

BEITRÄGE ZUR GEOLOGIE DER SCHWEIZ
GEOTECHNISCHE SERIE

herausgegeben von der

Schweizerischen Geotechnischen Kommission

(Organ der Schweizerischen Naturforschenden Gesellschaft)

MATÉRIAUX POUR LA GÉOLOGIE DE LA SUISSE
SÉRIE GÉOTECHNIQUE

publiés par la

Commission Géotechnique Suisse

(Organe de la Société Helvétique des Sciences Naturelles)

Lieferung 65

Bundesamt für Strassenbau
Bern

Kanton Uri
Baudirektion

Kanton Nidwalden
Baudirektion

Geologischer Schlussbericht

Seelisbergtunnel

Zusammenfassung

T. R. Schneider

1984

In Kommission bei Kümmerly & Frey AG, Geographischer Verlag, Bern
Druck: Speich AG, Zürich

Vorwort der Schweizerischen Geotechnischen Kommission

An der Sitzung vom 25. Januar 1984 beschloss die Kommission, den zusammenfassenden geologischen Schlussbericht des Seelisbergtunnels der Nationalstrasse N2 von T. R. Schneider in die Beiträge zur Geologie der Schweiz, Geotechnische Serie, aufzunehmen.

Der Bericht gibt kurze Hinweise auf die Voruntersuchungen, befasst sich aber hauptsächlich mit den Beobachtungen und den verschiedenartigen Problemen während dem Bau des Tunnels und versucht, für die verschiedenen Fragen eine abschliessende Bilanz zu ziehen. Die grosse Menge von Einzelbeobachtungen oder Messungen wird zu graphischen Darstellungen zusammengefasst, so dass der Bericht einen wertvollen Überblick über zahlreiche geologische, geotechnische oder hydrogeologische Resultate vermittelt, dies nicht zuletzt auch in Hinsicht auf die im Berg auftretenden Methanvorkommen.

Die Kommission dankt den Autobahnbüros der Kantone Uri und Nidwalden für die Finanzierung des Drucks dieser Arbeit sowie dem Bundesamt für Strassenbau für seine konstruktive Mithilfe.

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

Zürich, 16. Juli 1984

Schweizerische Geotechnische Kommission

Der Präsident:

C. Schindler

Inhaltsverzeichnis

	Seite		
Vorwort der Schweiz. Geotechnischen Kommission	2	4.3.1 Ausbruch Tunnelröhren	41
Verzeichnis der Anhänge	4	4.3.2 Ausbruchsklassen	43
1. Einleitung	5	4.3.3 Zentralen Rütönen und Hattig	44
2. Übersicht über die Geologie und das Bauwerk	7	4.4 Schacht Hattig	45
2.1 Allgemeine Geologie	7	4.5 Konventionelle Ausbrüche Los Huttegg ...	45
2.2 Der Seelisbergtunnel	7	4.5.1 Pilotstollen	45
2.2.1 Vorgeschichte	7	4.5.2 Zentrale Huttegg und Versuchskaverne	47
2.2.2 Linienführung	9	4.5.3 Umleitbauwerk 19 und Querschläge	48
2.2.3 Losunterteilung	10	4.5.4 Abluftbauwerk	48
2.3 Vorkenntnisse, Voruntersuchungen und Sondierungen	11	4.6 Los Büel	48
2.3.1 Vorkenntnisse	11	4.6.1 Tunnelröhren	48
2.3.2 Voruntersuchungen und Sondierungen	11	4.6.2 Ausbruchsklassen	51
2.3.3 Sondierungen während des Baus ...	12	4.6.3 Umleitbauwerk und Ventilatorenkaverne	52
3. Geologie	14	4.7 Amdenermergelstrecke (Los Rütönen)	52
3.1 Übersicht	14	4.7.1 Verhalten beim Durchörterern	52
3.1.1 Tektonik	14	4.7.2 Verhalten nach der Durchörterung, Deformationsmessungen	53
3.1.2 Stratigraphie	14	4.7.3 Schäden in der seeseitigen Rigole der Seeröhre	53
3.1.3 Lithologie	15	4.7.4 Geotechnische Untersuchungen ...	53
3.2 Spezielle Hinweise auf die durchörterten Schichtserien	18	4.7.5 Ergänzende Verformungsmessungen	56
3.2.1 Drusberg-Decke	18	4.7.6 Sanierungsmassnahmen	57
3.2.2 Axen-Decke	22	4.8 Mechanische Vortriebe Los Huttegg	57
3.2.3 Flyschunterlage der Axen-Decke	24	4.8.1 Fräsen des Erschliessungstollens 70	57
3.3 Tektonik	24	4.8.2 Bestimmung geotechnischer Kennziffern	58
3.3.1 Drusberg-Decke	25	4.8.3 Erfahrungen beim Vortrieb mit dem «Big John»	63
3.3.2 Axen-Decke	28	4.8.4 Geologisch-geotechnische Faktoren und Vortriebsleistung	64
3.3.3 Flyschunterlage der Axen-Decke ..	29	4.9 Vergleich Prognose - Befund der Ausbruchsklassen	66
3.4 Strukturen und Durchtrennung des Gebirgskörpers	29	5. Bergwasser	69
3.4.1 Trennflächentypen	29	5.1 Hydrogeologische Übersicht	69
3.4.2 Gefüge	30	5.1.1 Gebirgsdurchlässigkeit	69
3.4.3 Allgemeine Lagerungsverhältnisse	32	5.1.2 Karstprobleme	69
3.4.4 Durchtrennung des Felskörpers ...	32	5.2 Wasseranfall im Tunnel	71
3.5 Tonmineralogische und chemische Untersuchungen	35	5.2.1 Karsterscheinungen im Los Rütönen und Schacht Hattig	71
3.5.1 Tonmineralogische Untersuchungen	35	5.2.2 Übrige Bergwasserführung	72
3.5.2 Chemische Untersuchungen	35	5.3 Einfluss des Tunnels auf Oberflächenquellen	73
3.6 Vergleich Prognose-Befund	37	5.4 Chemismus des Bergwassers	73
4. Geotechnik	39	5.5 Wasser- und Felstemperaturen	73
4.1 Übersicht	39	6. Erdgas	75
4.2 Portalzonen	39	6.1 Allgemeine Gassituation	75
4.2.1 Portal Rütönen	39		
4.2.2 Portal Büel	41		
4.3 Los Rütönen	41		

6.1.1	Kenntnisse vor dem Bau.....	75	6.2.3	Kondensate.....	78
6.1.2	Erstes Gasvorkommen im Erschliessungsstollen	75	6.2.4	Einzelaustritte	78
6.1.3	Neubeurteilung der Gaslage	76	6.2.5	Gaskonzentration im freien Querschnitt	78
6.1.4	Geologische Sicherheitsmassnahmen während des Vortriebs	76	6.3	Untersuchungen im Hinblick auf den Tunnelbetrieb	78
6.1.5	Oberflächenuntersuchungen	77	6.4	Beurteilung der Erdgasvorkommen.....	79
6.2	Beobachtungen während des Vortriebs.....	77	6.5	Zusammensetzung des Erdgases.....	80
6.2.1	Vorbohrungen	77	6.6	Für den Betrieb getroffene Massnahmen...	80
6.2.2	Flächenhafte Ausgasungen	77			

Verzeichnis der Anhänge

		Seite
Anhang 1	Literaturverzeichnis	81
Anhang 2	Verzeichnis der durchfahrenen Schichtserien	83
	a) Schichtserien im Los Rütönen	83
	b) Schichtserien im Los Huttegg.....	84
	c) Schichtserien im Los Büel	84
Anhang 3	Definition der Ausbruchsklassen	86
Anhang 4	Geologisches Befundprofil durch die Bergröhre, 1:10000	
Anhang 5	Geologisch-geotechnische Horizontalschnitte, 1:10000	
	a) Los Rütönen	
	b) Los Huttegg	
	c) Los Büel	
Anhang 6	Bergwasser in den Tunnelröhren (Wasserführung und Chemismus), Längsprofil, 1:10000	
Anhang 7	Gasaustritte in den Tunnelröhren (Längsprofil 1:10000)	

1. Einleitung

Der Seelisbergtunnel ist ein Teilstück der Nationalstrasse N2, die als Nord-Süd-Transversale Basel mit Chiasso verbindet. Mit seinen zwei doppelspurigen, je rund 9,28 km langen Tunnelröhren, dem vertikalen Lüftungsschacht Hattig und dem Lüftungsbauwerk Huttegg ist er das grösste Einzelobjekt des schweizerischen Nationalstrassennetzes.

Der Tunnel liegt zum weitaus grössten Teil im Helvetikum, der Drusberg-Decke im Norden und der Axen-Decke im Süden. Einzig im südlichsten Abschnitt durchfährt er auf wenigen hundert Metern hauptsächlich parautochthoner Schächentaler Flysch sowie nördlich daran angrenzend – vor dem Erreichen der Überschiebung der Axen-Decke – ein schmales Band ultrahelvetischen Flysches. Gesamthaft betrachtet waren somit die geologischen Verhältnisse relativ komplex und damit auch die mit dem Bau verknüpften geotechnischen Fragen.

Da zwischen Beckenried im Norden und Seedorf am Süden des Urnersees keine von Seiten der Besiedlung und damit dem Bedürfnis nach Anschlüssen bedingten Zwangspunkte bestanden, konnte bei der Wahl der Linienführung des Seelisbergtunnels weitgehend auf die örtlichen geologischen und topographischen Bedingungen Rücksicht genommen werden. Die Projektierung wurde somit von Seiten der Geologie und Geotechnik massgebend beeinflusst (SCHNEIDER, 1979). Während des Baues waren es neben den laufend anfallenden geologischen und geotechnischen Problemen hauptsächlich die Gasführung, die von Seiten der Geologie erhebliche Aufwendungen erforderte. Die wöchentlichen zuhanden der Bauleitungen und Unternehmungen abzufassenden Gasbulletins, die im wesentlichen eine Prognose der in den kommenden Tagen zu erwartenden Gaslage enthielten, erforderten eine laufende Nachführung der in den Vortrieben angetroffenen geologischen Verhältnisse und ein Vergleich mit den Erwartungen. Das Kernstück der geologischen Erfassung der neu geschaffenen, aufgrund der nachfolgenden Auskleidung der Tunnelröhren nur kurzfristig zugänglichen Aufschlüsse bildet eine Aufnahme sämtlicher konventionell aufgefahrener Tunnelstrecken in den Losen Nord und Süd sowie der Pilotstollen des Mittelloses im Massstab 1:200. Die Ausweitung auf Tunnelgrösse in letzterem wurde mittels periodisch aufgenommener Brustbilder erfasst.

Die umfangreiche geologische Dokumentation, zusammen mit den geotechnischen Erfahrungen, sowie sämtliche mit der Geologie und Geotechnik zusammenhängende Untersuchungen «in situ» und im Laboratorium wurden in einem voluminösen Schlussbericht zusammengefasst. Aufgrund seines Umfanges erhielt dieser nur eine sehr beschränkte Auflage, indem einzig folgende Stellen mit Exemplaren bedient wurden: Bundesamt für Strassenbau, Baudirektionen der Kantone Uri und Nidwalden, Schweizerische Sammelstelle geologischer Dokumente und ETH, Zürich. Um die wesentlichsten der sehr wertvollen Erkenntnisse aus dem grossen Bauwerk gleichwohl einem grösseren Interessentenkreis zugänglich zu machen, wurde vom Technischen Ausschuss der Baukommission Seelisbergtunnel beschlossen, die Zusammenfassung des Schlussberichtes etwas umfangreicher zu gestalten und als in sich geschlossenes Dokument in einer grösseren Auflage zu drucken. Ein gleiches Vorgehen ist für den Schlussbericht über den Gotthard-Strassentunnel vorgesehen. Freundlicherweise war die Schweizerische Geotechnische Kommission bereit, die Drucklegung dieser Zusammenfassung des Schlussberichtes in den Beiträgen zur Geologie der Schweiz, Geotechnische Serie, zu übernehmen. Der Originaltext des den Behörden unterbreiteten Berichtes wurde dabei in unveränderter Form übernommen.

Die geologische Beratung während der ersten Projektierungsphase des Seelisbergtunnels lag bis ins Jahr 1968 in den Händen von Herrn Dr. R. U. Winterhalter, Zürich, in den Jahren 1968–1970 im Büro der beratenden Geologen Dr. R. U. Winterhalter und Dr. T. R. Schneider. Ab 1970, d.h.

insbesondere während der Bauphase, war der Verfasser mit der Beratung beauftragt. Während der Bauphase waren mehrere Mitarbeiter des Verfassers mit Aufnahmen von unterschiedlicher Dauer tätig, so insbesondere die Herren Dr. H. U. Aeberli, R. Chevolet, Dr. J.-P. Jenni, T. Juillard, Dr. F. Keller, W. Klemenz und Dr. J. Uttinger. Die Zusammenstellung des grössten Teils des Schlussberichtes besorgte der langjährige Mitarbeiter des Verfassers, Herr Dr. F. Keller.

Der Verfasser möchte an dieser Stelle den Herren Direktor J. Jakob und Sektionschef F. Ruckstuhl vom Bundesamt für Strassenbau, den Herren Kantonsingenieuren P. Püntener, Uri, und R. Zobrist, Nidwalden, sowie den Herren H. Bargähr, Chef Nationalstrassenbüro des Kantons Uri, und B. Boffo, Kantonsingenieur-Stellvertreter, Nidwalden, seinen besten Dank aussprechen, einmal für die Erlaubnis, das vorliegende Dokument zu publizieren, im weiteren aber auch für die Bereitschaft, die Publikationskosten zu Lasten des Bauwerkes zu übernehmen.

2. Übersicht über die Geologie und das Bauwerk

2.1 Allgemeine Geologie

Im Bereich des Seelisbergtunnels besteht das Gebirge linksufrig des Urnersees ausschliesslich aus Sedimenten des Helvetikums, die in der Kreide und im Tertiär abgelagert wurden. Einen guten Überblick über die Sedimentationsgeschichte des Helvetikums und die regionale Tektonik liefern die von der Schweizerischen Geologischen Gesellschaft herausgegebenen Führer der Schweiz von 1934 und 1967 sowie die von TRÜMPY (1980) verfasste «Geology of Switzerland».

Das in bautechnischer Hinsicht wichtigste Merkmal des Helvetikums ist die zyklische Sedimentation in der *Kreide*. Sie führte zu grossräumigen Wechsellagerungen von bautechnisch im allgemeinen standfesten Kalken mit weniger standfesten Mergeln. Bautechnische Konsequenzen ergaben sich auch aus der Faziesverteilung im ursprünglichen Sedimentationsraum. Die im Süden abgelagerten Schichten sind mächtig und zeigen eine Tendenz zur Vermergelung. So entstammen die beiden vom Seelisbergtunnel auf einer längeren Strecke durchfahrenen Mergelserien dem südlichen Helvetikum. Die nordhelvetischen Schichtserien sind im Gegensatz dazu weniger mächtig und kalkiger. In lithologischer Hinsicht sind spätige (neritische) Kalke und grobgebankte bis massige Gesteine im Nordhelvetikum häufiger; dichte (pelagische) und dünn geschichtete dagegen im Südhelvetikum.

Im *Tertiär* ändert der lithologische und damit auch der bautechnische Charakter der Sedimente. Über einer voreozänen Erosionsfläche folgen auf die Flachwassersedimente des Alttertiärs (Sandsteine und Nummulitenkalke), pelagische Schiefer (Globigerinenschiefer, Stadschiefer) sowie als letztes die terrigenen Flyschablagerungen des Nordhelvetikums mit Tonschiefern, gebankten Sandsteinen und lokal auch Konglomeraten.

Die ältesten Spuren *tektonischer Bewegungen* sind die bereits in der Trias einsetzenden synsedimentären Bruchbildungen, die teilweise sprunghafte Mächtigkeits- und Faziesveränderungen innerhalb einer Schichtserie zur Folge hatten. Bei späteren tektonischen Beanspruchungen begannen die Brüche oft erneut zu spielen (sogenannte persistente Brüche).

Auf die alpine Gebirgsbildung wirkten sich die grossräumigen Faziesunterschiede insofern aus, als die mächtigeren Schichtstapel des südlicheren Ablagerungsraumes in ihrer heutigen Form einen ruhigeren Faltenbau aufweisen als die weniger mächtigen und von mehr synsedimentären Brüchen durchzogenen des nordhelvetischen. Im Zuge der Deckenbildung entstand die in der Fig. 1 dargestellte tektonische Situation mit der Drusberg-Decke im Norden und der in einen Nord- und einen Südlappen unterteilten Axen-Decke im Süden sowie der tertiären Flyschunterlage der Axen-Decke im Bereich des Südportals (Portal Büel). Die aus dem südlichen Ablagerungsgebiet stammende Decke (Drusberg-Decke) gelangte somit im allgemeinen weiter nach Norden als die nordhelvetische (Axen-Decke). Die teilweise beträchtlichen Unterschiede zwischen Drusberg-Decke und Axen-Decke bezüglich Lithologie und Schichtmächtigkeiten sind unter anderem darauf zurückzuführen, dass ihre Sedimentationsräume nicht unmittelbar aneinandergrenzten, sondern durch einen Streifen, dem mittelhelvetischen, getrennt waren, dem heute das Helvetikum der Rigi-Hochflue und des Urmiberges entspricht (helvetische Randketten).

2.2 Der Seelisbergtunnel

2.2.1 Vorgeschichte

Bereits zur Zeit des zweiten Weltkrieges bestanden erste Pläne für eine linksufrige Vierwaldstättersee-Strasse. Sie sollte als touristische Panoramastrasse über Seelisberg nach Bauen führen. Im Zuge der Nationalstrassenplanung nahm die Idee einer linksufrigen Verbindung zwischen Nidwalden und Uri konkretere Formen an. Zwischen Beckenried und Bauen respektive Seedorf bestanden keine verkehrstechnische oder siedlungspolitische Zwangspunkte. Zudem

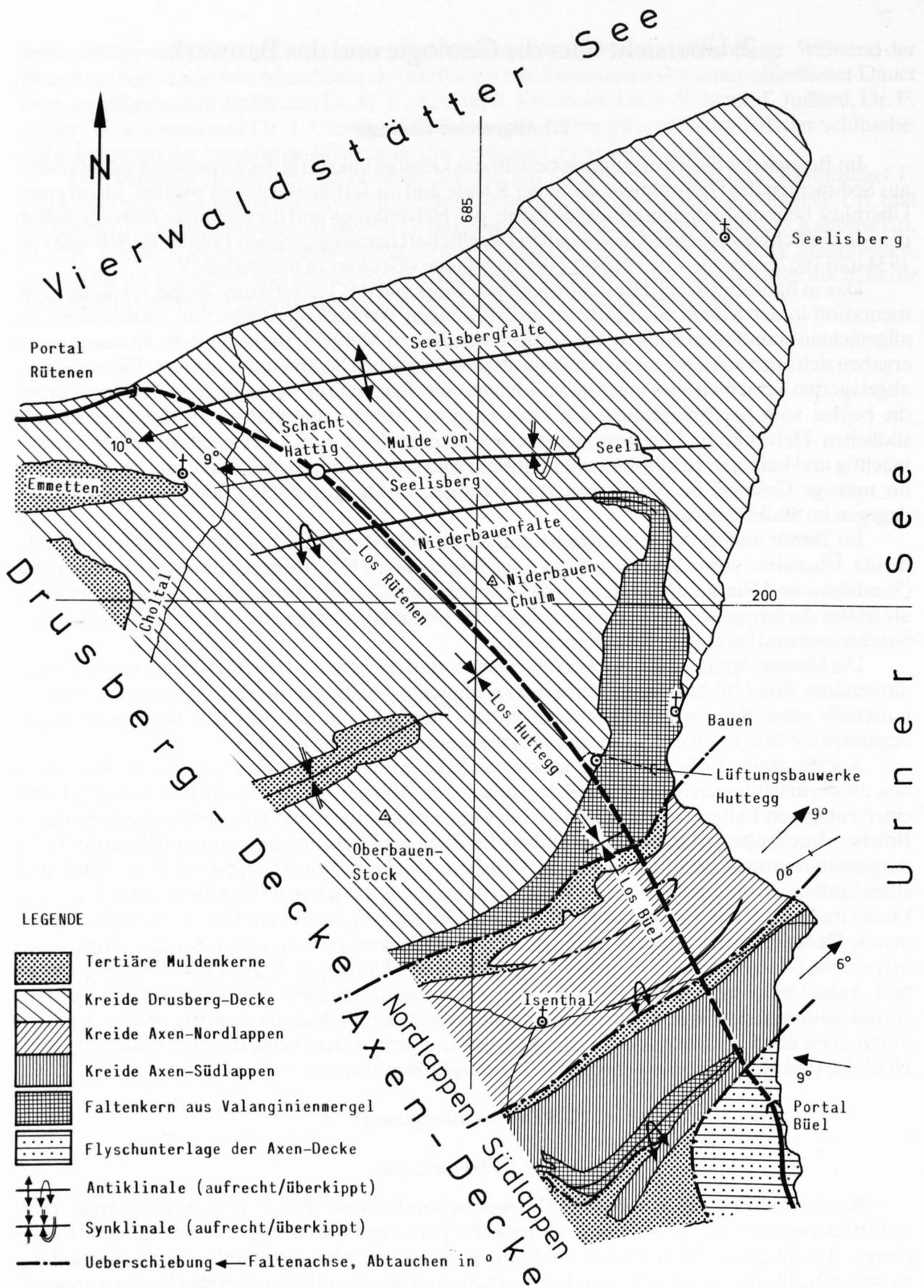


Fig. 1: Tektonische Kartenskizze 1:50000

hatten zu jener Zeit die Probleme des Umwelt- und Landschaftsschutzes noch nicht das heutige Gewicht. Die Linienführung konnte deshalb weitgehend aufgrund der topographischen und geologisch-geotechnischen Randbedingungen gewählt werden.

Bei den ersten Variantenstudien waren die projektierenden Ingenieure nach wie vor im Sinne einer Panoramastrasse bestrebt, die Strasse soweit als möglich offen und die Tunnelstrecken kurz zu gestalten. So sah ein erstes Vorprojekt einen kurzen Tunnel von nur rund 3 km Länge vor, mit dem die Nase von Treib-Seelisberg abgeschnitten werden sollte (Fig. 2). Sie wurde hauptsächlich aus heimat- und naturschützerischen Gründen (Rütliwiese) und aufgrund der zu erwartenden bautechnischen Schwierigkeiten in den steilen, stark coupierten Hängen südlich des Rütli aufgegeben.

Im zweiten Vorprojekt war ein rund 4 km langer Seelisbergtunnel Härggis-Schwäntlen geplant. Die Mulde von Bauen sollte knapp oberhalb des Dorfes offen gequert werden. Weiter südlich schloss der 3 km lange Isenthalertunnel an. Dieses Projekt wurde bis zur Ausschreibungsreife ausgearbeitet, jedoch fallengelassen, als sich im südlichsten Teil der offenen Strecke eine mögliche Bedrohung der künftigen N2 durch die Ende der 60er Jahre erneut in Bewegung geratenen Rutschung Cholrütli abzeichnete.

2.2.2 Linienführung

Ausgehend vom Konzept einer Hinterfahrung der Rutschung Cholrütli, die einer Überbrückung vorgezogen wurde, entstand das Projekt des heutigen Seelisbergtunnels. Folgende topographische, geologische und bautechnische Einflussfaktoren bestimmten die Linienführung

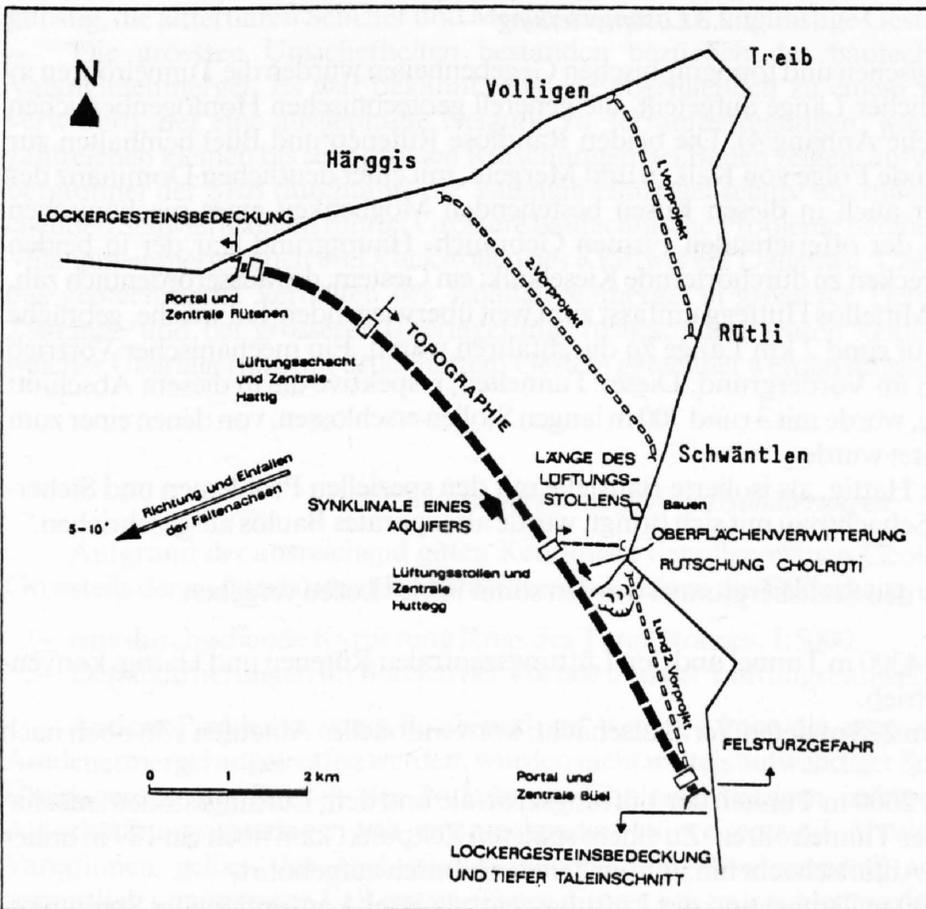


Fig. 2: Lage der Projektvarianten und geologische Randbedingungen für die Linienführung des heutigen Seelisbergtunnels.

- Das *Nordportal* wurde bis an die Westgrenze von anstehendem, bautechnisch günstigem Fels verschoben. Westlich des gewählten Punktes hätten in der Portalstrecke instabile Lockergesteinszonen und bautechnisch relativ ungünstige Flyschschiefer in einem schleifenden Schnitt durchörtert werden müssen.
- Der *Lüftungsschacht Hattig* wurde innerhalb des Längstälchens Emmetten–Happlig soweit südwärts plaziert, als dies bei der rasch ansteigenden Oberfläche und der damit zunehmenden Schachttiefe in vernünftigem Rahmen möglich war.
- Das Ausbuchten der Linienführung *gegen Osten* verkürzt den horizontalen Lüftungsstollen Huttegg. Andererseits setzte die tiefgründige Verwitterung der dort vorkommenden Valanginienmergel dem Ausbiegen gegen Osten Grenzen. Die gewählte Linienführung bot ferner den Vorteil, dass ein Anfahren der Synform aus Valanginienkalken (siehe Befundprofil, Anhang 4) mit dem darin vermuteten Aquifer unter Einhaltung eines ausreichenden Sicherheitsabstandes vermieden wurde.
- Die Lage des *Südportals* entspricht jener der alten Tunnellösung (Isenthalertunnel). Das Portal konnte in der Abbauwand eines aufgelassenen Steinbruches angelegt werden. Dieses brachte zudem den Vorteil einer relativen guten Zugänglichkeit mit sich. Eine Verschiebung in nördlicher Richtung hätte zu Gefährdungen der offenen Strecke durch Felsstürze geführt. Bei einer Verlängerung des Tunnels nach Süden hätten sich Probleme durch die Lockergesteinsbedeckung sowie ein tief eingeschnittenes Tal ergeben.

2.2.3 Losunterteilung

Aufgrund der geologischen und topographischen Gegebenheiten wurden die Tunnelröhren in drei Baulose unterschiedlicher Länge aufgeteilt, die generell geotechnischen Homogenbereichen entsprechen (Grenzen siehe Anhang 4). Die beiden Randlose Rüteneu und Büel beinhalten zur Hauptsache eine wechselnde Folge von Kalken und Mergeln, mit einer deutlichen Dominanz der kalkigen Serien. Von der auch in diesen Losen bestehenden Möglichkeit eines mechanischen Vortriebes machte keine der offerierenden Firmen Gebrauch. Hauptgrund war der in beiden Randlosen auf längere Strecken zu durchörternde Kieselkalk; ein Gestein, das ausserordentlich zäh, hart und abrasiv ist. Das Mittellos Huttegg umfasst zum weit überwiegenden Teil weiche, gebräuche Valanginienmergel, die auf rund 2 km Länge zu durchfahren waren. Ein mechanischer Vortrieb stand hier von Anfang an im Vordergrund. Dieser Tunnelteil, respektive die in diesem Abschnitt liegende Zentrale Huttegg, wurde mit 3 rund 700 m langen Stollen erschlossen, von denen einer zum Lüftungsstollen ausgeweitet wurde.

Der Vertikalschacht Hattig, als isolierte Baustelle mit den speziellen Problemen und Sicherheitsvorschriften, die ein Schachtbau mit sich bringt, wurde als separates Baulos ausgeschrieben.

Die Bauarbeiten für den Seelisbergtunnel wurden somit in vier Losen vergeben:

- *Los Rüteneu* mit 2×4300 m Tunnel und den Lüftungszentralen Rüteneu und Hattig: konventioneller Sprengvortrieb.
- *Los Hattig* mit einem 273 m tiefen Vertikalschacht: konventionelles Abteufen von oben nach unten.
- *Los Huttegg* mit 2×2000 m Tunnel, der Lüftungszentrale und dem Lüftungsstollen: mechanischer Ausbruch der Tunnelröhren. Zu einem späteren Zeitpunkt kam noch ein 189 m hoher Vertikalschacht als Abluftschacht hinzu: zum Teil mechanisch aufgebohrt.
- *Los Büel* mit 2×2900 m Tunnel und der Lüftungszentrale Büel: konventioneller Sprengvortrieb.

2.3 Vorkenntnisse, Voruntersuchungen und Sondierungen

2.3.1 Vorkenntnisse

a) Geologie

Der Seelisbergtunnel liegt in einem Gebirgstheil, der in den bis zu 1700 m hohen Steilabstürzen längs des Urnersees geologisch sehr gut aufgeschlossen ist. Die Lage an einer vielbereisten Alpen-transversale brachte ferner mit sich, dass die Geologie dieses Querprofils bereits im letzten Jahrhundert das Interesse der damaligen Geognostiker und Geologen fand. In diesem Jahrhundert erfolgte eine erste systematische Kartierung durch BUXTORF (1916). Seine Schüler bearbeiteten das dem heutigen Seelisbergtunnel entsprechende Gebiet im Detail: FICHTER (1934) den Bereich zwischen Nordportal und Mittellos, ANDEREGG (1940) denjenigen des Südloses.

Die Arbeiten dieser beiden Autoren konnten in allem, was die Stratigraphie und die Tektonik betrifft, als zuverlässige Grundlagen für die Ausarbeitung der geologischen Prognose verwendet werden. Ferner standen die im Zusammenhang mit den früheren Tunnelvarianten erstellten Gutachten zur Verfügung.

b) Geotechnik

Über das bautechnische Verhalten der meisten Schichtserien lagen aufgrund von in der Region bestehenden Untertagebauten im Zeitpunkt der Projektierung bereits weitgehende Hinweise vor. Insbesondere die Tunnels der SBB und der Axenstrasse auf der rechten Seite des Urnersees sowie Kraftwerk- und Festungsbauten lieferten zahlreiche Informationen. So war bekannt, dass Valanginienkalk, Kieselkalk, Drusbergschichten, Schrattekalk und Gault bautechnisch als relativ günstig, die alttertiären Schiefer und Mergel dagegen als ungünstige Gesteine zu bewerten sind.

Die grössten Unsicherheiten bestanden bezüglich des bautechnischen Verhaltens der Valanginienmergel. Es war bekannt, dass sie oberflächlich zu einem weichen lehmigen Schutt verwittern, der eine ausgeprägte Neigung zu Terrainbewegungen, wie unter anderem auch die zahlreichen kleinen bis sehr grossen Rutschungen bei Bauen zeigen, aufweist. Der Stutzeck-Axenbergtunnel der SBB durchfährt die Valanginienmergel relativ oberflächennahe, was zu entsprechenden Schwierigkeiten führte. Grössere bautechnische Probleme bereiteten die oberflächennahen Valanginienmergel auch im Druckstollen des Kraftwerkes Dallenwil. Unbekannt war insbesondere das geotechnische Verhalten der Valanginienmergel in grösserer Tiefe, d.h. in unverwittertem Zustand und bei grösserer Überlagerung. Insbesondere waren keine Hinweise zu finden, ab welcher Überlagerung mit druckhaftem Gestein gerechnet werden musste.

2.3.2 Voruntersuchungen und Sondierungen

Aufgrund der ausreichend guten Kenntnisse der allgemeinen Geologie und Geotechnik des Grossteils der zu durchörternden Schichtserien konnten die Feldarbeiten beschränkt werden auf:

- eine durchgehende Kartierung längs des Tunneltrasses, 1:5000.
- Detailkartierungen im Bereich der Portale und der Lüftungsbauwerke.

Andere Probleme, wie z.B. ob und auf welche Länge die geotechnisch eher ungünstigen Amdenermergel angetroffen werden, wurden nicht mittels aufwendiger Sondierbohrungen (grösste Überlagerung im Bereich des Niderbauen-Chulms), sondern insbesondere im Rahmen der Ausschreibungsunterlagen mit entsprechenden Hinweisen und Abschätzungen der möglichen Variationen gelöst. Im geologisch-geotechnischen Prognoseprofil wurde diesbezüglich der vermutlich ungünstigste Fall eingezeichnet. Einige Spezialprobleme erforderten jedoch weitergehende Abklärungen.

Sondierbohrung Schacht Hattig

Der Schacht Hattig mündet in einem quartärbedeckten Längstal mit unbekannter Lockergesteinsmächtigkeit. Diese wurde mit einer 69 m langen Sondierbohrung ermittelt.

Seismik, Los Huttegg

Der Lüftungsstollen Huttegg musste in den äussersten Partien in lockergesteinsbedeckten, oberflächlich verwitterten und aufgelockerten Valanginienmergel unbekannter Dicke angelegt werden. Eine seismische Kampagne zeigte, dass die Lockergesteinsbedeckung durchwegs gering ist (bis ca. 20 m) und die Zone der oberflächlichen Auflockerung, mit Wellengeschwindigkeiten von weniger als 4200 m/s nur bis in eine Tiefe von 60 bis 70 m reicht.

Geotechnik Valanginienmergel

(Erschliessungsstollen und Versuchskammer)

Die Fragen der Druckhaftigkeit und des allgemeinen geotechnischen Verhaltens der Valanginienmergel konnten nur mittels eines direkten Aufschlusses in einem Sondierstollen beantwortet werden. Programmstudien zeigten zudem, dass die grossen Zeitverluste beim Umsetzen der vorgesehenen Tunnelfräse vermindert werden konnten, falls der Ausbruch der Kaverne für die Lüftungszentrale frühzeitig in Angriff genommen wurde. Aus diesen Gründen wurde noch vor der Ausschreibung und Vergebung der Bauarbeiten ein *Erschliessungsstollen* bis in den Bereich der Zentrale Huttegg vorgetrieben, der parallel zum künftigen Lüftungsstollen verläuft. Ergänzt wurde er durch eine parallel zum Haupttunnel angelegte *Versuchskammer*. Ihr Querschnitt entspricht jenem der Tunnelröhren.

Das Untersuchungsprogramm umfasste:

- Konvergenzmessungen im Erschliessungsstollen im Bereich der künftigen Lüftungszentrale,
- Deformationsmessungen mittels Extensometern in der Versuchskammer,
- Beobachtungen über das Verhalten verschiedener provisorischer Auskleidungssysteme, insbesondere von verschiedenen Ankertypen in der Versuchskammer,
- die Bestimmung von geotechnischen Kennziffern im Labor.

Einen Überblick über die durchgeführten Verformungsmessungen und die bautechnischen Konsequenzen der Versuche geben die Publikationen von LETSCH (1977) und SKAANES (1980). Im Hinblick auf das künftige Baugeschehen führte vor allem das Anfahren eines grösseren Erdgasvorkommens im Erschliessungsstollen zu weitreichenden Konsequenzen (Seite 75 ff). Die wichtigste bestand darin, dass zur Beherrschung der Gaslage ein Umluftsystem mittels Pilotstollen geschaffen werden musste. Nur so konnte die notwendige Frischluftmenge in den Vortriebsbereich gebracht werden. Ferner wurde die Beherrschung der Gaslage im Bereich des Bohrkopfes der ursprünglich vorgesehenen Vollschnitt-Tunnelfräse als so problematisch betrachtet, dass ein anderes mechanisches Abbausystem vorgesehen werden musste. Die Wahl fiel auf den in einem Schild montierten Reisszahnbagger «Big John».

2.3.3 Sondierungen während des Baus

Im Zuge der Detailprojektierung der gewichtigen Portalbauwerke musste sowohl beim Portal Rütönen wie auch beim Portal Büel die Felsoberfläche mit objektgebundenen Sondierbohrungen genauer abgetastet werden. Weitere Sondierbohrungen betrafen ausgesprochene Nebenschauplätze (Bauzufahrten, Installationsplätze).

Eine Verfeinerung der geologischen Prognose während des Vortriebs ermöglichten im Los Rütönen die bis zu 100 m langen Gasvorbohrungen, indem anhand von Bohrfortschritt, Bohrwasser und Bohrklein lithologische Veränderungen und Störungen erfasst werden konnten:

Nachdem die Pilotstollen Süd des Loses Huttegg die Grenze zwischen den bautechnisch schwierigen Valanginienmergeln und den Kalken der Axen-Decke nicht am vorgesehenen Ort antrafen, wurde im Pilotstollen der Seeröhre ab Kilometer 126.732 eine 85 m lange Kernbohrung angesetzt.

Die Staffelung der Vortriebe der Tunnelröhren in den Losen Rüteneu und Büel sowie der Ausbruch der Pilotstollen im Los Huttegg können im weitesten Sinne ebenfalls zu den Sondierungen während des Baus gerechnet werden.

3. Geologie

3.1 Übersicht

3.1.1 Tektonik

Der Seelisbergtunnel durchfährt in Richtung der Kilometrierung, d.h. von Norden nach Süden, folgende tektonische Einheiten und Elemente (Anhang 4):

Drusberg-Decke

- *Seelisbergfalte*, ein weitgespanntes aufrecht stehendes Gewölbe, dessen normalliegende Schichten an zahlreichen, vorwiegend südostfallenden Brüchen verstellt sind. Die bedeutendste unter ihnen ist die Choltalverwerfung mit einer Sprunghöhe von 200 m.
- *Mulde von Seelisberg* mit einem südvergenten, enggepressten und teilweise überfahrenen Muldenkern aus Amdenermergeln.
- *Niderbauenfalte*, liegende nordvergente Falte mit einem tektonisch stark reduzierten liegenden Schenkel (verkehrt liegende Schichtserie) und einem enggepressten, langgezogenen, tektonisch stark beanspruchten Antiklinalkern aus Valanginienmergeln. Diese inkompetente Schicht bildete gleichzeitig den Abscherhorizont der Drusberg-Decke.

Axen-Decke

- *Axen-Nordlappen* mit einer engen Valanginien-/Kieselkalk-Synform (= überkippte tauchende Antiklinale) und einer kofferförmigen Antiform mit Alttertiär im Kern (= verkehrt liegende Synklinale), Harderband-Struktur.
- *Axen-Südlappen* mit einer Spiegel-S-förmigen Falte zu Beginn und zerscherten Kalkschuppen in der Nähe der Überschiebungsfläche an der Südgrenze.

Flyschunterlage der Axen-Decke

- *Ultrahelvetischer Flysch*, ein schmales Band unterhalb der Überschiebungsfläche der Axen-Decke bildend.
- *Parautochthoner Schächentaler Flysch* mit Sandsteinen und Tonschiefern der Altdorfer Sandstein-Gruppe, die im Bereich der Überschiebungsfläche tektonisch stark beansprucht sind.

3.1.2 Stratigraphie

Detailangaben über die Schichtfolge, das Schichtalter und die Schichtmächtigkeiten sowie über die Lithologie der verschiedenen Einheiten im Bereich des Seelisbergtunnels finden sich in den Publikationen von FICHTER (1934) und ANDEREGG (1940). Einen Überblick bietet zudem die Legende des Anhanges 4.

Eine Reihe neuerer Arbeiten hatte die regionale Untersuchung einzelner Schichtserien bezüglich Lithologie, Sedimentologie und Mikropaläontologie zum Ziel; BURGER + STRASSER (1981), ISCHI (1978), OBERHÄNSLI-LANGENEGGER (1978), STRASSER (1982). In diesen Publikationen wurden zum Teil die herkömmlichen Bezeichnungen für die Schichtserien im Zuge einer internationalen Nomenklaturbereinigung (SCHWEIZ. GEOL. KOMMISSION, 1973) durch Formationsnamen ersetzt, wobei die Autoren vor allem die Verknüpfung mit stratigraphischen Bezeichnungen ausmerzten. Beispiele sind:

<i>neue Bezeichnung</i>	<i>Autor</i>	<i>herkömmliche Bezeichnung</i>
Wang-Formation	} OBERHÄNSLI-LANGENEGGER (1978)	Wangschichten
Amdener Formation		Amdenermergel
Choltal-Schichten		Seewerschiefer
Seewerkalk		Seewerkalk
Vitznau-Mergel	} BURGER, STRASSER (1981)	Valanginienmergel, Berrias-Valanginienmergel
Diphyoideskalk		Valanginienkalk (pelagische Fazies, Diphyoideskalk
Betliskalk		Valanginienkalk (neritische Fazies)

Im vorliegenden Schlussbericht wurde die herkömmliche, auch in den Ausschreibungsunterlagen verwendete, Nomenklatur beibehalten, da sich einerseits die neue Nomenklatur noch nicht durchgesetzt hat und andererseits die Bereinigung nicht konsequent durchgeführt wurde, denn gerade die im Falle des Seelisbergtunnelbaus Verwirrung stiftende Bezeichnung «Mergel» wurde beibehalten (konsequent wäre Vitznau-Formation und nicht Vitznau-Mergel). Die neu geschaffenen Formationsnamen oder Synonyme von Schichtserienamen werden im folgenden Text in Klammern aufgeführt.

Wie bereits erwähnt, gehört der mengenmässig weitaus grösste Teil der im Seelisbergtunnel durchörterten Gesteine der Kreide, und zwar der unteren Kreide an (Valanginienmergel, Valanginienkalk, Kieselkalk, Altmansschicht, Drusbergsschichten und Schrattenkalk). Die mittlere Kreide (Gault) und die obere Kreide (Seewerkalk und Amdenermergel) sind im Tunnelbereich nur in der Drusberg-Decke vorhanden.

Alttertiäre Schichten sind auf Tunnelniveau in beiden Lappen der Axen-Decke anzutreffen, fehlen dagegen in der Drusberg-Decke, weil die Mulde von Seelisberg erst westlich des Tunnels im Bereich von Emmetten, Tertiär enthält (siehe Fig. 1). Dem Tertiär sind ausserdem der ultrahelvetiche Flysch und die Gesteine der Altdorfer Sandstein-Gruppe beim Südportal zuzurechnen.

3.1.3 Lithologie

Im folgenden werden die im Tunnel angetroffenen Schichtserien kurz charakterisiert. Wie erwähnt sind ganz allgemein die Schichtserien der Axen-Decke weniger mächtig, kalkiger und undeutlicher geschichtet als jene der Drusberg-Decke. Infolge der zyklischen Sedimentation treten in verschiedenen Horizonten immer wieder gleichartige Gesteine auf, so z.B. glaukonitische Schichten zu Beginn eines Zyklus oder Echinodermenbrekzien, die den Zyklus häufig abschliessen.

Valanginienmergel (Berrias-Valanginienmergel, Vitznau-Mergel)

Die Valanginienmergel sind tektonisch stark beansprucht und zerschert, da diese inkompetente Schicht als Gleitmaterial diente, auf dem die Drusberg-Decke abgeschoben wurde. Es sind fahle, bräunlichgrau anwitternde, feinsandige, kalkige bis tonige Mergel. Eingeschaltet sind Mergelkalk- und Kalkbänke, zum Teil auch Wechsellagerungen von Kalken und Mergeln.

Valanginienkalk (Diphyoideskalk, Betliskalk)

In der Drusberg-Decke hell anwitternde, bräunlichgraue, feinspätige bis dichte, gut gebankte bis plattige Kalke, zum Teil kieselig mit unregelmässigen dunklen Tonhäuten. Muscheliger Bruch (pelagische Fazies des Valanginienkalkes = Diphyoideskalk). In der Axen-Decke ist der Valanginienkalk vorwiegend spätig (Echinodermenbrekzie, neritische Fazies des Valanginienkalkes = Betliskalk).

Graue Mergelschiefer und Schiefer der Kieselkalkbasis

Es handelt sich hier um mergelige bis kalkige Schiefer mit sehr feinen Glimmerschüppchen, die gegen unten durch zunehmend mächtiger werdende Einschaltungen von Kalkschichten in den Valanginienkalk übergehen.

Kieselkalk

Im Bereich des Tunnels kann der Kieselkalk grob dreigeteilt werden in (von unten nach oben):

- *Kieselkalkschiefer*: flaserige Schiefer, grau bis bräunlichgrau, fein, aber deutlich spätig, zäh, hart, kieselig.
- *Kieselkalk*: Eine glaukonitreiche Bank mit Mergelschiefern («Schifflichicht» = Lidernenschichten) erlaubt eine Unterteilung in einen unteren und einen oberen Kieselkalk. In der Drusberg-Decke besteht der untere Kieselkalk aus einer mächtigen Serie von grauen, mehr oder weniger feinspätigen, zähen, harten, kieseligen Kalken, die gut und dünnbankig geschichtet sind. Mächtigkeit der Bänke unten 5 bis 10 cm, oben 10 bis 25 cm. Im obersten Teil ist der untere Kieselkalk zum Teil knollig, zum Teil spätig ausgebildet. Der obere Kieselkalk besteht ebenfalls aus einer regelmässigen Wechsellagerung von Kieselkalkbänken mit dunklen Schieferzwischenlagen im dm-Bereich. In der Axen-Decke verschwindet die auffallend regelmässige Wechsellagerung («Mäuerchenkalk»). Der Kieselkalk ist bei ähnlicher lithologischer Beschaffenheit grobgebankt bis massig.
- *Echinodermenbrekzie*: auffallende, hellgelblich anwitternde, grobe, oft glaukonitische, spätige Echinodermenbrekzie.

Altmansschicht

Dunkler, grünlichschwarzer, sehr glaukonitreicher, kalkiger Grünsandstein, zum Teil auch pyritreich. Ausgezeichneter Leithorizont. Gegen oben in hellgrauen Mergelkalk mit weniger und unregelmässig verteiltem Glaukonit übergehend.

Drusbergschichten

Die Drusbergschichten bestehen aus einer Wechsellagerung von grauen Mergelschiefern mit grauen bis dunkelgrauen Kalkbänken. An der Basis dominieren die Mergelschiefer (= mergelige Drusbergschichten), gegen oben herrschen die Kalke vor (= kalkige Drusbergschichten). Die Kalke werden zuoberst meist grobkörniger und oft auch heller grau. Die Grenze zum Schrattenkalk ist meist unscharf, indem der Kalk schrattenkalkähnlich wird und gleichzeitig die mergeligen Schichten an Zahl und Mächtigkeit abnehmen (sogenannte Grenzschichten).

Schrattenkalk und Orbitolinaschichten

Im Gelände durch senkrechte, durchgehende Felsbänder auffallender Schichtkomplex aus grobgebankten, teilweise sogar massigen Kalken. Hellbräunlichgraue mit eingestreuten, oft groben Spatkörnchen, lokal Schalentrümmer, teilweise oolithisch-onkoidische Grundmasse, spröde. Ziemlich reiner Kalk und deshalb zu Karstbildung neigend. In den Schrattenkalk sind die *unteren Orbitolinaschichten* eingeschaltet, die aus einer Wechsellagerung von bräunlichgrauen, zum Teil

reichlich Orbitolinen führenden Mergeln mit mehr oder weniger mächtigen schrattenkalkähnlichen Kalkbänken bestehen.

Gegen oben wird der Schrattenkalk durch die *oberen Orbitolinaschichten* abgegrenzt: spätige bis sandige Schiefer und Kalke.

Gault

Äusserst wechselvolle Serie mit mehreren glaukonitischen, fossilführenden Horizonten und folgenden Einzelschichten:

- *Luitere-Zug*: dünner phosphoritischer und glaukonitischer Fossilhorizont sowie glaukonitarme Mergelschiefer (Luitere mergel).
- *Glaukonitführende Schiefer und Grünsandsteine*: an der Basis harte, sandige Schiefer, teils auch geschieferter, flaseriger Grünsandstein. Im oberen Teil massiger bis dickbankiger, kompakter, harter Grünsandstein, frisch schwarzgrün, sehr zäh mit 35 bis 80% Quarzkörnern.
- *Echinodermenbrekzie* (Brisibrekzie): massige oder gebankte Echinodermenbrekzie, mehr oder weniger glaukonitführend.
- *Kalksandstein*: feinkörniger, kalkreicher Sandsteinkomplex, grau; zum Teil glaukonitführend.
- *Concentricusschichten*: vorwiegend schiefrige Zone mit bis zu vier Phosphorit-Fossilhorizonten, lokal mit knolliger Kalkbank, sehr fossilreich.
- *Knollenschichten*: dunkle, spätige und relativ glaukonitreiche Kalke, gegen oben auch hell, glaukonitarm. Knollenstruktur mit Kalkknollen zwischen grünsandigen und mergeligen Schlieren. Oberster Teil bräunlich, feinspätig bis spätig, zuletzt teilweise hell und nahezu marmorartig mit grünsandigen Schlieren und pyritreichen Flecken.

Seewerkalke und -schiefer (Seewerkalk, Choltal-Schichten)

Dickbankiger bis flaserig-dünnbankiger, auffallend hellgelblicher bis fast weisser Kalk mit muscheligen Bruch, dicht. Gegen oben in Seewerschiefer übergehend. Diese sind seewerkalkähnlich, jedoch dünnplattig bis schiefrig, etwas dunkler und enthalten vermehrt Mergelfugen. Sie können von den Seewerkalken nicht eindeutig abgegrenzt werden.

Amdener mergel (Amdener Formation)

Monotone Serie von grauen, schiefrigen, im Tunnel relativ kompakt aussehenden Mergeln, hellgrünlichgrau anwitternd.

Alttertiär

Im Bereich des Seelisbergtunnels (Los Büel, Axen-Decke) können vier Schichten innerhalb des Alttertiärs unterschieden werden:

- *Glaukonitführende Sandsteine* mit Assilinen (Assilinen grünsand).
- *Nummulitenkalke*: bräunliche, schlecht gebankte Kalke mit reichlich Nummuliten und Assilinen (Complanata-Kalk).
- *Sandsteine*: graue, feinkörnige Sandsteine, zum Teil glaukonitführend (oberer Quarzsandstein?) in glimmerführende, schiefrige Sandsteine übergehend (Pectinitenschiefer).
- *Glimmerführende sandige Schiefer*, gelblich anwitternde Mergelschiefer (Stadschiefer).

Ultrahelvetischer Flysch

Dunkelgraue, globigerinenführende Mergelschiefer, die sowohl westlich wie östlich des Urnersees unmittelbar unter der Überschiebung der Axen-Decke vorkommen; von BRÜCKNER (1956) als ultrahelvetischer Flysch bezeichnet und mit dem «Blattengratflysch» verglichen.

Altdorfer Sandstein-Gruppe

Die Gruppe der Altdorfer Sandsteine enthält zwei lithologische Grundtypen: *Sandsteine* und *Tonschiefer*. Diese können in jeder Grössenordnung vom Millimeter- bis zum Dekameterbereich miteinander wechsellagern, wobei normalerweise ein Gesteinstyp dominiert.

Die *Sandsteine* sind im dm-Bereich gebankte, graublau, feste, zähe, glimmerführende Sandsteine mit tonigen Bankungsfugen, die vorwiegend 1 bis 10 mm mächtig sind. Daneben kommen dunkelgraue *Tonschiefer* mit sehr geringem Sandsteinanteil sowie untergeordnet auch regelmässige Wechsellagerungen von Tonschiefern mit Sandsteinen im cm-dm-Bereich vor.

3.2 Spezielle Hinweise auf die durchörterten Schichtserien

Im Anhang 2 sind alle durchörterten Schichtserien in der Reihenfolge ihres Antreffens aufgeführt. Die Angabe der Grenze bezieht sich auf die Verschneidung mit dem geotechnisch relevanten First. Die Lage der Grenzflächen geht ferner aus dem geologischen Befundprofil (Anhang 4) sowie den geologischen Horizontalschnitten (Anhänge 5a–5c) hervor.

In stratigraphischer und lithologischer Hinsicht lieferten die Tunnelaufschlüsse gegenüber den Beschreibungen von FICHTER (1934) und ANDEREGG (1940) nichts grundlegend Neues. Sie ermöglichen lediglich Präzisierungen und Ergänzungen.

Im folgenden wird nur auf jene Schichtserien näher eingegangen, die entweder geotechnisch von Bedeutung sind oder bei denen der Tunnelaufschluss über das Publierte hinausgehende geologische Informationen lieferte. Alle Detailangaben sind im 11. Teil des Schlussberichtes enthalten.

3.2.1 Drusberg-Decke

Von bautechnischer Bedeutung ist die Lithologie der Amdener- und der Valanginienmergel; geologische Zusatzinformationen konnten im Gault gewonnen werden. Von den übrigen Schichtserien liegen keine ausserordentlichen Beobachtungen vor.

a) Amdenermergel

Der Kern der Mulde von Seelisberg besteht aus ziemlich homogenen, relativ kompakten, dunkelgrauen Mergeln. Diese haben, aufgrund der tonmineralogischen Analysen (Seite 35) einen Schichtsilikatanteil von 30 bis 35%, bei Kalzitgehalten von 40 bis 49% und Dolomitgehalten von 2 bis 6%. Der Quarzgehalt ist mit 16 bis 21% relativ hoch. Das Gestein entspricht somit petrographisch einem *sandigen Mergel*.

Trotz der enggepressten Faltenform ist die Lagerung der Amdenermergel im Tunnelbereich weitgehend ruhig und tektonisch ungestört.

Neben der mittelsteil bis steil südfallenden Schieferung kommt eine flach südfallende Bankung vor. Die in Abständen von 1 bis 3 m auftretenden Bankungsfugen enthalten bis zu 2 cm Kalzit. Die primäre Schichtung, die diskordant zu diesen Strukturen verlaufen kann, ist nur ganz lokal als Stoffbänderung zu erkennen. Aus diesem Grunde konnte der Muldenkern nicht genau lokalisiert werden.

Die Amdenermergel sind im Seelisbergtunnel das jüngste Schichtglied der Drusberg-Decke. Sie setzen über dem Seewerkalk mit einer scharfen Grenze ein. Diese verläuft diskordant zur Schichtung des Seewerkalkes und greift in südlicher Richtung schichtweise rasch tiefer in diesen hinab (Fig. 3). Die unmittelbar über der Grenze folgenden Amdenermergel enthalten von 0,3 bis zu 1,2 m grosse Einschlüsse aus Seewerkalk sowie cm-grosse rundliche Einschlüsse aus einem dunkleren, seewerkalkähnlichen Gestein. Die ganze Erscheinung entspricht eher einer stratigraphisch bedingten Diskordanz (Transgression) als einem tektonischen Kontakt.

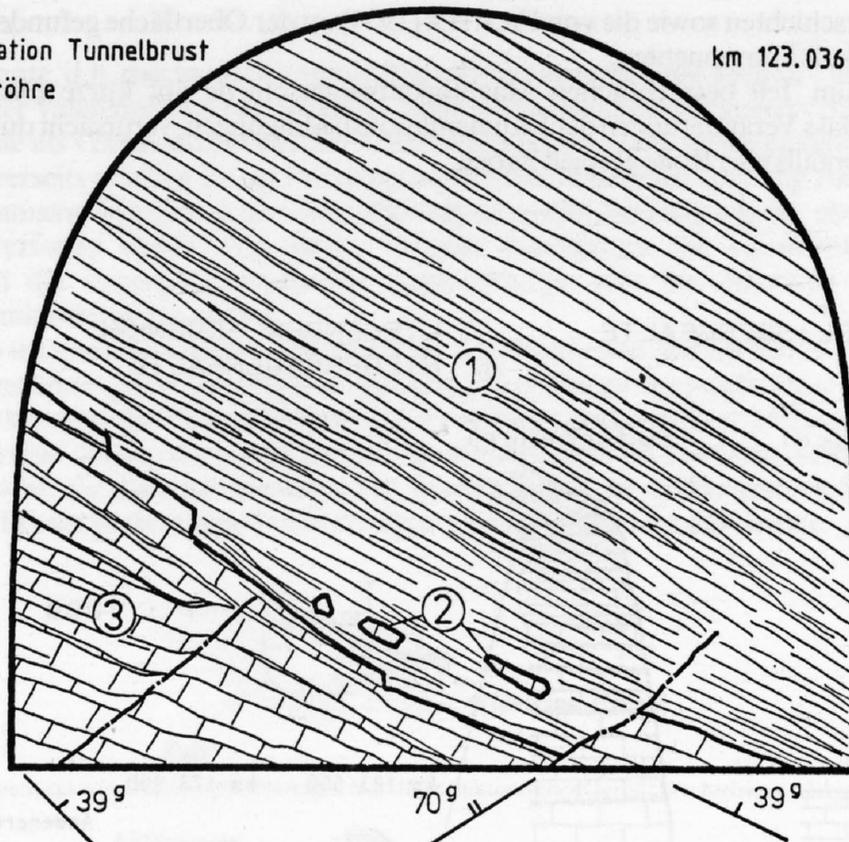


Fig. 3: Grenze Seewerkalk/Amdenermergel

1 = Amdenermergel

2 = Seewerkalkeinschlüsse in den Amdenermergeln

3 = im 1-3-dm-Bereich gebankte feingeschichtete Seewerkalke

b) Gault und Seewerkalkschichten

Die Ausbildung der einzelnen Schichten des Gaults ist raschen Wechseln unterworfen (FICHTER, 1934). So war auch im Tunnel das mehrmals durchfahrene Gault nie gleich ausgebildet, wie der nachstehenden Zusammenstellung in Fig. 4 zu entnehmen ist. Die Schichtserie setzt durchwegs über einer Belemniten, Terebrateln und Rynchonellen führenden, meist 1 m mächtigen Kalkbank ein, die oberflächlich verkarstet ist (obere Orbitolinaschichten?). Der fossilführende, weiche Luitere-Zug füllt diese Karsttaschen, ist jedoch im übrigen nur geringmächtig entwickelt, aber ebenso wie die folgenden grünsandigen Schiefer immer vorhanden. Der Grünsandstein als nächste Schicht fehlt im Nordschenkel der Seelisbergfalte, dafür ist dort die ihn ablösende Echinodermenbrekzie sehr mächtig. Diese wird gegen Süden wechselvoller, feinspätiger und führt vermehrt Glaukonit. Im liegenden Schenkel der Niderbauenfalte ist ihr Aufbau bei einer Mächtigkeit von 8 bis 9 m dreiteilig, indem sie einen 2 bis 3 m mächtigen mittleren Teil aus grauem glaukonitführendem Kalksandstein und grünsandigen Lagen enthält. Die den Abschluss bildenden Knollenschichten sind bei unterschiedlicher Schichtmächtigkeit wieder uniformer.

Den grössten Veränderungen sind die Seewerkalke und -schiefer unterworfen, nimmt doch deren Mächtigkeit von rund 50 m im Südschenkel der Seelisbergfalte auf 1 bis 2 m im liegenden Schenkel der Niderbauenfalte ab. An der über eine Distanz von nur ca. 1 km erfolgenden Schichtreduktion ist vermutlich eine teilweise Erosion der Seewerschichten zu Beginn der oberen Kreide mitbeteiligt. Dafür sprechen die im Tunnel beobachtete Diskordanz zwischen Amdenermergeln

und Seewerschichten sowie die von FICHTER (1934) an der Oberfläche gefundenen Konglomerate mit Seewerkalkkomponenten.

Die zum Teil beträchtlichen Mächtigkeitsunterschiede auf kurze Distanz lassen jedoch vermuten, dass Veränderungen der Sedimentationsbedingungen, verursacht durch syndimentäre Brüche, ebenfalls eine Rolle gespielt haben.

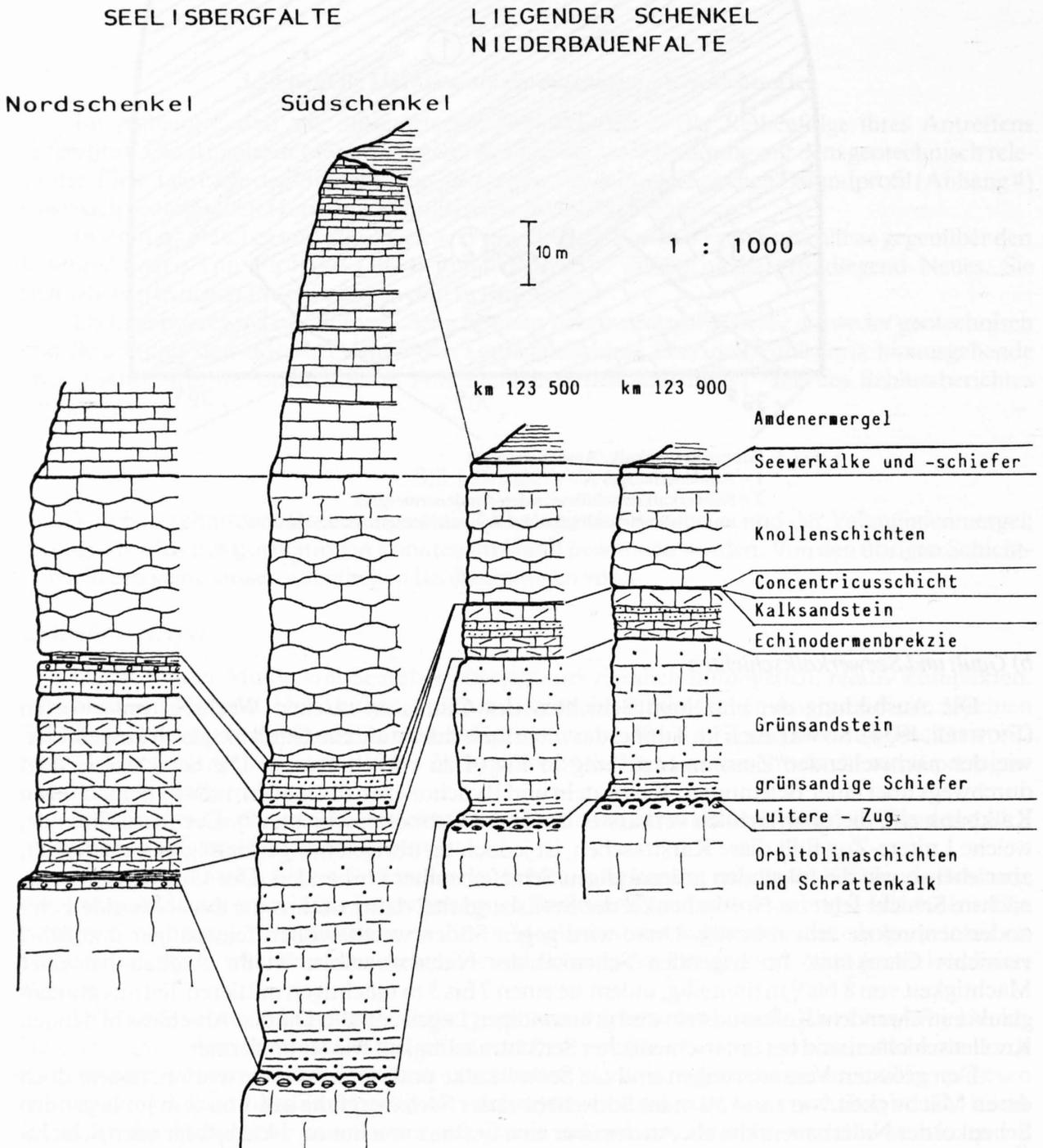


Fig. 4: Detailprofile durch das Gault und die Seewerschiefer

c) Valanginienmergel

Die inkompetente, d.h. mechanisch – verglichen mit den umgebenden Kalken – wenig widerstandsfähige Serie der Valanginienmergel wurde im Zuge der Gebirgsbildung intensiv durchbewegt. Einerseits dienten sie als Gleithorizont bei der Abschiebung des Kreide-Tertiärpaketes der Drusberg-Decke. Andererseits wurden sie im Faltenkern der Niederbauenfalte sehr eng zusammengepresst. Die Gesteinsmasse wurde von der Durchbewegung ungleichmässig erfasst, obwohl sie als Ganzes plastisch verformt wurde. Aus diesem Grunde durchfahren die Tunnelröhren neben Strecken, in denen die Lagerungsverhältnisse ausgesprochen wirr bis chaotisch sind, auch Gebirgsabschnitte mit ruhiger Lagerung.

So beginnt ein tektonisch weniger stark gestörter Abschnitt rund 500 bis 600 m nördlich der Zentrale Huttegg und endet 140 m (Seeröhre) respektive 190 m (Bergröhre) südlich der Zentrale. In den restlichen Strecken sind die Valanginienmergel oft verfaultet und zerschert. In Zonen mit stark gestörter Lagerung sind dünne, kalkige Schichten im Kleinbereich oft zerrissen, verfaultet und in kleine Linsen aufgelöst, wie die nachstehenden Fig. 5 und 6 zeigen. In stärker gestörten Zonen mit zahlreichen Ruschelzonen ist das Gestein zudem intensiv von Kalzitadern durchsetzt.

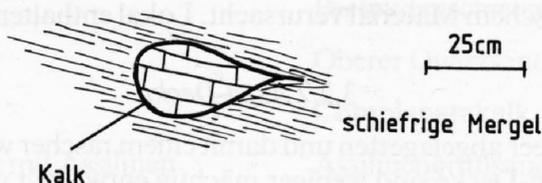


Fig. 5: Detail einer tektonisch entstandenen tropfenförmigen Kalklinse (tektonisches Geröll) in schiefrigen Mergeln.



Fig. 6: Beispiele von stark gestörter Lagerung und Zerschierung in den Valanginienmergeln.

Die intensive Durchbewegung hat zur Folge, dass sich geologische Einzelheiten der beiden nur 55 bis 60 m auseinanderliegenden Tunnelröhren normalerweise nicht korrelieren lassen.

Innerhalb der lithostratigraphischen Einheit der Valanginienmergel wurden beim Ausbruch des Seelisbergtunnels die folgenden Gesteinstypen angetroffen:

- Mengenmässig dominierend sind plattige bis dünn gebankte *Mergel*, häufig mit einer regelmässigen Feinschichtung aus mm-cm mächtigen helleren, stärker kalkigen Lagen und ebenso mächtigen dunkleren, stärker tonigen Schichten.
- *Mergelkalk* oder *mergelige Kalk* in Schichten, die meist 5 bis 30 cm mächtig sind. Sie erscheinen als vereinzelt, in die Mergel eingeschaltete Schichten oder als mehrere Meter mächtige Wechsellagerungen von dm-dicken Mergelkalkschichten mit cm-dicken dunkleren Mergelschichten, seltener auch als bis einige Meter mächtige Bänke aus geschichteten Mergelkalken. Mergelkalkbänke im nördlichen Teil enthalten manchmal feine, tonige Schmitzen, analog zu jenen in den Valanginienkalken.

- Schlecht geschichtete bis ungeschichtete, kompakt aussehende, ziemlich homogene *Mergel*, die teilweise einen *erhöhten Kalkgehalt* aufweisen. Diese Typen brechen häufig schalig.
- *Bräunliche Kalke*, die lithologisch dem Valanginienkalk gleichen, jedoch lithostratigraphisch immer noch den Valanginienmergeln zuzuordnen sind. Sie erscheinen sehr selten in dm-mächtigen Schichten, vor allem in den nördlichsten Abschnitten.
- Der Anteil an *schiefrigen, stärker tonigen Schichten* ist ebenfalls gering. Stärker tonig sind vor allem die mm-cm mächtigen Zwischenschichten von gebankten Mergelkalcken. Da die Valanginienmergel stark durchgearbeitet wurden, sind die Gesteine oft, unabhängig von ihrem Kalkgehalt, tektonisch verschiefert und verruschelt. Ein schiefriger Habitus bedeutet somit nicht zwangsläufig, dass auch der Tongehalt hoch ist.

Aus den zahlreichen Karbonatsgehaltbestimmungen (Seite 56) geht hervor, dass der weitaus grösste Teil der Proben petrographisch ins Mergelfeld fällt.

Mikroskopisch wurden 4 Proben aus dem Erschliessungsstollen untersucht. Der Quarzgehalt beträgt weniger als 5% in Mergelkalcken und maximal 5 bis 10% in Mergeln. Die rundlichen Körper haben Durchmesser bis zu 0,03 mm, maximal 0,05 mm. Spärlich kommen auch Körner von Feldspäten und Schwermineralien vor. Die dunkelgraue Farbe der Mergel wird durch einen 1 bis 3%igen Gehalt an organischem Material verursacht. Lokal enthalten die Mergel Reste von Mikrofossilien.

3.2.2 Axen-Decke

Die in untieferem Meer abgelagerten und damit einem rascher wechselnden Milieu unterworfenen Sedimente der Axen-Decke sind weniger mächtig entwickelt und weisen raschere lithologische Veränderungen auf als jene der Drusberg-Decke. Die Mächtigkeitsabnahme setzt sich zudem vom Axen-Nordlappen zum Axen-Südlappen fort.

Die ausserordentlich komplizierten tektonischen Verhältnisse erschweren Angaben der Schichtmächtigkeiten anhand der Oberflächenaufschlüsse. Der durchgehende Tunnelaufschluss ermöglichte dabei verschiedene Präzisierungen. Dies gilt insbesondere für das verwitterungsanfällige Alttertiär, das oberflächlich schlecht aufgeschlossen ist.

a) Alttertiär Axen-Nordlappen

Anschliessend an eine tektonisierte Grenzzone unterhalb der Überschiebungsfläche der Drusberg-Decke erscheint folgende Schichtfolge (Angabe der Schichtmächtigkeit):

- Bis zu 30 m bräunliche Kalke und graue Kalksandsteine mit unterschiedlichem Glaukonit- und Foraminiferengehalt. Einzelne Schichten bestehen fast ausschliesslich aus Nummuliten und Assilinen (Nummulitenkalke). Die Kalksandsteine sind im obersten Abschnitt zum Teil stark glaukonitisch.
- 2 bis 3 m heller, mittel- bis grobspätiger Kalk mit reichlich Fossiltrümmern.
- 4 bis 6 m graue feinkörnige, quarzitisches Sandsteine, die geschichtet bis gebankt sind.
- 1 bis 2 m quarzitisches Sandsteine, im dm-Bereich gut geschichtet, mit tonigen, schwarz gefärbten Schichtflächen sowie einer regelmässigen Feinschichtung im mm-Bereich.
- Orbitolinaschichten und oberer Schrattenkalk.

Die auf die Überschiebung der Drusberg-Decke folgenden tertiären Nummulitenkalke und Sandsteine des Axen-Nordlappens sind somit mächtiger entwickelt, als aufgrund der Literatur zu erwarten war. Es wurden rund 30 m Nummulitenkalke und Kalksandsteine durchfahren, gegenüber den von ANDEREGG (1940) angegebenen 8 bis 10 m.

b) Alttertiär Axen-Südlappen

Das Alttertiär beginnt südlich der Überschiebungsfläche zwischen Axen-Nordlappen und Axen-Südlappen mit einem glimmerreichen, sandigen Schiefer. Aufgrund von röntgenographischen Untersuchungen (siehe Tabelle 3, Seite 35) bestehen die *alttertiären Schiefer* vorwiegend aus

Quarz und Illit (hellglimmerartiges Tonmineral). Untergeordnet kommen noch Kalzit und Chlorit vor. Es handelt sich somit um kalzitführende, sandige Schiefer. Gegen Süden gehen die dunkelgrauen, feinkörnigen, mergeligen, glimmerführenden Schiefer bei abnehmendem Glimmergehalt ohne scharfe Grenze in *glimmerführende Sandsteine* über. Diese wiederum werden von einem harten, stellenweise quarzitischen, glaukonitführenden, feinkörnigen bis feinkörnigen *Sandstein* abgelöst, der bis 2 mm grosse, glasige Quarzkörner enthalten kann. Darauf folgen 8 bis 10 m bräunliche, *nummulitenführende Kalke*. Unmittelbar über der Grenze zum Schrattenkalk wurde stellenweise ein dm-mächtiger, dunkler und etwas *glaukonitführender Sandstein* angetroffen, der voll von Nummuliten und Assilinen ist. Beim südlichsten Antreffen der insgesamt dreimal durchfahrenen Grenze zum Schrattenkalk fehlt diese Schicht.

Stratigraphisch ist folgende Zuordnung der einzelnen Schichten wahrscheinlich:

<i>Lithologie im Tunnel</i>	<i>Stratigraphie</i> (nach ANDEREGG, 1940)
sandige Schiefer	Stadschiefer
glimmerführende Sandsteine	Pectinidenschiefer?
harte Sandsteine	Oberer Quarzsandstein
Nummulitenkalk	Complanatakalk
glaukonitführender Sandstein mit Assilinen	Assilinengrünsand

c) *Schichtmächtigkeiten der Kreide des Axen-Nordlappens*

Im steilstehenden, quer zum Tunnel streichenden Südschenkel der Harderband-Struktur ist die Lagerung der Schichten weitgehend ungestört. Es war deshalb möglich, die effektiven Schichtmächtigkeiten relativ präzise zu erfassen. Sie sind zum Teil wesentlich grösser, als ANDEREGG (1940) vermutete:

<i>Schichtserie</i>	<i>approx. Schichtmächtigkeiten</i>	
	Tunnel (Mittel)	Oberfläche nach ANDEREGG (1940)
Valanginienkalk	80–90 m	40–45 m
Kieselkalk	140 m	95 m
Echinodermenbrekzie	45–50 m	25 m
Altmansschichten	6 m	3 m
Drusbergschichten, kalkig	32 m	15–20 m

Die aus den Tunnelaufschlüssen abgeleiteten Schichtmächtigkeiten gelten allerdings nur für einen sehr engen Bereich, denn auf der Nordseite der Harderband-Struktur ist die Echinodermenbrekzie des Kieselkalkes bei ebenfalls weitgehend ungestörten Verhältnissen nur noch 25 bis 30 m mächtig, und die Altmansschichten fehlen. Die ursprünglichen Ablagerungsräume lagen in diesem Falle nur 350 m auseinander. Dies ist ein weiteres Indiz für die postulierten alten synsedimentären Brüche.

Die Drusbergschichten sind überall tektonisch begrenzt. Ihre Mächtigkeit kann deshalb nicht angegeben werden. Der Schrattenkalk südlich der Überschiebung der Drusberg-Decke ist mit 150 m Mächtigkeit sehr gut und vermutlich ziemlich vollständig entwickelt. Das Gault fehlt infolge der alttertiären Erosion.

3.2.3 Flyschunterlage der Axen-Decke

a) Ultrahelvetischer Flysch

Zwischen der Axen-Decke und der Altdorfer Sandstein-Gruppe des parautochthonen Schächentaler Flysches findet sich in beiden Röhren eine 35 bis 40 m lange Strecke in einem schwarzen relativ ruhig gelagerten, feinplattigen, mergeligen Tonschiefer. Ein Handstückvergleich zeigte Übereinstimmung mit dem von BRÜCKNER (1956) im Axenberg-Tunnel der SBB gefundenen Vorkommen, das die gleiche tektonische Stellung einnimmt. BRÜCKNER rechnet diese schwarzen, globigerinenführenden Schiefer dem ultrahelvetischen Flysch zu und vergleicht sie aufgrund ihrer tektonischen Stellung mit dem sogenannten Blattengratflysch, der in den Glarner Alpen mächtig entwickelt ist. Auf der Westseite des Urnersees wurde die Globigerinenführung dieser Schicht an Proben aus einer Bohrung bei Aengisort unweit des Portals Büel nachgewiesen (SCHINDLER, 1969). Oberflächlich ist die Serie nicht aufgeschlossen.

Unmittelbar unter der scharf ausgebildeten Überschiebungsfläche der Axen-Decke, die unregelmässig verläuft, sind in der Berggröhre noch Schürflinge aus einem nicht identifizierbaren tektonisierten Kalk vorhanden. Im übrigen sind die Schiefer sehr homogen, weisen eine flach ost- bis südfallende Schieferung auf und sind von zahlreichen nordfallenden Ruschelzonen durchzogen.

b) Altdorfer Sandstein-Gruppe

Der Vorschub der helvetischen Decken erfolgte über die Gesteine der Altdorfer Sandstein-Gruppe hinweg. Diese verhielten sich aufgrund ihres hohen Tonschieferanteils als Ganzes plastisch und wurden tektonisch stark beansprucht. Im Bereich unterhalb der Überschiebungsfläche sind die Lagerungsverhältnisse stark gestört. Parallel zur Überschiebungsfläche verlaufende, d.h. quer zum Tunnel streichende, mittelsteil nordfallende Ruschelzonen sind häufig. Die zwischen die plastischen Tonschiefer eingelagerten Sandsteinbänke sind zerrissen und in Linsen zerlegt. Die in diesem Bereich vorherrschenden Tonschiefer selbst sind zerruselt und von Kalzitadern durchzogen. Die stark tektonisierte Zone reicht im Tunnel von der Überschiebung portalwärts bis etwa auf die Höhe des Schutterstollens (Querschlag 39). Südlich des Portalquerschlages sind die Tonschiefer ruhiger gelagert. Der Abschnitt, der vorwiegend Tonschiefer enthält, reicht in der Berggröhre von km 129.069 bis 129.491 und in der Seeröhre von km 129.123 bis 129.518.

Anschliessend beginnt eine gefaltete Sandsteinserie, die bis zu den Portalen anhält. Die Sandsteine sind im 1–5-dm-Bereich gebankt. Die Bankungsfugen bestehen aus dünnen, d.h. mm–cm-mächtigen Tonschieferzwischenlagen. Die rigiden Sandsteine sind intensiv geklüftet.

3.3 Tektonik

Das gut aufgeschlossene Querprofil auf der Westseite des Urnersees gewährt einen weitgehend vollständigen Einblick in den allgemeinen Aufbau des vom Seelisbergtunnel durchfahrenen Gebirges. Die im Querprofil beobachteten geologischen Verhältnisse konnten axial auf den Tunnelbereich projiziert werden. Unterschiede zwischen Prognose respektive Oberflächenaufschlüssen und Befund ergaben sich vor allem bei Richtungsänderungen der Faltenachsen. Je nach der Steilheit ihres Abtauchens quert der Tunnel eine Falte auf einem anderen Niveau mit anderem Gesteinsinhalt.

Lokal, d.h. vor allem im Bereich der Axen-Decke, weicht der Faltenstil im Tunnelbereich beträchtlich von jenem an der Oberfläche ab, ähnlich wie dies auch BRÜCKNER (1956) in den rechtsufrigen Eisenbahntunnels beobachtete. Die grössten Abweichungen ergaben sich naturgemäss im tief unter dem Niderbauen-Chulm liegenden Abschnitt, da die hier vorliegenden Strukturen in axialer Richtung nirgends aufgeschlossen sind.

In der geologisch-geotechnischen Prognose wurde innerhalb des Interpretationsspielraums die jeweils geotechnisch ungünstigere Annahme gewählt. D.h. bei den bautechnisch ungünstigeren

Mergelstrecken wurden innerhalb des möglichen Streubereiches die grössere Länge eingesetzt, um bezüglich der Ausbruchskosten und dem Bauprogramm, soweit dies verantwortet werden konnte, auf der sicheren Seite zu liegen.

Der Stil des Faltenbaus und die Lage der wichtigsten Verwerfungen und Brüche geht aus dem geologischen Befundprofil (Anhang 4) und den geologischen Horizontalschnitten (Anhänge 5a–5c) hervor.

Im folgenden werden die allgemeinen Verhältnisse nur gestreift, die Abweichungen von den Oberflächenaufschlüssen jedoch ausführlicher beschrieben.

3.3.1 Drusberg-Decke

a) Seelisbergfalte

Im zuerst durchfahrenen Gewölbe der Seelisbergfalte ergibt der tektonische Befund einen relativ «eckigen» Faltenstil. Der Schrattenkalk als kompetente Schicht verhielt sich rigide und bildet relativ starre, hauptsächlich durch Brüche verstellte Platten. Die Umbiegungen erfolgen rasch und flexurartig.

Während der Nordschenkel wenig gestört ist, weisen sowohl der aus Schrattenkalk bestehende Gewölbescheitel, wie auch die Schichtplatte Schrattenkalk-Gault-Seewerkalk des Südschenkels, zahlreiche kleinere und grössere Brüche auf. Ihre Lage geht aus dem geologischen Horizontalschnitt (Anhang 5a) hervor. Sie streichen vorwiegend in nordsüdlicher bis nordost-südwestlicher Richtung.

Die beiden wichtigsten Einzelstörungen sind:

Überschiebung, im Bereich des Portalbauwerkes Rüteneu, 175/32° E. Längs dieser Überschiebung wurde das Gault um einen Betrag von ca. 35 m quer zum Schichtstreichen über die Seewerkalke im Liegenden überschoben. Die 1 bis 10 m mächtige Fuge ist verlehmt.

Choltalverwerfung. An der Choltalverwerfung stösst der Kieselkalk direkt an den Schrattenkalk. Der nordwestliche Flügel wurde um rund 200 m gehoben. Die Verwerfungsfläche (N 46° E/40 bis 60° SE) weist einen 1 bis 3 cm mächtigen Belag aus schwarzem Klufflehm auf. Während der Kieselkalk im Liegenden nur leicht geschleppt und wenig gestört ist, ist der Schrattenkalk im Hangenden auf eine Breite von mehreren Metern tektonisiert und von zahlreichen sekundären Harnischflächen durchsetzt.

b) Amdenermergelmulde

Der Tiefgang der Amdenermergelmulde im Tunnelbereich war vor dem Bau unbekannt. Bereits FICHTER (1934, Tafel 2, Profil 4) hat sie tief unter den Niderbauen-Chulm gezogen. In der Prognose wurde sie aufgrund ihres geotechnisch relativ ungünstigen Inhaltes, dem oben erwähnten Konzept entsprechend, soweit in die Tiefe gezogen, dass sie vom Tunnel im Bereich der Amdenermergel gequert wurde. Der eher unwahrscheinlichen Form der Mulde wurde ein «wahrscheinlicher» Tiefgang gegenübergestellt, mit einem den Aufschlüssen beim Hundszingel entsprechenden höher gelegenen Muldenschluss (siehe Fig. 7).

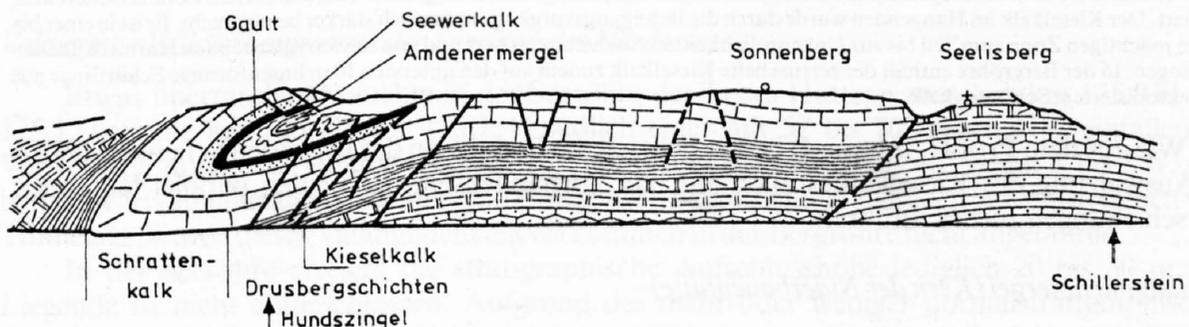


Fig. 7: Der Muldenschluss der Mulde von Seelisberg am Westufer des Urnersees (nach FICHTER, 1934).

Nachdem sowohl die Schachtabsenkung wie auch der Tunnelvortrieb des Loses Rüttenen den Schrattekalk erreicht hatten, schien sich die zweite als wahrscheinlich bezeichnete Lösung zu bestätigen. Es war deshalb eher überraschend, als die Amdenermergel dann doch ziemlich genau an der prognostizierten Stelle angefahren und beinahe in der angegebenen Länge durchfahren wurden. Plausibel und gebirgsmechanisch verständlich erklären liess sich der Tiefgang der Mulde erst, als nach weiteren 650 m Vortrieb die vorher unbekannte Überschiebung angetroffen wurde, längs der die Niederbauenfalte den Muldenkern überfuhr und teilweise zuschob (Anhang 4). Tektonisch gesehen verläuft diese Überschiebung parallel zum Scheitelbruch durch den Faltenkern der Niederbauenfalte.

c) *Liegender Schenkel der Niederbauenfalte*

Der Bereich zwischen der Amdenermergelmulde und der Überschiebung der Niederbauenfalte ist aufgrund der Verwerfung Seelisbergseeli-Seelisberg an der Oberfläche nirgends aufgeschlossen. Vor dem Tunnelbau war lediglich bekannt, dass der Kieselkalk im liegenden Schenkel der Niederbauenfalte stark reduziert ist.

Im Zuge des Tunnelvortriebes wurde dann die erwähnte, vorher unbekannte, flach gegen Norden ansteigende Überschiebungsfläche angefahren. Zusätzliche Komplikationen schuf eine *Abschiebung*, die zu einer Verdoppelung der Schichtfolge Seewerkkalk – kalkige Drusbergsschichten führte.

Das ganze Schichtpaket über den mergeligen Drusbergsschichten wurde längs dieser Serie abgesichert.

Die *Abscherfläche* verläuft generell gesehen parallel zur Schichtung (N 80–100° E/40–67° S). Im Detail ist ihr Verlauf unregelmässig und uneben. So schneidet sie in der Seeröhre (km 123.935) die Schichtung örtlich ab. In beiden Röhren sind die liegenden Kalke auf ihren obersten Metern tektonisch stark beansprucht, zertrümmert und intensiv von Kalzitadern durchsetzt. In der Bergröhre (km 123.894) findet sich zwischen den kalkigen Drusbergsschichten und den dunklen Mergeln im Hangenden eine Linse aus Seewerkkalk (siehe Fig. 8). In der Seeröhre (km 123.945) ist von unten her zwischen die gleichen Schichten eine Linse aus stark tektonisierten Grünsandsteinen des Gaults eingeschuppt. Die stratigraphische Zuordnung der längs der Überschiebungsfläche angetroffenen Mergel ist unsicher. Da der Kontakt zu den hangenden Seewersschichten mehr oder weniger normal, jener zum Liegenden dagegen tektonisch gestört ist, dürfte es sich vorwiegend um Amdenermergel handeln. Die Verhältnisse werden auf Tunnelniveau noch dadurch kompliziert, dass die Abschiebungsfläche ihrerseits an zwei jüngeren steilstehenden Verwerfungen verstellt ist.

Eine derartige Schuppe in der Drusberg-Decke ist kein neues tektonisches Element, denn FICHTER (1934) hat bei Niederrickenbach eine isolierte Schrattekalkschuppe und im Choltal südlich von Emmetten eine Verdoppelung der Abfolge Gault-Schrattekalk beobachtet. Er bezeichnet die beiden Vorkommen als Stirnschuppen der Niederbauenfalte. Sie sollen während des Faltungsvorgangs durch Überfahren eines abgesicherten Faltenschenkels entstanden sein. Fest steht, dass die Verschuppung vor der Überschiebung stattfand, denn oberhalb des Seelisbergseelis und damit oberhalb der Überschiebung findet sich eine weitere Verdoppelung des Gaults.

Die Überschiebung der Niederbauenfalte:

Die Überschiebungsfläche ist uneben und unregelmässig geformt, denn in der Bergröhre streicht sie E-W und in der Seeröhre NNE-SSW. Aus beiden Tunnelaufschlüssen ergibt sich ein mittleres Streichen von N 30° E. Das Südfallen schwankt zwischen 10 und 20° (Mittelwert 12°). Im Liegenden der Überschiebung ist der Schrattekalk längs einer 1 bis 2 m breiten Zone zerschert und brekziiert. Der Kieselkalk im Hangenden wurde durch die Bewegungsvorgänge wesentlich stärker beansprucht. Er ist in einer bis zu 20 m mächtigen Zone zum Teil bis zur Unkenntlichkeit zerruschelt, zerschert und von schwarzglänzenden Harnischflächen durchzogen. In der Bergröhre enthält der zerruschelte Kieselkalk zudem auf den untersten 10 m linsenförmige Schürflinge aus stark tektonisiertem Schrattekalk.

Wie aus dem Profil (Anhang 4) hervorgeht, ist die Reduktion des liegenden Schenkels neben der Auswalzung des Kieselkalkes auch auf das Vorhandensein der beiden parallel laufenden Überschiebungen zurückzuführen.

d) *Valanginienmergel (Kern der Niederbauenfalte)*

Die Form des Antiklinalkerns aus Valanginienmergeln stimmt weitgehend mit den Annahmen überein.

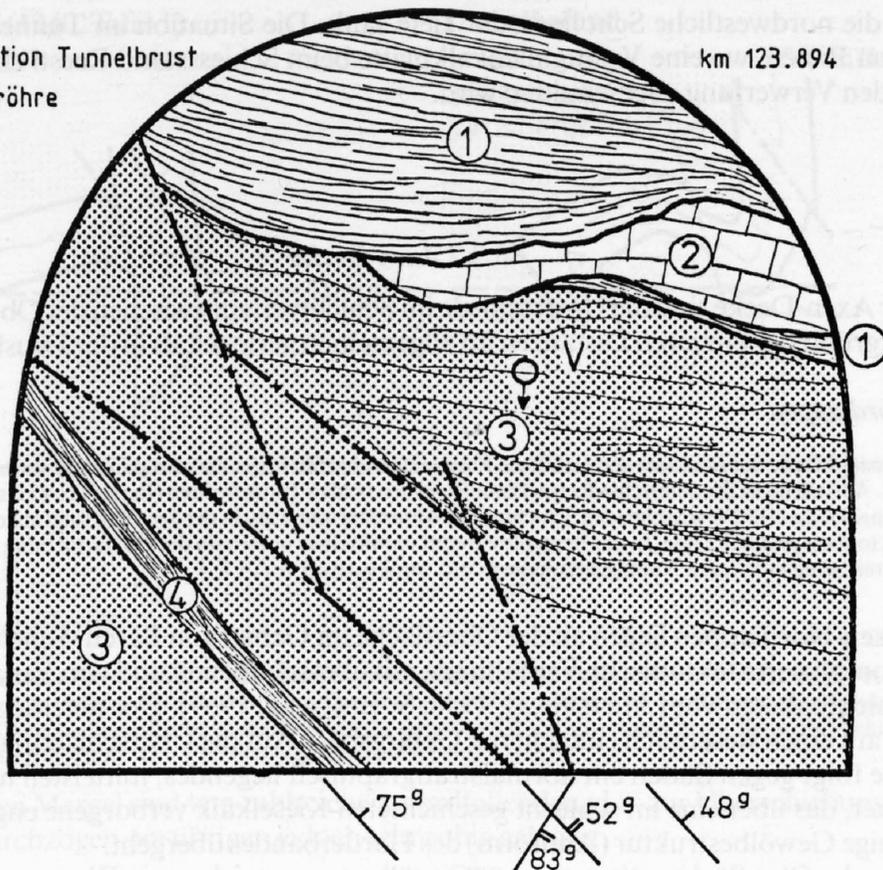


Fig. 8: Tektonische Grenze an der Basis der Verschuppung

- 1 = dunkelgraue, leicht schiefrige Mergel (Amdenermergel?)
- 2 = hellbräunlicher dichter Kalk (Seewerkalk)
- 3 = unruhig welliger, dünn geschichteter, oben stark von Kalzit durchaderter bräunlicher Kalk, bröckelig (Drusberg-Kalk, zum Teil tektonisiert)
- 4 = Mergellage
- V = Vorbohrloch mit $\frac{1}{2}$ bis $1\frac{1}{s}$ Wasser
- Strichpunktirt = Ruschelzonen

Die plastisch verformten Valanginienmergel werden von zahlreichen Ruschelzonen durchzogen. Diese sind oft gekrümmt und können in Schichtfugen auslaufen, so dass es trotz des hohen Durchtrennungsgrades nicht möglich ist, die Ruschelzonen der einen Tunnelröhre mit jenen der anderen zu korrelieren. Dies gilt selbst für die nachstehend beschriebene Verwerfung bei km 125.030 der Seeröhre längs der Valanginienmergel an den Valanginienkalkgrenzen. Einzig im Südast des Loses Huttegg quert eine nordfallende Störung ($73/65-100^\circ$ NW) beide Tunnelröhren.

Valanginienkalkvorkommen in der Seeröhre des Nordastes

Etwas überraschend tauchte in der Seeröhre des Loses Huttegg zwischen km 125.030 und 125.122 (Sohle km 125.016 bis 125.151) südlich einer mit 57 bis 70° gegen NW einfallenden Verwerfung nochmals Valanginienkalk auf. Aufgrund der mit 20 bis 45° gegen S bis SW, d.h. bergewärts einfallenden Schichten und dem spitzen Schnittwinkel zwischen Schichtstreichen und Tunnelaxe, wurde dieses Valanginienkalkvorkommen in der Bergröhre nicht angefahren.

In der Seeröhre erreicht die stratigraphische Aufschlusshöhe lediglich 20 bis 30 m, das Liegende ist nicht aufgeschlossen. Aufgrund des mehr oder weniger normalstratigraphischen Kontaktes zu den überliegenden Valanginienmergeln darf angenommen werden, dass es sich nicht um eine isolierte Valanginienkalkschuppe handelt, sondern um einen normalen Streckungsbruch,

längs dem die nordwestliche Scholle in die Tiefe sank. Die Situation im Tunnel entspricht jener nördlich von Bauen, wo eine Valanginienkalkplatte beim Schiessstand Reesti ebenfalls von einer nordfallenden Verwerfung abgeschnitten wird.

3.3.2 Axen-Decke

In der Axen-Decke sind die Unterschiede im Schichtverlauf zwischen der Oberfläche und dem Tunnel aufgrund der kürzeren Distanzen im allgemeinen geringer als in der Drusberg-Decke.

a) Axen-Nordlappen

Die *Überschiebungsfläche* der *Drusberg-Decke* hat die Form einer scharfen Fuge, die unregelmässig verbogen ist. Sie streicht im Mittel N 80° E. Auffallend ist ihr unterschiedliches Einfallen in den beiden Tunnelröhren (Bergröhre 45 bis 50° N, Seeröhre 70 bis 80° N). Sie schneidet die NE-SW streichenden Schichten des Alttertiärs schief ab. In der Seeröhre folgt auf die Überschiebung eine 10 m lange tektonisch gestörte Zone. In der Bergröhre trennt unmittelbar unterhalb der Überschiebung eine einzelne Ruschelzone die tertiären Schiefer von den Nummulitenkalken.

Im Axen-Nordlappen liegen an der Oberfläche im Gebiet von Bärch–Scheidegg–Riebgarten ziemlich komplizierte tektonische Verhältnisse mit überschobenen und von Verwerfungen durchsetzten Schichtpaketen vor (ANDEREGG, 1940, SCHINDLER, 1969). Der tieferliegende Tunnelvortrieb stiess auf einen wesentlich einfacheren Gebirgsbau. Auf die Überschiebungsfläche der Drusberg-Decke folgt gegen Süden ein normalstratigraphisch liegendes, mittelsteil nordwestfallendes Schichtpaket, das über eine im schlecht geschichteten Kieselkalk verborgene enge Synform in die kofferförmige Gewölbestruktur (Antiform) des Harderbandes übergeht.

Das an der Oberfläche weitgespannte Gewölbe verengt sich gegen Westen, so dass die Schratzenkalkstrecke auf eine Distanz von nur 750 m von 535 m an der Oberfläche auf 270 m im Tunnel verkürzt wird. Der südlichste Teil dieser Struktur besteht aus einer einfachen ungestörten und ungefalteten Schichtplatte. Die von SCHINDLER (1969) in seiner Axialprojektion eingezeichnete Umbiegung innerhalb des Valanginienkalkes entfällt.

b) Axen-Südlappen

Die *Überschiebungsfläche Axen-Nordlappen/Axen-Südlappen* streicht im Mittel N 64° E, d.h. quer zum Tunnel und fällt mit 80 bis 90° gegen Norden, lokal (Westparament der Bergröhre) auch steil gegen Süden ein. Südlich der scharfen Fuge folgt auf einige cm mit weichem und verlehmtm Gestein eine Verschuppungszone von 2 bis 5 m Mächtigkeit. Sie besteht zur Hauptsache aus verruschetten alttertiären Schiefen und enthält ferner eingeschuppte Kalklinsen, die möglicherweise aus dem Axen-Nordlappen stammen.

In bezug auf die allgemeinen Lagerungsverhältnisse kann der Axen-Südlappen zweigeteilt werden. Im nördlichen Teil bildet der Schratzenkalk als mächtige kompetente Schicht eine relativ einfache grossräumige Falte, eingefasst von den inkompetenten Schichten der alttertiären Schiefer und der mergeligen Drusbergschichten. Letztere wirkten als Abscherhorizont des darüberliegenden Schichtstapels.

Der im Tunnel festgestellte Faltenstil weicht etwas von dem von ANDEREGG (1940) angegebenen ab, wie die nachstehende Fig. 9 zeigt.

Der südliche Abschnitt des Axen-Südlappens besteht aus einem stark zerstückelten und zerscherten Schichtpaket. In ihm blieb zwar die generelle Schichtfolge Drusbergschichten-Kieselkalk-Valanginienkalk gewahrt, beinahe jeder Kontakt zwischen den Schichtserien ist jedoch tektonischer Natur. Innerhalb der einzelnen, durch Verwerfungen begrenzten Blöcke sind die Gesteine indessen weitgehend ungestört.

ANDEREGG (1940, Tafel 1)

Tunnelbefund

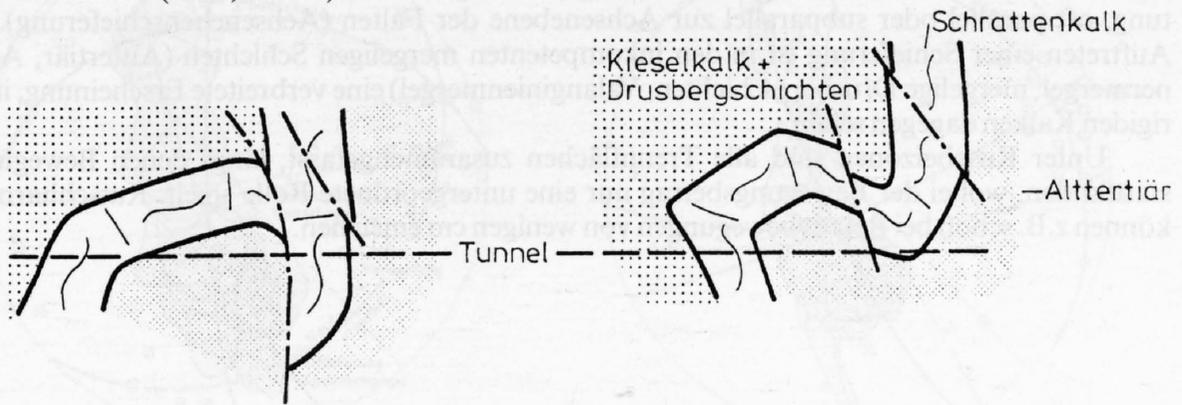


Fig. 9: Verlauf der kompetenten Schicht des Schrätkalkes im Axen-Südlappen nach ANDEREGG (1940) und Befund.

3.3.3 Flyschunterlage der Axen-Decke

a) Ultrahelvetischer Flysch

Die *Überschiebungsfläche* der Axen-Decke ist als scharfe Fuge ausgebildet. In der Bergröhre wird sie im Liegenden von mehreren Ruschelzonen begleitet. In diesem Bereich waren im Ostparament zudem tektonische Schürlinge aus tektonisiertem Kalk aufgeschlossen. Die Überschiebungsfläche ist stark verbogen, denn das SW-NE-Streichen in der Bergröhre geht in ein WNW-ESE-Streichen in der Seeröhre über. Das Einfallen schwankt zwischen 20° und 60° .

Die folgenden Mergel sind von zahlreichen, nordfallenden, d.h. zur Überschiebung parallelen Ruschelzonen durchzogen, im übrigen jedoch sehr ruhig gelagert.

b) Altdorfer Sandstein-Gruppe

Die *Überschiebung*, die den ultrahelvetischen Flysch vom parautochthonen Schächentaler Flysch trennt, streicht quer zu den Tunnelröhren ($N 72 E/50^\circ N$). Sie wird im Liegenden von ca. 50 cm zerruschelten, weichen und gegen Norden in die Tiefe geschleppten Schiefen begleitet.

Die auf die Überschiebungsfläche folgenden Gesteine sind intensiv zerruschelt und zerschert. Diese Zone mit stark gestörter Lagerung reicht bis auf die Höhe des Portalquerschlags, d.h. bis km 129.430 der Seeröhre, respektive 129.410 der Bergröhre. Von dort bis zum Portal sind die Sandsteine und Tonschiefer im Dekameterbereich gefaltet. Die Anordnung der Z-förmigen Falten bewirkt bei südfallenden Achsenebenen, dass die Schichten als Ganzes gegen Norden in die Tiefe abtauchen.

3.4 Strukturen und Durchtrennung des Gebirgskörpers

3.4.1 Trennflächentypen

Im Zuge der geologischen Tunnelaufnahmen wurden folgende Trennflächentypen unterschieden:

- Schichtung (primär sedimentär) und Schieferung (sekundär tektonisch), im Text zum Teil zusammengefasst unter dem Begriff «s-Flächen»
- Ruschelzonen (Störzonen, Harnischflächen, Verwerfungsflächen)
- Klüfte

Die mechanisch entstandene Schieferung (Cleavage) verläuft häufig diskordant zur Schichtung, oft parallel oder subparallel zur Achsenebene der Falten (Achsenebenschieferung). Das Auftreten einer Schieferung ist in den inkompetenten mergeligen Schichten (Alttertiär, Amde-nermergel, mergelige Drusberg-schichten, Valanginienmergel) eine verbreitete Erscheinung, in den rigiden Kalken dagegen selten.

Unter Ruschelzonen sind alle Trennflächen zusammengefasst, längs denen Bewegungen stattfanden, wobei der Bewegungsbetrag nur eine untergeordnete Rolle spielt. Rutschharnische können z.B. schon bei Relativbewegungen von wenigen cm entstehen.

3.4.2 Gefüge

Die räumlichen Lagen und die gegenseitigen Beziehungen der verschiedenen Trennflächen-systeme sind aus den stereographischen Projektionen Fig. 10 ersichtlich. Diese entsprechen Sammeldiagrammen, die aus insgesamt 35 Einzeldiagrammen des II. Teils des Schlussberichtes gewonnen wurden.

Die Faltenachsen konnten nur bei den mesoskopischen Falten des Altdorfer Sandsteins direkt gemessen werden, divergieren dort allerdings stark (Fig. 10c).

In den Einzeldiagrammen ergab sich infolge von Schleppungen an Verwerfungsflächen eine erhebliche Streuung der s-Flächenlagen. Dies vor allem in den stark zerruschelten, plastisch deformierten Valanginienmergeln.

In den Sammeldiagrammen lassen sich die s-Flächenpolmaxima und die Bereiche höchster Belegungsdichten der s-Flächen jedoch im allgemeinen relativ gut einer zylindrischen Faltenachse zuordnen. Die grössten Streuungen finden sich im Axen-Nordlappen und in der Altdorfer Sandstein-Gruppe.

Aus den verschiedenen Diagrammen wurden die folgenden Faltenachsen ermittelt (Streichen über E, Fallen in °):

Seelisbergfalte	76/13 W (Nordschenkel + 97/9 W Südschenkel)
Valanginienmergel	73/13 W + 99/13 W
Axen-Nordlappen	67/11 SW + 60/22 NE
Axen-Südlappen	54/7 NE
Flyschunterlage Axendecke	91/16 W + 103/16 W

Die leicht divergierende Lage der konstruierten Faltenachse für den Nord- und den Südschenkel der Seelisbergfalte zeigt, dass deren Form nicht ganz zylindrisch ist.

Bewegungsflächen (Ruschelzonen, Harnischflächen), die mit dem Faltungsvorgang in Zusammenhang stehen, liegen auf dem gleichen Zonenkreis wie die s-Flächen selbst (h01-Flächen). Wie aus der Fig. 10 zu ersehen ist, trifft dies für die Maxima der im übrigen stark streuenden Ruschelzonen in den Valanginienmergeln zu.

Die meisten Klüftflächen stehen mehr oder weniger senkrecht auf der Schichtung. Generell dominieren die senkrecht zu den Faltenachsen orientierten sogenannten ac-Klüfte. Sie streichen demnach NNW-SSE und stehen steil.

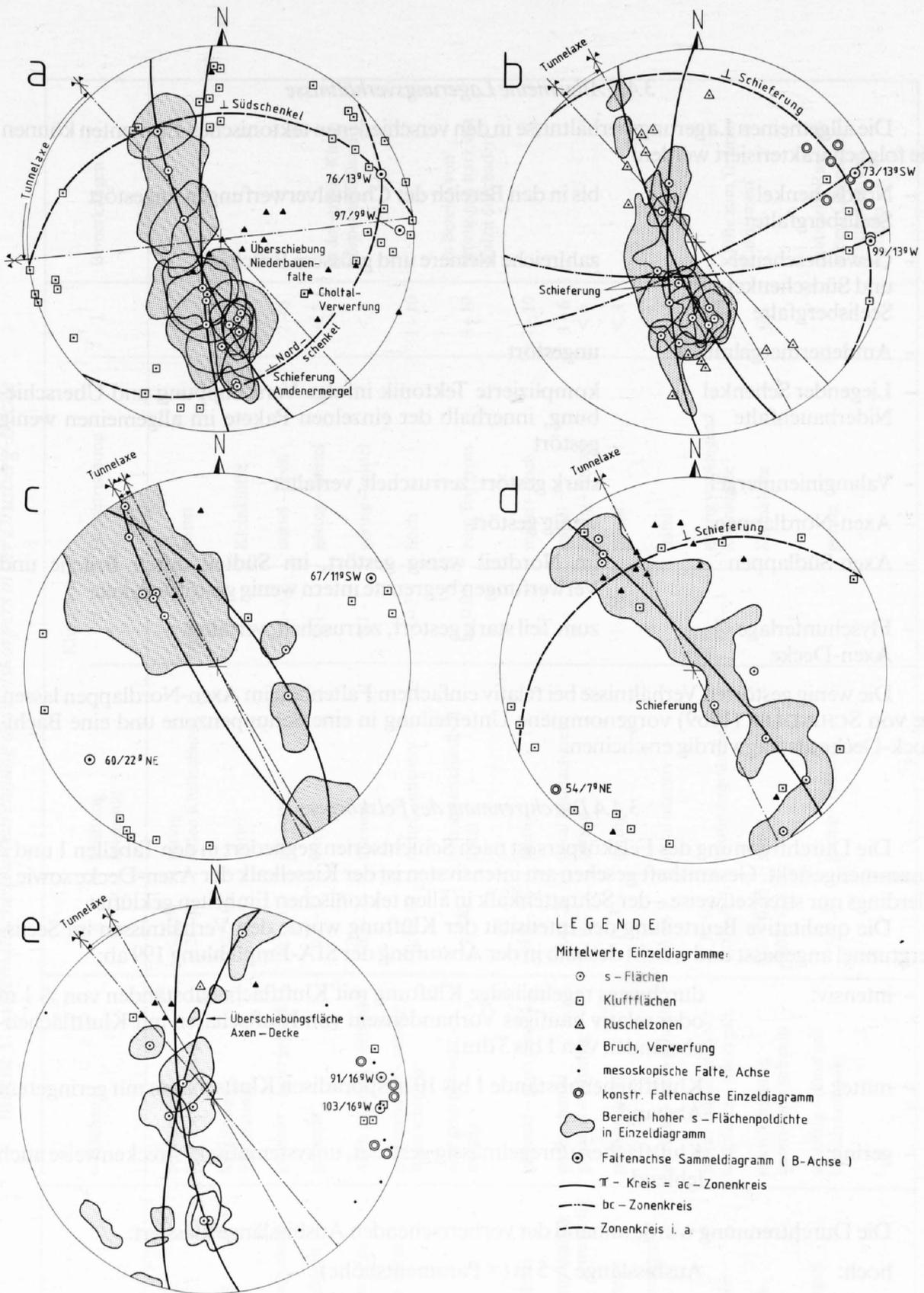


Fig. 10: Stereographische Projektionen (flächentreues Schmidt'sches Netz, obere Halbkugel), Sammeldiagramme
 a) Drusberg-Decke ohne Valanginienmergel
 b) Valanginienmergel
 c) Axen-Nordlappen
 d) Axen-Südlappen
 e) Flyschunterlage der Axen-Decke

3.4.3 Allgemeine Lagerungsverhältnisse

Die allgemeinen Lagerungsverhältnisse in den verschiedenen tektonischen Elementen können wie folgt charakterisiert werden:

- Nordschenkel
Seelisbergfalte bis in den Bereich der Cholталverwerfungen ungestört
- Gewölbescheitel
und Südschenkel
Seelisbergfalte zahlreiche kleinere und grössere Brüche
- Amdenermergelmulde ungestört
- Liegender Schenkel
Niderbauenfalte komplizierte Tektonik infolge Verschuppung und Überschiebung, innerhalb der einzelnen Pakete im allgemeinen wenig gestört
- Valanginienmergel stark gestört, zerruschelt, verfaltet
- Axen-Nordlappen wenig gestört
- Axen-Südlappen im Nordteil wenig gestört, im Südteil durch Brüche und Verwerfungen begrenzte intern wenig gestörte Pakete
- Flyschunterlage
Axen-Decke zum Teil stark gestört, zerruschelt, verfaltet

Die wenig gestörten Verhältnisse bei relativ einfachem Faltenbau im Axen-Nordlappen lassen die von SCHINDLER (1969) vorgenommene Unterteilung in eine Schuppenzone und eine Bächistock-Decke als fragwürdig erscheinen.

3.4.4 Durchtrennung des Felskörpers

Die Durchtrennung des Felskörpers ist nach Schichtserien gegliedert in den Tabellen 1 und 2 zusammengestellt. Gesamthaft gesehen am intensivsten ist der Kieselkalk der Axen-Decke sowie – allerdings nur streckenweise – der Schrattenkalk in allen tektonischen Einheiten geklüftet.

Die qualitative Beurteilung der Intensität der Klüftung wurde den Verhältnissen im Seelisbergtunnel angepasst und weicht deshalb in der Abstufung der SIA-Empfehlung 199 ab:

- intensiv: durchwegs regelmässige Klüftung mit Klüftflächenabständen von ≤ 1 m oder relativ häufiges Vorhandensein von Klüftscharen mit Klüftflächenabständen von 1 bis 3 dm.
- mittel: Klüftflächenabstände 1 bis 10 m sporadisch Klüftscharen mit geringerem Abstand
- gering: Klüftflächen unregelmässig gestreut, unsystematisch, streckenweise auch fehlend

Die Durchtrennung wurde anhand der vorherrschenden Ausbisslänge klassiert:

hoch: Ausbisslänge > 5 m (= Paramentshöhe)

mittel: Ausbisslänge 1 bis 5 m

gering: Ausbisslänge < 1 m

Kleinklüfte: in dünnbankigen Gesteinen auf die Bankmächtigkeit von 5 bis 30 cm beschränkt

Tabelle 1: Systematische Durchtrennung des Felskörpers in der Drusberg-Decke

Schichtserie	s-Flächen	d	Klüftung Intensität	Klüftflächen			Bemerkungen
				d	Durchtrennung	l	
Amdenmergel	Schieferung + grobe Bankung	<0,01 2-10	gering selten Klufscharen	1-9 0,05-0,3	mittel	1-3	
Seewerschichten	Schichtung + Bankung	0,02-0,2 0,5-5	mittel		Kleinklüfte	<0,2	
Gault, Knollenschichten	gebant - grob gebant	0,5-1,5	intensiv	1-3	mittel - hoch	2-6	
Gault, Kalksandstein	gebant	0,1-1	intensiv	0,1-1	gering - mittel	<3	
Gault, Echinodermbrekzie	dünn gebant - gebant	0,1-1	intensiv	0,1-1	gering - mittel	<4	in dm-grosse Klufkörper zerfallend
Gault, Grünsandstein	grob gebant - massig Basis schiefrig	0,4-10	mittel - intensiv	1-3	hoch	1-10	
Schraffenkalk	sehr grob gebant - massig	2-30	sehr unterschiedlich lokal	bis 0,01	zum Teil gross	3-10	im Bereich von Störungen stark mit Kalzit durchadert
Orbitolinaschichten	gebant - grob gebant	0,1-5	gering		mittel - hoch	1-10	
Drusbergsschichten kalkig mergelig	grob gebant gebant - schiefrig	0,4-20 0,2	lokal Klufscharen gering		mittel gering - mittel	1-6 <6	
Altmansschichten	grob gebant	1-3	gering	1-10	mittel	<3	
Echinodermbrekzie Kieselkalk	gebant - grob gebant	0,5-5	lokal intensiv		mittel	1-6	
Kieselkalk	dünn - mittel gebant	0,1-0,5	häufig engständig	0,1-1	gering vorwiegend Kleinklüfte	<0,5	Klüfte zum Teil mit Kalzitrasen
Kieselkalkschiefer	feinplattig - dünn geb.	0,01-0,3			Kleinklüfte	0,1	
Valanginienkalk	oben feinplattig unten dünn gebant	0,01-0,05 0,05-0,3	mittel		gering		zahlreiche Ruschelzonen, Gestein zerschert, zum Teil verfaltet
Valanginiemergerl	schiefrig - dünn geb. örtlich kompakt	<0,2	gering - fehlend				

d = vorherrschende Trennflächenabstände in m, l = Ausbisslänge der Klüfte in m

Tabelle 2: Systematische Durchtrennung des Felskörpers in der Axen-Decke und deren Flyschunterlage

Schichtserie	s-Flächen	d	Klüftung Intensität	Klüftflächen		I	Bemerkungen
				d	Durchtrennung		
<i>Axen-Decke</i>							
Altertär Schiefer	schiefrig	<0,01	Einzelklüfte		mittel – hoch		
Kalke + Sandsteine	gebantk – grobgebantk Axen-Südlappen	0,1 – 3 2 – 10	meist gering lokal intensiv		mittel	1 – 5	
Schraffenkalk	grob gebantk – massig	2 – 30	lokal intensiv zum Teil	0,1 – 0,3 0,05 – 0,2			
Orbitolinaschichten	gebantk – grob gebantk	1 – 4	i.a. gering lokal intensiv	mittel			
Drusbergschichten kalkig mergeilig	grob gebantk gebantk – schiefrig	5 – 10 <0,1	gering	mittel – hoch mittel			
Altmannschicht	Einzelbank	1 – 3	sehr gering	gering			
Echinodermenbrekzie Kieselkalk	grob gebantk	5 – 30	gering – mittel lokal	0,1	meist hoch	bis 40	
Kieselkalk	massig	> 10	intensiv	0,05 – 0,3	hoch	> 5	
Kieselskalkschiefer (Stüdlappen)	schiefrig	<0,1	gering	gering			
Valanginienkalk	i.a. grobgebantk – massig Mittelteil Nordlappen	> 5 0,05 – 3	± intensiv	0,05 – 0,2	vereinzelt hoch		
<i>Flyschunterlage</i>							
ultrahelvetischer Flysch	schiefrig	<0,05	gering		gering		zahlreiche nordfäl- lende Ruschelzonen
Aldorfer Sandstein-Gruppe Sandsteine Tonschiefer	gebantk schiefrig	0,1 – 0,5 <0,01	intensiv gering	0,1 – 1	gering mittel	0,1 – 1	verfaltet, zum Teil stark zersichert und von Ruschelzonen durchzogen

d = vorherrschende Trennflächenabstände in m, l = Ausbisslänge der Klüfte in m

3.5 Tonmineralogische und chemische Untersuchungen

3.5.1 Tonmineralogische Untersuchungen

Die tonmineralogische Untersuchung der mergeligen Gesteine galt der Anwesenheit von quellfähigen Tonmineralien. Unter diesen kommt vor allem Montmorillonit in Frage. Die Untersuchungsergebnisse sind in Tabelle 3 zusammengestellt:

Tabelle 3: Röntgendiffraktometrische Untersuchungen

a) Anteil der Phyllitmineralien in der dekarbonatisierten Tonfraktion <math>< 2\mu</math> (Gew. %). Analytiker: M. Frey, A. Breitschmid						
Schichtserie	Tonmineral	Illit + Illit/ Montmorillonit	Chlorit	Kaolinit		
Altdorfer Sandstein-Gruppe (keine Tunnelproben)		60 – 90	10 – 40	–		
Alttertiär (Axen-Südlappen)		55 – 90	10 – 45	–		
Amdenermergel		60 – 85	15 – 40	–		
Valanginienmergel		50 – 70	20 – 30	10 – 25		

b) Mineralbestand des Gesamtgesteins (Gew. %). Analytiker: M. Frey						
Schichtserie	Mineral	Illit + I/M	Chlorit	Quarz	Kalzit	Dolomit
Amdenermergel		25 – 30	5 – 10	16 – 21	40 – 49	2 – 6
Alttertiär (Axen-Südlappen)		30 – 45	5 – 10	40 – 45	5 – 20	–

Häufigstes und wichtigstes Schichtsilikat unter den Phyllitmineralien war in allen analysierten Proben Illit, ein mikrokristalliner wasserreicher Hellglimmer. Daneben konnte das quellfähige Mineral Montmorillonit in Form einer Wechsellagerung Illit/Montmorillonit nachgewiesen werden. Der Montmorillonitanteil kann 5 bis 10% betragen. Reiner Montmorillonit fehlt jedoch. Im Gesamtgestein liegt die Montmorillonitkonzentration durchwegs unterhalb der Nachweisgrenze von 5%.

A. BREITSCHMID (1982) untersuchte u.a. die Illit-Kristallinität, die Rückschlüsse auf den Grad der Metamorphose zulässt. Seine Untersuchungen zeigen, dass der Seelisbergtunnel im Bereich der Diagenese (Gesteinsbildung) bis schwachen Anchizone (Beginn der Metamorphose) liegt.

3.5.2 Chemische Untersuchungen

a) Gesamtgesteinsanalysen

Chemisch untersucht wurden 11 Proben aus der Schichtserie der Valanginienmergel im Hinblick auf den allgemeinen Charakter dieses Gesteins. Wie die Gegenüberstellung in der Tabelle 4 zeigt, liegt der Chemismus der Valanginienmergel bezüglich der Hauptkomponenten zwischen Kalksteinen und Tonsteinen.

Tabelle 4: *Chemische Analysen der Valanginienmergel, Vergleich*

	Tongesteine*	Valanginienmergel Hutteg		Kalksteine*
		Streubreite	Mittel	
SiO ₂	58,11	11,2 – 42,1	26,7	5,19
Al ₂ O ₃	15,40	0,9 – 19,1	7,0	0,81
Fe ₂ O ₃	6,74	1,7 – 4,6	3,3	0,54
MgO	2,44	0,2 – 4,4	1,7	7,89
CaO	3,10	14,9 – 42,6	33,6	42,57
Na ₂ O	1,30	0,2 – 0,4	0,3	0,05
K ₂ O	3,24	0,4 – 1,4	0,9	0,33
CO ₂	2,63	11,7 – 33,5**	26,4**	41,54

** berechnet

* Mittelwerte nach F. W. Clarke in Niggli P., de Quervain F. und Winterhalter R. U. (1930): «Chemismus schweizerischer Gesteine», Beiträge Geol. Schweiz, Geotechnische Serie, 14. Lief., p. 373.

b) *Karbonatbestimmungen an Proben aus dem Los Hutteg*

Nachdem der im Los Hutteg eingesetzte Reisszahnbagger «Big John» ohne Vorsprengungen nicht die erhoffte Leistung erbrachte, stellte die Unternehmung den Mergelcharakter der durchörterten Valanginienmergel in Frage. Obwohl mit dem lithostratigraphischen Begriff Valanginienmergel eine altersmässig bestimmte Formation (Schichtserie) bezeichnet wird, die im vorliegenden Falle neben Mergeln auch Mergelkalk enthält, wurde vorsorglicherweise eine grosse Zahl von Valanginienmergelproben auf ihren Karbonatgehalt untersucht. Unter Mergel in lithologisch-petrographischem Sinne werden Gesteine verstanden, die zur Hauptsache aus einer Mischreihe zwischen den beiden Endgliedern Ton und Kalk bestehen. Die Bezeichnungen der einzelnen Glieder dieser Mischreihe gehen aus der Fig. 11 hervor.

Die Bestimmungen erfolgten mit dem Passon-Apparat. Insgesamt wurden mit diesem Verfahren 216 Proben analysiert. Die Proben wurden möglichst so gewählt, dass sie für die vorherrschenden Gesteinstypen repräsentativ sind. Daneben wurden aber auch spezielle Gesteinstypen (z.B. Mergelkalkbänke, kompakte oder schiefrige Mergel) erfasst. Weitere Bestimmungen stehen im Zusammenhang mit felsmechanischen Versuchen.

Wie aus der Fig. 11 hervorgeht, fallen weitaus die meisten Proben ins Mergelfeld. Am häufigsten sind Proben, die zwischen 40% und 60% Karbonat enthalten. In Übereinstimmung mit dem lithologischen Befund anlässlich der geologischen Aufnahmen (eingeschaltete Mergelkalkschichten) streuen die Werte stärker gegen kalkige Mergel und Mergelkalk als gegen tonige Mergel. Die Spannweite der Karbonatgehalte reicht von 28% bis 87%. Petrographisch verteilen sich die untersuchten Proben folgendermassen:

- 3% tonige Mergel
- 74% Mergel
- 11% kalkige Mergel
- 11% Mergelkalk
- 1% mergeliger Kalk

Aufgrund der Tatsache, dass die Proben zum Teil ausgewählt wurden, sind die kalkigeren Proben überproportional vertreten. Dafür spricht z.B., dass in den Probenbohrungen für felsmechanische Versuche, die statistisch einer zufälligen Stichprobe entsprechen, nur 3 von 28 Proben oder 11% mehr als 65% Karbonat enthielten.

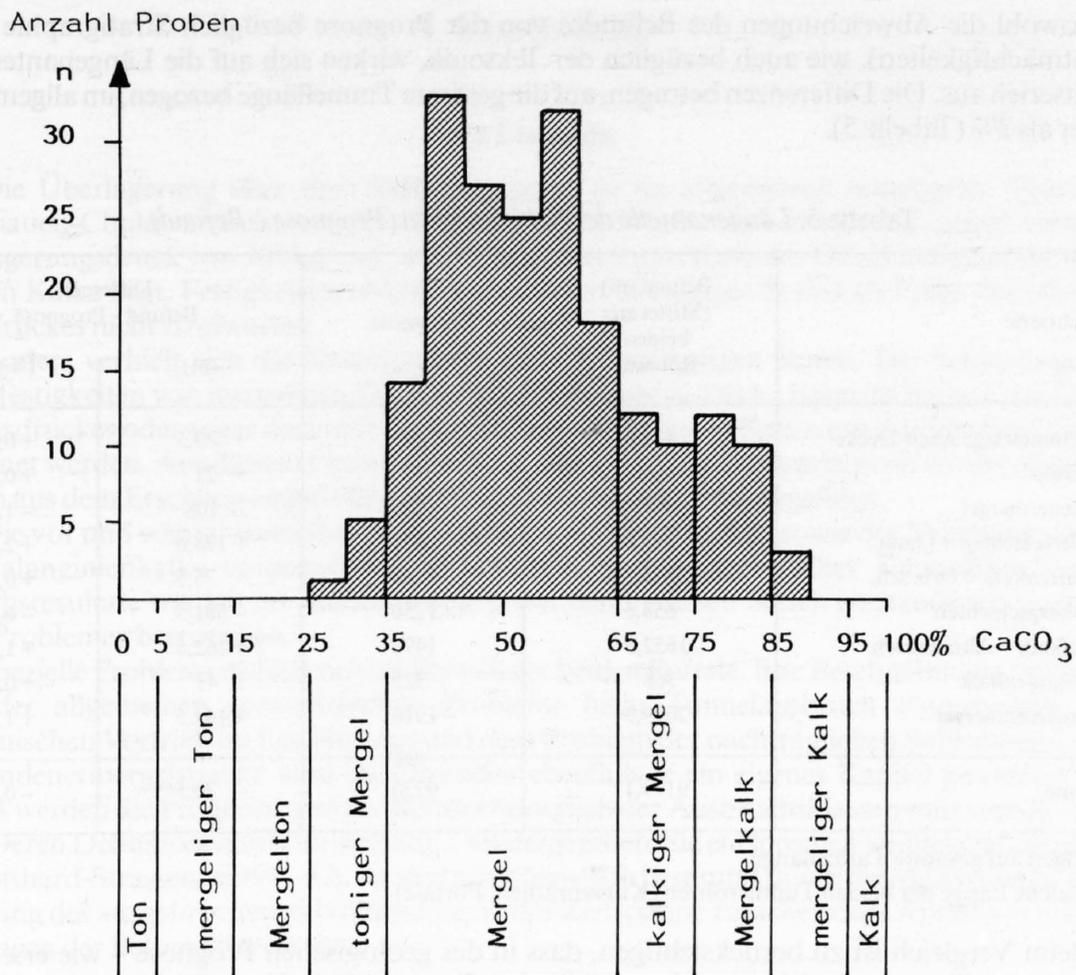


Fig. 11: Histogramm der Karbonatgehalte in der Schichtserie der Valanginienmergel

Die Karbonatgehalte der Valanginienkalke schwanken zwischen 67% und 85%. Es handelt sich hier jedoch nicht um reine Kalk-Ton-Gemische, denn der Valanginienkalk enthält unter anderem reichlich Spongiennadeln und Radiolarien sowie zum Teil Quarz und andere Silikate, alles Bestandteile, die nicht in Salzsäure löslich sind, jedoch auch nicht dem Tonanteil zugerechnet werden können. Aus diesem Grunde fällt der ermittelte Karbonatgehalt niedriger aus, als dies bei einem reinen Kalk zu erwarten wäre.

3.6 Vergleich Prognose – Befund

Zusammenfassend ergab der Tunnelaufschluss nur bemerkenswert geringe Abweichungen von der Prognose. Dies vor allem angesichts der Tatsache, dass diese, abgesehen von der Bohrung beim Schacht Hattig, auf reinen Extrapolationen der Feldbefunde beruhten.

Die Abweichungen bezüglich Lithologie und Stratigraphie sind sehr gering und betreffen allenfalls die Schichtmächtigkeiten. In bezug auf die Tektonik findet sich der einzige Unterschied von Bedeutung im liegenden Schenkel der Niederbauenfalte. Dort traf der Tunnelvortrieb auf eine Verschiebung mit Verdoppelung der Schichtfolge Seewerkalk-Drusbergschichten sowie eine flach südfallende Überschiebungsfläche.

Sowohl die Abweichungen des Befundes von der Prognose bezüglich Stratigraphie (bzw. Schichtmächtigkeiten), wie auch bezüglich der Tektonik, wirken sich auf die Längenanteile der Schichtserien aus. Die Differenzen betragen, auf die gesamte Tunnellänge bezogen, im allgemeinen weniger als 2% (Tabelle 5).

Tabelle 5: Längenanteile der Schichtserien (Prognose – Befund)

Schichtserie	Befund (m) (Mittel aus beiden Röhren)	Prognose	Differenz Befund – Prognose	
			(m)	(%)*
Flyschunterlage Axen-Decke	478,5	445	+ 33,5	+ 0,4
Alttertiär	356	335	+ 21	+ 0,2
Amdenermergel	467	575	- 108	- 1,2
Seewerschichten + Gault	823,6	625	+ 198,6	+ 2,2
Schrattenskalk + Orb. sch.	2335,5	2260	+ 75,5	+ 0,8
Drusbergschichten	658,5	1250	- 591,5	- 6,4
Kieselkalk + Altmanssch.	1652,5	1490	+ 162,5	+ 1,8
Valanginienkalk	368	325	+ 43	+ 0,5
Valanginienmergel	2059,5	1916	+ 144,5	+ 1,6
Summe	9199,1	9220	- 20,5**	- 0,1

* bezogen auf gesamte Tunnellänge

** ungleiche Länge der beiden Tunnelröhren (Kurvenradien, Portale)

Beim Vergleich ist zu berücksichtigen, dass in der geologischen Prognose – wie erwähnt – innerhalb des Ermessensspielraums, generell die jeweils geotechnisch ungünstigere Variante, d.h. jene mit dem höheren Mergelanteil, stärker gewichtet wurde. Aus diesem Grunde ist der Anteil der mergeligen Drusbergschichten sowie jener der Amdenermergel in der Prognose gesamthaft zu hoch, jener aller übrigen Schichtserien entsprechend zu tief.

4. Geotechnik

4.1 Übersicht

Die Überlagerung über dem Seelisbergtunnel ist im allgemeinen mittelgross. Unter dem Niderbauen-Chulm erreicht sie mit 1350 m ihr Maximum. Dies entspricht einem vertikalen Überlagerungsdruck von 365 kg/cm^2 , ein Wert, der weit unterhalb der Druckfestigkeit der durchörterten Kalke liegt. Festigkeitsprobleme waren somit in kalkigen Serien als Folge des Überlagerungsdruckes nicht zu erwarten.

Anders verhielt sich die Situation bezüglich der mergeligen Serien. Die Schätzungen der Druckfestigkeiten von mergeligen Gesteinen in der Drusberg-Decke lagen im Bereich des Überlagerungsdruckes oder sogar darunter. Es musste folglich in diesen Serien mit druckhaftem Gebirge gerechnet werden. Aus diesem Grunde wurde in den Valanginienmergeln noch vor Baubeginn an Proben aus dem Erschliessungstollen entsprechende Versuche durchgeführt.

Die vor und während des Baus an Proben der Amdenermergel sowie der Valanginienmergel und Valanginienkalke vorgenommenen Bestimmungen geotechnischer Kennziffern und die Versuchsergebnisse werden im Zusammenhang mit den in diesen Serien entstandenen geotechnischen Problemen besprochen.

Spezielle Probleme stellten sich im Bereich der beiden Portale. Ihre Beschreibung wird deshalb jener der allgemeinen geotechnischen Probleme beim Tunnelausbruch vorangestellt. Dem mechanischen Vortrieb im Los Huttegg und dem Problem der nachträglichen Sohlensanierung in der Amdenermergelstrecke wird im folgenden ebenfalls je ein eigenes Kapitel gewidmet. Zum Schluss werden die Prognose und der Befund bezüglich der Ausbruchsklassen miteinander verglichen. Deren Definitionen sind im Anhang 3 wiedergegeben. Sie entsprechen weitgehend denjenigen des Gotthard-Strassentunnels, d.h. sie sind ausschliesslich bestimmt durch die Massnahmen für die Sicherung des ausgebrochenen Hohlraumes in der Zeitspanne zwischen dem Auffahren und dem Einbringen der Betonverkleidung.

4.2 Portalzonen

Beiden Portalzonen ist gemeinsam, dass der Tunnel in einen steilen, felsigen Hang rund 50 m über dem Vierwaldstättersee mündet. In beiden Fällen wurde deshalb der Tunnelausbruch von einem auf der Höhe des ersten Querschlages liegenden Schutterstollen aus H-förmig in Angriff genommen.

Auch in geologisch-geotechnischer Hinsicht weisen die beiden Portalzonen Gemeinsamkeiten auf. Erstens fallen die hangparallelen Schichten gegen aussen, und zwar mit Fallwinkeln, die grösser sind als der Reibungswinkel der Restscherfestigkeit. Es bestand somit bei jedem Unterschneiden die Gefahr eines Abrutsches von Schichtpaketen. Zweitens befinden sich die gewichtigen Portalbauwerke teilweise im Bereich der Lockergesteinsdecke. Da sie auf Fels fundiert werden mussten, wurde der Felsverlauf im Rahmen der Detailprojektierung mit Hilfe von vorwiegend objektgebundenen Sondierbohrungen abgetastet.

4.2.1 Portal Rütönen

Die Portalzone Rütönen liegt im Nordschenkel der Seelisbergfalte, der an dieser Stelle mit rund 60° einfällt. Als Fels stehen die obersten Schichten des Gaults, die gebankten bis grobgebankten Knollenschichten an. Sie sind nach drei Systemen grob geklüftet. Der Schnitt des Tunnels mit der Oberfläche ist schleifend. Der Schnittwinkel zwischen Tunnelaxe und Hang beträgt 25 bis 30° (siehe Fig. 12).

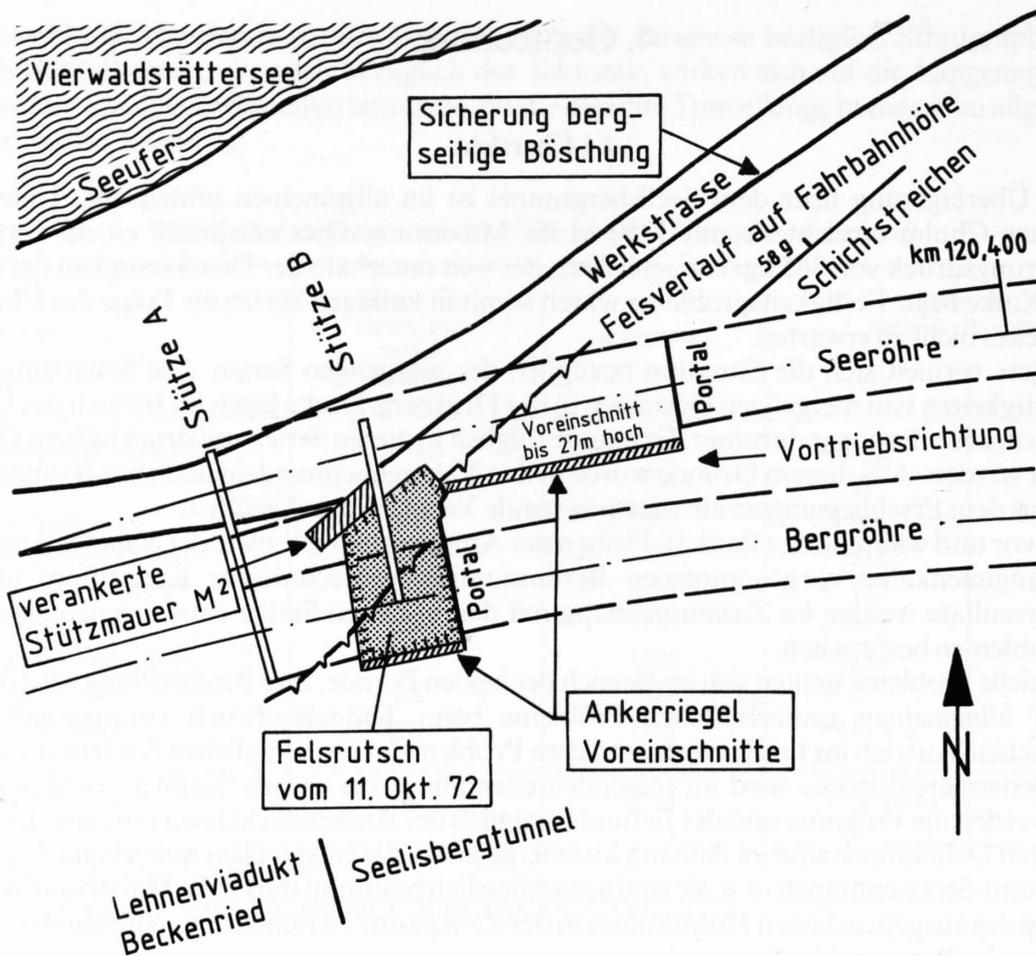


Fig. 12: Situation Portal Rütönen 1:1000

Felssicherungen

Hang und Schichtflächen verlaufen im Portalbereich sowie östlich davon über weite Strecken parallel. Die Situation erforderte eine intensive Sicherung aller Anschnitte mit Vorspannankern (Spannkraft 150 t). Diese Massnahmen betrafen die Voreinschnitte der Tunnelröhren (Ankerriegel) sowie den gesamten Felseinschnitt entlang der Werkstrasse (Riegel + Einzelanker).

Felsrutsch vom 11. Oktober 1972

Am 11.10.72 ereignete sich um 03.15 Uhr anlässlich eines Abschlages in der Bergröhre (Durchschlag zur Terrainoberfläche) ein Felsrutsch. Rund 2000 m³ Fels glitten auf einer Schichtfläche ab und verschütteten die Werkstrasse. Räumung und Neuinstallation der zerstörten Zuleitung führten zu einem dreitägigen Unterbruch der Tunnelvortriebe. Der Tunnelvortrieb in Richtung Portal wurde in der Folge so lange zurückgestellt, bis alle Ankerungen und Unterfangungen im Portalbereich abgeschlossen waren.

Hohlräume in den Ankerbohrungen

Beim Bohren der Ankerlöcher im Bereich einer Stützmauer bei der Stütze B (siehe Fig. 12) stiessen die Bohrungen auf bis zu 2 m lange Hohlräume. Trotz des Einbringens von 167 t Injektionsgut blieb der Fels in diesem Bereich undicht. Gekernte Sondierbohrungen ergaben neben leeren Hohlräumen auch Füllungen mit Kies aus Gault oder heterogenem Sand mit glatt polierten Körnern sowie in einem Falle weissem Tuff. Die meisten Hohlräume stehen geometrisch in

Zusammenhang mit einer ostfallenden Überschiebungsfläche (Seite 25). Höchstwahrscheinlich gehören die Hohlräume zudem zu einem ausgedehnten Karstsystem, denn im See trat an der gleichen Stelle Injektionsgut aus, die beim Färbversuch des Dürensees positiv ansprach (Seite 71).

Foundation Stütze A

Die gewichtige Stütze A wurde mittels zweier 17 m tiefer Schächte von 3,4 m Durchmesser in gesundem Fels fundiert. Mühe bereitete auch hier die Verankerung, die im Bereich der Überschiebungsfläche in einem schleifenden Schnitt mit der Felsoberfläche erfolgen musste. Die gestaffelten Ankerlängen erreichten aus diesem Grunde 36 bis 48 m.

4.2.2 Portal Büel

Der bergmännisch erstellte Tunnelteil mündet in der ehemaligen Abbauwand eines aufgelassenen Sandsteinbruches. Die anstehenden Sandsteine sind im 1–5-dm-Bereich gebankt und weisen tonige Schichtfugen mit niedriger Scherfestigkeit auf. Im Kalottenbereich fallen die Schichten mit 60 bis 80° gegen Süden, im Bereich der Strosse zum Teil flach gegen Westen ein.

Felssicherungen

Um ein Abgleiten der Schichtpakete zu verhindern, wurde über dem Portal ein durchgehender Riegel mit vorgespannten Ankern erstellt.

Beim Anlegen des Installationsplatzes im felsigen Steilhang vor dem Schutterstollenportal entstanden 20 bis 30 m hohe Anschnitte in oberflächlich aufgelockerten Sandsteinen und Tonschiefern. Ein Felssturz beim Anschliessen des Schutterstollens zeigte, dass diese Felsböschung instabil war. Sie wurde in der Folge mit verankerten Riegeln gesichert.

Niederbruch im Schutterstollen

Bei Tm 20 des Schutterstollens ereignete sich am 10.9.72 aus dem nördlichen Teil der Kalotte ein Niederbruch von rund 200 m³ Gestein. Ursache war eine ungünstige Verschneidung der Schichtung mit einer Ruschelzone. Die Niederbruchstrecke wurde mit hinterfüllten Stahleinbau-bogen gesichert und mit einem Betongewölbe verkleidet, das zusätzlich mit Ankern zurückgebunden wurde.

Foundation Portalbauwerk

Die Standfestigkeit der Gesteine der Altdorfer Sandstein-Gruppe ist in Obflächennähe schlecht. Aus diesem Grunde wurde im Bergesinnern nur je eine längsliegende Ventilatorenkaverne ausgebrochen und die eigentliche Lüftungszentrale in den Bereich des Portalbauwerkes respektive Brückenwiderlagers verlegt. Die Foundation erfolgte mittels 5 Schächten von 2,4 m Innendurchmesser. Die vier Schächte in der Widerlageraxe konnten in Tiefen von 11 bis 15,5 m in gesundem Fels fundiert werden. Mit den relativ grossen Einbindetiefen von 2,5 bis 4 m konnte die Gefahr eines Gleitbruches längs der tonigen Schichtfugen ausgeschaltet werden. Der auf der Ostseite liegende fünfte Schacht in einem statisch unkritischen Bereich ruht auf leicht verwittertem Fels bei einer Einbindetiefe von nur 0,5 m.

4.3 Los Rütönen

4.3.1 Ausbruch Tunnelröhren

a) Allgemeines Verhalten

Im Los Rütönen waren vorwiegend kalkige Serien mit gesamthaft günstigen geotechnischen Eigenschaften zu durchfahren. In beiden Röhren zusammen betragen die Längenanteile der

- Kalke 7173 m 84%
- Mergel und Schiefer 1357 m 16%

Die einzige nennenswerte Mergelstrecke mit den als geotechnisch eher ungünstig eingestuften Amdenermergeln konnte ebenfalls ohne spezielle Schwierigkeiten durchörtert werden (siehe Abschnitt 4.7, Seite 52). Das spektakulärste Ereignis war der Wassereinbruch, der sich beim Anfahren eines Karstsystems ereignete (siehe Abschnitt 5.2, Seite 71).

Hauptsächlich aus installationstechnischen Gründen erfolgte der Ausbruch des Schutterstollens und der direkt anschliessenden Tunnelröhren 2phasig (Kalotte/Strosse). Während in den südlichen Tunnelästen im standfesten Schrattenkalk nach 20 bis 30 m definitiv auf Vollausbuch umgestellt wurde, behielt die Unternehmung den Kalottenvortrieb in Richtung Portal im Hinblick auf den Zentralenausbruch sowie den Durchschlag zur Terrainoberfläche bei.

Die geotechnisch wichtigsten Trennflächensysteme sind die Schichtung und die wichtigsten Verwerfungen. Sie werden vom Tunnel im allgemeinen günstig, d.h. stumpfwinklig bis quer durchfahren. Einzig im Bereich der Eingangskurve in der Portalzone beträgt der Schnittwinkel mit der Schichtung lediglich 20 bis 30°.

Die generell günstige Schichtlage bringt jedoch mit sich, dass das senkrecht auf der Faltenachse stehende Hauptluftsystem ungünstig spitzwinklig zum Tunnel verläuft und Nebenluftsysteme zum Teil eine tunnelparallele Lage einnehmen. Spezielle Erwähnung verdient das geotechnische Verhalten von zwei Gesteinsserien:

- Der *Luitere-Zug* an der Grenze zwischen Gault und Schrattenkalk bildete immer eine durchgehende, meist durchnässte Fuge aus grünsandigen, zum Teil auch verlehmtten Mergeln mit geringer Kohäsion. Unterhalb dieser prädestinierten Ablösungsfläche brach das Gestein häufig aus. Dies vor allem im Bereich von Ecken bei querschlägigen Vortrieben (Zentrale Rütene, Schutterstollen, Querschlag Nr. 12) und erforderte Sicherungs- und Sanierungsmassnahmen in Form von Betonpfeilern.
- Der *Schrattenkalk* ist an und für sich ein standfestes Gestein. Im Gelände baut er häufig markante, senkrechte Felswände auf (z.B. Höch Flue westlich Seelisberg, Niderbauen-Chulm, Oberbauenstock). Er ist jedoch ausgesprochen spröde. Auf diese Sprödigkeit ist der scheinbare Widerspruch zurückzuführen, dass ein Gestein, das feste, massige Felswände aufbaut, im Tunnel oft bis in den cm-Bereich geklüftet war. Offensichtlich sind im Gesteinsgefüge latente Klüftungen vorhanden, die erst als Folge der Sprengerschütterungen in Erscheinung traten. Die Sprödigkeit des Schrattenkalkes bedingte ferner, dass das Gestein längs der Verwerfungen oft stark zerrüttet und teilweise bröckelig ist. Teilweise verheilten die Risse nachträglich mit Kalzit, so dass eine Verfestigung der tektonisierten Zonen eintrat. Der Schrattenkalk zeigte je nach Durchklüftung ein sehr unterschiedliches geotechnisches Verhalten. Während er sich im Nordschenkel der Seelisbergfalte als bautechnisch ideales Gestein erwies, bereitete er bei seinem zweiten Antreffen im Gewölbescheitel erhebliche Schwierigkeiten.

Die *Überlagerung* erreicht südlich der Amdenermergelmulde mit 1340 m ihr Maximum. Im Tunnel machten sich in diesem Abschnitt Spannungsumlagerungen durch Risse in der Gunitverkleidung der Paramente, wie auch im Fels selbst bemerkbar. Stellenweise ereigneten sich auf der Ostseite auch bergschlagartige Abplatzungen in Kämpferhöhe. Ein hörbares Knacken war vor allem in den massigen Grünsandsteinen zu verzeichnen. Besonders stark aufgelockert war jeweils der Fuss des seeseitigen Paramentes im Kieselkalk der Seeröhre (asymmetrische Spannungsverteilung). Die Risse konnten sich zu Spalten von mehreren Zentimetern Breite ausweiten und lokal zu kleinen Niederbrüchen führen, so dass über weite Strecken eine Ankerung der Paramente unumgänglich wurde.

b) Einbauten

Wie auch aus dem Anhang 5a zu ersehen ist, gelangte gemäss Tabelle 6 Einbau als Sicherungsmassnahme nur ausnahmsweise zur Anwendung:

Tabelle 6: Einbaustrecken im Los Rütönen

Strecke S = Seeröhre, B = Bergröhre	Länge (m)	Lithologie, Einbaugrund
B: km 120.323 – 120.335 S: km 120.356 – 120.380	12 24	<i>Gault</i> : geklüftete Knollenschichten, oberflächlich aufgelockerter Fels in <i>Portalzone</i> , schleifender Schnitt mit Felsoberfläche
B: km 120.920 – 120.930 S: km 120.941 – 120.955	10 14	<i>Kalkige Drusbergschichten</i> : engständig geklüftet, zum Teil verlehmt
B: km 121.876 – 121.886	10	<i>Schrattenskalk</i> : <i>Störung</i> , von Hand zerreibliches, durchnässstes Gestein längs einer Verwerfung
B: km 121.896 – 121.960	64	<i>Schrattenskalk</i> : ausgeprägte <i>Störung</i> in Vortriebsrichtung langsam absinkend, begleitet von gestörtem, intensiv geklüftetem Gestein und zum Teil 50 cm mächtiger Lehmzone
Total	134	

Die Länge aller Einbaustrecken beträgt somit 134 m oder 1,6%

4.3.2 Ausbruchsklassen

Die Ausbruchsklassenverteilung innerhalb der einzelnen Schichtserien ist in der Tabelle 7 zusammengestellt, die Verteilung längs dem Tunnel und damit die zeitliche Abfolge geht aus dem Anhang 5a hervor.

Zu Beginn des Tunnelvortriebs in Richtung Süd wurden der Schrattekalk und die Drusbergkalke im Nordschenkel der Seelisbergfalte vorwiegend in den Ausbruchsklassen I und II ausgebrochen. Kurze, geotechnisch schwierige Strecken wurden eingebaut (Ausbruchsklasse IV).

In der ganzen, bis zum Losende anhaltenden Strecke ab km 121.129 der Seeröhre, respektive 121.250 der Bergröhre, entspricht die Sicherungsart dagegen vorwiegend der Ausbruchsklasse III, und der Einbau gelangte nicht mehr zur Anwendung. Auffallenderweise erfolgte die Umstellung in den beiden Röhren in geologisch verschiedenartigen Gesteinen. Sie fand jedoch praktisch gleichzeitig, d.h. Ende März 1973, statt. Ganz offensichtlich wurde ab diesem Zeitpunkt ein einmal eingespielter Arbeitsrhythmus, weitgehend unabhängig von den jeweils vorliegenden Schichtserien respektive geotechnischen Bedingungen, beibehalten (Bohren – Sprengen – Schüttern/Sichern nach 1 bis 3 Abschlägen). Dass in der Folge der bautechnisch meistens viel günstigere Schrattekalk in der gleichen Ausbruchsklasse aufgefahren wurde wie die ungünstigeren Amdenermergel und der nachbrüchige Kieselkalk, ist auf das weite, geotechnisch eine recht grosse Mannigfaltigkeit abdeckende Spektrum der Ausbruchsklasse III zurückzuführen, wie aus den nachstehenden Beispielen zu ersehen ist.

Schichtserie	Sicherungsmaßnahme im Vortriebsbereich = Ausbruchsklasse III
Schrattenskalk Gault Kieselkalk Amdenermergel	Gunit oder Spritzbeton Anker + Spritzbeton Anker + Netz + Spritzbeton

Der Aufwand an Sicherungsmassnahmen wurde somit den sich ändernden Felsverhältnissen angepasst, der Arbeitsrhythmus und damit die Ausbruchsklasse jedoch beibehalten. Einzig bei wesentlich günstigeren Felsverhältnissen erfolgte teilweise ein Wechsel in die Klasse II (Sicherung hinter dem Vortriebsbereich).

Interessant ist die Feststellung, dass auch bei relativ schlechten Felsverhältnissen die Klasse III beibehalten wurde, d.h. der eine grössere Umstellung erfordernde und ohne spezielle Installationen bei grossen Querschnitten sehr zeitraubende Stahleinbau wurde nach Möglichkeit vermieden. Nach der generellen Umstellung auf die Klasse III wurde Stahleinbau in der Klasse IV nicht mehr angewendet.

Tabelle 7: Ausbruchsklassenverteilung im Los Rütönen

Schichtserie	Tunnelröhre B = Bergröhre S = Seeröhre	Länge (m)	Prozentuale Längenanteile der einzelnen Ausbruchsklassen				
			I	II	III	IV	V
Amdenermergel	B	471	-	-	100	-	-
	S	463	-	1	99	-	-
Seewerschichten	B	227	-	-	100	-	-
	S	241	-	1	99	-	-
Gault	B	559,2	9	17	72	-	2*
	S	620	10	13	73	-	4*
Schrattenkalk+ Orbitolinaschichten	B	1699	26	7	62	5	-
	S	1653	21	11	68	-	-
kalkige Drusbergschichten	B	307	79	3	15	3	-
	S	264	83	12	0,4	5	-
mergelige Drusbergschichten	B	172	30	54	16	-	-
	S	157	-	7	93	-	-
Kieselkalk	B	698	-	6	94	-	-
	S	769	-	-	100	-	-
Kieselkalkschiefer	B	52	-	-	100	-	-
	S	42	-	-	100	-	-
Valanginienkalk	B	82,1	-	-	100	-	-
	S	53,5	-	-	100	-	-

* Portalzone

4.3.3 Zentralen Rütönen und Hattig

Beide Zentralen wurden quer zu den Tunnelröhren angelegt.

Zentrale Rütönen

Die Zentrale wird von der mit 60 bis 70° gegen NNW einfallenden Grenze Gault/Schrattenkalk unter einem Winkel von 55° geschnitten. Der grösste Teil der Kalotte besteht aus grobgeklüfteter Echinodermenbrekzie und wurde mittels Ankern und Spritzbeton systematisch gesichert. Im bergseitigen Teil der Bergröhre mit grob gebanktem und kaum geklüftetem Schrattenkalk waren die bautechnischen Verhältnisse wesentlich besser, so dass hier auf eine systematische Ankerung verzichtet werden konnte.

Zentrale Hattig

Die Zentrale Hattig liegt im Schrattenkalkgewölbe der Seelisbergfalte. Der Kalk enthält an dieser Stelle die flach südfallenden Mergelfugen der unteren Orbitolinaschichten. Der Ausbruch der

Kaverne stiess auf keine speziellen Schwierigkeiten und konnte mit einer systematischen Ankerung und Spritzbeton gesichert werden.

4.4 Schacht Hattig

Der Schacht befindet sich im Südschenkel der Seelisbergfalte. Die Schichten fallen im Mittel mit 30° gegen S bis SSW ein. Im Zuge der Schachtabsenkung wurden durchörtert:

- 54 m Lockergesteine (Gehängeschutt + Moräne)
- 26 m Amdenermergel
- 44 m Seewerschiefer und Seewerkalk
- 45 m Gault
- 112 m Schrattenkalk

Die 54 m lange Lockergesteinsstrecke wurde mit Einbauringen und vorgeschlagenen Verzugsblechen überwunden (Marciavanti-Vortrieb). Im Fels war die Standfestigkeit besser, als in der Ausschreibung angenommen worden war. So konnten während mehreren Wochen bis zu 15 m freie Schachtlänge ohne Sicherung belassen werden (Prognose: 4 bis 6 m). Einzig im Schrattenkalk (Sm 235–238.5) musste eine stark geklüftete Partie sofort mit Ankern und Netzen gesichert werden. Schwierigkeiten beim Bohren, Besetzen und Sprengen ergaben sich teilweise in den stark geklüfteten Serien des Gaults und des Schrattenkalkes.

Das Antreffen eines mit Wasser und Mondmilch (wässrige Suspension von Kalzit und Palygorskit) gefüllten Karstsystems im Schrattenkalk bei Sm 186.5 liess die Vorinjektion einer 25 m langen Strecke als ratsam erscheinen. Die injizierte Strecke konnte anschliessend ohne jede Schwierigkeit durchfahren werden.

4.5 Konventionelle Ausbrüche Los Huttegg

Die Valanginienmergel sind verwitterungsanfällig, d.h. sie verlieren bei Zutritt von feuchter Tunnelluft und der damit verbundenen Kondenswasserbildung ihre Festigkeit. Versuchsweise atmosphärischen Bedingungen ausgesetzte kompakte Valanginienmergelblöcke zerfielen innerhalb von wenigen Wochen bis Monaten vollständig. Um den Kohäsionsverlusten vorzubeugen, wurden die Ausbruchflächen durchwegs mit Gunit abgedeckt. Der Gunitauftrag erfolgte meistens innert Wochenfrist.

4.5.1 Pilotstollen

a) Allgemeines Verhalten

Die innerhalb des künftigen Ausbruchsprofils der Tunnelröhren liegenden Pilotstollen wiesen einen Querschnitt von 8,8 bis 9,6 m² auf (Tunnelquerschnitt 111 bis 115 m²). Zusätzlich zum Erschliessungsstollen 70 wurden mit dem Parallelstollen 73 und dem von ihm abzweigenden Stollen 74 weitere Zugänge zum Zentralbereich und den Pilotstollen geschaffen. Einen Überblick über die Lage und Bezeichnung der verschiedenen Stollen gewährt die nachstehende Fig. 13.

Während die Tunnelröhren und damit die entsprechenden Pilotstollen günstig, d.h. quer zu den geotechnisch wichtigsten Trennflächen, nämlich den oft als kohäsionslose Harnischflächen ausgebildeten Ruschelzonen sowie den Schicht- respektive Schieferungsflächen verlaufen, streichen diese Trennflächen bezüglich der Zugangsstollen ungünstig, d.h. schneiden sie spitzwinklig bis parallel.

Die seismisch festgestellte Auflockerungszone äusserte sich in allen Zugangsstollen lediglich in Form einer stärkeren Durchnässung, ohne dass die Standfestigkeit des Gesteins beeinträchtigt war.

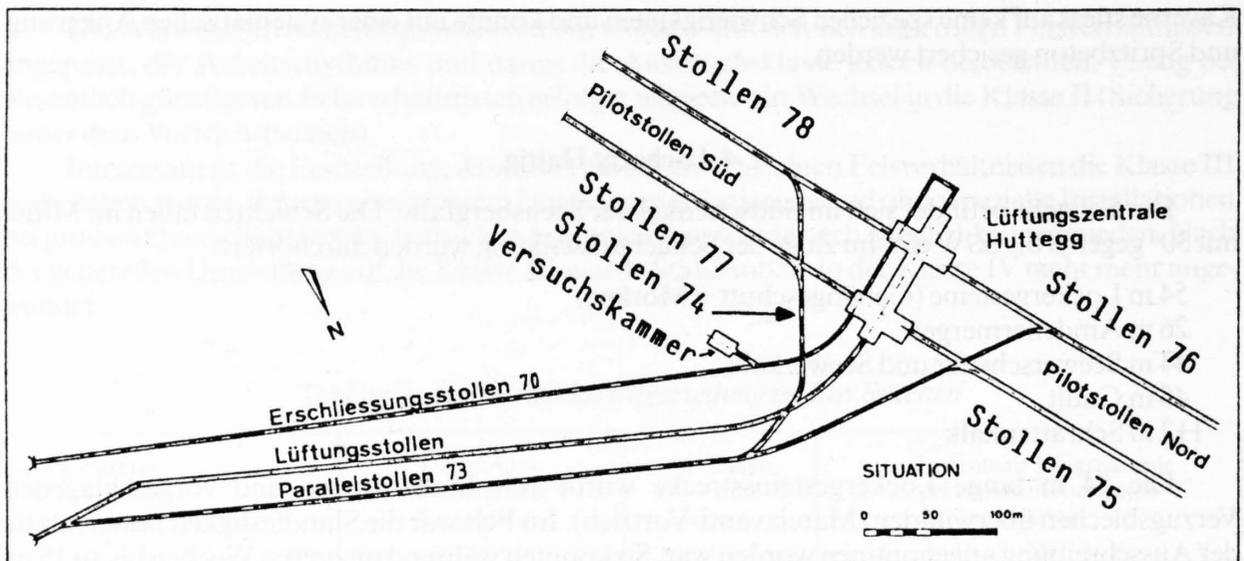


Fig. 13: Erschliessungs- und Pilotstollen Los Huttegg

Der Ausbruch der Pilotstollen stiess nirgends auf grössere Schwierigkeiten. Insbesondere hat sich die im Bereich der grössten Überlagerung für möglich gehaltene Druckhaftigkeit des Gebirges glücklicherweise nicht bestätigt. Gleich wie im Los Rüteneu äusserten sich die durch den Stollenausbruch ausgelösten Spannungsumlagerungen in Form von Rissen in den Paramenten. Diese klangen zudem beim Anschlagen oft hohl.

b) Ausbruchsklassenverteilung

Beim Vergleich der Sicherungsmassnahmen und Ausbruchsklassen (Definition siehe Anhang 3) der verschiedenen Stollen ist ihr unterschiedlicher Verwendungszweck zu berücksichtigen. In den im Tunnelprofil liegenden Pilotstollen musste sich jeder versetzte Anker oder Einbaubogen auf den späteren Vortrieb hindernd auswirken. Eine gewisse Auflockerung des Gebirges um den Pilotstollen herum war zudem zur Erleichterung des späteren Abbaus erwünscht. Die Sicherung bestand aus diesem Grunde im allgemeinen nur aus einem nach Wochenfrist aufgetragenen Gunitauftrag. Bei den Zugangsstollen, die ohne Unterbruch offenbleiben mussten, wurde ein etwas höherer Sicherungsaufwand betrieben. So wurde im Stollen 73 eine Zone mit gestörtem Fels zwischen Tm 362.1 und 530 eingebaut, während die entsprechende Zone im parallel laufenden Pilotstollen für den Lüftungsstollen keinen Einbau aufweist.

Aufgrund der unterschiedlichen Aufgabenstellung sowie der ungünstigeren Lage bezüglich der wichtigsten Trennflächen weicht die Ausbruchsklassenverteilung des «permanenten» Stollens 73 stark von jener der Pilotstollen 75 bis 78 ab (Tabelle 8):

Tabelle 8: Ausbruchsklassenverteilung in den Pilotstollen (%).

Ausbruchsklasse	Stollen				
	73	75	76	77	78
I	33	95,5	91	100	98
II	44	4,5	9	0	2
III	23	0	0	0	0
	100	100	100	100	100

c) Langzeitverhalten

In allen ausgebrochenen Stollen machten sich die Valanginienmergel durch ihr ungünstiges Langzeitverhalten bemerkbar. Der Gunit begann nach rund einem halben Jahr Schäden in Form von Rissen, Abplatzungen und kleineren Niederbrüchen aufzuweisen. Der nachbrechende Fels erforderte eine Sanierung der Stollen. Trotz der stärker ausgeführten Sicherung im Parallelstollen 73 musste in diesem aufgrund der aufgetretenen Schäden 2 bis 3 Jahre nach dem Ausbruch nochmals eine grössere Sanierung durchgeführt werden.

Wie aus den nachstehenden Skizzen (Fig. 14) hervorgeht, ereigneten sich die Schäden vor allem in den Abschnitten, wo die s-Flächen parallel zum Stollen verlaufen oder ihn spitzwinklig schneiden. Bei flachem Einfallen platzten Gunit und Gestein im First ab, bei mittelsteilem Westfallen brach das Gestein aus dem westlichen (= bergseitigen) Parament aus, so vor allem im Stollen 76 (Berg/Nord) ab Tm 500.

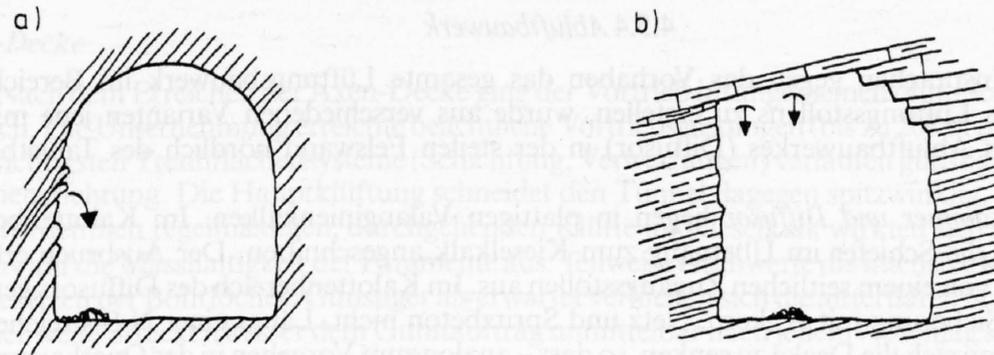


Fig. 14: Häufige Lagen der Nachbrüche bei stollenparallelem Verlauf der s-Flächen.
a) aus dem westlichen bergseitigen Parament
b) aus dem First bei flachem Einfallen

Anlässlich der Sanierungsarbeiten zeigte sich, dass das Gestein hinter dem Gunit zum Teil aufgelockert war. Langfristig gesehen würde somit in den Valanginienmergeln auch bei kleineren Querschnitten eine Sicherung allein mit Gunit nicht genügen.

4.5.2 Zentrale Huttegg und Versuchskaverne

Die Versuchskaverne wurde in vier Abbauphasen ausgebrochen, wobei mit Ankern, Netzen und Gunit gesichert wurde.

Die Zentrale Huttegg umfasst eine Querkaverne mit 14,2 m Durchmesser und zwei längsliegende Ventilatorenkavernen. Letztere entsprechen Ausweitungen der Tunnelröhren auf einen Durchmesser von 18,2 m auf einer Länge von total 52,7 m. Die anschliessenden je 30 m langen Startröhren für den «Big John» wurden ebenfalls etappenweise konventionell ausgebrochen.

Ungünstige Strukturen waren die parallel zur Querkaverne streichenden, mittelsteil nordfallenden Ruschelzonen, die verschiedentlich kleinere Niederbrüche verursachten.

Der Querschnitt der Querkavernen wurde in 10 Ausbruchsetappen unterteilt. Mit schonendem Sprengen (zum Teil pre-splitting) freigelegte kleinere Flächen von rund 10 bis 20 m² wurden jeweils sofort mit Perfoankern, Netzen und Spritzbeton gesichert. Anschliessend in einem 4,5 m Raster versetzte Vorspannanker von 16 bis 18 m Länge wiesen bei einer Verankerungsstrecke von 4,2 m eine Tragkraft von 150 t auf. Diese, aufgrund der Erfahrungen und Deformationsmessungen in der Versuchskaverne angewandte Sicherungsmethode, bewährte sich weitgehend. Einzig in der Querkaverne klangen, aufgrund des in diesem Bereich stärker gestörten Gebirge, die Deformationen nicht ab, so dass zusätzliche Verstärkungen in Form von vier je 25 cm dicken, 4 m breiten, armierten Stützringen angebracht werden mussten.

4.5.3 Umleitbauwerk 19 und Querschläge

Das Umleitbauwerk 19 an der Losgrenze Nord (Rütönen) konnte an der im Projekt vorgesehenen Stelle in bautechnisch günstigem Valanginienkalk ausgebrochen werden. Das im dm-Bereich gebankte und mit 20 bis 45° gegen Süden einfallende Gestein erwies sich im allgemeinen als standfest. Im Firstbereich folgte der Ausbruch teilweise den Schichtflächen, um das Abstürzen von Schichtplatten zu verhindern, mussten hier jedoch kurz nach dem Ausbruch einzelne Anker gesetzt werden. Nachträglich wurden die Ausbruchsprofile der weitgespannten Kammern mit Ankern, Netzen und Gunit gesichert, weil mit der definitiven Auskleidung jahrelang zugewartet werden musste.

Die Querschläge konnten ebenfalls ohne spezielle Schwierigkeiten im Teilausbruch ausgeführt werden. Die geringe Festigkeit der Valanginienmergel machte sich vor allem im Bereich der Ecken zu den Pilotstollen bemerkbar. Diese waren fast durchwegs zerrissen und mussten oft mit armiertem Gunit saniert werden.

4.5.4 Abluftbauwerk

Nach Einsprachen gegen das Vorhaben das gesamte Lüftungsbauwerk im Bereich der Mündung des Lüftungstollens zu erstellen, wurde aus verschiedenen Varianten jene mit der Mündung des Abluftbauwerkes (Diffusor) in der steilen Felswand nördlich des Tabletbaches gewählt.

Windenkammer und Diffusor liegen in plattigen Valanginienkalken. Im Kalottenbereich wurden noch die Schiefer im Übergang zum Kieselkalk angeschnitten. Der Ausbruch erfolgte etappenweise von einem seitlichen Zugangsstollen aus. Im Kalottenbereich des Diffusors genügte die normale Sicherung mit Ankern, Netz und Spritzbeton nicht. Längs einer N-S-streichenden Störung begann sich die Decke zu senken, so dass – analog zum Vorgehen in der Querkaverne der Zentrale Huttegg – drei armierte Stützringe eingezogen werden mussten.

Der *Abluftschacht* wurde in drei Arbeitsgängen teils mechanisch, teils konventionell ausgebrochen:

1. Pilotbohrung \varnothing 32 cm von oben nach unten
2. Aufbohren auf 2,15 m mit einer am Bohrgestänge aufgehängten Fräse, von unten nach oben
3. Erweitern auf 8,6 m mittels konventionellem Sprengvortrieb, von oben nach unten.

In dem 189 m tiefen Schacht waren die obersten 47 m im Valanginienkalk, der Rest in den Valanginienmergeln auszubrechen. Für die Felsicherung gelangten Haftanker und armierter Spritzbeton zur Anwendung. Anfänglich erfolgte die Sicherung bei der konventionellen Erweiterung täglich, d.h. nach jedem Abschlag. Aufgrund der relativ guten Standzeit konnten später die Sicherungsmassnahmen auf einmal wöchentlich reduziert werden. Die freie Standhöhe erreichte dabei 7 bis 11 m.

4.6 Los Büel

4.6.1 Tunnelröhren

a) Allgemeines Verhalten

Gleich wie im Los Rütönen dominieren im Los Büel die kalkigen Serien, wenn auch ihr Anteil durch die Tonschiefer und Sandsteine des Tertiärs reduziert wird:

Kalke	3801 m	65%
Mergel, Kalkschiefer	449 m	8%
Sandsteine	286 m	5%
Tonschiefer, sandige Mergel	1273 m	22%

Die Überlagerung ist mit maximal 670 m geringer als im Los Rüteneu und wirkte sich geotechnisch nicht aus.

Flyschunterlage der Axen-Decke

Zu Beginn erfolgte der Tunnelausbruch von einem Schutterstollen aus 2phasig (Kalotte/Strosse). Die zuerst durchfahrenen, stark tektonisierten und oberflächennahen Tonschiefer und Sandsteine der Altdorfer Sandstein-Gruppe erwiesen sich als gebrüchlich. Die Abschlagslänge erreichte zum Teil nur 1 m, und die Sicherung bestand vorwiegend aus Stahleinbau oder einem Aussenbetonring. Während der Abschnitt zwischen Schutterstollen und Portal hauptsächlich im Teilausbruch bewältigt wurde, konnte in Richtung Nord nach rund 60 m Vortrieb auf Vollaushub umgestellt werden. In der ganzen folgenden Flyschstrecke musste das ausgebrochene Profil nach jedem der 3 bis 4 m langen Abschlüsse mit Ankern, Netzen und Spritzbeton gesichert werden.

Axen-Decke

Nach dem Erreichen der Axen-Decke ging der Vortrieb im allgemeinen ohne Schwierigkeiten vor sich. Die Unternehmung erreichte beachtliche Vortriebsleistungen (bis zu 208 m pro Monat (!)). Die wichtigsten Trennflächensysteme (Schichtung, Verwerfungen) verlaufen günstig, d.h. quer zur Vortriebsrichtung. Die Hauptklüftung schneidet den Tunnel dagegen spitzwinklig. Vor allem die ausserordentlich regelmässigen, durchgehenden Klüfte im Kieselkalk wirkten sich streckenweise negativ auf die Masshaltigkeit der Paramente aus. Teilweise erschwerte die intensive Klüftung auch das Besetzen der Bohrlöcher. Günstiger als erwartet verhielten sich die alttertiären Schiefer, indem sie über weite Strecken ausser dem Gunitauftrag unmittelbar nach jedem Abschlag keine weiteren Sicherheitsmassnahmen erforderten. Immerhin zeigte ein nachträglicher Niederbruch von 8 bis 10 m³ bei km 128.565, dass das Langzeitverhalten der alttertiären Schiefer nicht allzu optimistisch beurteilt werden darf. Der Niederbruch ereignete sich rund 14 Monate nach der Durchörterung in einer Periode mit durch die Schneeschmelze bedingtem erhöhtem Wasseranfall. Allseits rostige Grenzflächen der niedergebrochenen Blöcke wiesen darauf hin, dass die betreffende Gesteinspartie bereits seit längerer Zeit aufgelockert war.

Valanginienmergel der Drusberg-Decke

Die Südgrenze der Valanginienmergel, die ursprünglich aus geotechnischen Gründen als Losgrenze vorgesehen war, wurde 120 m weiter südlich angetroffen als prognostiziert. Aus programmlichen Gründen entschied die Oberbauleitung an der in der Ausschreibung festgelegten Stelle festzuhalten, so dass im Los Büel 120 m Valanginienmergel konventionell ausgebrochen werden mussten.

Da das Profil in Angleichung an das Kreisprofil des Loses Huttegg ein Sohlgewölbe aufweist, erfolgte der Ausbruch aus installationstechnischen Gründen in 2 Etappen (Reichweite des Jumbos, Sicherungsarbeiten). Die Kalotte wurde unmittelbar nach jedem Abschlag mit Ankern, Netzen und Spritzbeton gesichert. In den Paramenten konnten die Sicherungsarbeiten in grösseren Etappen nachgezogen werden. Der Vortrieb in den Valanginienmergeln stiess auf keine speziellen Schwierigkeiten.

b) Einbaustrecken

Wie aus der nachstehenden Tabelle 9 zu entnehmen ist, konzentrieren sich die Einbaustrecken im Los Büel auf die Altdorfer Sandstein-Gruppe. Aus dem Anhang 5c ist ersichtlich, dass vor allem im portalwärtigen Abschnitt eingebaut wurde.

Tabelle 9: Einbaustrecken Los Büel

Schichtserie	totale Einbaulänge (inkl. Aussenbeton- ringe oder System Bernold)	Grund
Valanginienmergel	S: 6 m B: 6 m	Übergang Umleitbauwerk/Tunnelröhre, statisch kritisch
alttertiäre Schiefer	S: 5 m	4 m tiefer, 1–2 m breiter und 5 m langer Kamin in wasserführender Ruschelzone
Altdorfer Sandstein-Gruppe	S: 165,8 m B: 143,9 m	zerruszelte durchnässte Tonschiefer, oberflächlich aufgelockerte Sandsteine mit Tonschieferzwischenlagen in der Portalzone, Stützringe bei Querschlägen
Total	326,7 m	

(S = Seeröhre, B = Bergröhre)

Der prozentuale Anteil aller Einbaustrecken im Los Büel beträgt 5,6%.

c) *Sohlunggestaltung* (siehe auch Anhang 5c)

In den *Valanginienmergeln* erhielt der Tunnel, wie erwähnt, in Angleichung an das Kreisprofil im Los Huttegg ein *Sohlgewölbe*.

In den *alttertiären Schiefeln* wurde aufgrund des relativ günstigen geotechnischen Verhaltens und angesichts der Tatsache, dass der Gehalt an quellfähigem Montmorillonit im Gesamtgestein unterhalb der Nachweisgrenze blieb, auf ein *Sohlgewölbe* verzichtet. Dieses wurde ersetzt durch eine durchgehende *Sohlenschutzplatte* mit einer Netzarmierung ohne statische Funktion. Der definitive Ausbau wurde mit einem armierten Widerlagerfuss verstärkt, dessen Armierung in die Paramente hochgezogen wurde.

Tabelle 10: *Sohlunggestaltung Los Büel*

Art der Sohle	Länge	Schichtserie, Bemerkungen
Sohlgewölbe	S: 110 m B: 104 m	Valanginienmergel
Sohlenschutzplatte	S: 24 m S: 292 m B: 340 m S: 154 m	Alttertiäre Schiefer, Axen-Nordlappen Alttertiäre Schiefer, Axen-Südlappen Altdorfer Sandstein-Gruppe (zerruszelte Tonschiefer)
Transportpiste	S: 228 m* B: 397 m	Altdorfer Sandstein-Gruppe
Total verstärkte Sohle	1649 m	28,4% der Tunnelstrecke

(S = Seeröhre, B = Bergröhre)

* inklusive Q 39

In den Gesteinen der *Flyschunterlage der Axen-Decke* neigten die Tonschiefer bei Nässe und Befahren mit schwerbeladenen Lastwagen zur Schlamm- und Geröllbildung. Die Transportpiste wurde deshalb betoniert.

Wie der Tabelle 10 zu entnehmen ist, musste im Los Büel aus diesen Gründen beinahe ein Drittel der Tunnelsohle verstärkt werden.

4.6.2 Ausbruchsklassen

In bezug auf das Sicherungssystem bestand im Los Büel ein wesentlicher vertraglicher Unterschied zum Los Rütene, der teilweise auch die unterschiedliche Klassierung gleicher Schichtserien in den beiden Losen erklärt. In den auf den Ausschreibungsunterlagen des Gotthard-Strassentunnels basierenden Richtlinien der SUVA «zur Verhütung von Unfällen und Berufskrankheiten bei der Durchführung von Untertagebauten» wird unter Steinfallsicherung aufgeführt:

«In Ausbruchsstrecken von mehr als 3 m Höhe, die zur Verhütung von Steinfall erst später verkleidet werden, ist unmittelbar dem Vortrieb folgend im Gewölbereich auf die ganze Länge mindestens ein engmaschiges Netz anzubringen, um das Personal vor herunterfallenden Steinen zu schützen. Andere Massnahmen sind zulässig, wenn sie dieselbe Sicherheit bieten.»

Im Falle des Losen Büel verzichtete die Unternehmung zum vorneherein auf das Anbringen solcher Netze und den in den Submissions-Bedingungen vorgeschriebenen Sicherungswagen. Als Kopfschutz wurde anschliessend an die Felssäuberung unmittelbar nach jedem Abschlag mit Hilfe von Auslegerkränen zum Teil noch über dem Haufwerk ein Sicherungsgunit von 3 bis 5 cm Dicke aufgetragen. Einer Vereinbarung zwischen Bauherr und Unternehmung entsprechend, zählte dieser erste Gunitauftrag zur Felsklasse I. Im Los Rütene wurde dagegen die gleiche Sicherungsart, da sie im Vortrieb erfolgte, in der Klasse III abgerechnet.

Tabelle 11: Ausbruchsklassenverteilung im Los Büel

Schichtserie	Tunnelröhre B = Bergröhre S = Seeröhre	Länge (m)	Prozentuale Längenanteile der Ausbruchsklassen				
			I	II	III	IV	V
Altdorfer Sandsteingruppe	B	450	-	-	59	-	41*
	S	435	-	-	52	9	39*
Ultrahelvetischer Flysch	B	38	-	-	100	-	-
	S	34	-	-	100	-	-
Alttertiär	B	376	26	56	18	-	-
	S	336	32	59	4	5	-
Schrattenskalk + Orbitolinasch.	B	643	67	33	-	-	-
	S	676	66	34	-	-	-
kalkige Drusbergschichten	B	156	80	20	-	-	-
	S	117	79	21	-	-	-
mergelige Drusbergschichten	B	83	51	49	-	-	-
	S	88	78	22	-	-	-
Kieselkalk	B	834	53	45	2	-	-
	S	883	55	44	1	-	-
Valanginienkalk	B	204	65	32	3	-	-
	S	213	54	39	7	-	-
Valanginienmergel	B	121	-	-	9	-	91**
	S	122	-	-	3	-	98**

* Portalzone

** Profil mit Sohlgewölbe etappenweise ausgebrochen

Der sofortige Gunitauftrag bewährte sich ausserordentlich gut. Ein durchgehend grösserer Sicherungsaufwand mit Teilausbruch (Klasse V) oder Vollausbruch mit sofortiger Sicherung mit armiertem Spritzbeton (Klasse III) musste einzig in der gesamten Flyschstrecke sowie in der Valanginienmergelstrecke betrieben werden. Im übrigen wurde der Gunitauftrag in wenigen Fällen durch Anker oder Anker und Netze verstärkt. Die meisten Schichtserien konnten somit vorwiegend oder vollständig in den Ausbruchsklassen I und II abgerechnet werden (Tabelle 11). Einzig in den alttertiären Schiefen ist der Anteil der Klassen III und IV mit 9% (Seeröhre) respektive 18% (Bergröhre) erhöht.

4.6.3 Umleitbauwerk und Ventilatorenkaverne

Umleitbauwerk 29

Das an der Grenze zum Los Huttegg in den Valanginienmergeln liegende Umleitbauwerk 29 konnte gleich wie die Tunnelstrecke in diesem Gestein im Teilausbruch aufgeföhren und mit Ankern, Netzen und Spritzbeton gesichert werden. Spezielle Schwierigkeiten traten nicht auf. Im Übergang vom Tunnel zum Umleitbauwerk wurden Einbaubogen gestellt.

Ventilatorenkaverne Büel

Die längs liegenden Ventilatorenkavernen entsprechen im Prinzip einer Ausweitung der Tunnelröhren auf 16 m.

Die seeseitige Ventilatorenkaverne liegt in gefalteten, jedoch ruhig gelagerten Tonschiefern, die bergseitige in gebankten und gefalteten Sandsteinen. Der Ausbruch der Ventilatorenkavernen erfolgte etappenweise nach der deutschen Bauweise (Sohlstollen-Widerlagerbeton-Kalotte-Kern). In der weitgespannten Kalotte erwies es sich angesichts der Gebirgsverhältnisse und der grossen Spannweite von 16 m als unerlässlich, den ausgebrochenen Hohlraum ringweise mit Einbaubogen und Beton zu sichern. Diese Arbeiten konnten ohne grössere Schwierigkeiten ausgeführt werden.

4.7 Amdenermergelstrecke (Los Rüteneu)

4.7.1 Verhalten beim Durchörteru

Die Amdenermergel verhielten sich in bezug auf ihre Standfestigkeit viel besser als erwartet. In der Prognose war für den 375 m langen Bereich mit einer Überlagerung von mehr als 800 m mit durchgehendem Einbau bei streckenweisem Teilausbruch gerechnet worden (Ausbruchsklassen IV und V). Tatsächlich genügte jedoch eine Sicherung mit Spritzbeton, Ankern und Netzen (Ausbruchsklasse III). Günstig wirkte sich vor allem die nicht in diesem Ausmass voraussehbare Trockenheit des angetroffenen Felskörpers aus, denn das Gestein neigt bei Wasserzutritt zu Kohäsionsverlusten.

Bei den Sicherungsarbeiten erfolgte der Spritzbetonauftrag nach 1 bis 2 Abschlügen. Die Anker und Netze wurden dagegen normalerweise einmal täglich, d.h. innerhalb von 1 bis 3 Abschlügen, angebracht. Je nach den lokalen Gesteinsverhältnissen wurden normale Sprezhülseanker oder Perfoanker verwendet. Die vorhandene Spritzbetonschicht wurde innerhalb des Vortriebsbereiches nach jedem Abschlag verstärkt.

Gesichert wurden sowohl die Kalotte wie die Paramente. Zeitweise wurde ferner die obere Hälfte der Brust zum Schutze der Mineure gegen Steinfall mit einer Spritzbetonschicht abgedeckt.

Die vorgenommene Sicherung des Ausbruchs bewährte sich im allgemeinen. Es ereigneten sich keine grösseren Niederbrüche. An einigen wenigen Stellen kam es zu Nachbrüchen aus den aufgelockerten Paramenten; dies zum Teil trotz angebrachter Netze. Die Nachbrüche erfolgten 2 bis 4 Wochen nach dem Ausbruch und umfassten normalerweise weniger als 1 m³.

Um eine Aufweichung oder sogar einen Zerfall des Mergels durch das Bohrwasser und den Fahrverkehr zu verhüten, wurde die Sohle in grösseren Etappen, meist wöchentlich, mit einer armierten Betonplatte befestigt.

In sprengtechnischer Hinsicht erwiesen sich die wenig geklüfteten Amdenermergel als ein sehr günstiges Gestein, indem die ganze gebohrte Länge, teils sogar einige dm mehr abgeschlagen werden konnte. Die Ausbruchfläche folgte masshaltig den Kranzbohrlöchern.

Durch den Ausbruch ausgelöste Spannungsumlagerungen äusserten sich vor allem in Form von Rissen in den Paramenten. Zudem war teilweise nach Abschlügen ein deutliches Knacken zu hören.

4.7.2 Verhalten nach der Durchörterung, Deformationsmessungen

Nachträgliche Schäden in der Ausbruchssicherung traten, wie erwähnt, vor allem im Bereich der Paramente auf. In diesen entstanden oft Risse, die vom Fuss aus gegen hinten und oben in den Fels einschnitten, so dass hängende Platten entstanden. Ursache dieser oft faustbreit klaffenden Risse waren die nach dem Ausbruch einsetzenden Spannungsumlagerungen. In beiden Tunnelröhren war vor allem das seeseitige Parament betroffen, was auf eine asymmetrische, primäre Spannungsverteilung hindeutet. Die Situation erforderte vor allem im Zuge des Rigolenausbruches erhöhte Vorsicht und Nachsicherungen.

In 3 Querschnitten der Bergröhre wurden in Anbetracht der pessimistischen Prognose mit Distometern Konvergenzmessungen durchgeführt. Sie ergeben eine relativ konstante Verkürzung der Querschnitte in der Grössenordnung von maximal 25 mm im ersten Monat. In den nächsten 3 Monaten klangen die Bewegungen ab. Anschliessend stellte die Bauleitung praktisch keine Veränderungen mehr fest.

Eine Präzisionsnivellement mit 13 Messpunkten in der Bergröhre zwischen km 122.830 und 123.475 ergab Hebungen von 5 bis 25 mm in der Zeitspanne zwischen dem 26.9.75 und dem 24.2.76, d.h. innert 5 Monaten. Bis zum Mai 1976 nahm die Hebung um weitere 0 bis 4 mm zu.

Aufgrund des beobachteten Abklingens der Bewegungen wurde der Tunnel mit einem auf 40 cm erweiterten Betongewölbe im Normalprofil ausgekleidet. Auf den Einbau eines Sohlengewölbes wurde verzichtet.

4.7.3 Schäden in der seeseitigen Rigole der Seeröhre

Das Profil der Seeröhre weicht insofern vom Normalprofil ab, als die seeseitige Rigole aus einem 100 cm Ø Schleuderbetonrohr besteht. Dieses wurde nach dem Anfahren der grossen Karstquelle eingezogen, um im Falle von weiteren Karstquellen im südlich der Amdenermergel nochmals zu durchörternden Schrattenkalk über eine ausreichende Rigolenkapazität zu verfügen.

In der zweiten Hälfte Oktober 1977, d.h. mehr als zwei Jahre nach der Durchörterung, wurden im Zuge der Vorbereitungsarbeiten für den Einbau der Bankette und Wandplatten Risse in dieser Rigole entdeckt. Da die Rigole Wasser führte, musste mit Wasseraustritten in das Gebirge und entsprechenden ungünstigen Auswirkungen auf die Festigkeit des Felskörpers gerechnet werden. Die Rissbildungen erstreckten sich über die ganze Amdenermergelstrecke. Besonders kritisch waren die Bereiche zwischen km 123.094 und 123.113 sowie km 123.119 und 123.125. Das Rissbild liess auf Sohlenhebungen schliessen. Als Ursache kamen sowohl Quelldrucke wie auch Spannungsumlagerungen als Folge des Auffahrens der Tunnelröhren in Frage.

4.7.4 Geotechnische Untersuchungen

Die röntgenographischen Untersuchungen (Tabelle 3, Seite 35) zeigten, dass der Anteil des quellfähigen Tonminerals Montmorillonit am Gesamtgestein unterhalb der Nachweisgrenze von 5% liegt, so dass aus dieser Sicht nicht mit Quellerscheinungen gerechnet werden musste, die über das normale Quellen von Mergeln hinausgehen.

Nach der Entdeckung der Schäden wurden die geotechnischen Kennziffern der Amdenermergel durch eine Reihe von Versuchen im Labor genauer bestimmt. Die Resultate sind in Tabelle 12 zusammengestellt. Das Hauptgewicht der Untersuchungen lag auf den Quellvorgängen.

Die stark streuenden Versuchsergebnisse sind aus der Fig. 15 ersichtlich.

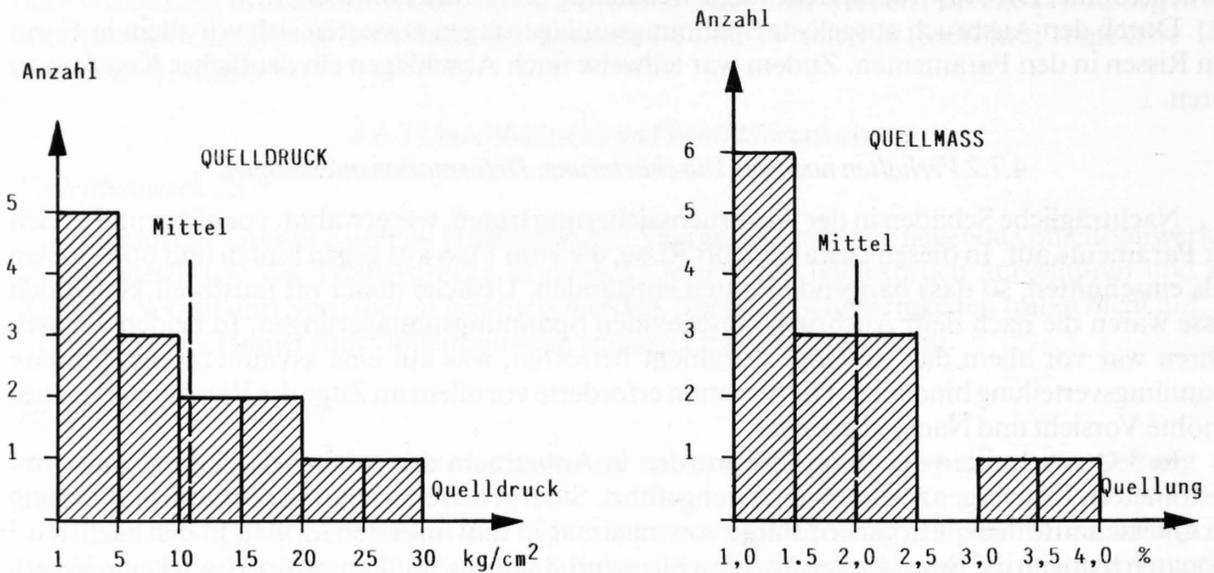


Fig. 15: Histogramme der Quelldrucke und Quellmasse von Amdenermergelproben.

Bemerkenswert ist das von anderen Mergeln (Opalinuston, Molassemergel) in zweifacher Hinsicht abweichende Verhalten. Erstens zeigten die Experimente, dass die Quellvorgänge aufgrund des hohen Raumgewichtes und der sich daraus ergebenden geringen Porosität und Durchlässigkeit nur sehr langsam erfolgen. Diese Eigenschaften sind darauf zurückzuführen, dass sich der Seelisbergtunnel in einer Zone mit hoher Gesteinsverfestigung (Diagenese) nahe am Übergang zu den schwach metamorphen Gesteinen befindet. Während in anderen Mergeln 80 bis 90% des Quellvorganges im Labor bereits nach einem Tag abgeschlossen sind, waren im vorliegenden Falle nur etwa 30% des Quellvorganges nach einem Tag beendet. Die Versuche dauerten zum Teil bis zu 6 Monate.

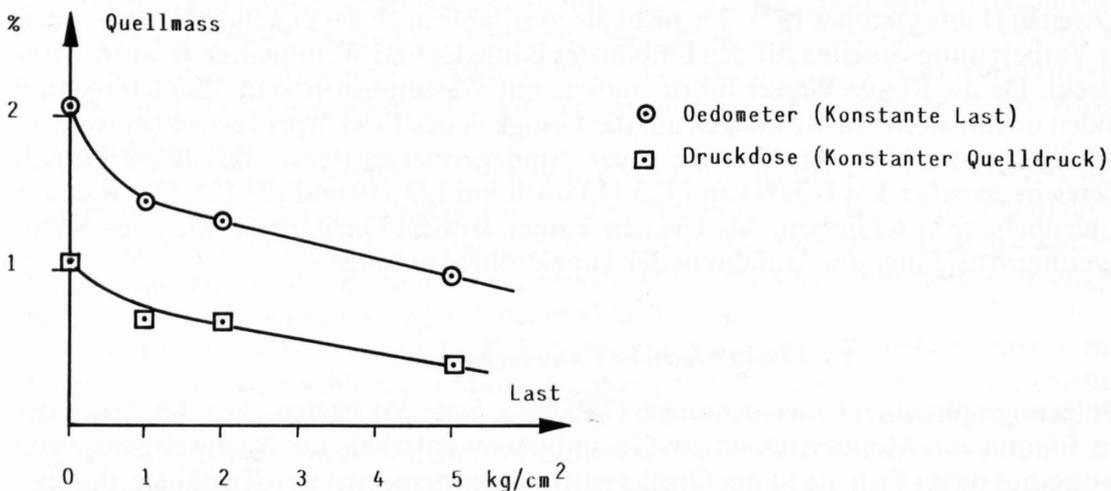


Fig. 16: Quellmasse bei aufgesetzter konstanter Last respektive nachgestelltem konstantem Quelldruck.

Der zweite Unterschied zu anderen Mergeln betrifft das Verhältnis zwischen Quelldruck und Quellmass, das bei den Amdenermergeln sehr gross ist. Einem Quelldruck von 10 kg/cm² entspricht z.B. im Opalinuston ein Quellmass von etwa 5%, im Amdenermergel dagegen ein solches von nur 1,75%.

Tabelle 12: Geotechnische Kennziffern der Amdenermergel

Parameter		Dimension	Streubreite	Mittel	Standardabweichung
spezifisches Gewicht	γ_s	g/cm ³		2,76	0
Raumgewicht	γ_R	g/cm ³	2,68 – 2,72	2,70	0,03
Trockenraumgewicht	γ_{Rr}	g/cm ³	2,60 – 2,71	2,68	0,03
Wassergehalt (Anlieferung)	W	%	0,84 – 1,27	0,94	0,17
Wasseraufnahme	ΔW	%	0,3 – 2,3	1,29	0,75
Porosität	n	%	1,15 – 3,6	2,46	1,13
Quelldruck nach 1 Tag beim Ausbau		kg/cm ² kg/cm ²	0,3 – 12,7 1 – 30	3,9 11	3,6 9
Quellmass nach 1 Tag beim Ausbau		% %	0,38 – 1,20 1,15 – 3,97	0,68 2,0	0,28 0,8
Quellhebung bei p = konst. p = 2 kg/cm ²		%	0,6 – 1,3		
p = 5 kg/cm ²		%	0,4 – 1,0		
Schrumpfung in gesättigtem Zustand		%	0,1 – 0,3	0,16	0,09
im Anlieferungszustand		%	0,1 – 0,4	0,22	0,16
max. Schrumpfindintensität		%/Tag		0,3	
einachsige Druckfestigkeit	δ_c	kg/cm ²	207 – 257	238	27
V-Modul Erstbelastung	V _I	kg/cm ²	110000 – 140000	138000	28000
V-Modul Entlastung	V _E	kg/cm ²	157000 – 225000	197000	36000
echte Kohäsion	c _O ¹	kg/cm ²	0,8 – 2,1	1,3	0,7
Scherfestigkeit ($\delta_N = 4 - 6 \text{ kg/cm}^2$)					
technische Kohäsion	c ¹	kg/cm ²	0,05 – 0,20	0,15	0,08
Reibungswinkel	φ	°	32 – 37	34	25
Zugfestigkeit (Spaltversuch)		kg/cm ²		20,8	

zum Teil nur 3 Versuche

Von Bedeutung für die Erklärung der Vorgänge im Tunnel ist ferner die Tatsache, dass austrocknende Proben um bis zu 0,4% schrumpften.

Um die Verhältnisse im Tunnel zu simulieren (vorgespannter Längsbalken) führte das IGB-ETHZ zwei Versuchsreihen durch. In der ersten blieb die Auflast im Oedometer konstant, in der zweiten wurde der Quelldruck im von der IGB verwendeten Apparat laufend nachgestellt. Die erhaltenen Resultate gehen aus der nachstehenden Fig. 16 hervor.

Die Versuche zeigen, dass bei einem stetigen Druck von 5 kg/cm² immer noch ein Quellen um 0,4 bis 1,0% stattfindet.

4.7.5 Ergänzende Verformungsmessungen

Um die Gesamtverformungen des Felskörpers genauer zu erfassen, wurden in zwei Querschnitten die in Fig. 17 dargestellten Messdispositionen getroffen. Installiert wurden 8fach-Extensometer der Terrexpert, einfache Stangenextensometer des ISETH sowie Distometer des ISETH. Ferner wurden die geodätischen Messungen im Sohlenbereich wiederholt.

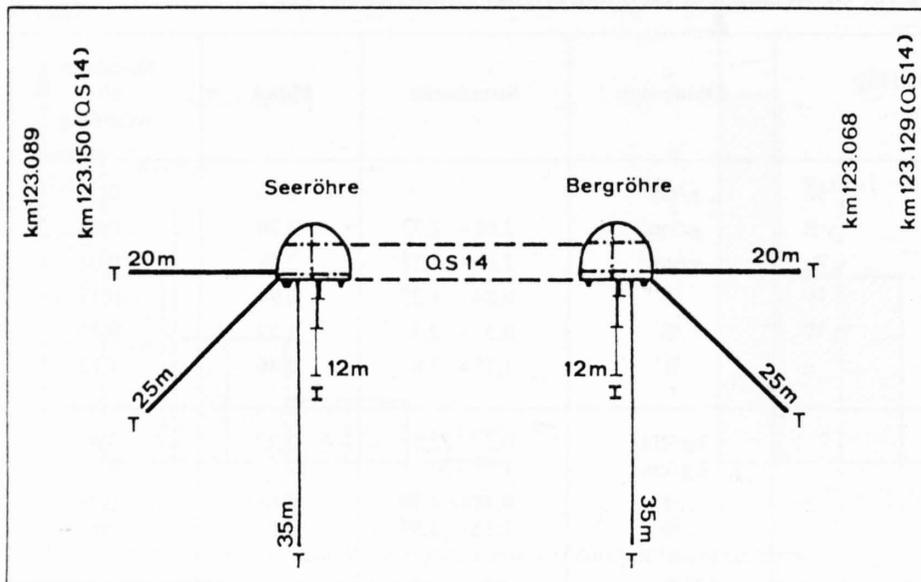


Fig. 17: Anordnung der Extensometer Terrexpert (T) und ISETH (I) sowie der Distometer ISETH (strichpunktiert)

13 Bohrungen für das Mess-Dispositiv wurden gekernt. Sie dienten gleichzeitig der Probenbeschaffung für die felsmechanischen Versuche. Die vertikalen Bohrungen im Bereich der seeseitigen Rigolen zeigten, dass der Fels bis in eine Tiefe von 2 bis 3 m unter den Beton (= -4 m ab OK Fahrbahn) stark aufgelockert ist. In den horizontalen Bohrungen der Paramente reichte die Auflockerungszone 1 bis 2 m weit in den Fels. In diesen Bohrungen konnten zudem Entspannungserscheinungen in Form von Querrissen bis zur jeweiligen Endtiefe von 21,6 m festgestellt werden.

Die verschiedenen Verformungsmessungen, die ja nur die Restbewegungen erfassen konnten, ergaben folgendes:

- In horizontaler Richtung zeigen die Extensometer eine Kontraktion des Felskörpers um 0,5 bis 1 mm im tunnelnahen Bereich, d.h. bis in eine Tiefe von 2 bis 7 m. Ursache ist vermutlich eine Schrumpfung des Gesteins infolge Austrocknens (trockene Tunnelluft, Wasseraufnahme des abbindenden Betons). Ausserhalb der Schrumpfungszone ist eine Extension des Felskörpers zu beobachten, die je nach Messstelle zwischen 13 bis 20 m tief in den Fels hineinreicht.

Die vertikalen Distometer sowie die in Tunnelmitte gelegenen Extensometer des ISETH zeigten bis Mitte 1980 eine anhaltende, wenn auch abgeschwächte Sohlenhebung.

- Die schrägen Messungen zeigen wie erwartet eine Expansion und zwar im Ausmass von 1 bis 5 mm. Besonders stark sind die Expansionserscheinungen im Felsbereich oberhalb -3 m. Sie reicht jedoch bis in den tiefsten Bohrlochbereich, d.h. der stabile Felskörper wurde nicht erreicht.
- Bei den vertikalen Messstellen reichen die Sohlenhebungen aufgrund der Extensometermessungen im allgemeinen bis in eine Tiefe von 5 bis 10 m. Das Bild wird jedoch durch die Einflüsse der im folgenden zu beschreibenden Verankerung verfälscht. Interessanterweise lässt eine Expansion unterhalb des Verankerungsbereiches auf ein gewisses Nachfliessen des Felsens

schliessen. Die vertikalen Distometer sowie die in Tunnelmitte gelegenen Extensometer des ISETH zeigten bis Mitte 1980 eine anhaltende, wenn auch abgeschwächte Sohlenhebung.

4.7.6 Sanierungsmaßnahmen

Auf das nachträgliche Einbringen eines Sohlengewölbes wurde aus zeitlichen, finanziellen und geotechnischen Gründen verzichtet. Da in der kurzen Zeitspanne vom Feststellen der Schäden und Vorliegen erster Messresultate bis zur vorgesehenen Verkehrsübergabe des Tunnels nicht mit einem vollständigen Abklingen der Bewegungen im durch einen Sohlensaubhub erneut gestörten Gebirge gerechnet werden konnte, hätte ein Sohlengewölbe auf entsprechend hohe Drücke dimensioniert werden müssen.

Unter den verschiedenen untersuchten Varianten erwies sich die in Fig. 18 dargestellte Lösung mit verankerten Längsbalken und quergespannter Brückenplatte als die günstigste. Die Verankerung erfolgte mit rund 12 m langen Vorspannankern von 60 t im Abstand von 3 m.

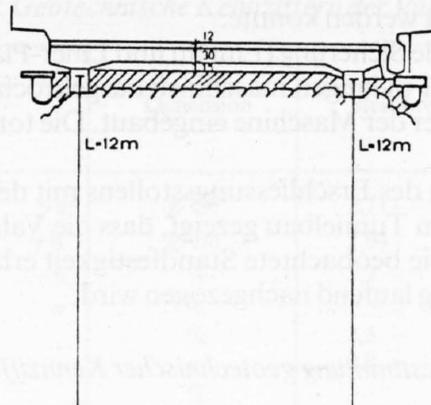


Fig. 18: Sanierung der Amdenermergelstrecke mittels verankerter Längsbalken und quergespannter Brückenplatte. Betonbelag 12 cm, Vorspannanker 60 t im Abstand von 3 m. Hohlraum unter der Brückenplatte leer.

Die trocken gebohrten Ankerbohrlöcher füllten sich erstaunlicherweise innerhalb einiger Stunden bis ca. 1,5 m unter OK Längsträger mit Wasser. Da die Amdenermergel beim Vortrieb vollständig trocken waren, musste vermutet werden, dass das Wasser entweder von der undichten Rigole oder in Längsrichtung von den Seewerkalken her, längs der durchlässigen Auflockerungszone um den Tunnel infiltrierte. Um das weitere Zusickern zu unterbinden, wurde auf der Südseite der Amdenermergelstrecke ein Injektionsschirm ausgeführt und der Rigolenbereich in der Grenzzone Seewerkalk/Amdenermergel ausinjiziert.

Nach der Sanierung klangen die horizontalen Bewegungen weitgehend ab. Dagegen sind die Sohlenhebungen noch nicht vollständig zum Stillstand gekommen. Alle in Tunnelmitte zwischen Februar 1980 und Februar 1982 durchgeführten Messungen (Extensometer + Distometer) zeigen eine lineare Hebung der provisorischen Fahrbahnplatte um $\frac{1}{2}$ mm/Jahr.

Die gewählte Konstruktion lässt eine künftige Bewegung von insgesamt 15 cm zu, bevor die während des Vortriebs erstellte Sohlenschutzplatte an die Brückenplatte stösst. Eine Gefährdung des Bauwerks durch noch stattfindende Hebungen ist deshalb selbst dann äusserst unwahrscheinlich, wenn diese ihr gegenwärtiges Ausmass beibehalten sollten.

4.8 Mechanische Vortriebe Los Huttegg

4.8.1 Fräsen des Erschliessungsstollens 70

Der Erschliessungsstollen 70 wurde zwischen dem 2. Dezember 1970 und dem 18. Februar 1971 mechanisch mit einer Robbins-Fräse aufgeföhren. Bei einem Durchmesser von 3,5 m lagen die

Vortriebsleistungen pro 10-h-Schicht zwischen 1,26 und 17,05 m. Der Mittelwert betrug 8,5 m, bei einer mittleren Vortriebsleistung pro Maschinenstunde von 2,58 m.

Das Gebirge verhielt sich günstiger als erwartet. Der Fels konnte bis Tm 420 grösstenteils ungesichert stehen gelassen werden. Erst nach einer freien Standzeit von rund einem halben Jahr machten sich ab Tm 310 Felsablösungen bemerkbar. Sie erfolgten von diesem Zeitpunkt an fast täglich, so dass in der Folge als Sicherung eine Gunitschicht aufgetragen wurde.

Dass mit den Sicherungsarbeiten so lange zugewartet werden konnte, ist zweifellos auf den gebirgsschonenden mechanischen Vortrieb und das statisch ideale Kreisprofil zurückzuführen.

Ab Tm 420, d.h. im Bereich mit rasch ansteigender Überlagerung und gestörtem Gestein, ereigneten sich bereits in der Vortriebszone ausgedehntere Ausbrüche, vor allem aus dem First und der Südseite des Stollens. Zwischen Tm 487 und Tm 644 musste fast die ganze Strecke mit Einbau-bogen oder Liner-Plates gesichert werden. Kleinere Niederbrüche von max. 1,5 m³ folgten zum Teil unmittelbar hinter dem Vortrieb, zum Teil nachträglich.

Im hintersten Stollenabschnitt (Tm 644 bis 674) verhielt sich das Gebirge wiederum günstiger, so dass auf einen Einbau verzichtet werden konnte.

Eine den Vortrieb behindernde Sicherung (Einbau und Liner-Plates) direkt über der Maschine war auf 123,4 m (= 19%) der 660,1 m langen maschinell ausgebrochenen Strecke notwendig. Auf 64,7 m Länge (= 10%) wurde hinter der Maschine eingebaut. Die totale Einbaulänge betrug somit 188,1 m oder 29%.

Das mechanische Auffahren des Erschliessungsstollens mit den erreichten guten Vortriebsleistungen hat im Hinblick auf den Tunnelbau gezeigt, dass die Valanginienmergel sich für einen mechanischen Vortrieb eignen. Die beobachtete Standfestigkeit erlaubt ferner einen Vortrieb im vollen Profil, falls dessen Sicherung laufend nachgezogen wird.

4.8.2 Bestimmung geotechnischer Kennziffern

a) Allgemeine geotechnische Kennziffern

Die felsmechanischen Berechnungen für die Lüftungszentrale und die Tunnelröhren erforderten eine genauere Kenntnis der geotechnischen Kennziffern (siehe auch Seite 13). Diese wurden noch vor Baubeginn anhand von Proben bestimmt, die dem Erschliessungsstollen und der Versuchskammer entstammten. Die Versuchsergebnisse wurden den Submittenten laufend bekanntgegeben.

Während der Vortriebsarbeiten wurde die Frage nach den Druckfestigkeiten der Valanginienmergel erneut aktuell, nachdem der Vortrieb mit dem Reisszahnbagger ohne massive

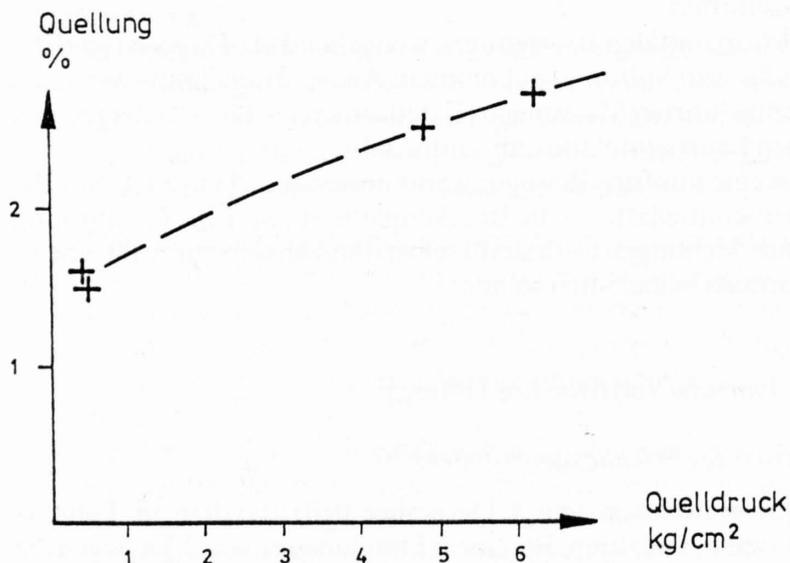


Fig. 19: Beziehung zwischen Quellung und Quelldruck gleicher Proben.

Vorsprengungen die erwarteten bzw. offerierten Leistungen nicht erreichte. Dies weil die Druckfestigkeit als einzige Kenngrösse in die Vertragsverhandlungen eingegangen war. In zwei Serien wurden deshalb Proben mit Hilfe von Kernbohrungen entnommen. In einer ersten wurde die Streubreite der Druckfestigkeit und ihre Abhängigkeit von der Lithologie und der Entnahmetiefe überprüft. Die zweite Serie diente der Untersuchung der Abhängigkeit der Festigkeit von der Schichtlage und der Probenkörpergrösse.

Die Resultate aller durchgeführten Untersuchungen sind in der Tabelle 13 zusammengefasst. Die Druckfestigkeiten von Valanginienmergeln und Valanginienkalken werden in separaten Kapiteln besprochen.

Speziell erwähnt sei, dass die Quellversuche im Unterschied zu den Amdenermergeln ein für Mergel normales Verhalten mit einem raschen Druckanstieg und einer Abhängigkeit des Quelldruckes vom Quellmass ergeben (Fig. 19):

Tabelle 13: Geotechnische Kennziffern der Valanginienmergel

Parameter		Dimension	Streubreite	Mittelwert	Standard- ab- weichung
spezifisches Gewicht	γ_s	g/cm ³	2,71 – 2,76	2,74	0,01
Raumgewicht	γ_R	g/cm ³	2,64 – 2,79	2,70	0,04
Porosität	n	%	1,3 – 5,5	3,3	1,1
Wassergehalt	w	%			
Mergel		%	2,3 – 2,5		
Mergelkalke		%	0,9 – 1,6		
Wasseraufnahme		%		0,58	
Quelldruck		kg/cm ²	0,4 – 6,25	3,0	3,0
Quellung nach 9 Tagen		%	1,26 – 2,32	1,08	0,5
Quellung nach 49 Tagen		%	1,46 – 2,7	2,01	0,6
einachsige Druckfestigkeit	δ_c	kg/cm ²	53 – 1158	s:268 s:329	172 211
Scherfestigkeit					
scheinbare Kohäsion	c'	kg/cm ²	0,24 – 0,72	0,5	0,3
Reibungswinkel	Φ'	°	24 – 31	28	3
V-Modul	$\perp s$ // s	kg/cm ² kg/cm ²		60'000	
E-Modul*		kg/cm ²	200'000 – 450'000 49'000 – 360'000		
Haftreibung Fels/Mörtel					
Haftfestigkeit	$c \perp s$ // s	kg/cm ² kg/cm ²		11,3 7,6	
Gleitfestigkeit	$c' \perp s$ // s	kg/cm ² kg/cm ²		6,1 6,5	
triaxiale Festigkeiten** (Seitendruck ca. 20 bar)					
Höchstfestigkeit	c φ	bar °	13 – 104 29 – 53		
Restfestigkeit	c_R φ_R	bar °	0 – 42 33 – 50		

* stark abhängig von Prüfkörpergrössen

** stark abhängig von Schichtrichtung und Seitendruck

b) Einachsige Druckfestigkeit

Im Rahmen einer vorsorglichen Beweissicherung wurden an insgesamt 93 Probekörpern die einachsigen Druckfestigkeiten bestimmt. In den Vertragsverhandlungen wurde als Grenze für einen rationellen Einsatz des Reisszahnbaggers «Big John» eine Druckfestigkeit von 600 kg/cm^2 festgelegt.

Mittelwerte und Streuung

Die anhand von Oberflächenaufschlüssen geschätzte Spannweite der Druckfestigkeit von 50 bis 200 kg/cm^2 wurde noch während der Submission aufgrund der ersten Laborresultate korrigiert. Als Mittelwerte aus den ersten Versuchen wurden bei einer Streuung von 276 bis 580 kg/cm^2 folgende Zahlen genannt:

$$\delta c \perp \text{Sch: } 296 \text{ kg/cm}^2$$

$$\delta c // \text{Sch: } 320 \text{ kg/cm}^2$$

Das arithmetische Mittel aus allen bis Ende Bauzeit durchgeführten Versuchen beträgt ($s =$ Standardabweichung):

$$\delta c \perp S: m = 268 \text{ kg/cm}^2 \quad s = 172 \text{ kg/cm}^2$$

$$\delta c // S: m = 329 \text{ kg/cm}^2 \quad s = 211 \text{ kg/cm}^2$$

Angesichts der beträchtlichen Streuung weichen somit die aus einer grossen Versuchszahl gewonnenen Werte nicht wesentlich von den anlässlich der Submission bekanntgegebenen ab.

Die Verteilungskurve der Druckfestigkeiten ist asymmetrisch, *mehr als die Hälfte der untersuchten Gesteine* weisen eine *Druckfestigkeit* auf, die zwischen 50 und 250 kg/cm^2 liegt (Fig. 20). Die arithmetischen Mittelwerte werden durch einzelne weit gegen oben streuende Werte gegen höhere Druckfestigkeiten verschoben. Nur ganz vereinzelte Werte überschreiten jedoch die erwähnte Limite von 600 kg/cm^2 .

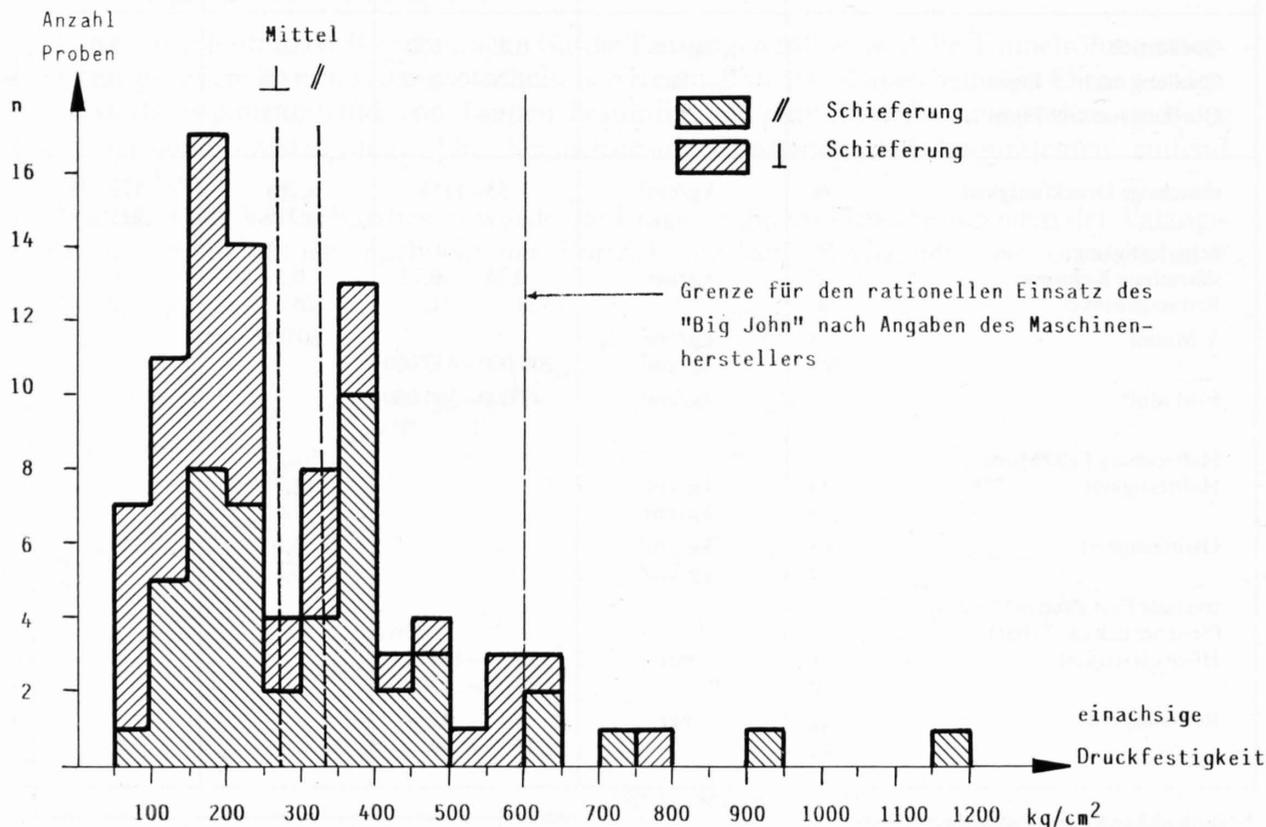


Fig. 20: Histogramm der einachsigen Druckfestigkeiten von Valanginienmergeln.

Die eine Bohrprobenserie lieferte echte Stichproben, die entsprechend statistisch ausgewertet werden können (Tab. 14).

Tabelle 14: *Arithmetische Mittelwerte und Mutungsgrenzen (Bohrproben).*

	$\delta c // Sch$ (kg/cm ²)	$\delta c \perp Sch$ (kg/cm ²)	$\delta c \perp + // Sch$ (kg/cm ²)
m	351	258	306
s	254	192,3	224,148
δ_x	47,1	37,0	29,95
e 99%	121	95	77
e 99,9%	155	111	98

m = Mittelwert (kg/cm²)

s = Standardabweichung (kg/cm²)

δ_x = Standardabweichung des Mittelwertes (kg/cm²)

e = maximaler Zufallsfehler (kg/cm²)

D.h. mit 99% Wahrscheinlichkeit liegt der Mittelwert aller Druckfestigkeitsbestimmungen zwischen 229 und 383 kg/cm² sowie mit 99,9% Wahrscheinlichkeit zwischen 208 und 404 kg/cm².

Das mit dem Anteil der verschiedenen Gesteinstypen an den Bohrkernen dieser Versuchsserie gewichtete gewogene Mittel weicht vom arithmetischen Mittelwert nur unwesentlich ab:

// Sch = 312 kg/cm²

⊥ Sch = 266 kg/cm²

⊥ + // Sch = 289 kg/cm²

Abhängigkeit der einachsigen Druckfestigkeit von verschiedenen Parametern

Die an Proben aus Bohrungen im fertig ausgebrochenen Tunnel durchgeführten Untersuchungen haben bezüglich der Beziehung zwischen einachsigen Druckfestigkeiten und verschiedenen Parametern folgende Resultate ergeben:

- Es besteht bei starker Streuung der Einzelwerte ein Zusammenhang zwischen Karbonatgehalt (Lithologie) und Druckfestigkeit (Tabelle 15, Fig. 21):

Tabelle 15: *Druckfestigkeiten bei verschiedenen Karbonatgehalten (Mittelwerte)*

δc (kg/cm ²)	Karbonatgehalt (Gew.%)			
	≤ 45	≥ 46 – ≤ 59	60 – 65	> 65*
//	196	310	532	809
⊥	150	225	461	536
⊥ + //	171	271	501	672

* nur 2 Proben

- Die Druckfestigkeit ist im untersuchten Bereich (2,5 bis 6 m Tiefe) unabhängig von der Entnahmetiefe (Auflockerungszone um den Tunnel).
- Mit zunehmender Prüfkörpergröße nimmt infolge zunehmender Inhomogenität die einachsige Druckfestigkeit ab. Die an kleinen Prüfkörpern (50 mm Kantenlänge) bestimmten

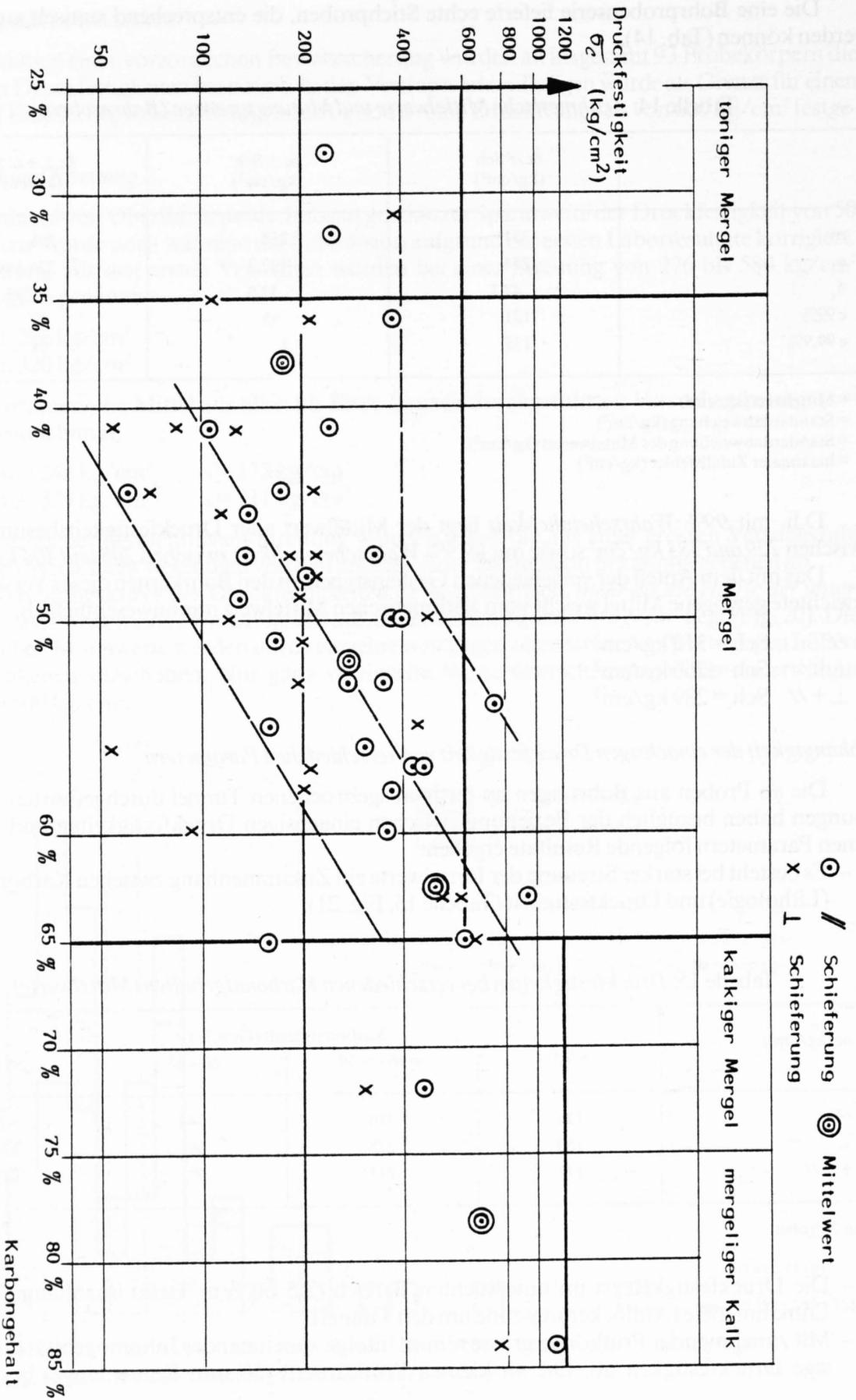


Fig. 21: Abhängigkeit der Würfeldruckfestigkeit vom Karbonatgehalt.

Würfeldruckfestigkeiten sind somit höher als die effektiv durch die Maschine zu bewältigenden Gesteinsfestigkeiten.

- Die Druckfestigkeit ist abhängig vom Winkel zwischen Belastungsrichtung und Schichtung. Sie ist bei einem Winkel von 30° am geringsten. Die arithmetischen Mittel der Würfeldruckfestigkeiten für Belastungen senkrecht und parallel zur Schichtung liegen im selben Streubereich.

c) Druckfestigkeit von Valanginienkalken

6 Proben aus dem Valanginienkalkvorkommen in der Seeröhre Nord (Tm 800 bis 840 ab Zentrale) ergaben für δc (kg/cm²):

Streubreite	602 – 1435
Mittelwert	<u>1167</u>
Standardabweichung	316

4.8.3 Erfahrungen beim Vortrieb mit dem «Big John»

a) Vortriebsmaschine Big John

Die ermittelten Felskennziffern und die gemessenen Deformationen mit langsamen, jedoch sehr lange andauernden Bewegungen führten zum Schluss, dass ein Einklemmen eines Schildes nicht zu befürchten war. Aufgrund von felsmechanischen Berechnungen wurde jedoch der Abstand der Tunnelröhren von ursprünglich 30 m auf 55 m erweitert, um eine gegenseitige Beeinflussung mit Sicherheit auszuschliessen. Das Deformationsverhalten erforderte zudem ein eher nachgiebiges Auskleidungssystem.

Aufgrund der oben genannten Erfahrungen und Randbedingungen sowie der Neuüberprüfung der durch die Gasvorkommen im Erschliessungstollen entstandenen Situation wurde ein mechanischer Vortrieb mit einem Reisszahnbagger gewählt. Dieser arbeitete im Schutze eines hydraulisch vorgeschobenen Schildes. Im Bereich des Schildschwanzes versetzte ein Erector gelenkig verbundene Tübbing mit einer Ringbreite von 1,5 m. Ein Förderband transportierte das mit den zwei Reisszähnen gelöste Material aus dem Vortriebsbereich.

Beschreibungen und Abbildungen des «Big John» finden sich bei AESCHLIMANN et al. (1977) sowie MEYER et al. (1980).

b) Vortriebsleistungen

Aufgrund der Angaben des Maschinenherstellers rechnete die Unternehmung mit einem Vortrieb von 7 Ringen oder 10,5 m pro Arbeitstag. Es zeigte sich jedoch, dass diese Leistung ohne zusätzliche Massnahmen nicht erreicht werden konnten.

Der Reisszahnbagger «Big John» der MEMCO war nämlich insofern ein Prototyp, als noch keine gleiche oder ähnliche Maschine in einem Tunnel mit 12 m Durchmesser eingesetzt worden war. Entsprechend lang war die als Probetrieb zu wertende Anlaufphase, denn in den ersten 6 Monaten des Jahres 1974 wurden aufgrund des häufigen Maschinenstillstandes nur 50 m aufgeföhren (PFISTER 1976). Die aufgetretenen Maschinenschäden betrafen vor allem Brüche im hydraulischen System, Schilddeformationen, geplatze Schweissnähte, Förderbanddefekte und Ripperzahnbrüche. Aber auch nach der Anlaufphase konnten höhere Leistungen trotz der zwei vorhandenen freien Abbauföhren Brust und Pilotstollen erst mit Hilfe von Lockerungssprengungen erzielt werden. Ganz offensichtlich sind die Valanginienmergel in unverwittertem Zustand für diese Abbaumethode zu homogen und kompakt, d.h. weisen zu wenig kohäsionslose Trennföhren auf. Mit dem Lockerungssprengen und dank der mit der Zeit geringeren Störanföhligkeit der Maschine sowie der grösseren Erfahrung der Bedienungsmannschaft konnte die Leistung allmählich gesteigert werden. In der Seeröhre/Nord, d.h. in der zuletzt ausgebrochenen Tunnelröhre,

betrug schlussendlich die Vortriebsleistung im Wochenmittel relativ oft 13 bis 15 m/AT. Als höchste Tagesleistung wurden 13 Tübbingringe oder 19,5 m, als höchste Monatsleistung 215 Ringe oder 322,5 m erreicht. Als reine Vortriebsleistung (ohne Umsetzen der Maschine) sind dies Werte, die in diesem Gestein mit einem konventionellen Vortrieb nicht erreicht werden können.

Mit der Leistungssteigerung ging eine Zunahme des Sprengstoffverbrauchs einher, wobei von den Pilotstollen aus bis zu 14 Bohrlöcher pro Querschnitt gebohrt wurden. Die Dicke der Scheiben betrug rund 2 m.

4.8.4 Geologisch-geotechnische Faktoren und Vortriebsleistung

a) Überblick

In bezug auf den mechanischen Vortrieb mit dem «Big John» muss unterschieden werden zwischen dem

- Vorpresen des Schildes
- Lösen des Gesteins mit dem Reisszahnbagger.

Während der Schildvortrieb noch am ehesten von der Druckfestigkeit des Gesteins abhängig ist, spielt diese beim Abbau mit dem Reisszahnbagger nur eine untergeordnete Rolle. Der Aufwand für das Lösen des Gesteins ist nach den Angaben in der Literatur (z.B. DARCY, 1971) und den im Los Huttegg gemachten Erfahrungen von der Verbandsfestigkeit abhängig. Ein direkter Zusammenhang zwischen den Trennflächenanteilen und dem Vortrieb liess sich allerdings nicht finden, da zahlreiche technische Faktoren die Leistungen ebenfalls stark beeinflussten, wie:

- Schilddruck beim Vorschub
- Ausfälle durch Defekte
- Kleinere Unterbrüche während einer Schicht (verstopfte Förderbänder, Servicearbeiten, Auswechseln der Baggerzähne)
- Einbau von Spezialtübbing bei Querschlägen
- Richtungskorrekturen
- Intensität der Vorsprengungen
- Lage des Pilotstollens (zentrisch – exzentrisch)

Geologisch-geotechnische Einflussfaktoren sind im Falle des Loses Huttegg:

- Lithologie (Kalk/Mergel/Homogenität)
- Trennflächenanteile, Trennflächenlage
- allgemeine Lagerungsverhältnisse (gestörtes, zerruschetes, ungestörtes Gestein)
- Festigkeitseigenschaften (vorwiegend abhängig von der Lithologie).

Eine eindeutige Korrelation zwischen den geologischen Einflussgrössen und den Vortriebsleistungen ist bereits aufgrund dieser zahlreichen Parameter kaum möglich. Zudem begrenzen die Vorschubgeschwindigkeit des Schildes, die installierte Maschinenleistung und die Transportkapazität die Leistung gegen oben, d.h. die nicht lineare Regressionskurve hat die Form einer Sättigungskurve.

b) Beziehungen Geologie – Vortriebsleistungen

Nachdem der Tunnelvortrieb im Mittellos leistungsmässig auf Schwierigkeiten stiess, wurde im Sinne einer vorsorglichen Beweissicherung alle 10 bis 15 m (ca. Tunneldurchmesser) die geologische Situation an der Ortsbrust aufgenommen. Der Tunnelgeologe hielt insbesondere auch die geologischen Einflussfaktoren auf den Vortrieb fest: Räumlicher Trennflächenanteil, Lage der Trennflächen, Anteil an Mergelkalkschichten, allgemeine Lagerungsverhältnisse (gestörtes-ungestörtes Gebirge). Bei keinem einzigen dieser geologischen Faktoren liess sich eine eindeutige Korrelation mit den Vortriebsleistungen finden. Rein qualitativ konnten jedoch folgende Feststellungen und Einzelbeobachtungen gemacht werden:

Lithologie

In homogenen kompakten Mergeln zog der Reisszahn zum Teil lediglich Furchen, ohne das Gestein zu reissen, d.h. er überwand zwar die Gesteinsfestigkeit, löste aber sehr wenig Gestein.

Eindeutig erfassbar ist der lithologische Einfluss auch bei den Valanginienkalkvorkommen. Die Druckfestigkeit überschreitet in diesem Falle allerdings den Grenzwert von 600 kg/cm^2 bei weitem. Die Leistungen in der Valanginienkalkstrecke sanken jedoch vor allem aufgrund von durch Maschinenschäden verursachten Ausfallschichten und zahlreichen kurzen Unterbrüchen, denn die Vorschubdauer des Schildes blieb trotz der Gesteins Härte im üblichen Rahmen. Ursache der Unterbrüche waren u.a.: Hydraulikschäden infolge von Schlägen des nicht gedämpften Baggerarms, Abnutzung respektive häufiges Auswechseln der Reisszähne, Schilddeformationen, verstopfte Förderbänder.

Durchtrennung

In Bereichen mit allgemein stark gestörtem Fels war die Leistung teilweise deutlich höher. So wurde die grösste in der Bergrohre/Süd erreichte Leistung von 11 Ringen/AT in einer stark gestörten, durchnässten Zone mit einer grösseren, beide Tunnelröhren querenden Störung und einem hohen Anteil an zerruscheltem Gestein erreicht.

Druckfestigkeit

Zwischen der Druckfestigkeit in den Valanginienmergeln und den Vortriebsleistungen besteht keine Beziehung. So wurde ein Bohrquerschnitt zur Gewinnung von Proben für Druckfestigkeitsbestimmungen an einer Stelle festgelegt, an der der Vortrieb nur äusserst mühsam vor sich ging. Der Mittelwert der an diesen Proben bestimmten Druckfestigkeiten betrug 231 kg/cm^2 und lag somit deutlich unterhalb des Mittelwertes von 306 kg/cm^2 , der aus der ganzen Versuchsreihe ermittelt wurde.

c) Schlussfolgerungen

In den Vertragsverhandlungen nannte der Unternehmer eine Druckfestigkeit von 600 kg/cm^2 als obere Grenze für einen wirtschaftlichen Einsatz des Reisszahnbaggers «Big John». Abrechnungsbasis waren die Schichtserien (Valanginienmergel, Valanginienkalk).

Aus geologischer Sicht ist die Sachlage in bezug auf diese beiden Faktoren eindeutig. Die aus allen Versuchen ermittelte durchschnittliche Druckfestigkeit liegt mit $\delta c \perp S = 268 \text{ kg/cm}^2$ und $\delta c // S = 329 \text{ kg/cm}^2$ weit unterhalb von 600 kg/cm^2 . Aus einer statistisch kohärenten Versuchsserie ergaben sich für eine Wahrscheinlichkeit von 99,9% Mutungsgrenzen des Mittelwertes von 208 bis 404 kg/cm^2 .

Auch in lithostratigraphischer Hinsicht ist die Lage eindeutig. Effektiv mit dem Big John durchörtert wurden:

- 94% Valanginienmergel
- 6% Valanginienkalk

Die Erfahrungen beim Vortrieb haben gezeigt, dass dieser vor allem aufgrund der mangelnden Durchtrennung des Gebirges auf Schwierigkeiten stiess. Erfolgreich gerippt werden konnte erst, nachdem Lockerungssprengungen die Durchtrennung künstlich erzeugten.

Offensichtlich führte die an der Oberfläche sichtbare Ausbildung der Valanginienmergel zu einer falschen Beurteilung der Verhältnisse. Die Valanginienmergel sind im Bereich der oberflächlichen Verwitterung immer blättrig bis plattig ausgebildet. Im unverwitterten Zustand im Tunnel waren sie dagegen häufig homogen und kompakt, d.h. die im Gefüge vorhandenen Schieferungsflächen besitzen eine echte Kohäsion. Der einzige im Tunnel vorhandene Trennflächentyp von Bedeutung, der eine niedrige Scherfestigkeit aufweist, sind Ruschelzonen.

Die Erfahrungen haben gezeigt, dass allein mit der Druckfestigkeit und der lithologischen Umschreibung der Schichtserien die geologisch-geotechnischen Randbedingungen für einen mechanischen Abbau mit einem Reisszahnbagger nur ungenügend erfasst sind.

Unverständlich ist in diesem Zusammenhang, dass die MEMCO den «Big John» projektierte und baute, ohne irgendwelche Versuche am abzubauenen Gestein durchzuführen. Dies obwohl im Erschliessungstollen und in der Versuchskammer vor Baubeginn entsprechende Aufschlüsse zur Verfügung gestanden hätten.

Als relativ günstig für den Vortrieb mit dem eingesetzten Ausbruchgerät können aufgrund der gemachten Erfahrungen Bereiche mit stark gestörtem, von mehreren Ruschelzonen durchsetztem Fels betrachtet werden. Eine anhand der Pilotstollenaufnahmen vorgenommene Schätzung, in der alle Zonen mit gestörter Lagerung oder mit Abständen der Ruschelzonen von 1 bis 3 m als günstig ausgeschieden wurden, ergab für den Valanginienmergel 50,7% mit gestörtem, für den Abbau mit dem «Big John» günstigem Fels; 49,3% mit wenig gestörtem, für den Abbau mit dem «Big John» ungünstigem Fels.

Dazu kommen noch total 226 m Tunnelausbruch im Valanginienkalk, die sich auf den Vortrieb erschwerend auswirkten.

Auf die effektiv mit dem «Big John» aufgefahrenen Tunnelstrecken umgerechnet, d.h. nach Abzug der konventionell ausgebrochenen Valanginienmergelstrecken (Zentralen + Startröhren) sind:

günstig 1876,4 m (47,8%)
 ungünstig 2050,6 m (52,2%)

Als positiv ist abschliessend zu vermerken, dass dank dem Schildvortrieb unfallfrei gearbeitet werden konnte und sich keine Niederbrüche in dem an sich gebrächen Fels ereignen konnten. Von der reinen Vortriebsleistung her (ohne Berücksichtigung des Zeitverlustes beim Umsetzen der Maschine und der Kosten) ist als weiterer positiver Aspekt anzuführen, dass gegen Ende des Vortriebes höhere Leistungen erzielt wurden, als dies bei einem konventionellen Vortrieb je möglich gewesen wäre.

4.9 Vergleich Prognose – Befund der Ausbruchsklassen

Wie aus der nachstehenden Tabelle 16 hervorgeht, bestehen grosse Unterschiede in den Ausbruchsklassenverteilungen zwischen dem Los Rütönen und dem Los Büel.

Tabelle 16: Vergleich der Ausbruchsklassenverteilung Los Rütönen – Los Büel

Ausbruchsklasse	Los Rütönen		Los Büel	
	Länge (m)	Anteil (%)	Länge (m)	Anteil (%)
I	1427	16,7	2589	44,6
II	662	7,8	1878	32,3
III	6301,6	73,9	703	12,1
IV	103	1,2	56	1,0
V	36,2	0,4	583	10,0
	8529,8	100,0	5809	100,0

(beide Tunnelröhren zusammengenommen)

Im Los Rütönen fallen beinahe $\frac{3}{4}$ der Tunnelstrecke in die Ausbruchsklasse III, im Los Büel ein gleich grosser Anteil in die Ausbruchsklassen I + II. Der Hauptgrund für diese Unterschiede ist nicht geologisch bedingt, sondern beruht auf der Tatsache, dass ein Gunitauftrag innerhalb des

Vortriebsbereiches im Los Rütönen als Klasse III, im Los Büel dagegen als Ausbruchsklasse I abgerechnet wurde. Dies – wie erwähnt (Seite 51) – aufgrund einer aus installationstechnischen Gründen getroffenen Vereinbarung zwischen Bauherr und Unternehmung.

Daneben bestehen zwischen den beiden Losen aber auch geologische Unterschiede, die sich geotechnisch ebenfalls auswirkten. Seewerkalk, Kieselkalk und Valanginienkalk sind in der Drusberg-Decke (Los Rütönen) bei mittlerem bis geringem Schichtfallen dünn gebankt und weisen tonige Schichtfugen auf. Die Möglichkeit der Ablösung von Schichtpaketen im Firstbereich war somit gegeben. Die Strecken in diesen nachbrüchigen Gesteinen mussten im Vortriebsbereich mit Ankern, Netzen und Spritzbeton gesichert werden (Ausbruchsklasse III). In der Axen-Decke (Los Büel) fehlen die Seewerkalke im Tunnelbereich. Der Kieselkalk und der Valanginienkalk sind weitgehend massig ausgebildet und daher standfester als die entsprechenden Schichtserien im Los Rütönen. Dünnebankte Abschnitte im Valanginienkalk stehen im Los Büel vertikal und streichen rechtwinklig zum Tunnel, nehmen also eine günstige Schichtlage ein. Eine Sicherung mit Gunit sowie eine lokale Ankerung genühten als Ausbruchssicherung (Ausbruchsklassen I und II).

Gleichartige Tendenzen sind in beiden konventionell ausgebrochenen Losen in verschiedener Hinsicht deutlich zu erkennen:

- Ein einmal eingespielter Rhythmus: Bohren – Sprengen – Schüttern / Säubern – Sichern nach einem bestimmten Verfahren (z.B. mit Spritzbeton) wird möglichst lange beibehalten.
- Im Vollausbuch wird ein Stahleinbau (Klasse IV) wenn möglich vermieden.
- Einbau erforderten die Portalzonen mit oberflächlich aufgelockertem Fels. In beiden Losen wurde zudem mit einem 2phasigen Ausbruch begonnen (Ausbruchsklasse V).

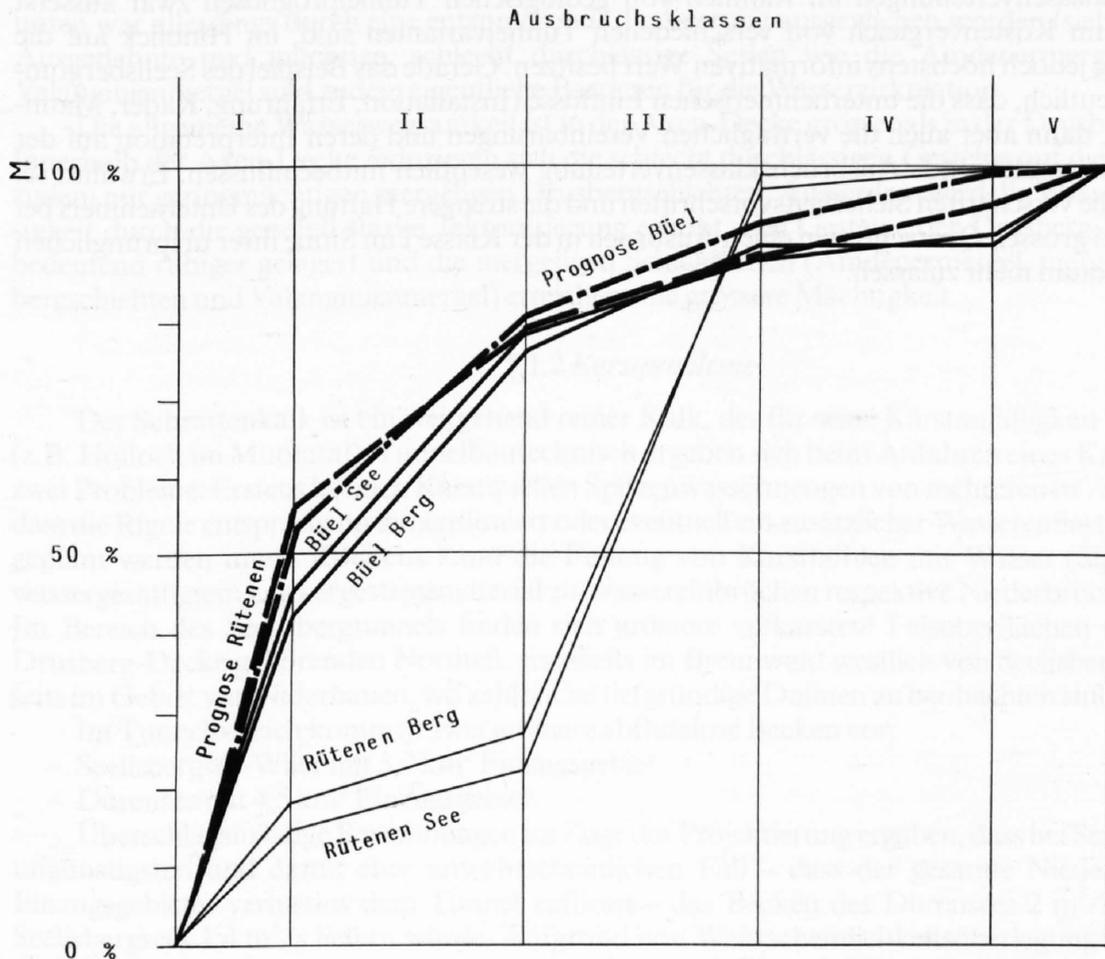


Fig. 22: Vergleich der Ausbruchsklassenverteilungen (Prognose – Befund) in den konventionell ausgebrochenen Baulosen Rütönen und Büel (Summenkurve).

Ursprünglich war damit gerechnet worden, dass geotechnisch schwierige Strecken (Amdenermergel, Valanginienmergel) grösstenteils eingebaut werden müssen. Dies aufgrund der Erfahrungen beim Kraftwerkbau und in Eisenbahntunnels. Es zeigte sich jedoch beim Vortrieb des Seelisbergtunnels, dass das Stellen von Stahlrahmen in einem Strassentunnel mit einem wesentlich grösseren Querschnitt von 88 bis 125 m² ohne spezielle Installationen mühsam und vor allem sehr zeitraubend und damit für den Unternehmer kostspielig, d.h. nicht interessant ist. Zudem konnte die Erfahrung gemacht werden, dass eine Sicherung mit Ankern, Netzen und Spritzbeton einen Stahleinbau in den meisten Fällen zu ersetzen vermag. Insbesondere gilt dies für trockene Mergel wie die Amdenermergel im Los Rütönen und die Valanginienmergel im Los Büel.

Aufgrund der obigen Ausführungen erklärt sich die beträchtliche Abweichung des Befundes von der Prognose im Los Rütönen, wie sie aus der Summenkurve in Fig. 22 ersichtlich ist. In diesem Los fand eine allgemeine Verschiebung in Richtung der Ausbruchsklasse III statt, und zwar sowohl von den Klassen I und II wie auch von der Klasse IV her. Insgesamt wurden in der Bergröhre 71% und in der Seeröhre 77% in der Klasse III abgerechnet. Beim Los Büel stimmen Prognose und Befund weitgehend überein. Eine Verschiebung fand hier vor allem von der Klasse IV zur Klasse V statt, einerseits aufgrund der in der Prognose nicht vorgesehenen Valanginienmergelstrecke, andererseits wurden die Einbaustrecken in der oberflächennahen Portalzone im Teilausbruch aufgeföhren. Wie erwähnt sind die Differenzen zwischen Los Büel und Los Rütönen weniger gross, wenn die effektiv ausgeführten Arbeiten miteinander verglichen werden.

Die Gegenüberstellung von Prognose und Befund einerseits und der Unterschied zwischen den beiden Baulosen Rütönen und Büel andererseits lassen deutlich erkennen, dass die geschätzten Ausbruchsklassenverteilungen im Rahmen von geologischen Tunnelprognosen zwar äusserst nützlich beim Kostenvergleich von verschiedenen Tunnelvarianten sind, im Hinblick auf die Ausführung jedoch höchstens informativen Wert besitzen. Gerade das Beispiel des Seelisbergtunnels zeigt deutlich, dass die unternehmerischen Einflüsse (Installation, Erfahrung, Kader, Mannschaft etc.), dann aber auch die vertraglichen Vereinbarungen und deren Interpretation auf der Baustelle die resultierende Ausbruchsklassenverteilung wesentlich mitbeeinflussen. Erwöhnt sei auch, dass die verschärften Sicherheitsvorschriften und die strengere Haftung des Unternehmers bei Unfällen bei grossen Querschnitten einen Ausbruch in der Klasse I im Sinne ihrer ursprünglichen Definition kaum mehr zulassen.

5. Bergwasser

5.1 Hydrogeologische Übersicht

5.1.1 Gebirgsdurchlässigkeit

Die Gesteine im Bereich des Seelisbergtunnels können in hydrogeologischer Hinsicht zweigeteilt werden in:

- auf Klüften mittel- bis gut durchlässige Kalke und Sandsteine
- schlecht durchlässige Serien aus Schiefen und Mergeln.

Dazu kommen noch die Altdorfer Sandsteine und die Seewerkalke, die aufgrund der Wechsellagerung von durchlässigen Schichten mit schlecht durchlässigen Tonschieferschichten hinsichtlich der Durchlässigkeit anisotrop sind.

Die grossräumige Wechsellagerung von gut durchlässigen mit schlecht durchlässigen Schichtserien unterbindet mehrmals die Wasserzirkulation quer zur Schichtung, so dass die Gebirgsdurchlässigkeit anisotrop wird. Die Wegsamkeit des Wassers ist in Richtung der Faltenachsen am grössten, quer zur Schichtung am kleinsten. Die Grenzflächen zwischen durchlässigen Kalken oben und undurchlässigen Schiefen oder Mergeln unten sind Stauhohizonte, die sich an der Oberfläche durch Quellhorizonte bemerkbar machen; im Tunnel einen erhöhten Wasseranfall zur Folge haben können. Dem wichtigsten Stauhohizont respektive potentiellen Aquifer, der muldenförmig verlaufenden Grenzflächen zwischen Valanginienkalken (oben) und Valanginienmergeln unten war allerdings durch eine entsprechende Trassierung ausgewichen worden (siehe Seite 10). Ausgedehnte und mächtige, schlecht durchlässige Serien wie die Amdenermergel und die Valanginienmergel sind zudem eigentliche Barrieren für die Wasserzirkulation.

Die allgemeine Wasserwegsamkeit ist in der Axen-Decke grösser als in der Drusberg-Decke. Innerhalb der Axen-Decke reduzieren sich die schlecht durchlässigen Gesteine auf die im Tunnel zudem nur geringmächtigen mergeligen Drusbergschichten. Ausserdem wird die Wasserdurchlässigkeit durch die generell starke Tektonisierung erhöht. Die Gesteine der Drusberg-Decke sind bedeutend ruhiger gelagert und die mergeligen Schichtserien (Amdenermergel, mergelige Drusbergschichten und Valanginienmergel) erreichen eine grössere Mächtigkeit.

5.1.2 Karstprobleme

Der Schrattenkalk ist ein weitgehend reiner Kalk, der für seine Karstanfälligkeit bekannt ist (z.B. Hölloch im Muotatal). Tunnelbautechnisch ergeben sich beim Anfahren eines Karstsystems zwei Probleme: Erstens können Karstquellen Spitzenwassermengen von mehreren m^3/s führen, so dass die Rigole entsprechend dimensioniert oder eventuell ein zusätzlicher Wasserentlastungsstollen geplant werden muss. Zweitens kann die Füllung von Karsthöhlen mit Wasser (Siphon) oder wassergesättigtem Lockergesteinsmaterial zu Wassereinbrüchen respektive Niederbrüchen führen. Im Bereich des Seelisbergtunnels finden sich grössere verkarstete Felsoberflächen nur im zur Drusberg-Decke gehörenden Nordteil, einerseits im Brennwald westlich von Seelisberg, andererseits im Gebiet von Niderbauen, wo zahlreiche tiefgründige Dolinen zu beobachten sind (Fig. 23).

Im Tunnelbereich kommen zwei grössere abflusslose Becken vor:

- Seelisbergsee-Wijer mit $3,2 \text{ km}^2$ Einzugsgebiet
- Dürensee mit $4,5 \text{ km}^2$ Einzugsgebiet.

Überschlagsmässige Berechnungen im Zuge der Projektierung ergaben, dass bei Starkregen im ungünstigsten und damit eher unwahrscheinlichen Fall – dass der gesamte Niederschlag des Einzugsgebietes verlustlos dem Tunnel zufliesst – das Becken des Dürensees $2 \text{ m}^3/\text{s}$, jenes des Seelisbergsees $1,4 \text{ m}^3/\text{s}$ liefern würde. Aufgrund von Wahrscheinlichkeitsüberlegungen wurde in der Folge die Rigole des Loses Rüteneu auf $1 \text{ m}^3/\text{s}$ dimensioniert.

Die Entwässerung der Karstsysteme war teilweise bekannt.

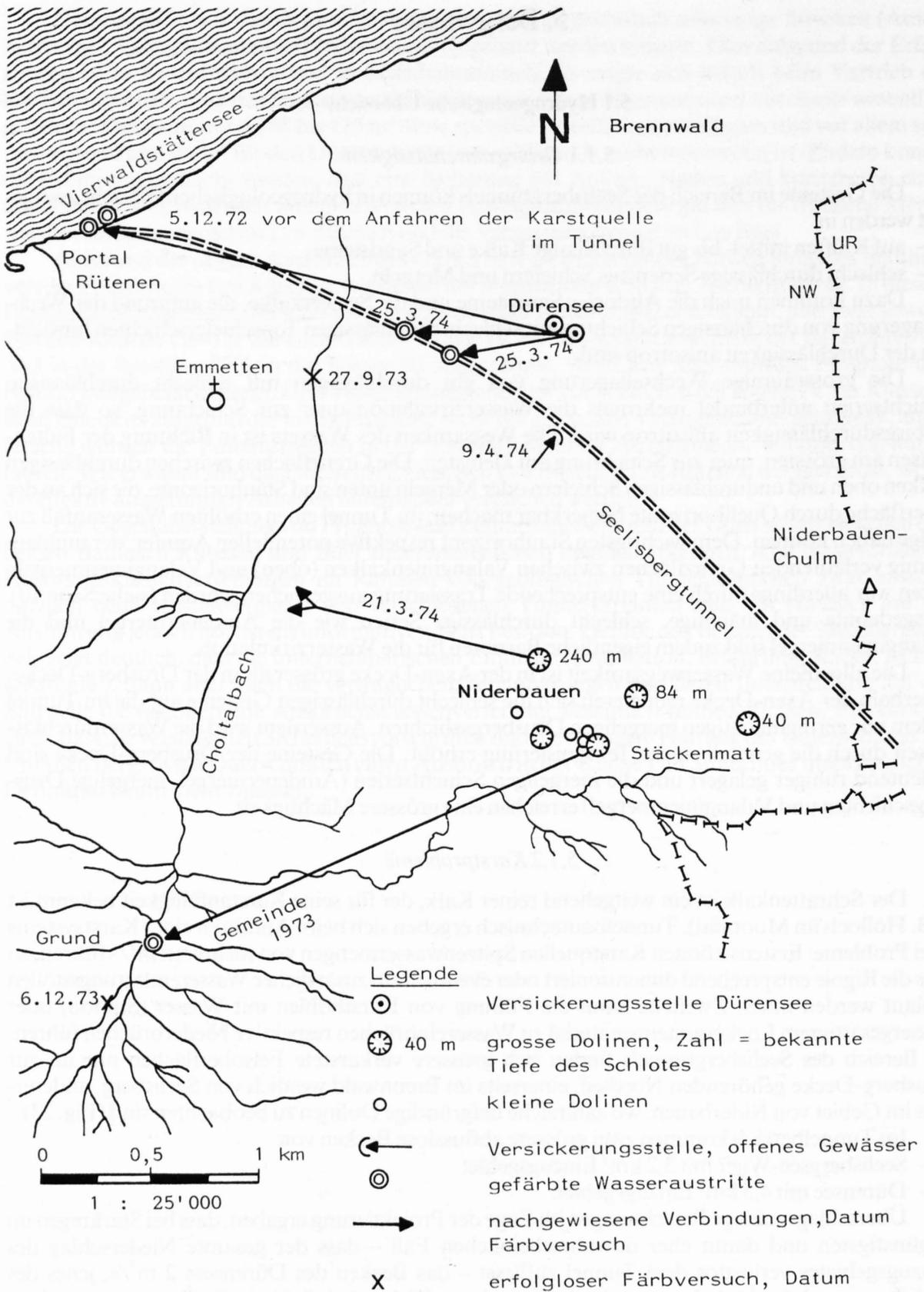


Fig. 23: Resultate der Färbversuche im Gebiet des Niderbauens und des Dürensees.

Im Falle des *Seelisbergsees* ergab ein von COLLET (1916) durchgeführter Färbversuch, dass das versickernde Wasser direkt dem Urnersee zufliesst. Das Wasser tritt beim Hundszingel in Ufernähe unweit der Grenze Schrattenkalk/Drusbergsschichten unter der Seeoberfläche aus. Tektonisch entspricht diese Stelle der Muldenumbiegung zwischen der Seelisbergfalte und der Niederbauenfalte.

Die übrigen im Bereich des Seelisbergtunnels vorkommenden Karstsysteme werden nach den bisherigen Färbversuchen westwärts entwässert, wie die Fig. 23 zeigt.

Der *Dürensee* führt nur periodisch Wasser und wird nach ergiebigen Niederschlägen sowie zur Zeit der Schneeschmelze 2 bis 3 m tief. Das Wasser ergiesst sich auf der Nordseite in einen mit einem Gitter verschlossenen Spalt im Schrattenkalk. Zwei weitere kleinere Versickerungsstellen befinden sich etwa 50 m westlich dieser Stelle. Gespiesen wird der Dürensee durch Grundwasseraufstösse und Hangquellen, die sich nördlich der Kantonsstrasse befinden, sowie durch 2 periodisch wasserführende Rinnen.

Ein Färbversuch im Zusammenhang mit dem Wasserandrang im Schacht Hattig führte zum erstaunlichen Resultat, dass das Wasser des Dürensees quer durch die Choltalverwerfung nach Westen fliesst und bei Rütönen an 2 Stellen in den See austritt.

Das im *Karstgebiet des Niederbauen* versickernde Wasser strömt ebenfalls nach Westen. Dies geht aus Färbversuchen der Gemeinde Emmetten und aus eigenen Färbversuchen im Zusammenhang mit dem Wassereinbruch im Tunnel hervor (Fig. 23).

Da die Weglänge aufgrund der Komplexität der Karstsysteme unbekannt ist, kann die effektive Fliessgeschwindigkeit nicht berechnet werden. Aus Distanz und Zeitdifferenz zwischen Färbung und Farbaustritt ergeben sich folgende Abstandsgeschwindigkeiten:

- Färbversuch Dürensee-Rütönen vom 5.12.72	85 m/h
- Färbversuch Dürensee-Tunnel vom 25.3.74	168 m/h
- Färbversuch Stäckenmatt-Grund 1973	346 m/h

5.2 Wasseranfall im Tunnel

Die Bergwasserführung in Form von Quellen, Tropf und Nässe wurde im Zuge der geologischen Tunnelaufnahmen im Detail (Massstab 1:2000) aufgezeichnet. Im vorliegenden Bericht ist sie in den Anhängen 5 und 6 zusammengefasst.

Die nach Abschluss der Bauarbeiten festgestellte Wasserführung der drei Tunnellose ist stark von den Niederschlägen abhängig. Sie erreicht während der Schneeschmelze ihr Maximum. Die Bauleitungen schätzten die Gesamtmengen auf:

Los Rütönen	50 – 1000 l/s
Los Huttegg	1 – 4 l/s (aus Abluftbauwerk)
Los Büel	5 – 10 l/s

Die maximale Wasserführung im Los Rütönen wird in ihrer Grössenordnung ausschliesslich durch ein mit dem Tunnel angefahrenes Karstsystem bestimmt.

5.2.1 Karsterscheinungen im Los Rütönen und Schacht Hattig

a) Los Rütönen

Beim Vortriebsstande von km 121.738 der Bergröhre wurde vom nächsten Abschlag am 22.9.73 ein wasserführendes Karstloch von 30 cm Ø freigelegt, aus dem unmittelbar nach der Öffnung schätzungsweise 1 bis 2 m³/s Wasser schossen und die Tunnelsohle bis einige hundert Meter hinter dem Vortrieb überfluteten. Das Wasser spülte bis 15 cm grosse Gesteinsbrocken in den Tunnel (vorwiegend Schrattenkalk, reichlich Grünsandsteine sowie vereinzelt Kristallin). Die Existenz eines Karstsystems wurde bereits eine Woche früher durch eine Gasvorbohrung angedeutet sowie unmittelbar vor dem Abschlag anhand der Wasserführung der Sprengbohrlöcher festgestellt. In beiden Fällen trat Wasser mit grossem Druck aus.

Das Karstwasser wurde in einer Nische im rechten Parament bei km 121.732 gefasst. Die Ergiebigkeit der Karstquelle schwankte stark. Normalerweise führte sie weniger als 100 l/s, doch konnte die Ergussmenge bei Starkregen innerhalb eines Tages auf 800 l/s anschwellen.

Der weitere Vortrieb legte die Fortsetzung des trocken gelegten Karstsystems frei. Es schneidet den Tunnel, einer steilstehenden E-W streichenden Kluft folgend, unter einem Winkel von 25° und verlässt das linke Parament der Seeröhre bei km 121.856. Die dortige Karstquelle brachte nach dem Anfahren 2 bis 3 l/s. Nach dem Ausbrechen der Rigole floss dagegen die gesamte Niedrigwasserführung des Karstsystems an dieser Stelle aus. Völlig überraschend begann anfangs September 1976, d.h. nach rund 3 Jahren, Wasser aus dem seeseitigen Parament der fertig betonierten Berg-röhre zu fliessen, so dass schliesslich eine Nische zur Wasserfassung aus dem Betongewölbe gebrochen werden musste. Die Faktoren, die nachträglich zu dieser Änderung des Karstwasserregimes führten, sind unbekannt (innere Erosion, Verstopfung?).

Eine weitere bei km 121.940 angefahrne Karstquelle wanderte mit dem Vortrieb und stiess schliesslich bei km 122.007 aus der Sohle auf. Sie sprach auf den Färbversuch Dürensee ebenfalls schwach positiv an und gehört somit zum gleichen Karstsystem.

Herkunft des Karstwassers

Ein erneuter Färbversuch mit Fluoreszin brachte den Nachweis, dass das angefahrne Karstsystem mit jenem des Dürensees zusammenhängt. Im Tunnel färbte sich das Wasser rund 5 Stunden nach dem Einspeisen. Die Wassermenge im Tunnel war jedoch rund viermal grösser als die Abflussmenge des Dürensees. Wo das restliche Einzugsgebiet liegt, konnte bis heute nicht eruiert werden. Aufgrund der hydrogeologischen Situation kommt am ehesten das abflusslose verkarstete Gebiet Brennwald-Radelfing in Frage.

b) Schacht Hattig

Im Schacht Hattig wurde ein inaktives Karstsystem angefahren. Beim Stand von -186,5 m trat eine als «Mondmilch» identifizierte sandig-gallertige Masse aus den Bohrlöchern. In dieser Masse wurden röntgenographisch neben grossen Mengen von Kalzit das Magnesiumhydrosilikat Palygorskit sowie geringe Mengen von Quarz nachgewiesen. Die Karsthohlräume reichten bis Sm 190, ohne dass fliessendes Karstwasser angetroffen wurde.

5.2.2 Übrige Bergwasserführung

Die allgemeine Bergwasserführung in Form von Nässe, Tropf und kleinen Quellen ist aus dem Anhang 6 ersichtlich. Folgendes sei speziell hervorgehoben:

- Beim Tunnelvortrieb erwiesen sich die Amdenermergel als absolut trocken. In den Valanginienmergeln war die Wasserführung vernachlässigbar klein.
- Die durch diese Mergelvorkommen gegen oben abgeschirmten Kalke, d.h. die Zonen nördlich der Amdenermergel sowie beidseits der Valanginienmergel, zeichnen sich durch eine spärliche Wasserführung aus.
- Im Schacht Hattig erfolgte der Hauptzufluss von bis zu 16 l/s an der Grenze zwischen dem Lockergestein und dem aus undurchlässigen Amdenermergeln bestehenden Fels.
- Im Axen-Nordlappen wurde dreimal ein Aquifer angefahren, was zur Folge hatte, dass während des Vortriebs bis zu 15 l/s aus der Ortsbrust flossen. Nach dem Absinken des Kluftwasserspiegels auf das Tunnelniveau strömte das Wasser von Westen (Bergseite) an. Nach Starkregen dauerte es 1 bis 3 Tage, bis sich der grösste Zufluss im Tunnel einstellte.
- Im Los Büel waren in der Berg-röhre und innerhalb dieser bergseits mehr Wassereintritte zu verzeichnen als in der Seeröhre.
- Eine erhöhte Wasserführung infolge besserer Wasserwegsamkeit konnte in der Drusberg-Decke bei der Choltalverwerfung sowie längs der Überschiebung der Axen-Decke festgestellt werden.

5.3 Einfluss des Tunnels auf Oberflächenquellen

Der Tunnelbau tangierte lediglich zwei der insgesamt 224 vorsorglich in einem Kataster erfassten und beobachteten Quellen.

Die *Quelle Nr. 509 von Bärchi* (Gemeinde Isenthal) wurde durch den Tunnelvortrieb im Axen-Nordlappen möglicherweise bezüglich eines Teils ihrer Ergiebigkeit geschädigt. Der auf maximal 400 bis 500 l/Tag veranschlagte Verlust konnte durch die Neufassung einer benachbarten, tiefer gelegenen Quelle und durch Hinaufpumpen des Wassers ins bestehende Reservoir vollumfänglich gedeckt werden.

Die *Quelle Nr. 308 von Huttegg* (Gemeinde Bauen) wurde während des Ausbruchs des Abluftbauwerkes Huttegg zeitweise verschmutzt. Das Quellwasser fliesst in der Windenkammer aus einer Ruschelzone und konnte dort ohne Beeinträchtigung der Ergiebigkeit neu gefasst und dem Reservoir von Huttegg zugeleitet werden.

Die angesichts der hohen Durchlässigkeit der Kalke geringe Zahl vom Tunnelbau beeinflusster Quellen lässt sich nach Abschluss des Baus durch folgende Umstände erklären:

- Der Bereich der abflusslosen geschlossenen Becken von Dürensee und Seelisbergseeli-Wijer wurde bereits vor dem Tunnelbau unterirdisch entwässert.
- Der Tunnel nimmt grossräumig betrachtet eine Hanglage ein. In den Kalkgebieten versickert der grösste Teil des Wassers, ohne in Form von Quellen zutage zu treten. Der Urnersee respektive der Vierwaldstättersee als Vorfluter für dieses Bergwasser liegt rund 60 bis 70 m tiefer als der Seelisbergtunnel.

Durch den Tunnelbau wurden somit allenfalls die unterirdischen Wasserwege in der Tiefe verändert, ohne dass sich dadurch Veränderungen im Quellenregime an der Oberfläche einstellten.

5.4 Chemismus des Bergwassers

Die Ergebnisse der zahlreichen Analysen sind im Anhang 6 graphisch dargestellt.

Gesamthaft betrachtet fallen an den Bergwasseranalysen des Seelisbergtunnels folgende drei Sachverhalte auf:

- Die sulfid- und ammoniakführenden Quellen des Loses Rütene, die durchwegs im Innern des Gebirges vorgefunden wurden und somit nicht durch oberflächliche Verunreinigungen beeinflusst sein können. Beide Verbindungen können mikrobakteriell entstehen, sei es aus organischen Substanzen oder im Falle des Schwefels aus der Zersetzung von Pyrit. Interessant ist, dass eine der sulfidführenden Quellen (Rigole Seeröhre km 123.718 im Schrattenkalk) Erdgas mit Methan und höheren Kohlenwasserstoffen führt, was einen Zusammenhang mit organischer Substanz im Gestein nahelegt.
- Das für kalkige Serien oft erstaunlich weiche Wasser, das allerdings aufgrund der relativ hohen Alkalität und des meist hohen Gehaltes an Natriumbikarbonat nur wenig kalklösend ist.
- Der ausserordentliche Chemismus des Bergwassers aus den Valanginienmergeln mit hohen Lösungsgehalten an Chlorid (bis 20 100 mg/l!), Ammoniak und Schwefelwasserstoff, die am ehesten mit dem Vorhandensein eines fossilen Porenwassers erklärt werden können.

Das Bergwasser mehrerer Austritte der Baulose Rütene und Huttegg wirkt infolge des Sulfidgehaltes betonaggressiv. Sulfatresistente Zementsorten sind in diesem Falle wirkungslos. Weitaus seltener ist Bergwasser, das aufgrund eines zu hohen Chloridgehaltes Stahl angreifen kann.

Im Los Rütene werden die sulfidhaltigen Austritte durch das übrige Bergwasser stark verdünnt, und im Los Huttegg fällt das Bergwasser mengenmässig nicht ins Gewicht, so dass in beiden Fällen keine zusätzlichen Massnahmen getroffen wurden.

5.5 Wasser- und Felstemperaturen

Die maximale Überlagerung beträgt im Falle des Seelisbergtunnels etwas mehr als 1300 m. Allein aufgrund dieser Überlagerung würde die Felstemperatur bei der im Gotthardbahntunnel

gemessenen geothermischen Tiefenstufe von 47 m/°C auf rund 28° ansteigen. Im Hinblick auf das starke Relief und den tunnelnahen steilen Abfall des Gebirges gegen den Urnersee sowie der tiefen mittleren Oberflächen-Temperatur im See selbst (4°C im tieferen Seebereich!) waren jedoch zum vornherein keine so hohen Felstemperaturen zu erwarten. Auf Felstemperaturmessungen während des Baus wurde aufgrund dieser Beurteilung verzichtet und von Massnahmen für eine Klimatisierung der Vortriebe abgesehen.

Im Los Rütönen konnte bei drei grösseren Quellengruppen die Wassertemperatur bestimmt werden. Diese entspricht bei langsam fliessendem Wasser normalerweise $\pm 1^\circ\text{C}$ der Felstemperatur. Die entsprechenden Temperaturbereiche hängen von der Überlagerung wie folgt ab (Tabelle 17):

Tabelle 17: *Wassertemperatur, Überlagerung und Tiefenstufe*

Strecke (km)	Wassertemperatur Streubereich °C	Überlagerung (m)	mittlere Jahrestemperatur Oberfläche (°C)	Tiefenstufe vertikal m/°C	Tiefenstufe senkrecht zur Oberfläche m/°C
121.500 – 122.200	8,2 – 12,0	ca. 250	7,8	150	156
122.600 – 122.700	15,2 – 16,4	400 – 450	6,9	47	45
123.500 – 123.720	18,2 – 20,4	900 – 1200	3,5	71	66

Die Temperatur der raschfliessenden Karstquelle bei km 121.732 der Berggröhre schwankt bei einer Überlagerung von 230 m zwischen 7,2 und 8,2°C.

Aus den vorliegenden Daten über die Bergwassertemperatur darf der Schluss gezogen werden, dass die Felstemperatur auch im Bereich der grössten Überlagerung den Wert 20°C nicht wesentlich überschritt. Die für das Los Rütönen berechneten, sehr stark schwankenden Tiefenstufen zeigen ferner, dass der Ausgleich der Isothermen erst auf einem weit unterhalb des Tunnels liegenden Niveau erfolgt.

6. Erdgas

Erdgas ist ein Gemisch aus gasförmigen, brennbaren Kohlenwasserstoffverbindungen und besteht meist zu mehr als 80 Prozent aus Methan (CH_4). Steigt seine Konzentration in der Tunnelluft auf mehr als 5% (– untere Explosionsgrenze = UEG) an, so entsteht ein explosives Gemisch (Schlagendes Wetter). Die obere Explosionsgrenze liegt bei ca. 15%. Enthält das Gemisch neben Methan noch höhere Kohlenwasserstoffe, so erweitern sich die Explosionsgrenzen sowohl gegen oben wie gegen unten.

Über die Gasvorkommen im Seelisbergtunnel sind bereits mehrere Publikationen erschienen, und zwar über das erste Auftreten im Los Huttegg (PFISTER, 1972, SCHNEIDER, 1974), über die allgemeinen geologischen Aspekte und den Befund kurz vor dem Durchschlag (SCHNEIDER, 1976), über die getroffenen Sicherheitsmassnahmen (AMBERG, 1976) sowie über die Situation bei der Eröffnung (KELLER, 1980).

6.1 Allgemeine Gassituation

6.1.1 Kenntnisse vor dem Bau

Erdgas war aufgrund von Erfahrungen beim Bau benachbarter Untertagebauten vor allem in den tertiären Schichten zu erwarten:

- Beim Vortrieb des Druckstollens des KW Bürglen II ereignete sich ein schlagendes Wetter in Gesteinen der Altdorfer Sandstein-Gruppe.
- Im Stutzeck-Axenbergtunnel der SBB wurde bei 172,5 m ab Südportal Erdgas festgestellt. Der Vortrieb befand sich zu diesem Zeitpunkt in den Wildflysch-Schiefern an der Basis der Axen-Decke.

Beide Gasvorkommen befanden sich somit in tertiären Gesteinen.

6.1.2 Erstes Gasvorkommen im Erschliessungstollen

Beim vorzeitigen Auffahren des Erschliessungstollens 70 in den Valanginienmergeln des Loses Huttegg beobachtete die Bauleitung zwischen Tm 428 und 430 erstmals Gasaustritte in Form von Perlstellen in Wasserlachen. Mit einem Explosimeter durchgeführte Messungen ergaben keine messbaren Konzentrationen. Durch Anzünden wurde festgestellt, dass es sich bei dem austretenden Gas um Erdgas handelte! Am 18. Februar 1971 trat bei ca. Tm 650 erneut Gas aus. Kurz vor dem Abschluss der Vortriebsarbeiten flammte bei einer pyrotechnischen Zündung die Stollenbrust ab.

Die anschliessend durchgeführten Untersuchungen ergaben folgende Lage bezüglich der Gasführung im Erschliessungstollen:

- In der Nische bei Tm 204 tritt neben dem bereits vorgängig festgestellten Schwefelwasserstoff auch Methan in geringen Mengen aus.
- Von Tm 204 bis Tm 621 ist die Gasführung des Gebirges schwach.
- In der von Tm 621 bis zum Stollenende (Tm 674) folgenden Strecke tritt am meisten Methan aus. Die austretende Gasmenge ist im gesamten als klein zu betrachten, immerhin liefert ein von einer Bohrung erfasster Bläser ziemlich konstant 2 bis 3 l/s. In nicht belüfteten Teilen des hinteren Stollenbereichs wurde die untere Explosionsgrenze überschritten.
- Am Ende des Erschliessungstollens wurden von der sogenannten *Gasabsaugnische* aus mehrere *Sondierbohrungen* in Richtung Zentrale vorgetrieben, die stark unterschiedliche Gasführungen aufwiesen. Während des Bohrens blieb die Konzentration an Methan $<1\%$. Nach 24 Stunden wurden Werte bis zu 80% festgestellt. Während in den meisten Bohrungen kein Druck entstand, baute sich in einem Bohrloch ein Maximaldruck von 3,8 atü auf. Die

gesamte Gasmenge war beträchtlich, denn an der installierten Gasabsaugleitung konnten bis zu 13 m³/h gemessen werden.

- Die durchgeführten *erdölgeologischen Untersuchungen* (Extraktionsversuche an Gesteinsproben) erbrachten den Nachweis, dass die Valanginienmergel als Muttergestein von Öl und Gas zu bewerten sind.

6.1.3 *Neubeurteilung der Gaslage*

Aufgrund des eher überraschenden Gasvorkommens im Erschliessungsstollen Huttegg mit einem anhaltenden und relativ ergiebigen Bläser wurde eine spezielle Gassicherheitskommission ins Leben gerufen. In deren Rahmen wurde das Gasproblem aus geologischer Sicht neu überprüft. Der anhaltende Bläser liess vermuten, dass aus tieferen Schichten Gas aufsteigt. Als im Untergrund vorhandene Gaslieferanten kommen aufgrund zahlreicher Beobachtungen in benachbarten Alpenrandseen (Lauerzersee, Vierwaldstättersee bei Vitznau und Alpnachersee) vor allem die mehrere 1000 m mächtigen tertiären Schichtfolgen der Molasse und des Flysches in Frage. Entsprechende tertiäre Serien sind im gesamten Bereich des Seelisbergtunnels unterhalb der überschobenen helvetischen Decken vorhanden. Bei der Anwesenheit geeigneter Strukturen war somit für den gesamten Tunnelbereich die Möglichkeit gegeben, dass sich im Laufe der Zeit aufsteigendes Gas in sogenannten Gasfallen sammelte.

Anlässlich der Neubeurteilung der Gasführung des Gebirges wurden die Gesteine klassiert in:

- *Gasmuttergesteine*, in denen vorwiegend flächenhafte Ausgasungen zu erwarten sind: aufgrund ihres Gehaltes an organischer Substanz alle dunklen, mergeligen Serien der Kreide (Amdenermergel, mergelige Drusbergschichten und Valanginienmergel) sowie tertiäre Gesteine (Altdorfer Sandstein-Gruppe und alttertiäre Schiefer).
- Gesteine, die Kondensate von höheren Kohlewasserstoffen enthalten können. Aufgrund von im Tunnelbereich und andernorts gemachten Erfahrungen: kalkige Drusbergschichten, Kieselkalk.
- *Speichergesteine*, in denen das Gas in Form von Bläsern unter Druck austreten kann: alle harten klüftigen Gesteinsserien (Seewerkalk, Gault, Schratzenkalk, Drusbergkalk, Kieselkalk und Valanginienkalk). Da alle im Bereich des Seelisbergtunnels vorkommenden Gesteinstypen diagenetisch verfestigt sind, ist die Porosität des eigentlichen Gesteins klein. Speichermöglichkeiten sind somit nur im Klufthohlraum oder eventuell in Karsthöhlen vorhanden.
- Zonen erhöhter Wegsamkeit, längs denen Gas nach oben wandert und beim Anschneiden durch den Tunnel direkt in diesen einströmt. Zonen erhöhter Wegsamkeit sind zugleich auch potentielle Speicher. In Frage kommen alle Verwerfungen und Brüche sowie die Überschiebungsflächen.

6.1.4 *Geologische Sicherheitsmassnahmen während des Vortriebs*

Die mergeligen Gasmuttergesteine weisen eine geringe Permeabilität auf, d.h. ihre Ausgasung geht so langsam vor sich, dass die Konzentration des Erdgases in der Tunnelluft durchwegs mit einer verstärkten Lüftung auf ungefährliche Werte verdünnt werden konnte.

Die potentiellen Speichergesteine sind bezüglich der Gassituation gefährlicher, indem sich in Gasfallen gespeichertes und unter Druck stehendes Erdgas schlagartig in den Tunnel entleeren kann (Bläser). Eine analoge Situation ergibt sich bei den sich rasch verflüchtigen Kondensaten höherer Kohlenwasserstoffe. Das Sicherheitsrisiko ist in diesen Fällen aufgrund des Überraschungseffektes erheblich grösser als in den Gasmuttergesteinen, in denen zum voraus mit Gas gerechnet wird. Um dieser Gefahr zu begegnen, wurden neben betrieblichen Sicherheitsmassnahmen (siehe AMBERG, 1976) folgende Aufgaben dem Geologen übertragen:

- Herausgabe eines wöchentlichen Gasbulletins mit einer kurzfristigen Gasprognose, die aufgrund des laufend nachgeführten geologischen Befundes erstellt wurde.

- Überwachung und Auswertung der bis zu 100 m langen Vorbohrungen, die je nach Vortriebsleistungen alle 2 bis 4 Wochen ausgeführt wurden.

Die einfachen Schlagbohrungen erlaubten es, als willkommenes Nebenprodukt, die geologische Prognose zu verfeinern, indem anhand von Vorschubgeschwindigkeit, Bohrwasserfarbe und herausgespültem Bohrklein sowohl Störungen wie auch die wichtigsten Gesteinswechsel recht präzise erfasst werden konnten.

Eine weitere Vorsichtsmassnahme war die Staffelung der Vortriebe in den Losen Rüttenen und Büel um mindestens 100 m.

Die permanente Überwachung der Gassituation im Bereich der Vortriebsarbeiten oblag den Unternehmungen und örtlichen Bauleitungen respektive ihren Sicherheitsbeauftragten.

6.1.5 Oberflächenuntersuchungen

Messungen mit einer in den Boden gestossenen Sonde zeigten, dass über dem Trasse des Tunnels im Bereich von tektonischen Störungen eine erhöhte Gasführung vorkommen kann. In 1 bis 2 m Tiefe wurden bis zu 6000 ppm Erdgas gemessen. Damit war beim Tunnelvortrieb eine Bläsergefahr beim Anschneiden von Störungen nicht auszuschliessen.

6.2 Beobachtungen während des Vortriebs

Alle Beobachtungen im Zusammenhang mit der Gasführung sind im Anhang 7 zusammengestellt.

6.2.1 Vorbohrungen

In den Vorbohrungen wurde während des Bohrens häufig Gas im Bohrloch registriert. Die höchsten Gehalte von 20 bis 90 Vol.% CH₄, maximal sogar 100%, konnten im Los Rüttenen in der Amdenermergestrecke sowie im südlich daran anschliessenden Tunnelteil festgestellt werden. In den Valanginienmergeln des Loses Huttegg erreichte die Gaskonzentration vor allem im Bereich der Zentrale hohe Werte, die Messgrenze von 5% CH₄ wurde oft überschritten. Im Los Büel blieben die Gasgehalte in den Vorbohrungen unter 5% CH₄.

In keinem der drei Baulose wurde jedoch ein grösseres, unter Druck stehendes Gasvorkommen angebohrt. Bei einem Teil der vom Erschliessungsstollen in Richtung Zentrale vorgetriebenen Bohrungen konnte sich nach Abschluss der Bohrung ein Druck aufbauen.

6.2.2 Flächenhafte Ausgasungen

Häufig führte die Tunnelluft nach Abschlagen im freien Querschnitt während einer Dauer von 10 bis 20 Minuten geringfügig Gas, und zwar normalerweise weniger als 0,2% CH₄. Diese Gasführung ist auf die Ausgasung aus dem Haufwerk und aus den frischen Ausbruchflächen zurückzuführen.

Nach Berechnungen im Los Huttegg kann in den Valanginienmergeln anhand der Ausgasung aus dem Haufwerk normalerweise mit 30 bis 60 l Gas pro m³ Festgestein gerechnet werden. In drei Strecken im Nordast des Loses Huttegg lagen die rechnerisch ermittelten Werte deutlich höher. Die Spitzenwerte schwankten zwischen 180 und 1000 l/m³ Festgestein.

Diese rein auf die abgeschlagene Gesteinsmenge bezogenen und aus dem Gasgehalt im freien Querschnitt errechneten Werte sind insofern zu hoch, als durch die frisch geschaffenen Ausbruchflächen zusätzlich zum Teil beträchtliche Erdgasmengen aus dem umgebenden Gebirge in den Tunnel gelangen. Anhand von Ausgasungen in Bohrlöchern angestellte Überschlagsrechnungen ergaben stark schwankende Werte der flächenhaften Ausgasung, die von 0,07 l/m³ h bis 17 l/m³ h (Zentralbereich) reichen.

Theoretisch können in einem adiabatischen Prozess bei einem Porenvolumen von 3,3% und einem Überlagerungsdruck von 135 atü bei der Entspannung 4500 l Gas freigesetzt werden.

6.2.3 Kondensate

Kondensate von flüssigen Kohlenwasserstoffen fanden sich einzig in den kalkigen Drusbergschichten des Loses Rütönen zwischen km 121.000 und 121.075. Es wurden Gaskonzentrationen bis zu 20% UEG festgestellt. Bei km 121.029 der Seeröhre führte eine angebohrte, sich rasch entleerende Kondensattasche zu einem kurzzeitig wirksamen Bläser.

In den übrigen kondensatverdächtigen Vorkommen von kalkigen Drusbergschichten und Kieselkalk wurden weder im Los Rütönen noch im Los Büel Imprägnationen mit flüssigen Kohlenwasserstoffen gefunden.

6.2.4 Einzelaustritte

a) Kleinere Austritte

Kleinere Austritte waren in Form von *Perlstellen* mit unterschiedlicher Häufigkeit in allen drei Losen zu beobachten:

- Im Los Rütönen traten Perlstellen vor und nach den Amdenermergeln, im Bereich der Überschiebung des Kieselkalkes über den Schrattekalk (Zone erhöhter Wegsamkeit) sowie im letzten Teilstück vor den Valanginienmergeln (Gasfalle) gehäuft auf.
- Im Los Huttegg wurden im Nordast mehr Perlstellen beobachtet als im Südast. Die Beobachtungsmöglichkeiten waren jedoch durch die fehlenden Wasserpfützen stark eingeschränkt.
- Im Los Büel waren nur spärlich Perlstellen festzustellen.

b) Bläser

Ausser dem erwähnten Kondensatbläser im Los Rütönen wurden im Los Huttegg zwei weitere Bläser registriert.

Bläser im Umluftstollen

Zwischen den beiden Umleitbauwerken (Nr. 19) an der Grenze zum Los Rütönen wurde im Kalottenbereich ein verbindender Umluftstollen ausgebrochen, der im Valanginienkalk liegt.

Am 4.3.75 stiess der Vortrieb auf einen Bläser. Unmittelbar nach dem Abschlag strömten schätzungsweise 100 l/s Erdgas aus einer steilstehenden N-S-streichenden Störung. Das Anfahren dieses Bläfers bewirkte das Auslösen eines Alarms und einen eintägigen Arbeitsunterbruch.

Nach rund einem Monat sank die austretende Gasmenge auf 5 l/s. Nach vier Monaten hatte sich der Bläser vollständig zurückgebildet.

Bläser im Zentralbereich

Der im Zentralbereich vom Erschliessungsstollen aus mit einer Bohrung erstmals erfasste Bläser lieferte auch nach Jahren noch ziemlich konstant 2 bis 3 l/s und war bei der Inbetriebnahme des Tunnels immer noch aktiv.

6.2.5 Gaskonzentration im freien Querschnitt

Im freien Querschnitt blieb die Gaskonzentration bei laufender Ventilation mit einer Ausnahme weit unterhalb der Explosionsgrenze respektive der Alarmgrenze von 1% CH₄. Die einzige Ausnahme betrifft den bereits erwähnten Bläser im Umleitbauwerk 19.

6.3 Untersuchungen im Hinblick auf den Tunnelbetrieb

Um die Gasführung im fertigen Bauwerk und damit die Gefährdung des Tunnels durch Erdgas im Betriebszustand beurteilen zu können, wurden in erster Linie Stillstandsmessungen durchgeführt. Es wurde dabei die Erdgaskonzentration bzw. ihr Anstieg in Abhängigkeit von der

Zeit bei stillstehender Ventilation gemessen. Die Versuche erfolgten sowohl in abgedichteten Tunnelabschnitten wie auch bei natürlicher Luftzirkulation (= Betriebszustand).

Sie ergaben folgendes:

- Im Los Rütene stieg südlich der Zentrale Hattig die Gaskonzentration in abgedichteten Tunnelabschnitten bis auf 1,6% CH₄ an.
- Ebenfalls im Los Rütene entstanden in der abgedichteten Rigole hohe Gaskonzentrationen, die bei geöffneter Sekundärrigole jedoch auf ungefährliche Werte absanken (= Betriebszustand).
- Die abgeschlossenen Hohlräume unter den Fahrbahnplatten der Amdenermergelstrecke im Los Rütene waren gasfrei.
- Im Los Huttegg blieb die Gaskonzentration in den Pilotstollen unterhalb 1%.
- Im Bereich der Zentrale Huttegg bestand die Tunnelluft lokal aus 100% Methan.
- In allen drei Losen konnte bei natürlichem Luftzug (= Betriebszustand) kein Gas gemessen werden.

6.4 Beurteilung der Erdgasvorkommen

Die Amdenermergel, die mergeligen Drusbergschichten und die Valanginienmergel sind nach den erdöltechnischen Versuchen aufgrund ihrer Lithologie und ihrem Gehalt an organischen Material Gasmuttergesteine. Im Tunnel war in diesen Gesteinen die Gasführung in den Vorbohrungen erhöht, und die Gaskonzentration stieg nach Abschlagen kurzfristig an. Offensichtlich wurde das im Porenraum unter Druck gespeicherte Gas beim Zerkleinern des Gesteins freigesetzt und dekomprimiert.

Ein weiteres Gasmuttergestein, die tertiäre Serie der Altdorfer Sandstein-Gruppe, führte im Seelisbergtunnel wider Erwarten nur wenig Erdgas. Dies im Gegensatz zu den Stollen des KW Bürglen II im Schächental, die in der gleichen Schichtserie liegen. Der Grund dürfte in der geringen Überlagerung der Tunnelstrecken liegen, die eine vollständige Ausgasung ermöglichte.

Die Gasführung in den kalkigen Drusbergschichten des Loses Rütene ist auf leichtflüchtige Kondensate von Kohlenwasserstoffen zurückzuführen, die sich in sekundärer Lagerstätte auf Klüften bildeten. Die Kohlenwasserstoffe stammen sehr wahrscheinlich aus den angrenzenden mergeligen Drusbergschichten, in denen bei Extraktionsversuchen Leichtöle respektive Erdgas gewonnen wurde.

Sämtliches in den Kalken gespeichertes oder zirkulierendes Gas befindet sich in sekundärer Lagerstätte. Als ausschlaggebende Faktoren für die Gasführung des Gebirges im Seelisbergtunnel erwiesen sich einerseits die Überlagerung und andererseits die generelle Tektonisierung. So war im *Los Büel*, das in der stark zerstückelten *Axen-Decke* liegt und eine verhältnismässig geringe Überdeckung bei einem ausgeprägten Relief aufweist, die *Gasführung* im gesamten gesehen *gering*.

In der einen ruhigen Faltenwurf aufweisenden *Drusberg-Decke* mit ihren grösseren Schichtmässigkeiten konnte dagegen eine *erheblich stärkere Gasführung* festgestellt werden. Im *Los Rütene* stieg mit zunehmender Überdeckung, d.h. gegen das Los Huttegg zu, die Gasführung deutlich an. Im Tunnel äusserte sich dies vor allem in Form der zahlreichen Perlstellen. Im *Los Huttegg* war die Ausgasung im wenig überdeckten Südast deutlich geringer als im Bereich der Zentrale und im Nordast.

Die Frage, ob das in den Klüften der Kalke gespeicherte Gas aus Muttergesteinen der betreffenden Decke selbst stammt oder aus den unter den helvetischen Decken liegenden Schichtstapeln des Tertiärs aufstieg, kann nicht mit Sicherheit beantwortet werden. Die andauernde Zufuhr von Erdgas im Bereiche der Zentrale Huttegg sowie die beobachtete erhöhte Zufuhr längs tektonischer Störungen (Choltalverwerfung, Überschiebung Kieselkalk/Schrattenkalk im Los Rütene) lassen aber doch vermuten, dass mindestens ein Teil des vorgefundenen Gases längs Zonen erhöhter Wegsamkeit aus der Tiefe stieg.

6.5 Zusammensetzung des Erdgases

In weitaus den meisten der untersuchten Proben bestand das Erdgas zu mehr als 98% aus Methan. In zwei Fällen (Berghöhe km 123.810, Seeröhre km 124.127) betrug das Verhältnis von Methan zu höheren Kohlenwasserstoffen 9:1 respektive 10:1.

6.6 Für den Betrieb getroffene Massnahmen

Da sämtliche Versuche ergaben, dass in den Tunnelröhren auch bei ausfallender Ventilation keine explosiven Erdgasgemische entstehen können, mussten im Hinblick auf eine allfällige Gasgefahr im Tunnel selbst keine speziellen Massnahmen ergriffen werden. Einzig im Bereich der *Zentrale Huttegg* erfordert die stetig anhaltende Gaszufuhr eine dauernde Belüftung sämtlicher begehbaren Räume, um ein Überschreiten der Explosionsgrenze in toten Winkeln zu vermeiden.

Literaturverzeichnis

- AESCHLIMANN, U., HERRENKNECHT, M., BANHOLZER, H. (1977): Das Baulos Huttegg des Seelisbergtunnels – Schweiz. Bauzeitung, Heft 6.
- AMBERG, R. (1976): «Gasvorkommen im Seelisbergtunnel, Sicherheitsmassnahmen», in: Tunnel- und Stollenlüftung, Projektierung, Bau und Betrieb, Referate der Studentagung, Bern, 8.4.76, Zürich: Schweizer Ingenieur- und Architekten-Verein, SIA-Dokumentation 14.
- ANDEREGG, H. (1940): Geologie des Isentals (Uri) – Beitr. Geol. Karte der Schweiz, N.F. 77.
- BOFFO, B., RITZ, W., PRADER, D. (1975): Baulos Rütene des Seelisbergtunnels – Schweizer Baublatt, Nr. 96 und 97.
- BREITSCHMID, A. (1982): Diagenese und schwache Metamorphose in den sedimentären Abfolgen der Zentralschweizer Alpen – *Eclogae geol. Helv.*, 75/2.
- BRÜCKNER, W. (1937): Stratigraphie des autochthonen Sedimentmantels und der Griesstockdecke im oberen Schächental – Diss. Univ. Basel.
- BRÜCKNER, W. (1956): Neue tektonische Untersuchungen am Ostufer des Urnersees (Zentralschweiz) – *Neues Jb. Geol. u. Paläontol. Abh.* 102/103.
- BURGER, H., STRASSER, A. (1981): Lithostratigraphische Einheiten der untersten Helvetischen Kreide in der Zentral- und Ostschweiz – *Eclogae geol. Helv.*, 74/2.
- BURI, F., AESCHLIMANN, H., HERRENKNECHT, M., GRINDAT, W. (1977): Seelisberg Middle Section Construction – Tunnel + Tunnelling, Heft 9.
- BUXTORF, A., TOBLER, A., NIETHAMMER, G., BAUMBERGER, E., ARBENZ, P., STAUB, W. (1916): Geologische Vierwaldstätterseekarte 1:50000, mit Profiltafel, Spezialkarte 66.
- COLLET, LÉON W. (1916): Le mode de formation et le régime des lacs suisses en général – *le Globe*, Genève.
- DARCY, M.J. (1971): La Rippabilité des Roches – *Revue de l'Industrie Minérales-Mines*, Juni 1971.
- FICHTER, H.J. (1934): Geologie der Bauen-Brisen-Kette am Vierwaldstättersee – Beitr. Geol. Karte Schweiz N.F. 69.
- HALDIMANN, P. (1977): Sedimentologische Entwicklung der Schichten an einer Zyklengrenze der helvetischen Unterkreide: Pygurus-Schichten und Gemsmättli-Schicht (Valanginien/Hauterivien) zwischen Thunersee und St. Galler Rheintal – Diss. ETH Zürich.
- ISCHI, H. (1978): Das Berriasien-Valanginien in der Wildhorn-Drusberg-Decke zwischen Thuner- und Vierwaldstättersee – Diss. Univ. Bern.
- KELLER, F. (1980): «Erdgas», in: Sonderheft Seelisbergtunnel – Schweizer Ingenieur und Architekt, Heft 50/80.
- LETSCH, U. (1977): Seelisberg-Tunnel, Huttegg Ventilation Chamber Field Measurements in Rock Mechanics, Proceedings of the International Symposium, Zürich.
- MEYER, E., VON MANDACH, F., HASLER, M. und KRESS, H. (1980): «Bau- und Montagearbeiten», in: Sonderheft Seelisbergtunnel – Schweizer Ingenieur und Architekt, Heft 50/80.
- OBERHÄNSLI-LANGENEGGER, H. (1978): Mikropaläontologische und sedimentologische Untersuchungen in der Amdener Formation – Beitr. geol. Karte Schweiz N.F. 150.
- PFISTER, R. (1972): Erdgasvorkommen im Seelisbergtunnel – Schweiz. Bauzeitung 36/90.
- PFISTER, R. (1974): Untertagebau im Valanginienmergel – Mitteilung Nr. 90 der Schweiz. Gesellschaft für Boden- und Felsmechanik.
- PFISTER, R. (1976): Excavation Methods for Long Highway Tunnels and Ventilation Shafts in the Swiss Alps – Proceeding Rapid Excavation and Tunnelling Conference, Las Vegas, Juni 1976.
- SCHINDLER, C. (1969): Neue Aufnahmen in der Axendecke beidseits des Urnersees – *Eclogae geol. Helv.*, 62/1.
- SCHNEIDER, T.R. (1974): Methangasvorkommen im Erschliessungsstollen Huttegg des Seelisbergtunnels – Strasse Verkehr, 60, Nr. 3.
- SCHNEIDER, T.R. (1976): «Gasvorkommen im Seelisbergtunnel, Geologischer Aspekt», in: «Tunnel- und Stollenlüftung, Projektierung, Bau und Betrieb» – Zürich, Schweizer Ingenieur- und Architekten-Verein, SIA-Dokumentation 14.
- SCHNEIDER, T.R. (1979): Baugeologische Erfahrungen mit Erkundungsstollen bei der Projektierung grosser Strassentunnel – *Rock Mechanics*, Suppl. 8.
- SCHNEIDER, T.R. (1979): Geological-geotechnical experience in the construction of the Seelisberg Tunnel – Tunnelling 79, Paper 22.
- SCHNEIDER, T.R. (1980): «Geologisch-geotechnische Erfahrungen», in: Sonderheft Seelisbergtunnel – Schweizer Ingenieur und Architekt, Heft 50/80.
- SCHWEIZERISCHE GEOLOGISCHE GESELLSCHAFT (1934): Geologischer Führer der Schweiz – Wepf, Basel.
- SCHWEIZERISCHE GEOLOGISCHE GESELLSCHAFT (1967): Geologischer Führer der Schweiz – Wepf, Basel.

- SCHWEIZERISCHE GEOLOGISCHE KOMMISSION, ARBEITSGRUPPE FÜR STRATIGRAPHISCHE TERMINOLOGIE (1973): Empfehlungen zur Handhabung der stratigraphischen, insbesondere der lithostratigraphischen Nomenklatur in der Schweiz – *Eclogae geol. Helv.*, 66/2.
- SIA NORM 198 (1975): Untertagebau – Schweizerischer Ingenieur- und Architekten-Verein, Zürich.
- SIA EMPFEHLUNG 199 (1975): Erfassen des Gebirges im Untertagebau – Schweizerischer Ingenieur- und Architekten-Verein, Zürich.
- SIDLER, H. (1980): «Lüftungsschacht Hattig», in: Sonderheft Seelisbergtunnel – Schweizer Ingenieur und Architekt, Heft 50/80.
- SKAANES, S. (1979): Mechanischer Tunnelausbruch am Beispiel Baulos Huttegg des Seelisbergtunnels – 4. Internationaler Kongress über Felsmechanik, Montreux.
- SKAANES, S. (1980): «Ausbruch und Felssicherung im Valanginienmergel, Felsmechanische Aspekte», in: Sonderheft Seelisbergtunnel – Schweizer Ingenieur und Architekt, Heft 50/80.
- STRASSER, A. (1982): Fazielle und sedimentologische Entwicklung des Betlis-Kalkes (Valanginian) im Helvetikum der Zentral- und Ostschweiz – *Eclogae geol. Helv.*, 75/1.
- TRÜMPY, R. (1980): *Geology of Switzerland, a guide book* – Wepf, Basel
- VON LERBER, M. (1974): Tunnelinstallationen für das Baulos Büel – Strasse und Verkehr, Heft 3.

Verzeichnis der durchfahrenen Schichtserien

a) Schichtserien im Los Rütönen

(Grenzen im First)

Schichtserie	Bergröhre		Seeröhre	
	Strecke (km-km)	Länge (m)	Strecke (km-km)	Länge (m)
Gault	120.322.8 – 120.445	122,2	120.356 – 120.486	130
Obere Orbitolinaschichten	120.445 – 120.447	2	120.486 – 120.487	1
Schrattenskalk	120.447 – 120.619	172	120.487 – 120.656	169
Untere Orbitolinaschichten	120.619 – 120.670	51	120.656 – 120.715	59
Unterer Schrattenskalk	120.670 – 120.833	163	120.715 – 120.872	157
Kalkige Drusbergschichten	120.833 – 121.086	253	120.872 – 121.118	246
Mergelige Drusbergschichten	121.086 – 121.258	172	121.118 – 121.275	157
Altmannschichten	121.258 – 121.268	10	121.275 – 121.276	1
Echinodermenbrekzie des Kieselkalkes	121.268 – 121.316	48	121.276 – 121.314	38
Kieselkalk	121.316 – 121.562	246	121.314 – 121.582	268
Choltalverwerfung	121.562		121.582	
Schrattenskalk	121.562 – 122.491	929	121.582 – 122.548	966
Gault	122.491 – 122.729	238	122.548 – 122.788	240
Seewerkalk-Seewerschiefer	122.729 – 122.949	220	122.788 – 123.021	233
Amdenermergel	122.949 – 123.410	461	123.021 – 123.474	453
Seewerkalk	123.410 – 123.414	4	123.474 – 123.477	3
Gault	123.414 – 123.516	102	123.477 – 123.575	98
Obere Orbitolinaschichten	123.516 – 123.527	11	123.575 – 123.584	9
Schrattenskalk	123.527 – 123.843	316	123.584 – 123.864	280
Amdenermergel			123.864 – 123.870	6
Seewerkalk			123.870 – 123.872	2
Gault			123.872 – 123.918	46
Kalkige Drusbergschichten	123.843 – 123.887	44	123.918 – 123.935	17
Amdenermergel	123.887 – 123.897	10	123.935 – 123.939	4
Seewerkalk	123.897 – 123.900	3	123.939 – 123.942	3
Gault	123.900 – 123.997	97	123.942 – 124.048	106
Obere Orbitolinaschichten	123.997 – 124.010	13	124.048 – 124.057	9
Schrattenskalk	124.010 – 124.052	42	124.057 – 124.060	3
Überschiebung	124.052		124.060	
Kieselkalk	124.052 – 124.456	404	124.060 – 124.523	463
Kieselkalkschiefer	124.456 – 124.463	7	124.523 – 124.533	10
Schiefer der Kieselkalkbasis	124.463 – 124.508	45	124.533 – 124.565	32
Valanginienkalk	124.508 – 124.590.1	82,1	124.565 – 124.618.5	53,5
Total		4267,3		4262,5

b) Schichtserien im Los Huttegg
(Grenzen im First)

Schichtserie	Bergröhre		Seeröhre	
	Strecke (km–km)	Länge (m)	Strecke (km–km)	Länge (m)
Valanginienkalk	124.590.1 – 124.624	33.9	124.618.5 – 124.676	57.5
Valanginienmergel	124.624 – 126.614	1990	124.676 – 125.030	354
Valanginienkalk*			125.030 – 125.122	92
Valanginienmergel			125.122 – 126.654	1532
Total		2023.9		2035.5

* in Sohle km 125.016.5 – 125.150.7 (134 m)

c) Schichtserien im Los Büel
(Grenzen im First)

Schichtserie	Bergröhre		Seeröhre	
	Strecke (km–km)	Länge (m)	Strecke (km–km)	Länge (m)
Valanginienmergel	126.614 – 126.735	121	126.654 – 126.776	122
Überschiebung	126.735		126.776	
Alttertiär			126.776 – 126.813	37
Alttertiäre Schiefer			126.776 – 126.783	7
Nummulitenkalke + Sandsteine	126.735 – 126.798	63	126.783 – 126.813	30
Oberer Schrattenkalk und Orbitolinaschichten	126.798 – 126.871	73	126.813 – 126.886	73
Schrattenkalk	126.871 – 127.020	149	126.886 – 127.058	172
Kalkige Drusbergschichten	127.020 – 127.101	81	127.058 – 127.095	37
Mergelige Drusbergschichten	127.101 – 127.141	40	127.095 – 127.128	33
Altmansschichten	127.141 – 127.142	1	127.128 – 127.131	3
Echinodermenbrekzie des Kieselkalkes	127.142 – 127.189	47	127.131 – 127.185	54
Kieselkalk	127.189 – 127.601	412	127.185 – 127.627	442
Echinodermenbrekzie des Kieselkalkes	127.601 – 127.626	25	127.627 – 127.643	16
Mergelige Drusbergschichten	127.626 – 127.655	29	127.643 – 127.684	41
Kalkige Drusbergschichten	127.655 – 127.659	4	127.684 – 127.695	11
Schrattenkalk	127.659 – 127.933	274	127.695 – 127.969	274
Kalkige Drusbergschichten	127.933 – 127.966	33	127.969 – 128.001	32
Altmansschichten	127.966 – 127.970	4	128.001 – 128.009	8
Echinodermenbrekzie des Kieselkalkes	127.970 – 128.025	55	128.009 – 128.059	50
Kieselkalk	128.025 – 128.163	138	128.059 – 128.199	140
Valanginienkalk	128.163 – 128.247	84	128.199 – 128.291	92
Überschiebung	128.247		128.291	

Alttertiär	128.247 – 128.408	161	128.291 – 128.441	150
alttertiäre Schiefer	128.247 – 128.352	105	128.291 – 128.387	96
alttertiäre Sandsteine	128.352 – 128.400	48	128.387 – 128.430	43
Nummulitenkalk	128.400 – 128.408	8	128.430 – 128.441	11
Schrattenkalk	128.408 – 128.465	57	128.441 – 128.502	61
Alttertiär	128.465 – 128.617	152	128.502 – 128.651	149
alttertiäre Schiefer	128.465 – 128.568	103	128.502 – 128.605	103
alttertiäre Sandsteine	128.568 – 128.607	39	128.605 – 128.643	38
Nummulitenkalk	128.607 – 128.617	10	128.643 – 128.651	8
Orbitolinaschichten	128.617 – 128.621	4	128.651 – 128.656	5
Schrattenkalk	128.621 – 128.707	86	128.656 – 128.747	91
Kalkige Drusbergschichten	128.707 – 128.740	33	128.747 – 128.773	26
Mergelige Drusbergschichten	128.740 – 128.754	14	128.773 – 128.787	14
Kieselkalk	128.754 – 128.763	9	128.787 – 128.789	2
Echinodermenbrekzie des Kieselkalkes	128.763 – 128.888	125	128.789 – 128.944	155
Kieselkalk	128.888 – 128.893	5		
Kieselkalkschiefer	128.893 – 128.896	3	128.944 – 128.951	7
Valanginienkalk	128.896 – 128.988	92	128.951 – 129.026	75
Kieselkalkschiefer	128.988 – 129.003	15	129.026 – 129.043	17
Valanginienkalk	129.003 – 129.031	28	129.043 – 129.089	46
Überschiebung	129.031		129.089	
Ultrahelvetischer Flysch	129.031 – 129.069	38	129.089 – 129.123	34
Altdorfer Sandstein-Gruppe	129.069 – 129.519	450	129.123 – 129.558	435
Total		2905		2904

Definition der Ausbruchsklassen

a) Tunnelröhren, konventioneller Vortrieb

Die Klassenzuordnung gilt jeweils für den ganzen Ausbruchsquerschnitt, gleichgültig, ob ein Voll- oder Teilausbruchverfahren angewendet wird.

Die sechs beim Sprengvortrieb zur Anwendung gelangenden Ausbruchsklassen sind wie folgt definiert:

Ausbruchsklasse I gilt dann als vorhanden, wenn die Voraussetzungen zur Einordnung in die Klassen II bis VI nicht gegeben sind.

Ausbruchsklasse II erfordert:

- entweder das Versetzen von Felsankern innerhalb von 20 m ab Ortsbrust im Ausmass von mehr als 0,4 Anker/m² auf einer Länge von mindestens 10 m, eventuell gleichzeitig das Versetzen von Drahtnetzen oder streifenartigen Abdeckungen;
- oder/und Gunit- oder Spritzbetonauftrag auf mindestens $\frac{1}{3}$ des Profilumfangs – exkl. Sohle – über eine Länge von mindestens 10 m auf eine Strecke von 20 m und bis 500 m ab Ortsbrust;
- oder/und Stahl, eventuell Holzeinbau mindestens 20 m, höchstens aber 500 m von der Ortsbrust entfernt.

Ausbruchsklasse III erfordert, allenfalls zusammen mit Felsankern am Umfang des Ausbruchprofils:

- entweder das Versetzen von Felsankern in die Ortsbrust hinein, im Ausmass von mehr als 0,2 Anker/m², jedoch mindestens 10 Stück;
- oder/und Gunit- oder Spritzbetonauftrag auf mindestens $\frac{1}{3}$ des Profilumfangs – exkl. Sohle – über eine Länge von mindestens 10 m, innerhalb von 20 m ab Ortsbrust ausgeführt;
- oder/und Stahl-, eventuell Holzeinbau, innerhalb von 20 m ab Ortsbrust, jedoch nicht unmittelbar nach jedem Abschlag ausgeführt.

Ausbruchsklasse IV erfordert unmittelbar nach jedem einzelnen Abschlag vor Ort Stahl- oder eventuell Holzeinbau, allenfalls zusammen mit Felsankern, mit Gunit- oder Spritzbetonauftrag oder mit eingelegten Verzugsbrettern (nicht nach Marciavanti-Art vorgetrieben).

Ausbruchsklasse V erfordert unmittelbar nach jedem einzelnen Abschlag vor Ort Stahl- oder eventuell Holzeinbau usw. wie Klasse IV, jedoch in Strecken, in welchen der hierfür vorgesehene Vollausbruch aus ausschliesslichen geologischen Gründen nicht mehr anwendbar und Kalottenausbruch oder ein ähnliches Verfahren notwendig ist. Wenn zwei Tunnelstrecken der Ausbruchsklasse V von einer kürzeren Strecke mit einer niedrigeren Ausbruchsklasse unterbrochen werden, die aber trotzdem im Teilausbruch ausgeführt wird, so wird über die Klassenzuordnung dieses Zwischenstückes während der Ausführung entschieden.

Ausbruchsklasse VI erfordert während des Vortriebes im Voll- oder im Teilausbruch die Verwendung von geschlagenen oder eingepressten Marciavanti- oder marciavantiähnlicher Abdeckung am Profilumfang (wie Messer), eventuell das Abstützen der Ortsbrust.

b) Pilotstollen Los Huttegg

In den konventionell ausgebrochenen Pilotstollen des Loses Huttegg mit ihrem nicht zu unterteilenden Querschnitt von 8,8 m² musste die Ausbruchfläche als Verwitterungsschutz, d.h. um Kohäsionsverlusten vorzubeugen, durchwegs mit einem Gunitauftrag versehen werden. Hier gelangte deshalb ein vereinfachtes 4stufiges Ausbruchklassensystem zur Anwendung:

Ausbruchsklasse I gilt dann als vorhanden, wenn die Voraussetzungen für die Ausbruchsklassen II–IV nicht gegeben sind.

Ausbruchsklasse II erfordert:

- sofortige systematische Ankerung im Ausmass von mehr als 3 Ankern/m²
- Gunit oder Spritzbeton innerhalb von 20 m ab Ortsbrust
- oder/und Einbau von Stahlrahmen mehr als 20 m ab Ortsbrust
- eventuell einlegen von Stahlspitzen oder Betonverzugsbrettern.

Ausbruchsklasse III

- sofortiger Einbau von Stahlrahmen, kein Marciavanti-Vortrieb.

Ausbruchsklasse IV

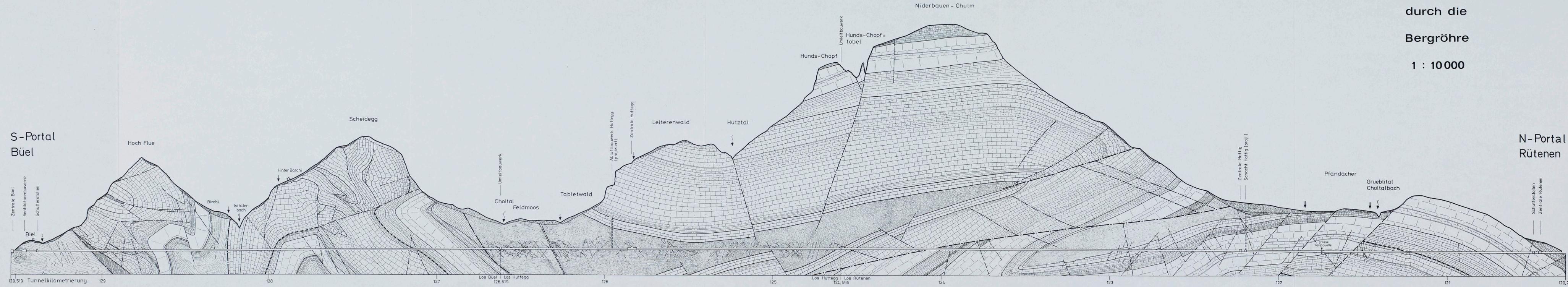
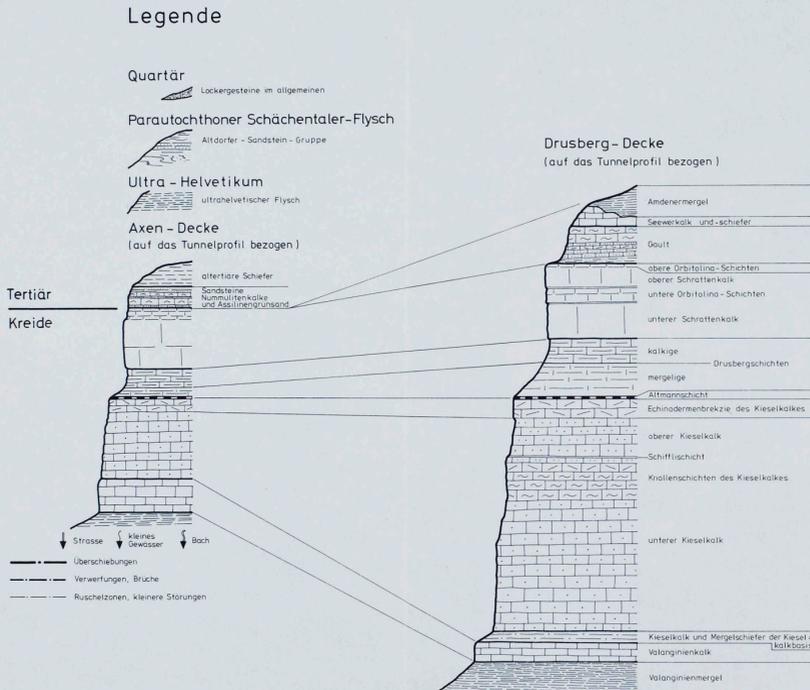
- für den Vortrieb die Anwendung der Marciavanti-Methode mit eventuellem Brustverzug.

Im gefrästen *Erschliessungsstollen* (Ø 3,5 m) wurde lediglich zwischen Sicherungsmassnahmen hinter der Maschine (Gunit, Einbau usw.) und Einbau über der Maschine unterschieden.

N-Portal
Rütenen

Geologisches Befundprofil

durch die
Bergröhre
1 : 10000

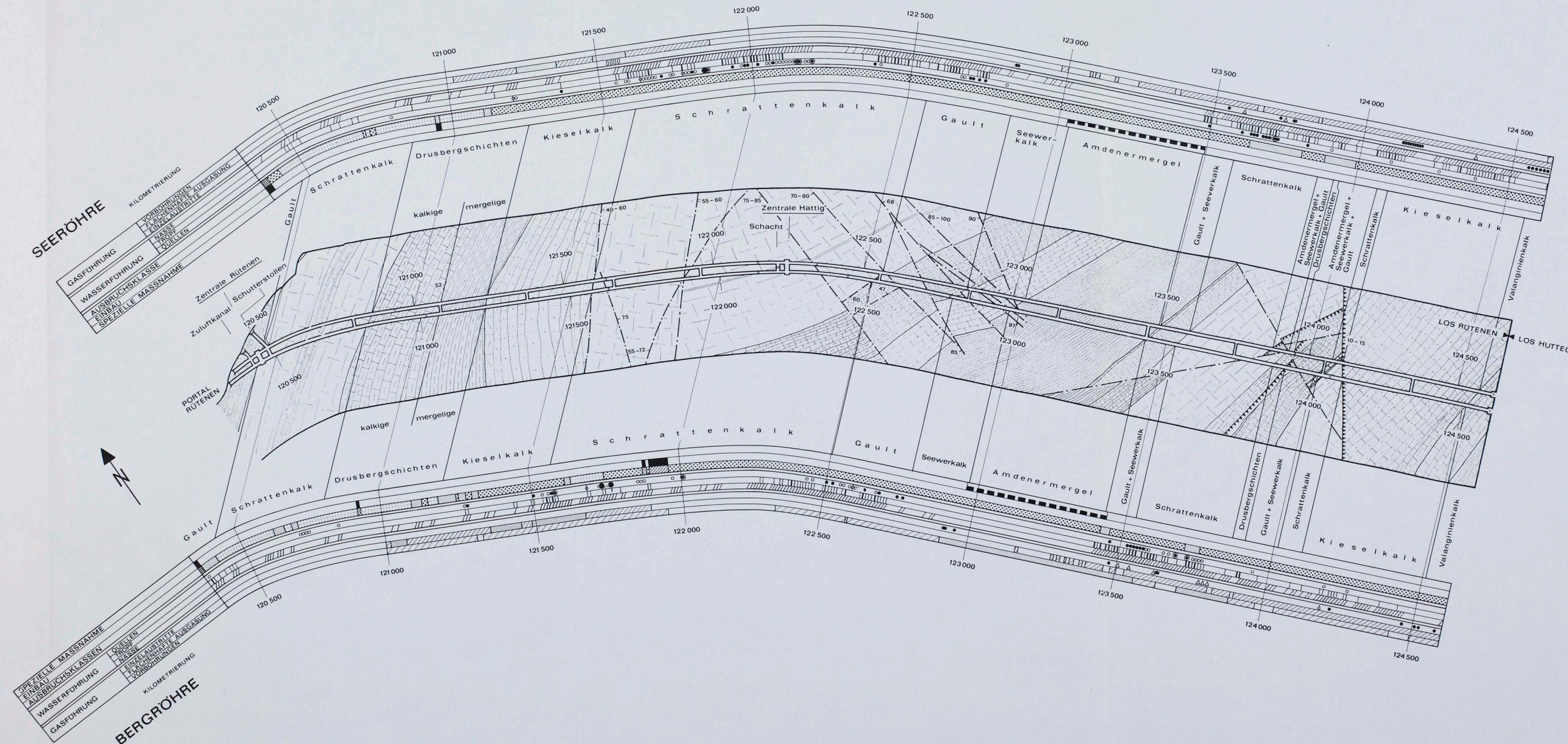


Wichtigste Überschiebungen und Verwerfungen	Überschiebung Axen-Decke		Überschiebung Axen-Nordlappen		Überschiebung Drusberg-Decke		Überschiebung Niederbauenfalte		Choltal-Verwerfung		
Tektonische Elemente	parautochthoner Schächentaler Flysch	A x e n - S ü d l a p p e n	A x e n - N o r d l a p p e n		V a l a n g i n i e n m e r g e l (F a l t e n k e r n)		N i e d e r b a u e n f a l t e (L i e g e n d e r S c h e n k e l)	A m d e n e r m e r g e l (M u l d e n k e r n)	S ü d s c h e n k e l	G e w ö l b e s c h e i t e l S e e l i s b e r g - F a l t e	N o r d s c h e n k e l
Tektonische Einheit	Flyschunterlage der Axen-Decke	A x e n — D e c k e		D r u s b e r g — D e c k e							

Geologisch-geotechnischer Horizontalschnitt

Los Rütene

1 : 10000



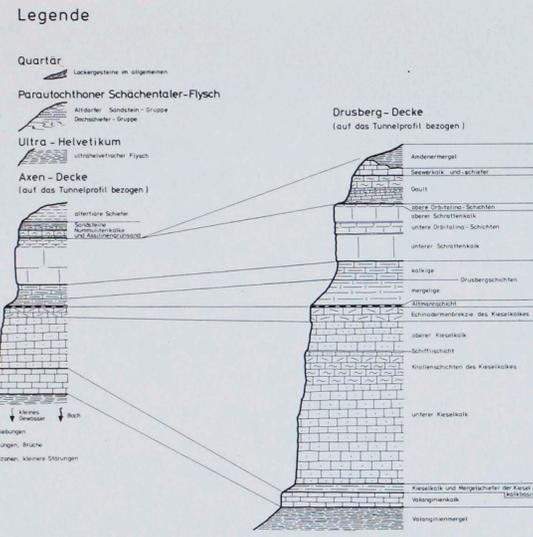
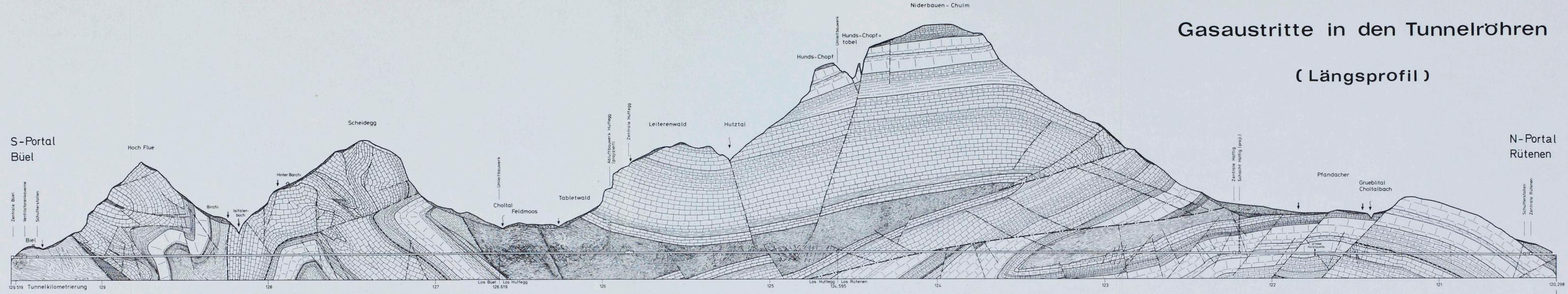
LEGENDE

- GASFUHRUNG**
- a) Vorböhrungen
 - < 5% CH₄ max. Konzentration
 - ≥ 5% CH₄ max. Konzentration
 - b) Flächenhafte Ausgasung
 - Spuren
 - bis 0.2% CH₄
 - > 0.2% CH₄
 - c) Einzelaustritte
 - Peristellen
 - Bläser und anhaltende Ausgasung
 - △ H₂S
 - ◇ Imprägnationen
- WASSERFUHRUNG**
- a) Nässe
 - einzelne nasse Stellen pro 10m Strecke
 - vorwiegend nass
 - b) Tropf
 - 1-3 Tropfstellen pro 10m Strecke
 - > 3 Tropfstellen pro 10m Strecke
 - starker Tropf
 - c) Quellen
 - 1-3 Austritte < 0.1l/s pro 10m Strecke
 - ◇ > 3 Austritte < 0.1l/s pro 10m Strecke
 - Quelle 0.1-1l/s
 - Quelle 1-10l/s
 - Quelle > 10l/s
- AUSBRUCHSKLASSEN**
- I
 - II
 - III
 - IV
 - V
- EINBAU**
- Stahlinbau
- SPEZIELLE MASSNAHME**
- Sohlensicherung mit verankertem Längsbalken und quergespannter Brückenplatte
 - Störung, Verwerfung [Zahl = Einfallen in°]
 - Überschiebung

DR. T. R. SCHNEIDER
 Beratender Geologe
 Rütihofstrasse 53
 8713 Uerikon / ZH

Gasaustritte in den Tunnelröhren

(Längsprofil)



EINZELAUSTRITTE

- Perlstellen, kleine Austritte
- Bläser und anhaltende Ausgasung
- Imprägnationen mit flüssigen Kohlenwasserstoffen
- H₂S

FLÄCHENHAFTE AUSGASUNGEN
(vorwiegend Ausgasung aus dem Haufwerk)

Spuren bis 0,2% CH₄
> 0,2% CH₄

VORBOHRUNGEN
(maximale Konzentrationen pro Bohrung)

Konzentration im Bohrlöch nach 1-3 Tagen

- 0,5% CH₄
- 5% CH₄
- 50% CH₄

STILLSTANDSMESSUNGEN

8/73 Monat / Jahr

Messungen in abgedichteter Rigole (Los Rütene)

- Bergröhre
- Seeröhre

0-0,9% UEG
1-10% UEG
11-54% UEG
> 55% UEG



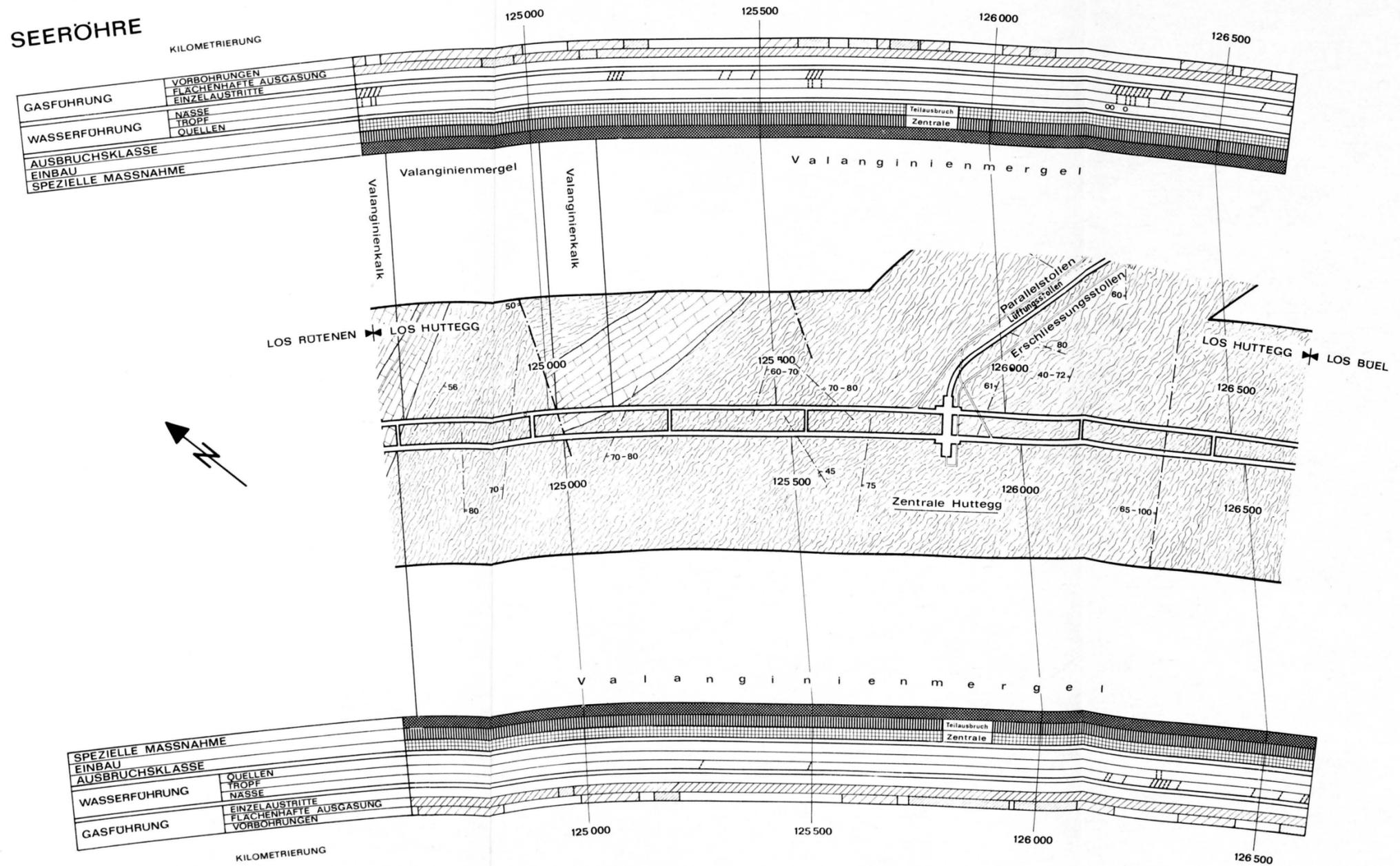
DR. T.R. SCHNEIDER
Beratender Geologe
Rüthhofstrasse 53
8713 Uerikon / ZH

Geologisch-geotechnischer Horizontalschnitt

Los Huttegg

1 : 10 000

SEERÖHRE



LEGENDE

GASFUHRUNG

- a) Vorbohrungen
 - < 5 % CH₄ max. Konzentration
 - > 5 % CH₄ max. Konzentration
- b) Flächenhafte Ausgasung
 - Spuren
 - bis 0.2 % CH₄
 - > 0.2 % CH₄
- c) Einzelaustritte
 - Peristellen
 - Bläser und anhaltende Ausgasung
 - △ H₂S
 - ◇ Imprägnationen

WASSERFUHRUNG

- a) Nässe
 - einzelne nasse Stellen pro 10m Strecke
 - vorwiegend nass
- b) Tropf
 - 1-3 Tropfstellen pro 10m Strecke
 - > 3 Tropfstellen pro 10m Strecke
 - starker Tropf
- c) Quellen
 - 1-3 Austritte < 0.1 l/s pro 10m Strecke
 - ⊕ > 3 Austritte < 0.1 l/s pro 10m Strecke
 - Quelle 0.1 - 1 l/s
 - Quelle 1 - 10 l/s
 - Quelle > 10 l/s

AUSBRUCHSKLASSE

- mechanischer Schildvortrieb

EINBAU

- Betontübbinge

SPEZIELLE MASSNAHME

- Kreisprofil

- Verwerfung, grössere Störung [Zahl = Einfallen in °]
- kleinere Störung

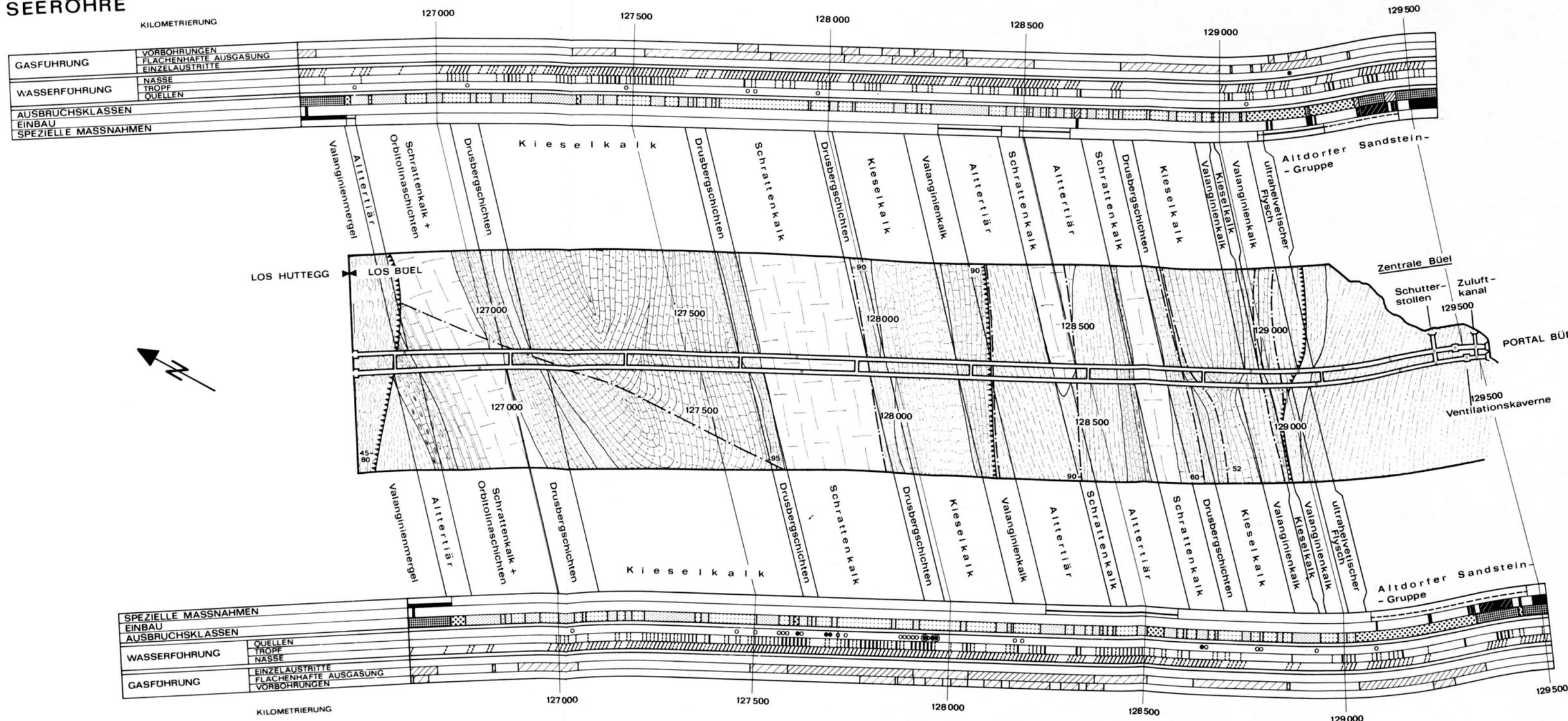
BERGRÖHRE

Geologisch - geotechnischer Horizontalschnitt

Los Büel

1 : 10 000

SEERÖHRE



BERGRÖHRE

LEGENDE

- | | |
|---|--|
| GASFÜHRUNG | AUSBRUCHSKLASSEN |
| a) <u>Vorbohrungen</u> | I |
| < 5% CH ₄ max. Konzentration | II |
| > 5% CH ₄ max. Konzentration | III |
| b) <u>Flächenhafte Ausgasung</u> | IV |
| Spuren | V |
| bis 0.2% CH ₄ | EINBAU |
| > 0.2% CH ₄ | Stahl einbau |
| c) <u>Einzelaustritte</u> | Einbau System Bernold od. Aussenbetonringe |
| • Peristellen | SPEZIELLE MASSNAHMEN |
| □ Bläser und anhaltende Ausgasung | betonierte Transportpiste |
| △ H ₂ S | Sohlenschutzplatte |
| ◇ Imprägnationen | Sohlgewölbe |
| WASSERFÜHRUNG | Störung Verwerfung (Zahl = Einfallen in °) |
| a) <u>Nässe</u> | Überschiebung |
| einzelne nasse Stellen pro 10m Strecke | |
| vorwiegend nass | |
| b) <u>Tropf</u> | |
| 1-3 Tropfstellen pro 10m Strecke | |
| > 3 Tropfstellen pro 10m Strecke | |
| starker Tropf | |
| c) <u>Quellen</u> | |
| ○ 1-3 Austritte < 0.1 l/s pro 10m Strecke | |
| ◊ > 3 Austritte < 0.1 l/s pro 10m Strecke | |
| • Quelle 0.1 - 1 l/s | |
| ● Quelle 1 - 10 l/s | |
| ● Quelle > 10 l/s | |

DR. T. R. SCHNEIDER
 Beratender Geologe
 Rütihofstrasse 53
 8713 Uerikon / ZH