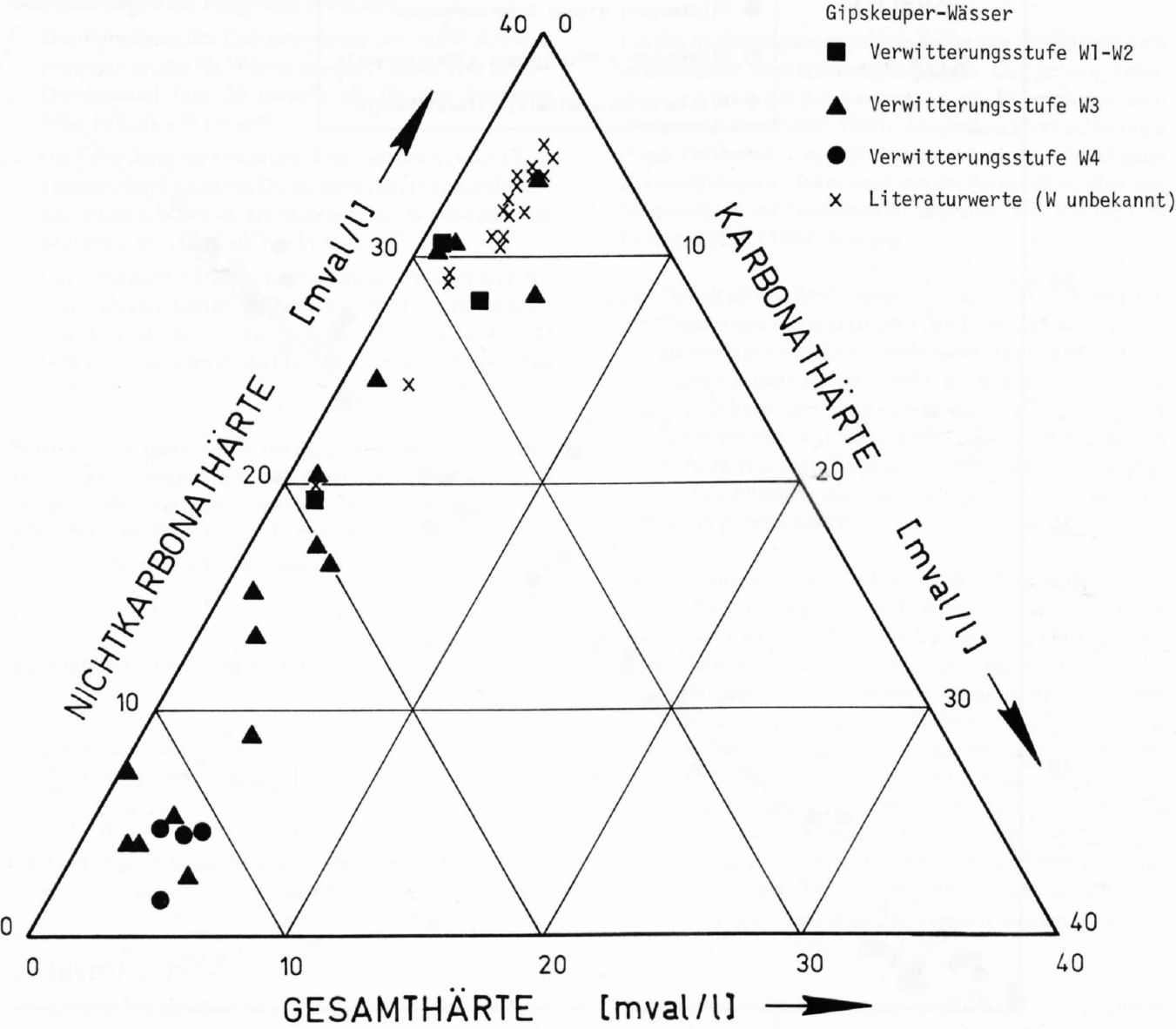
Beziehung zwischen dem Strontiumanteil in den Erdalkalien und dem Mg/Ca-Äquivalentverhältnis in den Sulfatwässern des östlichen Jura.

b) Härtebeziehungen

Unter der *Gesamthärte (GH)* eines Wassers verstehen wir die Stoffmengenkonzentration an Calcium-, Magnesium-, Strontium- und Bariumionen, wobei in Grund- und Trinkwässern die beiden letzteren im allgemeinen in sehr geringen Konzentrationen vorkommen. Aus diesem Grund entspricht die Gesamthärte oft der Summe der Calcium- und Magnesiumionen. Unter *Karbonathärte (KH)* wird jene Härte verstanden, die durch Erdalkalien (insbesondere Calcium- und Magnesiumionen) verursacht wird, für welche eine äquivalente Konzentration an Karbonat- oder Hydrogenkarbonationen vorliegt. Die *Nichtkarbonathärte (NKH)* errechnet sich aus der Differenz von KH zu GH und bezeichnet den verbleibenden Rest an Calcium- und Magnesiumionen. Sie wird deshalb oft auch Resthärte oder Permanente Härte genannt. Wichtig ist, dass dieser Anteil demnach nicht aus der Auflösung von Karbonaten stammt, sondern z.B. aus Sulfaten, Chloriden, Nitraten, Silikaten und Phosphaten.

Zur Darstellung der Beziehung zwischen GH, KH und NKH verwenden wir das von SCHWILLE (1957) vorgeschlagene Härtedreieck. Im Unterschied zu den üblichen Dreiecksdarstellungen (z.B. in der Geochemie) werden hier nicht die prozentualen Anteile, sondern die absoluten Konzentrationen der Komponenten in Milligrammäquivalente je Liter Wasser (mval/l) wiedergegeben. In Figur 4.16 sind die verfügbaren Proben aus dem Gipskeuper nach den verschiedenen Verwitterungsstufen gesondert bezeichnet.

Der Mittelwert der Gesamthärte in französischen Härtegraden der untersuchten Sulfatwässer liegt bei 117 °f, wobei die Bandbreite von 6.2 °f bis 189 °f geht. Die Karbonathärte ist bei allen Proben im Vergleich zur GH ziemlich konstant und pendelt um einen Mittelwert von 15 °f (2.9 mval/l). Der Maximalwert liegt bei 32 °f. Anders verhält es sich mit der Nichtkarbonathärte. Die Daten der Wasserproben aus dem unverwitterten bis mässig verwitterten Gipskeuper bewegen sich in einem weiten Feld zwischen 21 °f und 168 °f NKH,



Figur 4.16 Härtebeziehungen der Gipskeuper-Wässer aus unterschiedlichen Verwitterungsstufen (W0 unverwittert; W4 vollständig verwittert).

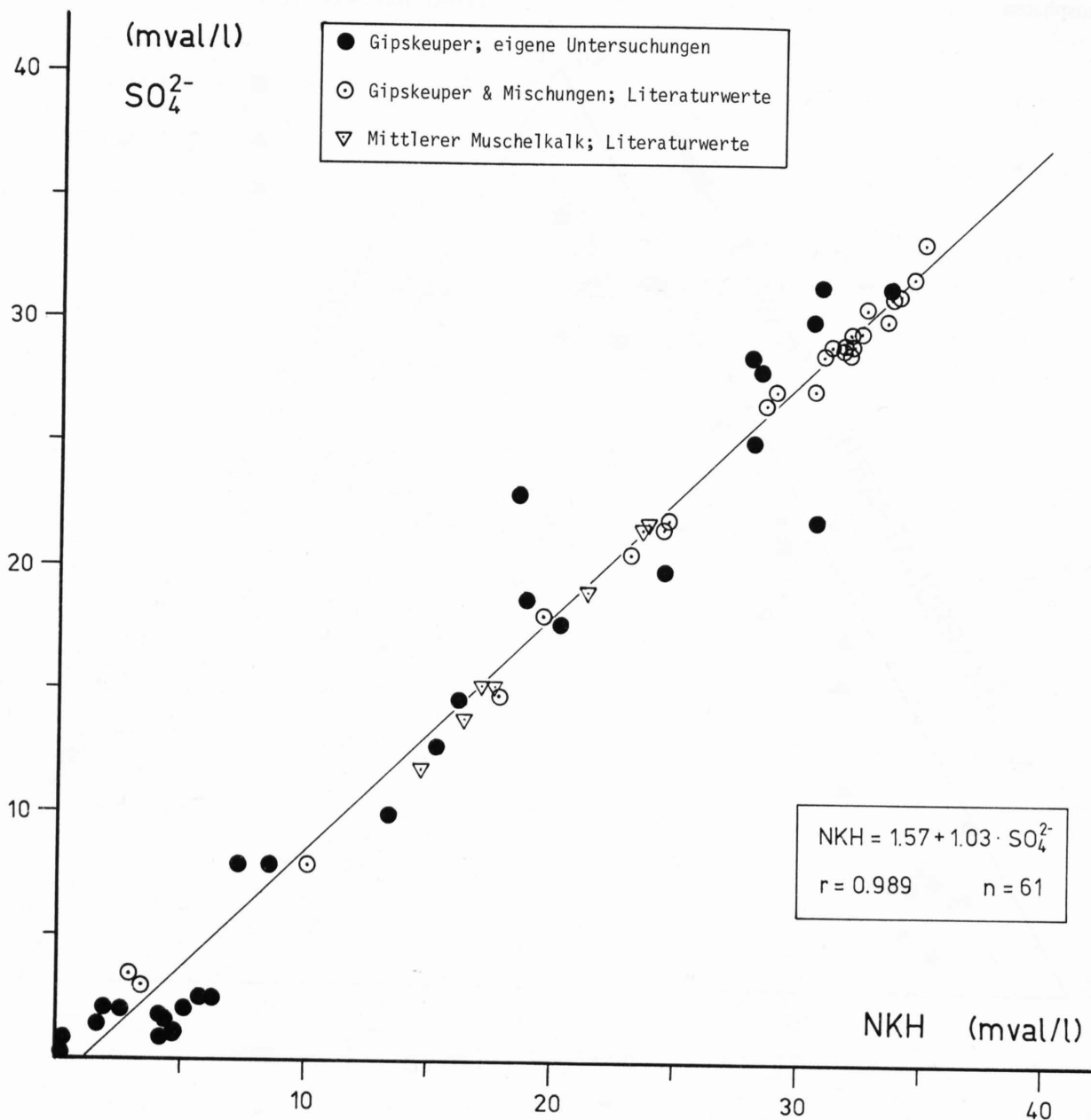
bei einer Gesamthärte zwischen 30 °f und 183 °f. Einzig die Proben aus dem vollständig verwitterten Gipskeuper (Verwitterungsstufe W4), in dem aller Gips weggelöst ist, bilden eine etwas einheitlichere Gruppe mit einer Gesamthärte kleiner 65 °f und ähnlichen Anteilen von KH und NKH.

Die Sulfatwässer aus dem Mittleren Muschelkalk zeigen ebenfalls grosse Gesamthärten, die vornehmlich der NKH entsprechen. Bei einer Bandbreite von 87 °f bis 136 °f beträgt der Mittelwert der GH 111 °f, während die Karbonathärte im Maximum 13 °f aufweist. Demgegenüber zeigen die beiden Wässer des Oberen Keuper eine bedeutend kleinere GH um 48 °f, die zu einem grossen Teil aus der Karbonatlösung resultiert: Die KH beträgt 67% der Gesamthärte.

Somit liegt der Schluss nahe, bei diesen oberflächennahen

Sulfatwässern die Gesamthärte vornehmlich als Resultat der Gipslösung anzusehen. Bei zunehmender Auslaugung des Gesteins, d.h. mit fortschreitender Verwitterung, treten die Anteile der Sulfatlösung zurück und die Gesamthärte wird mehr und mehr durch die Karbonathärte, d.h. durch die Auflösung von Kalken und Dolomiten bestimmt.

Der Vergleich der Sulfatkonzentrationen mit der u.a. aus der Gips-Auflösung resultierenden NKH zeigt denn auch, dass eine hohe positive Korrelation zwischen diesen beiden Parametern vorliegt ($r=0.989$). Dass alle Proben einen Überschuss gegenüber den zum Äquivalentabgleich für das gesamte Sulfat notwendigen Calcium- und Magnesium-Ionen aufweisen, lässt darauf schliessen, dass auch noch eine unterschiedliche Menge an Nitraten und ev. Chloriden und Phosphaten gelöst sein muss. Entsprechende Hinweise ergaben auch die Nitratgehalte, die mit einer Bandbreite von 0.05-22 mg/l ermittelt wurden (vgl. Tabelle 4.3).



Figur 4.17 Korrelation von Sulfatgehalt und Nichtkarbonathärte (NKH) in den Sulfatwässern des östlichen Jura.

4.1.3.5 Differenzierung unter den Sulfatwässern

Obwohl die Sulfatwässer aus dem Gipskeuper und dem Mittleren Muschelkalk in ihrer chemischen Evolution einander sehr ähnlich sind, wäre eine Differenzierung mit Hilfe von hydrochemischen, formationsspezifischen Parametern wünschenswert. In der Literatur finden sich diesbezügliche Hinweise besonders für die Gehalte an Strontium und Fluorid, sowie das entsprechende Äquivalentverhältnis F/Sr (SCHMASSMANN et al., 1984; MATOUSEK, 1985).

Bei der Diskussion der Verteilungscharakteristik der hydrochemischen Parameter in den Sulfatwässern (vgl. vorangehende Kapitel) wurde deutlich, dass sowohl bezüglich der Fluorid-Konzentration als auch des Mg-Gehaltes die Bereiche des Mittleren Muschelkalk und des Gipskeupers stark überlappen. Als formationsspezifische Parameter, die zur Unterscheidung der Wässer aus dem Mittleren Muschelkalk von denjenigen des unverwitterten-angewitterten Gipskeupers dienen könnten, haben sich bei unseren Untersuchungen die Folgenden erwiesen:

- Die Verteilung der *Calcium- sowie der Sulfat-Konzentrationen* zeigen für Wässer aus dem Gipskeuper höhere Dichtemittel (um 29 mval/l) als für den Mittleren Muschelkalk (18 mval/l).
- Die Verteilung der *Strontium-Konzentrationen* der Gipskeuperwässer weist ein Dichtemittel bei 0.23 mval/l auf, das deutlich höher ist, als dasjenige der Wässer aus dem Mittleren Muschelkalk mit 0.09 mval/l.
- Ein signifikanter Unterschied zeichnet sich auch im F/Sr-Äquivalentverhältnis ab, welches im Mittel für Wässer aus dem Mittleren Muschelkalk mit 0.64 bedeutend höher liegt als für Gipskeuper-Wässer (Dichtemittel bei 0.20).

Im nächsten Kapitel wollen wir auf eine weitere interessante Möglichkeit eingehen, wie in hydrochemischen Parametern gespeicherte, formationsspezifische Informationen zur Abklärung der Herkunft und genetischen Entwicklung eines Grundwassers genutzt werden können.

4.2. Stabile Isotopen im Sulfat

4.2.1 Einführung

4.2.1.1 Grundlagen

Da die Untersuchungsmethodik der stabilen Isotopen im Grundwasser mehrfach detailliert dokumentiert wurde (u.a. FRITZ & FONTES, 1980; FONTES & MICHELOT, 1983; BALDERER, 1983), verweisen wir für eine allgemeine Einführung auf diese Literatur. Hier möchten wir kurz die wichtigsten Grundlagen in Erinnerung rufen, die für die Untersuchung der *stabilen Isotopen im Sulfat* von Bedeutung sind, um uns dann der Diskussion ihrer Anwendungen im Rahmen unserer Untersuchungen im Gipskeuper zuzuwenden.

Wie bei der Diskussion von stabilen Isotopen üblich, so verwenden wir auch in dieser Arbeit die δ -Notation. Dabei wird das Verhältnis R des seltenen Isotopes zum normal häufigsten Isotop, wie es in der Probe analysiert wurde, in Beziehung zu einem Vergleichsstandard ausgedrückt.

$$\delta = \frac{R(\text{Probe})}{R(\text{Standard})} - 1$$

Normalerweise wird der δ -Wert in ‰ angegeben. Für hydrochemische Studien bezüglich der stabilen Isotopen im Schwefel-Zyklus wird üblicherweise das Verhältnis der beiden häufigsten Isotope $^{34}\text{S}/^{32}\text{S}$ gemessen (NIELSEN, 1979). Als Standard, auf den die Messungen bezogen werden, wird Troilit (FeS) aus dem Canyon Diablo Meteoriten verwendet. Die Zusammensetzung der Schwefelisotopen wird deshalb als $\delta^{34}\text{S} \text{ ‰}$ (CD) angegeben. Bei Sauerstoff im Sulfat (SO_4^{2-}) wird das Verhältnis $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ untersucht und auf den Standard Mean Ocean Water (SMOW) bezogen. Die Sauerstoffisotopen-Zusammensetzung wird folglich als $\delta^{18}\text{O} \text{ ‰}$ (SMOW) angegeben.

Für das im Grundwasser gelöste Sulfat gibt es grundsätzlich verschiedene Herkunftsmöglichkeiten. Der grösste Anteil stammt jedoch aus der Auslaugung von Evaporitgesteinen (PEARSON & RIGHTMIRE, 1980). Ausserdem kann Sulfat noch durch Oxidation von Sulfiden entstehen. In sehr kleinen Konzentrationen wird es auch aus der Atmosphäre über den Niederschlag ins Grundwasser gebracht, wie Beispiele in HESSLEIN et al. (1988) belegen.

Der Gehalt an stabilen Isotopen ^{34}S und ^{18}O im Sulfat-Ion (SO_4^{2-}) kann nun Aufschluss über den Ursprung des gelösten Sulfats sowie eventuell im Grundwasser abgelaufene Redox-Reaktionen geben (u.a. IAEA, 1983; BALDERER, 1985). Es gilt deshalb, anhand der gemessenen Zusammensetzung der stabilen Schwefel- und Sauerstoffisotopen im Sulfat dessen mögliche Herkunft zu erkennen und/oder abgelaufene Prozesse abzuschätzen, die zur vorliegenden Isotopenkonzentration geführt haben.

Marine Sulfate widerspiegeln in der Zusammensetzung ihrer stabilen Isotopen die Verhältnisse des Ozeans zur Zeit der Evaporit-Bildung (PEARSON & RIGHTMIRE, 1980). Bei der Ausfällung der Evaporite wird eine spezifische Fraktionierung in den stabilen Isotopen festgestellt: Verglichen mit dem noch in Lösung verbliebenen Sulfat ist das auskristallisierte Sulfat leicht an schweren Isotopen angereichert. Der Fraktionierungsfaktor für Sauerstoff liegt zwischen 3 und 4 ‰ (LLOYD, 1968; HOLSER et al., 1979; u.a.). Für Schwefel wurde eine Fraktionierung um 1.65 ‰ angenommen (THODE & MONSTER, 1965). Neuere Untersuchungen von FONTES & TOULEMONT (1987) zeigen jedoch, dass dieser Wert auf einen Bereich erweitert werden muss, der sich von 1.4 bis 3.4 ‰ erstreckt.

Die weltweiten Bestimmungen von $\delta^{34}\text{S}$ und $\delta^{18}\text{O}$ im Sulfat zeigen grosse Veränderungen dieser Isotopen-Zusammensetzung über geologische Zeiträume. Die stabilen Isotopen in den Evaporitvorkommen geologischer Formationen ver-

schiedenen Alters zeigen dabei typische Werte je nach Zeitepoche. Die Variationsbreite für $\delta^{18}\text{O}$ ist mit ungefähr 8 ‰ bedeutend kleiner, als mit rund 20 ‰ für $\delta^{34}\text{S}$. Diese Schwankungen werden allgemein als Resultat der globalen Bilanz unter den verschiedenen Schwefel-Spezies, ihrer Verfügbarkeit (d.h. ihrer Position im Erosions-Sedimentations-Zyklus zwischen Ozeanen und Sedimenten), sowie des globalen Redox-Milieus gedeutet. Die Meere stellen dabei neben den Evaporitvorkommen das grösste Reservoir an Sulfaten dar, das die erwähnte globale Bilanz in der Isotopen-Zusammensetzung widerspiegelt (u.a. CLAYPOOL et al., 1980).

Aus diesem Grund wurden Zeitkurven (sog. age curves) für $\delta^{34}\text{S}$ aufgestellt. Solche Kurven der Veränderungen der Zusammensetzung in Funktion der geologischen Zeit wurden für Schwefelisotopen von NIELSEN (1979), KROUSE (1980) und besonders von CLAYPOOL et al. (1980) publiziert. CLAYPOOL et al. (1980) präsentierte auch eine Variationskurve für $\delta^{18}\text{O}$ im Sulfat. Beide Isotopenzusammensetzungen, diejenige des Sauerstoffs wie des Schwefels, zeigen während der Trias eine starke Evolution. Es ist deshalb zu überprüfen, ob dieser Trend als diagnostisches Merkmal im Hinblick auf eine Unterscheidungsmöglichkeit der Mittel- von den Obertriassischen Evaporiten ausgewertet werden kann.

4.2.1.2 Ziel der Untersuchungen

Die Untersuchung der stabilen Isotopen im Sulfat, wie $\delta^{34}\text{S}$ und $\delta^{18}\text{O}$, wurde in der Vergangenheit mit Erfolg als Mittel zur Korrelation zwischen mineralisierten Grundwässern und dem Muttergestein der gelösten Sulfate eingesetzt. Beispiele finden sich in NIELSEN (1979), LANGGUTH & NIELSEN (1980), FONTES & MICHELOT (1983), SCHMASSMANN et al. (1984), BALDERER (1985), BALDERER et al. (1987) sowie YONGE & KROUSE (1987). Unter bestimmten Voraussetzungen kann die Zusammensetzung der stabilen Isotope im Sulfat demnach als formationsspezifischer Parameter gelten.

Bereits LANGGUTH & NIELSEN (1980) weisen jedoch darauf hin, dass ein Becken, welches vom grossen Reservoir der Ozeane abgeschnitten wird - auch wenn dies nur für geologisch kurze Zeiträume sein sollte -, in seiner Schwefelisotopen-Zusammensetzung eine nicht-„normale“, d.h. von den globalen Verhältnissen abweichende Entwicklung durchlaufen kann: Wenn wir einmal von der Verarmung der Restlösung an schweren Isotopen infolge der Sulfatausfällung absehen, so sind es bakterielle Prozesse (z.B. Reduktion des Sulfats) oder der Einfluss von kontinentalen Wässern mit „niedrigeren“ $\delta^{34}\text{S}$ Werten, die solche lokalen Veränderungen in der Isotopenzusammensetzung hervorrufen. Die von der Zusammensetzung der Meere abweichende Isotopenverteilung wird nun bei der Evaporitbildung übernommen. Bei einer späteren Auflösung der Sulfate wird die zur Zeit der Bildung „eingeprägte“ Isotopenzusammensetzung gewissermassen als „Gedächtnis“ mitgegeben. Ein Vergleich der in Grundwasserproben analy-

sierten Zusammensetzung der stabilen Isotopen im gelösten Sulfat mit Referenzwerten, die sich auf marine (bzw. globale) Verhältnisse beziehen, könnte in diesem Fall zu falschen Interpretationen führen.

Ein gutes Beispiel für die mancherorts komplizierten Herkunftsverhältnisse des gelösten Sulfats wird von den Eocaenen Gipsvorkommen des Pariser Beckens berichtet (FONTES & LETOLLES, 1976; FONTES & TOULEMONT, 1987). In diesem Sulfat sind $\delta^{34}\text{S}$ Werte beobachtet worden, die niedriger als die normal-marinen Werte des Tertiärs sind (mittlere Abweichung um 6 ‰). Auf der Basis eines Vergleiches der Isotopenzusammensetzung im Sulfat wurde nun ein kontinentaler Ursprung für diese Obereocaenen Gipsablagerungen postuliert, wobei ältere Permotriassische Sulfate ausgelaugt und im Tertiär remobilisiert wurden.

Aus den vorangestellten Überlegungen wird deutlich, dass sowohl für eine detaillierte Interpretation von regionalen hydrogeologischen Daten, als auch insbesondere für die Diskussion der Herkunft des gelösten Sulfats, regionale Referenzdaten von grosser Wichtigkeit sind. Dies trifft speziell für die Trias-Evaporite der Nordschweiz zu, wenn wir bedenken, dass sie eine Randfazies des nördlich angrenzenden Germanischen Keupers darstellen und zudem während der Bildung in Kontakt mit kontinentalen Einflüssen aus den umliegenden Kristallinmassiven gekommen sein dürften (FREY, 1969; PRASAD, 1970; DRONKERT, 1987). Referenzdaten für die Isotopenzusammensetzung im Sulfat waren jedoch bis anhin aus dem Schweizer Gipskeuper nicht verfügbar. Es ist deshalb auch ein Ziel der vorliegenden Untersuchungen, Daten über die Zusammensetzung der stabilen Isotopen im Gipskeuper des Schweizer Jura bereitzustellen. In einem zweiten Schritt sollen verfügbare Analysen aus Gipskeuper-Wässern mit diesen Referenzdaten verglichen werden (RICK, 1990). Dabei wird sich auch die Frage stellen, inwiefern die Sulfatwässer des Mittleren Muschelkalk von denjenigen des Gipskeupers in der Isotopenzusammensetzung unterschieden werden können.

4.2.2 Untersuchungen im Gipskeuper

Die Analyse unserer Wasser- und Mineralproben die alle aus dem Gipskeuper des Schweizer Jura stammen, konnte in den Labors von Prof. J.-Ch. Fontes, Orsay (Frankreich) durchgeführt werden.

Lithostratigraphisch horizontierte Mineralproben konnten wir aus dem Gipskeuper-Profil in der Gipsgrube Riepel gewinnen. Dieses Profil wurde hinsichtlich seiner geographischen Lage und stratigraphischen Bedeutung bereits ausführlich in Kapitel 1.3.3 diskutiert. Aus dem Profil Riepel haben wir 5 Mineralproben (Gips) bezüglich der Zusammensetzung der stabilen Isotopen im Sulfat untersucht. Dazu kam eine Gipsprobe aus einer Bohrung bei Ennetbaden. Diese Probe entstammte der tiefsten lithostratigraphischen Einheit des Gipskeupers, welche im Profil Riepel leider

nicht zugänglich ist. Die Resultate der Isotopen-Bestimmungen an Mineralproben sind in Tabelle 4.5 wiedergegeben.

Um Hinweise auf die Variationsbreite der Isotopenzusammensetzung im gelösten Sulfat von Gipskeuperwässern zu erhalten, haben wir auch einige *Wasserproben* in die Untersuchungen miteinbezogen. Aus dem angewitterten-verwitterten Gipskeuper von Ennetbaden stammen 3 Proben, während aus dem aktiven Gipskarst aus dem Profil Riepel 2 Wasser beprobt werden konnten, die innerhalb dieses Profils perkolieren und über einer mergeligen Schicht, bzw. am Fusse einer Doline austreten. Die Resultate der Isotopen-Bestimmungen am gelösten Sulfat sind in Tabelle 4.6 zusammen mit Daten von SCHMASSMANN et al. (1984) von 4 Mineralquellen aus dem Gipskeuper und einer Quelle aus dem Mittleren Muschelkalk dargestellt. Die Sulfatwässer, die in der ungesättigten Zone des unterschiedlich verwitterten Gipskeupers perkolieren, weisen Sulfat-Konzentrationen bis zu 1.5 g/l SO_4^{2-} bei einer totalen Mineralisation bis 63 mval/l auf. Sie können deshalb als Zeugen der oberflächen-

Tabelle 4.5 Zusammensetzung der stabilen Isotopen im Sulfat des Gipskeupers.

Probe	Herkunft	Sulfat-Fazies	Einheit 1)	$\delta^{34}\text{S}$ (‰)	$\delta^{18}\text{O}$ (‰)
R1	Riepel	Gips-Knolle	IA	+15.4	+ 7.99
R2	Riepel	Gips, massig	IIIB	+16.9	+11.71
R3	Riepel	Gips, gebändert	IV	+16.6	+11.20
R4	Riepel	Gips, gebändert	IV	+15.8	+12.09
E1	Ennetbaden	chickenwire	V	+17.4	+12.79
R5	Riepel	Fasergips-Kluft	II	+16.8	11.85

1) lithostratigraphische Einheiten nach DRONKERT (1987)

nahen Gipsauslaugung gelten. Für eine detaillierte Diskussion der hydrochemischen Zusammenhänge in diesen Wässern wird auf unsere Ausführungen in Kapitel 4.1 verwiesen.

Tabelle 4.6 Zusammensetzung der stabilen Isotopen im Sulfat in Grundwässern des Gipskeupers und des Mittleren Muschelkalk.

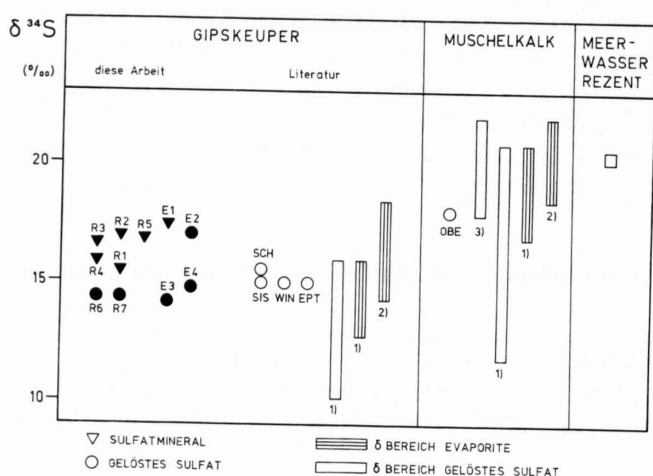
Probe	Herkunft	Mineralisation (mval/l)	Sulfat-Gehalt (mg/l)	$\delta^{34}\text{S}$ (‰)	$\delta^{18}\text{O}$ (‰)	Referenz
<i>aus dem Gipskeuper:</i>						
E2	Ennetbaden	63.7	1510	+17.0	+11.28	
E3	Ennetbaden	30.2	850	+14.1	+10.62	
E4	Ennetbaden	28.9	1100	+14.7	+11.09	
R6	Riepel	31.8	1200	+14.3	+11.76	
R7	Riepel	21.0	900	+14.3	+7.70	
SIS	Sissach	37.2	1514	+14.9		1)
WIN	Wintersingen	37.9	1568	+14.9		1)
SCH	Schinznach	34.6	1324	+15.5		1)
EPT	Eptingen	20.0	811	+14.9	+12.84	1)
<i>aus dem Mittleren Muschelkalk:</i>						
OBE	Oberdorf	26.7	1041	+18.0		1)

1) SCHMASSMANN et al. (1984)

4.2.3 Diskussion der Resultate

4.2.3.1 Zusammensetzung der Schwefel-Isotopen im Sulfat des Gipskeupers

Da SCHMASSMANN et al. (1984) Schwefelisotopen-Daten von schweizerischen Mineralwässern aus dem Gipskeuper und dem Mittleren Muschelkalk publizierte, haben wir in Figur 4.18 unsere eigenen sowie verfügbare Literaturdaten als Synthese zusammengestellt. Unsere neuen $\delta^{34}\text{S}$ Daten von Sulfatmineralien aus der späten Trias bewegen sich in einem Bereich zwischen +15.4 und +17.4 ‰ (CD) mit einem Mittelwert von +16.5 ‰ (CD). Wie auf Figur 4.18 schön zu sehen ist, stimmen unsere Mineral-Daten bezüglich $\delta^{34}\text{S}$ gut mit den entsprechenden Werten aus Deutschland von NIELSEN & RICKE (1964) und NIELSEN (1979) überein.



Figur 4.18 $\delta^{34}\text{S}$ Werte von Trias Evaporiten verglichen mit publizierten Daten aus der Nordschweiz und Deutschland; ausgefüllte Symbole bezeichnen neue Daten dieser Untersuchung. 1)= NIELSEN (1979); 2)= NIELSEN & RICKE, (1964); 3)= Oberer Muschelkalk, BALDERER (1985).

Die Schwefelisotopen-Zusammensetzung der Wasserproben lässt sich ebenfalls gut mit den publizierten Daten von Mineralwässern aus dem Jura vergleichen. Die Werte für $\delta^{34}\text{S}$ sämtlicher Wasserproben liegen innerhalb der durch die Literaturdaten repräsentierten Variationsbreite für $\delta^{34}\text{S}$ im Gipskeuper. Verglichen mit dem mittleren $\delta^{34}\text{S}$ Wert unserer Mineralproben sind die Werte einiger Wasserproben leicht tiefer. Die maximale Abweichung beträgt 2.3 ‰. Theoretisch könnte eine Erniedrigung des $\delta^{34}\text{S}$ Wertes als ein Resultat geringer Beimischungen oxidierter Sulfide erklärt werden. Durch die Oxidation von Sulfid wird jedoch Sulfat mit einer charakteristischen Sauerstoffisotopen-Zusammensetzung produziert: Der im Sulfat gebundene Sauerstoff widerspiegelt die Isotopenzusammensetzung des bei der Oxidation eingefangenen Sauerstoffs. Dabei nehmen am Oxidationsprozess sowohl der im Wasser gelöste, wie

auch der im Wassermolekül enthaltene Sauerstoff teil. Dieser Sachverhalt wurde unter anderen Autoren von LLOYD (1968), IAEA (1983) und FONTES & TOULEMONT (1987) diskutiert. $\delta^{18}\text{O}$ Werte des Niederschlags im Untersuchungsgebiet des Schweizer Jura wurden im Bereich von -8 bis -12 ‰ (SMOW) gemessen, wobei die Werte eine signifikante Korrelation zur absoluten Höhe über Meer zeigen (SCHMASSMANN et al., 1984). Durch Oxidation von Sulfiden produziertes Sulfat hätte demnach einen $\delta^{18}\text{O}$ Wert nahe bei 0 ‰. Die resultierenden Werte für Wasserproben, die Anteile von oxidiertem Sulfid enthalten, wären demnach viel tiefer als für Proben, die ihr Sulfat aus der Auflösung von Evaporiten erhalten. Abgesehen von einer Probe (R7), deren hydrochemischen Evolution wir später noch nachgehen werden, lassen die bestimmten $\delta^{18}\text{O}$ Werte nicht auf oxidiertes Sulfid schliessen.

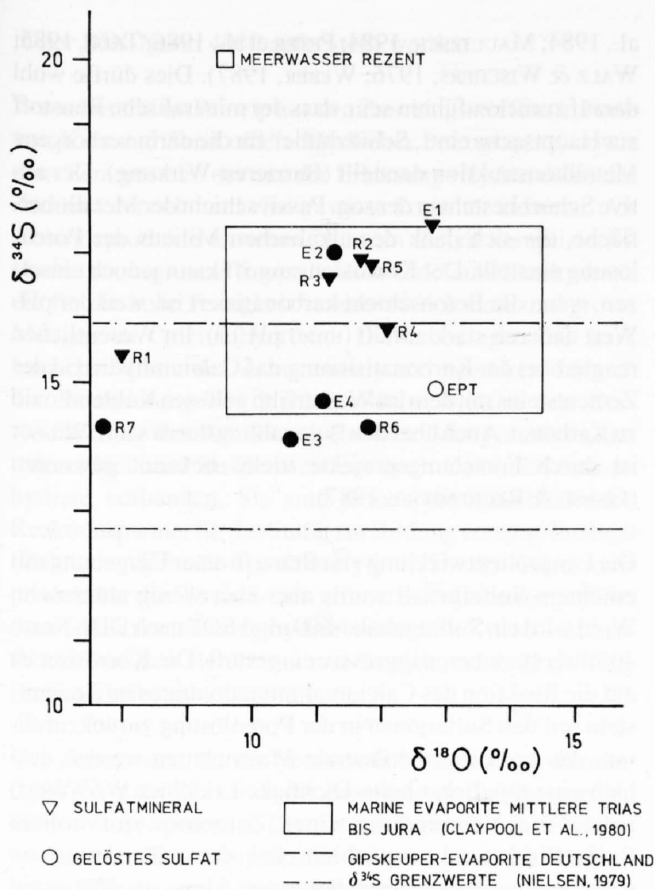
4.2.3.2 Zusammensetzung der Sauerstoff-Isotopen im Sulfat des Gipskeupers

Die Zusammensetzung der stabilen Isotope des Sauerstoffs im Sulfat enthält Informationen über die Herkunft des Sulfats. Ausserdem widerspiegelt sie die hydrogeochemische Evolution des Grundwassers in Bezug auf oxidierende und reduzierende Prozesse, die den Sauerstoff im Sulfat miteinbeziehen (PEARSON & RIGHTMIRE, 1980; IAEA, 1983; BALDERER, 1985). Wir haben deshalb in unseren Mineral- und Wasserproben auch die $\delta^{18}\text{O}$ Werte im Sulfat untersucht. Mit Ausnahme von einer Probe (R1), auf die noch später eingegangen wird, bewegen sich die $\delta^{18}\text{O}$ Werte in Mineralproben (Gips) aus dem Gipskeuper zwischen +11.20 und +12.79 ‰ (SMOW).

Die Beziehung zwischen $\delta^{34}\text{S}$ und $\delta^{18}\text{O}$ im Sulfat haben wir in Figur 4.19 dargestellt. Die Grundwasserdaten aus dem Gipskeuper korrelieren gut mit den bisher bekannten Gesteinswerten aus dem Gipskeuper. Die Resultate sind auch einigermaßen in Übereinstimmung mit den $\delta^{34}\text{S}$ Grenzwerten der Gipskeuper-Evaporite Deutschlands nach NIELSEN (1979), wenngleich dieser Bereich für den Gipskeuper des Schweizer Jura nach oben etwas erweitert werden muss. Gute Übereinstimmung wird erzielt mit dem Bereich für marine Evaporite der Mittleren Trias bis Jura nach CLAYPOOL et al. (1980).

Die vorliegenden Resultate aus der randlichen Fazies des Schweizer Gipskeupers lassen im Vergleich mit der normalmarinen Entwicklung in der Trias keine signifikante Abweichung in der Zusammensetzung der stabilen Isotope im Sulfat erkennen. Die Abweichung von 2 Proben zu leicht „niedrigeren“ $\delta^{18}\text{O}$ Werten bedarf jedoch weiterer Erklärungen:

- 1) Die Probe R7 wurde als im ungesättigten Bereich perkolierendes Wasser aus einer Kluft im Gipskeuper gewonnen. Da dieses Wasser unter oxidierenden Bedingungen stand, wäre folgende Erklärung für die „leichteren“ Isotopenwerte denkbar: Das Meteorwasser aus dem lokalen Niederschlag löst entlang von Spalten und



Figur 4.19 Beziehung zwischen $\delta^{34}\text{S}$ und $\delta^{18}\text{O}$ in gepaarten Analysen an Proben aus dem Gipskeuper; ausgefüllte Symbole bezeichnen neue Daten dieser Untersuchung.

Schichtgrenzen anstehenden Gips. Andererseits ist dieses Wasser auch der Evaporation ausgesetzt. Remobilisierung und Wiederausfällung von Gips ist im Gipsprofil Riepel geologisch nachweisbar durch beobachtbare Karbonat- und Gipskrusten, die lokal die Lithologie überziehen. Analytisch konnten bisher keine Hinweise auf eine Isotopenfraktionierung während der chemischen Auflösung von Gips festgestellt oder nachgewiesen werden (CLAYPOOL et al., 1980). Andererseits bestehen Anzeichen für eine schrittweise Fraktionierung während der Wiederausfällung (FONTES & MICHELOT, 1987). Es ist bekannt, dass der Effekt der Fraktionierung bei der Kristallisation für Sauerstoff grösser ist als für Schwefel. Dargestellt auf dem Diagramm $\delta^{34}\text{S}$ versus $\delta^{18}\text{O}$ (vgl. Figur 4.19) bewegt sich die Isotopen-Zusammensetzung der Restlösung, welche diesem Fraktionierungseffekt unterliegt, von einer ursprünglichen Zusammensetzung weg (auf einer Geraden mit der Steigung 0.5) in Richtung kleinerer $\delta^{18}\text{O}$ und leicht erniedrigter $\delta^{34}\text{S}$ Werte. Basierend auf diesen Überlegungen halten wir es für wahrscheinlich, dass die Isotopenzusammensetzung der Probe R7 das Resultat in einer Restlösung darstellt, die durch eine frühere Ausfällung bereits an schweren Isotopen „verarmte“.

Als weiterer Mechanismus für eine Isotopen-

Fraktionierung könnte Bioaktivität in Frage kommen. Speziell wäre hier die bakterielle Reduktion des gelösten Sulfats zu nennen. Im Detail ist dieser biochemische Prozess äusserst kompliziert. Letztlich führt er zu an schweren Isotopen angereichertem Sulfat im Vergleich mit der Ausgangszusammensetzung. Die Bakterien bevorzugen nämlich die „leichten“ Isotopen ^{32}S und ^{16}O (MIZUTANI & RAFTER, 1973; KROUSE, 1980). Zudem ist dieser Prozess begleitet von einem Sauerstoffaustausch, der die Zusammensetzung von $\delta^{18}\text{O}$ im Sulfat auch beeinflusst: Laborexperimente weisen auf einen Isotopenaustausch im Sauerstoff zwischen Wasser und Sulfat hin (FRITZ et al., 1989). Theoretisch wäre es möglich, dass nun reduzierter Schwefel einer Re-Oxidation unterworfen wird. Ein entsprechendes Beispiel einer Schwefelquelle wurde von VAN EVERDINGEN (1982) publiziert. Da nun aber in unserem Beispiel kein reduzierter Schwefel - weder Pyrit noch Anzeichen von H_2S - festgestellt werden konnten, halten wir die erste Interpretation zum jetzigen Zeitpunkt für eine vernünftige Arbeitshypothese.

- Die Mineralprobe R1 musste dem Gipskeuper-Profil Riepel sehr oberflächennah entnommen werden. Es kann deshalb nicht vollständig ausgeschlossen werden, dass diese Probe von Verwitterungs-, Auslaugungs- und Wiederausfällungsprozessen beeinflusst wurde. Da es jedoch die einzig verfügbare Probe aus der lithostratigraphisch obersten Einheit des Gipskeupers war, erachteten wir es von Interesse, auch in dieser Probe die Isotopenzusammensetzung zu erfassen. Angenommen, dass die Vorgabe der schrittweisen Isotopenfraktionierung in einem Lösungs/Wiederausfällungszyklus - wie oben dargelegt - korrekt ist, so lässt sich die Zusammensetzung der stabilen Isotopen im Sulfat der Probe R1 relativ einfach erklären: Sie entspricht einem Sulfat, das aus einer Lösung kristallisierte, die ihrerseits durch eine frühere Ausfällung an schweren Isotopen bereits angereichert worden ist.

Die Abweichungen der gemessenen Werte von den Mittelwerten sind relativ klein. Für $\delta^{18}\text{O}$ sind die Differenzen um 4 ‰, währenddem sie für $\delta^{34}\text{S}$ 1-2 ‰ betragen.

4.2.3.3 Vergleich mit den Evaporiten der Mittleren Trias

Die einzige zur Zeit unserer Untersuchungen verfügbare Angabe über die Isotopen-Zusammensetzung des Mittleren Muschelkalk aus dem Schweizer Jura betrifft die Mineralquelle Oberdorf. SCHMASSMANN et al. (1984) meldet von ihr einen Wert $\delta^{34}\text{S} +18.0$ ‰ (CD).

Beide Sulfatwässer (aus dem Gipskeuper und aus dem Mittleren Muschelkalk) zeigen eine chemisch vergleichbare Zusammensetzung (SCHMASSMANN et al., 1984), was bei einer ähnlichen hydrochemischen Entwicklung durch die Sulfat-Auslaugung naheliegt. In ihrer Zusammensetzung

der stabilen Isotopen im Sulfat könnten sie sich jedoch unterscheiden. Die verfügbaren Daten weisen auf niedrige $\delta^{34}\text{S}$ Werte in den Evaporiten des Gipskeupers im Vergleich mit dem Mittleren oder Oberen Muschelkalk hin (vgl. Fig. 4.18). In diesem Sinne könnten bei der Frage nach der Herkunft der Mineralisation von Sulfatwässern die Analyse der stabilen Isotopen im Sulfat - neben den hydrochemischen Indizien, wie wir sie in Kapitel 4.1.3 aufgezeigt haben - von Nutzen sein. Für eine detailliertere Diskussion müsste jedoch vorerst ein Satz an Referenzdaten der Isotopenverteilung im Sulfat des Mittleren Muschelkalk aufgestellt werden, wie wir dies für den Gipskeuper in dieser Arbeit getan haben.

4.3 Bautechnische Aspekte der Sulfatwässer

4.3.1 Ziel der Untersuchungen

Ingenieurgeologische Untersuchungen der Praxis werden mit dem Ziel durchgeführt, detaillierte Angaben über den Baugrund zu erhalten. Diese Informationen dienen als Bemessungsgrundlagen für die Dimensionierung und Ausführung des Bauvorhabens. Ausserdem sollen sie eine Beurteilung der möglichen Wechselwirkungen zwischen Bauwerk und Boden erlauben. Bei der Diskussion der physikalisch-chemischen Reaktionen ist nicht nur die Natur der Festsubstanz des Untergrundes, sondern auch des Poren- und Grundwassers von grossem Interesse. In diesem Kapitel wollen wir uns deshalb mit bautechnischen Auswirkungen mineralisierter Grund- und Porenwässer befassen, wie sie durch die Verwitterung sulfatführender Formationen entstehen.

Unter *Korrosion* wird nach KNÖFEL (1982) die nachteilige Einwirkung auf einen Baustoff (Metalle, mineralische Baustoffe) durch das ihn umgebende meist flüssige Medium verstanden. Sie führt mit der Zeit zu einer messbaren Veränderung des Baustoffes und gegebenenfalls zu seiner vollständigen Zerstörung. Meistens können Schäden, die im Laufe der Zeit an konstruktiven Bauteilen auftreten, saniert werden. Im Falle jedoch von nicht mehr zugänglichen Elementen (z.B. Pfahlfundationen, Ankerverpressungen, Deponieabdichtungen), die für die Tragfähigkeit oder Dichtigkeit eines Bauwerkes von grosser Bedeutung sind, kann eine Schädigung bzw. Zerstörung des Bauteiles nicht hingenommen werden. Damit die Planer und Ingenieure jedoch geeignete Gegenmassnahmen ergreifen können - Korrosionsschutz, anderer Baustoff -, muss der Mechanismus der Zerstörung im Detail bekannt sein.

In der betontechnologisch orientierten Literatur finden wir viele Untersuchungen über das Verhalten des Betons bei Chlorid-Korrosion, sowie die Bedeutung der Karbonatisierung (u.a. BRODERSEN, 1982; KÖLLIKER, 1985; LOCHER et

al., 1984; MAULTZSCH, 1984; PETER et al., 1986; TRÜB, 1985; WALZ & WISCHERS, 1976; WEBER, 1987). Dies dürfte wohl darauf zurückzuführen sein, dass der mineralische Baustoff zur Hauptsache eine „Schutzhülle“ für die darin verborgene Metallkonstruktion darstellt (Barrieren-Wirkung). Der aktive Schutz besteht in der sog. Passivschicht der Metalloberfläche, die sich dank des alkalischen Milieus der Porenlösung einstellt. Der Korrosionsangriff kann jedoch einsetzen, wenn die Betonschicht karbonatisiert ist, weil der pH-Wert dadurch stark abfällt (unter pH 10). Im Wesentlichen reagiert bei der Karbonatisierung das Calciumhydroxid des Zementsteins mit dem im Wasserfilm gelösten Kohlendioxid zu Karbonat. Auch über den Betonabtrag durch saure Wässer ist durch Forschungsprojekte vieles bekannt geworden (GRUBE & RECHENBERG, 1987).

Die Langzeitentwicklung von Beton in einer Umgebung mit erhöhtem Sulfatgehalt wurde aber eher wenig untersucht. Wohl wird ein Sulfatgehalt $>600 \text{ mg/l SO}_4^{2-}$ nach DIN-Norm 4030 als stark betonaggressiv eingestuft. Die Korrosion ist auf die Reaktion des Calciumaluminathydrates im Zementstein mit den Sulfationen in der Porenlösung zurückzuführen. Als korrosionshemmende Massnahmen werden deshalb eine möglichst hohe Dichtigkeit (kleiner W/Z-Wert) sowie die Verwendung eines Zementes mit hohem Sulfatwiderstand empfohlen, bei dem der Anteil an Calciumaluminathydraten besonders klein ist (KÖLLIKER, 1985; LUKAS, 1980; PETER et al., 1986; SPRUNG 1978). Weil jedoch bekannt ist, dass auch solche Betone langfristige Veränderungen erfahren können - z.B. Wieder-Freisetzung des gebundenen Sulfats bei der Karbonatisierung (ÖCHSNER et al., 1983) - wollten wir, angeregt durch Bedürfnisse der Praxis, Anhaltspunkte zur langfristigen Entwicklung von Beton in Erfahrung bringen, die einer chemischen Umgebung ausgesetzt werden, wie sie in den Böden der sulfatführenden Mergelserien des Schweizer Jura vorliegt. Unsere Untersuchungen haben keinen abschliessenden Charakter und erheben keinen Anspruch auf Vollständigkeit bezüglich der betontechnischen Aspekte wie Transportmechanismen im Zementstein, Art der Mineralausblühungen etc. Der Sinn der Abklärungen bestand vielmehr im Versuch, Tendenzen in der langfristigen Entwicklung aufzuzeigen, wie sie konstruktive Teile (z.B. Beton-Pfahlfundationen, Betonabdichtungen unter Deponien) in sulfatführenden Böden unter dem Einfluss der entsprechenden Poren- und Grundwässer erfahren können.

4.3.2 Grundlagen der Beton-Korrosion

Im Grund- und Tiefbau wird als mengenmässig häufigster Baustoff Beton verwendet. Da dieser Werkstoff zwar schon von den Römern erfolgreich verwendet (SOMMER, 1987), jedoch als Folge der erweiterten Anwendungsbereiche auch die Abhängigkeit der Dauerhaftigkeit von der chemischen Umgebung erkannt wurde, ist es heutzutage ratsam, auf schädigende Einflüsse bereits bei den geotechnischen Voruntersuchungen zu achten. Richtlinien für die Beurteilung betonangreifender Wässer, Böden und Gase sind z.B.

in der DIN-Norm 4030 aufgestellt worden.

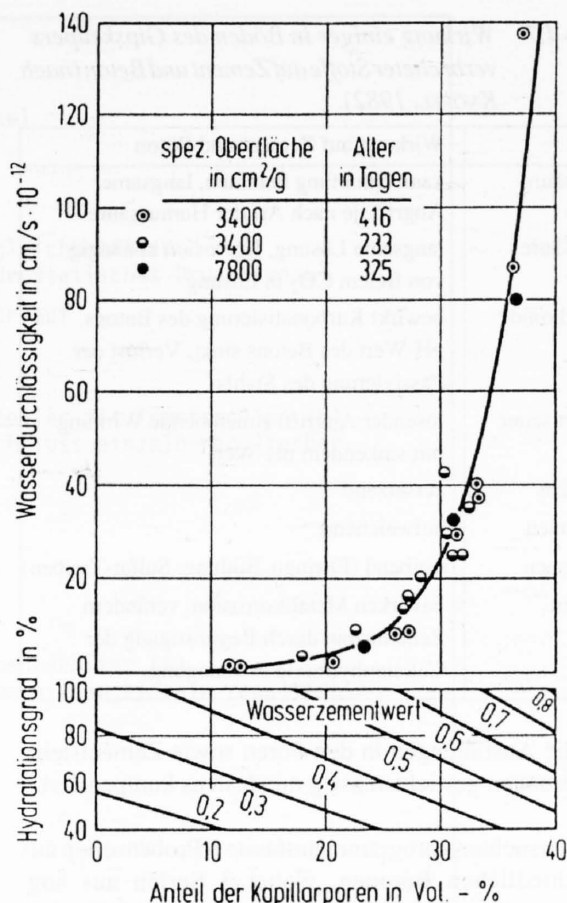
Beton besteht im Prinzip aus den Zuschlagsstoffen (in Form von Kies und Sand unterschiedlicher Petrographie) sowie dem Zementstein, der aus der Erhärtung (Hydratation) des Zements entsteht und eine gewisse Porosität aufweist. Als Abbindeprodukte entstehen beim im Detail komplizierten Hydratationsprozess hauptsächlich Calciumsilikathydrate, die für die hohe Festigkeit verantwortlich sind, und grosse Mengen an Calciumhydroxid. Diese bedingen das stark basische Milieu des Zementsteins und bewirken dadurch die Passivierung der Stahloberfläche, welche den Korrosionsschutz der Armierung darstellt. Mengenmässig untergeordnet sind im Zementstein noch Calciumaluminathydrate vorhanden. Sie sind jedoch die entscheidenden Reaktionspartner für das Sulfat zur Bildung von sog. Ettringit (Calcium-Aluminat-Trisulfat-Hydrat). Dieses Korrosionsprodukt übt durch sein 8-fach grösseres Volumen gegenüber dem Tricalciumaluminathydrat bedeutende Kristallisationsdrücke auf den Beton aus und bewirkt seine Zerstörung (Sulfat-Treiben).

Der Zementstein ist im Normalfall bezüglich der Beständigkeit empfindlicher als die Zuschlagsstoffe (PETER et al., 1986), weil er porös ist. Die Art des Porengefüges ist dabei von grosser Bedeutung für die Beständigkeit. Im Wesentlichen können zwei Arten von Poren unterschieden werden:

- a) Die Kapillar- und Gelporen entstehen bei der Hydratation des Zementes und sind für den Wasser- und Gastransport im Zementstein wesentlich.
- b) Die Luftporen sind nicht wasserführend. Sie dienen jedoch bei Frost- und Kristalldruck als Expansionsräume und erhöhen so die Beständigkeit.

Zur vollständigen Hydratation des Zementes sind nach KNÖFEL (1982) ca 30% Wasser (bezogen auf das Zementgewicht) nötig für chemische Bindungen. Etwas Wasser wird zusätzlich physikalisch angelagert. Der restliche Teil des Zugabewassers bei der Betonherstellung hinterlässt nach seiner Verdunstung Poren im Zementstein (Kapillarporen). Deshalb wird der Zementstein umso poröser, d.h. auch durchlässiger sein, je mehr überschüssiges Wasser vorhanden ist, bzw. je grösser der sog. W/Z-Wert angesetzt wird. Wie aus Figur 4.20 ersichtlich, kann eine höhere Dichtigkeit des Werkstoffes Beton durch hohen Hydratationsgrad und niedrige W/Z-Werte angestrebt werden. Ein hoher Hydratationsgrad wird dabei vornehmlich durch eine lange feuchte Nachbehandlung erreicht, bei der verhindert wird, dass das Wasser verdunstet, bevor die Hydratation vollständig ablaufen konnte. Bei im Boden ganz eingebundenem Beton (z.B. Pfahlfundation) ist die vollständige Hydratation in den meisten Fällen durch die konstante Bodenfeuchte gewährleistet. Ein entsprechend grosser Einfluss kommt deshalb der Wahl eines möglichst kleinen W/Z-Wertes zu.

Die korrosionsfördernden Stoffe werden durch Wasser in allen Aggregatzuständen an den Baustoff getragen. Bei der Korrosionsreaktion selbst kann zwischen lösendem Angriff



Figur 4.20 Wasserdurchlässigkeit des Betons in Abhängigkeit vom Wasserzementwert (W/Z) und vom Hydratationsgrad (aus GRÄF & GRUBE, 1986; Fig. 14).

(z.B. durch weiche Wässer, Säuren, organische Öle und Fette) und treibendem Angriff (z.B. durch Sulfat, Magnesiumsalze) unter Bildung von schwerlöslichen, voluminösen Reaktionsprodukten unterschieden werden. Tabelle 4.7 gibt einen Überblick über die Wirkung einiger Stoffe, die in den Böden sulfathaltiger Mergelserien (z.B. des Gipskeupers) anzutreffen sind.

4.3.3 Untersuchungsprogramm

Dichter Beton mit kleiner Wasserdurchlässigkeit zeigt eine entsprechend hohe Festigkeit. Andererseits führen lösende und treibende Korrosionserscheinungen im Beton zu einer Verminderung der Festigkeit. Ausserdem gilt die Druckfestigkeit nach 28 Tagen gemäss der SIA-Norm 162 als Qualitätsprüfung für den Beton. Als quantitative Grösse zur Erfassung der Qualitätsveränderung haben wir deshalb die Entwicklung der Würfeldruckfestigkeit benutzt. Qualitative Veränderungen konnten zusätzlich durch eine periodische, makroskopische Probenbeschreibung erfasst werden. Der Versuch, über Gewichtsveränderungen die Lösungs- und Abplatzungserscheinungen an den Proben quantitativ zu erfassen, führte nicht zu befriedigenden Ergebnissen: Auch nach 2 Jahren waren bei sichtbaren Korrosionserscheinungen keine entsprechenden Gewichtsveränderungen zu verzeichnen. Vermutlich werden allfällige Lösungsverluste

Tabelle 4.7 Wirkung einiger in Böden des Gipskeupers verbreiteter Stoffe auf Zement und Beton (nach KNÖFEL, 1982).

Stoff	Wirkung auf Zement und Beton
Humussäure	kann Erhärtung hemmen, langsamer Angriff, je nach Art der Humussäure
Kohlensäure	langsame Lösung, Korrosion abhängig von freiem CO ₂ in Lösung
Kohlendioxid	bewirkt Karbonatisierung des Betons, pH-Wert des Betons sinkt, Verlust der Passivierung des Stahls
pH-Wert sauer (<6.5)	lösender Angriff, zunehmende Wirkung mit sinkendem pH-Wert
Bittersalze	zersetzend
Mg ²⁺ -Ionen	aufweichend
SO ₄ ²⁻ -Ionen	treibend (Ettringit-Bildung: Sulfat-Treiben)
Cl ⁻ -Ionen	bewirken Metallkorrosion; verändern Zementstein durch Begünstigung der Calciumhydroxid-Auslaugung

durch die Ausfällungen in den Poren sowie Zementsteinveränderungen gewichtsmässig mindestens kompensiert.

Das Untersuchungsprogramm umfasste 6 Probenserien aus unterschiedlichen Betonen, wobei 3 Serien aus sog. sulfatbeständigem Zement hergestellt wurden (d.h. Zement mit geringem Anteil an Calciumaluminathydraten; Handelsname Sulfacem). Die betontechnischen Kenndaten der verwendeten Betone sind in Tabelle 4.8 aufgelistet. Die Betone wurden in der gleichen Zusammensetzung für die Versuche verwendet, wie sie in der Praxis auf der Baustelle eingesetzt wurden. Sie standen uns in Form von Normprüfkörpern (Würfel mit Kantenlänge 20 cm) zur Verfügung, aus denen wir die Proben als Würfel mit der Kantenlänge 5 cm sägten. So entstand jeweils eine Serie von mindestens 6 Proben der gleichen Betonsorte. Total wurden 50 Probenkörper untersucht.

Tabelle 4.8 Betontechnische Kenndaten der Probenserien.

Probenserie	A	B	C	D	E	F
Zementart	PC400	PC400	PC400	PC400S	PC450S	PC400S
sulfatbeständig	--	--	--	x	x	x
W/Z-Wert	0.50	0.45	0.52	0.50	0.44	0.42
f _{cw28} N/mm ²	30	35	40	50	59	63
Rohdichte kg/m ³	2299	2238	2283	2361	2320	2365
Porosität %	18.7	17.3	15.8	13.4	14.7	13.3

Um den Einfluss der Sulfatwässer auf den Beton in Relation zur „normalen“ Entwicklung zu sehen, haben wir die Proben in folgende Medien eingelagert (Temperatur konstant, 20 °C):

- 1) Luft, rel. Luftfeuchtigkeit 45%
- 2) Luft, rel. Luftfeuchtigkeit 90%
- 3) Destilliertes Wasser
- 4) Sulfatwasser mit 1.5 g/l SO₄²⁻; Na-Ca-(Mg)-Cl-SO₄- (HCO₃)
- 5) Sulfatwasser mit 10 g/l SO₄²⁻; Na-SO₄

Das Medium 4) entspricht in seinem Chemismus einem natürlichen Sulfatwasser (z.B. Badener Thermalwasser).

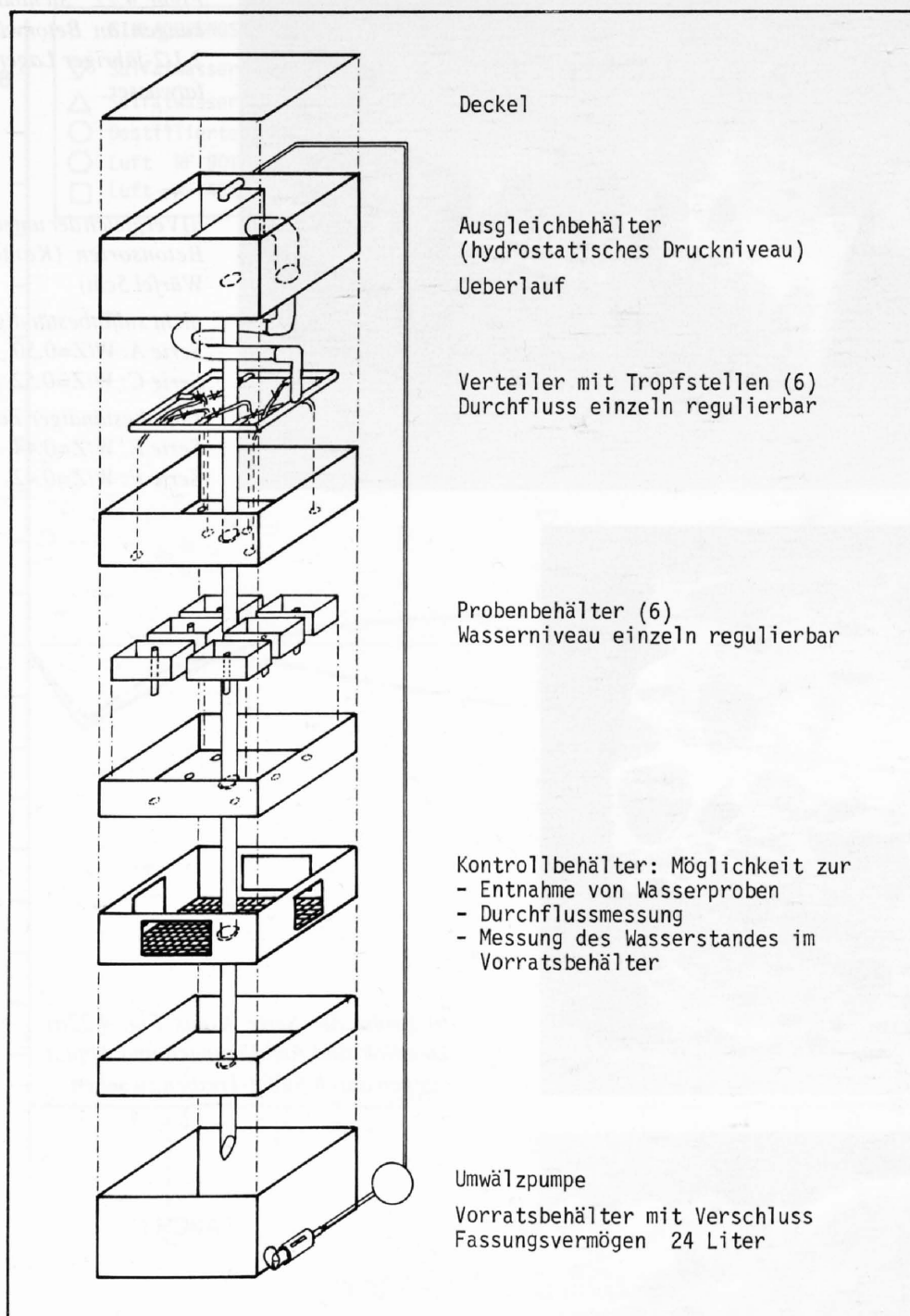
Ausserdem wollten wir etwas der Frage nachgehen, inwiefern die Betonkorrosion durch Sulfat auch von der Fliessgeschwindigkeit des Mediums abhängt. Dazu musste eine Vorrichtung konstruiert werden, die es erlaubte, einerseits den Benetzungsgrad der Proben (Wasserstand) und andererseits die Wassermenge zu regulieren, die an der Probe vorbeifliessen sollte. Die Vorrichtung musste rund um die Uhr automatisch in Betrieb bleiben und die Kontrolle des Chemismus des umgewälzten Mediums sowie der Durchflussmengen erlauben. Der Aufbau dieser Apparatur, die wir aus inerten Plastik-Elementen konstruierten, geht aus Figur 4.21 hervor.

Die Versuchsdauer erstreckte sich insgesamt auf rund 3 Jahre, wobei erste Proben nach 3 Monaten durch die Druckfestigkeitsprüfung zerstört werden mussten. Nach Versuchsende haben wir bei allen Proben die Würfeldruckfestigkeit ermittelt und in Beziehung zur Druckfestigkeit nach 28 Tagen (Festigkeit zu Versuchsbeginn) gesetzt.

4.3.4 Ergebnisse der Langzeituntersuchungen

Die Resultate unserer mehrjährigen Korrosionsversuche sind auf den Figuren 4.22 bis 4.25 dargestellt. Auf Fig. 4.22 sind die makroskopisch sichtbaren Auswirkungen zu sehen. Deutlich zu erkennen sind *Aufblähungen* und *Abplatzungen* durch Sulfat-Treiben bei nicht sulfatbeständigen Zementen. Die voluminösen Ausscheidungsprodukte sind dabei besonders entlang von Korngrenzen und in grösseren Poren zu beobachten. Die sulfatbeständigen Betone zeigen makroskopisch bei gleichlanger Einlagerungszeit keine vergleichbaren Korrosionserscheinungen.

Die *Druckfestigkeitsentwicklung* sämtlicher Proben während der Versuchsdauer bis zu 3 Jahren geht aus Figur 4.23 hervor. Normalerweise wird beobachtet, dass die Druckfestigkeit eines Betons bei dauernder Feuchtlagerung noch etwas zunimmt, wobei bis zu 160% des Wertes nach 28 Tagen erreicht werden (HEGNER, 1989). Bei der Untersuchung der Langzeiteinwirkung von Chloridlösungen auf den Beton stellt MAULTZSCH (1984) bei Lagerung unter Wasser (Kurve 1 in Fig. 4.23) eine Festigkeitszunahme bis ca. 105% des Anfangswertes fest, während bei Lagerung in Salzlösungen (Kurve 2 in Fig. 4.23) eine markante Festigkeitseinbusse zu verzeichnen ist. Unsere Resultate in den verschiedenen Einlagerungs-Medien zeigen eine starke Streuung. Es ist zu berücksichtigen, dass infolge der etwas kleinen Probengrössen (im Vergleich zum Grösstkorn des Zuschlags) eher zu hohe Druckfestigkeiten bestimmt werden, da im Extremfall die Druckfestigkeit des Zuschlags (viele Quarzgerölle) ermittelt würde. Generell ist jedoch eine Tendenz zu einer Druckfestigkeits-Zunahme bei Luftlagerung erkennbar, der eine Druckfestigkeits-Vermin-

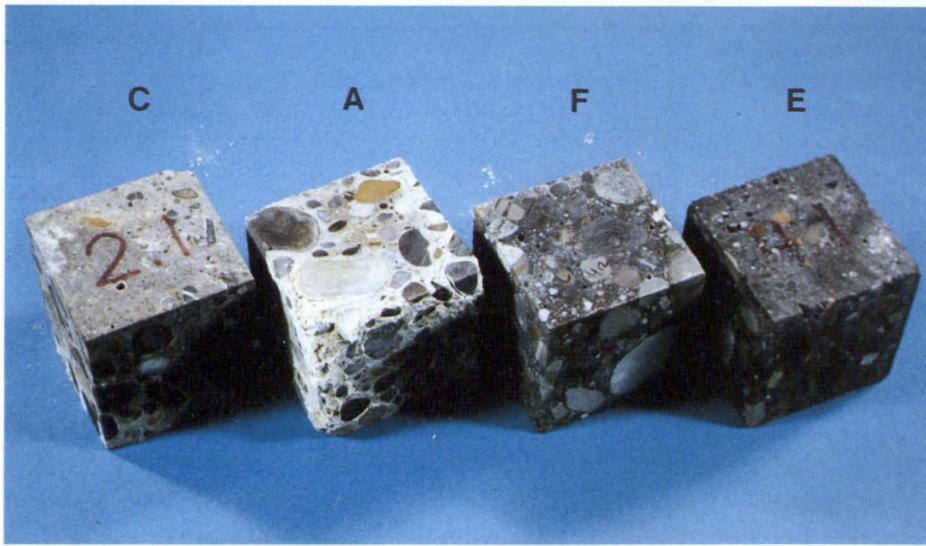


Figur 4.21 Aufbau der Versuchsanordnung (Explosionszeichnung) zur Untersuchung der Betonentwicklung in bewegtem Sulfatwasser mit unterschiedlicher Durchflussgeschwindigkeit.

derung bei Lagerung in Sulfatwasser gegenübersteht. Einen Unterschied in dieser Entwicklung zwischen sulfatbeständigen Zementen und „normalen“ Zementen können wir an unseren Daten nicht beobachten.

Figur 4.24 zeigt die Druckfestigkeits-Entwicklung der Probenserien in den unterschiedlichen Einlagerungs-Medien.

Deutlich ist wieder eine eher verbesserte Festigkeitsentwicklung bei Lagerung in Luft oder weichem Wasser (dest. Wasser) zu erkennen, während die Proben, die in Sulfatwasser eingelagert waren, allgemein - ob sulfatbeständiger Zement oder nicht - zu Festigkeitseinbußen neigen. Dies dürfte auf die zerstörende Wirkung der voluminösen Reaktionsprodukte zurückzuführen sein, die Mikrorisse und Abplatzungen erzeugen, welche die Festigkeit der Probe schwächen.



Figur 4.22 Sichtbare Auswirkungen an Betonwürfeln nach 2 1/2-jähriger Lagerung in Sulfatwasser.

a) Vergleich der unterschiedlichen Betonsorten (Kantenlänge der Würfel 5cm)

nicht sulfatbeständiger Zement:

Serie A: $W/Z=0.50$

Serie C: $W/Z=0.52$

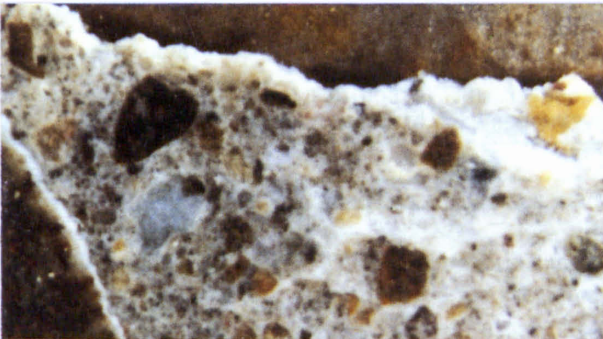
sulfatbeständiger Zement:

Serie E: $W/Z=0.44$

Serie F: $W/Z=0.42$



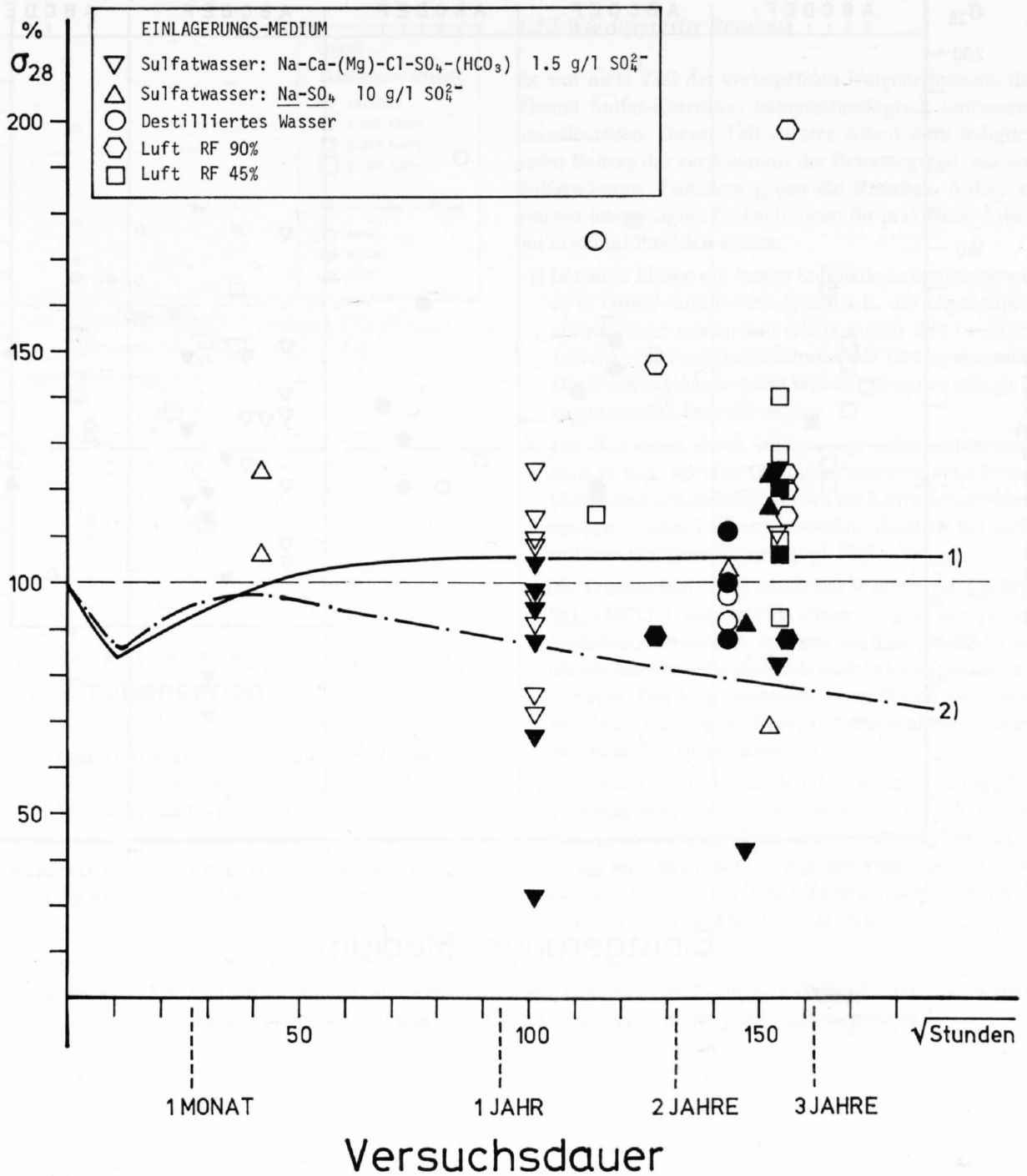
b) Probe der Serie A aus Fig. 4.22a): Deutlich sind Aufblähungen und Abplatzungen durch Sulfat-Treiben zu sehen.



c)



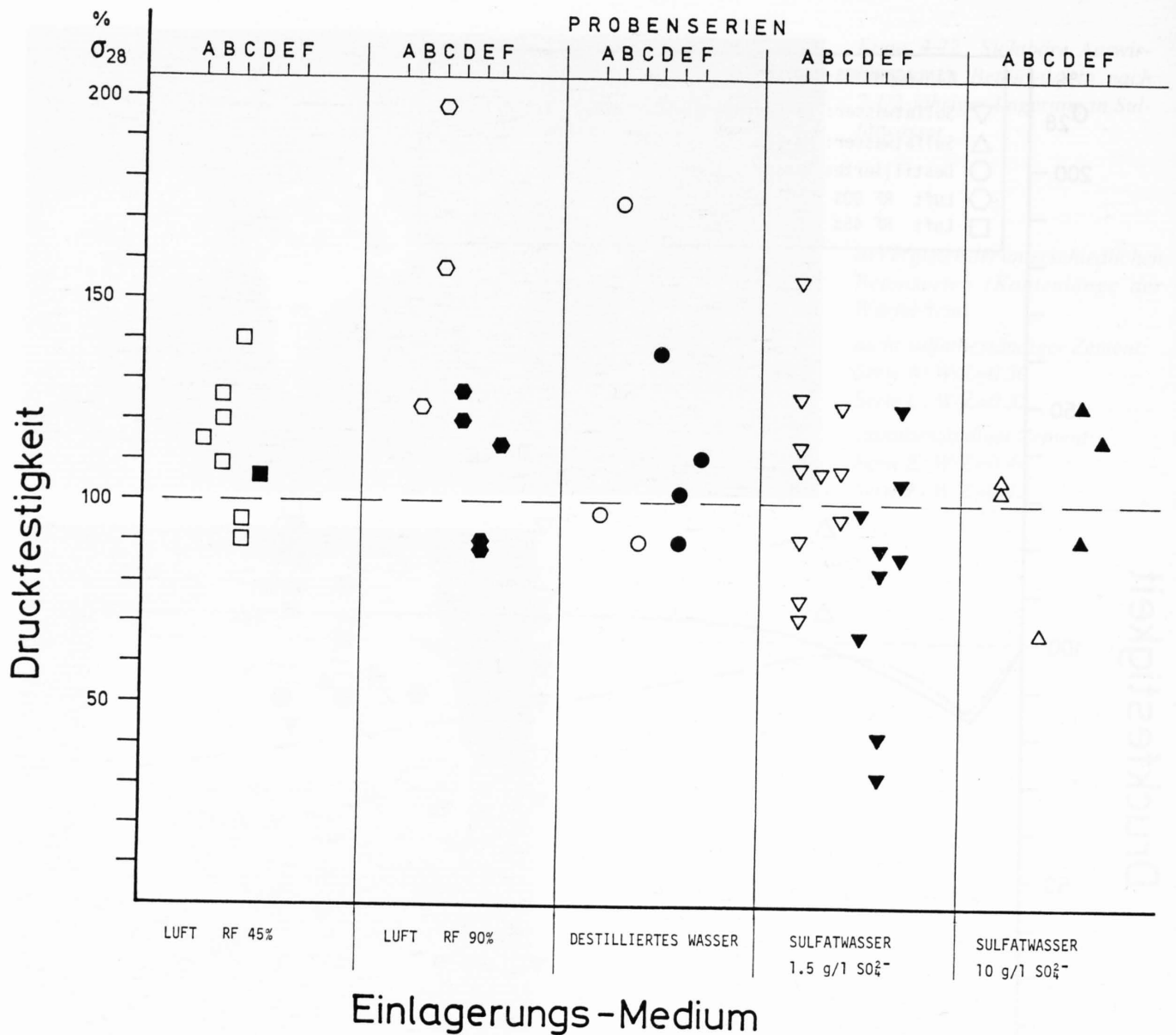
c) & d) Nahaufnahmen von b) Bilddurchmesser 3cm.
Ettringit-Ausscheidungen im Zementstein in Poren und bevorzugt entlang von Korngrenzen.



Figur 4.23 Zeitlicher Verlauf der Druckfestigkeits-Entwicklung sämtlicher Proben in Abhängigkeit von der chemischen Umgebung (ausgefüllte Symbole bezeichnen Proben mit sulfatbeständigem Zement).
Zum Vergleich: Festigkeitsverlauf von Zementmörtelprismen bei Lagerung 1) in Wasser, bzw. 2) in einer 4%igen Salzlösung (MAULTZSCH, 1984).

Interessant ist ausserdem der Vergleich zwischen den beiden Sulfatwässern. Obwohl das Wasser mit 1.5 g/l SO₄²⁻ nur 1/7 der Sulfatkonzentration des zweiten aufweist, sind bei dieser Versuchsreihe bedeutendere Festigkeitseinbußen zu verzeichnen. Diese Korrosionsfolge ist demnach, gerade weil sie auch bei sog. sulfatresistenten Betonen auftritt,

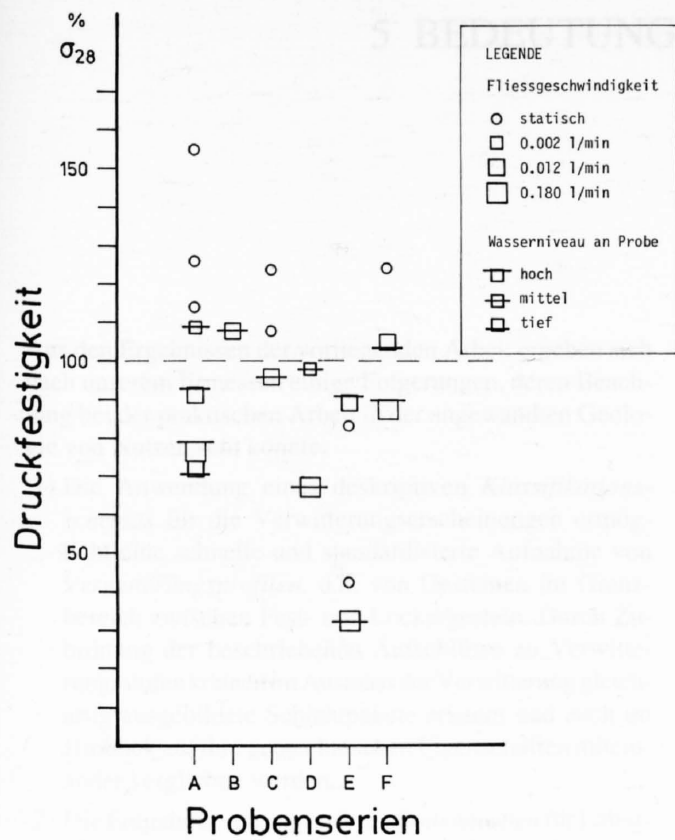
nicht alleine auf die Sulfatkonzentration zurückzuführen. Vielmehr dürfte sie durch die kombinierte Wirkung der als betonaggressiv eingestuften Parameter Magnesium, Chlorid und Sulfat entstanden sein, die in diesem Wasser mit Konzentrationen von 113 mg/l Mg²⁺, 1125 mg/l Cl⁻ und 1550 mg/l SO₄²⁻ enthalten sind.



Figur 4.24 Druckfestigkeits-Entwicklung der einzelnen Probenserien in den unterschiedlichen Einlagerungs-Medien (ausgefüllte Symbole bezeichnen Proben mit sulfatbeständigem Zement).

In Figur 4.25 schliesslich haben wir die Festigkeits-Entwicklung derjenigen Proben aufgetragen, die unter dem Einfluss von bewegtem Sulfatwasser standen. Aus dieser Figur geht hervor, dass die Sulfatkorrosion bei bewegtem Wasser allgemein grösser ist, als in stagnierenden Verhältnissen. Ebenso scheint sich eine Tendenz zu höheren

Festigkeitseinbussen bei grösseren Fliessgeschwindigkeiten abzuzeichnen. Jedenfalls scheint bei unseren Versuchen die Fliessgeschwindigkeit eine bedeutendere Rolle auf die Korrosion gespielt zu haben, als die Höhe des Wasserstandes. Endgültige Schlussfolgerungen zu dieser Problematik sind jedoch anhand der wenigen Resultate nicht möglich.



Figur 4.25 Druckfestigkeits-Entwicklung der Proben-serien in Sulfatwasser unter verschiedenen hydraulischen Bedingungen.

4.3.5 Würdigung der Resultate

Es war nicht Ziel der vorliegenden Untersuchungen, das Thema Sulfat-Korrosion betontechnologisch umfassend auszuleuchten. Dieser Teil unserer Arbeit stellt lediglich einen Beitrag dar zur Kenntnis der Betonaggressivität von Sulfatwässern. Trotzdem geben die Resultate Anlass zu einigen interessanten Feststellungen für praktische Arbeiten in sulfatführenden Böden:

- 1) In einem Milieu mit hohen Sulfatkonzentrationen, wie es in Grund- und Porenwässern z.B. des Gipskeupers auftritt, kann schon nach relativ kurzer Zeit (wenigen Jahren) eine Festigkeitseinbusse des Betons eintreten. Diese scheint in bewegtem Wasser grösser zu sein als in stagnierenden Porenlösungen.
- 2) Die Korrosion durch sulfathaltige Lösungen scheint auch in sog. sulfatbeständigen Zementen aufzutreten. Makroskopisch sichtbar werden die Korrosionserscheinungen (Sulfat-Treiben) besonders deutlich bei nicht sulfatbeständigem Zement (vgl. Fig. 4.22).
- 3) Die Triassischen Sulfatwässer des Wassertypus $\text{Ca-Mg-SO}_4\text{-(HCO}_3\text{)}$ sind nicht allein wegen der hohen Sulfatkonzentrationen, sondern auch aufgrund der erhöhten Magnesiumgehalte als stark betonaggressiv einzustufen. Die Korrosionsreaktionen führen langfristig zur Verminderung der Festigkeit und schliesslich auch zu einem Zerfall des Betons.
- 4) Grundsätzlich sind in Böden der sulfatführenden Mergelserien möglichst dichte, vollständig hydratisierte Betone anzustreben. Eine absolute Dichtigkeit - auch über einige Jahrzehnte - von nicht mehr zugänglichen, bzw. kontrollierbaren Beton-Bauteilen dürfte jedoch ein kaum zu realisierendes Postulat bleiben.

5 BEDEUTUNG FÜR DIE PRAXIS

Aus den Ergebnissen der vorliegenden Arbeit ergeben sich nach unserem Ermessen einige Folgerungen, deren Beachtung bei der praktischen Arbeit in der angewandten Geologie von Nutzen sein könnte:

- 1) Die Anwendung eines deskriptiven *Klassifikations-schemas* für die Verwitterungserscheinungen ermöglicht eine schnelle und standardisierte Aufnahme von *Verwitterungsprofilen*, d.h. von Gesteinen im Grenzbereich zwischen Fest- und Lockergestein. Durch Zuordnung der beschriebenen Aufschlüsse zu Verwitterungsstufen können im Ausmass der Verwitterung gleichartig ausgebildete Schichtpakete erkannt und auch im Hinblick auf ihre geotechnischen Eigenschaften miteinander verglichen werden.
- 2) Die Entnahme von *ungestörten Bodenproben* für Laboruntersuchungen im Verwitterungsprofil ist äusserst problematisch. In ihrer Struktur und Lagerungsdichte ungestörte Proben können meistens nur aus der vollständig verwitterten Lithologie gewonnen werden. In den Verwitterungsstufen mit weniger weit fortgeschrittener Verwitterung besteht nämlich der Boden noch zum grössten Teil aus fragilen Aggregaten, sog. Gesteinsbröckchen der Sand- und Kiesfraktionen. Unter diesem Licht betrachtet müssen auch Ergebnisse von Laborproben aus Kernbohrungen in der angewitterten-verwitterten Lithologie kritisch interpretiert werden.
- 3) Die *Auflockerung* des Gesteinsverbandes durch die Verwitterung (besonders die Gipsauslaugung) kann im Falle des Gipskeupers mit Rammsondierungen gut erfasst werden.
- 4) Die *Plastizitätseigenschaften* des verwitterten Gipskeupers sind eng mit den in dieser Lithologie vorhandenen und remobilisierbaren Tonmineralien verknüpft. Von besonderer Bedeutung sind dabei *quellfähige Tonminerale*. Wichtiger als der absolute Tongehalt ist im Bezug auf die Plastizitätszahl der Anteil an quellfähigen Tonmineralien.
- 5) In den Verwitterungsböden des Gipskeupers können *Restscherfestigkeiten* nachgewiesen werden, die einem Winkel der inneren Reibung $\phi'_r < 20^\circ$ entsprechen. Die Grösse der Restscherfestigkeit hängt nicht vom Anteil der Tonfraktion ab, sondern vielmehr vom effektiven Gehalt an Tonmineralien im Boden. Dabei sind die innerkristallin quellfähigen (z.B. Smectite) von entscheidender Bedeutung. Im verwitterten Gipskeuper besteht keine direkte Abhängigkeit der Restscherfestigkeit von der Verwitterungsstufe. Zumindest für den verwitterten Gipskeuper lässt sich jedoch eine Tendenz zu niedrigen Restscherfestigkeiten bei erhöhten Plastizitätszahlen ableiten. Die relativ einfache und kostengünstige Laboruntersuchung der Konsistenzgrenzen könnte demnach die Eingrenzung der für die Stabilität kritischen Bereiche erlauben. Dadurch können Proben für zeitaufwendige und kostenintensive Scherversuche sowie tonmineralogische Untersuchungen gezielt ausgewählt werden.
- 6) In unseren hydrochemischen Untersuchungen der *Sulfatwässer* des östlichen Jura haben wir die Variationsbreiten der wichtigsten Inhaltsstoffe zusammengestellt. Diese könnten bei lokalen hydrogeologischen Arbeiten als Vergleichswerte dienen. Zur Unterscheidung der Wässer aus dem Gipskeuper von denjenigen aus dem Mittleren Muschelkalk haben sich die Strontium-Konzentration sowie das F/Sr-Äquivalentverhältnis als besonders sensitive Parameter erwiesen.
- 7) Mit Hilfe der Zusammensetzung der *stabilen Isotopen im Sulfat* können dessen mögliche Herkunft und/oder im Grundwasser abgelaufene Redox-Prozesse erkannt werden. Zum Vergleich sind dazu Kenntnisse der Isotopen-Zusammensetzung im Gesteins-Sulfat nötig. In unseren Untersuchungen stellen wir einen Satz an Referenzdaten für die Zusammensetzung der stabilen Isotopen im Gipskeuper vor, den wir im Zusammenhang mit verfügbaren Isotopendaten an Grundwässern aus dem Gipskeuper und dem Mittleren Muschelkalk diskutieren.
- 8) Die Triassischen Sulfatwässer des östlichen Jura, die ihre Mineralisation zur Hauptsache aus dem Mittleren Muschelkalk und dem Gipskeuper beziehen, weisen Sulfatgehalte auf, die als *betonaggressiv* gelten. Entsprechend ihrem Wassertyp $\text{Ca-Mg-SO}_4\text{-(HCO}_3\text{)}$ verursachen sie an Beton-Bauteilen sulfat- und magnesiuminduzierte Korrosionserscheinungen, die langfristig zur Verminderung der Festigkeit und schliesslich auch zu einem Zerfall des Betons führen können. Bei der geotechnischen Begutachtung eines Baugrundes in sulfatführenden Formationen (z.B. Gipskeuper) ist es deshalb ratsam, das Auftreten von magnesium- und sulfathaltigen, betonaggressiven Porenwässern abzuklären und auf ihre korrosiven Eigenschaften aufmerksam zu machen. Bei den entsprechenden sulfathaltigen Thermalwässern (z.B. Baden, Schinznach) dürfte der korrosive Charakter durch die hohen Temperaturen noch verstärkt werden.

LITERATURVERZEICHNIS

A) Veröffentlichte Literatur

- BAILEY, S.W. 1982: Nomenclature for regular interstratifications. *Clay Minerals* 17, 243-248.
- BALDERER, W. 1985: Sondierbohrung Böttstein - Ergebnisse der Isotopenuntersuchungen zur hydrogeologischen Charakterisierung der Tiefengrundwässer. Nagra, Baden, Tech. Ber. 85-06.
- BALDERER, W., FONTES, J.-CH., MICHELOT, J.-L. & ELMORE, D. 1987: Isotopic investigations of the water-rock system in the deep crystalline rock of Northern Switzerland. In: *Saline Water and Gases in Crystalline Rocks* (Ed. by FRITZ, P. & FRAPE, S.K.). Geol. Assoc. Can., Spec. Pap. 33, 175-195.
- BAUMANN, W. 1984: Stratigraphische und rheologische Untersuchungen sowie Kluftstudien an Evaporiten der Mittleren Trias in der Nordschweiz (Bergwerk Felsenau). Diss. ETH Zürich 7457.
- BAUMANN, W. & STUCKY, K. 1984: Geologische Untersuchungen an Evaporiten der Mittleren Trias in der Nordschweiz am Beispiel des Bergwerkes Felsenau. *Eclogae geol. Helv.* 77/3, 511-540.
- BECK, A. & GOLTA, A. 1972: Tunnelsanierungen der Schweizerischen Bundesbahnen. *Schweiz. Bauzeitung* 90/36, 857-863.
- BENITO, G. & GUTIERREZ, M. 1988: Karst in Gypsum and its Environmental Impact on the Middle Ebro Basin, Spain. *Environ. Geol. Water Sci.* 12/2, 107-111.
- BIRKELAND, P.W. 1984: *Soils and Geomorphology*. Oxford University Press, Oxford.
- BITTERLI, P. 1972: Erdölgeologische Forschungen im Jura. *Bull. Ver. Schweiz. Petrol.-Geol. u. -Ing.* 39/95, 13-28.
- BLOUNT, C.W. & DICKSON, F.W. 1973: Gypsum-Anhydrite Equilibria in Systems $\text{CaSO}_4\text{-H}_2\text{O}$ and $\text{CaSO}_4\text{-NaCl-H}_2\text{O}$. *Amer. Mineral.* 58, 331-332.
- BRAITSCH, O. 1962: Entstehung und Stoffbestand der Salzlagerstätten. Springer, Berlin.
- BRANDT, A., KEMPE, S., SEEGER, M. & VLADI, F. 1976: Geochemie, Hydrographie und Morphogenese des Gipskarstes von Düna/Südharz. *Geol. Jb., Reihe C*, 15, 3-55.
- BREITSCHMID, A. 1982: Diagenese und schwache Metamorphose in den sedimentären Abfolgen der Zentralschweizer Alpen (Vierwaldstätter See, Urirotstock). *Eclogae geol. Helv.* 75/2, 331-380.
- BRENNER, K. 1973: Stratigraphie und Paläogeographie des Oberen Mittelkeupers in Südwest-Deutschland. *Arb. Inst. Geol. Paläont. Univ. Stuttgart, N.F.* 68, 101-122.
- BRODERSEN, H.A. 1982: Zur Abhängigkeit der Transportvorgänge verschiedener Ionen im Beton von Struktur und Zusammensetzung des Zementsteins. Diss. Techn. Hochschule Aachen.
- BRUDER, J. 1974: Der Autobahntunnel bei Hölzern (Württemberg). *Strasse Brücke Tunnel* 26/4, 85-91.
- BUCHER, F. 1975: Die Restscherfestigkeit natürlicher Böden, ihre Einflussgrößen und Beziehungen als Ergebnis experimenteller Untersuchungen. *Mitt. Inst. Grundbau und Bodenmechanik ETHZ* 103.
- BÜCHI, U.P., LEMCKE, K., WIENER, G., ZIMDARS, J. 1965: Geologische Ergebnisse der Erdölexploration auf das Mesozoikum im Untergrund des schweizerischen Molassebeckens. *Bull. Ver. Schweiz. Petrol.-Geol. u. -Ing.* 32/82, 7-38.
- CHANDLER, R.J. 1969: The effect of weathering on the shear strength properties of Keuper Marl. *Géotechnique* 19/3, 321-334.
- CLAYPOOL, G.E., HOLSER, W.T., KAPLAN, I.R., SAKAI, H. & ZAK, I. 1980: The age curves of sulphur and oxygen isotopes in marine sulphate and their mutual interpretation. *Chem. Geol.* 28, 199-260.
- COLMAN, S. M. & DETHIER, D.P. 1986: *Rates of chemical weathering of rocks and minerals*. Academic Press, Inc., New York.
- COLOTTA, T., CANTONI, R., PAVESI, U., RUBERL, E. & MORETTI, P.C. 1989: A correlation between residual friction angle, gradation and the index properties of cohesive soils. *Géotechnique* 39/2, 343-346.
- CONLEY, R.F. & BUNDY, W.M. 1958: Mechanism of gypsification. *Geochim. Cosmochim. Acta* 15, 57-72.
- DEARMAN, W.R. 1976: Weathering classification in the characterisation of rock: a revision. *Bull. Int. Assoc. Eng. Geol.* 13, 123-127.
- DEVEUGHELE, M. & USSEGLIO POLATERA, J.M. 1979: Cartographie des zones exposées aux risques liés aux dissolutions de la fraction gypseuse du marno-calcaire de Saint-Ouen dans les 19ème et 20ème arrondissements de la ville de Paris. *Bull. Int. Assoc. Eng. Geol.* 19, 121-125.

- DRONKERT, H. 1987: Diagenesis of Triassic evaporites in northern Switzerland. *Eclogae geol. Helv.* 80/2, 397-413.
- ECHLE, W. 1961: Mineralogische Untersuchungen an Sedimenten des Steinmergelkeupers und der Roten Wand aus der Umgebung von Göttingen. *Beitr. Miner. Petr.* 8, 28-59.
- ECKHARDT, F.E. 1985: Solubilization, transport and deposition of mineral cations by microorganisms - efficient rock weathering agents. In: *The chemistry of weathering* (Ed. by DREVER, J.I.). D. Reidel Publishing Company, Boston, 161-173.
- EINSELE, G. & LEMPP, CH. 1981: Ursache und Einfluss der Entfestigung veränderlich fester Gesteine auf die Tragfähigkeit des Erdplanums. *Forschung Strassenbau und Strassenverkehrstechnik* 330, 1-101.
- EINSELE, G., HEITFELD, K.-H., LEMPP, CH. & SCHETELIG, K. 1985: Auflockerung und Verwitterung in der Ingenieurgeologie: Uebersicht, Feldansprache, Klassifikation (Verwitterungsprofile) - Einleitender Beitrag. In: *Ingenieurgeologische Probleme im Grenzbereich zwischen Locker- und Festgestein* (Ed. by HEITFELD, K.-H.). Springer, Berlin, 2-23.
- EINSTEIN, H.H., BISCHOFF, N. & HOFMANN, E. 1972: Verhalten von Stollensohlen in quellendem Mergel. *Ber. Int. Symp. Untertagebau, Luzern*, 296-319.
- EMMERT, U. 1985: Das fränkische Wort „Keuper“. *Jber. Mitt. oberrhein. geol. Ver., N.F.* 67, 173-175.
- FABRE, D. & DAYRE, M. 1982: Geotechnical properties of gypsum and anhydrite (Trias of the Northern Alps in France). *Bull. Int. Assoc. Eng. Geol.* 25, 91-98.
- FONTES, J.C. & LETOLLE, R. 1976: ^{18}O and ^{34}S in the Upper Bartonian gypsum deposits of the Paris Basin. *Chem. Geol.* 18, 285-295.
- FONTES, J.-CH. & MICHELOT, J.L. 1983: Stable isotopes geochemistry in groundwater systems from Stripa. In: *Geochemical and Isotope Characterization of the Stripa Groundwaters - Progress Report* (Ed. by CARLSSON, L., OLSSON, T., ANDREWS, J., FONTES, J.-CH., MICHELOT, J.L. & NORDSTROM, K.). Nagra, Baden, Tech. Ber. 83-27, 74-98.
- FONTES, J.-CH. & TOULEMONT, M. 1987: Faciès, pétrologie et teneurs en isotopes lourds (^{18}O , ^{13}C , ^{34}S) des niveaux évaporitiques du Lutétien supérieure du Bassin de Paris: interprétation paléohydrologique. *Bull. Centr. Rech. Expl. Prod. Elf-Aquitaine* 11/1, 39-64.
- FREEZE, R.A. & CHERRY, J.A. 1979: *Groundwater*. Prentice Hall, New York, N.Y.
- FREY, M. 1969: Die Metamorphose des Keupers vom Tafeljura bis zum Lukmanier-Gebiet. *Beitr. Geol. Karte Schweiz, N.F.* 137.
- FRITZ, P., BASHARMAL, G.M., DRIMMIE, R.J., JBSN, J. & QUERESH, R.M. 1989: Oxygen isotope exchange between sulphate and water during bacterial reduction of sulphate. *Chem. Geol. (Isot. Geosci. Sect.)* 79, 99-105.
- GOLDSCHMID, H.O. 1964: Die Geologie des Faltenjura zwischen Olten und Unterem Hauenstein. *Tät.ber. Natf. Ges. Baselland* 24, 15-92.
- GORHAN, H.L. & GRIESSER, J.C. (Hsg.) 1988: Geothermische Prospektion im Raume Schinznach Bad-Baden. *Beitr. Geol. Schweiz Geotech. Ser.* 76.
- GRÄF, H. & GRUBE, H. 1986: Verfahren zur Prüfung der Durchlässigkeit von Mörtel und Beton gegenüber Gasen und Wasser. *beton* 36/5&6, 184-187/222-226.
- GROB, H. 1972: Schwelldruck im Belchentunnel. *Ber. Int. Symp. Untertagebau, Luzern, Schweiz. Ges. Boden- und Felsmechanik*, 99-119.
- 1976: Swelling and heave in Swiss tunnels. *Bull. Int. Assoc. Eng. Geol.* 13, 55-60.
- GRUBE, H. & RECHENBERG, W. 1987: Betonabtrag durch chemisch angreifende saure Wässer. *beton* 37/11&12, 446-451/495-498.
- GSELL, F. 1968: Geologie des Falten- und Tafeljura zwischen Aare und Wittnau und Betrachtungen zur Tektonik des Ostjura zwischen dem Unteren Hauenstein im W und der Aare im E. *Mitt. Geol. Inst. ETH Univ. Zürich, N.F.* 91.
- GUNDLACH, H., VAN DEN BOOM, G. & KOCH, W. 1981: Geochemische Untersuchungen. In: *Angewandte Geowissenschaften, Bd. 1* (Hsg. BENDER, F.). Enke, Stuttgart.
- HÄFELI, R., AMBERG, G. & VON MOOS, A. 1951: Eine leichte Rammsonde für geotechnische Untersuchungen. *Schweiz. Bauzeitung* 69/36, 497-503.
- HAMBACH, P. & ODIER, M. 1988: Der Vernier-Tunnel in Genf/Schweiz. *Tunnel* 1988/3, 114-122.
- HARDIE, L.A. 1967: The Gypsum-Anhydrite equilibrium at one atmosphere pressure. *Amer. Mineral.* 52, 171-199.
- HARTMANN, A. 1937: Zur Kenntnis der Thermen von Baden. *Mitt. Aarg. Natf. Ges.* 20, 112-136.
- 1943: Natur und Herkunft der Therme von Baden. *Alte und Neueste Untersuchungen an der Schwanenquelle. Mitt. Aarg. Natf. Ges.* 21, 1-32.
- HAUBER, L. 1971: Zur Geologie des Salzfeldes Schweizerhalle-Zinggibrunn (Kt. Baselland). *Eclogae geol. Helv.* 64/1, 163-183.
- HEGNER, R. 1989: Betonfestigkeiten nach Norm SIA 162 (1989). *Cementbulletin* 57/21, 1-12.
- HEITFELD, K.-H. (Hsg.) 1985: *Ingenieurgeologische Probleme im Grenzbereich zwischen Locker- und Festgestein*. Springer, Berlin.
- HENKE, K., KAISER, W. & BEICHE, H. 1979: Verhalten von Tunnelbauwerken in quellfähigen Schichten des Gipskeupers. *Ber. 2. Nat. Tagung Ingenieurgeologie, Fellbach*, 135-142.
- HENKE, K. & KAISER, W. 1975: Zusammenfassung und Deutung der Ergebnisse im Bezug auf Sohlhebungen beim Tunnelbau im Gipskeuper. In: *Durchführung eines*

- felsmechanischen Grossversuches in der Nordröhre des Wagenburgtunnels in Stuttgart (Ed. by KOLBE, G.). Strassenbau und Strassenverkehrstechnik, 184, 185-195.
- HESSLEIN, R.H., CAPEL, M.J. & FOX, D.E. 1988: Sulfur isotopes in sulfate in the inputs and outputs of a Canadian Shield watershed. *Biogeochemistry* 5, 263-273.
- HÖGL, O. 1980: Die Mineral- und Thermalquellen der Schweiz. Haupt, Bern.
- HÖHN, E. 1979: Hydrogeologische Untersuchungen im Gebiet westlich von Frick (Aargauer Tafeljura). *Beitr. Geol. Schweiz Hydrologie* 26.
- HÖTZL, H. 1982: Auswertung hydrochemischer Daten. DVWK Schriften 54, Parey, Hamburg.
- HOLSER, W.T., KAPLAN, I.R., SAKAI, H. & ZAK, I. 1979: Isotope geochemistry of oxygen in the sedimentary sulfate cycle. *Chem. Geol.* 25, 1-17.
- HORSTMANN, E.L. 1957: The distribution of lithium, rubidium and caesium in igneous and sedimentary rocks. *Geochim. Cosmochim. Acta* 12, 1-28.
- HUDER, J. & AMBERG, G. 1970: Quellung in Mergel, Opalinuston und Anhydrit. *Schweiz. Bauzeitung* 88/43, 975-980.
- HÜTTER, L.A. 1979: Wasser und Wasseruntersuchung. Sauerländer, Aarau.
- IAEA (International Atomic Energy Agency) 1983: Isotope techniques in the hydrogeological assessment of potential sites for the disposal of high-level radioactive wastes. Int. At. Energy Agency, Vienna, Tech. Rep. Ser. 228.
- ISRM (International Society for Rock Mechanics, Commission on classification of rocks and rock masses) 1981: Basic geotechnical description of rock masses. *Int. J. Rock. Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.* 18, 85-110.
- JÄCKLI, H. 1970: Kriterien zur Klassifikation von Grundwasservorkommen. *Eclogae geol. Helv.* 36/1, 7-15.
- JOHNS, W.D., GRIM, R.E. & BRADLEY, W.F. 1954: Quantitative estimations of clay minerals by diffraction methods. *J. Sed. Petr.* 24/4, 242-251.
- JORDAN, P. & NÜESCH, R. 1989: Deformational behavior of shale interlayers in evaporite detachment horizons, Jura overthrust, Switzerland. *J. Struct. Geol.* 11/7, 859-871.
- KENNEY, T.C. 1967: The Influence of Mineral Composition on the Residual Strength of Natural Soils. *Proc. Geotechnical Conf. Oslo*, 1, 123-129.
- KINSMAN, D.J. 1974: Calcium Sulphate Minerals of Evaporite Deposits: Their Primary Mineralogy. *Northern Ohio Geol. Soc., 4th Symp. Salt* 1, 343-348.
- KNÖFEL, D. 1982: Stichwort Baustoffkorrosion. Bauverlag GmbH, Wiesbaden.
- KOCKERT, W. 1972: Höhlenbildungen im Zechstein der DDR und einige grundsätzliche Bemerkungen zur Karsthydrologie der Zechsteinschichten. *Ber. deutsch. Ges. geol. Wiss., A, Geol. Paläont.* 17/2, 261-272.
- KÖLLIKER, E. 1985: Zur Carbonatisierung von Beton. *Schweiz. Ing. Arch.* 103/25, 636-640.
- KOVARI, K., AMSTAD, CH. & ANAGNOSTOU, G. 1987: Tunnelbau in quellfähigem Gebirge. *Mitt. Schweiz. Ges. Boden- und Felsmechanik* 115, 19-26.
- KRAUSE, H. 1977: Zur Geologie und Statistik des Tunnelbaus in Baden-Württemberg unter besonderer Berücksichtigung der Keupertunnel. *Jh. geol. Landesamt Baden-Württemberg* 19, 35-57.
- KROUSE, H.R. 1980: Sulphur isotopes in our environment. In: *Handbook of Environmental Isotope Geochemistry*, Vol. 1, The Terrestrial Environment, A (Ed. by FRITZ, P. & FONTES, J.-CH.). Elsevier, Amsterdam, 435-471.
- KRUMBEIN, W.E. & DYER, B.D. 1985: This planet is alive - weathering and biology, a multi-faceted problem. In: *The chemistry of weathering* (Ed. by DREVER, J.I.). D. Reidel Publishing Company, Boston, 143-160.
- KÜBLER, B. 1967: La cristallinité de l'illite et les zones tout à fait supérieures du métamorphisme. *Etages tectonique. Colloq. Neuchatel*, 105-122.
- 1973: La corrensite, indicateur possible de milieux de sédimentation et du degré de transformation d'un sédiment. *Bull. Centre Rech. Pau-SNPA* 7/2, 543-556.
- LAGALY, G. 1988: Grundzüge des rheologischen Verhaltens wässriger Tonmineraldispersionen. In: *Tonmineralogie und Bodenmechanik* (Ed. by MÜLLER-VONMOOS, M.). Mitt. Inst. Grundbau und Bodenmechanik ETHZ 133, 7-22.
- LANG, H.-J. & HUDER, J. 1985: *Bodenmechanik und Grundbau*. Springer, Berlin.
- LANGGUTH, H.R. & NIELSEN, H. 1980: Sulphur isotopes in thermal waters and anhydrites of the Dinantian at the southern margin of the Brabant Massif: preliminary note. *Mémoires du Service Géologique du Canada* 32/13, 101-105.
- LAUBSCHER, H. 1984: Sulfate deformation in the upper Triassic of the Belchen tunnel (Jura Mountains, Switzerland). *Eclogae geol. Helv.* 77/2, 249-259.
- 1987: Die tektonische Entwicklung der Nordschweiz. *Eclogae geol. Helv.* 80/2, 287-303.
- LEMPPE, CH. 1979: Die Entfestigung überkonsolidierter, pelitischer Gesteine Süddeutschlands und ihr Einfluss auf die Tragfähigkeit des Strassenuntergrundes. *Diss. Univ. Tübingen*.
- LIPPMANN, F. 1954: Über einen Keuperton von Zaisersweiher bei Maulbronn. *Heidelberger Beitr. Mineral. Petrogr.* 4, 130-134.
- 1956: Clay minerals from the Röt member of the Triassic near Göttingen, Germany. *J. Sed. Petr.* 26, 125-139.
- 1976: Corrensite, a swelling clay mineral, and its influence on floor heave in tunnels in the Keuper formation. *Bull. Int. Assoc. Eng. Geol.* 13, 65-68.
- LIPPMANN, F. & PANKAU, H.-G. 1988: Der Mineralbestand des Mittleren Muschelkalk von Nagold, Württemberg. *N. Jb. Miner. Abh.* 3, 257-292.
- LIPPMANN, F. & SAVASCIN, M.Y. 1969: Mineralogische Untersuchungen an Lösungsrückständen eines

- württembergischen Keupergipsvorkommens. *Tschermaks Miner. Petr. Mitt.* 13, 165-190.
- LITTLE, A.L. 1969: The engineering classification of residual tropical soils. *Proc. Int. Conf. Soil. Mech. & Found. Eng., Mexico*, 1, 1-10.
- LOYD, R.M. 1968: Oxygen isotope behaviour in the sulphate-water system. *J. Geophys. Res.* 73, 6099-6110.
- LOCHER, F.W., RECHENBERG, W. & SPRUNG, S. 1984: Beton nach 20jähriger Einwirkung von kalklösender Kohlensäure. *beton* 34/5, 193-198.
- LUCAS, J. 1962: La transformation des minéraux argileux dans la sédimentation. *Etudes sur les argiles du Trias. Univ. Strasbourg, Mém. Ser. Carte géol. Als.-Lorr.* 23.
- LUKAS, W. 1980: Modellmässige Vorstellung über den Mechanismus des Sulfatangriffes auf Proben aus verschiedenen Zementen. *Zement und Beton* 25/1, 17-21.
- LUPINI, J.F., SKINNER, A.E. & VAUGHAN, P.R. 1981: The drained residual strength of cohesive soils. *Géotechnique* 31/2, 181-213.
- MACK, K. 1981: Die Verwitterung diagenetisch verfestigter Tonsedimente und ihr Einfluss auf mineralogische und bodenmechanische Kenngrössen. *Dissertation Univ. Stuttgart*.
- MADSEN, F. & KAHR, G. 1985: Quellende Gesteine als Ursache von Problemen im Untertagebau. *Schweiz. Ingenieur und Architekt* 103/19, 426-427.
- MADSEN, F. & MÜLLER-VONMOOS, M. 1985: Swelling pressure calculated from mineralogical properties of a Jurassic Opalinum shale, Switzerland. *Clays and Clay Minerals* 33/6, 501-509.
- MADSEN, F. & NÜESCH, R. 1989: Quellende Gesteine, Quellmechanismen und die Bestimmung massgebender Quellparameter im Labor. *Schweiz. Ing. Arch. SIA-Dokumentation D 037*, 31-42.
- 1990: Langzeitverhalten von Tongesteinen und tonigen Sulfatgesteinen. *Beitr. Geol. Schweiz, kl. Mitt.* 85
- MATOUSEK, F. 1985: Hydrogeologie und Hydrogeochemie des Waldenburger Tales (Baselbieter Jura). *Diss. ETH Zürich* 7829.
- MATOUSEK, F. & HÖHN, E. 1986: Fluorid in Grundwässern der Mittleren und Oberen Trias im Jura der Nordwestschweiz. *Eclogae geol. Helv.* 79/1, 19-32.
- MATTER, A., PETERS, T.J., BLÄSI, H.-R., MEYER, J., ISCHI, H. & MEYER, CH. 1988a: Sondierbohrung Weiach, Geologie. Bundesamt für Umweltschutz, Landeshydrologie und -geologie, *Geol. Ber. Nr. 6*.
- MATTER, A., PETERS, T.J., BLÄSI, H.-R., SCHENKER, F. & WEISS, H.P. 1988b: Sondierbohrung Schafisheim, Geologie. Bundesamt für Umweltschutz, Landeshydrologie und -geologie, *Geol. Ber. Nr. 8*.
- MAULTZSCH, M. 1984: Vorgänge beim Angriff von Chloridlösungen auf Zementstein und Beton. *Material und Technik* 12/3, 83-90.
- MAXWELL, D.T. & HOWER, J. 1967: High-grade diagenesis and low-grade metamorphism of illite in the Precambrian Belt Series. *Amer. Mineral.* 52, 843-857.
- MERKI, P. 1961: Der Obere Muschelkalk im östlichen Schweizer Jura. *Eclogae geol. Helv.* 54/1, 137-220.
- MILLOT, G. & CAMEZ, T. 1961: Genesis of vermiculite and mixed-layered vermiculite in the evolution of the soils of France. *Clays and Clay Minerals* 10, 90-95.
- MIZUTANI, Y. & RAFTER, T.A. 1973: Isotopic behaviour of sulphate oxygen in the bacterial reduction of sulphate. *Geochem. J.* 6, 183-191.
- MÜLLER, W.H., SCHMID, S.M. & BRIEGEL, U. 1981: Deformation experiments on anhydrite rocks of different grain sizes: rheology and microfabric. *Tectonophysics* 78, 527-543.
- MÜLLER, W.H., HUBER, M., ISLER, A. & KLEBOTH, P. 1984: Erläuterungen zur geologischen Karte der zentralen Nordschweiz 1:100000. Nagra, Baden, *Tech. Ber.* 84-25.
- MÜLLER-VONMOOS, M. 1983: Die Bedeutung der Tonminerale für das bodenmechanische Verhalten der Lockergesteine. *Mitt. Schweiz. Ges. Boden- und Felsmechanik* 109, 3-6.
- MÜLLER-VONMOOS, M., HONOLD, P. & KAHR, G. 1985: Das Scherverhalten reiner Tone. *Mitt. Inst. Grundbau und Bodenmechanik ETHZ* 128.
- MÜLLER-VONMOOS, M. & LØKEN, T. 1988: Das Scherverhalten der Tone. In: *Tonmineralogie und Bodenmechanik* (Ed. by MÜLLER-VONMOOS, M.). *Mitt. Inst. Grundbau und Bodenmechanik ETHZ* 133, 23-37.
- MÜNZEL, U. 1947: Die Thermen von Baden - eine balneologische Monographie. *Diss. ETH Zürich* 1546.
- NAGRA 1984: Die Kernbohrung Beznau. Nagra, Baden, *Tech. Ber.* 84-34.
- 1988: Sedimentstudie - Zwischenbericht 1988, Möglichkeiten zur Endlagerung langlebiger radioaktiver Abfälle in den Sedimenten der Schweiz. Nagra, Baden, *Tech. Ber.* 88-25.
- NEFF 1984: Nutzbarmachung der Geothermie im Raume Baden und Umgebung. *Schlussbericht. Nationaler Energie-Forschungs-Fonds, Basel*.
- NIELSEN, H. 1969: Sulfur isotopes. In: *Lectures in Isotope Geology* (Ed. by JAEGER, E. & HUNZIKER, J.C.). Springer, Berlin, 283-312.
- NIELSEN, H. & RICKE, W. 1964: Schwefel-Isotopenverhältnisse von Evaporiten aus Deutschland: Ein Beitrag zur Kenntnis von $\delta^{34}\text{S}$ im Meerwasser-Sulfat. *Geochim. Cosmochim. Acta* 28, 577-591.
- ÖCHSNER, W.PH., SCHWARZ, H., SEMET, W. & VOGT, O. 1983: Einfluss der Sulfatphasen im Zementstein auf die Korrosion der Bewehrung im Beton. *Bautenschutz + Bausanierung* 6/3, 89-93.
- OHRODORF, R. 1968: Ein Beitrag zur Geochemie des Lithiums in Sedimentgesteinen. *Geochim. Cosmochim. Acta* 32, 191-208.
- PAUL, W. 1971: Die Trias. In: *Die Wutach, Naturkundliche Monographie einer Flusslandschaft* (Ed. by SAUER,

- K. & SCHNETTER, M.). Badischer Landesverein Naturk. Naturschutz e.V. 6, 37-116.
- PEARSON, F.J. & RIGHTMIRE, C.T. 1980: Sulphur and oxygen isotopes in aqueous compounds. In: *Handbook of Environmental Isotope Geochemistry*, Vol. 1, The Terrestrial Environment, A (Ed. by FRITZ, P. & FONTES, J.-Ch.). Elsevier, Amsterdam, 227-258.
- PETER, G., YANG, Q. & BRUNOLD, B. 1986: Die Beständigkeit von Beton im Bereich Wasser und Abwasser. *Gas Wasser Abwasser* 66/7, 453-459.
- PETERS, T.J., MATTER, A., BLÄSI, H.-R. & GAUTSCHI, A. 1987: Sondierbohrung Böttstein, Geologie. Bundesamt für Umweltschutz, Landeshydrologie und -geologie, Geol. Ber. Nr. 1.
- PILOT, G. & DURVILLE, J.-L. 1988: Conférence spéciale: Les mouvements de terrain dans les Alpes françaises. *Proc. 5th Int. Symp. Landslides*, Lausanne, 1515-1538.
- PRASAD, N. 1970: Sedimentology of Keuper from Belchentunnel, Eastern Swiss Jura. Phil. Dissertation 979, Universität Basel, Basel.
- PRIESNITZ, K. 1969: Ueber die Vergleichbarkeit von Lösungsformen auf Chlorid-, Sulfat- und Karbonatgestein - Überlegungen zu Fragen der Nomenklatur und Methodik der Karstmorphologie. *Geol. Rundschau* 58/2, 427-438.
- PRINZ, H. 1982: Abriss der Ingenieurgeologie. Enke, Stuttgart.
- DE QUERVAIN, F., 1969: Die nutzbaren Gesteine der Schweiz. Kümmerly & Frey, Bern.
- REUTER, F., MOLEK, H. & SCHWERTER, R. 1983: Möglichkeiten einer ingenieurgeologischen Bewertung des verkarstenden Gebirges. *Z. angew. Geol.* 29/8, 361-365.
- RICK, B. 1988: Instability as a consequence of deep disintegration in gypsiferous marls. *Proc. 5th Int. Symp. Landslides*, Lausanne, 1363-1366.
- 1990: Sulphur and oxygen isotopic composition of Swiss Gipskeuper (Upper Triassic). *Chem. Geol. (Isot. Geosci. Sect.)* 80, 243-250.
- SAHORES, J. 1962: Contribution à l'étude des phénomènes mécaniques accompagnant l'hydratation de l'anhydrite. Centre d'études et de recherches de l'industrie des liants hydrauliques, Paris, Publ. techn. 126.
- SCHOURING, B.W. 1970: Palynologische und palynostratigraphische Untersuchungen des Keupers im Bölchentunnel (Solothurner Jura). *Schweiz. Paläont. Abh.* 88.
- SCHILLINGER, G. 1970: Die Felsdrücke im Gipskeuper beim Bau des Belchentunnels. *Mitt. Schweiz. Ges. Boden- und Felsmechanik* 80, 31-36.
- SCHINDLER, C. 1977: Zur Geologie von Baden und seiner Umgebung. *Beitr. Geol. Schweiz, kl. Mitt.* 67.
- 1988: Zones instables en Suisse. *Proc. 5th Int. Symp. Landslides*, Lausanne, 1293-1299.
- SCHLENKER, B. 1971: Petrographische Untersuchungen am Gipskeuper und Lettenkeuper von Stuttgart. *Oberrhein. geol. Abh.* 20, 69-102.
- SCHMASSMANN, H. 1953: Das Keuper-Profil von Neue Welt. *Tätber. natf. Ges. Baselland* 19, 129-153.
- 1972: Das Gebiet des Tafeljuras und des Faltenjuras. In: *Erläuterungen zur hydrogeologischen Karte der Schweiz 1:100000*, Blatt Bözberg-Beromünster. (Ed. by JÄCKLI, H. & KEMPF, Th.). Hsg. von Schweiz. Geotech. Kommission.
- 1977: Die Mineral- und Thermalwässer von Bad Liestorf. *Mitt. Natf. Ges. Solothurn* 27, 149-290.
- 1980: Geologie und Genese der schweizerischen Mineral- und Thermalwässer. In: *Die Mineral- und Thermalquellen der Schweiz* (Ed. by HÖGL, O.). Haupt, Bern, 47-100.
- SCHMASSMANN, H., BALDERER, W., KANZ, W. & PEKDEGER, A. 1984: Beschaffenheit der Tiefengrundwässer in der zentralen Nordschweiz und angrenzenden Gebieten. *Nagra, Baden, Tech. Ber.* 84-21.
- SCHWILLE, F. 1957: Das Härtedreieck. *Gas- und Wasserfach* 98/12, 280-282.
- SHTERNINA, E.B. 1960: Solubility of gypsum in aqueous solutions of salts. *Int. Geol. Review* 2, 605-616.
- SKEMPTON, A.W. 1964: Long-term stability of clay slopes. *Géotechnique* 14/2, 77-101.
- 1985: Residual strength of clays in landslides, folded strata and the laboratory. *Géotechnique* 35/1, 3-18.
- SOMMER, H. 1987: Beton aus der Römerzeit. *Zement und Beton* 32/2, 62-65.
- SONDEREGGER, U.C. 1985a: Das Scherverhalten von Kaolinit, Illit und Montmorillonit. *Mitt. Inst. Grundbau und Bodenmechanik ETHZ* 129.
- 1985b: Interpretationsversuch des Scherverhaltens reiner Tone auf der Basis von Texturuntersuchungen. *Eclogae geol. Helv.* 78/1, 137-149.
- SPRUNG, S. 1978: Beton für Meerwasserentsalzungsanlagen. *Betontechnische Ber.* 19, 93-104.
- STEINER, W. 1989: Wisenbergtunnel (Bahn 2000). Schweiz. Ing. Arch. SIA-Dokumentation D 037, 69-80.
- THODE, H.G. & MONSTER, J. 1965: Sulfur isotope geochemistry of petroleum, evaporites and ancient seas. In: *Fluids in Subsurface Environments* (Ed. by YOUNG, A. & GALLEY, J.E.). *Mem. Am. Assoc. Petrol. Geol.* 4, 367-377.
- THORIN, R. 1986: Caractéristiques des masses et marnes du gypse et de leurs faciès d'altération dans la région Parisienne, Méthodologie des études géotechniques. *Bull. Int. Assoc. Eng. Geol.* 33, 73-89.
- TRÜB, U.A. 1985: Chemische Angriffe auf Beton. *Cementbulletin* 53/13, 1-5.
- TRÜMPY, R. 1980: *Geology of Switzerland, Part A: An Outline of the Geology of Switzerland*. Wepf, Basel.
- VAN EVERDINGEN, R.O., SHAKUR, M.A. & KROUSE, H.R. 1982: Isotope geochemistry of dissolved, precipitated airborne, and fallout sulfur species associated with springs near Paige Mountain, Norman Range, N.W.T. *Can. J. Earth Sci.* 19, 1395-1407.

VUATAZ, F.-D. 1982: Hydrogéologie, géochimie et géothermie des eaux thermales de Suisse et des régions alpines limitrophes. Beitr. Geol. Schweiz Hydrologie 29.

WALLRAUCH, E. 1969: Verwitterung und Entspannung bei überkonsolidierten tonig-schluffigen Gesteinen Südwestdeutschlands. Diss. Univ. Tübingen.

WALZ, K. & WISCHERS, G. 1976: Über Aufgaben und Stand der Betontechnologie. Betontechnische Ber. 17, 135-169.

WEAVER, C.E. 1956: The distribution and identification of mixed-layer clays in sedimentary rocks. Amer. Mineral. 41, 202-221.

WEBER, J. 1987: Die Karbonatisierung des Betons und deren Einfluss auf die Betonbeständigkeit. strasse und verkehr 73/4, 226-232.

WICHTER, L. 1985: Ergebnisse von Langzeitmessungen im Wagenburgtunnel, Stuttgart. Tunnel 1985/4, 254-257.

WILDBERGER, A. 1981: Zur Hydrogeologie des Karstes im Rawil-Gebiet. Beitr. Geol. Schweiz Hydrologie 27.

WIRTH, K. 1974: Spurenelementgehalte in Quellwässern und ihre Beziehungen zum durchflossenen Gestein. Geol. Mitt. 12, 367-388.

YONGE, C.Y. & KROUSE, H.R. 1987: The origine of sulphates in Castleguard Cave, Columbia Icefields, Canada. In: Isotopes in the Sedimentary Cycle (Ed. by CLAUSER, N. & CHAUDHURI, S.). Chem. Geol. (Isot. Geosc. Sect.) 65, 427-433.

B) Unpublizierte Arbeiten und Berichte privater Büros

BACHMANN, M. 1983: Einsatz geophysikalischer Methoden für die geothermische Prospektion. Inst. Geophysik ETHZ. Unpubl. Diplomarbeit.

MERKI, P. 1958: Geologische Untersuchungen im Aargauer Jura; Blatt Aarau, östlicher Teil. Geol. Inst. ETH und Univ. Zürich. Unpubl. Diplomarbeit Nr. 11.

MÜRI, J. 1959: Geologische Untersuchungen im Aargauer Jura; Blatt Rupperswil, nördlich der Aare. Geol. Inst. ETH und Univ. Zürich. Unpubl. Diplomarbeit Nr. 51.

NAGRA 1989: Hydrochemische Analysen, Regionalprogramm Nordschweiz. Nagra, Baden. Unpubl. interner Bericht, NIB 89-06.

DR. VONMOOS AG 1960: Die Gips und Anhydrit führenden Triasschichten im östlichen Faltenjura zwischen Lostorf und Habsburg, Kt. Aargau. Unpubl. Bericht 464.

—1962: Gipsvorkommen zwischen Riepel und Staffelegg (AG), Untersuchung Frühling 1962. Unpubl. Bericht 464/2.

—1966: Gipsbruch Riepel, Geologische Aufnahmen 1966. Unpubl. Bericht 464/3.

—1972: Verbreiterung der unteren Geissbergstrasse, Ennetbaden. Unpubl. Bericht 2750.

—1973: Ausbau der unteren Geissbergstrasse, Ennetbaden. Unpubl. Bericht 2947.

—1979: Mehrzweckhalle Bachteli, Ennetbaden, Geologischer Bericht. Unpubl. Bericht 3573/2.

—1983: Umfahrungstunnel Ennetbaden, Ergebnisse der Sondierungen 1983. Unpubl. Bericht 3736.

—1984: Nationalstrasse N3/07, Bözbergtunnel Südportal - Birrfeld, Resultate von hydrogeologischen Untersuchungen zwischen Habsburg und der Therme Bad Schinznach. Unpubl. Bericht 3477/6.

—1985: Umfahrungstunnel Ennetbaden, Ergänzende Untersuchungen 1985 und Grundwasseruntersuchungen 1983/1985. Unpubl. Bericht 3736/2.

—1985: Wohn- und Geschäftshaus Adler, Ennetbaden, Baugrunduntersuchung. Unpubl. Bericht.

—1986: Umfahrungstunnel Ennetbaden, Hydrogeologische Untersuchungen 1986. Unpubl. Bericht 3736/4.

—1987: Nationalstrasse N3/07, Habsburgtunnel Objekt 709, Geologisch-geotechnische Unterlagen für die Submission. Unpubl. Bericht 3477/9.

ZIEGLER, M. 1958: Geologische Untersuchungen zwischen der Staffelegg und dem Bözberg (Aargauer Jura). Geol. Inst. ETH und Univ. Zürich, unpubl. Diplomarbeit Nr. 50.

C) Geologische Karten

BITTERLI-BRUNNER, P., FISCHER, H. & HERZOG, P. 1984: Geol. Atlas der Schweiz 1:25000, Blatt Arlesheim (LK 1067). Geol. Komm., Atlasblatt 80.

DIEPOLD, P., LAUBSCHER, H.P., SCHNEIDER, A. & TSCHOPP, R. 1963: Geol. Atlas der Schweiz 1:25000, Blatt St. Ursanne (LK 1085). Geol. Komm., Atlasblatt 40.

HOFMANN, F. 1981: Geol. Atlas der Schweiz 1:25000, Blatt Neunkirch (LK 1031). Geol. Komm., Atlasblatt 74.

ISLER, A., PASQUIER, F. & HUBER, M. 1984: Geologische Karte der zentralen Nordschweiz 1:100000 (mit angren-

zenden Gebieten von Baden-Württemberg). Schweiz. Geol. Komm., Geol. Spezialkarte 121.

DE QUERVAIN, F., FREY, D., HOFMÄNNER, F. & JENNY, V. 1963: Geotechnische Karte der Schweiz 1:200000, Blatt 2. Kümmerly & Frey, Bern.

DE QUERVAIN, F., HOFMÄNNER, F., JENNY, V. & KÖPPEL, V. 1964: Geotechnische Karte der Schweiz 1:200000, Blatt 1. Kümmerly & Frey, Bern.

WITTMANN, O., HAUBER, L., FISCHER, H., RIESER, A. & STÄHELIN, P. 1970: Geol. Atlas der Schweiz 1:25000, Blatt Basel (LK 1047). Geol. Komm., Atlasblatt 59.

ANHANG

A 1 Verzeichnis der verwendeten Normen zur Untersuchung von Lockergesteins- und Betonproben

Norm	Ausgabe	Thema
DIN 4030	1969	Beurteilung betonangreifender Wässer, Böden und Gase
DIN 18125	1986	Bestimmung der Dichte des Bodens, Labormethoden
SIA 162, 162/1	1989	Betonbauten, Materialprüfung an Betonbauten
SNV 670005	1973	Klassifikation der Lockergesteine; Feldmethode nach USCS
SNV 670008	1973	Klassifikation der Lockergesteine; Laboratoriumsmethode nach USCS
SNV 670340	1974	Wassergehalt
SNV 670345	1973	Konsistenzgrenzen
SNV 670810c	1985	Siebanalyse
SNV 670816	1969	Schlammanalyse nach der Aerometermethode

A 2 Verzeichnis der verwendeten hydrochemischen Untersuchungsmethoden

Die Analyse der Wasserproben erfolgte für die meisten Parameter im hydrochemischen Labor des Lehrstuhls für Ingenieur-geologie an der ETH Höggerberg. Neben titrimetrischen Methoden, die u.a. in HÜTTER (1984) im Detail beschrieben sind, standen uns ionensensitive Elektroden, ein Kolorimeter sowie ein Atomabsorptionsspektrometer zur Verfügung, das sowohl für Absorptionsverfahren (AAS) wie auch für Emissionsbetrieb (AES) geeignet ist. Die Untersuchungen mit dem Anionenchromatographen (AC) konnten auf einem entsprechenden Gerät im Laboratorium für organische Chemie der ETHZ durchgeführt werden.

Spez. elektrische Leitfähigkeit:	Messung mit feldtauglichem Gerät (WTW LF91), mit eingebautem Temperaturfühler und automatischer Temperaturkompensation (Referenztemperatur 20°C)
Gesamthärte:	titrimetrisch
Karbonathärte:	titrimetrisch
Calcium:	titrimetrisch
Magnesium:	berechnet aus der Gesamthärte, sowie den analytisch bestimmten Konzentrationen von Calcium und Strontium (Annahme: Barium-Konzentration ist vernachlässigbar)
Strontium:	AAS, N ₂ O-Acetylen-Brenngas, Wellenlänge 460.7 nm
Lithium:	AES, Luft-Acetylen-Brenngas, Wellenlänge 670.8 nm
Natrium:	AES, Luft-Acetylen-Brenngas, Wellenlänge 589.0 nm
Kalium:	AES, Luft-Acetylen-Brenngas, Wellenlänge 766.5 nm
Fluorid:	Ionensensitive Elektrode (ORION), Überprüfung mit AC
Chlorid:	titrimetrisch, bei kleinen Konzentrationen Überprüfung mit AC
Bromid:	AC
Jodid:	AC
Nitrat:	AC
Sulfat:	kolorimetrisch mit Hilfe des Spektralphotometers nach Bariumsulfat-Fällung, bei kleinen Konzentrationen Überprüfung mit AC
Hydrogenkarbonat:	Bei den in den untersuchten Proben vorherrschenden Bedingungen entspricht der m-Wert (Säureverbrauch bis pH=4.3) der Hydrogenkarbonat-Konzentration