MITTEILUNGEN IAG BOKU

Institut für Angewandte Geologie Universität für Bodenkultur Wien

Reihe: Angewandte Geowissenschaften



Vorträge 1999/2000

Herausgeber:

B. SCHWAIGHOFER H.W. MÜLLER J.F. SCHNEIDER

MITTEILUNGEN

IAG BOKU

Institut für Angewandte Geologie Universität für Bodenkultur Wien

Reihe: Angewandte Geowissenschaften

Heft 11

BAUGEOLOGISCHES SEMINAR

Vorträge 1999/2000

Herausgeber:

B. SCHWAIGHOFER H.W. MÜLLER J.F. SCHNEIDER

Wien, Februar 2001

Diese Ausgabe beinhaltet die Vorträge des Baugeologischen Seminars des Studienjahres 1999/2000

Herausgeber:

Bernd SCHWAIGHOFER, Univ.Prof.Dr. Harald W. MÜLLER, ao.Univ.Prof.DI.Dr. Jean F. SCHNEIDER, o.Univ.Prof.DI.Dr.

Redaktion:

Friederike HINTERMÜLLER Helene PFALZ-SCHWINGENSCHLÖGL

IAG BOKU

Institut für Angewandte Geologie Universität für Bodenkultur Wien A-1190 Wien, Peter Jordan-Str. 70

Tel. ++43-1-47654/5400, Fax /5449

geolsek @ mail.boku.ac.at http://www.boku.ac.at/iag

Herstellung: Riegelnik Ges.m.b.H., Wien

Inhaltsverzeichnis

23
23
31
٦,
49
77
61
•
77
97
135
151
155
133

S6 - Semmeringschnellstraße Tunnel Spital

Baugeologische Dokumentation

Norbert HEIM

1 Einleitung

Am 21.12.1998 erging von der ÖSAG der Auftrag an das Technische Büro Dr. Norbert Heim (TBGG), die baugeologische Dokumentation des Tunnels Spital im Zuge des Ausbaus der S6-Semmeringschnellstraße zwischen Grautschenhof und Maria-Schutz auszuführen. Das Projekt Tunnel Spital umfaßt die Erstellung von zwei Tunnelröhren von gesamt 4.176 m Länge (bergmännischer Vortrieb), zugehöriger Nischen und von drei Querschlägen.

Am 22.01.1999 wurde nach der Herstellung des Voreinschnittes und der Unterquerung der ÖBB-Südbahn mit dem bergmännischen Vortrieb der Nordröhre begonnen. Die Südröhre wird erst Anfang April 1999 in Angriff genommen. Beide Röhren werden von Westen gegen Osten vorgetrieben.

2 Projektbeschreibung

Im folgenden wird eine schlagwortartige Übersicht über die wichtigsten Projektdetails gegeben:

Gesamtlänge 2 Tunnelröhren à ca. 2.500 m

max . Achsabstand 60 m

durchschnittliche Ausbruchsquerschnitte Kalotte 58 m²

Strosse 20 m² Sohle 18 m²

Sonderbauwerke 2 Abstellnischen je Röhre

3 Querschläge

voraussichtliche Bauzeit Vortrieb Okt. 1998 - Ende 2000

voraussichtliche Verkehrsfreigabe Ende 2002

Auftragssumme 937.000.000 ATS

2.1 Projektablauf

Für den Tunnel Spital werden zwei Röhren (Nord- und Südröhre) errichtet, wobei der Vortrieb beider Röhren steigend von West nach Ost erfolgt.

Die Bauarbeiten wurden am 18.09.1998 mit der Herstellung des Voreinschnittes und der Vorbereitung der Unterquerung der ÖBB-Südbahnstrecke (Pfahlreihen und Deckel) begonnen.

Am 17.01.1999 wurde mit dem Vortrieb der Nordröhre begonnen. Der Vortrieb der Südröhre wurde aufgrund der anfänglich engen Achslage nacheilend erst am 02.03.1999 in Angriff genommen.

Im Bereich des Ostportals ist eine offene Bauweise mit anschließendem Deckel vorgesehen. Die entsprechenden Aushubarbeiten wurden am 10.11.1999 in Angriff genommen.

3 Überblick über das Projektgebiet



Abb. 1: Lageplan der gesamten Ausbaustrecke Maria Schutz - Grautschenhof

Im gesamten Projektabschnitt sind 3 Tunnelbauwerke mit jeweils 2 Röhren geplant. Dies sind, von West nach Ost gesehen, der hier beschriebene Tunnel Spital, daran anschließend der Tunnel Steinhaus und schließlich als Scheiteltunnel der Tunnel Semmering.

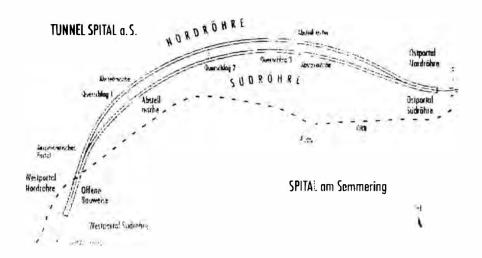


Abb. 2: Detaillageplan des Tunnels Spital

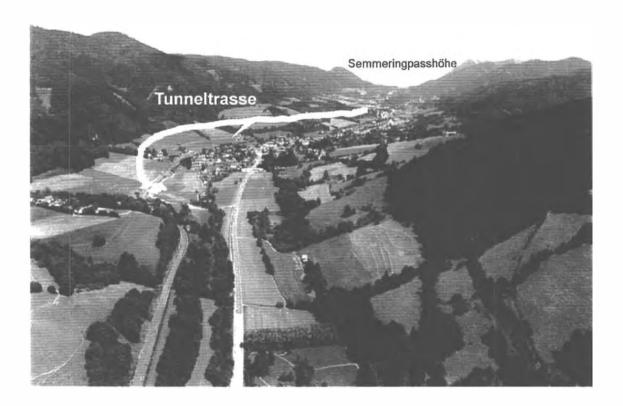


Abb. 3: Überblicksfoto des Projektsgebietes Blickrichtung Osten (Semmeringpaßhöhe)

Das Luftbild gibt einen Überblick über das Projektgebiet, wobei die seichte Lehnenlage des Tunnels knapp unterhalb des karbonatisch dominierten Gebirges im nördlichen "Hinterland" gut ersichtlich ist.

3.1 Geologischer Überblick

Der folgende geologischer Überblick ist einerseits aus Literaturangaben gewonnen, andererseits sind die projektspezifischen Details anhand der prognostizierten Verhältnisse dargestellt.

3.1.1 Grundgebirge

In der Semmering-Einheit treten als Grundgebirge massiv ursprünglich granitische Gesteine auf, die unter dem Begriff Grobgneis zusammengefasst werden. Es handelt sich dabei in den meisten Fällen um schwach geschieferte Metagranite. Zusätzlich treten Quarzphyllite und Quarzite bis Quarzitschiefer auf.

3.1.2 Deckgebirge

Die dem Grundgebirge auflagernden Sedimente (Semmeringmesozoikum) liegen heute großteils als zuerst deutlich metamorphe Quarzite (Semmeringquarzit) und Marmore vor. Darüber folgt ein Wechsel zu karbonatisch dominierter Sedimentation mit Kalkund Dolomitmarmoren. Vor allem die Kalkmarmore sind meist dunkelgrau, seltener gebändert, deutlich grobkristallin (zuckerkörnig), die Dolomitmarmore hingegen sind fast immer hellgrau bis ockerfarben und nicht so grobkörnig. Die Obertrias ist wiederum klastisch, vom sog. "Keupereinfluß" dominiert. Die gegenständliche Tunneltrasse kommt zum überwiegenden Teil in diesen schwach metamorphen Gesteinsabfolgen (großteils Phyllite mit Einschaltungen von Rauhwacken, Quarziten und Karbonatgesteinen) zu liegen.

Aus der geologischen Karte des engeren Projektgebietes (Bestandteil der baugeologischen Prognose) geht hervor, daß der Großteil der Tunneltrasse in weitestgehend undifferenzierten Phylliten (hellgrau) mit Einschaltungen von Karbonaten (rötliche Farben) zu liegen kommt.

Diese grundsätzliche Gesteinsverteilung kommt auch im Prognoselängsschnitt zum Ausdruck. Die Phyllite sind hier in Brauntönen ausgeschieden, Karbonatabschnitte sind dunkelbraun (Karbonatschiefer) bzw. violett (Kalk- und Dolomitmarmore) gehalten.

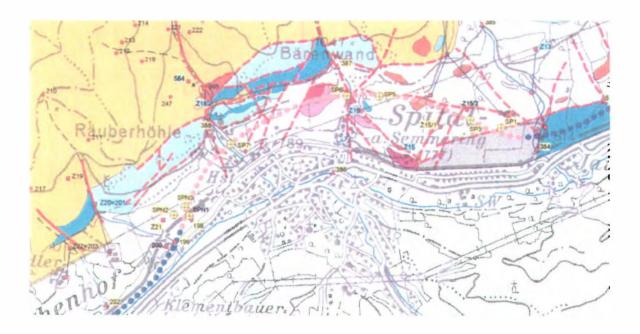


Abb. 4: Regionale geologische Karte (Projektbestandteil)

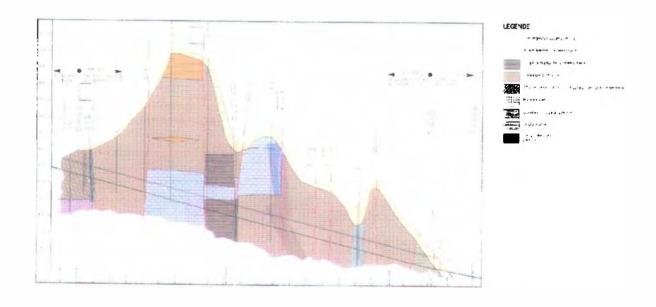


Abb. 5: Prognoselängsschnitt

3.1.3 Lithologie der aufgefahrenen Strecke

Legende aus der geologischen Prognose

Legende aus der baugeologischen Dokumentation



Abb. 6: Überblick der anzutreffenden lithologischen Einheiten (Vergleich Prognose, Dokumentation)

Im folgenden werden die im Zuge der baugeologischen Dokumentation angetroffenen und erfaßten Gesteine kurz aufgelistet und beschrieben.

3.1.3.1 Bunter Keuper

Unter dem Begriff "bunter Keuper" werden tonig mylonitisierte Phyllitfolgen (grau bis rötlich braun, z.T. intensiv limonitisch verfärbt) zusammengefaßt, die teils fließende Übergänge zu dünnschiefrigem Quarzphyllit aufweisen und teilweise mit Phylliten und Phyllitmyloniten verschuppt sind. Dazu kommen verschieden mächtige Lagen von sandig-grusig zersetzten Rauhwacken und Quarziten, die zumeist ebenfalls intensiv limonitisch verfärbt sind. Es handelt sich dabei um schwach verfestigte kiesig-sandige, feinschuppig zerlegte Lagen, die sowohl in feineren Lamellen als auch in mächtigeren Lagen im Phyllitschuttkörper eingeschaltet sind. Die "Matrix" des "bunten Keupers" sind vorwiegend Chlorit/Serizitphyllite, die in wechselnder Intensität vertalkt auftreten. Der Gebirgstyp ist durch eine intensive Zerscherung, an Lagen gebundene starke Limonitisierung und gute Kohäsion gekennzeichnet.

3.1.3.2 Phyllite

Allgemein liegt eine stark heterogene Wechsellagerung innerhalb der Phyllite vor. Diese Gesteine sind großteils der Keuperformation (Obertrias) zuzurechnen, wobei wiederholt Einschaltungen von altkristallinen Scherkörpern (Quarzphyllite und Quarzite) zu beobachten sind. Grundsätzlich sind die bisher aufgefahrenen Phyllite intensiv zerschert und zerlegt, teilweise mylonitisiert und entsprechend stark wasserempfindlich.

Die Phylllite im allgemeinen können unterschieden werden in:

Chloritphyllite Chlorit – Serizitphyllite Quarzphyllite Graphitphyllite

3.1.3.3 Karbonate

Karbonatgesteine treten in den gegenständlichen Tunnelabschnitten zuerst nur in Form kleiner Scherlinsen innerhalb der Phyllite auf, wobei es sich großteils um karbonatische Rauhwacken und nur untergeordnet um kristalline Kalke und Marmore handelt. Erst gegen Ende der beschriebenen Tunnelabschnitte werden (v.a. in der Nordröhre) Karbonate in Form von Kalk- und Dolomitmarmoren aufgefahren, die den gesamten Ausbruchsquerschnitt einnehmen.

Die durchörterten Karbonate sind im wesentlichen:

Kalkschiefer

Kalk- bzw. Dolomitrauhwacken Kalk- bzw. Dolomitmarmore Untergeordnet Kalke und Dolomite

3.1.3.4 Mylonite

Mylonite sind über die gesamten bisherigen Tunnelbereiche vereinzelt oder in größeren Lagen anzutreffen. Ihr Erscheinungsbild variiert dabei sehr stark von weichen, entfestigten Lagen, zu steifen bis plastischen und mürben (z.t. "sandigen"), hell- bis dunkelgrau gefärbten Einschaltungen.

3.1.3.5 Quarzite

Im gegenständlichen Bereich sind grundsätzlich vier Ausbildungen von Quarziten unterscheidbar, die wiederum unterschiedlichen stratigraphischen bzw. tektonischen Positionen zuzuordnen sind.

Die Ausbildungstypen können wie folgt beschrieben werden:

Massig bis bankige Ausbildung Quarzitschiefer Kleinpolyedrisch zerlegte Schollen und Späne Zu Mittel- bis Feinsand vergruste Quarzite Stratigraphisch bzw. tektonisch können folgende Quarzite unterschieden werden, wobei die jeweilige Zuordnung zum jetzigen Zeitpunkt rein phänomenologisch (makroskopische Gesteinsansprache vor Ort) erfolgt. Aus baugeologischer Sicht hat die jeweilige Zugehörigkeit keine Relevanz; die baugeologischen und geotechnischen Eigenschaften ergeben sich aus den jeweiligen Ausbildungstypen.

Keuperquarzite: Bei diesen Gesteinen handelt es sich um meist graue, größtenteils kleinpolyedrisch zerlegte bzw. plattige, harte Gesteine, die vorwiegend als geringmächtige Einschaltungen oder einzelne Blöcke auftreten.

Semmeringquarzite: Vereinzelt sind Späne von Semmeringquarzit in den Phylliten zu beobachten (feinkörnige Quarzite mit einzelnen, z.T. rosaroten Quarzlagen). Daneben sind aufgelöste, vergruste rostrote Quarzite zu beobachten, bei denen es sich ebenfalls um aufgearbeitete Semmeringquarzite handeln dürfte. Speziell im Bereich der Südröhre treten diese Gesteine aber auch massig bis bankig auf.

3.1.4 Strukturelle und tektonische Gegebenheiten

Aufgrund der regionalen tektonischen Gegebenheiten herrscht im Projektsraum grundsätzlich ein Einfallen der Schieferungsflächen gegen \pm ENE vor, wobei durch die starke tektonische Beanspruchung (Zerscherung und Durchbewegung) im Detail eine große Bandbreite von Abweichungen zu beobachten ist. Dabei bleibt der generelle Trend aber stets erhalten. Parallel zu diesen Strukturen und entlang von Störungen kommt es zur Entwicklung teils mächtiger Mylonite.

Die Gesteinsabfolgen sind einerseits von im Streichen als auch quer dazu verlaufenden steilstehenden Störungen durchzogen, entlang denen kompetente festere Scherkörper eingeschalten sind.

Verantwortlich dafür ist das groß angelegte NE-SW verlaufende tektonische Lineament der Mürztalfurche mit seinen Begleitstörungen, welches sich wiederholt sehr deutlich schleifend zur Tunnelachse verlaufend bemerkbar macht.

Von Bedeutung ist weiters, dass das gegenständliche Gebiet nicht vergletschert, sondern permafrostartigen Verhältnissen unterworfen war, wobei es durch periglaziale und postglaziale Ereignisse einer tiefgreifenden Verwitterung und Auflockerung unterlag.

4 Aufgaben im Rahmen des Projektes

4.1 Baugeologische Dokumentation

Die Aufgaben des beauftragten Büros und der Mitarbeiter vor Ort besteht grundsätzlich in der laufenden geologischen Dokumentation des angetroffenen Gebirges in beiden Vortrieben und in den Sonderbauwerken. Dabei werden jeweils Ortsbrustbilder der angetroffenen Stationen angelegt und alle relevanten baugeologischen Faktoren, wie Gesteinsbestand und -zustand, Gebirgsverhältnisse, strukturelle Gegebenheiten

(Gefügeinventar), Bergwasserverhältnisse und dergleichen aufgenommen. Daneben werden die angetroffenen Verhältnisse fotografisch festgehalten (Fotodokumentation).

Zusätzlich zur Aufnahme des Gebirges und seiner verschiedenen Parameter werden in regelmäßigen Abständen bzw. in Abhängigkeit markanter Änderungen des Gebirges Gesteins- und Wasserproben gezogen, die unmittelbar nach deren Entnahme ihrer Analytik unterzogen werden, um rasch entsprechende Entscheidungsgrundlagen zu erlangen.

4.2 Beratende Funktion

Die weitere Aufgabe im Rahmen der baugeologischen Dokumentation besteht in der beratenden Funktion der ÖBA, der Projektsteuerung und des Bauherrn bzw. in der laufenden Information der übergeordneten Organe der begleitenden Kontrolle und der Sondersachverständigen.

4.3 Ausarbeitung und Interpretation

Die Ausarbeitung der laufenden Dokumentation erfolgt in Form von reingezeichneten, handkolorierten Brustbildern (M 1:100), Tagesberichten und Tunnelbändern (M 1:100). Sämtliche aufgenommenen Daten werden in einer Datenbank (System **GeoDokuBank**, Eigenentwicklung des Verfassers) abgelegt, um sie einer weiterführenden Interpretation und Auswertung zuführen zu können. Auch der grafische Teil der Dokumentation wird digital abgewickelt, indem die reingezeichneten Brustbilder eingescannt werden, bzw. die Fotodokumentation auf Foto-CD vorliegt. Beides, sowohl digitale Brustbilder und Fotos sind in die erwähnte Datenbank eingebunden und direkt mit den entsprechenden Tunnelstationen und den dort zugehörigen Parametern verknüpft.

4.4 Software

Folgende Software gelangt im Rahmen der laufenden Dokumentation und Ausarbeitung zum Finsatz:

MS Office 97 bzw. 2000

GeoDokuBank

Datenverwaltung, Auswertung, Statistik, Erstellung der Tagesberichte (Datenblätter), Anbindung an AutoCad und GIS

DEST (Datenerfassungs- und Auswertungssystem für den Tunnelbau) Dateneingabe vor Ort (Import der Daten aus der **GeoDokuBank** in das Programm DEST), Auswertung durch GGG an der TU Graz

AutoCad R 14

Corel Grafik Suite 8.0

Spezialsoftware, wie StereoNet oder Wintek, zur Gefügeauswertung

4.4.1 Datenblätter der baugeologischen Dokumentation

Als Beispiele der Ausarbeitung mittels EDV zeigen die folgenden Abbildungen die Datenblätter bzw. Tagesberichte der laufenden baugeologischen Dokumentation (GeoDokuBank).

	S6 Semmeringschneilstraße Abschnitt Maria-Schutz - Grautschenhof	TB9 7
	Tunnel Spital	Technicals a Books Contago and Contagh (A
Calpunium Andrian- es Libratio in AC	Baugeologische Dokumentation - Daterblatt Allgemeine und geologische Daten	1 Number 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1
	VORABZLIG	
	Allgemeins Daten	
D.W. 100	Works Hordrickes	Brackelser Confecting
SAM.	Thisquersatule Kalotte	Files TV.
18.5	(Vernicham)	Paro Ak
19.30		
UNION DEAS	Gentrasya	3
Derbgening (bil		
SAMPLE STATE OF		
Ver orbit prich mad	Mariana Royal Burning	
	Gestelnsbestand / Lithologic	
	OEREGODERAG / LITTONG	
(Part 1984	a, militika, kekarajaan, filiside, i <mark>li Allidepar, telemili</mark> sideran piskidelassan "k ladi. Bif Dunas ngilira Allida Alababatan (dan dipunda), iliab piskengi anak anfandas, Casarin antangsuna karangs, kindi dipun (nakarangs), mendisid	t GPP
rterefedigieit: Pi Oussel, 1924, Mi Ich, Velterefese Oussbochte, (2 retens: Res. Velt Ousspryth, 1914),	, refisik kvisatilati (liter). Ozfolgar i naprili dan isti disezza Ji 101. BV Diett (difere i Artanian dan Jahren et 9. Vali zança) gra, arfadig Ozona ettergi pe e serjar, sivili dipe i naprili (ter biblio). BV Diett (kvis dipe i terefisir) juti, arbida BV Diett (kvis dipe i gilage). Quitalper 17 derili di 20. jutich (arbida). BV Diett (arbida). Quitalper 17 derili di perili pida i salt gila (bV Diett (arbida). Velta sung il deri Veltaren fastigisch (di R. BV Diett (arbida). Velta meng il deri	kdff har geschlosser, ge, dig ,< 1 cm, amfestgel. Gorille en geschlosser "kleinpolyetrisch. 26-1cm., ampåd
ether edvel diskt; et Outrace, (5%), et sich, Verbrendrug Outrace (16%, Verb Outrace (16%	(ad. 18) June: (Offer Andelskahder) der (Andelskahder) June: Andelsk, Chande deren grune unfahr, findelspie Franklich fant: schlach: 180 Zeals, fondt Valenpung Edm Sill, reicht Faustalgen, Jun; Gande unfelz, Gefählere Franklich andelscijden; sehr gut. 180 Zealsroccian: Valenpung in lebbe owningste, nil 18 pag, unwal unt, filch: Gelählere Fillenschlag:	k die har geschicsson, ge, dig , < 1 cm, sonissige. Conside an geschicsson, Just polyeetisch, 20-1 cm , sonsche an
other sched glittle in Outstan, (1953), its Outstan, (1954), its Outstan richte, (20 Outstan richt, Verh Outstan richt, Verh Outstan richt, (1964), Indicate in Indicate Inter/filmgen Fillmakkeite	(ad. 18) June: (Offer Andelskahder) der (Andelskahder) June: Andelsk, Chande deren grune unfahr, findelspie Franklich fant: schlach: 180 Zeals, fondt Valenpung Edm Sill, reicht Faustalgen, Jun; Gande unfelz, Gefählere Franklich andelscijden; sehr gut. 180 Zealsroccian: Valenpung in lebbe owningste, nil 18 pag, unwal unt, filch: Gelählere Fillenschlag:	kere har galchicsan, go,dg , < 1 cm, amberge, scrift yn glachicsan, Jishpohelfsch, 26-1m , amphe galch <u>icsa</u> n, edwraithrift, < 1 cm, allachiec
ribre of heal distriction of health in the control of health in the con	ist, BV Jurier (Offer AudatAshder) der deren (Wild Steinfel) gen, erfedig (Daniel deren) und und viellöger (Frenkt) jell: unbehör. BV Judit fesch: Visit anne tider Steinfeld (Bulletin), Juri (Bulletin) (Bulletiner (Frenkt) medissigkelt; sehr juri (BV Jurier (Stein (Bulletiner) (Bereich medissigkelt; sehr juri (BV Jurier) (Bulletiner) (Belletiner) vollanze findig der jell: BV Jurier (Vollan (Bulletiner) (Bulletiner) vollanze findig der jell: BV Jurier (Vollan (Bulletiner)) sohreit bung / Geloingstaastand (F = Mittel verbe aus d	kere har galchicsan, go,dg , < 1 cm, amberge, scrift yn glachicsan, Jishpohelfsch, 26-1m , amphe galch <u>icsa</u> n, edwraithrift, < 1 cm, allachiec
riber of head delict in Court and Co	(vi), BV Jurier (Office Audia/Audian) stretures (Will Street); in present of the Control of the	keen se geschiesser, ge.dg < 1 cm, emitstigk, komite en geschiesser, sebrechleite, 20-1cm, amsche geschiesser, eden schiefig, < 1 cm, amschert. Jenn jeweiligen Gestelnssätzfüsstam) sen jeweiligen Gestelnssätzfüsstam)
riber of head delict in Court and Co	(vi). BY Jurier (Office AuditArtenders stretures (With present present of the Common and the Com	tere per Hosser, guidy of the perfectly to the per Hosser, purpopertied, 26 for , amobie per baser, elementarity, of an , amobie per baser, elementarity, of an , amobie per joved igen (Sector next to tustom) producer " [Translator perdicator producer" [Hosselator perdicator
ryther edited (MMI: In Court of MMI: In	(ed. bit Jurian (Office Anderskeitheit stimeteren) With stamps: grow, erfolgt, Canada efficie in us (ed. tot. (ville Grant French); jobs: or blacke. Bit Jurian (no. de. Visit arguing tiden stimeters (et. elisten), et. or or or order, Carlogner, transfor- anterlesights, part you. Bit Jurian codes. (Antidoper, Transfor- anterlesights, part you. Bit Jurian codes.) Vertagang, jobs- evaluation, participated per, bit Jurian codes. (Antidoper, Transformer Verbares fault of part, unwent and faith of Antidoper, Transformer Verbares fault of part, purely and participated per souther building of Geological stand (* = bifficie weethe aus of the proofice. Outside	keen m packlosser, p.n.dg < 1 cm, ambatge, korilde m packlosser Jaippoheetisch, 20-1cm, amache packlosser, oderectischig, < 1 cm, amacher. Jen jaweiligen Gestelnssthribuiten) moduni "
Comments of the comments of th	Ind. B.P. Burtter (Orders Anderskand der unterwerte Web zereigt: genus erfoldigt, Canade dieses in der einsteller, (Web Zereit Frencht: jettlicht beitelte. BM Zuder (wicht, Web zerein) jettlicht in Mit Zuder (wicht, Web zerein) jettlicht (deutsichte), per Queste verfügt, Gufdelper (Fernand- genetischlicht, jettlicht zu der Verterstate) (Web zereitsche Verbandschafte), jettlicht jettlicht zu der Verbandschafte get. BM Zurbt, vordien, Weben meiglichen Verbandschafte get. BM Zurbt, vordien, Weben meiglichen Schiffelt in Web zereitschaft verteilt genetische Gubblicht Gub	tere to pack house, guidy, < 1 cm, anterigh, scribble grach base, elementarity, < 1 cm, association pack base, elementarity, < 1 cm, association len jovedligen Gedelnisattribusten) producer promisive secretarion producer promisive sec
ritur shrel diliti: ri Culturi, 1981 did. Velberodhun Culturi priliti (1984) odese 1984, (1984) prekenzi habhaci sant'imagen y J. Imalogia Pin Elecatrianga (Assilinatrianga)	Ind. BF Jurist (Office AuditArtender der dertor der Websternet)	tere to pack house, guidy, < 1 cm, anterigh, 4 cm in m glachicase, Just polyestech, 26-10m, amobie pack baser, elementerigh, < 1 cm, amobie ten jewelligen Gedelmaattinisusten) erredum * Promitive secolosie erred
riber alleri (ilitati re Course), Filia (ilitati	Ind. BF Jurist (Office AuditArtender der dertor der Websternet)	tere perchaser, pudg < 1 cm, embarge, scribt en particular, pudg < 1 cm, embarge, scribt en particular, pudge constitution, pu
ritur abred distilit. (n. Cutarus, 1984). Cutarus, 1984 (n. Subsensiture). Cutarus inter Vert. Cutarus inter Vert. Cutarus inter Vert. Cutarus inter Vert. Cutarus interiori. Inter	101. BV Jurier (Office AudatAndrier der dertret (Wild Stein French): gen, erfentlig (Daniel deren) auf einer (Wild Stein French): gen, erfentlig (Wild Jurier (Wild Jurier Stein)) Jurier (Jurier Stein), Aus (Jurier Stein) Jurier (Jurier Stein) Jurier (Jurier Stein) Jurier (Jurier Stein) Jurier (Jurier Stein) Jurier (Jurier Stein) Jurier (Jurier Stein) Jurier (Jurier Stein) Jurier (Jurier Stein) Jurier (Jurier Stein) Jurier (Jurier Stein) Jurier (Jurier Stein) Jurier (Jurier Stein) Jurier (Jurier Stein) Jurier (Jurier Stein) Jurier (Jurier Stein) Jurier (Jurier Stein) Jurier (Jurier Stein) Jurier (Jurier Stein)	tere packicser, gud; < 1 cm, entergit toride proportion descriptions de 20-10m, ambie packicser, elematishit; < 1 cm, amode packicser, elematishit; < 1 cm, amode packicser, elematishit; pack
The sheet district of Courts (1984) and Courts (Ind. B.P. Jurian (Philes Audita Audit and America (Philes Audita Audita)	tere packicser, gud; < 1 cm, entergit toride proportion descriptions de 20-10m, ambie packicser, elematishit; < 1 cm, amode packicser, elematishit; < 1 cm, amode packicser, elematishit; pack
The sheel shall; in Course, 1984, and a sheel shall; in Course, 1984, and a sheel shall sh	105. BP Jurist (OPPS A Material And American Street (1985) 11 months	tere packicser, gud; < 1 cm, entergit toride proportion descriptions de 20-10m, ambie packicser, elematishit; < 1 cm, amode packicser, elematishit; < 1 cm, amode packicser, elematishit; pack
The sheet district of Courts (1984) and Courts (105. BP Jurist (OPPS A Material And American Street (1985) 11 months	tere packicser, gud; < 1 cm, entergit toride proportion descriptions de 20-10m, ambie packicser, elematishit; < 1 cm, amode packicser, elematishit; < 1 cm, amode packicser, elematishit; pack

Abb. 7: Datenblatt 1: "Allgemeine und geologische Daten"

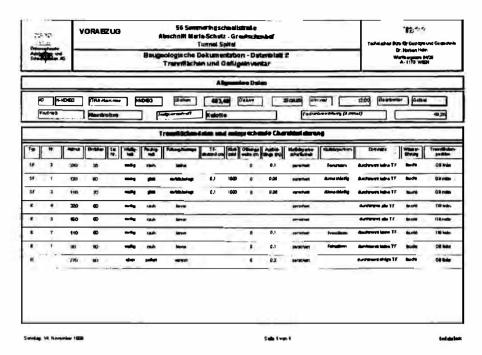


Abb. 8: Datenblatt 2: "Trennflächen und Gefügeinventar"

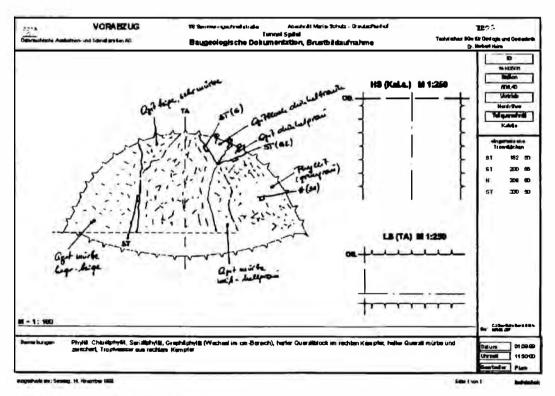


Abb. 9: Datenblatt 3: "Brustbildaufnahme"

5 Chronologie der bisher angetroffenen Verhältnisse

5.1 Nordröhre

Im Zuge der Dokumentation der bisherigen Tunnelstrecke der Nordröhre ist es möglich, grundsätzlich drei verschiedene Gebirgsabschnitte zu unterscheiden. Die Unterschiede liegen einerseits in der lithologischen Zusammensetzung, aber auch im Gebirgszustand und in den strukturellen Gegebenheiten.

5.1.1 Lithologie und Gebirgsbeschaffenheit

- Abschnitt A: Der Abschnitt vom bergmännischen Anschlag bis etwa Station 295 wird von verschiedenen Phylliten dominiert, die wechselnd tektonisch zerschert vorliegen und deren generelle Gefügeverhältnisse von einem klaren Trend, nämlich mittelsteil bis steil annähernd gegen Norden einfallende Schieferungsflächen, dominiert werden.
- Abschnitt B: Um Station 295 kommt es zu einem sehr raschen Gebirgswechsel. Nach einer kurzen Übergangszone, die durch vergruste Quarzite gekennzeichnet ist, treten zuerst Rauhwacken auf, die nach kurzer Zeit von Kalk- und Dolomitmarmoren abgelöst werden. Phyllite treten nur als untergeordnete Scherkörper und eingequetschte Linsen auf. Dieser Abschnitt bis etwa Station 465 kann als Karbonatabschnitt bezeichnet werden. Er ist auch dafür verantwortlich, daß sich in diesem Abschnitt ein deutlicher morphologischer Rücken abbildet.
- Abschnitt C: Wiederum nach einem recht raschen Wechsel um Station 465 verläßt der Vortrieb das karbonatisch dominierte Gebirge, um in eine vorerst phyllitisch-mylonitische Melange zu gelangen, die in weiterer Folge zunehmend stark von Quarziten abgelöst wird. Die Quarzite treten in diesem Abschnitt vorwiegend stark zerrüttet bis sandig vergrust auf.

Die folgenden Abbildungen (Grafiken aus der **GeoDokuBank**) zeigen die Gesamtgesteinsverteilung in den beschriebenen drei Abschnitten und die Verteilung der jeweiligen Gesteinsgruppen (Zusammenfassung von lithologischen Einheiten in entsprechende Gruppen) über die jeweiligen Abschnitte in Form von Prozentganglinien. Die Legende zu den Diagrammen der Gesamtgesteinsverteilung ist unter Kapitel 3.1.3, Lithologie der aufgefahrenen Strecke ersichtlich.

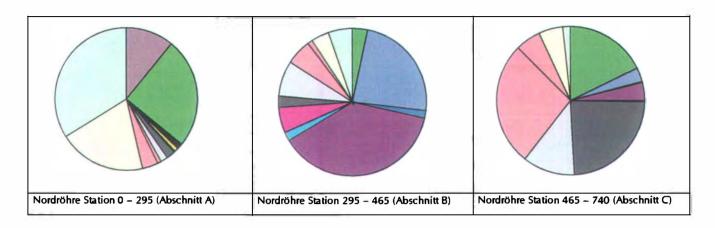


Abb. 10: Gesamtgesteinsverteilung innerhalb der einzelnen Abschnitte

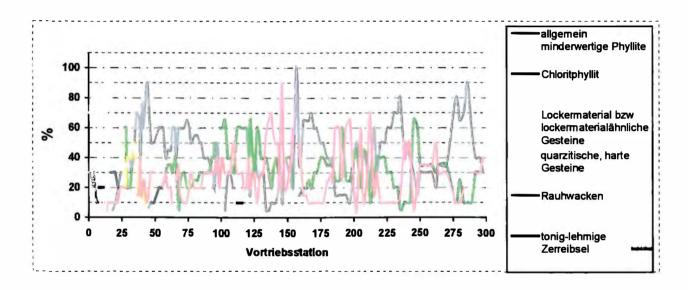


Abb. 11: Stationsbezogene Verteilung der Gesteinsgruppen Nordröhre Station 0 – 295 (Abschnitt A)

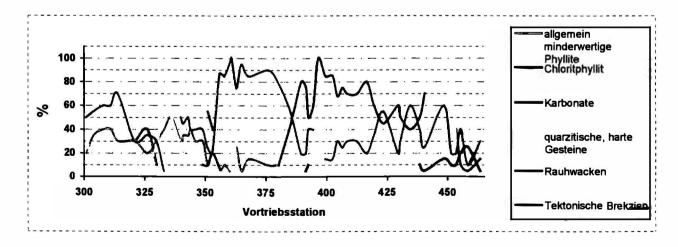


Abb. 12: Stationsbezogene Verteilung der Gesteinsgruppen Nordröhre Station 295 – 465 (Abschnitt B)

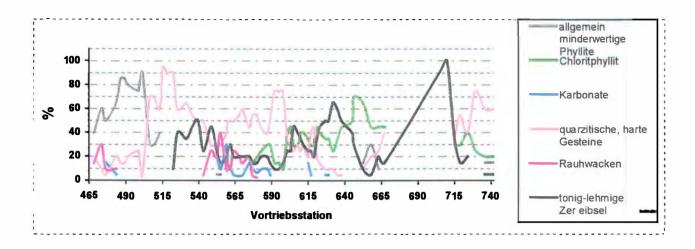


Abb. 13: Stationsbezogene Verteilung der Gesteinsgruppen Nordröhre Station 465 – 750 (Abschnitt C)

5.1.2 Strukturelle Gegebenheiten und Gefügeinventar

Wie bereits kurz angeführt, können in drei unterscheidbaren Gebirgsabschnitten auch deutlich unterschiedliche Gefügeverhältnisse festgestellt werden.

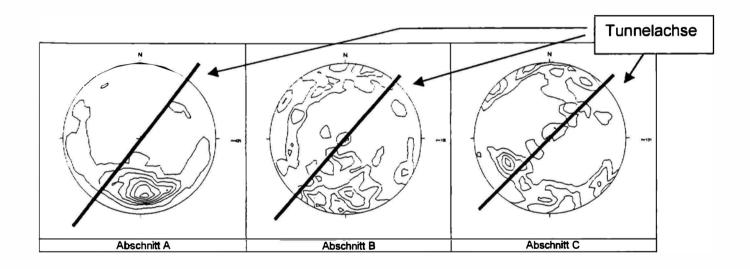


Abb. 14: Gefügeverhältnisse Nordröhre

- Abschnitt A: Im Verlauf des Abschnittes A herrschen weitestgehend einheitliche Lagerungsverhältnisse vor, wobei die gemessenen Schieferungsflächen als dominierendes Gefügeelement durchschnittlich mittelsteil gegen Norden einfallen. Grundsätzlich stellen diese Verhältnisse in Bezug zur Tunnelachse recht günstige Verhältnisse dar, wobei lediglich durch örtliche Verstellungen gefügebedingte Verschlechterungen der Vortriebsbedingungen auftraten.
- Abschnitt B: Ab Erreichen des Abschnittes B kommt es zu einer Auflösung des bisher recht klar definierten Gefügeinventars, wobei bereits hier eine Tendenz zu eher achsparallelen steilen Strukturen bemerkbar ist. Grundsätzlich sind aus Sicht dieser Lagerungsverhältnisse eher günstige Ausbruchsbedingungen ableitbar, die aber wiederum durch den wechselnden Gesteinsbestand vorerst (v.a. in den rauhwackenbetonten Abschnitten) negativ beeinflußt wurden. Erst in den Karbonaten kommt dieser positive Einfluß voll zum Tragen.
- Abschnitt C: Der auf den Karbonatabschnitt folgende Bereich zeigt noch deutlicher das häufige Auftreten steiler tunnelachsparaller Strukturen. Die quer zur Tunnelachse verlaufenden Trennflächen können bedingt der in diesem Bereich vermuteten Störung zugeschrieben werden, welche sich aber ansonsten praktisch nicht bemerkbar machte.

5.2 Südröhre

5.2.1 Lithologie und Gebirgsbeschaffenheit

- Abschnitt A: Die lithologische Zusammensetzung in diesem Abschnitt entspricht weitestgehend hinsichtlich Gesteinsbestand und -zustand den im Abschnitt A der Nordröhre beschriebenen Verhältnissen.
- Abschnitt B: Der Abschnitt B in der Südröhre weicht allerdings in seiner Gesteinszusammensetzung wesentlich vom entsprechenden Abschnitt der Nordröhre ab. In der Südröhre dominieren in diesem Bereich Quarzite wechselhafter Ausbildung, wohingegen die Karbonate nur einen vergleichsweise geringen Anteil einnehmen.

Die folgenden Abbildungen (Grafiken aus der **GeoDokuBank**) zeigen die Gesamtgesteinsverteilung in den beschriebenen Abschnitten und die Verteilung der jeweiligen Gesteinsgruppen (Zusammenfassung von lithologischen Einheiten in entsprechende Gruppen) über die jeweiligen Abschnitte in Form von Prozentganglinien. Die Legende zu den Diagrammen der Gesamtgesteinsverteilung ist unter Kapitel 3.1.3, Lithologie der aufgefahrenen Strecke ersichtlich.

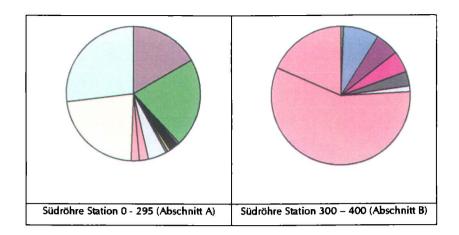


Abb. 15: Gesamtgesteinsverteilung innerhalb der einzelnen Abschnitte

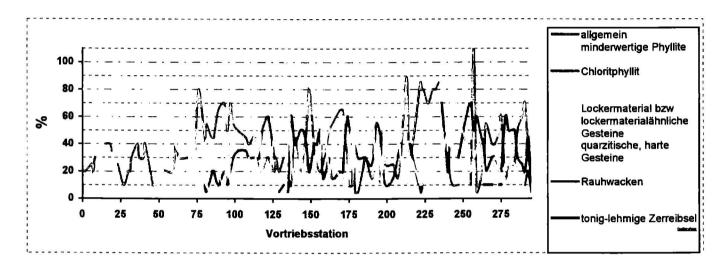


Abb. 16: Stationsbezogene Verteilung der Gesteinsgruppen Südröhre Station 0 – 295 (Abschnitt A)

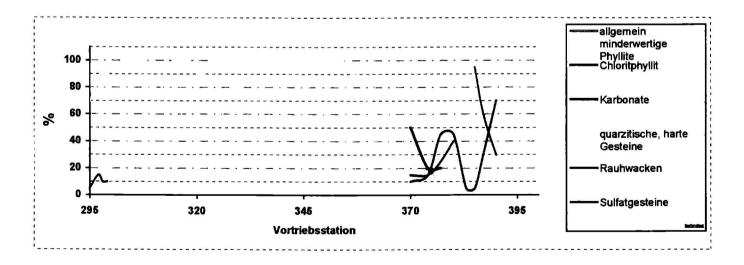


Abb. 17: Stationsbezogene Verteilung der Gesteinsgruppen Südröhre Station 300 – 400

5.2.2 Strukturelle Gegebenheiten und Gefügeinventar

Wie bereits angeführt, können in der Südröhre im bisher aufgefahrenen Abschnitt zwei unterscheidbare Gebirgsabschnitte mit entsprechend deutlich unterschiedlichen Gefügeverhältnissen festgestellt werden, wobei der Abschnitt B hinsichtlich seiner Gefügeeigenschaften in zwei Untergruppen geteilt werden muß.

Abschnitt A: Im Abschnitt A herrschen im wesentlichen gleiche Gefügeverhältnisse wie im vergleichbaren Abschnitt der Nordröhre vor. Es kommt allerdings, auch in den folgenden Gefügediagrammen, deutlich zum Ausdruck, daß die Schieferungsflächen hier noch wesentlich straffer ausgerichtet sind.

Im Gebirgsabschnitt B können zwei unterschiedliche Orientierungsbereiche des Gefügeinventars beobachtet werden.

Abschnitt B1:In diesem Bereich, der vorwiegend von Quarziten aufgebaut wird, ist noch das nordvergente Element der Schieferung recht deutlich ausgeprägt, allerdings bereits mit einer wesentlich breiteren Streuung.

Abschnitt B2: Dieser Abschnitt ist der kurze karbonatisch dominierte Bereich im Abschnitt B. Hier kommt es, wie auch im Abschnitt B der Nordröhre, zu einem Verschwenken und zu einer Versteilung der Schieferungs- und vor allem der Schichtflächen. Diese Trennflächen verlaufen hier großteils steilstehend ± tunnelachsparallel.

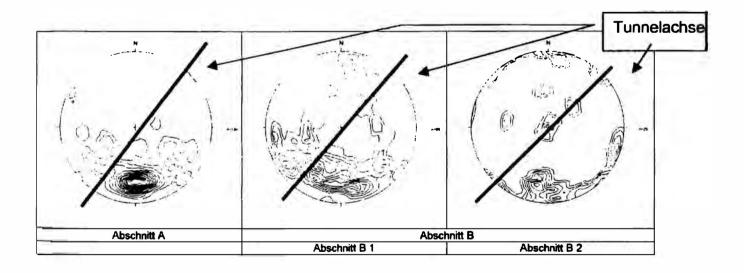


Abb. 18: Gefügeverhältnisse Südröhre

5.3 Interpretation der beschriebenen Verhältnisse

Aus den in den vorhergehenden Kapiteln beschriebenen Verhältnissen lassen sich folgende Interpretationen der lokalen geologischen Situation ableiten:

Auf den ersten 300 Metern beider Tunnelvortriebe herrschen recht einheitliche phyllitisch dominierte Gesteinsabfolgen der obertriassischen Keuperformation vor, die auch hinsichtlich ihrer generellen Lagerungsverhältnisse ein einheitliches Bild liefern. Durch die inverse Lagerung des Liegendschenkels der Semmeringdecke, der den wesentlichen Schichtaufbau des Projektsgebietes darstellt, sind wiederholt Einschuppungen von Scherkörpern und -spänen des altkristallinen Basements in die Keuperphyllite zu beobachten.

Ab etwa Station 300 bis ca. 450 wird diese phyllitische Entwicklung von kompetenteren Rauhwacken und schließlich Karbonaten unterbrochen. Das Auftreten dieser härteren Gesteine bildet sich auch in der Morphologie des darüberliegenden Geländes deutlich in Form eines in Richtung Tal streichenden Rückens ab. In Zusammenschau der Verhältnisse in den beiden Tunnelröhren zeigt sich, daß dieser Rücken bzw. dessen Härtlingskern deutlich von der Bergseite zum Tal hin auskeilt bzw. ausdünnt. Es liegt die Vermutung nahe, daß es sich bei diesem Sporn um einen Ausläufer vom kalkalpinen Hinterland zum Tal hin handeln könnte. Andererseits könnte es sich aber auch um eine isolierte Großscholle handeln, die aufgrund tektonischer Vorgänge (Mürztallineament) in die phylltische "Matrix" eingespießt bzw. rotiert sein könnte. Dafür würden die veränderten Lagerungsverhältnisse (Vorherrschen tunnelachsparalleler Strukturen) sprechen. Eine exakte Deutung ist aber auch unter Zugrundelegung der aus der geologischen Dokumentation erlangten Erkenntnisse zur Zeit nicht möglich.

Anschließend an diese Zone gelangt man wiederum in inkompetente Abfolgen (zerrüttete Quarzite und zerscherte Phyllite), die einem breiten Störungsband zugeschrieben werden können, das quer zur Tunnelachse durchzieht, wobei allerdings die gemessenen Gefügewerte nur untergeordnet Anhaltspunkte für diese Annahme liefern.

Der folgende schematische geologische Lageplan auf Tunnelniveau soll die beschriebenen Verhältnisse veranschaulichen.

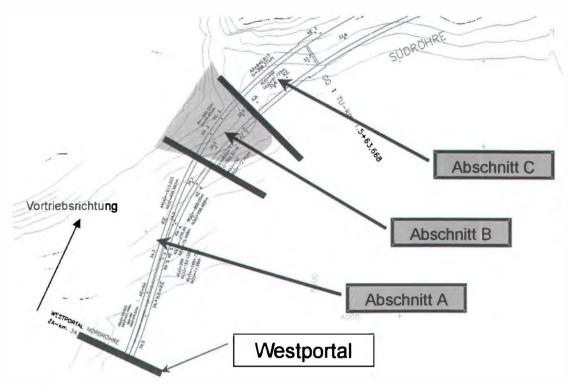


Abb. 19: Schematischer geologischer Lageplan

6 Baugeologische Probleme - geotechnische Lösungen

Die beschriebenen Verhältnisse resultierten in einer Fülle von baugeologisch - geotechnisch bedingten Problemen bei der Bewältigung des Gebirges.

Zu diesen zählen:

- ⇒ geringe Überlagerung (wenige Meter bis max 40 Meter im Bereich des Härtlingsrückens)
- ⇒ der generell schlechte Gebirgszustand
- ⇒ die strukturellen Gegebenheiten
- ⇒ der Gesteinsbestand
- ⇒ das Gebirgsverhalten
- ⇒ die Verformungen an der Oberfläche
- ⇒ die hohlraumbezogenen Verformungen
- ⇒ das Ausbruchsverhalten
- ⇒ das Verhalten der Ortsbrust
- ⇒ das Verhalten der Laibung

Durch die auf den ersten 200 Metern sehr geringe Überlagerung war zu erkennen, daß es zu keiner Ausbildung eines Gebirgstragringes kam. Dies manifestierte sich in bedeutenden Oberflächensetzungen, die natürlich auch durch den schlechten Gebirgszustand (inkompetente Gesteine, starke tektonische Zerscherung und Mylonitisierung) begünstigt wurden. Zusätzlich dazu zeigte sich die Ortsbrust generell

sehr instabil und konnte nur in Teilquerschnitten unter Zuhilfenahme eines Brustkeiles und massiver Ortsbruststützmaßnahmen gehalten werden.

Die intensiven geotechnischen Messungen im Hohlraum als auch an der Oberfläche zeigten, daß die Oberflächensetzungen in Relation zu den Setzungen an der Tunnelfirste anfangs ein wesentlich größeres Ausmaß hatten.

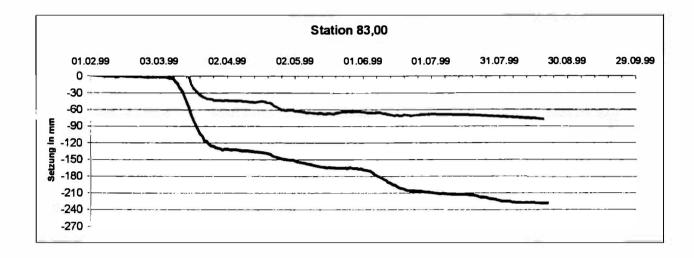


Abb. 20: Verformungslinien Oberfläche Achspunkt (blau) und Firstpunkt (rosa) vor dem verstärkten Einsatz von Brustankem

Die Ursache konnte schließlich darin gefunden werden, daß für die Bewältigung des Hereindrängens des Gebirges über die Ortsbrust die gesetzten Maßnahmen anfangs nicht ausreichten. Das Massendefizit an der Geländeoberfläche gelangte zu etwa 80 % über die Ortsbrust in den Ausbruchshohlraum (durch Messungen der Längsverformungskomponente an der Ortsbrust belegt). Erst wesentlich verstärkte Sicherungsmaßnahmen an der Ortsbrust, vor allem verstärkter Einsatz von Brustankern, konnte diese Tendenz bedeutend herabsetzen.

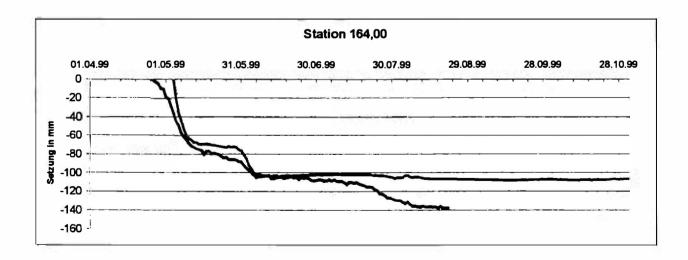


Abb. 21: Verformungslinien Oberfläche Achspunkt (blau) und Firstpunkt (rosa) nach dem verstärkten Einsatz von Brustankern

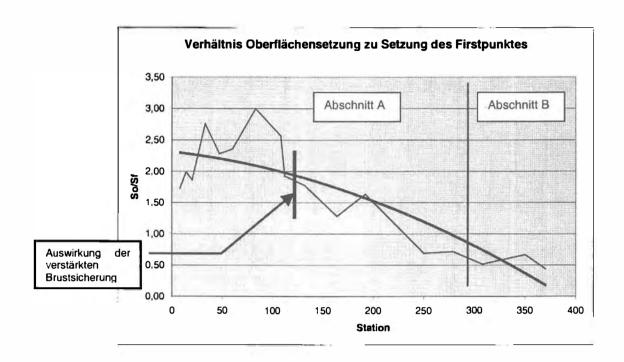


Abb. 22: Geomechanisches Verhalten (So = Setzung Oberfläche, Sf = Setzung Firste)

Aus dem obigen Diagramm geht hervor, daß das Verhältnis Oberflächensetzung zu Firstsetzung anfangs bis 3:1 betrug. Erst mit dem Einsatz verstärkter Brustsicherungsmaßnahmen konnte dieses Verhältnis entscheidend vermindert werden und damit ein wertvoller Beitrag zur Beherrschung des Gebirges im weiteren Vortriebsverlauf geschaffen werden.

7 Resumee und Ausblick

Der bisherige Vortrieb in beiden Tunnelröhren bestätigte das in diesem Gebiet zu erwartende extrem wechselhafte und schwierige Gebirge. Die verschiedenen Generationen an tektonischen Ereignissen bis hin zu den quartären periglazialen Einflüssen führten zu einem intensiv durchbewegten und bereichsweise stark entfestigten und mylonitisierten Gebirge, das auch hinsichtlich seiner lithologischen Zusammensetzung eine große Streubreite aufweist.

Die geologischen und geotechnischen Rahmenbedingungen bedingten bisher durchwegs wesentlich erschwerte Vortriebsbedingungen und machen das gegenständliche Projekt sicherlich zu einem der schwierigsten derzeit in Österreich laufenden Tunnelprojekte.

Aufgrund der derzeitigen Erkenntnisse muß auch im weiteren Verlauf des Projektes mit durchwegs schwierigen Verhältnissen gerechnet werde, wobei natürlich aufgrund der

generellen Heterogenität des Gebirges bereichsweise auch etwas bessere Abschnitte möglich sind (insbesondere beim Antreffen von Karbonaten).

Aufgrund der seichten Lehnenlage des Tunnels ist jedenfalls stets erhöhte Vorsicht geboten. Die beschriebenen Verhältnisse sind unter Bedachtnahme der auftretenden oder möglichen Probleme nur in enger Zusammenarbeit und laufender Abstimmung aller am Projekt Beteiligten bewältigbar. Dabei spielt der dokumentierende Geologe sicher eine wesentliche Rolle, indem er aus der laufenden Dokumentation heraus eine ständige Korrelation zwischen beiden Röhren, eine kurze Vorausprognose und damit ein räumliches Bild der jeweiligen geologischen Situation im Vortriebsbereich liefern kann.

Autor:

Dr. Norbert HEIM Technisches Büro für Geologie & Geotechnik A-1170 Wien, Wurlitzergasse 94/29

Karstwasserschutz und Vulnerabilität – Entwicklung eines Modells in den Karnischen Alpen

Georg CICHOCKI, Hartmut ZOJER & Hans ZOJER

1. Zielsetzung

In der Hydrogeologie spielt die Infiltration von Wasser in den Untergrund und die Exfiltration eine bedeutende Rolle. Vor allem im Bereich der Trinkwasserversorgung – im speziellen in der Festlegung von Schutz- und Schongebieten – ist die Kenntnis über den Wasser- und Stofftransport sehr wichtig. Deshalb werden schon seit Jahrzehnten Untersuchungen über die Sickerwege und –geschwindigkeiten von Wasser durchgeführt. Im Hinblick auf die Sicherung und den Schutz der Resource Wasser gewinnen insbesondere Kluft- und Karstgebiete eine immer größere Bedeutung für die Wasserversorgung. Eine Dimensionierung des Quellschutzgebietes ist aber bekanntlich in Gebieten mit Karstwasservorkommen aufgrund der schnellen Fließbewegung des Wassers nicht immer einfach. Die Auslegung der "60 Tage – Grenze" für die Dimensionierung der Schutzzone II ist allerdings in diesem Aquifer zumeist nicht anwendbar und wird deshalb seit den letzten Jahren mit Hilfe der Frage der Vulnerabilität eines Gebietes neu bewertet.

Das Ziel dieses Projektes ist es, ein für alpine Räume gängiges Vulnerabilitätsmodell zu entwickeln. Dadurch soll die Frage der Dimensionierung von Schutz- und Schongebieten neu überarbeitet und verbessert werden. Zusätzlich wird dadurch die Landnutzung in alpinen Räumen optimiert und dadurch das Schadenspotential für Karstgrundwasserkörper minimiert.

2. Vulnerabilität

Die Frage der Vulnerabilität steht seit den letzten Jahren immer mehr im Mittelpunkt der internationalen hydrologischen Forschungen. Es wurden auch bereits mehrere Methoden zur Vulnerabilitätskartierung entwickelt (z.B.: EPIK, GERMAN APROACH), die allerdings entweder noch nicht ausreichend getestet wurden, oder deren Anwendung sich nur auf spezielle Untersuchungsgebiete beschränkt. Um nun eine Vunerabilitätskartierung in hochalpinen Karbonatgesteinen durchführen zu können, wurde in Österreich im Zuge der Diplomarbeiten von G. Cichocki und H. Zojer ein erstes Konzept mit folgenden Bewertungskriterien erarbeitet:

- Boden
- Hangneigung
- unkonsolidierter Fels
- Infiltration
- konsolidierter Fels
- Exfiltration
- Verweilzeit des Wassers

Dem 1995 von der Europäischen Kommission abgeschlossenen Projekt zum Karst- und Grundwasserschutz "COST action 65" folgte 1997 das Projekt "COST action 620", das sich zum Ziel gesetzt hat, Methoden zur Bewertung und Kartierung der dem jeweiligen Gestein eigenen Vulnerabiltät zu entwickeln. Zu diesem Zweck wurden das von DOERFLIGER, N. & F. ZWAHLEN (1997) für den Schweizer Jura entwickelte Konzept EPIK und die in Deutschland herausgearbeitete Methode von HOYER, M. VON & B. SÖFNER (1998) sowie die österreichische Methode (CICHOCKI G. & H. ZOJER) ins Leben gerufen. Diese Konzepte werden laufend weiterentwickelt und ihre Anwendung getestet. Ein aktueller Beitrag liegt von GOGU, R.C. & A. DASSARGUES (2000) vor.

Diese Methode zur Bewertung der Vulnerabilität wird nun als Grundlage für weitere Überlegungen eingesetzt. Der Unterschied des österreichischen Ansatzes zu den anderen Konzepten liegt in der genaueren Bewertung der Infiltration und Exfiltration, wodurch die Grundwasserwege in Karbonatgesteinen besser und objektiver erfaßt werden sollen.

Für das Projektgebiet wurden zwei Testgebiete in den östlichen Karnischen Alpen herangezogen, die unterschiedlichen ökologischen Beeinflussungen ausgesetzt sind:

Anthropogen beeinflusste Region:

Schiregion Naßfeld-Rudnigalm: An den Quellen im Bereich von Schipisten soll der anthropogene Einfluss durch die Änderung mitberücksichtigt und analysiert werden. Die Geologie besteht in diesem Bereich vorwiegend aus mesozoischen Kalken, die von "wasserstauenden" Schiefergesteinsschichten unterlagert werden. In einigen Bereichen wird diese Gesteinsabfolge durch Blockschutt- und Moränenablagerungen überprägt.

Anthropogen unbeeinflusste Region:

Gebiet nördlich des Trog- und Zweikofels: Dieses Gebiet blieb bislang von anthropogenen Einflüssen (die Landnutzung betreffend) verschont und weist eine ähnliche Geologie wie im Bereich der Schiregion Naßfeld-Rudnigalm auf.

3. Grundlagen des österreichischen Methodenansatzes für hochalpine Bereiche

a) ein besseres Verständnis der Infiltration von Wasser in Karbonatgesteinen:

Dabei werden vor allem die Veränderungen der chemisch – physikalischen Eigenschaften und die unterschiedlichen Sickerwege und –geschwindigkeiten der Infiltrationswässer vom Eintritt in die Bodenzone bis zum Austritt an Quellen untersucht. Überdies wird angestrebt, Kenntnisse über den Wassertransport unter bestimmten Infiltrationsbedingungen (Gegensatz von anthropogen beeinflußten Bereichen zu natürlich belassenen Arealen) in Karbonatgesteinen und deren Überdeckungen zu erlangen.

b) eine Überprüfung der Infiltrationsbedingungen durch Beobachtung der Exfiltration:

Mittels mehrerer Messreihen von aus Niederschlagsereignissen gewonnenen Ganglinien werden die Abflusskomponenten separiert und Aussagen zum Speicherverhalten des Systems getroffen, woraus sich ein Konnex zu den Ergebnissen der Infiltration ableiten lässt.

c) eine kritische Diskussion über die Anwendbarkeit bisheriger Speichermodelle für Karbonatgesteine:

Dabei soll mit Hilfe bereits bestehender Wassertransport-, Speicher- und Mischungsmodelle die Dynamik von Wasser in Karbonatkomplexen dargestellt und deren Grenzen aufgezeigt werden.

d) ein auf andere Gebiete übertragbares Konzept einer Vulnerabilitätsbewertung für hochalpine Karbonatregionen:

Eine anfängliche Idee wurde bereits im Zuge der Diplomarbeiten von G. CICHOCKI und Ht. ZOJER entwickelt. In einem synoptischen Ansatz wird eine genaue Bewertung dieses Konzeptes vorgenommen und die Anwendbarkeit überprüft. Die Abstufung eines Gebietes in unterschiedlich verletzbare Bereiche soll schließlich für eine Beurteilung und Festlegung einer nachhaltigen Bewirtschaftung stark belasteter Hochgebirgsregionen herangezogen werden.

4. Methodische Schritte

Um die Dynamik des Wassers in einem Karbonatkomplex genau untersuchen zu können, müssen jene Parameter gemessen werden, die zum einen den Wassertransport und zum anderen den Stofftransport repräsentieren. Dafür eignen sich vor allem Isotopen- und chemische Analysen.

Zusätzlich werden Tracertests durchgeführt, um einen Überblick über die Verweilzeit des Wassers in Abhängigkeit zur Größe des Einzugsgebietes zu erlangen. Alle diese Untersuchungen können z.B. im Bereich des Rudniggrabens dazu führen, festzustellen, welche Quellen von anthropogenen Einflüssen, wie etwa Kunstschneeauftrag an Skipisten oder Almwirtschaft, betroffen sind. Diese Kenntnis ist vor allem für die Fragestellung wichtig, inwieweit derartige Naturveränderungen den Wasserhaushalt verändern.

Unter Berücksichtigung der Verdunstung und Vegetation werden die Isotope im Wasser zur Beschreibung der Infiltration herangezogen. Dadurch ist es möglich, den Wassertransport im Gesamtsystem Überdeckung – konsolidierter Fels abzuschätzen und die Herkunft der Quellwässer und deren Beeinflussung durch Niederschlagsereignisse genauer zu bestimmen.

Anhand eines neuen Konzeptes soll die Verkarstung und Trennflächenausbildung im Karbonatgestein mit Hilfe der Hydrogeologie im Vergleich zur Strukturgeologie untersucht werden. Um eine subjektive Beurteilung der Wasserwegigkeit über Klüfte

und korrosive Erweiterungen einer geologischen Einheit zu umgehen, wird versucht, durch die Beziehung zwischen Anzahl/Dichte der Quellen und der Fläche der geologischen Einheit auf das Trennflächengefüge rückzuschließen.

Einen weiteren Schwerpunkt zur Untersuchung des Wasserhaushaltes von Karbonataquiferen stellt die Exfiltration von Grundwassersystemen dar. Insbesondere können Ganglinien Hinweise zum Speicherverhalten von Grundwasserkörpern im Festgestein geben. Mittels erweiterter Berechnungsmethoden des Auslaufkoeffizienten (vergl. Auslaufkoeffizient α nach MAILLET) soll der Zwischenabfluss nach mathematischer Analyse vom Basisabfluss abgetrennt werden. Einzelne Abflussereignisse werden ausgewählt und Abflussganglinien in Bezug zum Niederschlag gestellt. Abflussganglinienseparation und stoffbezogene Komponententrennung sollen Hinweise auf die Wasserzirkulation und die jeweiligen Abflussanteile (Basisabfluss, Zwischenabfluss, Direktabfluss) im System geben. Dabei wird nicht nur der Ganglinienabfall (die Entleerung des Systems) beobachtet und ausgewertet, sondern auch der Anstieg der Kurve (die Auffüllung des Wasserspeichers) analysiert.

5. Ergebnisse aus dem Naßfeldgebiet

a) Boden

Zur Beurteilung des Faktor Boden wird die nutzbare Feldkapazität (nFK) herangezogen. Die Bodenkennwerte wurden aus der Bodenkarte Österreichs (Maßstab 1:100.000) entnommen und mit den unterschiedlichen Gesteinseinheiten korreliert. In den Dolomiten und Kalken, die meist von Rendsinen überlagert werden, wird die nFK mit sehr gering bis gering angeschätzt. Eine geringe bis mittlere nutzbare Feldkapazität ist Rankern und seichtgründigen silikatischen Braunerden eigen, meistens assoziiert mit Schiefern und Sandsteinen. Rendsinen und Braunerden hingegen, die über Moränen lagern, weisen örtlich, besonders über silikatischen Moränen, eine hohe Feldkapazität auf.

b) Hangneigung

Im Rahmen der Vulnerabilitätsbewertung spielt die Hangneigung eine beachtliche Rolle, weil sie andere Parameter, wie z.B. Boden und Infiltration, beeinflusst. Die Steilheit der Hänge im Untersuchungsgebiet bedingt einen nennenswerten Oberflächenabfluss bei Starkregen, der in weiten Bereichen in den anlagernden Schuttfächern versickert.

c) unkonsolidierte Überdeckung

Die Korngrößenverteilung, die Kompaktion der Mineralien, der geologische Inhalt (im Hinblick auf den Ionenaustausch) und damit die Wasserdurchlässigkeit im Untersuchungsgebiet bilden die Grundlage für eine Bewertung, wobei folgende Klassen, bezogen auf eine einheitliche Mächtigkeit, unterschieden werden können:

- Blockschutt
- Hangschutt mit Kalkkomponenten
- Hangschutt mit Dolomitkomponenten
- Hangschutt mit Schieferkomponenten
- quartäre Ablagerungen mit einem karbonatischen Hauptgemengeanteil
- quartäre Ablagerungen mit einem silikatischen Hauptgemengeanteil

Die Schwierigkeit, ähnlich wie beim Faktor Boden, liegt in der Abschätzung der Sedimentmächtigkeit. Sie muss für den Vulnerabilitätsansatz in jedem Fall berücksichtigt werden, denn je länger das Sickerwasser in dieser Zone verweilt, desto stärker können mechanische, physikochemische und mikrobiologische Prozesse auf das Wasser einwirken und daher besser Schadstoffe abbauen.

d) Infiltration

Der Parameter Infiltration wird vor allem über die Wasserbilanzgleichung bestimmt. Für die Berechnungen wurden die Niederschlagsstationen Förolach und Naßfeld sowie die Abflusskennwerte Garnitzenbach und Oselitzenbach herangezogen. Die Verdunstung wurde nach mathematischen Verfahren mit 21% bestimmt und der unterirdische Abfluss, gleichgesetzt mit der Infiltration, über die Abflussrezession an den beiden Bächen berechnet. Die mittlere Infiltrationsrate liegt knapp über 500 mm.

e) konsolidierter Fels

Grundlage für diese Bewertung sind das Trennflächengefüge, Karsterscheinungen und Massenbewegungen. Um eine subjetive Beschreibung der Klüftigkeit zu umgehen, wird versucht, durch die Beziehung zwischen der Quelldichte und den geologischen Einheiten auf das Trennflächengefüge zu schließen.

f) Exfiltration

Die mathematische Analyse von Abflussereignissen führt zur Berechnung des Speicherverhaltens von Aquifern. Somit kann auf die Wasserwegigkeit des gesamten Gebietes ohne Unterscheidung der Einzelparameter Boden – Überdeckung – Fels geschlossen werden. Unter Berücksichtigung des Auslaufkoeffizienten wurde berechnet, dass bei monatlichem Niederwasser (MoMNQ) etwas mehr als 2 Mio m³ als auslaufbares Volumen unterirdisch gespeichert sind. Weitere Ansätze für die Exfiltration sind Dauerbeobachtungen ausgewählter Parameter bei Quellen, die auch die jahreszeitliche Dynamik des Abflusses einschließen.

g) Verweilzeit des Wassers

Dieser Faktor dient lediglich der Kontrolle der anderen Parameter.

6. Zusammenfassung

Die in der österreichischen Methode zur Bestimmung der Vulnerabilität verwendeten Untersuchungskriterien unterscheiden sich in einigen Punkten von den bereits bestehenden Konzepten:

a) Boden

Schweiz (EPIK): Aussagen über Bohrlochbeschreibungen und Auswertung von

Bodenproben

Deutschland: nutzbare Feldkapazität und bodenkundliche Kartierungen Österreich: nutzbare Feldkapazität und bodenkundliche Kartierungen

b) Hangneigung

Schweiz (EPIK): Computermodelle über Hangneigung; Verbindung zur Infiltration

Deutschland: geht nicht ein; Annahme einer horizontalen Fläche

Österreich: über Karten und GIS

c) unkonsolidierte Überdeckung

Schweiz (EPIK): ähnlich wie bei der Beschreibung des Bodens

Deutschland: Kationenaustauschvermögen

Österreich: lonenaustausch; Unterscheidung der Ablagerungen und deren Mächtigkeit

d) Infiltration

Schweiz (EPIK): wird über die Hangneigung berechnet

Deutschland: berechnet über die Wasserbilanz und Neubildungsrate Österreich: Bestimmung über die Wasserbilanz und über das MoMNQ

e) konsolidierter Fels

Schweiz (EPIK): Epikarst und Kluftnetz

Deutschland: Gesteinsstruktur

Österreich: Gesteinsstruktur und Quelldichte/Schüttung

f) Exfiltration

Schweiz (EPIK): nicht erwähnt Deutschland: nicht erwähnt

Österreich: Schwankungen von Messparametern; Rezessionsanalyse des Abflusses

g) Verweilzeit

Schweiz (EPIK): nicht erwähnt

Deutschland: Isotopenmessungen zur Berechnung des Wasseralters Österreich: Isotopenmessungen zur Berechnung des Wasseralters

Literatur

- СІСНОСКІ, G. (1999): Zur Hydrogeologie der östlichen Karnischen Alpen (Egger Alm Poludnig Oisternig) Untersuchungen zur Vulnerabilität von (Karst-) Aquiferen. Diplomarbeit an der K.F.-Uni Graz.
- DOERFLIGER, N. & F. ZWAHLEN (1997): Méthode de determination des zones de protection en régions karstoques, Cartographie multicritére de la vulnerabilité (methode EPIK. Rapport pour le service Hydrogéologique ét Géologique National (OFEFP).
- DOERFLINGER, N., P.-Y. JEANNIN et.al. (1999): Water vulnerability assessment in karst environments: a new method of defining protection areas using a multi-attribute approach and GIS tools (EPIK method). Environmental Geology, Springer Verlag, 1999.
- GOGU, R. C. & A. DASSARGUES (2000): Sensitivity analysis for the EPIK method of vulnerability assessment in a small karstic aquifer, Southern Belgium. Hydrology Journal (2000) 8: 337-345. Springer Verlag.
- VON HOYER, M. & B. SÖFNER (1998): COST Action 620: Groundwater Vulnerability Mapping in Carbonate Areas of Germany- BA für Geowissenschaften u. Rohstoffe Hannover, Archiv Nr.117 854, Hannover 1998.
- ZOJER, H. et al. (1996): Erfahrung mit dem Einsatz von Umwelttracern in der Abflußanalyse. Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft, (Zur Interpraevent in Garmisch Partenkirchen), Heft 5/6, Springer, Wien New York 1996.
- ZOJER, Ht. (1999): Hydrogeologische Untersuchungen in den Karnischen Alpen zwischen Rudnigbach und Garnitzenbach Vulnerabilitätskartierung alpiner (Karbonat-) Aquifere. Diplomarbeit an der Karl-Franzens und Technischen Universität Graz.

Autoren:

Mag. Georg CICHOCKI
Mag. Hartmut ZOJER
Univ.Prof.Dr. Hans ZOJER
Joanneum Research Graz
Institut für Hydrogeologie und Geothermie
ihg @ joanneum.ac.at

Angewandte Tonmineralogie im Tunnelbau – Möglichkeiten und Grenzen quantitativer Phasenanalyse

Reiner DOHRMANN, Kristian UFER und F. Michael MEYER

1 Einleitung und Problemstellung

Im Tunnelbau und bei unterirdischen Bauverfahren werden vielfach Bentonite eingesetzt. Ende des 19. Jahrhunderts gab es für Bentonite erste bedeutende Anwendungen im Baubereich bei vertikalen Bohrungen (Krampitz und Weinmann, 1999). Bereits zu dieser Zeit wurde das besondere Fließverhalten des Bentonits ausgenutzt, um Bohrklein nach Übertage zu fördern und um die Bohrlochwandung zu stabilisieren. Ein weite Verbreitung fand diese Anwendung durch den Ölbohrindustrieboom in der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts und durch die Ausführung von Schlitzwänden mit Bentonitsuspensionen (Veder, 1975) in den 50er Jahren.

Aus Japan stammt die Entwicklung einer Schildvortriebsmaschine mit flüssigkeitsgestützter Ortsbrust im Jahre 1967. Anfang der 70er Jahre wurde der Hydroschildvortrieb im Tunnelbau mit Bentonitsuspensionen Stand der Technik. Bei dieser Vortriebsweise wird das hereingewonnene Erdreich mittels einer Bentonittrübe nach Übertage gefördert. Neben dem Austragen des Bohrkleins sorgt die Trübe dafür, daß die Ortsbrust gestützt, der Zufluß von Grundwasser minimiert und die Reibung des Schildes und der Bohrwerkzeuge der Tunnelbohrmaschine (TBM) verringert wird. Die Regeneration der Bentonittrübe erfolgt mit einer speziellen Aufbereitungsanlage. Dabei wird das Erdreich abgetrennt und die gereinigte Bentonitsuspension vorzugsweise wieder in den Kreislauf gegeben. Eine Bentonitseparieranlage besteht aus Stangensizern zur Grobkornabtrennung, Hydrozyklonen mit unterschiedlichen Trennschnitten sowie Siebmaschinen zur Entwässerung.

Rahmen eines Gemeinschaftsprojektes des Lehr- und Forschungsgebietes Aufbereitung mineralischer Rohstoffe (AMR) und des Institut für Mineralogie und Lagerstättenlehre (IML) der RWTH Aachen in Zusammenarbeit mit der Schauenburg Maschinen- und Anlagenbau GmbH sowie der IBECO Bentonit-Technologie GmbH wurden Untersuchungen zur Optimierung einer solchen Anlage durchgeführt (Müller et al., 1999; Ufer, 1999). Zum einen wurden die Einflüsse verschiedener Anmachwässer auf die Qualität der Bentonittrübe und die Auswirkungen auf das Trennverhalten im Hydrozyklon untersucht. Weiterhin wurden Optimierungen der Kombination der Aggregate Hydrozyklon und Entwässerungssieb angestrebt. Ziel war es, eine geeignete analytische Methode zu entwickeln, mit der aufgrund vertragsrechtlicher Bedingungen seitens der industriellen Kooperationspartner Bentonitkonzentrationen von < 1 Gew.% (gemessen als Smektitgehalt) in dem abgetrennten Bohrklein bestimmt werden können. Die Einhaltung dieses Qualitätskriteriums ist unvermeidlich, um von Bentonitresten gereinigte Sandprodukte als Baumaterial einsetzen zu können. Aus den oben genannten Auflagen geht hervor, daß bei Verfehlung dieses Kennwertes das Material kostenintensiv deponiert werden muß.

Seit langer Zeit ist bekannt, daß der sichere Nachweis derartig geringer Konzentrationen an quellfähigen Tonmineralen ein sehr anspruchsvolles, wenn nicht unerreichbares Ziel darstellt (Ottner et al., 1996). Dies ist sicher eine wichtige und ernst zu nehmende Einschränkung bei der Betrachtung von Allgemeinfällen, das heißt bei der Analyse von typischen tonigen Sedimenten oder gar von Böden. Interessanter und daher im Bereich des realisierbaren ist jedoch die Analyse von nur einer Mineralart in einem isolierten technischen Prozeß (hier Technikumssimulation). Auf diese Randbedingungen wurde hier ein besonderer Schwerpunkt gelegt. Diese Studie soll daher aufzeigen, dass unter ganz definierten Bedingungen zum Beispiel bei einer Prozeßkontrolle die Ergebnisse zur quantitativen Tonmineralanalyse oder einer aus Eigenschafts-Messungen (z. B. Kationenaustauschkapazität) kalkulierbaren Kenngröße durchaus reproduzierbar und auch richtig sein können. Es soll ebenfalls gezeigt werden, dass solche Untersuchungen trotz aller berechtigter Einwände auch erfolgreich in der Praxis eingesetzt werden können. Es darf jedoch nicht daraus abgeleitet werden, dass prinzipiell jeder Ton oder Boden uneingeschränkt quantifizierbar sei.

2 Technikumssimulation einer Bohrgutaufbereitung

Im Rahmen des Projektes wurde die Technikumssimulation einer Bohrgutaufbereitung durchgeführt (Abb. 1). Dabei wurden mehrere Diplom- und Studienarbeiten (Ufer, 1999; Hütter, 1999, Steck et al., 1999) in enger Kooperation und an mehreren Standorten mit teilweise gemeinsamer analytischer Bearbeitung fertiggestellt. Ziel der dabei gewonnenen Erkenntnisse sollte die Optimierung der Hydrozyklon-Steuerung sein. Das Qualitätskriterium ist neben der Recyclingfähigkeit des Bentonits die Verwendbarkeit des Grobgutes (Sandprodukt aus dem Unterlauf des Hydrozyklons) als Baumaterial.

Zur Herstellung von mit Bohrklein belasteten Bentonittrüben wurden Suspensionen aus handelsüblichen Industrieprodukten hergestellt. Hierbei handelt es sich um Bentonite und repräsentativ für die Sandfraktion um einen Sand der Quarzwerke Frechen (Millisil, Korngröße (100-300 μ m). Das Material wurde eingehend mineralogisch und kolloidchemisch charakterisiert. Von fundamentaler Bedeutung für die rheologische Stabilität der Trübe sind Art und Menge an Fremdionen. Zum Studium dieser Parameter wurden folgende Anmachwässer verwendet:

Leitungswasser der Stadt Aachen, Aachener Leitungswasser, mit Salz künstlich zu Brackwasser vermischt, Aachener Leitungswasser, mit Huminstoffen befrachtet.

Bentonitsuspensionen weisen im täglichen Baustelleneinsatz eine gewisse Bandbreite im Bentonitanteil auf. Dieser Bereich wurde durch rheologische Voruntersuchungen und auf der Basis bekannter Praxiswerte erfaßt und eingegrenzt. Die Ergebnisse zeigen, dass eine Menge von 30, 40 und 50 g l⁻¹ Bentonit bei einer Sandmenge von etwa 250 g l⁻¹ für die Simulationen geeignet sind. Bei der Suspensionsherstellung wurde stets auf die Einstellung einer exakten Feststoffdichte von 1,16 g cm⁻³ geachtet. Aufgrund unzureichender rheologischer Kennwerte wurde auf eine Mischung von 50 g l⁻¹ Bentonit mit Huminstoff-belastetem Wasser verzichtet. Insgesamt acht verschiedene Mischungen pro eingesetztem Bentonit (Handelsbezeichnung B 1 und HTX, IBECO) wurden

verwendet, also 16 Ansätze. Zur Trennung wurde der Hydrozyklon PC 75 der Firma Schauenburg benutzt (Müller et al., 1999).

Die aufbereitungstechnischen Untersuchungen wurden sowohl am AMR, als auch in Mannheim im Geotechnischen Labor der Firma IBECO durchgeführt. Parallel dazu wurde am IML die Analytik der quantitativen Smektitbestimmung so optimiert, dass Gehalte von < 1 Gew. % Bentonit in diesen künstlichen Mineralgemischen reproduzierbar und richtig nachgewiesen werden können. Dazu wurden 8 vollkommen verschiedene Verfahren systematisch auf ihre Eignung geprüft (Abb. 1).

Suspensions- Komponenten	Feststoff-Analytik KAK-basierend	Technikums- simulation
Bentonite - HTX - B1	Methylenblau Cu(II)Triethylentetramin Interkalation von	Rheologietests - Kugelharfe - Marsh-Trichter
Quarzsand - Millisil (100-300μπ)	- n-Alkylammonium - Potyvinylpyrrolidon (PVP)	Einstellung der Bentonittrüben
Anmachwässer aus Leitungswasser	Oxidation - Benzidin	Hydrozyklonversuche
- rein - salzhaltig - huminstoffhaltig	XRD - Interner Standard - Rietveld-basierende	Nachschaltung Entwässerungsschwingsieb Analytik, Optimierung
	Berechnung (Siroquant) Korngrößenanalytik - Siebung	und Bewerlung

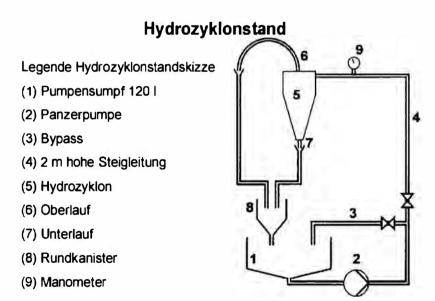


Abb. 1: Überblick über die Eingangsgrößen der beteiligten Komponenten, der eingesetzten Methodik, der im Technikum simulierten Verfahrensschritte und schematische Skizze des Technikumsstandes der Hydrozyklonanlage (aus Müller et al. 1999).

2.1 Quantitative Analyse von Bentonit

Grundlagen

Die quantitative Tonmineralanalyse ist eine der anspruchsvollsten Aufgaben in der Tonmineralogie. Bisher ist dieses Ziel selbst unter Einsatz aller handhabbaren Techniken noch unerreicht. Grund hierfür ist die sehr vielfältige Zusammensetzung und Variabilität der die Tonfraktion aufbauenden Minerale, amorphen und organischen Substanzen. Die Strukturen der am besten bekannten quellfähigen Tonminerale sind nach wie vor mit modernen Einkristallmethoden nicht meßbar und daher sind die Ergebnisse aller röntgenographischen Beugungs-Verfahren letztlich nur relativ grobe Näherungen.

Lagerstättentone, wie Bentonite oder Kaoline, sind in der Regel dadurch gekennzeichnet, dass nur eine Tonmineralart stark angereichert ist. Durch diese vereinfachende, annähernd monomineralische Situation ist eine Kontrolle der unterschiedlichen Horizonte bezüglich ihrer Phasenanteile möglich. Werden Bentonite untersucht, so ist eine Mengenangabe der Smektite nach Messung einer bestimmten Eigenschaft möglich (Kahr, 1998). Es existiert daher ein indirekter Weg zur Lösung der Frage der quantitativen Analyse. So konnten Dohrmann und Kaufhold (1998) mit einer Schnellmethode dieses Problem für den Bentonitbergbau durch Einsatz der in-situ Messung des spezifischen elektrischen Widerstandes lösen. Es muss jedoch gewährleistet sein, daß diese Eigenschaftskennwerte nicht durch systematische Fehler verfälscht werden. In dieser Studie wurde ein definiertes System verwendet (Technikumssimulation), bei dem die eingesetzten Rohstoffe und Flüssigkeiten bekannt sind. Die Ausgangsstoffe konnten vorher gründlich charakterisiert werden. Nur dadurch konnte die hier beschriebene Genauigkeit realisiert werden.

Bentonite werden seit langer Zeit mit Hilfe der Kationenaustauschkapazität (KAK) quantifiziert. Diese stellt eine der wichtigsten Eigenschaften von Smektiten dar, dem Hauptbestandteil von Bentoniten. Dabei handelt es sich um die Fähigkeit, Kationen in Zwischenschichten und an äußeren Oberflächen reversibel auszutauschen. Die übrigen Minerale in einem Bentonit und in den hier angefertigten Mischproben haben eine bekannte bzw. vernachlässigbar (z. B. Quarzsand) geringe KAK. Aus einer solchen Kenngröße einer gemessenen Probe (z. B. Unterlaufprobe, Technikumssimulation) im Vergleich zum reinen Bentonit kann der Bentonitgehalt berechnet werden.

2.2 Methodik

2.2.1 Nomenklatur

Zu Beginn der Methodendiskussion ist es notwendig, auf die im folgenden verwendeten differenzierten Angaben hinsichtlich der Analysenergebnisse einzugehen. Zur Quantifizierung der Bentonite wurden mehrere verschiedene Analysemethoden getestet. Bei den Vorversuchen zur Beurteilung der Methodeneignung, hierbei war auch die spätere Anwendbarkeit zur online-Qualitätssicherung im Baustellenbetrieb zu hinterfragen, konnten die Ergebnisse stets als gemessener Bentonitgehalt bezeichnet werden. Dies ist z. B. in künstlichen Mischungen mit Quarz ausführlich untersucht worden.

Im Zusammenhang mit Analysen der Proben aus den Hydrozyklonversuchen ist hier jedoch zu beachten, dass es mineralogisch falsch ist, von "Bentonitgehalten" zu sprechen:

Korrekte Ergebnisansprache (Nomenklatur) als

Bentonitgehalt: Bei Vorversuchen mit reinem Bentonit bzw. Mischungen aus

Bentonit und Quarz für Tests der Methoden zur

Quantifizierung,

Kenngröße wie z. B. Cu-Komplex-Wert: Bei Proben, die im Hydrozyklon einer Trennung unterlagen.

Der Grund hierfür ist, dass nicht der Bentonit als technisch modifiziertes Gesteinspulver direkt quantifiziert wird. Es werden entweder eine Materialeigenschaft der im Bentonit vorwiegend enthaltenen Smektite (= Tonmineralgruppe) oder die ursprünglich enthaltenen Minerale (XRD) direkt analysiert. Eine sehr gut geeignete Eigenschaft ist beispielsweise die oben erwähnte KAK. Ebenso könnte auch die spezifische Oberfläche verwendet werden, jedoch ist deren exakte Erfassung mit größerem analytischen Aufwand verbunden. Wird also an einer Probe aus den Technikums-Hydrozyklonversuchen die Kenngröße KAK gemessen, so eignet sich diese zur Quantifizierung des Smektitgehaltes. Ist wie im vorliegenden Fall der Smektitgehalt des eingesetzten Bentonites bekannt, so kann daraus ein berechneter, extrapolierter Bentonitgehalt angegeben werden. Die Bezeichnung "extrapoliert, muss hier gewählt werden, da das Material Bentonit im Hydrozyklon einer Klassierung und damit einer Veränderung der Zusammensetzung unterliegt. Die Feinstbestandteile gelangen in den Oberlauf und grobe Bestandteile wie Quarz in den Unterlauf.

Es ist hingegen durchaus möglich, einen definierten Kennwert anzugeben, der prinzipiell die Bedeutung eines Bentonitgehaltes hat. Im Falle der Messung der KAK mit Cu(II)-Triethylentetramin wurde dazu die Bezeichnung Cu-Komplexwert eingeführt. Für die Interkalation von Polyvinylpyrrolidon (PVP) würde demgemäß bezüglich der Ergebnisangabe der Begriff PVP-Wert verwendet. Diese Vorgehensweise entspricht dem Bentonitindustrie üblicherweise verwendeten Methylenblauwert Methylenblau-Adsorptionsvermögen). Der Grund für diese Umschreibung liegt darin, dass häufig der sogenannte "Montgehalt" (= Anteil an Montmorillonit, ein Mineral aus der Smektitreihe) mit deutlich über 100 % angegeben werden müßte. Dies ist eine unsinnige Mineralmengenangabe und hinter dieser Zahl verbirgt sich lediglich die Nichtbeachtung kristallchemischer Unterschiede verschiedener Bentonite. So müsste korrekterweise auch die Schichtladung gemessen und in die Kalkulation aufgenommen werden. Damit würde eine Korrektur möglich. Dies ist jedoch mit einem nicht vertretbaren Aufwand verbunden und zur reinen Prozesskontrolle auch gar nicht notwendig (Kahr und Madsen, 1994). Bezeichnet man derartige Kontrollgrößen hingegen als Methylenblauwert so wird verdeutlicht, dass sie eine vergleichende Größe darstellt. Analog dazu entspricht also der Cu-Komplexwert dem aus der KAK der Probe im Vergleich zum Ausgangsbentonit berechneten idealisierten Bentonitanteil.

Die zur Quantifizierung verwendeten Verfahren werden im folgenden vorgestellt.

2.2.2 Beschreibung der Quantifizierungsmethoden

Röntgendiffraktometrie (XRD)

Die Röntgendiffraktometrie (XRD) ist eines der wichtigsten Analyseverfahren in der Mineralogie. Mit Hilfe dieser Technik ist es möglich, Informationen über Art und Mengenanteile verschiedener kristalliner Phasen in einem Gemisch zu erhalten.

Die Röntgendiffraktometrie basiert auf dem physikalischen Prinzip, dass Röntgenstrahlen an den Netzebenen der Kristallstrukturen gebeugt werden. Eine solche Beugung kann geometrisch als Reflexion des Röntgenstrahles an einer Netzebene aufgefasst werden. Diese Reflexionen treten nur unter bestimmten phasenabhängigen Einfallswinkeln des Röntgenstrahles relativ zu einem Präparat auf. Trägt man diesen Einfallswinkel gegen gemessene Intensitäten der Reflexionen auf, so erhält man ein sog. Röntgendiffraktogramm. Mit Hilfe dieses Diffraktogrammes können Einzelphasen auch in Gemischen wie Bentoniten identifiziert und teilweise auch quantifiziert werden.

Für die quantitativen Untersuchungen an den Proben aus den Hydrozyklonversuchen wurde hier die Methode des inneren Standards (Klug und Alexander, 1974) und die Rietveld-Verfeinerung (Rietveld, 1967) verwendet.

Die Methode des inneren Standards beruht auf der Tatsache, dass zwischen dem Flächenverhältnis der Reflexe zweier Phasen und ihrem Mengenverhältnis ein linearer Zusammenhang besteht. Mischt man einer Probe mit unbekannter Zusammensetzung einen Standard zu, so kann durch Flächenverhältnisbildung und Vergleich mit vorher erstellten Kalibrierungsmessungen ein Mineralgehalt ermittelt werden.

Als innerer Standard diente Fluorit, der den zu untersuchenden Proben in einem bestimmten Mengenverhältnis zugemischt wurde. Anschließend erfolgt nach gründlicher Homogenisierung eine XRD-Pulverpräparation und Messung mit einer Schrittweite von 0,03° pro Schritt bei einer Messzeit von 3 Sekunden im Winkelbereich von 19-58° 2 Theta (Siemens D 500, Cu Ka α-Strahlung). Nach der Ausmessung geeigneter Reflexe mittels Flächenintegrationsanalyse wurde der Anteil an Quarz bzw. Smektit (hier die Reflexe (001) und (060)) anhand einer zuvor aufgestellten Kalibrationsfunktion ermittelt. Dies ist ein Standardverfahren am Institut für Mineralogie und Lagerstättenlehre der RWTH Aachen (Dohrmann und Echle, 1997). Die erreichbare statistische Genauigkeit liegt für die Quarzbestimmung bei 1,2-1,6 Gew.% (ermittelt an 15 Doppelpräparationen; für Einfachpräparationen an weit über 100 verschiedenen tonigen Materialien ergibt sich eine Wert von 2,2 Gew.%).

Bei der Rietveld-Methode handelt es sich ursprünglich um ein Verfahren zur Verfeinerung kristallographischer Strukturdaten aus Pulvermessungen. Da mehrere Phasen simultan verfeinert werden können und nur bekannte Phasen in den hier zu untersuchenden Gemengen vorliegen, kann mit dieser Methode auch ein Mineralgehalt ermittelt werden.

Die Software Siroquant ist bislang das einzige auf einem Rietveldalgorithmus basierende Programm, mit dem quellfähige Tonminerale zumindest vom Ansatz her quantifiziert werden können. Anstelle eines für Smektite und deren extreme Fehlordnung nicht vorhandenen Strukturvorschlags, welcher bei Rietveldberechnungen mittels least square-Verfeinerung generell benötigt wird, setzten die Programmierer dieser Software

sogenannte observed hkl-Dateien ein. Es kann bei dieser Vereinfachung allerdings nicht mehr von echter Rietveld-Berechnung gesprochen werden.

Kationenaustauschkapazität (KAK)

Eine der herausragenden Eigenschaften der Tonminerale ist deren Fähigkeit Kationen so zu adsorbieren, dass sie jederzeit von einem geeigneten, im Überschuss zugegebenen Kation wieder desorbiert werden können. Die Menge an Kationen, die in dieser reversiblen Form umgetauscht werden kann, wird als Kationenaustauschkapazität (KAK) bezeichnet. Kristallchemische Ursachen hierfür sind: a) der diadoche Ersatz von Zentralkationen in den Bausteinen der Tonminerale, was diesen Anteil als vom pH-Wert unabhängig kennzeichnet, und b) die Ladung an den Rändern der Tonminerale. Zusammen mit dieser variablen, vom pH-Wert abhängigen Ladung erhält man die gesamte KAK eines Tonminerals, die wiederum in gewissen Schwankungsbereichen charakteristisch ist.

Seit Beginn des 20. Jahrhunderts war mit der Messung der KAK viele Jahrzehnte lang eine sehr aufwendige, zeitraubende Analytik verbunden. Die Cu(II)-Triethylentetramin-Methode (Meier und Kahr, 1999) erlaubt hingegen eine sehr schnelle Bestimmung der KAK durch eine einfache photometrische Differenzkonzentrationsbestimmung. Dazu wird der zu untersuchende Bentonit mit einer intensiv-blauen Cu(II)-Triethylentetramin-Lösung versetzt. Die gesamten von den Smektiten adsorptiv gebundenen Kationen werden gegen diese Cu(II)-Komplexionen equivalent ausgetauscht und somit die Lösung partiell entfärbt. Diese Entfärbung steht in einem linearen Zusammenhang mit der Abnahme der Cu(II)-Komplexionenkonzentration und damit mit der KAK, und kann durch eine einfache photometrische Messung quantifiziert werden.

Das Verfahren ist auch zur Quantifizierung von Smektitgehalten geeignet, sofern gewisse Randbedingungen erfüllt sind. Da hier stets dieselben Bentonite eingesetzt werden (Technikumssimulation), sind Schwankungen der Schichtladung und variierende Mengen begleitender Tonminerale (Illite, Chlorite, Kaolinite, Wechsellagerungsminerale) auszuschließen. Diese würden die Zuverlässigkeit der Ergebnisse negativ beeinflussen.

Details zur Methylenblau-Methode sowohl hinsichtlich der Analysevorschriften (Kahr und Madsen, 1994) als auch eine zusammenfassende Diskussion über deren Schwächen (Dohrmann, 1997) können der Literatur entnommen werden.

Interkalation organischer Verbindungen

Organische Substanzen können zwischen die Schichten von quellfähigen und auch teilweise von in wässrigen Lösungen nicht quellfähigen Tonmineralen (z. B. Dimethylsulfoxid in Kaolinit) eingelagert (interkaliert) werden. Dabei sind sowohl geladene als auch ungeladene Moleküle verwendbar. Levy und Francis (1975) diskutierten eine röntgendiffraktometrische Methode zur Quantifizierung von Montmorilloniten, wobei die Steigerung der Basisreflexe durch Adsorption von Polyvinylpyrrolidon (PVP) an inneren Oberflächen von Montmorilloniten ausgenutzt wird.

Bei PVP handelt es sich um ein nichtionisches synthetisches Polymer, das als weißer Feststoff mit hygroskopischen Eigenschaften vorliegt. Das Molekül setzt sich aus der

kettenförmigen Aneinanderreihung der in Abbildung 2 dargestellten Baueinheit zusammen.

Abb. 2: Molekulare Struktur des PVP (nach Francis, 1973)

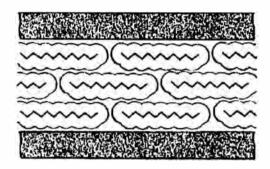


Abb. 3: Schematische Darstellung der drei PVP-Schichten in den Smektitzwischenschichten, (aus Jasmund und Lagaly, 1993, verändert)

Das Molekulargewicht beträgt je nach Kettenlänge 10.000 bis 360.000 g/mol. PVP ist löslich in Wasser und mehreren organischen Lösungsmitteln. Genutzt wird es vor allem als Filmbildner oder Dispersant für Pigmente (Francis, 1973). Durch die Adsorption von PVP in den Zwischenschichten vergrößert sich der Basisabstand von Montmorillonit auf etwa 26 Å, während andere quellfähige Tonminerale sowie Vermikulit PVP nicht einlagern (Levy und Francis, 1975). Eine Einlagerung von PVP in kaolinitischen oder illitischen Tonen konnte mit konventionellen gravimetrischen Techniken nicht nachgewiesen werden (Francis, 1973).

Durch die Einlagerung wird die Intensität des Basisreflexes und damit die Nachweisempfindlichkeit des Smektites erhöht. Die Vergrößerung des Basisabstandes wird dadurch erklärt, daß sich drei PVP-Schichten mit einer geschätzten Dicke von 6 Å übereinander in die Smektit-Zwischenschichten einlagern (Francis, 1973; Abbildung 3).

Die Intensitätssteigerung kann durch einen Effekt erklärt werden, den Weiss et al. (1971) in Zusammenhang mit der Einlagerung von n-Alkylammoniumderivaten beschreiben. Danach kann die Intensitätserhöhung des (001)-Reflexes auf zwei Ursachen zurückgeführt werden:

Die Intensität eines Reflexes ist proportional zum Quadrat der Strukturamplitude (F(001)), dem Lorentz- und Polarisationsfaktor (LP-Faktor) und dem Temperaturfaktor. Der LP-Faktor ist vom Beugungswinkel abhängig und nimmt zu, wenn dieser sich verringert. Wird nun der d_Wert des (001)-Reflexes durch Einlagerung einer organischen Substanz vergrößert, so verringert sich entsprechend dem Braggschen Gesetz der Beugungswinkel und der LP-Faktor steigt an und damit auch die Intensität des gesamten Reflexes.

Die zweite Ursache für die Intensitätssteigerung wird deutlich, wenn man die Strukturamplitude des (001)-Reflexes betrachtet:

F(001) = fi cos 2 zi Die Summierung erfolgt über alle Atome i der Elementarzelle;

fi sind die Atomformfaktoren der jeweiligen Atomart i und zi die Parameter in z-Richtung.

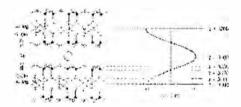


Abb. 4: Phasenbeziehungen der Atome eines Ca-Montmorillonits für die (001)-Interferenz (aus Weiss et al., 1971).

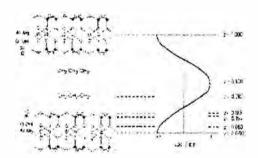


Abb. 5: Phasenbeziehungen der Atome eines Montmorillonits nach Einlagerung von n-Alkylammonium für die (001)-Interferenz (aus Weiss et al., 1971).

In Abbildung 4 sind zwei Schichten eines Ca-Montmorillonites entlang der z-Richtung skizziert. An der dargestellten cos-Funktion läßt sich der Beitrag des cos-Terms für jedes Atom erkennen. Die Atomformfaktoren von Mg, Al und O bzw. OH werden mit positiven Werten der cos-Funktion, die Atomformfaktoren von Si, Ca und dem Ca zugewandten O dagegen mit negativen Werten der cos-Funktion multipliziert: Wird nun allerdings Ca durch n-Alkylammonium ersetzt, so erhalten alle Atome außer die der Zwischenschicht positive Multiplikatoren aus der cos-Funktion (Abb. 5).

Der zuvor negative Streubeitrag von fast der gesamten Tetraederschicht (das gilt für beide Tetraederschichten dieses 2:1-Tonminerals) bekommt nun ein positives Vorzeichen, d. h. die Intensität steigt stark an. Außerdem ist der Streubeitrag der Zwischenschicht (organisches Molekül) geringer als der der Ca-lonen, weil die C- und H_Atome relativ kleine Atomformfaktoren haben. Das heißt, daß die Summation einen höheren Wert für F(001) liefert und damit die Intensität höher ist (Weiss et al., 1971).

Nach Levy und Francis (1975) ergeben sich als optimale Untersuchungsbedingungen folgende Parameter:

PVP: Ton-Verhältnis = 2:1

Reaktionszeit 24 Stunden

2 Waschvorgänge mit demineralisiertem Wasser

Wichtig ist, daß das PVP: Ton-Verhältnis 2: 1 beträgt. Ist das Verhältnis kleiner als 2: 1, reicht die PVP-Menge nicht aus, um alle Flächen zu bedecken. Wenn das Verhältnis allerdings größer als 2: 1 ist, wird die äußere Oberfläche des Montmorillonits mit PVP belegt und damit die Reflexintensität reduziert (Levy und Francis, 1975).

Als weiteres Verfahren mit Einlagerung eines organischen Moleküls wurde das Tensid Tetradecylammoniumchlorid ausgewählt. Lagaly (1994) beschreibt dieses Verfahren sehr detailliert. Aus vorangegangenen Schichtladungsbestimmungen dieser Bentonite war bekannt, dass sich als Basisabstand der obere Grenzwert bei Erreichen der sogenannten bilayer-Anordnung dieser Tensidmoleküle von 17,6 Å einstellt. Die erwartete Intensitätssteigerung fußt auf der selben Argumentation wie die des PVP.

Oxidation mit Benzidin

Mit Hilfe der Benzidin-Blau-Reaktion sollte versucht werden, Smektitgehalte quantitativ zu bestimmen. Wird Montmorillonit mit einer wäßrigen Benzidinlösung in Kontakt gebracht, so entsteht eine blaue Färbung, die beim Trocknen oder in saurer Lösung in Gelb übergeht (Solomon und Hawthorne, 1983). Diese Reaktion wurde zum qualitativen Nachweis von Smektiten genutzt. Es handelt sich hierbei um eine Oxidation des Benzidins zu dem farbigen Benzinblau-Radikal (Abb. 6).

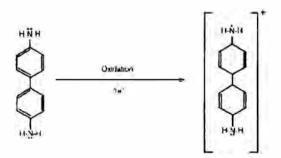


Abb. 6: Oxidation von Benzidin zu Benzidin-Blau (aus Lahav und Raziel, 1971).

Die Reduktion findet hierbei an Kationen des Smektites statt. Nach McBride (1979) ist für die Benzidin-Blau-Reaktion nicht nur die Anwesenheit eines oxidierenden Partners nötig, sondern auch die einer Tonoberfläche, die das farbige Radikal adsorbiert und damit gegen weitere Oxidation schützt.

Eine sehr ausführliche Beschreibung diverser Nebenreaktionen und Einflüsse der Probenvorbereitung auf die ermittelten Ergebnisse gibt Ufer (1999).

Korngrößenanalytik

Versuche zur Korngrößenanalytik wurden am AMR mit Hilfe konventioneller Siebtechniken durchgeführt (Hütter, 1999).

3 Ergebnisse

3.1 Charakterisierung der Bentonite

Die handelsüblichen sodaaktivierten Bentonite lagen pulverisiert mit einem für Baubentonite typischen Wassergehalt von etwa 9 Gew.% vor. Der Mineralbestand wird dominiert von Smektit, Muskovit, Illit, Chlorit (nur B 1), Quarz, Feldspat und Calcit. Akzessorisch treten beim HTX Kaolinit, Gips und Pyrit auf, beim B 1 Dolomit. Der Anteil an Smektit wurde aus der Kombination der Ergebnisse mehrerer Verfahren ermittelt. Dazu wurde neben den üblichen röntgendiffraktometrischen Untersuchungen an verschiedenen Korngrößenfraktionen auch die Kationenaustauschkapazität, die chemische Zusammensetzung und die Schichtladung mit n-Alkylammoniumionen (Lagaly, 1994) der Kettenlängen 6-15 berücksichtigt. Aufgrund der unterschiedlichen Herkunft der Bentonite (HTX: Milos; B 1: Bayern) gab es beträchtliche Unterschiede hinsichtlich der Schichtladung: Bei dem Bentonit mit der Handelsbezeichnung HTX wurde diese mit 0,31 Ladungen pro Formeleinheit bestimmt, während der niedriger geladene B 1 nur 0,25 aufwies. Die KAK wies ebensolche Differenzen auf: (HTX: 91 meg/100 g; B 1: 66 meg/100 g). Auf der Grundlage dieser beiden Messwerte und der Annahme von etwa 20 % Kantenladung an der Rändern der Smektite (Vogt und Köster, 1978) konnte der Anteil dieser quellfähigen 2: 1-Tonminerale berechnet werden. Da die neben den Smektiten vorhandenen Tonminerale sowohl eine sehr viel geringere KAK aufweisen, als auch nur in geringen Anteilen vorhanden waren, wurde der Smektitgehalt vereinfacht aus der gesamten gemessenen KAK berechnet. Der dadurch verursachte Fehler ist sicher in einer ähnlichen Größenordnung wie die vereinfachte Annahme von etwa 20 % Kantenladung. Interessant ist, dass trotz der großen Unterschiede hinsichtlich der KAK von ca. 50 % ein nur geringfügig höherer Smektitgehalt von 87 Gew.% für den Bentonit HTX im Vergleich zum B 1 mit 79 Gew.% kalkuliert wird. Diese beiden Werte sind nicht als Absolutgehalte, sondern als nach dem Stand der Forschung berechnete Anhaltswerte aufzufassen. Realistischer sollte ein Bereich angegeben werden, jedoch wären hiermit nur eingeschränkt die nachfolgenden Berechnungen der Proben aus den Technikumsversuchen durchführbar gewesen.

3.2 Vorversuche

Die Vorversuche zur Quantifizierung reiner Bentonite bzw. von Mischungen dieser mit Quarz waren nur teilweise befriedigend. Bei der Bewertung der Anwendbarkeit aller Verfahren zur Optimierung der Kombination der Aggregate Hydrozyklon und Entwässerungsschwingsieb für die Bentonitaufbereitung wurde festgestellt, dass einige entweder zu aufwendig sind oder dass die Ergebnisse nicht mit der erforderlichen Genauigkeit ermittelt werden können. Hierzu zählen die mit den beiden röntgendiffraktometrischen Methoden ermittelten Ergebnisse und auch die Einlagerung von Tetradecylammoniumionen und Polyvinylpyrrolidon, die Adsorption von Methylenblau und die Oxidation mit Benzidin. Das Benzidin-Verfahren beispielsweise eignete sich trotz intensiv durchgeführter Kalibrierungsexperimente und Verfeinerungen hinsichtlich der Handhabung nicht, weil zu viele Nebenreaktionen und auch kolloidale Restbestandteile von Tonmineralen selbst nach starker Zentrifugierung sehr starke Störungen verursachten.

Es muß beachtet werden, dass die Röntgendiffraktometrie trotz der Nachteile hinsichtlich der Quantifizierung relevante qualitative Informationen ermöglicht. Die Differenzierung der Materialien im Aufbereitungsgang kann hiermit nachvollzogen werden und damit werden mögliche Fehlerquellen für weitere Analysen frühzeitig erkennbar.

3.3 Interkalation von PVP

Am Beispiel des PVP soll gezeigt werden, an welchen methodischen Problemen der Einsatz dieses Verfahrens scheiterte.

Die beiden Bentonitproben B1 und HTX wurden entsprechend den im Methodikteil beschriebenen Bedingungen mit Polyvinylpyrrolidon behandelt und röntgenographisch untersucht. Die Präparation der mit PVP belegten Proben auf Glas- und auf Keramikträgern erwies sich als ungeeignet, da sich beim Trocknen Risse bildeten und das Material abblätterte, sodaß eine röntgendiffraktometrische Untersuchung unmöglich war. Die Herstellung von Pulverpräparaten von mit PVP belegten Proben hingegen führte zu auswertbaren Messergebnissen.

In Abbildung 7 sind die beiden Diffraktogramme dieser Messungen dargestellt (schwarz: HTX mit PVP belegt; rot: B1 mit PVP belegt). Zur besseren Bewertung der Intensitätsveränderung des Basisreflexes durch die PVP-Behandlung sind ebenfalls die Diffraktogramme zweier Pulveraufnahmen der unbehandelten Bentonite dargestellt.

Der Vergleich der Diffraktogramme der mit PVP behandelten Bentonite und der unbehandelten Rohbentonite zeigt, dass durch eine Belegung mit PVP die Intensität des Basisreflexes nicht erhöht wird und somit auch die Nachweisempfindlichkeit nicht gesteigert wird. Die in Abbildung 7 nicht dargestellte hk-Bande bei ca. 4,48 Å ist zu Lasten der Basisreflexintensität stark erhöht. Die Halbwertsbreite des Basisreflexes ist ebenfalls stark erhöht. Dies läßt den Schluß zu, dass PVP zwar sicherlich theoretisch die Reflexintensität des Basisreflexes erhöht, aber gleichzeitig verhindert PVP auch die Ausbildung eine starken Vorzugsorientierung. Dieser zweite Effekt übertrifft den ersten bei weitem und bewirkt, dass die gewünschte Verbesserung der Nachweisempfindlichkeit nicht erreicht wird. Die Ergebnisse zeigen, dass eine sichere

Quantifizierung sehr geringer Bentonitgehalte (bzw. PVP-Werte) mit diesem Verfahren nicht erfolgreich durchgeführt werden kann.

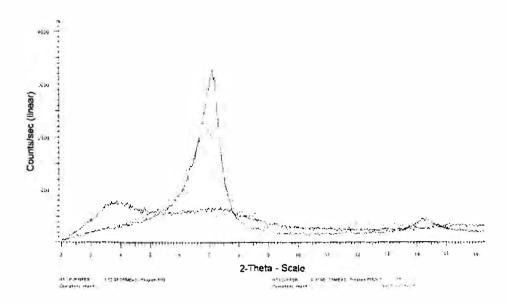


Abb. 7: Diffraktogramme (Siemens D 500, Cu-Strahlung) der mit PVP behandelten Pulverpräparate im Vergleich zu unbehandelten Präparaten (schwarz: HTX mit PVP behandelt, rot: B1 mit PVP behandelt, blau: HTX unbehandelt, grün: B1 unbehandelt).

3.4 KAK mit Cu(II)Triethylentetramin

Die Methode zur Bestimmung der KAK mit Cu(II)Triethylentetramin (hier vereinfacht als Cu-Komplex-Methode bezeichnet) erwies sich als sehr gut geeignet für die Zielsetzung des Projektes. Zu Beginn wurde für jeden Bentonit eine Kalibrierungsfunktion ermittelt. Dies erfolgte durch Variation der Feststoffmenge bei gleichzeitiger Fixierung aller weiteren Versuchsparameter. Die Reproduzierbarkeit des Verfahrens konnte dabei als sehr gut erkannt werden. Der statistische Fehler, die Standardabweichung des Analyseverfahrens (Köster, 1979), beträgt bei sehr geringen Bentonitanteilen von unter 2 Gew.% = 0,2 Gew.%. Neben diesem wichtigen Beweis der Zuverlässigkeit hinsichtlich der zufälligen Fehler musste zusätzlich die absolute Genauigkeit verifiziert werden.

Der Nachweis der Absolutgenauigkeit kann erbracht werden, wenn eine hohe Anzahl von Proben mit bekannten (eingewogenen) Bentonitgehalten mit dem verwendeten Verfahren quantifiziert wird (gemessene Bentonitgehalte) und die Ergebnisse anschließend gegeneinander aufgetragen werden. Diese Vorgehensweise ist in Abb. 8 zu erkennen.

Über einen weiten Konzentrationsbereich von < 1 bis etwa 32 Gew.% existiert ein streng linearer Zusammenhang zwischen dem theoretisch erwarteten und dem experimentell ermittelten Bentonitgehalt (ausgedrückt als gemessener Cu-Komplexwert).

In Anlehnung an Kapitel 2.2.1 ist es bei diesen Vorversuchen noch korrekt, die Messergebnisse als Bentonitgehalt anzugeben, da noch keine Klassierung mit dem

Hydrozyklon erfolgt war. Demgemäß ist nach derartigen Versuchen nur die Bezeichnung Cu-Komplexwert anstelle von Bentonitgehalt gültig. Die ermittelten Ergebnisse der Kalibrierung zeigen eindeutig, dass das Verfahren sehr gut reproduzierbar und richtig arbeitet.

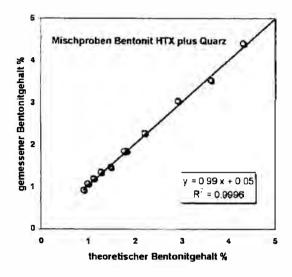


Abb. 8: Überprüfung der Richtigkeit und Reproduzierbarkeit der Bentonit-Quantifizierungsmethode am Beispiel des Bentonits HTX, Erläuterungen siehe Begleittext.

3.5 Hydrozyklonsteuerung

Auf der Basis der am IML entwickelten Analytik konnten die am AMR gefahrenen Hydrozyklonversuche nun einer Bewertung und Optimierung unterzogen werden. Insgesamt wurden 3 Anmachwässer mit je 2 Bentonitsorten und je 3 Bentonit-Feststoffals eingenständige Technikumsversuche durchgeführt. konzentrationen zeitraubenden Experimente wurden während des Laufes einer genau abgestimmten Beprobung unterzogen, mit dem Ziel, Artefakte durch unzureichende Homogenisierung auszuschließen. Das einheitliche Ergebnis aller Versuche war überraschend. Es zeigte sich, dass mit dem eingesetzten Hydrozyklon unabhängig von Bentonitart, Bentonitkonzentration und Anmachwasserart stets ein Cu-Komplexwert ("Bentonitgehalt") der Unterlaufproben (Sandprodukt) von etwa 1-2 Gew.% erreicht werden konnte. Damit war jedoch die geforderte Norm, ein sicheres Unterschreiten der 1 Gew. %-Marke knapp verfehlt worden. Diese Einschätzung konnte allerdings nur durch die zuvor exakt ausgearbeitete Analytik getroffen werden. Die quantitative Bestimmung des Bentonitgehaltes erweist sich somit als ein sehr gut brauchbares Werkzeug zur Steuerung eines Hydrozyklons.

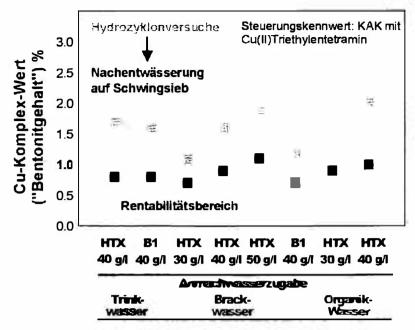


Abb. 9: Gegenüberstellung der Ergebnisse einiger Technikumsversuche und nochmalige Reduzierung des Bentonitgehaltes (gemessen als Cu-Komplexwert) durch Schwingsieb-Entwässerung.

Aus den ermittelten Ergebnissen wurde eine Nachbehandlung des Unterlaufproduktes mit einem Zusatzaggregat notwendig. Dies stellt jedoch keinen Mehrkostenaufwand für eine Baustellenanlage dar, da routinemäßig das Unterlaufprodukt über eine Schwingentwässerereinheit gegeben wird, bevor es die Anlage endgültig verlässt. Diese Technik wurde nun an einigen Unterlaufprodukten angewendet.

Die Unterlaufprodukte wurden ohne zusätzliche Bewässerung über einen Schwingentwässerer gegeben. Hierbei kam es im wesentlichen zu einem Abtropfen der Restfeuchte und damit auch des in der Flüssigkeit angereicherten Bentonits. Somit wurde eine Verringerung des Anteils an quellfähigen Tonmineralen erreicht. Es kam in den meisten Fällen zu einer Reduzierung auf weniger als 1 Gew.% (Abb. 9). Mit einer weiteren Besprühung mit Wasser ließe sich der Abtrennungsprozeß sicher noch deutlich steigern.

4 Diskussion und Zusammenfassung

Diese Studie wurde mit dem Ziel durchgeführt, eine reale Baustellensituation zu simulieren und erste Erfahrungen für die Optimierung einer Bohrgutaufbereitung zu sammeln. Untersuchungsgegenstand war es, den Trennschnitt eines Hydrozyklons zur Aufbereitung von Bentonittrüben über die Analyse des Gehaltes an quellfähigen Tonmineralen (Smektite) zu steuern und zu optimieren. Von den Kooperationspartnern dieser Studie hatte die Mineralogie (IML) die Aufgabe, eine empfindliche Tonmineralanalytik auszuarbeiten und zur Verfügung zu stellen, mit deren Hilfe die Aufbereitung Mineralischer Rohstoffe (AMR) den Hydrozyklonstand steuern und optimieren konnte.

Im Analytik-Bereich dieses Projektes kamen verschiedenste Verfahren mit unterschiedlichen Messprinzipien zum Einsatz. Dabei wurde festgestellt, dass lediglich eine der ausgiebig getesteten Methoden die gewünschten Eigenschaften ausweist. Die Cu-Komplex-Methode (KAK-Bestimmung mit Cu(II)Triethylentetramin) liefert unter den genannten Rahmenbedingungen richtige und reproduzierbare Ergebnisse selbst für geringe Bentonitgehalte von unter 1 Gew.%. Die Handhabung ist unkompliziert und die kostengünstigen und standardlosen Analysen sind schnell durchzuführen. Der Aufwand für den Betrieb eines Photometers ist gering und die Messungen sind prinzipiell auch direkt auf der Baustelle in einem Container durchführbar.

Der Betrieb einer Aufbereitung erfolgt sinnvollerweise nicht alleine mit Hydrozyklonen, sondern es ist Stand der Technik, auch das Aggregat Schwingentwässerer nachzuschalten. Für die hier verwendeten Komponenten (Bohrgut) konnte gezeigt werden, dass es prinzipiell möglich ist, eine dem Bentonitgehalt entsprechende Steuerungsgröße (hier Cu-Komplexwert) von unter 1 Gew.% im Unterlaufprodukt zu erreichen.

Es muss jedoch betont werden, dass die hier vorgestellten Ergebnisse für Technikumsversuche unter den genannten Rahmenbedingungen gültig sind. Im realen Baustellenbetrieb werden sich neue Probleme ergeben, die die Zuverlässigkeit der quantitativen Analytik sicher erschweren werden. Für die Praxis muss beachtet werden, dass mit großer Wahrscheinlichkeit Sedimente mit mehr oder weniger tonigem Anteil durchfahren werden. Dies wird eine direkte Auswirkung auf die Bohrgutzusammensetzung haben, sowohl was die rheologischen Eigenschaften als auch die mineralogische Zusammensetzung betrifft. Werden auf diese Weise Tonminerale eingeführt, so werden diese mit ihrer eigenen KAK die Analytik bis zu einem gewissen Grad beeinflussen. Da Smektite als Hauptbestandteile der Bentonite von den häufigen Tonmineralen die höchsten KAK-Werte aufweisen (70-130 meg/100 g), würden allerdings selbst moderate Illit- bzw. Chlorit- (KAK=15-40 meg/100 g) und hohe Kaolinitanteile (KAK = 1-10 meg/100 g) die gemessenen Cu-Komplexwerte nicht stark (zu höheren Werten) modifizieren. Im Zweifelsfall würde dies dazu führen, dass bei der technischen Klassifizierung des Unterlaufproduktes ein eigentlich noch als Baustoff brauchbares Material als Abfall deklariert würde. Dies bedeutet, dass durch die angesprochene Fehlerquelle kein Risiko in der Hinsicht entstehen würde, dass ein technisch fragwürdiges Produkt für einen nicht geeigneten Verwendungszweck freigegeben würde. Um derartige Prozesse qualitativ exakt verfolgen zu können, ist der Einsatz von röntgendiffraktometrischen Methoden notwendig. Hiermit können die verschiedenen (Ton-) Minerale identifiziert und ihre Mengenanteile halbquantitativ abgeschätzt werden. Das größte Potential bietet hier die Anwendung der Rietveld-Methode (Kleeberg, 1996) und das Softwarepaket BGMN/AutoQuan der Firma Seifert mit Fundamentalparameteransatz. Hier ist eine Quantifizierung auch mit Hilfe von Fehlordnungsmodellen für nicht quellfähige Tonminerale ermöglicht. Für quellfähige Tonminerale existieren derartige Modelle bislang noch nicht.

Zusammenfassend ist herauszustellen, dass es durch den Einsatz mineralogisch-kolloidchemischer Analyseverfahren möglich ist, charakteristische Kennwerte zu liefern, die zur sicheren Steuerung und Optimierung eines Hydrozyklons verwendet werden können. Ein Leistungsmerkmal dieser Kombination stellt die mit Erfolg betriebene Nachschaltung der Bohrgutaufbereitung mittels Einsatz eines Schwingsiebes dar.

Literatur

- DOHRMANN, R. (1997). Kationenaustauschkapazität von Tonen. Bewertung bisheriger Analysenverfahren und Vorstellung einer neuen und exakten Silber-Thioharnstoff-Methode. Diss. RWTH Aachen, AGB-Verlag Nr. 26, 234 S.
- DOHRMANN, R., ECHLE, W. (1997). Statistische Untersuchungen zur quantitativen Quarzanalyse in tonigen Sedimenten.- In: Wagner, J.F. [Hrsg.], Berichte der Deutschen Ton- und Tonmineralgruppe (DTTG), Trier, 63-71
- DOHRMANN, R., KAUFHOLD, S., (1998). Qualitätskontrolle von Bentoniten: Möglichkeiten und Grenzen einer neuen Schnellmethode zur Einstufung von Rohstoffqualitäten mit geoelektrischen in situ-Widerstandsbestimmungen.- In: HENNING, K.-H., Kasbohm, J. [Hrsg.], Berichte der Deutschen Ton- und Tonmineralgruppe (DTTG), Greifswald, 137-146
- FRANCIS, C.W. (1973). Adsorption of polyvinylpyrrolidone on reference clay minerals. Soil Science 115, 40-54
- HÜTTER, J. (1999). Untersuchung zum Trennverhalten von Bentonit/Sand-Suspensionen im Hydrozyklon. Diplomarbeit, AMR, RWTH Aachen, 76 Seiten
- KAHR, G. (1998). Methoden zur Bestimmung des Smektitgehaltes von Bentoniten. In: HENNING, K.-H., KASBOHM, J. [Herausgeber], Berichte der Deutschen Ton- und Tonmineralgruppe (DTTG), Greifswald, 163-172
- KAHR, G., MADSEN, F.T. (1994). Bestimmung des Kationenaustauschvermögens und der Oberfläche von Bentoniten, Illit und Kaolinit durch Methylenblauadsorption. In: KOHLER, E.E. [Hrsg.], Berichte der Deutschen Ton- und Tonmineralgruppe (DTTG), Regensburg, 154-164
- KLEEBERG, R. (1996). Quantitative Röntgenphasenanalyse an schichtsilikathaltigen Gesteinen mit der Rietveld-Methode Probleme, Erfolge und Grenzen. In: WOLF, D., STARKE, R., KLEEBERG, R. [Hrsg.], Berichte der Deutschen Ton- und Tonmineralgruppe (DTTG), Freiberg/Sachsen, 127-137
- KLUG, H.P., ALEXANDER, L.E. (1974). X-ray Diffraction Procedures for polycristalline and amorphous Materials. Wiley-Interscience, New York
- KÖSTER, H.M. (1979). Die chemische Silikatanalyse: Spektralphotometrische, komplexometrische und flammenspektrometrische Analysenmethoden. Springer Verlag, 196 S.
- KRAMPITZ, H., WEINMANN, A. (1999). Bentonit für Tunnelbau und unterirdische Bauverfahren. Ein Handbuch für die Baupraxis. Herausgeber IBECO Bentonit-Technologie GmbH, Mannheim
- LAGALY, G. (1994). Layer charge determination by alkylammonium ions. In CMS Workshop Lectures Volume 6, Layer charge characteristics of 2:1 silicatic clay minerals, A.R. MERMUT, ed., The Clay Minerals Society, Boulder, CO, 1-46
- LEVY, R., FRANCIS, C.W. (1975). Interlayer adsorption of polyvinylpyrrolidone on montmorillonite. J. Colloid Interface Sci. 50, 442-450.
- McBRIDE, M.B. (1979): Reactivity of adsorbed and structural iron in hectorite as indicated by oxidation of benzidine: Clays Clay Min: 27, 224-230

- MEIER L.P., KAHR G. (1999). Determination of the Cation Exchange Capacity (CEC) of Clay Minerals using the Complexes of Copper (II) Ion with Triethylenetetramine and Tetraethylenepentamine. Clays Clay Min. 47, 386-388
- MÜLLER, W., DOHRMANN, R., MOCZURAD, J. (1999). Auswirkungen verschiedener Wasserqualitäten auf die Trennung von Bentonit-/Sandsuspensionen im Hydrozyklon.- Freiberger Forschungshefte A 850 1999, 285-295
- OTTNER, F., SCHWAIGHOFER, B., MÜLLER, H. W. (1996). Quantitative Tonmineralanalyse Phantasie, Philosophie oder Realität? Zentralblatt für Geologie und Paläontologie. Teil I, Allgemeine, angewandte, regionale und historische Geologie, Sedimentologentreffen 09.-15.05.1996, Wien, 5/6, 561-572
- RIETVELD, H.M. (1967). Line profiles of neutron powder-diffraction peaks for structure refinement. Acta Cryst. 22, 151-152
- SOLOMON, D.H., HAWTHORNE, D.G. (1983). Chemistry of pigments and fillers. Wiley, New York
- STECK, A., OERKERMANN, H., SCHIFFERS, A. (1999). Untersuchung zur Trennung von synthetischen Bentonit/Sandgemischen im Hydrozyklon und Entwässerungssieb. Gemeinsame Studienarbeit, AMR, RWTH Aachen
- UFER, K. (1999). Optimierung eines Hydrozyklons zur Bohrgut-Aufbereitung: Quantitative Smektitanalyse als Qualitäts- und Steuerungsmerkmal. Diplomarbeit am Institut für Mineralogie und Lagerstättenlehre der RWTH Aachen
- VEDER, C. (1975). Die Schlitzwandentwicklung, Gegenwart und Zukunft. Österreichische Ingenieur Zeitschrift, Heft 8, Wien
- WEISS, A., LAGALY, G., BENEKE, K. (1971). Steigerung der Nachweisempfindlichkeit von quellfähigen Dreischichttonmineralen in Gemengen. Z. Pflanzenern. Bodenk. 129, 193-202

Autoren:

Reiner DOHRMANN, Dr. Diplom-Mineraloge Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) D - 30655 Hannover, Stilleweg 2 r.dohrmann @ bgr.de

[früher: Institut für Mineralogie und Lagerstättenlehre, RWTH Aachen]

Kristian UFER, Diplom-Mineraloge Institut für Kristallographie, RWTH Aachen D - 52066 Aachen, Jägerstraße 17-19

F. Michael MEYER, Univ.Prof. Dr. Diplom-Mineraloge Institut für Mineralogie und Lagerstättenlehre, RWTH Aachen D - 52056 Aachen, Wüllnerstr. 2

CHI-CHI Erdbeben Spektakuläre tektonische Phänomene

Gunther RIEDMÜLLER

ABSTRACT: The devastating Chi-Chi earthquake, September 21, 1999, in Central Taiwan caused spectacular tectonic phenomena. Vertical and horizontal ground displacements in the range of several metres were observed mainly along the Chelungpu Fault, which belongs to a thin-skinned foreland-vergent thrust system. It is assumed that due to lateral shortening of the thrust wedge ramps and flats were generated which caused heave of the ground with a predominance of extensional ruptures. As a consequence, structures were preferably damaged in the hanging wall of the thrust fault.

ZUSAMMENFASSUNG: Das verheerende Chi-Chi Erdbeben in Zentral Taiwan vom 21. September 1999 verursachte spektakuläre tektonische Phänomene. Entlang der Chelungpu Störung, die zu einem "thin-skinned" Überschiebungssystem mit Vergenz zum Vorland gehört, wurden vertikale und horizontale Geländeverstellungen in der Größenordnung von mehreren Metern beobachtet. Es wird angenommen, dass die laterale Einengung des Überschiebungskeils die Bildung von steilen und flachen Segmenten ("ramps and flats") bewirkte. Auf diese Weise kam es zu einer Hebung des Untergrundes mit Vorherrschen von Dehnungsbrüchen. Als Folge finden sich Gebäudeschäden bevorzugt im Hangenden der Überschiebung.

1 Einleitung

Das außergewöhnlich starke Chi-Chi Erdbeben ereignete sich am frühen Morgen des 21. September 1999 um 1:47 Uhr Ortszeit in der Nähe der kleinen Stadt Chi-Chi in der Provinz Nantou in Westtaiwan. Das Beben verursachte 2300 Tote und 8700 zum Teil schwer Verletzte. Hunderttausende Menschen wurden obdachlos. Das Hauptbeben hatte eine Stärke von M=7,3 und dauerte dreißig Sekunden. Die maximale horizontale Beschleunigung betrug 0,98 g, gemessen in E-W Richtung (1). Die während des Hauptbebens entstandenen tektonischen Bewegungen bewirkten die größten Oberflächenveränderungen, von denen in der Geschichte der Erdbebenforschung berichtet wurde.

Fünf Nachbeben mit Magnituden größer als sechs wurden registriert. Das stärkste Nachbeben (M=6,8) verursachte zahlreiche Schäden an bereits vorgeschädigten Gebäuden.

Obwohl die rezente Seismizität am stärksten in NE-Taiwan zum Vorschein tritt, werden die stärksten Bebenschäden aus Westtaiwan, aus dem Gebiet um Taichung berichtet. Die Ursache liegt in der geringen Tiefe der Bebenherde. Die stärksten Schadbeben des vergangenen Jahrhunderts ereigneten sich alle in dieser Region. Es waren dies vor allem das Chiayi Beben (1906) und das Hsinchu-Taichung Beben (1935), die aufgrund der katastrophalen Schäden neue Bauvorschriften erzwangen.

Alle diese Beben wurden durch Bewegungen an westvergenten Aufschiebungen ausgelöst (2, 3, 4, 5). Das jüngste Beben mit seinem Hypozentrum nahe der kleinen Stadt Chi-Chi, in einer Krustentiefe von 8 km, entstand durch Bewegungen an der Chelongpu Störung (Abb.1, 2).

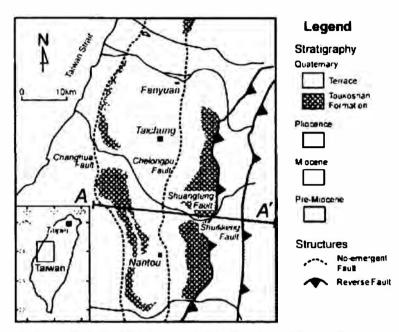


Abb. 1: Schematische geologische Karte des Erdbebengebietes

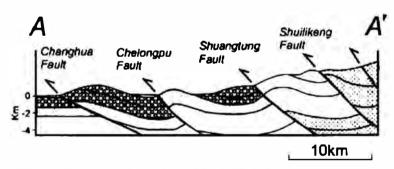


Abb. 2: Schematisches geologisches Profil

2 Geologische Situation

In Taiwan ereignet sich eine rezente Gebirgsbildung mit Plattenkollision, Vorlandsüberschiebungen und Störungstektonik (6). Die kleine Insel Taiwan befindet sich an der konvergenten tektonischen Grenze zwischen der Eurasiatischen und der Philippinischen Platte (Abb.3).

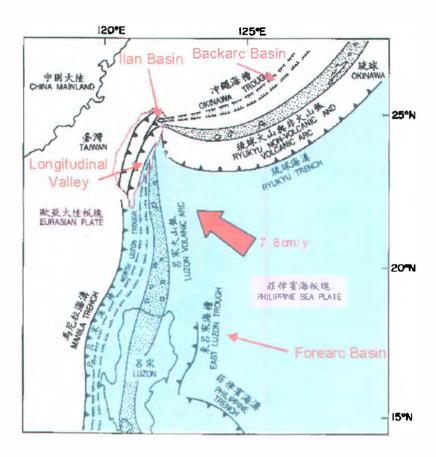


Abb. 3: Känozoische plattentektonische Situation in Taiwan

Die Konvergenzgeschwindigkeit beträgt in NW-SE Richtung derzeit 8,2 cm / Jahr (7). Die Plattenkonvergenz bewirkte eine komplizierte Kompressionstektonik. Sie ist gekennzeichnet durch eine nach Osten gerichtete Subduktion der Eurasiatischen Platte entlang des Manila Grabens unter den vulkanischen Luzon Inselbogen der Philippinischen Platte und durch eine nach Norden gerichtete Subduktion der Philippinischen Platte entlang des Ryukyu Grabens unter den vulkanischen Ryukyu Inselbogen der Eurasiatischen Platte. Entlang der Plattengrenze entstand das NE-SW streichende "Longitudinal Valley". Das im NE der Insel befindliche "Ilan Basin" ist die westlichste Fortsetzung des Okinawa Troges, der als "Backarc Basin" gedeutet wird. Bei der Subduktion der Eurasiatischen Platte unter die Philippinische Platte entstand als "Forearc Basin" der Luzon Trog.

Die beiden vulkanische Inselbögen, Luzon Bogen und Ryukyu Bogen, treffen in Taiwan aufeinander und prägen den känozoischen Vulkanismus Taiwans. Die Plattenkonvergenz mit extremer Kontinent-Inselbogen Kollision bewirkte in Westtaiwan die Ausbildung eines Akkretionskeils. In einer breiten Zone, den sogenannten "Western Foothills" entstanden westvergente Deckenüberschiebungen, wobei eine quartäre Molasse von tertiären Sedimentfolgen überschoben wird (8), (Abb.4).

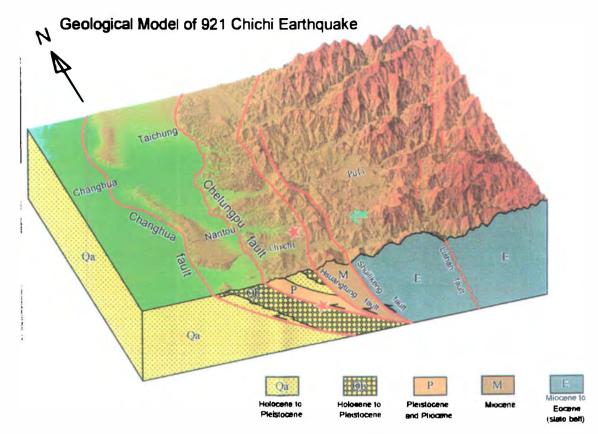


Abb. 4: Westvergente Aufschiebungen tertiärer Sedimente auf die quartäre Molassefüllung

In Fortsetzung gegen Osten führte die Kollision zu einer mehr als 100 km breiten Zone mit intensiver Spröddeformation. In dieser Zone finden sich sinistrale NE-SW streichende Schrägaufschiebungen mit meist dominanter Horizontalbewegungskomponente. Die östlichste dieser gewaltigen Scherzonen markiert das bereits erwähnte "Longitudinal Valley". Der sinistrale Bewegungssinn ist morphologisch durch den Versatz von Nebenflüssen, Schwemmfächern und Flußterrassen erkennbar. Der direkte Beweis erfolgte durch geodätische Vermessungen, aus denen eine durchschnittliche Bewegungsrate von 6 cm / Jahr erkennbar wurde.

Die hohe Aktivität tektonischer Bewegungen wird neben Bewegungen an Störungen vor allem auch durch das häufige Auftreten von seichtliegenden Starkbeben demonstriert. Die Beben treten mehr oder minder auf der gesamten Insel auf (4). Es vergeht kaum eine Woche, in der nicht ein Erdbeben spürbar wird. Konzentriert finden sich die Beben jedoch entlang des "Longitudinal Valleys", dem Ilan Becken und im zentralen Teil Westtaiwans, wo es im vergangenen Jahr zum verheerenden Chi-Chi Beben kam.

3 Charakteristik des Chi-Chi Erdbebens

Die N-S streichende Chelongpu Störung, an der das Chi-Chi Beben stattfand, verläuft entlang des Fußes der "Western Foothills" und bildet die östliche Begrenzung des mit quartären Sedimenten gefüllten Taichung Beckens (Abb.5).

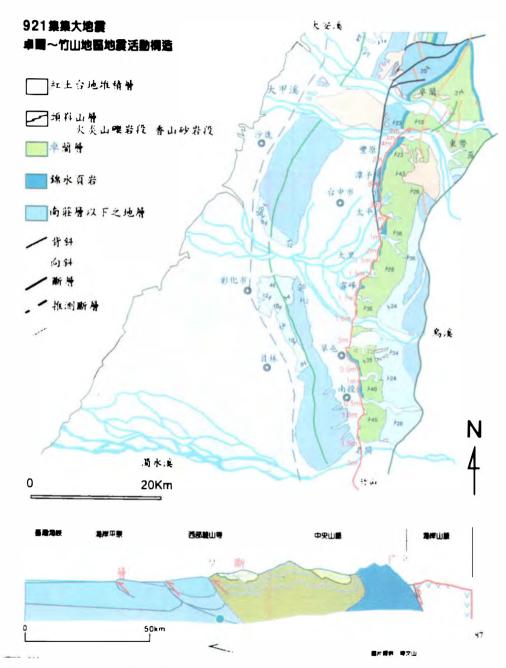


Abb. 5: Geologische Situation des Erdbebengebietes

Entlang dieser Störung kam es zu einer Überschiebung der altpleistozänen Konglomerate der Toukoshan Formation durch die Sand-Siltstein-Shalefolge der pliozänen Cholan Formation (6). Der Ausbiß dieser aktiven Störung kann über eine Länge von ca. 80 km verfolgt werden (9, 10).

An ihrem nördlichen Ende dreht die Chelongpu Störung nach NE und verzweigt sich in mehrere NE bis ENE streichende Segmente. In diesem nördlichsten Abschnitt der Störung, nahe der Stadt Fengyuen, wurden mit 10 m vertikal und 10 m horizontal die stärksten Untergrundverstellungen beobachtet. Es ist dies insofern bemerkenswert, als diese Störungssegmente bisher als nicht aktiv gegolten hatten.

Es ist weiters auffällig, dass die durch geodätische Messungen belegte Langzeitaktivität der Chelongpu Störung nach Süden zunimmt, während gleichzeitig die beim Chi-Chi Erdbeben aufgetretenen Versatzbeträge sowohl in horizontaler als auch in vertikaler Richtung abnehmen.

4 Erdbebenschäden

Die Erdbebenschäden wurden durch tektonische Untergrundverstellungen, Schadwirkungen durch seismische Wellen und durch sekundäre, vom Beben ausgelöste Massenbewegungen verursacht. Die stärksten Schäden finden sich entlang der Chelongpu Störung, wobei im Süden der Störung, in größerer Nähe zum Epizentrum, die Bauschäden zur Hauptsache durch Schwingungen verursacht wurden, während im Norden die meisten Bauschäden als Folge tektonischer Untergrundverstellungen auftraten. Die beobachteten Schäden korrespondierten mit den PGA (peak ground acceleration) Werten und Schwingungsfrequenzen, die gegen Süden deutlich zunahmen, sowie mit der gegen Norden zunehmenden Intensität von Untergrundverstellungen.

Im folgenden werden einige der spektakulärsten tektonischen Phänomene und Bauschäden vorgestellt.

Die Schäden und Untergrundveränderungen beim Wasserkraftwerk Shi-Kang sind besonders außergewöhnlich. Die Schwergewichtsmauer des Shi-Kang Wasserkraftwerkes hat eine Länge von 700 m. Sie wurde im Zeitraum von1974 bis 1977 gebaut und staut das Wasser des Ta-Chia Flusses auf. Neben der Energiegewinnung dient das Wasserkraftwerk auch zur Wasserversorgung für die Millionenstadt Taichung. Die von der Chelungpu Störung abzweigende Cher-Lung-Pu Störung quert das rechte Widerlager der Sperre (11). Beim Erdbeben erfolgte südlich der Störung eine Vertikalverstellung von 9,8 m und nördlich der Störung eine gleichsinnige Vertikalverstellung von 2 m, sodass sich eine Relativverstellung von 7,8 m ergab. Die Verstellungen zerstörten die Hochwasserentlastung und die Wehrfelder im unmittelbaren Nahbereich der Störung. Die südlich der Störung befindlichen Bauteile der Betonsperre blieben bei der Vertikalverstellung nahezu unzerstört (Abb.6).



Abb. 6: Zerstörter Abschnitt der Shi-Kang Sperre. Ansicht von der Wasserseite

In den feinsandigen Stausedimenten fanden sich südlich der Störung eine Reihe größerer Liquifaktion-Trichter.

Etwa 1 km flußabwärts der Shi-Kang Sperre quert die Cher-Lung-Pu Störung den Ta-Chia Fluß und zerstörte die Pei-Fung Brücke. Durch eine vertikale Hebung entstand quer über den Fluß eine 7m hohe Felsschwelle (Abb.7).



Abb. 7: Felsschwelle im Ta-Chia Fluß, entstanden durch Hebung

Am Kreuzungspunkt der Cher-Lung-Pu Störung mit der Chelungpu Störung wurde bis in das Stadtgebiet von Fengyuen mit 10 m die größte horizontale Verstellung gemessen. GPS Messungen ergaben, dass von dieser gewaltigen horizontalen Verstellung ein Gebiet südöstlich der Störung mit einer Breite von 15 km erfaßt wurde. Wie schon erwähnt nimmt das Ausmaß der Untergrundverstellungen gegen Süden kontinuierlich ab.

Flußabwärts der Shi-Kang Sperre zeigt ein Aufschluß die Aufschiebung von pliozänen Siltsteinen auf altpleistozäne Grobklastika. Es ist auffällig, dass im Bereich der Aufschiebung keine rezenten Verstellungen beobachtet werden konnten. Hingegen fanden sich breite Aufwölbungen und Störungsstufen östlich des Ausbisses der Chelongpu Störung (Abb.8).



Abb. 8: Charakteristische Hebung im Hangenden der Chelongpu Störung

Die Schäden an Gebäuden und Brücken sind zur Hauptsache auf die Einwirkung der Untergrundschwingungen zurückzuführen. Es fällt auf, dass bei mehrstöckigen Häusern die Obergeschosse weitgehend verschont blieben, während infolge geringer Aussteifungen durch Garageneinfahrten und Geschäftslokale das unterste Stockwerk abgeschert wurde (Abb.9, 10).



Abb. 9: Schäden an einem mehrstöckigen Haus durch Abscheren des untersten Stockwerkes



Abb. 10: Totalschaden verursacht durch Untergrundschwingungen

Aus der Untersuchung der Gebäudeschäden ging hervor, dass die starken Zerstörungen durch Untergrundschwingungen zur Hauptsache im Hangenden der Chelongpu Störung auftraten.

Im Gegensatz zu Gebäuden blieben Tunnel durch die Schwingungen weitgehend unbeschädigt. Lediglich im Portalbereich wurden bis in eine Tiefe von etwa eineinhalb bis zwei Tunneldurchmesser durch Schwingungen verursachte Schäden an der Auskleidung festgestellt. Die stärksten Schäden bei Tunneln waren auf direkte Verstellungen des Untergrundes zurückzuführen. Bei einem Pipeline Tunnel fanden sich durch Scherbrüche stark deformierte Querschnitte. Die Scherbrüche wurden offensichtlich durch eine Einengung im Bereich der Überschiebungsstirne verursacht.

5 Diskussion

Die beobachteten tektonischen Phänomene können durch die Mechanik einer vorlandvergenten Falten- und Überschiebungstektonik erklärt werden. In dem nach Westen in Richtung Vorland ausdünnenden Akkretionskeil bewirkt die Überschiebungstektonik die Ausbildung von steilen Rampen ("ramp and flat geometry") und in verschiedenen tektonischen Stockwerken auftretende Detachmentzonen (5, 8). Es ist offensichtlich, dass weiche Tonschieferhorizonte innerhalb der tertiären Schichtfolge die Ausbildung von seicht liegenden Überschiebungen begünstigten. Weiters wird angenommen, dass das Überschieben von jungen Dehnungszonen mit Abschiebungen und Grabenbildung eine der Voraussetzungen für das Zustandekommen der "ramp and flat" Geometrie ist.

Die charakteristischen, mit Dehnung verbundenen, mehrere hundert Meter breiten Hebungszonen im Bereich der Überschiebungsstirn der Chelongpu Störung werden als Folge von Rampen Antiklinalen, Hangend Rampen und Rücküberschiebungen gedeutet.

Nachdem über weite Strecken nur Hebungen mit Dehnungsrissen, jedoch keine Ausbisse der Chelongpu Störung beobachtbar sind, wird als Hypothese zur Diskussion gestellt, dass in Tiefen von mehreren Kilometern Überschiebungen an einer "low-angle blind fault" erfolgen. Aus Erdölexplorationen aus dem Gebiet der nördlich der Chelongpu Störung auftretenden Sanyi Störung sind derartige basale "blind faults", die in den quartären Trogfüllungen enden, bekannt (5).

Zuletzt noch einige Bemerkungen über das Zusammenwirken zwischen quartärer Tektonik und Morphogenese. Der zum Taichung Becken abfallende Hang der "Western Foothills" zeigt eine ausgeprägte Terrassentreppe, bestehend aus pliozänen bis altpleistozänen Pedimenten und jüngeren talgebundenen Terrassensystemen. Tektonische Verstellungen dieser als Erosionsniveaus gedeuteten Terrassen sind in der Literatur beschrieben. Es fällt auf, dass die Terrassenkanten meist eine nach Westen, bzw. NW gerichtete Vorwölbung zeigen, wobei laterale Verstellungen der Terrassen an "tear faults", die durch Seitentäler nachgezeichnet werden, beobachtbar sind. Es läßt sich aus diesen Beobachtungen folgern, dass die morphologische Gestaltung der Hänge in der Westabdachung der "Western Foothills" zu einem großen Teil durch die quartäre Tektonik kontrolliert wird.

Literatur:

- 1 Lee, W.H.K., K.W. Kuo (1999): http://caldera.wr.usgs.gov/chi-chi1.html
- Wang, CY.(1999): http://caldera.wr.usgs.gov/chi-chi4.html
- Bonilla, M.G. (1975): A review of recently active faults in Taiwan, U.S. Geological Survey, Open-File Report 75-41, 58 pp.
- Bonilla, M.G. (1999): A note on historic and Quaternary faults in western Taiwan, U.S. Geological Survey, Open-File Report, 99-447,5 pp.
- Davis, D., J. Suppe, and F.A. Dahlen (1983): Mechanics of fold-and-thrust belts and accretionary wedges.- Geophys.Res. 88(B2), pp. 1153-1172.
- Ho, C.S.H.(1988): An introduction to the geology of Taiwan explanatory text of the geologic map of Taiwan.- Central Geological Survey, Ministry of Economic Affairs, Taiwan, R.O.C., 2nd edition, 192 pp.
- 7 Liou, J.G. and L.Y. Hsiao (1999): http://caldera.wr.usgs.gov/chi-chi4.html
- 8 Eldridge, E.M. and R.J. Twiss (1995): Tectonics.-Freeman, 415 pp.
- 9 Suppe, J. (1985): Principles of structural geology.- Prentice Hall, Inc., pp.537.
- Bonilla, M.G. (1999): http://wrgis.wr.usgs.gov/open-file/of99-447/
- Hwang, H.H.Y. and J.Yung-Wan Lien. (1999): Taiwan Chi-Chi Earthquake:Bird's eye view of Cher-Lung-Pu Fault.- Sino Geotechnology Inc., pp.151.

Autor:

o.Univ.Prof. Dr. Gunther RIEDMÜLLER TU Graz, Institut für Technische Geologie A-8010 Graz, Rechbauerstr. 12

Vorausschauende Geothermik für tiefliegende Tunnelbauten – am Beispiel des Gotthard Basistunnels (Schweizer Alpen)

Ladislaus RYBACH

Zusammenfassung

Dieser Beitrag behandelt zwei Themen:

- 1) Prognose der Felstemperatur, und
- 2) Vorhersage von wasserführenden Zonen.

Die Kenntnis der ursprünglichen Felstemperatur ist bautechnisch von grosser Bedeutung: ihre Verteilung geht direkt in die Dimensionierung der Tunnelbelüftung für Bau und Betrieb ein. Die Anwendung eines Prognosewerkzeugs wird vorgestellt (numerisches Finite Element Verfahren), welches die Einflüsse der dreidimensionalen Topographie, von zirkulierenden Gebirgswässern und von instationären Effekten (Klimaschwankungen, Hebung/Erosion) berücksichtigt. Das Prognoseprofil des Gotthard Basistunnels weist Temperaturen bis knapp über 40 °C auf.

Das unerwartete Anfahren von wasserführenden Zonen, mitunter gefolgt von massiven Wassereinbrüchen, zählt zu den grössten geotechnischen Problemen im Tunnelbau. Ein Mess- und Berechnungsverfahren wird beschrieben, mit welchem Lage und Wasserführung solcher Zonen im voraus abgeschätzt werden können. Das Verfahren wurde im Piora Sondierstollen erfolgreich getestet.

1. Prognose der Felstemperatur

Der Gotthard-Basistunnel, welcher eine Länge von ca. 57 km und eine maximale Überdeckung von 2.5 km erreichen soll, stellt höchste Anforderungen an die Geologen und Ingenieure. Er durchquert (vgl. Abb. 1) mehrere tunnelbautechnisch günstige kristalline Einheiten (Aarmassiv, Gotthard-Massiv, Penninische Gneisszone), das tektonisch stark überprägte Tavetscher-Zwischenmassiv, welches eventuell schwierig zu durchörtern sein wird, und die sedimentäre Piora-Zone, welche sich erst kürzlich als unproblematisch erwiesen hat.

Generell nimmt die Felstemperatur mit zunehmender Überlagerung im Gebirgskörper zu. Im speziellen wird sie jedoch massgebend durch die vorherrschende dreidimensionale Topographie, die geologischen Einheiten in Form von verschiedenen Wärmeleitfähigkeiten und die Wasserwegsamkeit bzw. generell die Wasserzirkulation bestimmt. Hinzu können instationäre Effekte treten, bedingt z.B. durch eiszeitliche Kältephasen oder durch Hebung/Erosion.

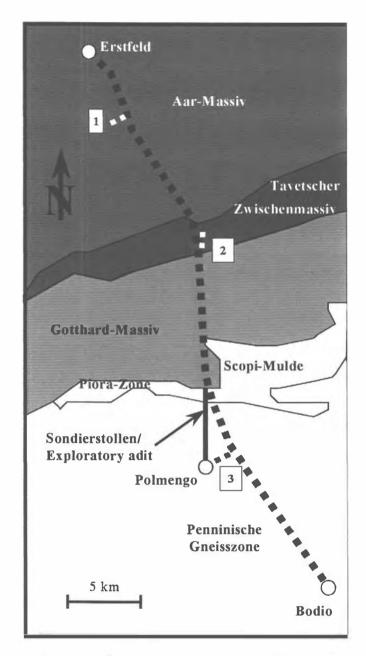


Abb. 1. Gotthard-Basistunnel: Linienführung und geologische Übersicht. Zwischenangriffe: 1 Amsteg, 2 Sedrun, 3 Faido.

1.1 Werkzeug, Modellierung

Zur Behandlung dieser Probleme eignet sich die numerische hydraulisch-thermisch gekoppelte Modellierung. Für die hier vorgestellten Arbeiten wird ein Finite-Elemente-Code, das Programm FRACTure verwendet, welches in der Forschungsgruppe Geothermik und Radiometrie an der ETH Zürich entwickelt wurde (Kohl 1992). Als Randbedingung wird an der Modellbasis stets ein konstanter Wärmefluss aus dem Erdinnern zugrunde gelegt. Dieser entspricht gemäss der Wärmeflusskarte der Schweiz (Medici & Rybach 1995) etwa 60 mWm⁻². Weiter wird an der Oberfläche der Modelle

eine höhenabhängige Bodentemperatur, basierend auf Daten der Schweizerischen Meteorologischen Anstalt (SMA), definiert (Details siehe in Rybach & Pfister 1994).

Vorabklärende numerische Modellierungen und Parametertests wiesen klar die Richtung für die Entwicklung des eigentlichen Prognose-Modells auf: Es musste ein dreidimenionales Modell erzeugt werden, um dem Einfluss von Topographie und Wasserzirkulation im Gebiet des Gotthard-Basistunnels gerecht werden zu können. Im speziellen heisst dies, dass man davon ausgehen musste, dass einerseits Erhebungen und Täler, andererseits fliessendes Wasser auch ausserhalb der Tunnellinie für die Felstemperaturen entlang des Gotthard-Basistunnels relevant sind.

Fliessendes Wasser kann unter Umständen zu tiefgreifender Umverteilung von Wärme im Gebirgsuntergrund führen. Man spricht in diesem Zusammenhang von advektivem (im Gegensatz zu konduktivem) Wärmetransport. Die im Untergrund vorherrschenden Zirkulationsmuster sind einerseits durch die Lage des Bergwasserspiegels geprägt, andererseits durch die hydraulischen Eigenschaften der vorliegenden Gesteine. Der Bergwasserspiegel weist im Gegensatz zum Wasserspiegel des Alpenvorlandes meist eine dramatische Topographie auf. Aus diesem Grund und basierend auf der Tatsache, dass im Gebirge nur sehr wenige Pegelbohrungen vorhanden sind, ist meist wenig über den genauen Verlauf des Bergwasserspiegels bekannt. Abb. 2 zeigt den Verlauf des Bergwasserspiegels entlang des Gotthard-Basistunnels, wie er aus verschiedenen Daten (Bohrungen, Stollen, Gerinneanfänge) zusammengestellt wurde (Daten aus ATH 1993).

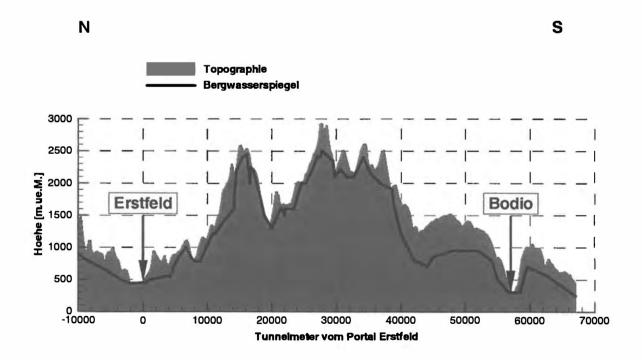


Abb. 2. Verlauf des Bergwasserspiegels in der Achse des geplanten Gotthard-Basistunnels. Zehnfach überhöhte Darstellung.

Ein bedeutender Faktor für die Gebirgswasser-Zirkulation ist die hydraulische Leitfähigkeit bzw. K-Wert von Gesteinen. Abb. 3 zeigt den Einfluss der Variation der hydraulischen Leitfähigkeit (in einem für das Gotthard-Gebiet realistischen Rahmen) auf die Felstemperatur auf Basistunnel-Niveau (2D Modell entlang der Tunnelspur).

Generell ist mit einer Zirkulation von kaltem Wasser aus Gipfel- in Talregionen zu rechnen (vgl. schematische Darstellung der Strömungswege in Abb. 3). Dies führt zu einer Auskühlung unter Bergkämmen bzw. aufgrund wieder aufsteigendem erwärmten Wasser z.T. zu Erwärmung unter Talschaften. Die Erhöhung der hydraulischen Leitfähigkeit hat eine Intensivierung der Zirkulation und somit des beschriebenen Effektes zur Folge. Während also bei sehr kleinen K-Werten von 10⁻¹¹ ms⁻¹ bis 10⁻¹⁰ ms⁻¹ noch wenig Änderungen verglichen mit dem rein konduktiven Fall zu erkennen sind, wird bei weiterer Erhöhung der Leitfähigkeit bis 10⁻⁸ ms⁻¹ deutlich, dass eine totale Umverteilung der Wärme im Gebirge durch die Wasserzirkulation stattfindet.

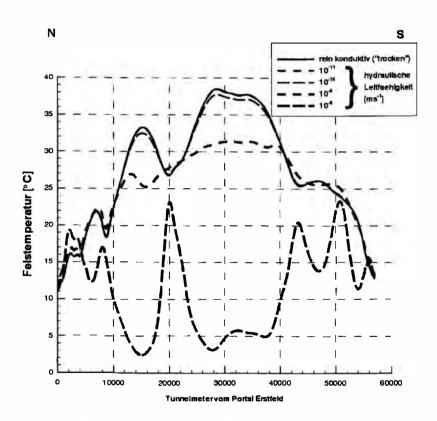


Abb. 3. Einfluss der hydraulischen Leitfähigkeit auf die Felstemperaturprognose. Schematisch eingetragen ist die generelle Zirkulation von Berg- in Talregionen. Berechnung hydraulisch-thermisch gekoppelt, Wärmeleitfähigkeit 3.0 Wm⁻¹K⁻¹, Basiswärmefluss 60 mWm⁻².

Aufgrund von Parametertests und Sensitivitätsanalysen hat man schliesslich ein dreidimensionales numerisches Modell entwickelt, wie es sich in Abb. 4 präsentiert.

Beiderseits sowie am Anfang und Ende der Tunnellinie wurden mindestens zusätzlich 5 km berücksichtigt. Die querstehenden Bereiche entsprechen Zonen, in denen mit erhöhter hydraulischer Aktivität senkrecht zur Tunnelachse gerechnet werden musste (z.B. Piora-Zone, siehe unten). Die Basis des Modells wurde bei 50 km unter dem

Meeresspiegel angesetzt. Dem Modell wurden 13 geologische Einheiten mit verschiedenen thermischen (Wärmeleitfähigkeit, Wärmeproduktion) und hydraulischen (hydraulische Leitfähigkeit) Eigenschaften einverleibt. Als Randbedingung wurde auf Seite der Thermik eine höhenabhängige Oberflächentemperatur verwendet, auf Seite der Hydraulik ein Bergwasserspiegel. Die seitliche Begrenzung des Modells wird als hydraulisch und thermisch impermeabel (isoliert) betrachtet.

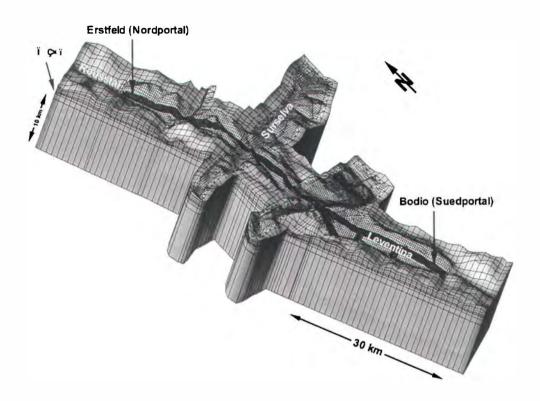


Abb. 4. Diskretisierung des 3D-Modells. 192'312 Knoten, 177'375 Elemente. Die unterste Schicht des FE-Gitters (von 11 km bis 50 km unter Meer) ist aus Gründen der Übersicht weggelassen. Die Querstruktur zwischen Surselva und Leventina ist der Bereich der Piora-Zone.

Die Diskretisierung des sehr umfangreichen Modells (nahezu 200'000 Knoten/Elemente) musste in mehreren Phasen verwirklicht werden. In einem ersten Schritt wird mittels eines CAD-Programmes eine horizontale Ebene des Modells erzeugt. Im weiteren werden mehrere solcher Ebenen vertikal gestapelt und schliesslich basierend auf der Topographie verformt. Zudem müssen Materialparameter und Randbedingungen im Modell definiert werden.

Die Kaltwasser-Zirkulation in der Piora-Mulde wirkt sich wie ein Kühlelement auf das benachbarte Gestein (in diesem Falle des Gotthard-Massiv und der penninischen Gneisszone vgl. Abb. 1) aus. Man geht nun davon aus, dass diese kühlende Zirkulation erst mit Ende der letzten Eiszeit, also vor rund 10'000 Jahren (thermisch relevant) begonnen hat. Der heutige thermische Zustand in diesem Gebirgsbereich wäre somit die Folge einer 10'000 Jahre langen Abkühlung. Dieses Konzept wurde im Modell realisiert, indem als Anfangsbedingung ein stationärer thermischer Zustand ohne

Einwirkung von Hydraulik bei einer Oberflächentemperatur von konstant 0°C angenommen wird. In der Folge wird die Hydraulik in Gang gesetzt.

Als weiterer Einflussfaktor muss noch der Effekt von Hebung/Erosion berücksichtigt werden. Hebung und Erosion beeinflussen das Temperaturfeld im Untergrund ebenfalls, was generell zu erhöhten Temperaturen führt. Der Einfluss nimmt mit der Tiefe ab. Bei der modellmässigen Behandlung wird davon ausgegangen, dass Hebung und Erosion zeitgleich ablaufen und dass ihre Geschwindigkeiten (mm/a) gleich sind. Numerische Modellierungen mit FRACTure haben gezeigt, dass auf Basistunnelniveau pro 0.1 mm/a Hebung/Erosion eine Temperaturerhöhung von 0.8 °C resultiert (Signorelli 2000). Dabei muss auch die Hebungs-/Erosionsgeschichte der Alpen in den letzten 1.4 Ma berücksichtigt werden.

Details über die Modellierung sind in Busslinger (1998) und Rybach & Busslinger (1999) zu finden.

1.2 Die Prognoseresultate

Ein vertikaler Schnitt durch das berechnete Temperaturfeld entlang dem Basistunnel (Abb. 5) betont nochmals den grossen thermischen Einfluss von Topographie und fliessendem Wasser im Gebirge. Im Bereich der Piora-Zone zeichnet sich die durch die starke Wasserzirkulation in der Piora-Zone bedingte Abkühlung des Gesteins ab. Es bildet sich ein steiler "Temperaturtrichter" aus. Man geht aufgrund der Erkenntnisse von Erkundungsbohrungen durch die Piora-Zone davon aus, dass auf Tunnelniveau mit keiner grossen Wasserzirkulation zu rechnen ist. Die im Felstemperaturprofil erkennbare Auskühlung kommt allein aufgrund einer "Deckenkühlung" (Zirkulation oberhalb Niveau des Tunnels) zustande.

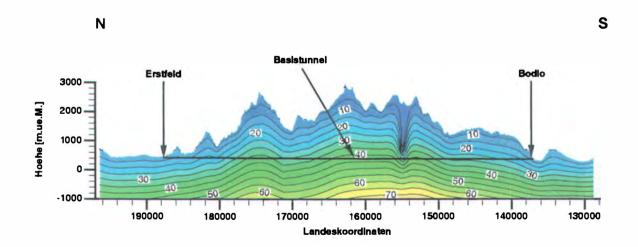


Abb. 5. Modelliertes Temperaturprofil im Vertikalschnitt in etwa entlang dem geplanten Basistunnel. Isothermen im Abstand von 5°C, vierfach überhöhte Darstellung. Hydraulisch-thermisch gekoppeltes, transientes 3D-Modell. Simulationsdauer 10'000 Jahre.

Betrachtet man die Linien gleicher Temperatur (Isothermen), so ist offensichtlich, dass diese über weite Bereiche in etwa der Vorgabe durch die Oberfläche folgen. Mit zunehmender Tiefe bzw. Entfernung von der Oberfläche wird dieser Effekt jedoch abgeschwächt. Deutlich sieht man auch, dass im Bereich der Piora-Zone der Topographie-Effekt überprägt wird. Die erwähnte Zirkulation von kaltem Wasser in dieser Zone führt zu einer tiefgreifenden Auskühlung auch des der Piora-Zone benachbarten Gesteins. Bis in grössere Tiefen (im 1000 m-Bereich ab Geländeoberfläche) können nahezu Temperaturen vorliegen, wie man sie an der darüberliegenden Oberfläche vorfindet.

Als Fazit der Prognose ist mit einer maximalen Felstemperatur von ca. 43°C über eine längere Strecke im Bereich von Tkm 30 (Landeskoordinate 16'000) zu rechnen. Dies ist der Bereich, in welchem die grösste Überlagerung auftritt. Allerdings wird dieser Verlauf durch die Zirkulation in der quer zur Tunnelachse streichenden Piora-Zone abrupt unterbrochen, wo Tiefsttemperaturen bis ca. 26°C erwartet werden. In diesem Bereich ist die Prognoseunsicherheit dank der Modellanpassung an die jüngst durchgeführten Felstemperaturmessungen (siehe unten) relativ gering (ca. ± 1°C). Ein weiteres Temperaturmaximum mit Werten zwischen 35°C und 40°C wird aufgrund der erhöhten Felsüberdeckung um Tkm 15 (Landeskoordinate 17'500) prognostiziert. Zu den Portalen hin nimmt die Felstemperatur schliesslich bis gegen 10°C ab.

Der Fehler der Felstemperaturprognose ausserhalb des Piora-Einflussbereiches wurde ebenfalls im Vergleich Modelle und Messung abgeschätzt. Im Mittel beträgt er etwa ± 4 °C. Der Fehler kann lokal grösser sein, da das modellierte Gebirge in der Natur kein Kontinuum darstellt.

2. Vorhersage von wasserführenden Zonen

Das Früherkennen von wasserführenden Zonen vor der Tunnelbrust ist für die Sicherheit und das Bauprogramm eminent wichtig. Bestehende Tunnelbauten, wie z.B. der Simplon-Bahntunnel oder der Mont-Blanc-Strassentunnel haben gezeigt, dass sich stark wasserführende Zonen im Verlauf der Felstemperatur entlang dem Tunnel abbilden; bereits etliche hundert Meter vor der Störzone kann beim Vortrieb eine deutliche Abkühlung des umliegenden Fels beobachtet werden ("Kältetrichter"). Die absolute Abkühlung kann im Extremfall Werte von einigen Zehnergraden annehmen, wie z.B. im Simplontunnel (Kaltwasserschüttungen nach Anfahren mit ca. 10 °C und bis 1000 ls⁻¹).

Die mesozoische Piora-Zone (Karbonatgesteine, an der Oberfläche verkarstet) streicht E – W und liegt zwischen der penninischen Gneisszone im Süden und dem Kristallin des Gotthardmassivs im Norden (vgl. Abb. 1). Tiefgang und Wasserführung waren zu Beginn der Sondierarbeiten unbekannt. Ein spezielles Sondierprogramm, das als Kernstück einen rund 300 m über Basistunnelniveau liegenden, N – S orientierten Sondierstollen beinhaltet (Lage siehe Abb. 1), wurde zur Klärung dieser Fragen konzipiert. Die vorausschauende Geothermie war integrierender Bestandteil dieses Programmes.

Die Piora-Zone kann im geothermischen Sinne als Naturphänomen betrachtet werden. Die deutlich ausgeprägte Kaltwasserzirkulation innerhalb der Zone wirkt sich auf das Nebengestein wie ein Kühlaggregat aus. Dies haben die umfangreichen im Sondier-

stollen Piora-Mulde durchgeführten Temperaturmessungen deutlich gezeigt (vgl. Abb. 6). Aber erst mit gezielter numerischer Modellierung konnte ein schärferes Bild der Piora-Zone gezeichnet werden.

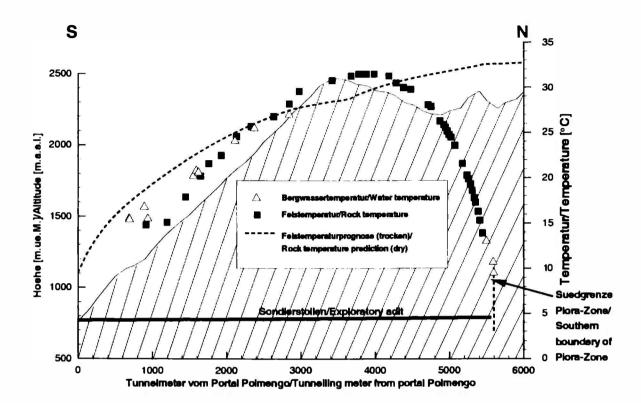


Abb. 6. Gemessener Temperaturverlauf und "trockene" Prognose für den Sondierstollen Piora-Mulde (Details siehe Text).

Dazu wurde zunächst an einem vereinfacht generalisierten, zweidimensionalen Modell die Auswirkung einer Kaltwasserzirkulation auf die Felstemperatur im Tunnel untersucht. Es handelt sich um ein numerisches Modell, welches als Oberfläche eine vereinfachte Topographie (Sägezahn) mit einem zentralen Bergkamm besitzt. Durch diesen Kamm soll ein Tunnel führen, dessen Verlauf eine vertikal verlaufende, wasserführende Kluftzone kreuzt. Die mit diesem Modell durchgeführten Parameterstudien haben weiter gezeigt, dass sich vor allem Änderungen in der Transmissivität der Kluftzone im Temperaturprofil abzeichnen. Die Form des Trichters weist also auf die Transmissivität der Kluftzone und damit auf die Grösse der zu erwartenden Wasserführung hin (näheres siehe in Busslinger & Rybach 1999). Allerdings erweist sich die Felstemperatur nur bis zu einer gewissen Grössenordnung der Klufttransmissivität empfindlich. Weitere Einflussfaktoren sind z.B. die Verteilung des hydraulischen Gradienten entlang der Kluft oder der Transmissivitätskontrast zum Nebengestein.

2.1 Ein spezifisches Messprogramm

Zu Beginn der Sondierarbeiten mittels des Piora-Sondierstollens wurde ein spezielles Messverfahren zur Erfassung der ursprünglichen Felstemperatur entwickelt. In regelmässigen Abständen wurde in speziellen Kurzbohrlöchern, welche mit einem Ankerbohrgerät quer zum Tunnelverlauf ins Parament vorgetrieben wurden, Temperaturmessungen mit einem tragbaren Gerät (PT Fühler; Eigenkonstruktion) vorgenommen. Bei der Wahl der Bohrlochtiefe, aber auch beim Messprogramm musste die thermische Beeinflussung durch die Tunnelbelüftung berücksichtigt werden (vgl. Abb. 7).

Der nach diesem Verfahren gemessene Felstemperaturverlauf entlang dem Sondierstollen ist in Abb. 6 dargestellt. Die Messresultate ergaben folgendes Bild: Zu Beginn zeichnete sich eine normale, d.h. dem Anstieg der Stollenüberlagerung entsprechende Erhöhung der Felstemperatur ab. Fels- und Bergwassertemperatur stiegen ca. bis Stollenmeter (Sm) 4.000 mehr oder weniger kontinuierlich auf 32°C an. Ab diesem Punkt konnte aber das stetig stärker werdende Absinken der Temperaturen entlang dem Sondierstollen beobachtet werden. Dies widersprach dem Verlauf, welcher durch eine damals durchgeführte numerische Modellierung prognostiziert wurde. Allerdings handelte es sich hierbei um eine rein konduktiv, d.h. eine ohne Berücksichtigung des thermischen Einflusses von fliessendem Wasser ausgeführte zweidimensionale Modellierung. Dies liess darauf schliessen, dass in der Piora-Zone bis in den Bereich des Sondierstollens kaltes Wasser zirkulieren muss, um diese Abkühlung zu bewirken. Allerdings liessen sich mit dieser Beobachtung alleine noch keine quantitativen Aussagen zum Charakter dieser wasserführenden Zone machen.

Die Felstemperatur ist schliesslich bis ca. 10°C abgesunken und die Südgrenze der Piora-Zone wurde durch eine verfeinerte thermisch-hydraulisch gekoppelte Modellierung auf ca. Sm 5.600 prognostiziert (siehe Abb. 6) und durch eine Vorausbohrung dort auch erbohrt. Diese Bohrung setzte ca. 4.000 m³ Wasser und ca. 1400 m³ Dolomitsand frei. Dies zeigte somit, dass der wasserführende Teil der Piora-Zone bis zum Niveau des Sondierstollens reicht. Ob jedoch auch auf Höhe des Gotthard-Basistunnels (ca. 300 m tiefer) mit dem wassergesättigten Zuckerdolomit zu rechnen ist, konnte noch nicht abgeschätzt werden.

Neben speziellen Schrägbohrungen (siehe unten) wurde nun die Geothermik eingesetzt, um weitere Erkenntnisse zur Zone zu gewinnen. Tracertests, welche von der Oberfläche aus durchgeführt wurden, proklamieren eine W-E-gerichtete Zirkulation in der Piora-Zone. Da dies senkrecht zum gemessenen Tunneltemperaturprofil verläuft, musste die Dreidimensionalität der Situation beachtet werden.

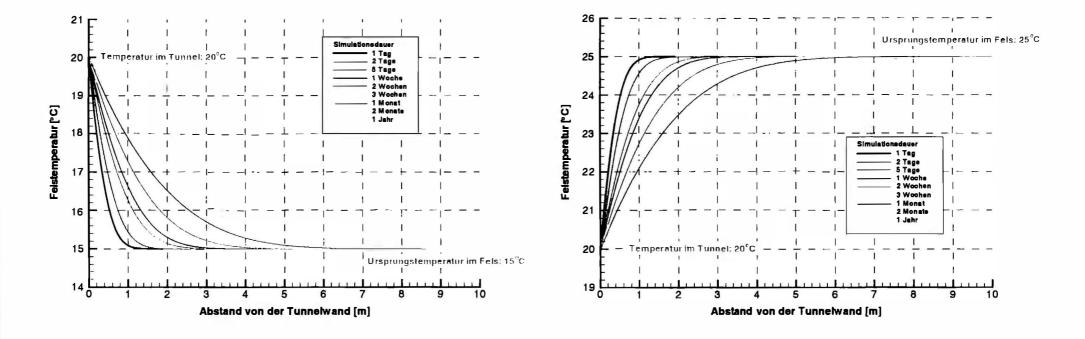


Abb. 7. Zur Vorbereitung der Messung im Sondierstollen Piora-Mulde wurden analytische Modellierungen zur Beeinflussung der Felstemperatur durch das Stollenklima durchgeführt. Der Stollen wird vereinfacht als Hohlzylinder betrachtet mit rein konduktiver Wärmeleitung bei einer konstanten Wärmeleitfähigkeit von 3.0 Wm⁻¹K⁻¹. Gezeigt sind die zwei Fälle einer Felserwärmung (links) und -abkühlung (rechts) durch die Stollenluft (jeweils 20 °C).

2.2 Modellierung und Resultate

Zur genaueren hydraulisch-thermischen Untersuchung des beobachteten Phänomens wurde ein dreidimensionales Modell der Piora-Zone erstellt. Da wenig Informationen über die Ausprägung der Zone vorhanden waren, musste bei der Modellgenerierung darauf geachtet werden, dass sowohl die Geometrie als auch die hydraulischen Eigenschaften der Piora-Zone variiert werden können. Unterschieden werden im Modell grundsätzlich die hochpermeablen Bereiche der Piora-Zone und die beinahe undurchlässigen Bereiche des angrenzenden kristallinen Nebengesteins.

Als Randbedingungen wurde, analog zum Modell zur Felstemperaturprognose für den Gotthard-Basistunnel (siehe oben), ein konstanter Wärmefluss aus dem Erdinnern, eine höhenabhängige Oberflächentemperatur sowie ein Bergwasserspiegel definiert. Das E – W gerichtete Modell hat etwa die Form eines Quaders mit 30 km Länge, 14 km Breite und 5 bis 7 km Tiefe. Anzahl Elemente: 71'188 (Details siehe in Busslinger & Rybach 1999).

Auch hier modelliert man das thermische Feld über 10'000 Jahre thermisch-hydraulisch gekoppelt, wobei als Anfangsbedingung der thermische Zustand des Gebirges bei 0°C Oberflächentemperatur (die Oberfläche war über längere Zeit total vergletschert) und ohne Einwirkung von fliessendem Gebirgswasser (nahezu kein Wasserzufluss aufgrund der Vergletscherung) eingesetzt wird.

Neben den Felstemperaturmessungen aus dem Sondierstollen konnten im laufenden Sondierprogramm weitere Daten aus Sondierbohrungen zum Vergleich mit dem Modell herangezogen werden. Es handelt sich, wie einleitend erwähnt, um Schrägbohrungen, welche vom Ende des Sondierstollens aus in Richtung der Piora-Zone gegen N z.T. bis auf Niveau des geplanten Basistunnels hinunter abgeteuft wurden. Mittels der Schrägbohrungen hat man festgestellt, dass die Piora-Zone in ihrem tieferen Bereich (auf Niveau des geplanten Basistunnels) aus trockenem festen Dolomit besteht, aber nicht wo die Grenze (Gipsspiegel?) zum stark wasserführenden oberen Teil der Zone liegt.

Durch schrittweise Anpassung und Variation von Geometrie und hydraulischen Eigenschaften der wassergesättigten Piora-Zone wurde versucht, eine möglichst gute Annäherung von modellierten und gemessenen Felstemperaturdaten zu erreichen. Die in den Bohrungen durchgeführten Temperaturmessungen konnten mit den Modellanpassungen sehr gut nachgebildet werden (siehe Abb. 8). Als eines der Resultate postuliert das Modell die Lage des Gipsspiegels in etwa 200 m über dem geplanten Basistunnel. Die Basis des wasserdurchtränkten Teils der Piora-Zone ist dabei durch eine erhöhte Zirkulation aufgrund einer Ausweitung gegen Nord und/oder erhöhter hydraulischer Leitfähigkeit charakterisiert.

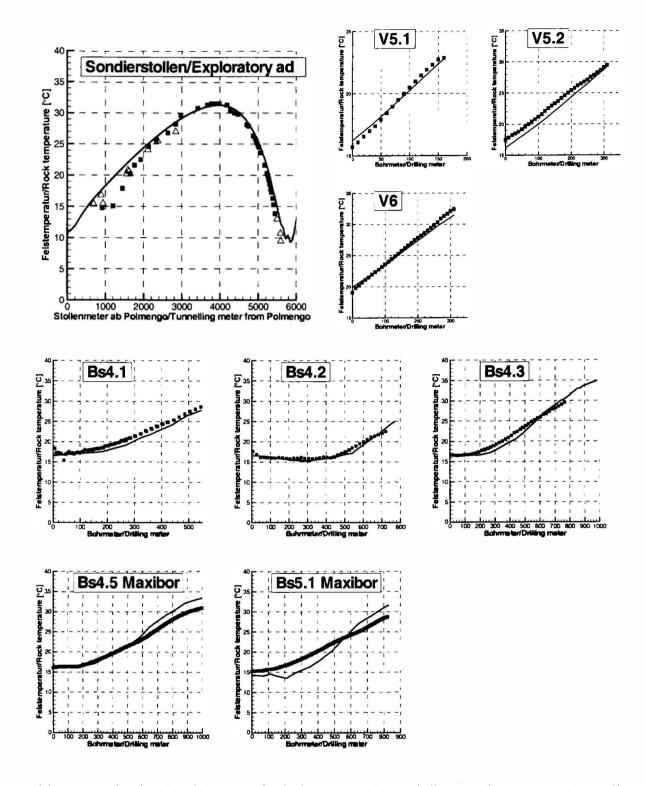


Abb. 8. Vergleich Messdaten Sondierbohrungen mit Modell. "Maxibor" ist ein spezielles Bohrloch-Temperaturmessverfahren. Lage der Bohrungen siehe Abb. 9.

Ein weiteres Resultat ist sicherlich die dreidimensionale Temperaturverteilung um die Piora-Zone. Abb. 9 zeigt einen Isothermen-Schnitt (Linien gleicher Felstemperatur) durch dieses Temperaturfeld in der Vertikalebene durch den Sondierstollen. Sehr deutlich ist die massive Auskühlung in der Piora-Zone (Umrisse markiert) auszumachen.

Durch die starke Wasserzirkulation wird vorallem der obere Teil der Zone in grossem Masse abgekühlt, nicht nur in lateraler Richtung sondern auch vertikal nach unten (bis unter Niveau des geplanten Gotthard-Basistunnels) (vgl. Abb. 5). Der zur gemessenen Temperaturabsenkung notwendige minimale Durchfluss durch die Zone bewegt sich in der Grössenordnung von 50 ls¹, der Bereich mit der höchsten Darcygeschwindigkeit (ca. 10⁻² ms⁻¹) kommt in den obersten 500 - 600 m zu liegen.

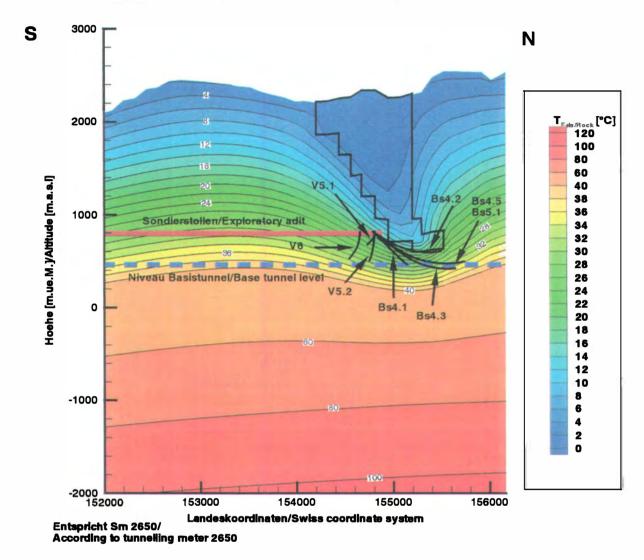


Abb. 9. Verteilung der Felstemperatur in einem Vertikalschnitt durch die Piora-Zone (in der Linie des Sondierstollens).

Eingetragen sind die Umrisse der wassergesättigten Piora-Zone (Modell).

Man muss hier jedoch betonen, dass es sich hierbei um modellierte Fliessgeschwindigkeiten und -mengen handelt, wie sie wahrscheinlich vorliegen, ohne dass ein Tunnel vorhanden ist. Durch den Tunnelbau wird das hydraulische System stark beeinträchtigt, da z.B. lokal plötzlich Druckbedingungen wie an der Oberfläche herrschen, was zu entsprechender Drainage führt.

3. Schlussfolgerungen

Die Felstemperaturprognose für tiefliegende Tunnel stellt ein aufwendiges Unterfangen dar. An zwei Beispielen konnte gezeigt werden, dass sowohl rein thermische Faktoren, hier die Wärmeleitfähigkeit des Gesteins, aber auch hydraulische Parameter, im Beispiel die hydraulische Leitfähigkeit, unter begünstigenden Umständen die Felstemperatur entlang eines Tunnels entscheidend beeinflussen können. Um diesen und weiteren Einflüssen (Topographie etc.) gerecht zu werden, muss zur Prognose der ursprünglichen Felstemperatur ein dreidimensionales numerisches Modell verwendet werden. Wasserzirkulation und die damit zusammenhängende thermische Beeinflussung des Untergrundes wurden über 10'000 Jahre, d.h. seit dem Ende der letzten Eiszeit, sowie Hebung/Erosion seit 14 Millionen Jahren instationär modelliert. Die thermischhydraulisch gekoppelten dreidimensionalen Prognoserechnungen haben für den geplanten Gotthard Basistunnel Felstemperaturen bis über 40°C in den Bereichen der grössten Überlagerung entlang der Tunnelachse ergeben. Allerdings werden noch höhere Temperaturen durch den kühlenden Einfluss der Wasserzirkulation in der Piora-Zone unterbunden. Im weiteren zeigt die Prognose, dass ein grosses thermisches Potential in Form der Bergwärme bzw. von warmen Bergwässern entlang dem Basistunnel vorhanden ist, welches z.B. zur Gebäudeheizung genutzt werden könnte (vgl. Rybach & Wilhelm 1995).

Ein spezielles Messverfahren sowie das in der Felstemperaturprognose angewandte numerische Modellwerkzeug wurde zur Vorhersage von Lage und Wasserführung der Piora-Zone verwendet. Die Geothermik hat damit einiges zur Klärung der geologischen Fragen zur Piora-Zone beitragen können. Mittels der thermisch-hydraulisch gekoppelten Modellierung konnten mehrere Aussagen zum tunnelbautechnisch problematischen, wassergesättigten Teil der Piora-Zone gemacht werden: Die thermische Auswirkung der starken Kaltwasserzirkulation in der Piora-Zone ist eine Abkühlung des Nebengesteins des Gotthard-Massivs und der Penninischen Gneisszone sowohl seitlich als auch nach unten. "Nach unten" bedeutet indessen, dass im Bereich des geplanten Gotthard-Basistunnels mit einer deutlichen Felstemperaturabsenkung zu rechnen ist. Die resultierende Verteilung der Fliessgeschwindigkeiten deutet darauf hin, dass die Hauptdurchströmung der Piora-Zone im obersten Teil stattfindet.

All diese Daten sind in das laufende Tunnelprojekt Gotthard-Basistunnel eingeflossen und wurden in den tunnelbautechnischen Entscheidungsprozess miteinbezogen. Die angewandte Technik lässt sich gut zur Vorauserkundung von Störungszonen anwenden. Es muss jedoch darauf hingewiesen werden, dass mittels der vorgestellten Methoden eine verlässliche Felstemperaturprognose bzw. relevante Aussagen zu einer Störungszone nur gemacht werden können, wenn zur Anpassung des Modells genügend Messwerte aus Tunnel und/oder Bohrungen vorliegen. Es hat sich in diesem Projekt klar erwiesen, dass die Geothermik ein höchst nützliches Prognosewerkzeug im Tunnelbau darstellt.

Danksagung

Die hier zusammengefassten Arbeiten wurden im Auftrag und in enger Zusammenarbeit mit der AlpTransit Gotthard AG, Herrn S. Flury sowie dem Geologen Dr. T.R. Schneider ausgeführt. Sie sind in zahlreichen Berichten an den Auftraggeber ausführlich beschrieben. Daneben wurden sie in der Dissertation von A. Busslinger (1998) wissenschaftlich aufbereitet. Ein grosser Dank gebührt auch Herrn PD Dr. Th. Kohl (ETH Zürich) für wertvolle Diskussionen und Hinweise.

4. Literatur

- Arbeitsteam Hydrogeologie (ATH) 1993. Bergwasserzuflüsse und Beeinflussbarkeit des Bergwasserspiegels. Bericht Nr. 425 bh. AlpTransit Gotthard AG.
- Busslinger, A. 1998. Geothermische Prognosen für tiefliegende Tunnel. Dissertation ETH Zürich.
- Busslinger, A., Rybach, L. 1999. Geothermische Vorhersage von wasserführenden Zonen. TUNNEL 1/99, 33 41.
- Kohl, T. 1992. Modellsimulation gekoppelter Vorgänge bei Wärmeentzug aus heissem Tiefengestein. Dissertation ETH Zürich Nr. 9802, 149p.
- Medici, F., Rybach, L. 1995. Geothermal Map of Switzerland 1995 (Heat Flow Density). Matériaux pour la Géologie de la Suisse. Géophysique Nr. 30. Zürich, 36p.
- Rybach, L., Pfister, M. 1994. Temperature Predictions and Predictive Temperatures in Deep Tunnels. Rock Mechanics and Rock Engineering 27, 77-88.
- Rybach, L., Wilhelm, J. 1995: Potential and use of warm waters from deep Alpine tunnels. Proc. World Geothermal Congress Florence, 2199-2203.
- Rybach, L., Busslinger, A. (1999): Prognose der Felstemperatur Gotthard Basistunnel. In: S. Löw u. R. Wyss (Herausg.), "Vorerkundung und Prognose der Basistunnels am Gotthard und am Lötschberg", A.A. Balkema, Rotterdam, 257-269.

Autor:

Prof.Dr. Ladislaus RYBACH Institut für Geophysik, ETH Zürich-Hönggerberg CH-8093 Zürich Rybach @ geo.phys.ethz.ch

Innovative ingenieurgeologische Methoden im alpintechnologischen Sektor

Entwicklung und Einsatz eines automatischen Fernüberwachungssystems basierend auf einem Laserscanner (ALARM)

Datenerfassung und Datenbearbeitung geomorphologischer Erhebungen auf Basis einer prozeßorientierten Standardlegende

Manfred SCHEIKL, Willi WANKER, Gerhard POSCHER

INHALTSVERZEICHNIS

1 EINLEITUNG

- 2 "ALARM" AUTOMATIC LASER REMOTE MONITORING
- 2.1 Allgemeines
- 2.2 Meßsystem
- 2.2.1 Lasersensor
- 2.2.2 Laserserver
- 2.2.3 Punktmessungen
- 2.2.4 Kleinflächenmessungen
- 2.2.5 Großflächenmessungen
- 2.2.6 Meß-PC mit Laserserver und Auswertesoftware
- 2.2.7 Entfernungs/Zeit-Diagramm mit Intensitätsfilter
- 2.2.8 Isolinienauswertung

3 GENERELLE LEGENDE FÜR GEOLOGISCH-GEOMORPHOLOGISCH-HYDROGEOLOGISCHE KARTIERUNGEN

- 3.1 Übersicht zum Themenbereich Geomorphologie
- 3.2 Legende zum Themenbereich Geomorphologie
- 3.2.1 Abtragsformen
- 3.2.2 Akkumulation
- 3.2.3 Allgemeine Morphologie
- 3.2.4 Anthropogene Formen
- 3.3 Literaturverzeichnis
- 4 ZUSAMMENFASSUNG

1 **EINLEITUNG**

In dieser Arbeit werden zwei neue Methoden vorgestellt, die im Rahmen der Bearbeitung konkreter ingenieurgeologischer Fragestellungen im Georisikobereich entwickelt wurden. Bei beiden Entwicklungen handelt es sich um Methoden zur Erfassung von Prozessen, die mit Massenbewegungen im Zusammenhang stehen.

"ALARM" – Automatic Laser Remote Monitoring

Die jüngste, aufgrund des Anlasses (Felssturz-Eiblschrofen) sowie der Entwicklungsgeschwindigkeit (4 Monate) auch spektakuläre, Entwicklung ist ein vollautomatisch arbeitendes Fernüberwachungssystem, das auf einem computergesteuerten Laserscanner basiert (Scheikl et. al. 2000). Das wesentliche Merkmal dieser reflektorlosen Anwendung ist dabei die Generierung von Datensätzen mit Informationen über die dreidimensionalen Verhältnisse des Meßbereichs. Diese Datensätze werden automatisch über 24 Stunden aufgenommen und weiterverarbeitet. So werden 3D-Daten mit einem Raster von 0,018° mal 0,018° zur Überwachung von Bewegungsvorgängen erhoben, wie zum Beispiel an der Abbruchwand des Eiblschrofen oder an einem Lawinenhang. Diese Daten werden mittels einer eigens entwickelten Software

verwaltet, ausgewertet und visualisiert. Als Ergebnis stehen Informationen wie Verschiebungslängen und Verschiebungsgeschwindigkeiten oder Ausbruch-, Verformungs- und Schneezuwachsvolumina zur Verfügung.

Im Folgenden wird ein Überblick über die Systemkomponenten, den Datenfluß, die Meß- und Auswertestrategie sowie ein Beispiel aus einer laufender Felsüberwachung gegeben.

"GEO-Legende" - Prozessorientierte Legende zur Erfassung von geomorphologischen Details auf digitaler Basis

Die im Zuge von Feldaufnahmen durchzuführende Erfassung von Prozessen, die für Massenbewegungen bzw. -transporten aller Art typisch und entscheidend sind, erfordert eine übersichtliche und umfassende Kartierungslegende. Der ursprünglich vorliegende Kartierungsschlüssel für die geomorphologischen Untersuchungen von Wildbacheinzugsgebieten mußte inhaltlich im Sinne einer "Prozeßbereinigung" neu strukturiert werden. Die Überarbeitung geschah im Auftrag der "Geologischen Stelle des Forsttechnischen Dienstes für Wildbach- und Lawinenverbauung" auf Grundlage der generellen Legende für geomorphologische Kartierungen. Bei der Primärerfassung der vor-Ort-Daten ist diese Standardisierung und Strukturierung der erhobenen Informationen wesentlich für die weitere Verarbeitung. Im allgemeinen werden dabei qualitative Parameter quantifiziert. Die überarbeitete Datenstruktur wird einer streng hierarchischen Gliederung unterzogen, wobei die Möglichkeit einer Erweiterung um einzelne Inhalte oder einer zusätzlichen Untergliederung gegeben ist. Aufgrund der soweit möglich - systemneutralen Vorgaben ist eine breite Akzeptanz und somit die Einführung als Standard gewährleistet. Die Wahl der anzuwendenden Signaturen basiert auf der Beschreibung von aktuellen und reliktischen, prozeßtypischen, morphologischen Phänomenen, die eine gesamthafte Interpretation der zu beurteilenden Situation ermöglichen.

2 "ALARM" – AUTOMATIC LASER REMOTE MONITORING

2.1 Allgemeines

Steile und unzugängliche, aufgrund von Felssturz- oder Lawinengefahr gesperrte Bereiche sind mit konventionellen vermessungstechnischen Anwendungen nur schwer bis gar nicht dreidimensional und innerhalb kurzer Zeiträume zu erfassen.

Das System "ALARM" besteht aus einem Meßsystem und einem Auswertesystem.

Diese beiden Teile sind im wesentlichen als zwei voneinander unabhängig arbeitende Komponenten des weitestgehend automatisierten Gesamtsystems zu sehen.

Durch die im Gesamtsystem realisierte Meß- und Auswertestrategie kann die Erfassung von Distanzänderungen im Bereich von <1cm/Woche erreicht werden. Die Meß- und Auswertestrategie ermöglicht nicht nur die **Reduktion des gerätespezifischen Meßfehlers**, sondern berücksichtigt auch die zwischen den einzelnen Meßperioden veränderlichen atmosphärischen Bedingungen. Kapitel 2.2 beschreibt die Komponenten des Meßsystems und widmet sich der Auswertung von verschiedenen Datensatzarten bzw. der Verwendung einzelner Meßprinzipien im Hinblick auf die Aussagekraft der Ergebnisse.

2.2 Meßsystem

Das Meßsystem besteht aus einem Lasersensor, der von einem Meß-PC Meßaufträge über ein serielles Schnittstellenkabel erhält. Die vom Lasersensor aufgenommenen Daten werden nach Abschluß des Meßauftrages aus dem sensoreigenen Zwischenspeicher über das serielle Schnittstellenkabel an den Meß-PC weitergeleitet und dort in einem festgelegten Dateiablagesystem gespeichert. Die Generierung sowie die Verwaltung der Meßaufträge sowie die Verwaltung der Meßdaten wird von einer am Meß-PC installierten Software, dem "Laserserver" wahrgenommen. In der untenstehenden Abbildung wird ein schematisches Datenflußdiagramm gezeigt (Abb.1)

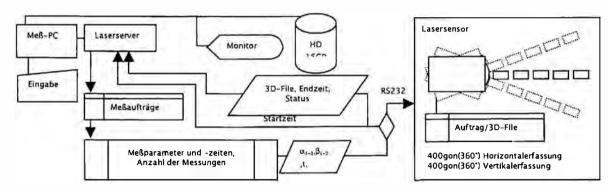


Abb. 1: Schematische Darstellung – Datenfluß, Organisationsdiagramm

2.2.1 Lasersensor

Hardwarekomponenten

Der Lasersensor besteht im wesentlichen aus einem Halbleiteremittor (~900nm) sowie einem dazu zeitlich gekoppelten Halbleitersensor. Die dazugehörige Positioniereinheit besitzt eine schrittmotorgetriebene Horizontalwinkelpositionierungseinheit sowie eine entsprechende Vertikalwinkelpositionierungseinheit. Die kleinsten Positionierungsschritte, die zugleich den feinsten Meßraster definieren, betragen in horizontaler und vertikaler Richtung zur Zeit 0,02gon bzw. 0,018°. Die beiden Winkelpositionen werden über ein absolutes, internes Referenzsystem bestimmt, das mit Hilfe der Messung von Referenzmarken (Reflextafeln) bekannter Lage sowie der Auswertungen dieser Messungen entsprechenden Bildverarbeitungsmodulen, in ein globales Referenzsystem eingehängt

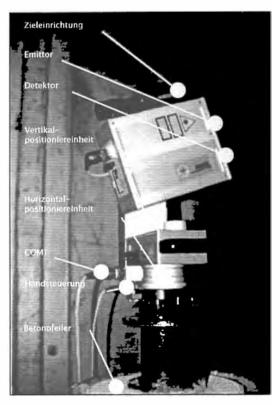


Abb. 2 : Bestandteile des Lasersensors

werden kann.

So können 3D-Daten, die sich auf das interne Referenzsystem beziehen, lagerichtig dargestellt bzw. weiterverarbeitet werden. In Abbildung 2 werden die einzelnen Geräteteile an dem am Eiblschrofen installierten Scanner gezeigt.

Meßprinzip - Lasersensor

Die Entfernungsmessung des Lasersensors basiert auf einer einfachen Berechnung der Entfernung über die als konstant angenommene Lichtgeschwindigkeit. Dabei können mehrere Detektionsprinzipien zur Verbesserung der Meßergebnisse bei Auftreten verschiedener Störeinflüsse aktiviert werden. Die Verarbeitungsprozedur (Maximumsuche) der Eingangssignale kann jedoch nicht beeinflußt werden, was im Hinblick auf die Optimierung der Meßgenauigkeit einen wesentlichen Nachteil darstellt.

Zur Entfernungsmessung werden vom Lasersensor rund 5000 Lichtimpulse pro Sekunde mit einer Wellenlänge von ~900nm emittiert, an der Zielfläche (Felswand, Schneeoberfläche usw...) reflektiert und in Richtung Lasersensor zurückgestreut. Der zurückgelegte Weg der Lichtimpulse ist proportional zu deren Gesamtlaufzeit. Der resultierende Entfernungswert wird demnach einer aus Vielzahl von Einzelimpulsmessungen berechnet. Ein Einzelpunktdatum setzt sich schließlich aus Entfernungsmittelwert, einer dazugehörigen Standardabweichung Entfernungsmittelwertes, einem Intensitätsmittelwert sowie aus einem Horizontal- und Vertikalwinkelwert zusammen. Diese (polaren) Daten können über eine vom Gerätehersteller mitgelieferte Software als x,y,z-Koordinaten (bezogen auf das interne Referenzsystem) exportiert werden. In Abb. 3 wird die Ermittlung der Entfernungswerte in Form einer schematischen Darstellung gezeigt.

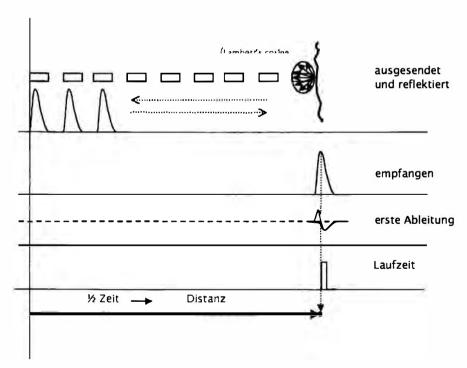


Abb. 3: Schematische Darstellung der Entfernungsmessung

Aufgrund der unterschiedlichen Reflexionseigenschaften natürlicher Materialien bzw. Oberflächen (Material, Rauhigkeiten, Wasserfilm oder Staubbelag) und atmosphärischer Störeinflüsse auf jeden einzelnen Lichtimpuls vor und nach der Reflexion ist anzunehmen, daß nur in seltenen Fällen ein eindeutiges, eingipfeliges, normalverteiltes und vor allem ein symetrisches Reflexionssignal vom Detektor aufgenommen wird. Zur Zeit wird ein unveränderliches, gerätespezifisches Signalverarbeitungsprinzip (Bildung der ersten Ableitung nach der Zeit; Suche nach Nullstellen, Berechnung der Entfernung) verwendet. Dem tatsächlichen, von der Idealform abweichenden Verlauf der Reflexionsintensität (Peakform) kann somit nicht Rechnung getragen werden. Methoden zur Ermittlung von Flächenschwerpunkten bzw. zur Entflechtung mehrgipfeliger Reflexionssignale über die Anwendung von Entflechtungs- und Anpassungsfunktionen sollen in einem weiteren Entwicklungsprogramm umgesetzt werden.

2.2.2 Laserserver

Kompensationsprinzip – System "ALARM"

Bei konventionellen vermessungstechnischen Methoden müssen die bei der Entfernungsmessung vorherrschenden atmosphärischen Bedingungen mitberücksichtigt und mittels rechnerischer Verfahren unter Annahme physikalischer Modelle (Lichtgeschwindigkeits-Temperatur-Luftdruckbeziehung) kompensiert werden. Bei großen Höhenunterschieden zwischen einem Zielpunkt und dem Meßgerät treten jedoch eine Reihe verschiedener Lichtausbreitungsbedingungen auf, die unter anderem durch Luftschichtung und damit verbundene Luftdruck- und Temperaturdiskontinuitäten zustandekommen. Die Summe dieser Effekte kann mittels Luftdruck- und Temperaturmessungen bzw. mit einem vertretbaren Aufwand innerhalb kurzer Zeit (alle 2 Minuten) nicht erfaßt werden.

Beim System "ALARM" wird eine einfaches Kompensationsprinzip verwendet. Dabei wird vor und nach einer Oberflächenmessung ein Ziel mit bekannter Entfernung (So) zur Referenzierung vermessen. So erhält ieder **Datensatz** zusätzliche zwei Referenzlängendatensätze die bei der Auswertung der Daten zur

Kompensationsrechnung herangezogen werden. Die resultierenden Kompensationswerte repräsentieren die bei der Zielflächenmessung vorherrschenden Lichtausbreitungsbedingungen.

In Abbildung 4 wird die am Eiblschrofen installierte Referenzfläche gezeigt. Die am oberen Rand des Rahmens befindlichen Meßprismen dienen zur periodischen Überprüfung der Tafelposition (So).

In Abbildung 5 wird das Kompensationsprinzip schematisch dargestellt.



Abb. 4: Referenztafel mit Meßprismen

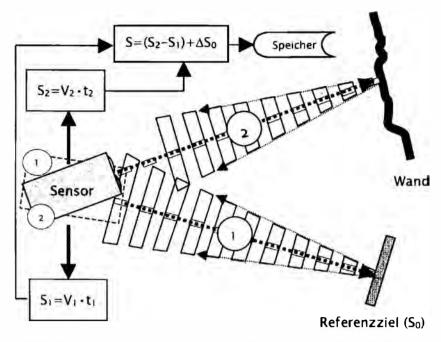


Abb.5: Kompensationsprinzip- 1) Referenzmessung 2) Messung Zielfläche

2.2.3 Punktmessungen

Der Sensor kann sowohl mit der Erzeugung von Punktentfernungsdaten mit räumlicher Zuordnung beauftragt werden als auch mit der Aufnahme vordefinierter Meßflächen. Ein Datenpunkt besitzt vor der Verarbeitung mit der entsprechenden Auswertesoftware folgende (Roh) Informationen:

Tabelle 1: Informationsgehalt von Punktdaten

Information	Abkürzung	Auflösung	Einheit	Meßbereich	Bespiel
Distanz	D	0,001	m	15-2000	1987,098
Horizontal- winkel	0	0,01	gon	0-400	187,78
Vertikalwinkel	0	0,01	gon	0-400	89,01
Reflexions- intensität	ı	1	-	0-200	135

Bei der Durchführung von Messungen gilt bezüglich der Reduktion des Meßfehlers das Prinzip der Berechnung eines statistischen Schätzwertes, der dem tatsächlichen Entfernungswert mit zunehmender Meßwiederholrate näher kommt. Bei der Durchführung von Punktmessungen besteht jedoch im Vergleich zu Kleinflächenmessungen der Nachteil, daß die Ablenkung der Lichtimpulse durch Brechungseffekte in Verbindung mit groben Oberflächenrauhigkeiten zur Erhöhung des Meßfehlers führt.

Deshalb spielen Punktmessungen nur eine untergeordnete Rolle bei der Erfassung von Bewegungserscheinungen.

2.2.4 Kleinflächenmessungen

Die oftmalige, automatische Messung von Kleinflächen wird durch ein Softwaremodul des Laserservers ermöglicht. Der wesentliche Vorteil bei der Durchführung von Kleinflächenscanns liegt dabei in der kurzen Dauer der Messung und der geringen Veränderung der atmosphärischen Bedingungen zwischen den vor- und nachgestellten Kompensationsmessungen. In der nebenstehenden Abbildung wird ein Reflexionsbild einer Kleinflächenmessung (Raster 0,018°x0,018°) gezeigt. Dabei handelt es sich um ein künstliches Ziel, das zur Orientierung des internen Referenzsystems dient. So wird ein periodischer Einsatz des Gerätes ermöglicht, ohne zusätzliche Fehlerquellen durch Montagefehler in Kauf nehmen zu müssen. Die mittels Software ermittelte interne Position der unbeweglichen und lagebestimmten Reflextafel wird mit dem externen Koordinatensystem zusammengeführt, sodaß alle dreidimensionalen Daten auf dieses bezogen werden können.

Die zuvor erwähnte Fehlerreduktion wird zum einen mittels der Anwendung der bereits beschriebenen Kompensationsmethode erreicht und zum anderen durch die statistische Auswertung der Kleinflächenscanns verbessert. Eine mehr oder weniger rauhe Gesteinsoberfläche, die im Bezug zum Koordinatensystem des Sensors eine allgemeine Lage aufweist, besitzt eine unendlich hohe Anzahl an verschiedenen Entfernungen zu einem definierten Nullpunkt (Scannernullpunkt). Um die zu messende Fläche hinsichtlich der Entfernung zu charakterisieren, errechnet die Auswertesoftware des Systems "ALARM" ein Entfernungshistogramm. Dieses spiegelt die in eine Entfernungsverteilung transformierte dreidimensionale Ebenheit der Zielfläche wieder. Die Form der Verteilung gibt demnach Auskunft über die Qualität einer Zielfläche. Treten an schräg zum Laserstrahl stehenden Zielflächen Entfernungsänderungen auf, die allgemeine Richtung besitzen, treten scheinbare Verkürzungen Verlängerungen auf. Um diese Effekte erkennen zu können, muß entweder eine dreidimensionale Betrachtung der geometrischen Verhältnisse durchgeführt oder zumindest eine Histogrammanalyse in die Auswertung miteinbezogen werden.

Abbildung 6 zeigt zwei Entfernungshistogramme.

Dabei stellt das Histogramm 1 die Entfernungsverteilung einer sehr ebenen und normal zum Laserstrahl stehenden Fläche dar.

Das Histogramm 2 zeigt die Entfernungsverteilung einer unebenen und schräg zum Laserstrahl stehenden Fläche. Die blauen Säulen stellen die Entfernungsverteilung am 18.08.2000, die roten Säulen jene am 05.10.2000 dar. Eine deutliche Änderung der Verteilungsform deutet auf die Änderung der Flächenstruktur hin, die in diesem Fall durch Ausbrüche verursacht wurde. Die unregelmäßige Form des Histogramms 2 weist zudem auf eine unregelmäßige Struktur der Zielfläche hin. Bei der Interpretation der Ergebnisse wird auf die Histogrammform d.h. auf die Flächenqualität entsprechend Rücksicht genommen.

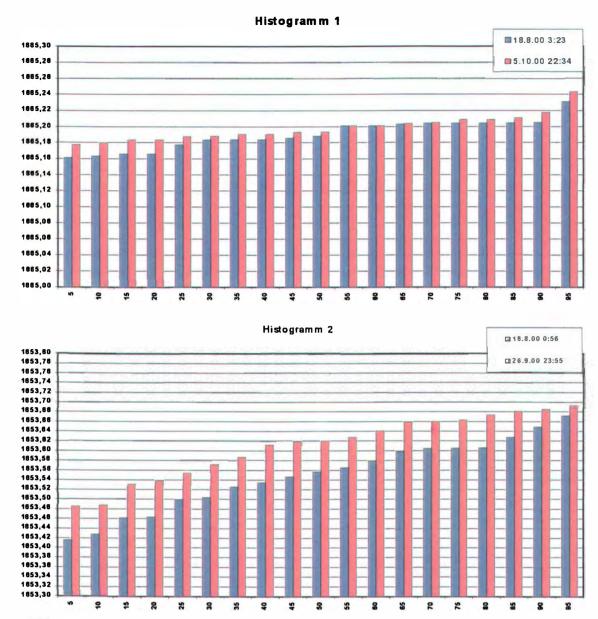


Abbildung 6: Entfernungshistogramme

2.2.5 Großflächenmessungen

Großflächenmessungen dienen im wesentlichen zur Erzeugung von Oberflächenmodellen mit einer Auflösung von bis zu 0,02gon. Diese Oberflächenmodelle können sowohl mit konventionellen CAD-Programmen als auch mit der Auswertesoftware des "ALARM"-Systems etwa zur Berechnung von Abbruch- oder Schneezuwachsvolumina genutzt werden. Das Produkt der Volumsauswertung ist die Ausgabe von Isolinienbildern oder von Volums/Zeit-Diagrammen.

Die Anwendung von Großflächenscanns dient nur in geringem Maß der Erfassung von detailierten Bewegungsvorgängen, da die lange Meßdauer keine exakte Kompensation der Meßdaten erlaubt.

2.2.6 Meß-PC mit Laserserver und Auswertesoftware

Die Hauptaufgabe des auf dem Meß-PC installierten Laserservers ist die Verwaltung der Meßaufträge und der vom Sensor akquirierten Datensätze. Dabei helfen Eingabemasken mit einfacher Menüführung die Generierung von Auftragsbibliotheken oder die Erstellung von neuen Meßflächen.

Die beim Laserserver eingehenden Datensätzen werden in einem vorgegeben Dateiablagesystem gespeichert. Diese Ablagestruktur ist bei der nachfolgenden Auswertung hilfreich, da die Auswertesoftware lediglich auf die in dem fixen Ablagesystem befindlichen Informatioen zugreifen muß, ohne große Datenmengen in die eigene Datenbank aufnehmen zu müssen. So wird eine rasche Auswertung nach verschiedenen Kriterien und vor allem die rasche Visualisierung großer Datenmengen ermöglicht.

Die Auswertesoftware greift je nach Auswertemodus auf verschiedene Informationen der Datensätze zu und legt gegebenfalls neue Datensätze in der gleichen Struktur an, sodaß z.B.: das Visualisierungsmodul darauf zugreifen kann.

In den nachfolgenden Punkten werden einige Auswertebeispiele aus einem aktuellen Felsüberwachungsprojekt gezeigt.

10%

20%

30%

40%

60%

2.2.7 Entfernungs / Zeit-Diagramm mit Intensitätsfilter

In Abbildung 7 wird die Reduktion der Datensätze durch die Anwendung eines Intensitätsfilters gezeigt. Dabei zunehmender werden bei kriminierung von Datensätzen mit niedrigen Intensitätswerten (schlechtes Wetter) die Ausreißer soweit reduziert. daß lediglich vertrauenswürdigsten zur Auswertung herangezogen werden. Von oben nach unten wird ein dichterer Intensitätsfilter angewendet.

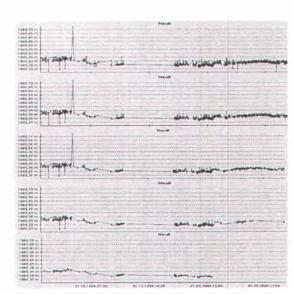


Abb. 7: Intensitätsfilter

2.2.8 Isolinienauswertung

Eine weitere für die Darstellung wesentlicher Bewegungsvorgänge hilfreiche Darstellungsform sind Bilder mit Linien gleicher Verschiebungslänge. Dabei werden zwei kompensierte 3D-Modelle überlagert, wobei für eine rechnerisch verdichtete Anzahl an Punktpositionen die Längendifferenz berechnet wird. Diese Längendifferen werden dann in Form von Isolinien über ein aktuelles RGB-Bild geplottet.

In Abbildung 8 ist eine Isolinienauswertung, die mit einem konventionellen CAD-Programm erstellt wurde, zu sehen.



Abbildung 8: Isolinienbild

3 GENERELLE LEGENDE FÜR GEOLOGISCH-GEOMORPHOLOGISCH-HYDROGEOLOGISCHE KARTIERUNGEN

3.1 Übersicht zum Themenbereich Geomorphologie

Der ursprünglich vorliegende Kartierungsschlüssel für die geomorphologischen Untersuchungen von Wildbacheinzugsgebieten mußte inhaltlich im Sinne einer "Prozeßbereinigung" neu strukturiert werden. Die Überarbeitung geschah im Auftrag der "Geologischen Stelle des Forsttechnischen Dienstes für Wildbach- und Lawinenverbauung" auf Grundlage der generellen Legende für geomorphologische Kartierungen. Die überarbeitete Datenstruktur wird einer streng hierarchischen Gliederung unterzogen, wobei die Möglichkeit einer Erweiterung um einzelne Inhalte oder einer zusätzlichen Untergliederung gegeben ist. Aufgrund der – soweit möglich – systemneutralen Vorgaben soll eine breite Akzeptanz und somit die Einführung als Standard gewährleistet sein.

Das vorliegende Ergebnis der ersten Entwicklungsstufe dieser Bearbeitung kann nicht den Ansprüchen einer "eierlegenden Wollmilchsau" gerecht werden. In der Durchführung und Handhabung muß dieses Schema flexibel und dynamisch bleiben. Allfällige Kritiken im Sinne von Wünschen, Anregungen oder Beschwerden sind gewollt und erhöhen die Wahrscheinlichkeit, dass sich die vorgeschlagene Methodik mehr und mehr als Standard durchsetzt. In diesem Sinne ist auch zu beachten, dass in der ersten Entwicklungsstufe die inhaltliche und strukturelle Gliederung auf den Erfassungs- und Zielmaßstab 1:5.000 ausgelegt wurde. Die Verwendung der Generallegende für andere Maßstabsbereiche ist ohne vorgeschaltenes systematisches Up- bzw. Downscaling nicht zulässig.

Bereits in der Phase der Datenerfassung gilt es, sämtliche Redundanzen im

beobachteten Raum und im untersuchten Themenbereich auszuschalten. Wie erwähnt, mussten die ursprünglich vorliegenden Kartierungsschlüssel für die geomorphologischen Untersuchungen von Wildbacheinzugsgebieten entsprechend ihrer Inhalte neu strukturiert werden:

Die Legende orientiert sich an den Abtrags- und Ablagerungsprozessen. Sie sieht eine Unterscheidung in Grundtypen von Massenbewegungen bzw. Massentransport mit den bekannten Übergangsbereichen im wesentlichen so vor, wie dies von BUNZA (1982, 1992a) und BUNZA et al. (1992b, 1996) systematisch beschrieben worden ist. Sie ist zudem so gestaltet, daß auch Teilbereiche verschiedener Oberflächenformen ausgewiesen werden können, da oft nicht alle Erscheinungsbilder eines Prozesses erhalten sind.

Für die Datenbearbeitung bzw. Datenhaltung war gefordert, die oben genannte Informationsstruktur einer streng hierarchischen Gliederung zu unterziehen, wobei eine Erweiterung um einzelne – in der Hierarchie gleichgestellte – Inhalte oder um weitere Untergliederungen möglich sein muß. Für die Datenhaltung sollte eine weitestgehend systemneutrale Methode entwickelt werden. In diesem ersten Arbeitsgang liegt der Schwerpunkt der Datenbearbeitung daher in einer effizienten Einarbeitung der erfaßten und strukturierten Primärdaten in ein CAD-System. Durch die freie Systemwahl soll weiters eine möglichst breite Umsetzung der strukturierten Erfassung und Einarbeitung des betrachteten Geoinventars gewährleistet werden.

Neben der strukturellen Vorgabe wird auch das Erscheinungsbild standardisiert, wobei beispielsweise bei den Abtragsformen rote Linienführungen durchwegs aktuelle Prozesse signalisieren, grüne Farbgebung steht für die reliktische Ausprägung der jeweiligen Form.

Datenstruktur

Die im Folgenden dargestellte inhaltliche Gliederung wird für die CAD-Bearbeitung nach einem grundsätzlichen Schema, das für alle Themenbereiche des Geoinventars Gültigkeit hat, strukturiert:

Thema - Bereich - Erscheinungsform - (Ausprägung) - Datenart

Beispielsweise wird ein aktueller Nischananbruch aus Stürzen wie folgt charakterisiert:

GM-AB-STURZ-A-L bzw. GM-AB-STURZ-A-X bzw. GM-AB-STURZ-A-C

Thema:

GeoMorphologie

Bereich:

Abtragsform

Bezeichnung:

Nischenanbruch aus STÜRZen

Ausprägung:

Aktuell

Datenart:

Linie, Flächen-Code, flächendarstellende Schraffur (X)

3.2 Legende zum Themenbereich Geomorphologie

ABTRAGSFORMEN			AKKUMULATION	
Nissbertweineh eus Slützen	ekand		Hangschul@uspel, Schul@uslde	alcusi
	reliktisch			rediction
Arthruch eus Ruterchung bzw. Gleitung			Bluckschvff, Turne	aktuel
	reliktisch			nalistra
	varmuse	<u>. </u>	Rutautwanan	elitatel
Responsibling, automotific Spalen, Sactions	etruel, skdv	·		malitach
	reliktioch	7. T		Amilian page
	Venture		Filmia dia Ahlagarungan	
Kriech- und/oder Fleißkürper	aktiv	ā		militach .
	reliktisch		نناسيسيفا	** ***********************************
	Ye/mutel			nellatech
Uler-, Felen-, Rivemenbruch		\sum_{i}	ALLGEMEINE MO	ORPHOLOGIE
	resident		Abfluctions Sente	
Schree und Lainerschuff			Rinne, algernain	∇
	nitract		Kant-Erstanzioler	ਨੇ
Shara: Gloti, Ratech, Martinini	March	\square	Sub-, hachelpane Kare I	
	redictoch		8 colombia	Ö
	VACTALIS	5.14	Hariffarachurdig	r r
ANTHROPOGENE FORMEN			Well Rucken	merteenl
Verbourgen				angeologiest -
Plants			Gelbrinierin	
Articly®V Abbase			Hangning	*
SchaingHale			Windows	
Status Berneldung, Vieligite				

Abbildung 9: Auszug aus der Generellen Legende für Geologisch-geomorphologisch-hydrogeologische Kartierungen, Themenbereich Geomorphologie (verkleinert)

3.2.1 Abtragsformen:

Nischenanbruch aus Stürzen (Steinschlag, Felssturz¹, Bergsturz²):

Anbruch ¹ aus <u>rotationsförmiger Gleitung</u> ² in veränderlich-festen und leicht verwitternden ³, stark durchtrennten Festgesteinen ⁴ oder Lockergersteinen ⁵ bzw. Anbruch ⁶ aus translationsförmiger Gleitung in Fest-⁷ und Lockergesteinen ⁸:

¹ Absturzereignisse von Einzelblöcken bis Blockverbänden (Einzelblock > 0,5m³) von 10-10.000m³ pro Ereignis; darunter Steinschlag; BUNZA, 1982; BOLLINGER et al., 1992;

² im Unterschied zum Felssturz verändert / prägt ein Bergsturz durch seine Dimension die Landschaft nachhaltig; BUNZA (1982) abstürzendes Gesteinsmaterial über 10.000m³, durch intensive Wechselwirkungen der Komponenten beim Sturzvorgang gekennzeichnet; BOLLINGER et al., 1992; KIENHOLZ, 1996;

¹ muschelförmige Gleitfläche;

² ZISCHINSKY, 1967;

- ³ z.B.: KEIL, 1963, EINSELE et al. 1985;
- ⁴ MÜLLER 1963a, 1963b:
- ⁵ Rutschung, Gleitung, bei der sich die Gleitfläche erst am Beginn der Bewegung bildet, tritt vor allem in "homogenem" Lockermaterial auf; VEDER, 1979; BUNZA, 1982
- 6 +/- ebene Gleitfläche;
- ⁷ Gleitung im Sinne ZISCHINSKY's (1967) an bestehenden Trennflächen;
- ⁸ Rutschungen, Gleitungen an einer oder mehreren vor dem Ereignis bereits bestehenden morphologischen Anisotropien, welche auch mechanisch als solche wirken ZISCHINSKY, 1967; MÜLLER, 1963; BUNZA, 1982;

Bergzerreißung ¹- ausgeprägte Spalten und Spaltensysteme in Fels- ² und Lockergestein ³; Sackung ⁴; Ablösezonen solcher Prozesse:

- ¹ Folgeerscheinungen von Systemen "Hart auf Weich" POISEL & EPPENSTEINER, 1988a, b, 1989;
- ² Bewegungsrate nimmt mit zunehmender Tiefe (Mächtigkeit) allmählich ab, Auflösung in Türme; AMPFERER, 1939,1940;
- ³ stehen in Lockergesteinen meist senkrecht und reichen nach TERZAGHI (1950) [in: BUNZA, 1982] maximal bis auf die Hälfte der Böschungshöhe hinab, sofern sie nicht durch das bestehende Flächengefüge beeinflußt werden; Bewegungsrate nimmt mit zunehmender Tiefe ab;
- ⁴ ZISCHINSKY, 1967

<u>Kriech-¹ und/ oder Fließ-² -körper</u>³, in Locker- und / oder Festgestein ⁴ (Talzuschubsmasse - seitliche und untere Umgrenzung):

- ¹ langsames, unmerkliches, steifplastisches Fließen von Felsmassen / plastisches Fließen von Gesteinsschutt, Boden oder gemischten Lockermassen, Bruchfestigkeit des Materials nicht überschreitend; BUNZA, 1982;
- ² mehr oder weniger mäßig schnelle, direkt wahrnehmbare Bewegung von weichplastischen Massen, losem Gesteinsschutt oder Boden unter Einfluß der Gravitation mit mehr oder weniger hohem Wassergehalt über innere Verformung - Fließen i.e.S.; Übergänge oft mit Konsistenzänderungen verbunden; BUNZA 1982; LAATSCH & GROTTENTHALER 1972; HAEFELI 1954; ACKERMANN, 1950;
- ³ wenn Kriechmasse an Hangeinschnitte /-mulden gebunden Erd- / Schuttstrom (nach Hauptlockergesteinstypen; BUNZA, 1982)
- ⁴ tiefgreifende, langsame, differenzierte Nachböschung (Bruchfließen) des Großteils bzw. der Talflanke, ungefähre Umgrenzung; AMPFERER, 1939,1940; STINI, 1941,1942; ZISCHINSKY, 1967,1969a, 1969b; BUNZA, 1982; BRÜCKL & SCHEIDEGGER, 1972; MÜLLER, 1960, 1963a;

Uferanbruch ¹, Feilenanbruch ², Rinnenanbruch ³:

- ¹ aus Tiefen- und / oder Seitenerosion resultierende Anbruchsform; die Masse ist durch das Gerinne abtransportiert worden;
- ² Summenlinie der Uferanbrüche;

³ bei periodischer Wasserführung - Rinnenanbruch, BUNZA 1975

Schnee- und Lawinenschurf:

zumeist seichtgründiger Abtrag als Folge des Abgehens von Grundschneebrettern und Grundlawinen

Sturz-, Gleit-, Rutsch- 1, Murbahn 2:

- ¹ Transmissions- und Erosionsstrecke, vermittelt zwischen Anbruchsform und Ablagerung
- ² durch die Schubkraft der Muren entsteht auf Transmissionsstrecke zwischen Anbruch und Ablagerung trogförmiger "Murkanal", Tiefgang in Abhängigkeit von Steilheit und Wassermenge (MAULL, 1958); Schurf durch Muren aufgrund von hohen Geschwindigkeiten auch nach Durchbrüchen von Verklausungen (LAATSCH & GROTTENTHALER, 1972) in BUNZA 1982;

3.2.2 Akkumulation:

Hangschuttkegel, Schutthalde:

Produkt aus dem Vorgang Stürzen

Blockschutt, Toma:

aus Fels- / Bergsturz; häufig treten Blockkomponenten auf, beim plötzlichen Stillstand bilden sich vor allem bei größeren Sturzmassen (im Unterschied zu Einzelsturzblöcken) oft Hügelformen im Sinne einer Toma-Landschaft

Rutschmasse:

Ablagerungen der verschiedenen Rutsch- bzw. Gleitvorgängen

fluviatile Ablagerungen:

aus dem Vorgang Massentransport mit Wasser als Medium abgelagertes Material Murmaterial:

Ablagerungen von Muren, murartigen, hyperkonzentrierten Abflüssen, Dichteströmen - RICKENMANN, 1990; HÜBL, 1995, im Grenzbereich von Massenbewegung zu Massenschurf (quasiviskoses Fließen) STINI, 1910; BUNZA, 1982; auch Murkegel, Murkopf; auf Erosionsrinnen darunter achten!

3.2.3 Allgemeine Morphologie

Abflußlose Senke

Rinne, allgemein

Karst-Einsturztrichter

Sub-, hochalpiner Karst

Buckelfläche

Kar / Karschwelle

Wall, Rücken

Geländekante

Hangneigung

Windwurf

3.2.4 Anthropogene Formen

Verbauungen

Planie

Anschnitt / Abbaue

Schüttung / Halde

Starke Beweidung / Viehtritt

3.3 Literaturverzeichnis

- ACKERMANN E.: Quickerden und Fließbewegungen bei Erdrutschen. Z. d. Dt. Geol. Ges., Bd. 100, S.427-466, Stuttgart 1950.
- AMPFERER O.: Über einige Formen der Bergzerreißung. Sitz.-Ber. Akad. d. Wiss., 149, 51, Wien 1939.
- AMPFERER O.: Zum weiteren Ausbau der Lehre von den Bergzerreißungen. Sitz.-Ber. Akad. d. Wiss. Wien, Abt.I, 149, 1.u.2.H., S.51-70, Wien 1940.
- BRÜCKL E. & SCHEIDEGGER A. E.: The Rheology of Spacially Continuous Mass Creep in Rock. Rock Mechanics 4, S.237-250, Wien 1972.
- BWW & BUWAL: Naturgefahren Empfehlungen Symbolkasten zur Kartierung der Phänomene Ausgabe 1995. Mitteilungen des Bundesamtes für Wasserwirtschaft Nr. 6 (KIENHOLZ H. & KRUMMENACHER B.), Bern 1995.
- BMLF FORSTTECHNISCHER DIENST F. WILDBACH- U. LAWINEN-VERBAUUNG GEOLOGISCHE STELLE: Generelle Legende für Geomorphologische Kartierungen des Forsttechnischen Dienstes für Wildbach- und Lawinenverbauung in Österreich (SÖNSER Th. & WANKER W.), Innsbruck 1997/98.
- BUNZA G. & KARL J.: Erläuterungen zur hydrographisch morphologischen Karte der Bayerischen Alpen 1:25 000. Bayerisches Landesamt f. Wasserwirtschaft, Sonderheft, 68 S., 64 Abb., 5 Ktn., München 1975.
- BUNZA G.: Systematik und Analyse alpiner Massenbewegungen. [in:] BUNZA G., KARL J., MANGELSDORF J. & SIMMERSBACH P.: Geologisch morphologische Grundlagen der Wildbachkunde. Schriftenreihe d.Bayer. Landesamt f. Wasserwirtschaft, Heft 17, S.1-84, München 1982.
- BUNZA G.: Die Erfassung des aktuellen Abtragsgeschehens mit Hilfe geomorpholo-

- gischer Kartierungen von potentiellen Gefahrenräumen. Int. Symp. Interpraevent Bern, Bd. 6, S.213-236, Bern 1992a.
- BUNZA G., LÖHMANNSRÖBEN R. & SCHAUER Th.: Erfassung und Darstellung des Gefährdungspotentials durch Oberflächenabfluß und Abtrag in einem Wildbacheinzugsgebiet (Hirschbach / Hindelang). Int. Symp. Interpraevent Bern, Bd. 6, S.273-276, 8 Ktn., Bern 1992b.
- BUNZA G., JÜRGING P., LÖHMANNSRÖBEN R., SCHAUER Th. & ZIEGLER R: Abflußund Abtragsprozesse in Wildbacheinzugsgebieten. Grundlagen zum integralen Wildbachschutz. - Schriftenreihe Bayer. Landesamt f. Wasserwirtschaft, H. 27, 90 S., 100 Abb., München 1996.
- BOLLINGER D., NOVERRAZ F. & TRIPET J.-P.: Die kartographische Darstellung der Bodenbewegungsgefahren als Planungsgrundlage: Ein Beitrag zur Vereinheitlichung der Gefahrenaufnahmen in der Schweiz. Int. Symp. Interpraevent Bern, Bd. 3, S.191-200, Bern 1992.
- DIN 19663 WILDBACHVERBAUUNG Begriffe, Planung und Bau. Normenausschuß Wasserwesen im Deutschen Institut für Normung, 27 S., Beuth Verlag GmbH, Berlin 1985.
- EINSELE G., HEITFELD K.-H., LEMPP Ch. & SCHETELIG K.: Auflockerung und Verwitterung in der Ingenieurgeologie: Übersicht, Feldansprache, Klassifikation (Verwitterungsprofile) Einleitender Beitrag. [in:] Ingenieurgeologische Probleme im Grenzbereich zwischen Locker- und Festgesteinen. [Hrsg.:] HEITFELD K.-H., S.2-23, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg 1985.
- GEO-BYTE (Gesellschaft für Analyse, Simulation und Modellierung georelevanter Daten GmbH. Nonntaler Hauptstr. 64, A-5020 Salzburg): NORMBOHR, das Programmsystem zur Bohrungsarchivierung und Darstellung von Bohrprofilen nach ÖNORM, Vers. 1.1, 1999.
- HAEFELI R.: Zum progressiven Bruch im Schnee, Boden, Fels und Eis. Felsmechanik und Ing.-Geologie, Vol. V/1, S.17-37, Wien 1967.
- HÜBL H.: Muren: Prozesse und Ablagerungsformen Bedeutung für die Gefahrenzonenplanung. unveröff. Diss. 211 S., BoKu Wien 1995.
- KEIL K.: Grundlegende Eigenschaften der Fels- und Festgesteine: Kriterien und Beispiele. Felsmechanik und Ing.-Geologie Vol I/H.3-4, S.206-213, 1963.
- KIENHOLZ H.: Gefahrenkarten: Maßgeblichen Parameter und Kriterien zur Festlegung von Intensitäten. Int. Symp. Interpraevent Bern, Bd. 3, S.47-58, Garmisch-Partenkirchen 1996.
- LAATSCH W. & GROTTENTHALER W.: Typen der Massenverlagerung in den Alpen und ihre Klassifikation. Forstwissensch. Centralblatt, 91.Jg., H.6, 309-339, 1972.
- MAULL O.: Handbuch der Geomorphologie. Wien 1958.
- MOSER M.: Hangstabilitäten; Klassifikation Kartierung Prognose. Seminarunterlagen zum Int. Symp. Interpraevent, Garmisch 1996.
- MÜLLER L.: Brechen und Fließen in der geologischen und mechanischen Terminologie. Geologie und Bauwesen, Jg.25, H.1, S.218-227, Wien 1960.

- MÜLLER L.: Die Standfestigkeit von Felsböschungen als spezifisch geomechanische Aufgabe. Felsmechanik und Ing.-Geologie, Vol.I/1, S.50-71, Wien 1963a.
- MÜLLER L.: Der Felsbau. Bd.1, 624 S., 307 Abb., 22 Taf., Enke Verlag, Stuttgart 1963b.
- POISEL R. & EPPENSTEINER W.: A contribution to the systematics of rock mass movements. LANDSLIDES Proceedings of the fifth Intern. Symp. on Landslides, p. 1353-1357, Lausanne 1988a.
- POISEL R. & EPPENSTEINER W.: Gang und Gehwerk einer Massenbewegung Teil 1: Geomechanik des Systems "Hart auf Weich". Felsbau 6 (1988), Nr.4, S. 189-194, Glückauf-Verlag Essen 1988b.
- POISEL R. & EPPENSTEINER W.: Gang und Gehwerk einer Massenbewegung Teil 2: Massenbewegungen am Rand des Systems "Hart auf Weich". Felsbau 7 (1989), Nr.1, S. 16-20, Glückauf-Verlag Essen 1989.
- RICKENMANN, D.: Bedload transport capacity of slurry flows at steep slopes. Mitt. VAW 103, 249 S., ETH Zürich 1990.
- SÖNSER T. & WANKER W.: Prozessorientiert digitale Bearbeitung von Wildbacheinzugsgebieten Integration von Daten des Geoinventars für die räumliche und zeitliche Modellierung bei Wildbachprozessen Erdwissenschaftliche Aspekte des Umweltschutzes, Tagungsband zur 4. Arbeitstagung des Bereiches Umwelt, Österreichisches Forschungs- und Prüfzentrum Arsenal, 1998.
- STINI J.: Die Muren. Versuch einer Monographie mit besonderer Berücksichtigung der Verhältnisse in den Tiroler Alpen. 139 S., Wagner 'scher Universitätsverlag, Innsbruck 1910.
- STINI J.: Unsere Täler wachsen zu. Geologie und Bauwesen, Jg.13, H.3, S.71-79, Wien 1941.
- STINI J.: Nochmals der Talzuschub. Geologie und Bauwesen, Jg.14, S.10-14, Wien 1942.
- STINI J.: Neuere Ansichten über "Bodenbewegungen" und über ihre Beherrschung durch den Ingenieur. Geologie und Bauwesen, Jg. 19, S. 31-54, Wien 1952.
- VEDER Ch.: Rutschungen und ihre Sanierung. Mit Beiträgen von Fritz HILBERT. 231 S., 116 Abb., Springer-Verlag, Wien 1979.
- VINKEN R. Darstellungsverfahren. [in:] BENDER F. [Hrsg.]: Angewandte Geowissenschaften. Bd.1, Kap. 1.3, S.42ff, Enke-Verlag Stuttgart 1981.
- VOSS H., MORGENSTERN D: Interoperable Geowissenschaftliche Informationssysteme (IOGIS). Geo-Informations-Systeme, Jg. 10, H. 6, S 5-8, Wichmann, Heidelberg 1997.
- ZISCHINSKY U.: Bewegungsbilder instabiler Talflanken. Mitt.Ges.Geol.Bergbaustud., 17.Bd., S.127-168, 7 Abb., 7 Taf., Wien 1967.
- ZISCHINSKY U.: Über Sackungen. Rock Mechanics Vol.1, S.30-52, Wien 1969a.
- ZISCHINSKY U.: Über Bergzerreißung und Talzuschub. Geol.Rdsch., Bd.58, H.3, S.974-983, Stuttgart 1969b.

4 ZUSAMMENFASSUNG

Das im Zuge des Felsüberwachungsprojektes am Eiblschrofen entwickelte System "ALARM" zeichnet sich durch die große Reichweite von bis zu 2000m sowie den hohen Automatisierungsgrad aus. Dies ermöglicht den Einsatz in Bereichen die unzugänglich sind und/oder innerhalb eines Gefahrenbereichs liegen. So kann die Erfassung großer Datenmengen mit geringstem Personalaufwand realisiert werden. Die Auswertung und Interpretation der Daten erfordert trotz der einfach handzuhabenden Werkzeuge jedoch ein hohes Maß an Verständnis für die Prozesse, die zur Veränderung von Meßflächen führen.

Das hier vorgestellte System "ALARM" ist in der Lage, den relativ großen Meßfehler des als geotechnisches Meßsystem eingesetzten Laserscanners soweit zu reduzieren, daß die Erfassung von Bewegungsgeschwindigkeiten von rund 1cm / Woche und größer ermöglicht wird.

Die Vermessung von steilen Hangflanken zur Erstellung von Oberflächenmodellen stellt eine weitere Anwendungsmöglichkeit dar, die zur Berechnung von Differenzvolumina nach Abbrüchen, Schneefall, Windverfrachtung oder einem Lawinenabgang verwendet wird.

Trotz der kurzen Entwicklungszeit dieser Anwendung ist somit ein relativ großer Schritt in der Entwicklung eines alternativen geotechnischen Meßverfahrens gelungen. In weiteren, bereits laufenden Entwicklungsprojekten sollen die Basiskomponenten (Lasersensor, Signalverarbeitungsmethoden) sowie die dazugehörigen Softwareteile verbessert werden.

Die "Generelle Legende für Geologisch – geomorphologisch – hydrogeologische Kartierungen" ist Beispiel einer standardisierten Basisdatenbearbeitung, die in Zusammenarbeit mit der "Geologischen Stelle des Forsttechnischen Dienstes für Wildbach- und Lawinenverbauung" im Vorfeld eines digitalen Wildbach- und Lawinenkatasters (WLK) in Österreich auf Basis bestehender Kartierungsgrundlagen erstellt wurde.

Bearbeitungsschwerpunkt ist dabei der Themenbereich Geomorphologie und Georisiko. Letztlich werden alle relevanten "Geo-Objekte" mit ihren Eigenschaften (räumliche Verteilung, Gestalt, Form, Ausbildung) und deren Veränderung im Laufe der Zeit (Kinematik, Dynamik) erfaßt, verarbeitet und bewertet. Wesentlich dabei ist, sämtliche Redundanzen im beobachteten Raum und innerhalb der untersuchten Themenbereiche auszuschalten. Der ursprünglich vorliegende Kartierungsschlüssel geomorphologischen Untersuchungen von Wildbacheinzugsgebieten mußte inhaltlich im Sinne einer "Prozeßbereinigung" neu strukturiert werden. Die überarbeitete Datenstruktur wird einer streng hierarchischen Gliederung unterzogen, wobei die Möglichkeit einer Erweiterung um einzelne Inhalte oder einer zusätzlichen Untergliederung gegeben ist. Aufgrund der – soweit möglich – systemneutralen Vorgaben wird eine breite Akzeptanz und somit die Einführung als Standard gewährleistet.

In einer zweiten Entwicklungsphase ist vorgesehen, aufbauend auf den bisherigen Erfahrungen in der Handhabung – sowohl vor-Ort als auch in der weiteren Datenverarbeitung – die methodischen Umsetzungen zu optimieren. Eine weitere Entwicklung wird die strukturelle Anpassung und Layout-Abstimmung der Inhalte auf Fragestellungen in den Maßstäben 1:2.000 bis 1:20.000 sein.

Autoren:

Mag. Manfred SCHEIKL

Mag. Willi WANKER

Mag. Dr. Gerhard POSCHER

ILF Beratende Ingenieure

Gruppe Georisikomanagement – Alpintechnologie
A-6020 Innsbruck, Framsweg 16
Tel. 0512-2412-0*

DIE BEDEUTUNG DER GEWÖLBEWIRKUNG IN DER BAUGEOLOGIE

Wolfgang DEMMER

Inhaltsverzeichnis

- 1.0. EINLEITUNG
- 2.0. GEWÖLBE, GEWÖLBEWIRKUNG
- 3.0. GEWÖLBE IN ABHÄNGIGKEIT VON IHRER RÄUMLICHEN LAGE
- 4.0. VERTIKALE GEWÖLBE
 - 4.1. Naturbögen
 - 4.2. Halbhöhlen
 - 4.3. Unterirdische Gänge, Höhlen und Kavernen
 - 4.4. Vertikale Gewölbe und Baukunst
 - 4.4.1. Stollen, Tunnel und Kavernen
 - 4.4.2. Brücken
- 5.0. SCHRÄGE GEWÖLBE
 - 5.1. Kare und ähnliche Geländeformen
 - 5.2. Bergsturznischen
 - 5.3. Rutschnischen, Bergsackungsnischen
 - 5.3.1. Rutschnischen
 - 5.3.2. Bergsackungsnischen
 - 5.4. Schlußfolgerungen auf die Baupraxis
 - 5.4.1. Bauen in Rutsch-und Bergsturzmassen
 - 5.4.2. Bauen mit Ausnützung schräger Gewölbe
- 6.0. HORIZONTALE GEWÖLBE
 - 6.1. Horizontale Gewölbe und Baukunst
- 7.0. SCHLUSSWORT

1.0. EINLEITUNG

Die Intention der vorliegenden Überlegungen und Darstellungen ist es, für alle Planenden und Ausführenden im Tiefbau Anregungen zu vermitteln, daß die **Gewölbewirkung** nicht nur bei vertikalen Lastabtragungen sicherheitserhöhend und kostensparend genützt werden kann, wie das im modernen Hohlraumbau allgemein Stand der Technik ist, sondern praktisch auch in allen räumlichen Lagen Vorteile bringt, wenn die Voraussetzungen dazu gegeben sind.

Es hat vieler Jahrtausende in der Menschheitsgeschichte bedurft, bis das Gewölbe in das Bewußtsein des Menschen eingedrungen ist. Das ist umso erstaunlicher, zumal die Natur eindrucksvolle Beispiele in den verschiedensten Größenordnungen und räumlichen Ausrichtungen auf Schritt und Tritt bietet.

So gräbt der Maulwurf instinktiv seinen Laufgang als Röhre und der Fuchs seinen Bau als Minikaverne. Selbst ein Kind macht im Sandkasten bald die Erfahrung, daß nur ein oben abgerundetes Loch hält und Karstschläuche und Höhlen von Bestand schließen fast immer mit einem gewölbten Dach ab. Unsere Urahnen haben zwar solche Höhlen schon als sichere Zuflucht- und Wohnstätten genutzt, aber es hat noch sehr lange gedauert, bis man das Gewölbe als Möglichkeit einer Dach- oder Brückenkonstruktion entdeckte.

Am hartnäckigsten wurde das Gewölbe im Bergbau abgelehnt. Eine Jahrtausende lange Tradition, die Zugänge zu den begehrten Erzen oder Bergsalzen sowie deren Abbaue mit Holz abzusichern, was zwangsläufig zu gerader Firstausbildung führen mußte – als klassisches Beispiel gilt die sogenannte "Türstockzimmerung" – konnte weltweit nur äußerst zögernd auf die Erkenntnisse der modernen Stollen- und Tunnelbautechniken umgestellt werden. Dieser Prozeß ist bis heute noch nicht abgeschlossen.

Im Hochbau wurde hingegen das Gewölbe zwar schon wesentlich früher entdeckt, doch anbetrachts der geistigen und handwerklichen Leistungen früher Hochkulturen immer noch reichlich spät. Weder die alten Kulturen des Orients noch die Ägypter oder die Kulturvölker Amerikas, ja nicht einmal die Griechen nutzten in der Baukunst bewußt die Vorteile der Gewölbewirkung. Alle Dach- und Brückenkonstruktionen waren vorwiegend von der Länge der verfügbaren, relativ leichten und auch gut zu bearbeitenden Baumstämme abhängig oder von der gewinnbaren Länge und dem limitierten Transportgewicht von Natursteinblöcken. Dort und da gab es Ansätze, auch mit Steinbaustoffen Hohlräume zu überdachen, indem man den nächsthöheren Quader von beiden Hohlraumseiten etwas vorschob, bis der Zusammenschluß erreicht war. Doch mit diesen "falschen Gewölben", wie wir sie insbesondere von den Mayas aber auch von den Azteken - seltener von den Inkas - kennen, blieben die Spannweiten der Dachkonstruktionen eher bescheiden.

Die ersten, die die Gewölbewirkung nach unserem Verständnis begriffen und in der Baukunst genützt haben, waren angeblich die ETRUSKER, jene, die sie exzessiv genützt haben, die RÖMER. Wir staunen heute noch über die kilometerlangen, manchmal sogar mehrstöckigen Bogengalerien für Wasserleitungen oder das Bogennetzwerk der Amphitheater. Den allergrößten Respekt verdienen jedoch die Kuppelbauten. Das prominenteste Beispiel ist das Pantheon in Rom, schon im frühen 2. Jh. unter Kaiser Hadrian errichtet, mit den für damalige Verhältnisse unvorstellbaren Abmessungen von 43m in Durchmesser und Höhe. Selbstverständlich gingen die Römer mit dem Gewölbe auch in die Tiefe, womit die eigentliche Heimat des Geologen und die Rückkehr zu dem gegenständlichen Thema wieder erreicht wäre.

2.0. GEWÖLBE UND GEWÖLBEWIRKUNG

Ein Gewölbe wird It. Brockhaus definiert als "eine räumlich gekrümmte, massive Raumüberdeckung, die so geformt ist, daß ihre Querschnitte nur auf Druck beansprucht werden. Gewölbe üben auf ihre Widerlager einen Schub aus".

Bei dieser Definition denkt man selbstverständlich in erster Linie an alle Möglichkeiten, einen Hohlraum zu überbrücken. Mehr oder weniger vertikal einwirkende Lasten müssen über gewölbte Konstruktionen in die Widerlagerbereiche umgelenkt und dort abgetragen werden. Dies wird in gewölbten Stollen-, Tunnel- oder Kavernendächern genauso vollzogen wie bei Bogenbrücken oder Kuppelbauten, nur daß letztere in den wenigsten Fällen direkt den Gründungsboden beanspruchen. Eine der wenigen Ausnahmen sind die Iglus der Eskimos.

Da diese Gruppe von Gewölben jedem im Tiefbau Tätigen geläufig sein dürfte, soll zusätzlich noch auf andere Gewölbe mit schräger oder horizontaler Raumlage aufmerksam gemacht werden. Zumal dabei die eingangs zitierte Definition des Gewölbes nicht mehr ganz zutrifft, muß die Erweiterung mit dem Begriff "Gewölbewirkung" erfolgen. Für alle drei Gruppen der Gewölbewirkungen, nämlich mit ±vertikaler, geneigter und ±horizontaler Lastabtragung zeigt uns die Natur den Weg zum besseren Verständnis. Auf die Modelle in der Natur muß die Aufmerksamkeit gelenkt werden, um ein statisches Gefühl für die Umsetzung in der Baukunst zu entwickeln. Der Dialog zwischen Geologen und Bauingenieur soll dadurch bereichert werden.

3.0. GEWÖLBE IN ABHÄNGIGKEIT VON IHRER RÄUMLICHEN LAGE

In der folgenden Tabelle wurde versucht, die wichtigsten Kenndaten für die drei Gewölbegruppen in bezug auf ihre räumliche Lage und Wirkungsweise zusammenzufassen. Dabei stand nicht die exakte Definition der Spannungsabtragung in den jeweiligen Widerlagerbereich im Vordergrund, sondern die Vergleichbarkeit mit Beispielen in der Natur. Dem Verfasser ist bewußt, daß es im Wesen eines Gewölbes liegt, einwirkende Spannungen umzulenken und daß es im jeweiligen Widerlagerbereich abermals zu einer Auffächerung in Druck- und Zugkräfte kommen kann, wenn die morphologischen Verhältnisse dies zulassen. Darüberhinaus ändert sich bei variierender Lastaufbringung auch noch die Richtung der resultierenden Kräfte im Widerlagerbereich, wie das zwar kaum in der Natur vorkommt, bei Kunstbauten, wie Brücken oder insbesondere bei Bogenstaumauern, aber statisch und geomechanisch zu beachten ist.

Als ein Naturbeispiel für eine variierende Lasteinwirkung auf ein Gewölbe könnte mit Einschränkungen eine jahreszeitlich bedingte, variierende Bergwasserspiegellage angesehen werden.

Die Gewölbewirkung in Natur und Technik

		STOFFLICHE VORAUSSETZUNGEN		NATURBEISPIELE	BAUWERKE	
	n g	Φ)	Diverse Böden und Locker gestei- ne	Grabgänge und Baue von Kleintieren	Stollen	
± Vertikale Lastabtragu	nd halbfeste Materialien, jedoch keine Flüssigkeiten oder Emulsionen	Halbfeste Gesteine	Grabgänge und Baue von Kleintieren Halbhöhlen, Wandnischen etc.	Tunnel (z.B. U-Bahn) Tunnelportalausbildungen		
		Festgesteine (Eis)	Karstschläuche und Höhlen Naturbögen mit unterschiedlicher Spannweite in Fels und Eis Gletschertore Halbhöhlen (Eis- Wasser- Winderosion)	Kavernen Bogenbrücken		
Schräge- Geneigte	p u n	ste Mate iten ode	Minder wertiger Fels - Böden	Rutschnischen Bergsackungsnischen Kare	Berücksichtigung bei allen Verbauungs- plänen (Flächenwidmungsplänen) und Bauvorhaben	
Schr	Gene Gene	und halbfeste Flüssigkeiten	Fels, Gebirge ± kompakt	Bergsturznischen Kare	Geneigte Bogen-Stützmauern Schrägschächte	
± Horizontale Belastı	Feste u		keine (mit Einschränkung Verklausungen in Bach- oder Flußläufen)	Bogenstaumauern Vertikale Bogen-Stützmauern (beides mit gewissen Einschränkungen in bezug auf die Vektoren der Belastung und Lastabtragung)		

Die Einschränkung bezieht sich darauf, daß bei temporären Ereignissen, wie nach Starkregen oder im Verlaufe der Schneeschmelze, beispielsweise Karsthohlräume streckenweise den unterschiedlichsten Belastungsfällen ausgesetzt sein können. Die Bandbreite kann zwischen erhöhtem Außendruck bei ungenügender Drainwirkung des Hohlraumsystems über Druckausgleich bei Vollfüllung bis erhöhtem Innendruck bei Vollfüllung des Hohlraumes in einem relativ dichten Streckenabschnitt in Kombination mit einem hochliegenden Einzugsgebiet variieren.

Die vorgenommene **Dreiteilung der Gewölbe** in vertikale, schräge und horizontale Typen erhebt nicht Anspruch auf exakte Definitionstreue. Sie erleichtert aber die angestrebte interdisziplinäre Auseinandersetzung zwischen geologischen Beobachtungen und den Schlußfolgerungen auf technische Maßnahmen.

4.0. VERTIKALE GEWÖLBE

In diese Gruppe fallen im wesentlichen die von Menschenhand geschaffenen Bauwerke Stollen, Tunnel, Kavernen – längsgestreckt oder seltener in Kuppelform – und Bogenbrücken. Mit ihnen assoziiert man automatisch den Begriff GEWÖLBE, sodaß detailliertere Erläuterungen über das Kräftespiel entbehrlich erscheinen. Dennoch sind an geeigneter Stelle ein paar grundlegende Gedanken in Erinnerung zu rufen. Zunächst soll aber die Aufmerksamkeit auf anschauliche Beispiele in der Natur gelenkt werden.

4.1. Naturbögen

Diesbezüglich sind an prominentester Stelle die faszinierenden Naturbögen des Arches National Parks im Bundesstaat Utah, USA, zu erwähnen. Hier hat die Winderosion in den Sandsteinen großartige Modelle aller unter die Gruppe der vertikalen Gewölbe fallenden Beispiele geschaffen. Stollen- oder Tunnelquerschnitte mit vertikalen oder eingezogenen Ulmen sind zu erkennen, an anderer Stelle sogar Kreisquerschnitte und nicht zuletzt in einem dreibeinigen Naturmonument die Ansätze von Kuppelbauten (Abb. 1 – 3, siehe Anhang). Auf dieses letztgenannte Sandsteingebilde wird nochmals im Kapitel der geneigten Gewölbe hingewiesen, denn so mancher Hochgebirgsgipfel scheint auf sternförmig zusammenlaufenden Felsgraten zu ruhen, zwischen denen schön ausgerundete Steilkare eingebettet sind (Abb. 4).

Im Arches Nationalpark hat die Winderosion aber auch faszinierende Brückengebilde aus dem Sandstein modelliert. Am imposantesten ist der Landscape Arch mit seiner atemberaubenden Spannweite von 93 m bei filigranem Gewölbescheitel (Abb. 5). Seine Standfestigkeit verdankt er einzig der Bogenform.

Felsenfenster gibt es aber auch in den Alpen oder in zerklüfteten Küstengebieten. Wenngleich deren Entstehung nicht durch Winderosion, sondern durch Witterungsoder Wassereinwirkungen verursacht ist, so vereint all diese weit sichtbaren Naturgebilde das Gemeinsame, daß sie ihre Stabilität der Gewölbewirkung verdanken. Gleiches gilt für Torformen aus Eis, wie Gletschertore am Ende von Gletscherzungen oder seltener von schwimmenden Eisbergen (Abb. 6 - 8).

4.2. Halbhöhlen

Auf dem Weg von den mehr oder weniger freistehenden Torbögen und Naturbrücken zu unterirdischen Gewölbebeispielen in der Natur gilt unsere Aufmerksamkeit zunächst allen Halbhöhlen und Felsnischen. Für deren Entstehung kann neben den vorgenannten Ursachen da oder dort auch noch die schürfende Tätigkeit des Gletschereises verantwortlich sein. Wieder ist in den meisten Fällen ihr Bestand in erster Linie der günstigen Spannungsumlenkung zufolge eines gewölbten Scheitelbereiches zuzuschreiben. Während aber bei den beschriebenen Torbogengebilden eher die zweidimensionale Betrachtung im Vordergrund stand, gewinnt nunmehr auch die räumliche Stützung eine immer größere Bedeutung.

Die vermutlich eindruckvollsten Beispiele sind abermals in den USA zu finden, und zwar im Mesa Verde National Park des Bundesstaates Colorado. Dort haben zahlreiche Halbhöhlen prähistorischen Indianerstämmen Schutz vor Feind- und Witterungsangriffen geboten. Einige sind so groß, daß ganze Dörfer samt Kultstätten in ihnen Platz fanden (Abb. 9). Ihr schützendes Dach ist selbstverständlich gewölbt, aber zusätzlich auch noch bergseitig durchgehend abgestützt. In der Ansichtssilhouette erinnert die größte unter ihnen - besonders in bezug auf die Ausformung des Daches - an manche moderne Großkaverne, wie sie in den letzten Jahren im wesentlichen für Sportanlagen, Entsorgungsanlagen, Garagen (z.B. Großkavernen im Mönchsberg Salzburg mit je 16 m Gewölbespannweite für 1500 PKW-Abstellplätze) oder Mehrzweckhallen (z.B. "Dom im Berg" in Graz unter dem Schloßberg mit 600 m² Nutzfläche) gebaut wurden. Weitere Kavernenprojekte sind in Österreich für kulturelle Zwecke geplant, wie beispielsweise das Musiktheater Linz oder ein neues Salzburger Festspielhaus im Mönchsberg.

4.3. Unterirdische Gänge, Höhlen und Kavernen

Die Gewölbebetrachtung erlangt erst mit der vollständigen Verlegung des Hohlraumes in den Berg die uneingeschränkte Vergleichbarkeit mit dem modernen Untertagebau. Fündig kann man in der Natur praktisch weltweit in den Verkarstungsgebieten werden, wo der Variantenreichtum an Stollen-, Tunnel- und Kavernengebilden, ergänzt durch Vertikal- und Schrägschächte unübertroffen ist. Das geschulte Auge wird aber auch bald erkennen. welchen großen Einfluß das Gefüge auf die Stabilität Hohlraumberandung hat. Klammert man die faszinierenden Tropfsteinhöhlen aus, die den Blick auf das Muttergestein verdecken, so wird man im wesentlichen zwei Typen von stabilen Hohlräumen erkennen, nämlich jene mit gewölbter Firste und jene, wo weitständige Trennlinien massive Deckelbildungen zulassen. Letztere können einen horizontalen Firstabschluß bilden oder in Anpassung an die Raumlage der Strukturen einen beliebigen Hohlraumquerschnitt erzeugen. Die Spannweiten sind im zweiten Fall meist begrenzt. Bei größerer Ausdehnung gehen sie nahtlos in die Gruppe der instabilen Verbruchstrecken über.

Es gibt aber nicht nur im verkarsteten Kalk anschauliche Naturmodelle des modernen Hohlraumbaues, sondern - weit weniger bekannt - beispielsweise auch in erstarrten Lavagesteinen. Die mehr als 8 km lange, durch tektonische Scherbrüche in drei Streckenabschnitte geteilte Leviathanhöhle im Rift Valley Kenias zeigt ein perfektes liegendes Ei-Profil mit einer Horizontalachse zwischen 5,5 und 6 m und einer Vertikalachse von rd. 3 m. Dieses statisch optimale Profil dokumentiert sich auch darin,

daß am Höhlenboden kaum Felsbrocken von einem Nachbruch liegen – ausgenommen sind Streckenabschnitte, die durch aktive tektonische Einwirkungen gestört wurden.

Die Leistungsfähigkeit der Gewölbewirkung wird auch im sogenannten Siloeffekt sichtbar. Unter der Voraussetzung einer ausreichenden randlichen Abstützung werden immer wieder zum Teil gefährliche Kuppelbildungen aufgrund von Zufälligkeiten bei den Kornlagerungen beobachtet. Ihre Tragfähigkeit ist beachtlich und nähert sich manchmal sogar der Eigenfestigkeit des Einzelkornes. Kann man sich dieses Phänomen bei grobem, eckigem Korn, wie zum Beispiel Kohle, Erz, Bruchstein etc. noch vorstellen, so soll es auch schon in Getreidesilos zu Kuppelbildungen von mehreren Metern Spannweite gekommen sein – unvorstellbar, wenn man sich die Geometrie des Einzelkorns vergegenwärtigt.

Was durch Zufälligkeiten eine derart überzeugende Wirkung verursacht, kann man auch erzwingen. Im Untertagebau ist dafür die Spritzbetontechnik am geeignetsten. Beim Druckstollenbau für das Kraftwerk Prutz- Imst in Tirol weltweit erstmals angewandt, ist der moderne Stollen- und Tunnelbau ohne sie nicht mehr denkbar. Die Spritzbetontechnik ist in der Lage, besonders in minderwertigen Gebirgsformationen das Ausbrechen wichtiger "Schlußsteine" im Gewölbedach eines Hohlraumes zu verhindern. Dadurch wird die Tragfähigkeit des Gewölbes unter maßgebender Mitwirkung des Gebirges unmittelbar nach der Hohlraumeröffnung aktiviert. Die grundsätzliche Formgebung des Gewölbes im Zuge der Ausbruchsarbeiten ist ebenso Voraussetzung wie eine Mindestfestigkeit des durchörterten Gebirges in Abhängigkeit von der Überlagerungshöhe und der Gewölbespannweite. Kontrollierte Verformungen müssen zugelassen werden. Zeigen diese Parameter Schwachstellen, können sie durch weitere Stützmitteleinbauten (wie durch Stahlbögen, Ankerungen etc.) kompensiert werden. Dies sind auch im wesentlichen die Merkmale der Neuen Österreichischen Tunnelbauweise (NATM). In minderwertigen Gebirgsarten ist der Tübbingausbau der Spritzbetonbauweise überlegen, allerdings nicht so flexibel.

Im Tagbaugeschehen vermitteln die Durchlässe in Stahfertigteilbauweise am anschaulichsten die Leistungsfähigkeit eines Gewölbes. Ähnlich wie bei der Spritzbetonbauweise in Stollen und Tunnel erzwingt nur eine verhältnismäßig dünne Schale, nun aber aus Stahlblech, im gewünschten Gewölbequerschnitt vorgefertigt, selbst überschüttete Böden zur Ausbildung erstaunlich tragfähiger Gewölbe. Schon geringe Überdeckungen können große dynamische Lasten schadlos abtragen (Abb. 10), aber auch Überschüttungen bis 30 m Höhe sind dem Autor bekannt. Bei dieser Art der Gewölbeausbildung wird man zwangsläufig auch wieder an den Siloeffekt erinnert.

Ein klares Ende für die Mitwirkung des den Hohlraum umgebenden Mediums ist in Emulsionen und Flüssigkeiten zu sehen.

In dem vorstehenden Kapitel wurde versucht, einen groben Überblick darüber zu geben, was uns die Natur an sichtbaren Gewölbemodellen anbietet. Mindestens ebenso bedeutend sind jedoch die unsichtbaren Gewölbebildungen. Es ist schon seit geraumer Zeit über genaue Spannungsmessungen nachweisbar, daß besonders in sehr kompakten Gebirgsformationen, namentlich in der Fußzone steiler Felsflanken, wesentlich größere Spannungen vorhanden sind, als sie aufgrund der jeweiligen Überlagerungshöhe zu erwarten wären. L. Müller hat dieses Phänomen mit dem bildlichen Begriff "Spreizdruck" belegt, was nichts anderes bedeutet, als die natürliche Ausbildung von Gewölben im Berg, um Lasten besser zu verteilen. Die sichtbaren Auswirkungen sind

häufig oberflächenparallele Plattenbildungen als Ausdruck der Entspannungskomponente in Richtung freier Oberfläche. Mit deren Erforschung hat sich besonders A. Kieslinger befaßt.

Auch die mehrfach beobachteten, bergschlagähnlichen Entspannungserscheinungen in Talbodennähe und in diesem selbst, wie sie beispielsweise beim Felsaushub zur Gründung von Talsperren aufgetreten sind (u.a. Vajont, Kölnbrein etc.), müssen ursächlich mit den Umlenkkräften von Gewölbebildungen im Berg in Verbindung gebracht werden. Würde es nicht so einen Spannungsfluß geben, könnten selbst in den härtesten Gesteinsarten keine Hohlräume unter hoher Gebirgsüberdeckung eröffnet werden.

4.4. Vertikale Gewölbe und Baukunst

4.4.1. Stollen, Tunnel und Kavernen

Die Natur hat es vorgezeigt und die Erfahrung hat es gelehrt, daß man im modernen Hohlraumbau ohne konsequente Einbeziehung der Gewölbewirkung weder dauerhaft standfeste noch kostengünstige Untertagebauten errichten kann.

Die ersten großen Fortschritte in der Tunnelbautechnik brachte die 2. Hälfte des 19. Jahrhunderts mit der Erschließung selbst gebirgiger Regionen durch den Eisenbahnbau. Das Gewölbe in der Firste bestimmte schon damals den Regelquerschnitt der Tunnel.

Die zweite Innovationsstufe brachte der Kraftwerksbau und untergeordnet die Realisierung von Fernwasserleitungen, besonders in Verbindung mit Wasserversorgungen, und Kanalisationssystemen im 20. Jahrhundert. Neben kilometerlangen Beileitungsstollen und Kavernenbauten waren es vor allem Druckstollen, die eine weitere Dimension in die Tunnelstatik brachten. Teilweise hohe dynamische Beanspruchungen von innen nach außen (gegen die Bergleibung) waren genauso zu bewältigen wie Standsicherheitsprobleme bei großen Überlagerungshöhen im entleerten Zustand. Auch hier wurde die Gewölbewirkung unverzichtbar und ein Kreisprofil zur Regel.

Im Großkavernenbau ist dem Verfasser weltweit kein einziges Beispiel bekannt geworden, wo nicht der Dachabschluß gewölbt ausgeführt wurde. Hingegen gibt es zu viele Großkavernen, bei denen die Erkenntnisse des modernen Untertagebaues unterhalb der Firstzone nicht mehr konsequent genug umgesetzt worden sind. Die Kritik zielt hierbei auf die Ulmen- und Sohlgestaltung. In Abhängigkeit von der einachsialen Gebirgsdruckfestigkeit und der Überlagerungshöhe sind hohe vertikale Ulmenwände oft überfordert, ohne künstliche Stützung die über die Kämpferzone abgeleiteten Gewölbespannungen bruchlos aufzunehmen. Hier hätte in zahlreichen Fällen schon eine leichte Ausrundung Abhilfe schaffen können oder zumindest wären kosten- und wartungsintensive Ankerungen deutlich zu reduzieren gewesen. Ähnliche Überlegungen gelten auch für die Ausgestaltung der Sohle, die zusätzlich zu den Einflüssen der Spannungsumlagerung aus dem Gewölbe auch gelegentlich dem Kluftwasserauftrieb oder manchmal auch Quellerscheinungen standzuhalten hat. Die Pflicht des Geologen ist es, rechtzeitig und überzeugend darauf aufmerksam zu machen, auch wenn eine Befolgung seiner Ratschläge nicht gesichert ist.

Die dritte Innovationsstufe im Untertagebau ist mit dem modernen Verkehrswegebau, wie er in der 2. Hälfte des 20. Jahrhunderts eingeleitet wurde und bis zur Gegenwart andauert, untrennbar verbunden. Dies gilt gleichermaßen für Straßen wie auch für schienengebundene Verkehrswege. Beiden ist gemein, daß nun wieder große Querschnitte zu bewältigen sind.

Die Zwänge einer dicht bebauten Kulturlandschaft im Verein mit den geforderten großen Radien bedeuten eine weitere Herausforderung. Die Frage an den Baugeologen lautet nun nicht mehr, wo die günstigsten Untergrundbedingungen zu finden sind, sondern sie reduziert sich auf die Auskunft, wie groß die Ausbruchsschwierigkeiten entlang einer kaum nennenswert verrückbaren Tunnelachse sein werden.

Diese Zwänge beflügelten die Geomechaniker und Tunnelstatiker unter maximaler Ausnützung der Computer zu wahren Höchstleistungen in der numerischen Erfassung geomechanischer und tunnelstatischer Modelle. Die diesbezüglichen Fortschritte werden jährlich in zahlreichen nationalen und internationalen Kongressen vorgestellt und sind längst auch fester Bestand der Ausschreibungsunterlagen.

In die gleiche Epoche fällt die rasante Entwicklung von Teil- und Vollschnittmaschinen. Heute sind bereits die ersten Tunnelfräsen mit großen Durchmessern für Bahn- und Straßentunnelquerschnitte im Einsatz (z.B. der Elbtunnel in Hamburg mit 14,2 m Ø) und es ist absehbar, daß sie in naher Zukunft auch bei den großvolumigen Tunnelbauten die konventionelle Ausbruchsmethode genauso verdrängen, wie dies bereits im Stollenbau vollzogen ist.

Aufgrund des großen Bekanntheitsgrades in Fachkreisen kann auf die Präsentation konkreter Beispiele verzichtet werden. Hinzuweisen ist lediglich auf die extremen Anforderungen bei allen Tunnelausbrüchen unter geringer Überdeckung und besonders mit Überbauung, wie sie der städtische U-Bahnbau erfordert, ferner auf unterirdische Verkehrswege unter See- oder Meeresspiegel und nicht zuletzt unter extremen Überlagerungshöhen. Alle diese Bauten sind nur unter konsequenter Nutzung der Gewölbewirkung realisierbar.

Die vierte Innovationsstufe für den Untertagebau ist bereits eingeleitet und wird sich nach Meinung des Verfassers schwerpunktmäßig auf den Großkavernenbau konzentrieren. Wir werden es uns in naher Zukunft bald nicht mehr leisten können, weiterhin fruchtbarstes Ackerland bedenkenlos zu überbauen, zumindest nicht für Lagerhaltungen oder weitgehend automatisierte Produktionsstätten. Auch die steigenden Energiekosten werden bei diesen Überlegungen eine immer wichtigere Rolle spielen. Schon heute ist nachweisbar, daß sich beispielsweise unterirdische Flüssiggaslager alleine über die Energieeinsparung rechnen. Bei weiter steigenden Energiepreisen wird sich die Rentabilität von unterirdischen Lager- oder Produktionsstätten auf immer mehr Anwendungsfälle ausdehnen – die Sicherheitsaspekte noch nicht miteingerechnet.

Auch die Baustoffgewinnung wird in Zukunft immer mehr zufolge des Natur- und Landschaftschutzes unter die Erdoberfläche abgedrängt werden. Es ist ja schon gegenwärtig kaum mehr ein neuer Steinbruch oder eine Kiesgrube politisch durchzusetzen, doch andererseits wird auch in Zukunft das Baugeschehen nicht wegzudenken sein. Ein Lösungsansatz wären da **Geo-Kombinationsprojekte**. Im Zuge einer untertägigen Baustoffgewinnung könnte beispielsweise schon auf konkrete Nachnutzungen der Hohlräume Rücksicht genommen werden, sodaß schließlich eine Kostenteilung für beide Interessensgruppen wirtschaftlich verkraftbare Projekte

ermöglichen wird. Da für derartige Zukunftsvisionen der Kavernenbau den gegenwärtigen Boom im Tunnelbau ablösen könnte, würde der geologisch – technischen Nutzung der Gewölbewirkung in allen erdenklichen Varianten ein besonderer Stellenwert zukommen. Österreich hätte für eine solche Entwicklung sowohl geologisch als auch technisch die allerbesten Voraussetzungen.

4.4.2. Brücken

Von den Bergtiefen an die Oberfläche zurückkehrend sind vertikale Gewölbebeanspruchungen namentlich bei **Bogenbrücken** zu finden. Anders als im Untertagebau wird das Gewölbe zur Gänze künstlich errichtet. Nur im Bereich der beiden Widerlager wird der Baugrund erreicht und entsprechend beansprucht. In den meisten Fällen wird es sich um Felsgebirge handeln, es müssen aber auch Böden nicht von vornherein für die Aufnahme und Abtragung der Bogenkräfte ausgeklammert werden. Eine entsprechende Widerlagergestaltung, die im wesentlichen auf eine Ermäßigung der spezifischen Bodenpressungen auszurichten ist, wird dazu Voraussetzung sein. Grundsätzlich tritt im Widerlagerbereich von Bogenbrücken ein durchaus vergleichbares Kräftespiel auf wie im Kämpferbereich von Tunnel oder Stollen. In beiden Fällen muß danach getrachtet werden, die Spannungen möglichst stumpfwinkelig zur freien Oberfläche in den Berg einzuleiten. Wo das nicht schon von vornherein durch die Morphologie eindeutig definiert ist, kann technisch nachgeholfen werden.

Bogenbrücken haben die Aufgabe, weite oder enge Talkerben mit flachen oder steilen Flanken zu überspannen. Symmetrische Talquerschnitte sind gefragt, aber nicht unbedingt Voraussetzung. Zu starke Asymmetrieverhältnisse können Bogenbrückenkonstruktionen durch technische Speziallösungen stark verteuern bis verhindern.

Aus der Sicht des Baugeologen haben Bogenbrückenlösungen mehr Vor- als Nachteile. Der Auftraggeber wird hingegen immer die Kostenseite im Auge haben und diesbezügliche Nachteile zu konventionellen Brückenlösungen feststellen. Die Mehrkosten dürften 10-15 % ausmachen und werden hauptsächlich mit dem erhöhten Schalungsaufwand begründet. Die Untergrundverhältnisse sind hingegen in den frühen, oft aber maßgebenden Planungsstadien fast nie ein Thema.

Die Auftragsvergabe an den planenden Ingenieur geschieht meistens nach den günstigsten Kosten für die Ingenieurarbeit und das Kunstbauwerk und da ist zweifellos ein horizontaler Strich über eine Talkerbe mit vertikalen Pfeilern in x-fach definierten gegenseitigen Abständen einfacher und billiger als noch ein zusätzlicher Bogen. Ist dieses sich immer wiederholende Bild erst fertig zu Papier gebracht, werden die Geologen oder Bodenmechaniker zugezogen, zumal ja jetzt erst die Bohrungen, an "richtiger Stelle" angesetzt, nämlich immer unter den – oft zahlreichen – Pfeilern, Auskunft über deren Gründungsbedingungen geben können. Ab diesem Zeitpunkt ist aber in 90 von 100 Fällen eine noch so überzeugend begründete Umplanung, etwa in eine Bogenbrücke, nicht mehr durchzusetzen.

Was sind aus geologischer Sicht die Vorteile einer Bogenbrücke gegenüber einer konventionellen Pfeilerbrücke:

- es gibt weniger Kontakstellen mit dem Untergrund,
- eine Bogenbrücke wird die Talflanken eher stützen als ungünstig belasten,

 der häufig geologisch eher kritische Talbodenbereich mit möglichen Alluvialakkumulationen und hohem Grundwasserspiegel, Rutschmassen und / oder Schutthalden am Hangfuß, der Hochwassergefahr etc. kann vom Bauwerk gänzlich ausgeklammert werden.

Kommen nur einige der aufgezählten Nachteile für Bauwerksgründungen zum Tragen, sind die Kostenvorteile einer Pfeilerbrücke bald aufgezehrt.

Am Beispiel der zur Bauzeit nach der "Europabrücke" mit 121 m Konstruktionshöhe zwischen Gründungssohle und Fahrbahndecke zweithöchsten Brücke in Österreich, der Larzenbachquerung im Zuge der Tauernautobahn, können vorstehende Überlegungen anschaulich demonstriert werden (siehe Abb. 13, Anhang). Dabei besteht keinerlei Absicht zu irgendeiner Kritik an dem ausgeführten Bauwerk.

Der mehrere Kilometer lange Trassenabschnitt im Fritzbachtal im Bundesland Salzburg ist richtigerweise schon im Zuge der Vorplanung von einem Geologen begangen worden, wobei die grundsätzliche Eignung der rechten Talflanke für die Errichtung einer Autobahn festgestellt werden konnte. Es waren allerdings zahlreiche Geländekorrekturen mit Hanganschnitten erforderlich, aber auch eine Reihe von Brückenbauwerken. Für letztere wurden in der Folge offensichtlich aus Zeit- und Kostengründen ausnahmslos nur Pfeilerbrücken entworfen, unter ihnen auch der Talübergang Larzenbach. Daraufhin sind im Gründungsbereich jeder Stütze Kernbohrungen abgeteuft und vom bearbeitenden Geologen aufgenommen worden.

Dann erfolgte die Übertragung des Ausbaues der Teilstrecke Hüttau-Eben vom Land Salzburg an die Tauernautobahn AG, die als geologischen Berater den Verfasser beauftragte. Ab nun stand alles unter großem Zeitdruck.

Eine erste Übersichtsbegehung des Geländes entlang der geplanten Trasse hat zahlreiche Hinweise auf Hanginstabilitäten gegeben, die bis dahin nicht bekannt waren, so auch im Bereich des gegenständlichen Talüberganges. Eine sofort in Angriff genommene baugeologische Kartierung festigte den ersten Befund. Unabhängig davon wurde auch noch die Stützenausteilung der Brücke verändert, ohne daß Mittel und Zeit vorhanden gewesen waren, zusätzliche Bohrungen abzuteufen. So blieb dem bearbeitenden Geologen nichts anderes übrig, als aus seinem Geländebefund und den vorhandenen Bohrprofilen seines Vorgängers eine Gründungsprognose für die Stützen und Widerlager zu erarbeiten. Es ist durchaus kein Ausnahmefall, daß schon zu dieser frühen Projektierungsphase eine Überprüfung der Bohrproben nicht mehr möglich war, weil diese entweder unauffindbar oder in einem katastrophalen Zustand waren.

Eindeutig ergab sich, daß in der Fußzone des linken Talhanges eine Rutschmasse lag, deren Mächtigkeit nur aus dem Ergebnis einer einzigen Bohrung, nämlich der Kernbohrung 9 indirekt ermittelt werden konnte (Abb. 11). Diese Bohrung ließ aufgrund von zwei ausgewiesenen Störzonen in unterschiedlicher Teufe wieder zwei Möglichkeiten offen, nämlich eine eher seichte und eine tiefe Lage der Gleitfläche. In beiden Fällen war aber auch noch eine Schubbeanspruchung auf die Stützen beziehungsweise ihre Gründungselemente zu befürchten. Trotz der sich abzeichnenden massiven Gründungsschwierigkeiten konnte aber einer vom Geologen sofort in Diskussion gebrachten Bogenbrückenvariante nicht mehr näher getreten werden. Nur sie hätte den gesamten sensiblen unteren Talabschnitt aus dem Baugeschehen ausklammern können.

Jetzt, da sich schon abgezeichnet hat, mit welchem technischen Aufwand die Brückengründung nur zu bewältigen sein würde, war nicht mehr der ursprüngliche Kostennachteil einer Bogenbrücke das maßgebende Argument, sondern nur mehr der Zeitfaktor. Auch die sich abzeichnenden, späteren Wartungsarbeiten der zahlreichen Meß- und Beobachtungseinrichtungen und umfangreiche Auswertungen der Meßergebnisse sowie ein gewisses Restrisiko im Hinblick auf allenfalls notwendige Nachbesserungen, konnten das Pfeilerbrückenprojekt nicht mehr verhindern.

Wie das Ausführungsprojekt schließlich gegründet, gesichert und mit Meßeinrichtungen ausgestattet werden mußte, zeigt der Talquerschnitt der Abbildung 12.

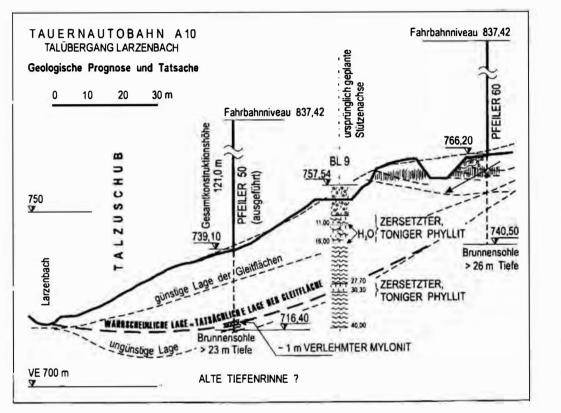
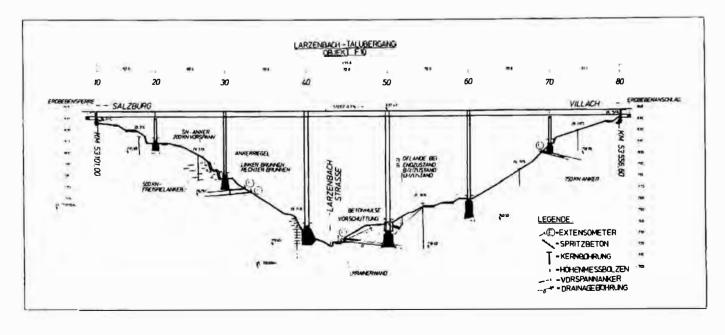


Abb. 11: Detailansicht

Abb. 12: Übersicht



Ursprünglich nicht vorgesehene, bis zu 26 m tiefe Brunnengründungen mußten unter teilweise gefährlichen Rahmenbedingungen ausgeführt werden. So ist während der Aushubarbeiten des 23 m tiefen Brunnenschachtes für den Pfeiler 50 dieser einmal halb und ein zweites Mal zur Gänze durch Rutschmassen verschüttet worden. Es war nur der gewissenhaften Beobachtung des Hangverhaltens durch einen erfahrenen Bauleiter während der gesamten kritischen Bauphase zu verdanken, daß keine Menschen zu Schaden kamen.

Auf die zahlreichen Vorspannanker und Meßeinrichtungen, besonders jene mit langen Mehrfachextensometern, sei mit Blick auf Abb. 12 nur hingewiesen.

Das Beispiel Talübergang Larzenbach (Objekt F10 der Tauernautobahn) eignet sich mehrfach für eine Diskussion Pfeiler- oder Bogenbrücke. Zunächst ist keinesfalls sichergestellt, weil nie ernstlich untersucht, ob eine Bogenbrückenvariante tatsächlich die erwarteten Vorteile gebracht hätte.

Die natürlichen Rahmenbedingungen einschließlich der nur unvollständig skizzierten Planungs- und Ausführungserfahrungen untermauern aber gut das, was der Verfasser in bezug auf die Vorteile einer Bogenbrücke gegenüber konventionellen Brücken aussagen möchte. Zusammengefaßt sind das

- die stützende Wirkung auf die Talflanke aufgrund der stumpfwinkeligen Spannungseinleitung im Bogenwiderlagerbereich und
- die Möglichkeit, den manchmal sensiblen Talbereich vom Baugeschehen völlig ausklammern zu können.

Aus persönlicher Sicht wäre noch das ästhetische Moment anzuführen. Es ist denkbar, daß die Mehrzahl der Menschen gemäß eines Ausspruchs von Friedensreich Hundertwasser "daß nämlich die Natur keine Gerade kennt" rein gefühlsmäßig eine Bogenbrücke schöner in die Landschaft eingefügt findet. Die Gegenüberstellung scheint dies zu beweisen (Abb. 13 + 14, Anhang).

Bogenbrücken können in einzelnen Fällen überhaupt nur die einzige wirtschaftliche Alternative zu Hängebrücken sein, um ein steil eingeschnittenes Tal oder eine unzugängliche Schlucht zu überbrücken. Bei solchen extremen topographischen Vorgaben sind meistens hoch beanspruchte Stützen nicht, oder nur mit unverhältnismäßig hohem Kosteneinsatz für Sicherungs- und Stützmaßnahmen zu gründen.

Einfach ist die Baudurchführung aber auch für Bogenbrücken nicht (Abb. 15). Je steiler nämlich die Bergflanken sind, desto weiter wird sich die resultierende Krafteinleitung der freien Oberfläche nähern. Dann ist nicht mehr der bereits erwähnte, stumpfe Winkel zur Talflanke gesichert, sondern unter Umständen ein wesentlich kleinerer geotechnisch zu beherrschen. Bei Bogenstaumauern soll dieser Winkel 30° nicht unterschreiten. Ungünstige Gefügekonstellationen können eher noch größere Winkel erzwingen. Grundsätzlich Gleiches sollte auch für die Einleitung der Spannungen in die Widerlager bei Bogenbrücken gelten. In jedem Fall ist jedoch dem beratenden Geologen zu empfehlen, auch bei schwierigsten Geländebedingungen eine sorgfältige Gefügeanalyse zu erstellen. Aufgrund des Ergebnisses ist im Dialog mit dem Statiker die Geometrie des Widerlagerblockes und somit auch jene des Gründungsaushubs festzulegen. Gleichzeitig sind die flankierenden Sicherungs– und Stützmaßnahmen sowohl für die

Bau- als auch die Betriebszeit zu planen. Es kann sich nämlich als vorteilhaft erweisen, wenn man beispielsweise rechtzeitig - etwa für Ankerungen oder Extensometer - Leerrohre in den Bewehrungskorb einlegt und diesen nicht durch nachträgliche Bohrungen schwächt.

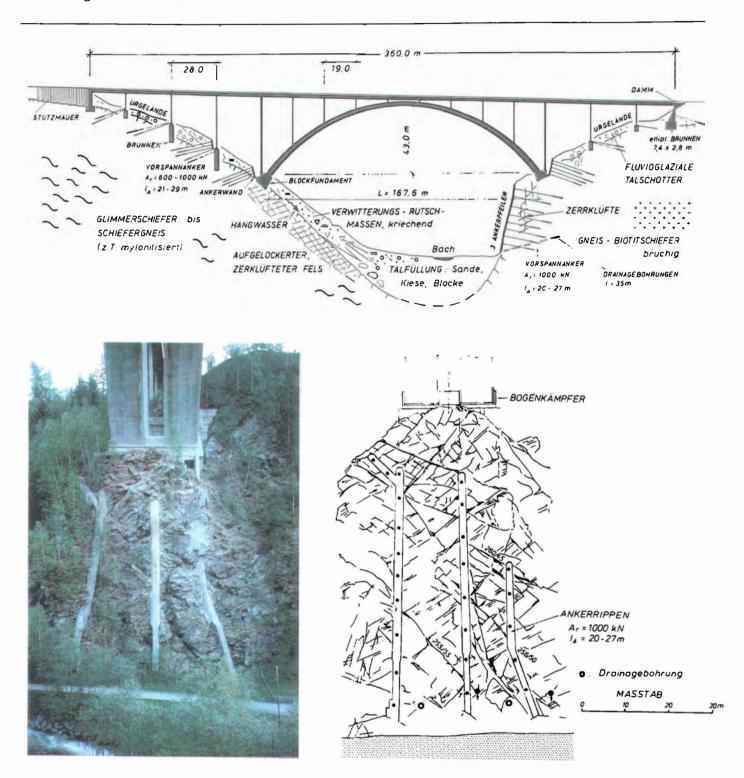


Abb. 15: Tauernautobahn Talübergang Leoben

5.0. SCHRÄGE GEWÖLBE

Diese Gruppe von Gewölben wird selbst von Geologen in der Natur am wenigsten bewußt registriert. In der Baukunst sind hingegen Lastabtragungen über schrägliegende Gewölbe schon lange integrierender Bestandteil von Architektenplanungen oder statischen Auseinandersetzungen. Die Fußzone des Eiffelturmes wäre eines von vielen Beispielen (Abb. 16, Anhang). Dies zur Kenntnis nehmend werden sich die folgenden Ausführungen besonders mit Naturbeobachtungen beschäftigen, zumal damit auch nützliche Schlußfolgerungen für die verschiedensten angewandten Bereiche gezogen werden können.

5.1. Kare und ähnliche Geländeformen

Kare sind nicht ausschließlich durch gravitative Massenverfrachtungen entstanden, wie das beispielsweise für Talzuschübe oder Bergstürze zutrifft. Es handelt sich vielmehr um Nischen- oder kesselförmige Geländehohlformen, die maßgeblich durch das Gletschereis geprägt wurden. Charakteristisch ist die gute Ausrundung der sie umfassenden Felswände, die allerdings das Produkt der Frostverwitterung und nicht der schürfenden Tätigkeit des Eises sind. Daher können sich Karnischen bis in die Gipfelregionen ausbilden, wo sie allseitig zusammenlaufend pyramidenförmige, oft sehr exponierte Felsspitzen (Karlinge) modellieren (vgl. Abb. 4).

Man wird daher das morphologisch Gemeinsame nicht unbedingt im Karboden finden, denn dieser kann beckenförmig eingetieft oder flach bis steil ansteigend ausgebildet sein und eine eher runde oder langgestreckte Form haben (Abb. 17). Das Gemeinsame ist vielmehr stets die gute Ausrundung der Umrahmung, in welcher man eine Aktivierung einer Gewölbewirkung erahnen kann.

Der Autor hat hunderte Kare durchwandert und keinen einzigen Fall in Erinnerung, daß irgendwo augenfällige Anzeichen von größeren Instabilitäten zu erkennen gewesen wären. Der natürliche Abtrag oder Einebnungsprozeß beschränkt sich stets auf eine oberflächennahe Felslockerungszone, die nur Ausgangspunkt für Felsstürze oder Steinschlag ist. Bei minderwertigen Gesteinsarten werden sich von vornherein flachere Böschungswinkel einstellen, so daß hier auch lokale Rutschungen vorkommen können. Katastrophalen Bergstürzen oder Talzuschüben dürften sich hingegen Karformen nachhaltig entgegenstemmen.

Diese Beobachtungen scheinen die bereits erwähnte Annahme zu bestätigen, daß sich in ausgerundeten Geländehohlformen, wie sie Kare am besten repräsentieren, Gewölbewirkungen einstellen. Sie werden stets ein stützendes Widerlager suchen und daher immer einen schräg nach unten gerichteten Spannungsfluß zeigen.

Verschränkt man den ebenfalls schon erwähnten "Spreizdruck" in steilen Bergflanken mit den schrägen Gewölbegirlanden von Karlingen, also Felsgipfel, bei denen steile Karnischen von mehreren Seiten bis in die Gipfelregionen klettern, dann ergeben sich zwangsläufig auch für solche zum Teil sehr exponierte Gipfel relativ stabile Verhältnisse (vgl. Abb. 4).

Die **Großstrukturen** werden selbstverständlich bei einer solchen Einschätzung zu beachten sein. So ist der **Gipfelabbruch des Ankogels** im Jänner 1932 ausschließlich auf gleitwillige phyllitische Glimmerschieferzwischenlagen in den Amphiboliten zurückzuführen, obwohl die Gipfelpyramide dem Augenschein nach die vorerwähnten Kriterien einer guten Abstützung hat.

Massenmäßig begrenzte Felsabstürze sind besonders im Hochgebirge immer und überall möglich. Ganze Gipfelniederbrüche, wie sie sich beispielsweise vor wenigen Jahren bei der **Bischofsmütze im Dachsteinmassiv** zugetragen haben, sind hingegen hauptsächlich auf turmartige Felspfeiler beschränkt, die von hohen, angenähert vertikalen Wandfluchten begrenzt werden. Die Höhe solcher Felszähne, Türme und Pfeiler und somit der Schlankheitsgrad, lassen eine wirksame Ausbildung von Bogenkräften nicht zu.

Die hohen spezifischen Spannungen setzen stets große Eigenfestigkeiten des Felses voraus. Vertikale Kluftbildungen sind – ähnlich wie in einem einachsialen Druckversuch – die Regel. Durch den natürlichen Abtrag werden daher nie breite, tragfähige Fußzonen modelliert, in denen sich die angesprochene, spannungsverteilende Bogenwirkung einstellen kann. Das Ende ist der vollständige Kollaps. Ein solcher kann wesentlich größere Felsmassen in Bewegung setzen als etwa ein Felssturz, bei dem ja gewöhnlich nur ein paar Kubikmeter Gesteinsmassen in die Tiefe donnern.

5.2. Bergsturznischen

Bergstürze setzen zunächst festes Felsgebirge voraus, das wandbildend auftritt. Die stürzende Massenverfrachtung überwiegt, die gleitende hat untergeordnete Bedeutung. Bei umgekehrter Gewichtung spricht man von Bergsackungen.

In der gegenständlichen Betrachtung ist jedoch nicht das Ereignis selbst Gegenstand einer eingehenderen Analyse, sondern die Geometrie des zurückgelassenen Felsverbandes. Diesbezüglich sind zwei Formen der Abbruchwände zu unterscheiden, nämlich

- eine mehr oder weniger ungegliederte Wandflucht, oder
- eine Ausbruchsnische, eine Nischenkette bis hin zu einer tief in die Flanke eingreifenden halbzylindrischen Kesselform.

Je ein bekanntes Beispiel soll zum besseren Verständnis der Schlußfolgerungen angeführt werden.

Der **Dobratsch-Bergsturz** bei Villach im Jahr 1348 als Folge eines vorangegangenen Erdbebens hat schreckliche Auswirkungen gehabt. Mehrere Dörfer sind nach der Chronik unter gigantischen Felsmassen begraben worden. Zurückgeblieben ist wieder eine Felswand, die vermutlich jener vor dem Bergsturz sehr ähnlich ist, nämlich eine wenig gegliederte, langgestreckte Wandflucht (Abb. 18). Die Abbruchflächen bilden eine Kulisse von talparallelen Steilwänden ohne die Möglichkeit einer seitlichen Abstützung. Es wundert daher nicht, daß sich am Oberrand der Abbrüche örtlich schon wieder offene Spalten aufgetan haben. Da am Fuße dieser Wandflucht inzwischen auch

eine Autobahntrasse vorbeiführt, wäre eine genaue Dokumentation und messende Beobachtung der augenscheinlich sensibelsten Spalten zu empfehlen.

Gewisse Ähnlichkeiten, nur in einem kleineren Ausmaß des Ereignisses, wird man auch in dem aktuellen Beispiel des **Eiblschrofens** bei Schwaz in Tirol erkennen. In beiden Fällen wird sich nie eine natürliche Bogenverspannung einstellen.

Etwas anders ist die Situation beim Tschirgant-Bergsturz in Tirol einzuschätzen. Auch hier sind vor etwa 3000 Jahren gewaltige Felsmassen in das Inntal abgebrochen und haben noch den Ausgang des gegenüber einmündenden Ötztales verlegt. Während jedoch beim Dobratsch die relativ glatten Abbruchwände bis in die Nähe der Talsohle reichen, blieb beim Tschirgant-Abbruchgebiet ein gegliederter, gegen das Inntal vorspringender Stützsockel zurück. Der Schwerpunkt der Abbruchmassen ist der oberen Wandhälfte zuzuordnen, wo nischenförmige Abbruchwände zumindest angedeutet sind (Abb. 19). Durch diese Ausformung und starke Gliederung der Abbruchwand können sich natürliche Gewölbeverspannungen in verschiedenster Ausrichtung einstellen und wesentlich zur Gesamtstabilisierung beitragen.

Zu den eindruckvollsten Beispielen für kesselförmige Abbruchnischen zählen vermutlich jene im Bergsturzgebiet von Arco nördlich des Gardasees (Abb. 20). Hier spürt man förmlich die Bogenverspannung in größter Dimension.

5.3. Rutschnischen, Bergsackungsnischen

Im Gegensatz zu Fels- und Bergstürzen werden Rutschungen in der Natur kaum jemals ohne Mitwirkung von Wasser ausgelöst. Nur bei zu steilen Böschungen im Zuge künstlicher Hanganschnitte, die nicht nach den Bodeneigenschaften projektiert wurden, kommt es auch gelegentlich zu Rutschungen ohne sichtbare Beteiligung von Wasser. Vergleichbar in der Natur wären starke Hangunterschneidungen durch einen Bach- oder Flußlauf.

5.3.1. Rutschnischen

lst in einem Material der Reibungswiderstand nicht mehr ausreichend, um eine natürliche oder künstliche Böschung stabil zu halten, bricht diese entlang eines Teiles oder der ganzen Böschungsfront nieder.

Ist hingegen in einer sonst ausreichend stabilen Böschung eine versteckte Wasserader vorhanden, kann diese maßgeblich dazu beitragen, daß es zu einer begrenzten Rutschung kommt. Diese wird in den meisten Fällen eine halbkreisförmige Abrißnische hinterlassen, deren Randstufe entweder senkrecht oder zumindest deutlich steiler sein wird als die ursprüngliche Böschung (Abb. 21).

Dieses morphologische Phänomen ist auch in vielen Bereichen des täglichen Lebens nachvollziehbar. Wenn man beispielsweise einen frisch geschütteten Sandkegel, dessen Mantelböschung den Grenzneigungswinkel darstellt, mit der Schaufel ansticht, um Material zu entnehmen, dann wird sich selbst bei minimaler Kohäsion ein ähnliches Bild ergeben. Unzählige vergleichbare Beispiele könnten noch angeführt werden. Den Anteil, den jedoch in bestimmten Materialien die Kohäsion bei der Gewölbeausbildung hat, erkennt man im völlig ausgetrockneten Wüstensand. Jeder kleinste Eingriff in die Böschung einer Düne, und sei es nur ein Fußtritt, wird eine Kettenreaktion von

Nachrutschungen bis zum Böschungsoberrand ohne bremsende Gewölbebildung ergeben. Diese Eigenschaft nützt schließlich auch jede Sanduhr in der Sauna.

Die entlang ihres Oberrandes gerundeten Nischen sind daher nur über die Aktivierung einer Gewölbewirkung zu erklären. Ein oder zwei angedeutete Parallelstrukturen entlang des Oberrandes weisen häufig auf die dafür notwendige Verformung hin.

In der Natur erkennt das geschulte Auge aus der vorbeschriebenen Morphologie selbst alte, längst wieder stabilisierte Geländerutschungen, auch wenn eine üppige Vegetationsdecke sie verhüllt. Bei solchen Beobachtungen ist tunlichst jeder bauliche Eingriff, insbesondere in der Fußzone der Rutschmasse, zu vermeiden.

Rutschungen können und konnten in der Natur in allen Dimensionen vorkommen. Erlangen sie ein Ausmaß, das nur mehr aus einer deutlichen Entfernung zur Gänze überschaubar ist, spricht man von Bergsackungen oder nach J. Stini von Talzuschüben.

5.3.2. Bergsackungsnischen

Bergsackungen oder Talzuschübe sind gravitative Massenverfrachtungen, die entlang einer ausgeprägten Gleitbahn erfolgen. Sie können mitunter gigantische Ausmaße erreichen und diesbezüglich durchaus mit Bergstürzen verglichen werden. Im alpinen Raum kommen Bergsackungen wesentlich häufiger vor als Bergstürze, wofür großteils die eiszeitliche Vergletscherung der Alpen verantwortlich ist. In Regionen, die von harten, widerstandsfähigen Gebirgsarten wie Kalkgestein, Granit, Gneis oder Amphibolit etc. aufgebaut sind, blieben die von den Gletschern tief ausgeschürften Täler mit steilen begleitenden Wandfluchten stabil. In weicheren Gebirgsarten wie Glimmerschiefer, Phyllite oder in tektonisch gestörten Bereiche etc. haben hingegen die übersteilten Hänge nach dem Wegfall der stützenden Wirkung der Gletscher vielerorts mit talwärts gerichteten Massenverfrachtungen reagiert. Sie verraten sich schon aus der Ferne, wenn ein breites Trogtal unvermittelt durch einen gigantischen Bergwulst abgeschnürt oder einseitig stark eingeengt wird (Abb. 22). Meist ist der Bach- oder Flußlauf auf das gegenüberliegende Talufer abgedrängt, wo er zufolge seiner Erosionsarbeit oft gute Einblicke in den inneren, zum Teil chaotischen Aufbau der Gleitmasse gewährt. Diese ist ja sonst fast ausnahmslos so gut in eine geschlossene Vegetationsdecke gehüllt und häufig auch bebaut, daß man gewöhnlich nicht die seinerzeitige Naturkatastrophe erahnt. Erst der Blick vom Gegenhang oder aus einem Luftfahrzeug und insbesondere durch die Stereobrille beim Betrachten von Luftbildpaaren eröffnet die umfassende Wahrnehmung des einstigen Ereignisses. Die gewaltigen Abrißnischen in den Bergflanken bestätigen dann paßgenau das Fehlen gerade jenes Massenberges, der nun das Tal abriegelt.

Die zweite und wesentlich interessantere Feststellung gilt jedoch der zurückbelassenen Umrahmung der Megarutschnische. In 90 von 100 Fällen gut ausgerundet sieht man schon aus der geschlossenen Vegetationsdecke, die manchmal sogar bis zum Oberrand der alten Abrißkante hinaufklettert und aus den bescheidenen Schuttansammlungen, daß der **Kesselrahmen stabil** blieb (Abb. 23). Ist: die Bogenform einmal vorgegeben, scheint sie jeder Tendenz zu ausgedehnterer Nachrutschung durch sofortige Aktivierung einer Gewölbeverspannung entgegenzuwirken.

Die Spannungsumlenkung vom Gewölbescheitel zur seitlichen Umrahmung und dort in die Bogenwiderlager erfolgt mit schräg nach unten einfallenden Resultierenden. Es sind

dies grundsätzlich die gleichen Phänomene wie bei den Karen oder Bergsturznischen, sodaß hier von den größten Dimensionen schräger Gewölbe gesprochen werden kann.

Es gibt bei den Großrutschungen nicht nur halbkreisförmige "Kesselausbrüche", sondern auch Massenverfrachtungen entlang planarer Gleitbahnen. Das eindruckvollste Beispiel dafür ist das Abgleiten der halben Bergflanke des Monte Toc im Zuge der Stauerrichtung des Vajont-Speichers am 9.10.1963. Die Folgen dieser gigantischen Massenverfrachtung von rd. 280 Mill. m³ Fels und der dadurch ausgelösten Flutwelle waren katastrophal. Die Sperre hielt dieser Flutwelle, welche die rd. 260 m hohe, extrem schlanke Bogenstaumauer mit einer Wassersäule von etwa 50 m über der Sperrenkrone überschwappte, jedoch stand. Die umfangreichen Stützmaßnahmen in den luftseitigen Widerlagern haben dazu maßgeblich beigetragen (Abb. 24 und 25).

5.4. Schlußfolgerungen auf die Baupraxis

Die Baupraxis nützt die schräge Gewölbewirkung bereits in vielerlei Anwendungsbereichen. Dennoch wäre eine noch konsequentere Berücksichtigung der Naturbeobachtungen wünschenswert.

Die vorstehenden Ausführungen lassen erahnen, welche stabilisierenden Kräfte die Natur einerseits zu mobilisieren vermag, aber andererseits auch, welche Gefahrenpotentiale da und dort lauern können. In der Folge sollen daher anhand von Beispielen aus der Praxis ein paar Hinweise geliefert werden.

5.4.1. Bauen in Rutsch- und Bergsturzmassen

Es bedarf keiner detaillierten Ausführung, daß Rutsch – oder Bergsturzmassen alles andere als ein idealer Baugrund sind. Insbesondere Untertagebauten werden hier auf größte Schwierigkeiten stoßen, mit deren erfolgreichen oder mißglückten Bewältigung sich schon zahlreiche Kongresse und Publikationen auseinandergesetzt haben.

In Rutschmassen sollten aber tunlichst auch Hanganschnitte, wo immer es Alternativen dazu gibt, vermieden werden. Ist das nicht möglich, sind zuallererst die Bergwasserverhältnisse zu erkunden und Drainagekonzepte zu erstellen. Keine andere technische Maßnahme kann einen derart effektvollen Spannungsabbau bewirken, wie gut auf die örtlichen Verhältnisse abgestimmte Drainagen. Die danach einzubauenden Stützmittel werden in einem deutlich wirtschaftlicheren Rahmen bleiben als in einer Anschnittsböschung ohne eine solche Drainagierung.

Eines der abschreckendsten Beispiele stellt der rd. 200 m lange Anschnitt einer Rutschmasse durch die Trasse der Tauernautobahn bei Flachau dar (Abb. 26). Hier mußten schon in den frühen 70er Jahren des 20. Jahrhunderts rd. 200 Millionen Schilling alleine in den Stützmittelaufwand zur Stabilisierung der Anschnittsböschung investiert werden. Dennoch konnte die bergseitige Fahrspur erst lange nach der offiziellen Autobahneröffnung, die im Juni 1975 stattfand, für den Verkehr freigegeben werden. Dieses Beispiel ist deshalb so einprägsam, weil zur Bauzeit eine Umfahrung der alten Rutschmasse mit einem wesentlich geringeren Aufwand und dem Ausschalten eines gewissen Restrisikos möglich gewesen wäre.

Im Zederhaustal mußte die gleiche Autobahn an einer noch wesentlich größeren Bergsackungsmasse vorbeigeführt werden. Ohne nennenswerte Böschungsanschnitte in

der Fußzone konnte hier jedoch weitgehend auf künstliche Stützmaßnahmen verzichtet werden.

Eine andere Gefahr, alte, scheinbar längst stabilisierte Rutschmassen wiederzubeleben, lauert bei einem Einstau der stützenden Fußzone (vgl. Abb. 24). Es wurde schon an anderer Stelle dargelegt, daß sich Großrutschungen, Bergsackungen oder Talzuschübe im wesentlichen auf gleitwillige Gebirgsarten konzentrieren. Da die überwiegende Zahl der großen künstlichen Stauseen Österreichs in den Hochgebirgsregionen der Zentralalpen liegen und diese aus Granitgneisen aufgebaut werden, ist hier die Bereitschaft zu Großrutschungen relativ gering.

Aber nicht alle Speicher sind in Täler mit stabilen Hängen eingebettet, sodaß bei einem allfälligen Einstau alte Rutschungen zufolge der Gewichtsverminderung durch den Auftrieb wiederbelebt oder sogar neue ausgelöst werden können. In solchen Fällen ist äußerst verantwortungsvoll vorzugehen, denn künstliche Stützmaßnahmen können zwar bei kleinen, lokalen Instabilitäten eingeplant werden, nicht aber bei jenen Größenordnungen, die man mit Talzuschüben gleichsetzt.

5.4.2. Bauen mit Ausnützung schräger Gewölbe

Zahlreiche Beobachtungen in der Natur haben zu der Überzeugung geführt, daß gut ausgerundete Naturnischen in allen Größenordnungen in den meisten Fällen eine auffallende Gesamtstabilität aufweisen. Der Verfasser nimmt als Ursache dafür die Ausbildung schräger Gewölbeverspannungen an. In logischer Folgerung sollten diese Erkenntnisse auch in **Raumordnungspläne** einfließen. Eine gründliche geologische Überprüfung müßte dennoch begleitend durchgeführt werden. Zu beachten sind selbstverständlich auch in höheren Lagen die Lawinengefahr und, unabhängig von der Höhenlage, daß solche Kessel auch bevorzugte Sammler von Murengängen sein können.

Aus jahrhundertelanger Beobachtung und Erfahrung sind auch große Talzuschübe ohne Folgeschäden überbaut worden. Eines von vielen Beispielen wäre die **Zarneischg-Riesensackung** am Beginn des oberen Liesertales in Kärnten (siehe Abb. 23). Taleinwärts folgen noch weitere Sackungen.

Wenngleich große unheilbringende Bergrutschungen oder Felsstürze aus alten Abbruchnischen mit guter Gewölbeverspannung nicht oder nur in Ausnahmefällen ihren Ausgang nehmen werden und daher "von oben" kaum Gefahr droht, so können unbedachte Anschnitte in einer dem Augenschein nach völlig konsolidierten oder überhaupt nicht erkannten Rutschmasse wesentlich folgenschwerer sein.

Es gibt aber auch immer wieder Fälle, bei denen erst durch geringfügige Unterschneidungen einer natürlichen Hangböschung eine Rutschung ausgelöst wird. Wenn man erkennt, daß die obere Berandung der Abrißkante ein natürliches Gewölbe abbildet, sollte man dieses in die Sanierungsüberlegungen miteinbeziehen. Sind höher den Hang hinauf keine Bauwerke, könnte man sich nach einer genauen geologischen Analyse unter Inkaufnahme eines vertretbaren Restrisikos im wesentlichen nur auf die bereits gerutschte Bergmasse konzentrieren.

Ein diesbezüglich erfolgreich gelöstes Beispiel ist die Hangrutschung vor dem Westportal des Autobahntunnels Gratkorn Nord in der Steiermark. Ein an sich harmloser Hanganschnitt in einem geologisch unverdächtigen Bergrücken hatte in der Bauzeit zu einer unerwarteten Hangrutschung von beachtlichem Ausmaß geführt. Zwei tiefe Schächte in der Rutschmasse sollten über die genaue Lage der Gleitfläche Auskunft geben, was mit Bohrungen nur selten gelingt. Sie wurden unter großen Schwierigkeiten gleich in Angriff genommen. Als der Autor beigezogen wurde, stellte er sofort die weiteren Schachtarbeiten wegen nicht zu verantwortenden Sicherheitsrisken ein.

Als Lösung wurde vorgeschlagen:

- Verschluß der tiefen, offenen Randspalte, um das Einfließen von Niederschlagswässern zu verhindern,
- Abrunden der scharfen Abrißkante und Ausgleich der entstandenen Geländestufe,
- keine Materialentnahmen in der Fußzone der Rutschmasse, sondern großzügiger Massenabtrag von oben nach unten und konkave Ausformung der Endböschung,
- Drainagierung und künstliche Stützung des restlichen Rutschkuchens auf Trassenniveau.

Diese Maßnahmen haben sich bestens bewährt und können für ähnliche Fälle als die kostengünstigste Sanierungs- und Stabilisierungsmethode empfohlen werden (Abb. 27). Entscheidend ist, daß man den Abbau der gerutschten Massen von oben beginnt, um die "treibenden Kräfte" zu vermindern. Parallel sind Drainagierungsmaßnahmen mitzuführen, sodaß zum Schluß die Fußzone mit einem angemessenen Aufwand an künstlichen Stützmaßnahmen gesichert und Überschußmaterial auch hier verführt werden kann.

Weniger Vertrauen auf eine wirksame Gewölbeverspannung hatte man offenbar bei der Felsgleitung "Rauchenkatsch" an der Katschberg-Bundesstraße. Stark von Gefügestrukturen geprägt ist etwa zur Bauzeit der Tauernautobahn, die entlang der linken Flanke des Liesertales errichtet wurde, auf der gegenüberliegenden rechten Talflanke eine Felssackung erfolgt, die auch die Katschberg-Bundesstraße verschüttet hatte. Daraufhin wurde diese mit aufwendigen Baumaßnahmen, die auch eine neue Brücke einschlossen, talwärts verlegt (Abb. 28).

Die Geometrie der Sackung läßt eine gut ausgerundete Abrißnische erkennen, die unter Einbeziehung der gegenständlichen Betrachtungen über natürliche Gewölbeverspannungen unter Umständen auch kostengünstigere Sanierungsmaßnahmen erlaubt hätte. Vermutlich rechtfertigt jedoch der sehr wichtige Verkehrsweg aus damaliger Sicht die getroffene Gesamtlösung, die ein völliges Abrücken vom Rutschhang zum Ziel hatte. In den folgenden 25 Jahren blieb jedenfalls der gesamte Sackungsbereich stabil!

Bauen unter bewußter Einbeziehung der Gewölbewirkung kann auch bei der Ausgestaltung von **Tunnelportalen** zu namhaften Stützmitteleinsparungen führen. Die meisten Verkehrswegetunnel, ob für Straße oder Bahn ist nicht entscheidend, entwickeln sich aus einem schleifenden Hanganschnitt, bis der volle Tunnelquerschnitt gesichert ist. Mit Ausnahme in sehr steilen Talhängen können sich gute Ausrundungen des bergseitigen Aushubverschnittes zwischen Längsböschung und meist rechtwinkelig zu ihr verlaufender Portalböschung sicherheitserhöhend und kostensparend auswirken.

Wichtig wäre vor allem, daß auch die Stützmauern der Bogenform folgen. Damit könnte zumindest ein Teil der sonst notwendigen Ankerungen entfallen.

Eine ganz besondere Bedeutung kommt der schrägen Gewölbewirkung bei Steinbrüchen zu. In großen Natursteingewinnungsstätten sind aufgrund des ständig fortschreitenden Abbaues künstliche Sicherungs- und Stützmaßnahmen bestenfalls bei permanenten Zufahrtsrampen, aber nie im Abbaugebiet selbst, üblich. Hier kann ein wohl überlegtes Abbaukonzept, das die natürliche Gewölbeverspannung ganz bewußt einbezieht, eine deutliche Erhöhung der Sicherheit in den Abbaufronten bewirken. Erfreulicherweise gibt es diesbezüglich schon zahlreiche Umsetzungsbeispiele (Abb. 29).

Wie es anders enden kann, zeigt der **Steinbruch** für die Betonschottergewinnung der 200 m hohen **Kölnbreinsperre**. In 30 m hohen Etagen ist der Abbau in gerader Ausrichtung der hohen Abbautreppen erfolgt, bis im letzten Baujahr der zentrale Teil niedergebrochen ist. Es kam glücklicherweise niemand zu Schaden, aus Sicherheitsgründen mußte aber danach der Steinbruch aufgegeben werden (Abb. 30). Wenige Jahre später wurden die Zuschlagkörnungen für weitere 500.000 m³ Beton benötigt. Sie mußten aus einem neu erschlossenen Abbaubereich hangabwärts des verstürzten Steinbruchs gewonnen werden. Eine Reaktivierung des vorhandenen Steinbruchs war zu gefährlich. Die Naturschützer hatten mit der so erzwungenen Lösung einige Freude.

Schräge Gewölbeverspannungen haben in den letzten Jahrzehnten bei sogenannten "Knopflochgründungen" vielfach ihre Wirksamkeit bewiesen. Kilometerlange Straßenund Autobahnstrecken sind in engen oder verbauten alpinen Tälern in teilweise extreme Hanglagen abgedrängt worden. Große Hanganschnitte waren vom geologischen Untergrundaufbau vielfach zu riskant, sodaß Hangbrücken oft die einzige Möglichkeit bieten, derartige Talabschnitte ohne lange und kostspielige. Durchtunnelungen zu überwinden (Abb. 31, Anhang). Die Stützenreihen mußten aber auch sicher fundiert werden. Was in einem flachen oder ebenen Gelände meist nur eine Frage der Gründungstiefe ist, wird in problematischen Hanglagen häufig noch von der Gefahr eines einseitigen Hangschubes überlagert. Die mancherorts bis zu 10 m hohen bergseitigen Anschnittsböschungen bis zum Gründungsplanum der Stützen oder Pfeiler werden daher immer gegen den Berg zu ausgerundet geplant, um schon beim ersten, höchstgelegenen Anschnittsteil die Mitwirkung des Gebirges über schräge Bogenverspannungen zu sichern. In minderwertigen Gebirgsarten müssen, gleich wie beim Tunnelbau, Spritzbetonschalen und, wo nötig, Ankerbalken, die der Gewölbeform folgen, mithelfen, das Gebirge zu zwingen, die Schubspannungen auf beide Seiten der Aushubnische umzulenken (Abb. 32). Daß grundsätzlich ähnliche Maßnahmen auch bei manchen Brunnengründungen gleiche Zielsetzungen haben, sei ergänzend erwähnt.

In weniger steilen Hängen sollten auch die ausgerundeten Anschnittsnischen für Pfeilergründungen flacher geböscht werden. Je mehr man sich nämlich der natürlichen Hangböschung nähert, desto weniger künstliche Stützmitteleinbauten werden nötig sein. Bei kleinem Winkel zwischen Natur- und gut ausgerundeter Anschnittsböschung wird man zufolge der Bogenverspannung sogar gänzlich auf künstliche Stützmittel verzichten können.

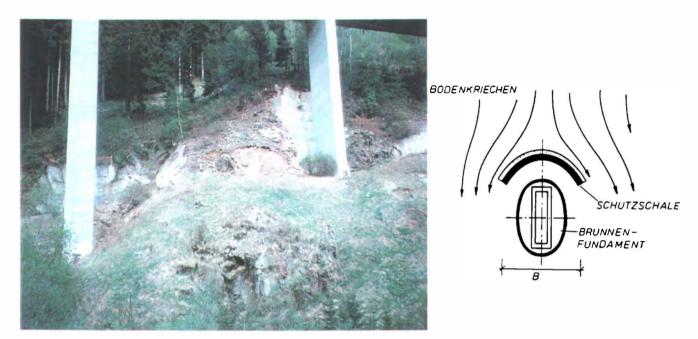


Abb. 32: "Knopfloch"-Gründungen, Tauernautobahn Liesertalstrecke

Während die vorerwähnten, eher punktuellen Sicherungsmöglichkeiten mit nischenförmiger Ausgestaltung fester Bestand des aktuellen Baugeschehens sind, werden bei linearen, großflächigen Böschungs- oder Hangstabilisierungsmaßnahmen die Vorzüge der Bogenwirkung kaum oder nur selten genützt. Der Grund dafür scheint in der etwas aufwendigeren Ausführung zu liegen, allenfalls aber auch darin, daß man schon bei der Planung nur auf Standardmuster zurückgreift.

Unter der Voraussetzung, daß man das Bau- und Stützungsvorhaben oberhalb der Grundwasserspiegellinie zu planen und auszuführen hat, sind gelegentlich schräge Gewölbewirkungen schon sehr erfolgreich in bezug auf Stabilität und Kostenersparnis genützt worden. Die dem Autor bekannten Beispiele beziehen sich auf **Bohrpfahl- oder Brunnenreihen**, die dem Massenabtrag vorauseilend nicht geschlossen niedergebracht wurden und bei denen die offenen Zwischenräume im Zuge der Aushubarbeiten leicht gegen die Bergseite ausgerundet, abschnittsweise mit Spritzbeton ohne oder mit Baustahlgitterarmierung gestützt wurden (Abb. 33). Da die Bohrpfähle oder Brunnen für diese Bögen die Widerlager bilden, sind besonders bei größeren freistehenden Höhen entsprechende technische Maßnahmen zu setzen. Dies können beispielsweise zusätzliche Rückverankerungen sein, um sicherzustellen, daß die Summe aller auf die Pfähle einwirkenden Spannungen schadlos aufgenommen wird. Das Kosteneinsparungspotential kann im Einzelfall, verglichen mit geschlossenen Bohrpfahl- oder Brunnenwänden beziehungsweise horizontalen Ankerbalkenreihen, ein beachtliches sein.

Die vorbeschriebene Stützmethode wird, wenn überhaupt, fast ausschließlich nur für temporäre Baugrubensicherungen angewandt. Ihre begrenzte Anwendbarkeit hat mehrere Gründe. Zunächst sind nur vertikale Stützwandgestaltungen möglich, sodaß höhere Hanganschnitte nicht bewältigt werden können. Weiters sind nur Böden oder bodenähnliche, minderwertige Gebirgsarten mit der Bohrpfahltechnik wirtschaftlich zu bewältigen und schließlich schränkt die relativ teure Baustelleneinrichtung ein derartiges Sicherungs- und Stützkonzept auf längere Streckenabschnitte ein.



Abb. 33: Blick in eine Baugrube. (Der elliptische Querschnitt zeigt, daß die links und rechts liegenden Brunnen bereits abgeteuft und ausbetoniert sind. Im Schutze einer Torkretschalung arbeitet sich die Aushubpartie bis zum tragfähigen Boden in 30 m Tiefe vor.)

Bei zahlreichen Hanganschnitten könnte sich jedoch eine Untersuchung lohnen, ob man nicht mit einem grundsätzlich gleichen Konzept wie das vorbeschriebene, eine kostengünstigere Alternative zu den sonst üblichen, horizontalen Ankerbalkenreihen entwickeln kann. Bei gleicher Neigung der Endböschung könnten bei entsprechenden Voraussetzungen in der Fall-Linie angeordnete Ankerbalken mit gut ausgerundeten Zwischenräumen effizienter und billiger sein. Einfachere Schalarbeiten und wirksamere Gewichtsauflast der Ankerbalken sowie stark reduzierter Stützmitteleinsatz für die Zwischengewölbe sind überlegenswerte Aspekte.

Auf eine traditionelle Nutzung der schrägen Gewölbewirkung sei bei (Form-) Stein- oder Kiesgirlanden in Böschungen hingewiesen. In Bogenketten in Böschungen eingesenkt, ist ihre stabilisierende Wirkung in erster Linie auf die Drainagierung einer oberzurückzuführen. Erst flächennahen Bodenschichte dadurch Komponenten einer Bogenwirkung zum Tragen. Ein Abschälen oder Ausbrechen der Böschung kann dadurch verhindert werden. Schließlich müssen im Kapitel über schräge Gewölbewirkungen auch Bogengewichtsmauern und Bogen gebaute im Geschiebesperren erwähnt werden (vgl. Kap. 6.1).

6.0. HORIZONTALE GEWÖLBE

Im Gegensatz zu den vertikalen und schrägen Gewölben ist es schwierig, für horizontale Gewölbewirkungen Naturbeispiele anzuführen. Da die Krafteinwirkung und Spannungsabtragung in mehr oder weniger horizontaler Richtung erfolgen soll, kann dies in der Natur nur durch Wind oder Wasser verursacht werden. Auszuklammern sind horizontale Kräftekomponenten bei so manchen vertikalen und schrägen Gewölbebeispielen.

Die Kraftumlenkung über horizontale Gewölbe ist hingegen für beide Medien, Wind und Wasser, sehr erfolgreich durch Kunstbauwerke möglich (z.B. Brückenpfeiler).

Als zugegebenermaßen etwas weit hergegriffenes Beispiel in der Natur könnten Verklausungen durch Treibholz angeführt werden. Ohne Aktivierung einer gewissen Gewölbewirkung wäre es in breiteren Fließgewässern kaum möglich, daß es selbst hier zu Treibholzverklausungen kommen kann. Nur Gewölbewirkungen können den beachtlichen Staudruckbeanspruchungen standhalten.

Dies in die Sicherheitsbetrachtung von schlanken Bogenstaumauern übertragend, mußte beispielsweise bei der rd. 39 m hohen **Bogenstaumauer Großsölk** in der Steiermark das massive Holzgeländer entlang der Sperrenkrone nachträglich mit Sollbruchstellen ausgestattet werden. Mit dieser Empfehlung wollte die zuständige Behörde verhindern, daß bei einem Extremhochwasser mit Treibholzfracht aufgrund von Verklausungen der Wasserspiegel angehoben und dadurch die Sperre einer zusätzlichen Belastung ausgesetzt wird. Bei einer geraden Geländeranordnung – etwa entlang der Krone einer nicht im Bogen errichteten Gewichtsmauer – würde das gleiche Geländer auch ohne Sollbruchstellen vom Staudruck umgelegt werden. Bei dem im Bogen montierten Geländer wurde hingegen von Behördenseite die Gefahr gesehen, daß Triftholz zunächst im Bogen angelegt wird und sich später ein vom Geländer unabhängiges Gewölbe ausbildet. In diesem Fall hätte das Geländer nur die Formgebung für den Treibholzstapel bewirkt, selbst aber keine größeren Rückhaltekräfte aktiviert. Somit war ohne zusätzliche Sollbruchstellen das erwünschte Versagen des Geländers nicht sichergestellt.

6.1 Horizontale Gewölbe und Baukunst

Am augenfälligsten und dennoch bei näherer Betrachtung mit Einschränkungen wird die ± horizontale Gewölbewirkung bei Bogenstaumauern genützt (Abb. 34). Der horizontal angreifende Wasserdruck aktiviert in der im Bogen konstruierten Staumauer eine Gewölbespannung, sodaß die einwirkenden Kräfte gebündelt in Richtung der beiden Widerlagerflanken abgelenkt werden. Gleich wie im Tunnelbau geschieht dies nicht ohne Verformungen. Je schlanker eine solche Staumauer ist, desto größer werden die Verformungen sein. Bei der 200 m hohen Kölnbreinsperre betrug beispielsweise die Kronendurchbiegung beim 1. Vollstau im Jahr 1979, also vor der Errichtung des Stützgewölbes, 158 mm! Diese Verformungen sind selbstverständlich in der Statik berücksichtigt und werden mit Präzisionsmeßgeräten kontrolliert.

Die eingangs erwähnte Einschränkung bezieht sich darauf, daß die Einleitung der Bogenspannungen in die Widerlager theoretisch nur auf Kronenhöhe angenähert horizontal erfolgt, während hingegen in allen tieferliegenden Gewölbeabschnitten eine Vertikalkomponente aus dem Eigengewicht der Sperre hinzukommt. Beide Spannungskomponenten kann man in der resultierenden Kraft bündeln. Grafisch dargestellt ergibt sich daraus ein Bild, das im Talboden überhaupt keine Bogenwirkung aufzeigt (Abb. 35).

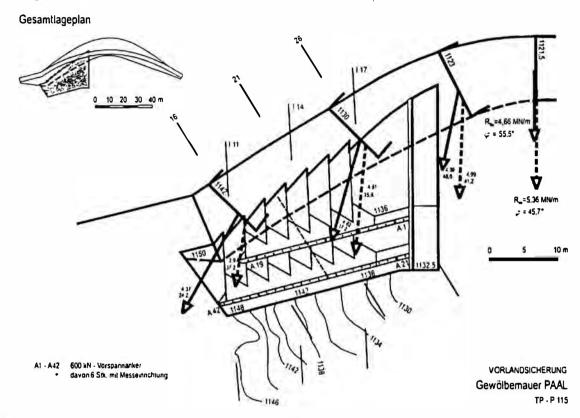


Abb. 35: Vorlandsicherung Gewölbemauer Paal

Es wurde bereits an anderer Stelle erwähnt, daß Bogenstaumauern einwandfreie Widerlager voraussetzen, um die in die Flanken abgelenkten Spannungen schadlos aufnehmen zu können. Weitere Details würden jedoch den Rahmen der gegenständlichen Betrachtung sprengen, und es ist auch der Geologe nicht berufen, sich eingehender mit der Baustatik zu befassen. Dennoch müssen für eine effiziente baugeologische Beratung zumindest die Ergebnisse einer statischen Berechnung in den wesentlichsten Auswirkungen auf den Gründungsfelsen verstanden werden. Grundsätzlich wird eine sehr schlanke Bogenstaumauer größere Spannungen bündeln als eine dicke, eine hohe größere Kräfte in die Widerlager einleiten als eine niedrige und die Bogenform in symmetrischen, engen Talquerschnitten wirksamer sein als in weiten und eventuell noch unsymmetrischen.

Dazwischen gibt es viele Möglichkeiten für eine optimale Einpassung in konkrete morphologische und geologische Verhältnisse. Die Grenzen für Bogenstaumauern in klassischer Ausbildung sind in weiten Talquerschnitten mit flachem Boden oder in ungenügend tragfähigem Felsuntergrund zu sehen.

Wenn die Untergrundverhältnisse nicht einmal mehr zur Gründung einer Gewichtsmauer geeignet sind, die ja aufgrund ihrer breiten Basis nicht mehr die hohen spezifischen Belastungen für den Gründungsfelsen bringt, dann bleibt nur mehr eine Schüttdammvariante zur Realisierung eines konkreten Stauraumes übrig.

Im Zusammenhang mit horizontalen Gewölbewirkungen soll weder von Wind- noch von Wasserabweisern (z.B. Fundamente für Brückenpfeiler) gesprochen werden, denn wie es diese Begriffe schon ausdrücken, handelt es sich hier nicht um Konstruktionen zur Bündelung von Spannungen, sondern nur zu deren Ablenkung. Wenn allerdings Wasser zum Spannungsverursacher wird, wie dies beispielsweise bei Abschlußbauwerken von Staubecken der Fall ist, dann kann die Bogenwirkung bei strenger Einhaltung aller dafür erforderlichen Parameter sicherheitserhöhend und kostensparend genützt werden. Ein großer Vorteil, den eine im Bogen gebaute Talsperre beispielsweise gegenüber einer Gewichtsmauer mit gerader Achsenausrichtung hat, liegt in der gegenseitigen Abstützung der einzelnen Betonierblöcke. Trotz Verdübelung der Blockfugen wird nämlich die Sicherheitsbeurteilung einer geraden Gewichtsmauer, was den Gründungsfelsen betrifft, im wesentlichen nur auf die Gleitsicherheit jedes Einzelblockes konzentriert sein. Bei einer Bogenstaumauer wird hingegen eine gegenseitige Verspannung der einzelnen Blöcke aktiviert, sodaß sich die Sicherheitsbetrachtung auf ganze Mauerabschnitte erstrecken kann.

Die vorstehenden Überlegungen können am Beispiel der 39 m hohen **Bogengewichtsmauer Paal** in der Steiermark veranschaulicht werden. Gewisse Zwänge, die sich aus der Gesamtkonzeption des gegenständlichen Stauprojektes inklusive der Wirtschaftslichkeitskalkulationen einerseits und andererseits aus den topographischen Verhältnissen ergeben haben, grenzten den Standort der Talsperre Paal stark ein.

Die von technischer Seite ausgewählte Sperrenstelle bot eine gut aufgeschlossene linke Talflanke aus hartem Konglomerat, das auch im Talboden unter der Überlagerung mit 3 Bohrungen nachgewiesen werden konnte. Der rechte Talhang war hingegen von Schuttmassen bedeckt, aus denen nur zwei isolierte Felsrippen herausragten. Da ein kleiner Speicherraum einem großen Einzugsgebiet gegenüberstand, war die Hochwasserabfuhr ein besonders wichtiger Faktor in den Projektierungsüberlegungen. Man glaubte daher, daß eine Gewichtsmauer mit zentralem Hochwasserüberfall allen technischen und wirtschaftlichen Aspekten am gerechtesten wird.

Die Planung war schon so weit fortgeschritten, daß die Einreichung bei der zuständigen Behörde erfolgen konnte. Bei diesem Projektierungsstand wurde der Verfasser als geologischer Berater für die Detailplanung und Baubetreuung beigezogen. Da die rechte Einbindungsflanke aufgrund der Schuttüberdeckung nicht eindeutig beurteilt werden konnte, konzentrierten sich die folgenden Erkundungsarbeiten auf diesen Hangabschnitt. Frische Straßenanschnitte knapp oberhalb der künftigen Sperrenkrone hatten zudem einen stark gelockerten und streifenweise engständig geklüfteten Felsverband gezeigt, dessen mögliche Fortsetzung in den Bereich der künftigen Sperreneinbindung nicht auszuschließen war. Kernbohrungen und Felsfreilegungen in drei Schürfröschen sollten bald darauf diesen Verdacht bestätigen (Abb. 36 + Abb. 37, Anhang).

Einen hohen Zerlegungsgrad und große Wasserdurchlässigkeiten des künftigen Gründungsfelses zeigten die Bohrungen. Die bedenklichsten Ergebnisse brachten

jedoch die Felsfreilegungen. Zahlreiche Klüfte hatten weiche Lehmfüllungen von Millimeter bis Zentimeter Dicke. Über ausgedehnte Bereiche glich der würfelig zerlegte Fels einem Trockenmauerwerk mit weicher Bettung der einzelnen Quader (Abb. 38).

Die Schlußfolgerungen waren:

- Die Lehmfüllungen der Klüfte waren nicht verrottete Klufttone einer Scher- oder Störungszone, sondern es handelte sich um eingeschlämmte Feinstoffe. Daher sollten sie gegen die Tiefe zu sowohl in ihrer Häufigkeit als auch Dicke abnehmen.
- Wasserabpreß- und Pressiometerversuche vor und nach Bohrlochinjektionsversuchen mit Zementsuspensionen ergaben, daß die Lehmklüfte durch vorangegangene Spülungen nicht so weit gesäubert werden konnten, daß Injektionen eine nachhaltige Gebirgsverfestigung hätten bewirken können. Die Felsnachgiebigkeit konnte nur um etwa 15 % in Richtung größerer Steifigkeit verbessert werden. Dies war für höhere Belastungen des Gründungsfelses deutlich zu wenig.
- Eine befriedigende Untergrundabdichtung war hingegen möglich.
- Die Lehmklüfte haben den Gleitsicherheitsnachweis für konkrete Einzelblöcke einer geraden Gewichtsmauer sehr in Frage gestellt.

Aufgrund dieses Ergebnisses war das Einreichprojekt nicht mehr aufrechtzuerhalten. Es ging ja noch von ähnlich guten Gebirgsverhältnissen aus, wie sie der linke Einbindungshang zeigte.

Die Lösung brachte schließlich der Vorschlag des beratenden Geologen, eine **Bogen-Gewichtsmauer** zu planen (Abb. 39). Für eine schlanke Bogenmauer waren die Fundierungsverhältnisse in der rechten Einbindungsflanke ungeeignet. Hohe konzentrierte Spannungsableitungen hätten hier zu unzulässigen Verformungen im Untergrund und folglich auch in der Mauerschale geführt. Eine Spannungsbegrenzung mit max. 200 N/cm² schien hingegen vertretbar. Dieser Wert wurde daher von geologischer Seite als äußerste Grenze für die Umplanung der Sperre angegeben. Zufolge der Bogenwirkung war nun auch eine Spannungsverteilung auf mehrere Blöcke sichergestellt. Allenfalls nachgiebigere Teilbereiche konnten überbrückt werden. An Stelle des Gleitsicherheitsnachweises eines jeden Einzelblockes war nunmehr eine räumliche Betrachtung des Gesamtsystems zulässig. Die schadlose Hochwasserabfuhr über die Sperrenkrone war ebenfalls gewährleistet (vgl. Abb. 39).

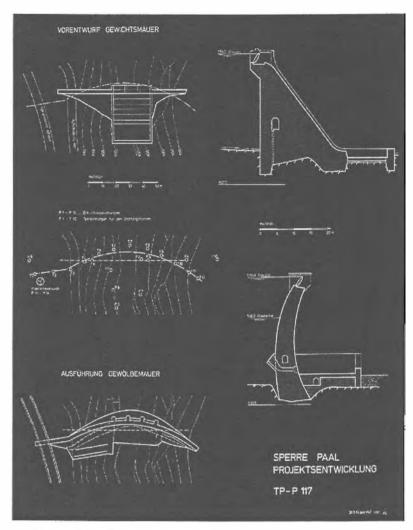


Abb. 39: Projektsentwicklung

Der Erfolg war perfekt. Die zahlreichen hochempfindlichen Meßeinrichtungen, mit denen die Sperre Paal vorsorglich ausgestattet wurde, haben nach nunmehr schon 19 Betriebsjahren (erster Einstau Mitte Juli 1982) ein ausgezeichnetes Verhalten von Sperre und Untergrund bestätigt. Allerdings mußte der Felsaushub in der rechten Flanke zweimal kräftig vertieft werden.

Darüberhinaus hat der angetroffene, minderwertige Felszustand zu theoretischen Gleitkreisuntersuchungen Anlaß gegeben, deren Ergebnis es ratsam erscheinen ließ, den rechten Sperrenflügel noch zusätzlich mit einer rückverankerten Vorlandplombe zu sichern (Abb. 40 und 41 im Anhang).

Das Beispiel der Sperre Paal zeigt die Nützlichkeit der Bogenwirkung in einem eher ungewöhnlichen Bild auf. Hier trug sie nämlich maßgeblich dazu bei, daß ein Stauprojekt trotz gewisser geologischer Mängel in einer Talflanke überhaupt realisiert werden konnte. Im Normalfall müssen für die Gründung von Bogenstaumauern besonders die beiden Einbindungsflanken einwandfreie Gebirgsverhältnisse aufweisen. Hierzu scheint die Projektierungsgeschichte der Sperre Paal im Widerspruch zu stehen. Aber dieses Beispiel unterstreicht eben besonders die Leistungsvielfalt der Bogenwirkung.

Spannungsumlenkungen durch mehr oder weniger horizontale Bogenwirkungen sind zwar im Baugeschehen am transparentesten bei schlanken Bogenstaumauern, aber auch bei Schüttdämmen für Stauhaltungen nicht auszuschließen. Ruft man sich in Erinnerung, was eingangs über vertikale Lasteinwirkungen auf Gewölbe in Lockersedimenten und deren Spannungsumlenkung über Gewölbebildungen beschrieben wurde (Siloeffekt, Stahlblech-Durchlässe, dünne Spritzbetonschalen etc.), dann kann man Gleiches auch um 90° verdreht bei im Bogen geschütteten Staudämmen annehmen (Abb. 42, Anhang).

Voraussetzung dafür sind aber vergleichbare Rahmenbedingungen. Das heißt, eine vertikale Schale oder Membran aus Beton, Kunststoff oder Bitumengemisch als zentrale, schlanke Dichtwand in einem im Bogen errichteten Schüttdamm würde vermutlich über begrenzte Verformungen, wie sie bei jedem Staudamm auftreten, Bogenwirkungen im luftseitigen Stützkörper aktivieren. Dadurch könnten zusätzliche Sicherheiten in das Bauwerk eingetragen, aber auch die Verformungen der zentralen Dichtwand reduziert werden. Dieser Aspekt erscheint besonders interessant für vertikale Dichtwände aus Beton, wie sie beispielsweise der Damm Bockhartsee aufweist. Nach Einschätzung des Verfassers ist dieser Gedanke einer bewußten Aktivierung einer Bogenwirkung bei Schüttdämmen noch nie ernstlich untersucht oder in Erwägung gezogen worden.

7.0 SCHLUSSWORT

Der Versuch einer umfassenden Darstellung der verschiedensten Wirkungsweisen von Gewölben in der Natur und Technik soll Anregungen vermitteln, wie die praktische Beratungstätigkeit des Geologen über die Beschreibung des Beurteilungsobjektes hinaus zur Mitgestaltung eines Bauprojektes erweitert werden kann. Als äußerst hilfreich hat sich dafür in einer langen Baupraxis die genaue Beobachtung von einschlägigen Phänomenen in der Natur erwiesen, die stets nach ihren Ursachen zu hinterfragen waren. Als zweite Säule eines vertieften Verständnisses muß rückblickend auch die oftmals intensive Mitarbeit in den Planungsbüros und auf Baustellen hervorgehoben werden. Das wertvollste dabei waren stets die Diskussionen mit den Bauingenieuren, um aus vielen Möglichkeiten die jeweils beste Lösung herauszufiltern. Dafür sollte dem Geologen im Vorfeld kein Detail so geringschätzig erscheinen, daß man seine Erhebung von vornherein delegiert. Nicht selten ist gerade der Schlüssel für eine gute Idee im Unscheinbaren oder nebensächlich Geglaubten zu finden. Dies ist insbesondere zu beherzigen, wenn man später als Erfahrener mit Prüfaufgaben betraut wird. Wenn daher in diesen Ausführungen auch einige Vergleiche zu einem Lächeln reizen, so ist zu hoffen, daß es kein spöttisches, sondern ein zustimmendes ist.

QUELLENNACHWEIS

BRANDL, H., BRANDECKER, H. (1982): Autobahnbau unter extremen geotechnischen Bedingungen (Die Tauernautobahn im Liesertal). [in:] BRANDL, H. (Hrsg.): Mitteilungen für Grundbau, Bodenmechanik und Felsbau, Technische Universität Wien, Heft 1, Wien.

(Abb. 15 und 32)

BRENNER-AUTOBAHN-AG (Hrsg., 1972): Die Brenner Autobahn. Die erste alpenüberquerende Vollautobahn. Verlag Tiroler Nachrichten, Innsbruck.

(Abb. 33)

DEMMER, W.: Zur Geologie der Tauernautobahn-Teilstrecke Hüttau – Eben (Abschnitt Fritzbachtal). [in:] TAUERNAUTOBAHN AG (Hrsg.): Tauernautobahn Scheitelstrecke. Sonderdruck, Salzburg.

(Abb. 12)

INTERNET (Abb. 8)

MANDL, G., Geologische Bundesanstalt Wien

(Abb. 6 und 7)

SZEPFALUSI, C., 1160 Wien

(Abb. 17)

Autor:

Dr. Wolfgang DEMMER A-2102 Bisamberg Rosengasse 12

ANHANG

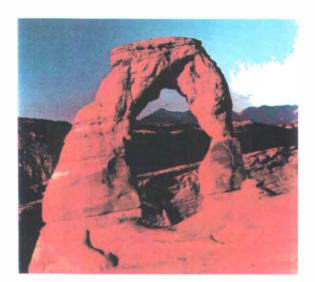


Abb. 1: Naturbogen, Utah



Abb. 2: Naturbogen



Abb. 3: Naturbogen, Utah



Abb. 4: Hafner



Abb. 5: Landscape Arch



Abb. 6: Eisbrücke



Abb. 7: Gletschereishöhle

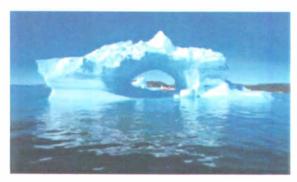


Abb. 8: Eisberg-Torbogen



Abb. 9: Mesa Verde Nationalpark



Abb. 10: Stahlfertigteildurchlaß

Abb. 11 und 12 im Textteil



Abb. 13: Larzenbachquerung

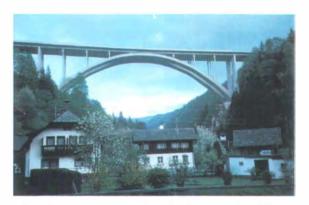


Abb. 14: Tauernautobahn Talübergang Leoben

Abb. 15 im Textteil

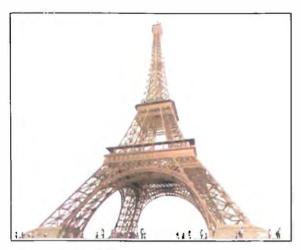


Abb. 16: Eiffelturm



Abb. 19: Tschirgant-Bergsturz, Abbruchwand



Abb. 17: Schneeberg - Kar "Breite Ries"



Abb. 20: Gardasee, Arco-Bergsturznische



Abb. 18: Dobratsch-Bergsturz



Abb. 21: Rutsch in Lockersedimenten



Abb. 22: Zarneischg-Sackung, Taleinengung



Abb. 23: Zarneischg-Sackung, Gesamtansicht

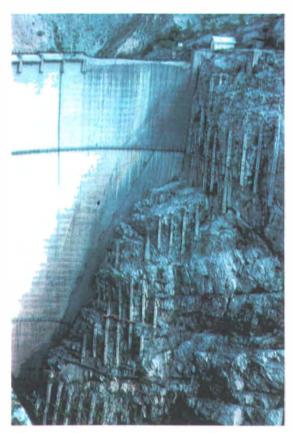


Abb. 25: Vajont-Sperre, massive künstliche Widerlagersicherungen



Abb. 24: Vajont-Sperre, Riesenbergrutschung im Zuge der Stauerrichtung



Abb. 26: Rutschhang Flachau



Abb. 27: Hangrutschung Gratkom-Tunnel Nord

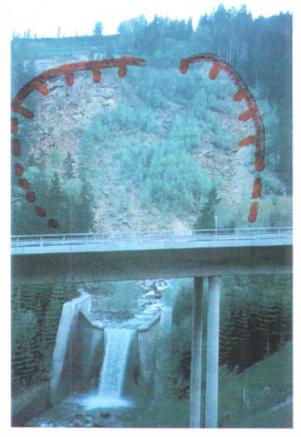


Abb. 28: Rauchenkatsch-Rutschung



Abb. 29: Steinbruch im Bozener Quarzporphyr



Abb. 30: Steinbruch Kölnbrein



Abb. 31: Hangbrücke Liesertal

Abb. 32 und 33 im Textteil



Abb. 34: Kölnbreinsperre

Abb. 35 im Textteil

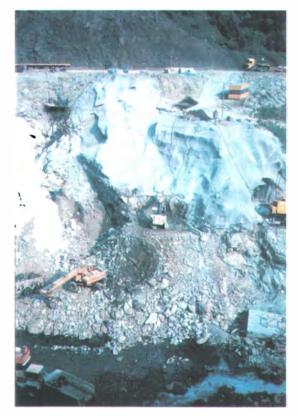


Abb. 37: Sperre Paal, Felsfreilegungen



Abb. 36: KW Bodendorf, Sperre Paal, Bohrkerne



Abb. 38: Sperre Paal, starke Gefügeauflockerungen

Abb. 39 im Textteil



Abb. 40: Sperre Paal, rechte Einbindung, ohne Vorlandplombe



Abb. 42: Feistritzbachdamm



Abb. 41: Sperre Paal, Vorlandplombe in Bau

Sprödtektonische Strukturanalyse der Talhofstörung im Semmeringgebiet

(Zusammenfassung der Diplomarbeit)

Markus GMEINDL

Zusammenfassung

Das Semmeringgebiet unterliegt im Bereich der Talhofstörung mindestens neun unterschiedlichen Deformationen. Die Deformationsphasen zeigen eine Analogie zu jenen der Nördlichen Kalkalpen. Deformation D1 ist eine Extension in den unteranisischen Gutensteiner bzw. Thörler Kalken, welche sich durch Extensionsspalten senkrecht zur Bankung äußert. Deformation D2 (Oligozän bis Mittel Miozän) ist die NW gerichtete Überschiebung der unterostalpinen Mürz-Tachenberg-Decke durch das mittelostalpine Altkristallin der Tratenkogel Deckscholle. Die Schichtfolge der Tratenkogel Deckscholle ist als invers liegend zu betrachten. Deformation D3 (frühes Mittel Miozän) ist die Anlegung einer dextralen, NW-SE streichenden, reinen Blattverschiebung, entstanden durch einer N-S Kompression. Dieses Störungsmuster ist gut aufgeschlossen im Bereich NE von Mürzzuschlag, wo tief eingeschnittene NW streichende Gräben an diese Störungsrichtung gebunden sind. Deformation D4 (Mittel Miozan) ist die sinistrale reine Blattverschiebung der Talhofstörung als Resultat einer NW-SE Kompression. Die Entstehung hängt zeitgleich mit jener der Salzachtal-Ennstal (SEMP) und Mur-Mürztal Linie zusammen. Sie zeigt sich durch steilstehende Anisbändermarmorharnische (Weinzettelwand, Polleroswand, Kaltenberg). Der Kaltenberg wird in dieser Arbeit nicht als steilstehende Antiklinalstruktur dargestellt, sondern ist mit aufrechter Schichtfolge die westlichste Fortsetzung der Adlitzschuppe, welche hier sinistral eingeschleppt wurde. Deformation D5 (Mittel Miozan) zeigt die Geometrie eines NE-SW streichenden Extensionsduplexes mit sinistralen Schrägabschiebungen. In die Tiefe setzt sich dieser Duplex mit einer negativen flower-structure fort. Die Versatzweite beträgt für das gesamte Kartierungsgebiet 450-500m. Sie ist an der Verstellung des Thörler Kalkes am Haakogel und durch das mittelostalpine Altkristallin des Ebenen Waldes, welches durch eine schräge Aufschiebung in die heutige Position gebracht wurde, determinierbar. Deformation D6 liefert die Reaktivierung von D3 und D5 während einer N-S Kompression. Deformation D7 zeigt sich als konjugiert ausgebildete NE-SW streichende Abschiebungen während einer NW-SE Extension. Deformation D8 erzeugt sinistrale Schrägabschiebungen auf NW-SE streichenden Störungsflächen. Deformation D9 (ab dem Mittel Miozän) erzeugt konjugierte N-S streichende Abschiebungen, die durch E-W Extension entstanden sind.

Einleitung

Das Ziel der vorliegenden Arbeit war es, ein sprödtektonisches Modell über ein Gebiet mit einem geplanten Tunnelprojekt zu erstellen; um somit auf beim Vortrieb auftretende Probleme hinsichtlich Schwächezonen bzw. Wasserführung aufmerksam zu machen. Die gewonnenen Daten über Einspannungs- und Bewegungsrichtung geologischer Einheiten sowie deren chronologische Abfolge und Reaktivierung in einem neuen Spannungsfeld erlauben Aussagen über die Entstehungsgeschichte des betrachteten Bereichs. Die Untersuchungen sollen Aufschluß über die Deformationsgeschichte, den Bewegungssinn, die Geometrie des Störungsmusters, das relatives Alter der Störungen und die Großtektonik des Gebietes geben:

Arbeitsweise und Methodik

Ausgangspunkt dieser Arbeit ist eine computergestützte Luft- bzw. Satellitenbildlineamentauswertung. Im Gelände erfolgte daraufhin die Verifizierung der im Satellitenbild gewonnenen Daten durch eine Detailkartierung im Maßstab 1:5000, wobei Lithologie und Bewegungskriterien an Harnischflächen bestimmt wurden. Die entstandene Karte wurde schließlich digitalisiert und über ein Höhenmodell gelegt. Für die Auswertung der Datensätze wurde die kinematische P/T Achsenmethode nach F. TURNER (1953) gewählt. Bei dieser Methode wird für jedes einzelne Fläche/Linear Paar eine theoretische Kompressionsachse P, eine intermediäre Achse b und eine Dehnungsachse T bestimmt, welche den lokalen inkrementellen Verkürzungs- bzw. Streckungsachsen λ_1 , λ_2 und λ_3 entsprechen Die Maxima der Punktverteilungen ergeben die Orientierung der Stresshauptachsen des Paläostresstensors. Dadurch ist es möglich, verschiedene tektonische Ereignisse voneinander zu trennen. Die Lage der b-Achse (σ2) ist, im Gegensatz zur P- und T-Achse, am aussagekräftigsten, da sie unabhängig von θ ist. Steht die b-Achse vertikal, so liegt eine reine Blattverschiebung (pure strike-slip Bewegung) vor, liegt sie subhorizontal, zeigt sie eine Auf- oder Abschiebung (revers oder normal dip-slip) an. (ANGELIER, 1994; PETIT, 1994). Aus der errechneten Lage der kinematischen Achsen können nun mit Hilfe der Dihedra-Methode (beachball methode) nach J. ANGELIER & P. MECHLER (1977) die Stresshauptachsen σ_1 , σ_2 und σ_3 des Paläospannungstensors berechnet werden. Durch Verschneidung der Lösungen einer Deformationsphase erhält man die Orientierung von σ_1 und σ_3 eines kogenetischen Datensatzes.

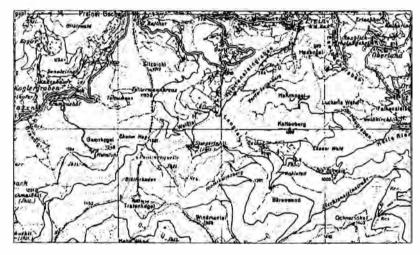


Abb. 1: Geographische Lage des Arbeitsgebietes. Das bearbeitete Gebiet liegt zwischen den beiden Bundesländern Steiermark und Niederösterreich an der nördlichen Stirn der Zentralalpen. Auszug aus: ÖK MÜRZZUSCHLAG (Blatt 104).

Großtektonische Übersicht

Die tektonische Gliederung des unterostalpinen Anteils des Semmeringgebietes erfolgt in vier große Faltendecken. Die einzelnen Deckenpakete wurden durch das Übergleiten der Kalkalpen schräg abgeschert, sodaß deren aufrechte Hangendschenkel nun zusammengequetscht in Nordposition vorliegen. Über der tiefer liegenden Wechseldecke liegt in ganzer Breite die Stuhleck-Kirchberg Decke. Die Stuhleck-Kirchberg-Decke (Synonyme dafür sind nach H. MOHR 1912 "Pretuldecke" und "Eselsteindecke") bildet die Hauptmasse der Semmeringeinheit. Die darüberliegende Mürz-Tachenberg Decke (=Stürzerkogel-Decke nach H. MOHR 1912 und Kampalpendecke nach H.P. CORNELIUS 1952a) ist ebenfalls als Liegendschenkel einer

Faltendecke ausgebildet. Darüber liegt nach Ansicht von A. TOLLMANN (1977) die mittelostalpine Tratenkogel Deckscholle bzw. die Tattermannschuppe. Gegen Norden hin taucht diese Einheit unter das Karbon der Veitscher Decke ab. Die nächst höhere Einheit gehört dem Oberostalpinen Deckensystem (OOA) an. Es sind dies die jungpaläozoische untere Grauwacken Decke bzw. Veitscher Decke, die Silbersberg Decke (F. NEUBAUER et al., 1994) und die aus altpaläozoischen Anteilen bestehende obere Grauwacken Decke bzw. Norische Decke.

Stratigraphie

Unterostalpin

Die Schichtfolge beginnt mit permischen Ablagerungen und reicht bis in das Rhät. Die Sedimentation setzt im Perm mit Alpinem Verrucano bzw. mit der synonymen ABP-Serie (P. FAUPL 1970, S. 38) ein. Die darüber liegenden Semmeringquarzite sind grünliche, feinkörnige, meist im dm-Bereich gebankte Quarzite des Skyth. Es sind dies phengitführende, teils gut gebankte Quarzite oder Arkosen. An deren Basis können Konglomeratlagen mit gut gerundeten, rosagefärbten Quarzkomponenten eingelagert sein. Die Mitteltrias wird nun durch das Auftreten der Reichenhaller Rauhwacke eingeleitet (G. RIEDMÜLLER, 1976). Über der Rauhwacke liegt der Gutensteiner Kalk. Teilweise kann der Kalk auch durch Dolomit ersetzt sein. Der Anisbändermarmor ist ein weißer, leicht rosafarbener Kalkmarmor mit deutlicher Bankung. Der Mitteltriasdolomit zeigt sich dunkel und dünngebankt. Der ladinische Wettersteindolomit hat im Gegensatz zum Mitteltriasdolomit ein hellgräuliches Aussehen. Eine Besonderheit der Karnentwicklung sind die schwarzen Kapellener Schiefer südöstlich des Talhofes und im Bereich südwestlich des Bahnhofes von Kapellen. Eine detaillierte Beschreibung findet man in H. BARNICK, (1966). Darüber beginnt im Semmeringgebiet eine evaporitische Entwicklung mit Gips, Dolomit und Rauhwacke des mittleren Karns. Der norische Anteil dieser Bunten Keuperfazies setzt sich aus violetten, grünen und roten Serizitschiefern zusammen, in denen Quarzite, Dolomite, Rauhwacken und brekzienführende Rauhwacken schwimmen können. Aus der kalkig-mergeligen Keuperfazies des Rhät stammten die ersten Fossilfunde, welche von F. TOULA (1877a) erstmals beschrieben wurden.

Mittelostalpin

Die Tratenkogel Deckscholle setzt sich aus feinblättrigen Phylliten und schuppigen Muskovitschiefern zusammen. Innerhalb dieser altkristallinen Einheit auftretende Pegmatite und Amphibolite stellen diese Scholle eher in das mittelostalpine als in das unterostalpine Deckenstockwerk. Die permomesozoischen Tattermannschiefer sind bläuliche bis lilagraue, feinschiefrige Phyllite mit Serizit, Quarz und Albit. Darüber folgt Quarzit. Die anisischen Thörler Kalke sind vorwiegend blauschwarze, aber auch rötliche dünnschichtige Kalke mit weißen Kalzitadern.

Das Oberostalpin und seine Schichtfolge

Der Gesteinsinhalt der Veitscher Decke besteht aus Graphitphylliten, Sandsteinen und Metaquarzkonglomeraten. Die klastischen Komponeten der Sandsteine sind Quarz,

Hellglimmer und Feldspat. Die Konglomerate bilden Bänke von einigen Metern Mächtigkeit innerhalb der Phyllite. Die Quarzgerölle sind gut gerundet, 1-3cm im Durchmesser, die Matrix besteht ebenfalls aus Quarzkomponenten mit eher dunkler Farbe. Die Silbersbergserie, welche auch die gleichnamige Silbersberg Decke aufbaut, besteht aus stumpfen, graugrünen phyllitischen Schiefern, Quarziten und Konglomeratlagen. Typisch ist das Auftreten von E-W streichenden Grünschieferrippen. Die Schichtfolge der Norischen Decke setzt im hangenden der Silbersberg Decke mit dem Blasseneckporphyroid ein.

Die kinematische Analyse des Semmeringgebietes

Deformationsphase D1 "Extensionsspalten"

Die älteste nachzuweisende Deformation sind kalzitgefüllte Extensionsspalten (extension fissures) im Gutensteiner bzw. Thörler Kalk, die wahrscheinlich auf eine Zerrung des Sedimentationsbecken im unteren Anis zurückzuführen sind. Die Extensionsspalten stehen senkrecht zur Bankung. Die Extension in den Thörler Kalken beträgt ca. 20%.

Deformationsphase D2: "NE streichende b-Achsen"

Hinweise auf eine frühere, NW gerichtete Kompressionsrichtung geben subhorizontale, ENE-WSW streichende b-Achsen im Liegenden der Tratenkogel Deckscholle und in den nördlicheren Anisbändermarmoren. Vermutlich wurden während dieser Deformation die Hangendschenkel der schon erwähnten Großfalten abgeschert.

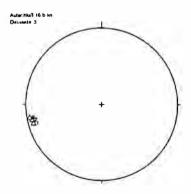


Abbildung 2: Die Lagekugeldarstellung zeigt ENE-WSW streichende b-Achsen, die nur in den unterostalpinen Bändermarmoren und im Liegenden des Kristallins der Tratenkogel Deckscholle gemessen wurden.

Deformationsphase D3:,, dextral NW-SE streichende Blattverschiebungen"

Die Anlage dieses als dextrale Blattverschiebung (pure dextral strike-slip) ausgebildeten Störungssystems erfolgte nach dem Abscheren der Hangendschenkel als Resultat einer N-S Kompression.

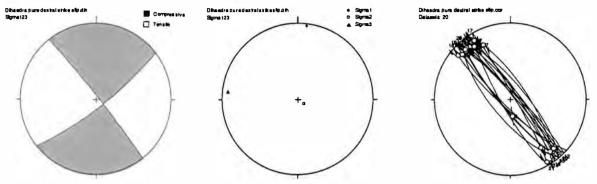


Abbildung 3: Für die Dihedra-Methode werden nach der Separation der Datensätze nur dextrale Blattverschiebungen verwendet. Diese und der stress/strain Achsenplot zeigen ein N-S kompressives Ereignis. Die dazu konjugierten sinistralen Blattverschiebungen (pure sinistral strike slips) findet man als sinistrale Schrägabschiebungen (normal sinistral oblique slips) reaktiviert durch Deformationsphase D4.

Da diese Störungen konjugiert auftreten, die Bewegung aber immer nur an einer Störungsrichtung stattfindet, es kommt ja sonst zu Platzproblemen, wurde in dieser N-S Kompression in erster Linie die NW-SE streichende Mohr-Coulombsche Bruchfläche bewegt. Die erste Striemung der > 85° einfallenden Harnische verläuft subhorizontal, die Reaktivierung erfolgte unter einen pitch-Winkel von 30-40°.

Deformationsphase D4: "sinistrale Blattverschiebung der Talhofstörung"

Das mächtigste Element im Gebiet des Semmerings ist die sinistral E-W streichende Battverschiebung der **Talhofstörung** (pure sinistral strike slip). Harnischflächenanalysen zeigen teilweise ein subhorizontales Linear. Überschneidungen von jüngeren Linearen konnten nicht festgestellt werden, eine Reaktivierung in einem anders orientierten Spannungssystem ist aber durchaus möglich.

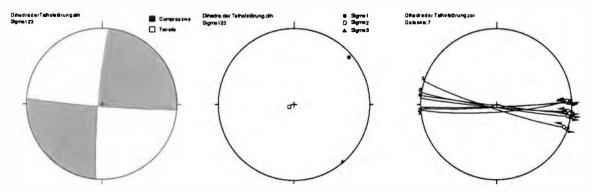


Abbildung 4: Für die Berechnung der P/T-Achsen wurden nur die sinistralen Blattverschiebungen (pure sinistral strike-slip) verwendet. Die Dihedradarstellung zeigt eine NE-SW Kompression.

Von der Talhofstörung selbst zweigen immer wieder Störungen in das Kristallin ab, die aufgrund des niedrigen Winkels als synthetische Riedel zu deuten sind. Belegt werden diese Riedelstrukturen durch das Vorkommen von Quarzitkataklasiten. Eindrucksvoll sind die steilstehenden Störungsflächen der Pfeffer,- Weinzettel- und Polleroswand, die von der Südbahn durchörtert werden und die Fortsetzung der Störung in das südliche Wiener Becken anzeigen.

Deformationsphase D5: "sinistral abschiebendes Störungssystem" (Duplexsystem)

Dieses sinistral NNE-SSW streichende Störungssystem bildet die am häufigsten auftretenden Strukturen im Kartierungsgebiet. Es handelt sich hierbei um ein sinistral abschiebendes (normal sinistral oblique slip) System, welches einem Extensionsduplexs (N. WOODCOCK, M. FISCHER, 1986) mit negativer flower-structure entspricht.

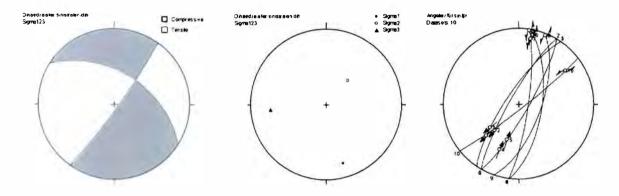


Abbildung 5: Für die P/T-Achsenberechnung wurden sinistrale Schrägabschiebungen verwendet. Der P/T Achsenplot zeigt eine NNW-SSE Kompression mit einem schräg nach NNW abtauchenden σ₁. Die primäre Anlage dieser Störungsrichtung erfolgte als reine sinistrale Blattverschiebung (pure sinistral strike-slip) während Deformationsphase D3. Die Reaktivierung dieser konjugierten Störungen erfolgte unter D5. Die Harnischfächen zeigen durchgehend 2 verschieden orientierte Bewegungslineare. Ein älteres, subhorizontales Linear wir von einem jüngeren, schrägabschiebenden überprägt.

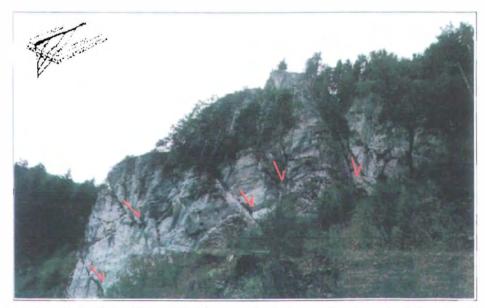


Abbildung 6: Blick auf einzelne Störungsäste der negativen flower-structure des Extensionsduplexs. Die Störungsflächen der negative flower-structure fallen zur Tiefe hin flacher ein und münden schließlich in die Hauptstörung

Von der Hollsteingrabenstörung und Gießgrabenstörung zweigen jeweils parallel zueinander stehende Äste ab, die den "leading" und "tailing extensional imbricate fan" darstellen (R. TWISS & E. MOORES, 1992; S.71). Auch diese Struktur besitzt einen abschiebenden Charakter.

Deformationsphase D6: "dextral und sinistral schrägaufschiebende Reaktivierung"

Hierbei handelt es sich um eine Reaktivierung von D3 und D5 als dextrale, bzw. sinistrale Schrägaufschiebung (reverse dextral und reverse sinistral oblique-slip). Dieses Ereignis findet man lokal in wenigen Aufschlüssen, wo D3 (pure dextral strike-slip) als dextrale Schrägaufschiebung (reverse dextral oblique-slip) reaktiviert wurde.

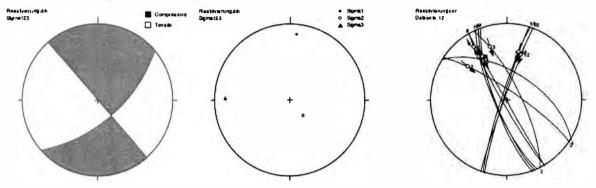


Abbildung 7: Das NW streichende Störungssystem zeigt auf seinen Harnischflächen, genauso wie das NNE streichende, ein schrägaufschiebendes Linear. In der Dihedra Darstellung zeigt sich eine N-S Kompression.

Deformationsphase D7: "NE-SW streichende Abschiebungen"

Dieses Ereignis ist das Resultat des Wechsels von σ_1 horizontal zu σ_1 vertikal. Die daraus resultierenden Abschiebungen streichen NE-SW. Dieses Störungsmuster tritt im Vergleich zu den schon erwähnten Systemen in seinem Auftreten eher in den Hintergrund. Nach Gesprächen mit Dr. Kurt Decker (Geo-Zentrum Wien) kommt dieses Störungssystem auch im Wiener Becken vor.

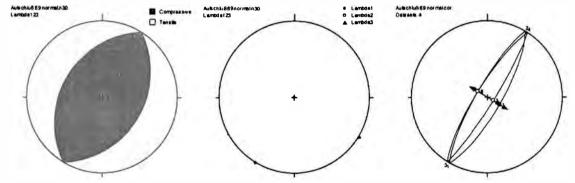


Abbildung 8: Das Bewegungslinear steht subvertikal zum Streichen der Harnischflächen. Ein zweites, schräg abschiebendes Linear überprägt die primär angelegten Abschiebungen (normal dip-slip Deformation). Ob es hier zu einer erneuten Reaktivierung von D3 bzw. D5 kam, konnte nicht festgestellt werden. Die Dihedradarstellung zeigt eine SE-NW Extension.

Deformationsphase D8: "NW-SE streichende Abschiebungen"

Untergeordnet findet man gegen NE fallende sinistrale Schrägabschiebungen. Die Harnischflächen weisen teilweise verschieden orientierte Lineare auf, wobei ein schräges ein älteres, vertikal orientiertes Linear überprägt. Die primäre Anlage erfolgte also als Abschiebung, welche in jüngeren Ereignissen von sinistralen Schrägabschiebungen überprägt wurde.

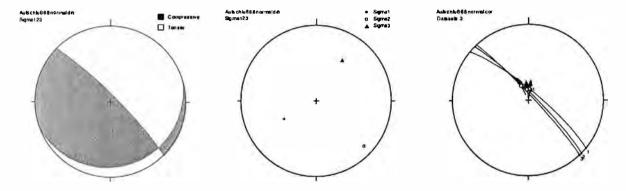


Abbildung 9: Primär als Abschiebungen ausgebildete Harnischflächen werden in einer Änderung des Spannungfelds schrägabschiebend reaktiviert.

Deformationsphase D9: "N-S streichende Abschiebungen"

Untergeordnet treten auch E-W gerichtete, konjugierte Abschiebungen auf, die auf eine E-W Extension zurückzuführen sind. σ_1 ist dabei vertikal orientiert, σ_3 liegt horizontal. Das Bewegungslinear steht subvertikal zum Streichen der Harnischflächen.

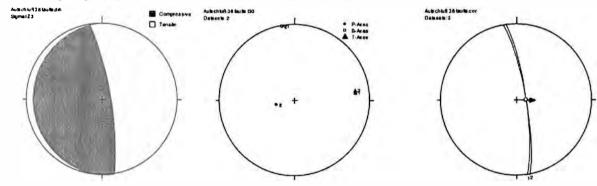


Abbildung 10: Der P-Achsenplot zeigt ein vertikal stehendes σ_1 . Ein zu dieser Abfolge relativ junges Ereignisse im Semmeringgebiet stellt somit N-S streichende Abschiebungen dar.

Eingliederung der Strukturen in das Deformationsschema der östlichen Kalkalpen

Die tertiäre tektonische Entwicklung der Ostalpen wird durch die kontinuierliche N-S Kompression der Ostalpen in Folge des Norddrängens des adriatischen Indenters geprägt.

etress direct.	T1. NW-SE compression	T2. N-S compression	T3. NE-SW compression	T4. E-W extension	TS. E-W compression	T6. N-S extension
Paulte.	WNW-ESE: dex N-S; sin NE-SW: rev	NW-SE: dex NE-SW: sin E-W: rev	NW-SE: rev N-S: dex ENE-WSW: sin	N-S: nor	ENE-WSW: dex WMW-ESE: sin	E-W: nor
reactivated faults	older Crelaceous faults	WNW-ESE (T1): dex *N-S (T1): nor	WNW-ESE (T1): rev NW-SE (T2): dex / rev N-S (T1): dex *NE-SW (T1, T2): nor	all older directions with oblique- normal slip	WNW-ESE (T1): sln NW-SE (T2): sin N-S (T1, T2, T3): rev NE-SW (T2): dex ENE-WSW (T3): dex	all older directions with oblique- normal allp
fault pattern scheme		7				
•Be	Late Eocene - ?Oligocene	7Oligocene- Early/ Middle Miocene	Middle Miocane	Middle Miocene	Late Miocene (Pennonien)	Lele- to post- Miocene

Abbildung 11: H. PERESSON und K. DECKER (1997) erklärten das Störungsmuster in den Nördlichen Kalkalpen als Resultat von sechs verschieden orientierten Paläostresstensoren:

Vergleicht man die Strukturen der Nördlichen Kalkalpen mit denen des Semmeringgebietes, so erkennt man eine deutliche Analogie der Paläostressrichtungen. Die dextrale, NW-SE streichenden "strike-slip Deformation" (D3) ist somit der Tensorgruppe T2 zuzuordnen. Die sinistral E-W streichende Blattverschiebung der Talhofstörung und die NNE-SSW streichenden Blattverschiebungen des Extensionsduplexes (D4 und D5) gehören zur Tensorgruppe T3. Die konjugierten, NE-SW streichenden Abschiebungen (D7) sind Richtungen, die laut Dr. K. Decker (Geo-Zentrum Wien) auch im Wiener Becken gefunden werden. Die Entstehung dieser Bewegung ist noch nicht eindeutig geklärt. Die N-S streichenden Abschiebungen (D9) können Tensor 4 zugeordnet werden.

Die Hauptlineamente

Aus der Satellitenbildanalyse, dem digitalen Höhenmodell und der Geländearbeit konnten 4 Hauptstörungsrichtungen festgestellt werden:

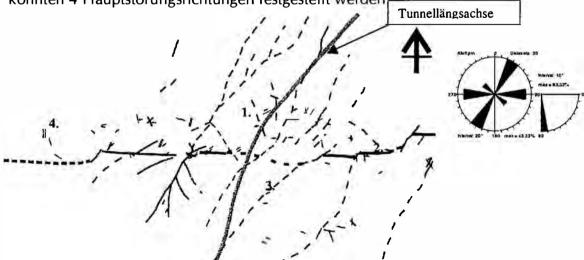


Abbildung 12: Man erkennt eine Dominanz der Blattverschiebungstektonik (strike-slip). Die Richtungsrose der Lineamente zeigt ein deutliches Maximum der NNE-SSW streichenden Strukturen. 1:

dextrale, NW-SE streichende strike-slips; 2:sinistral E-W streichende strike-slips (Talhofstörung); 3: NNE-SSW streichende strike-slips (Duplexgeometrie); 4: NW-SE und N-S streichende normal faults.

Ausbildung und Tiefenwirkung der Talhofstörung

Die Breite der Störungszone liegt zwischen 20-200m im Südhang des Talhofes. Die Streichrichtung ist durchwegs E-W orientiert. Die Striemung der auf den > 85° einfallenden Harnischflächen ist horizontal orientiert und zeigt keine Reaktivierung. Die Harnischflächen sind jedoch sehr stark verwittert, eine Reaktivierung durch jüngere Deformationsrichtungen ist durchaus möglich. Es ist ersichtlich, daß die Harnischflächen in der Störungszone vertikal einfallen. Dabei verteilen sich die Einfallsrichtungen gleichmäßig nach Süden. Die Fortsetzung in die Tiefe ist daher als steil bis senkrecht anzunehmen. Ein weiterer Hinweis dafür ist auch der über die ganze Länge der Störung anhaltende geradlinige Verlauf.



Abbildung 13: Der Verlauf der Talhofstörung gegen das Wiener Becken zeigt sich in den hohen Wandfluchten der Polleros und Weinzettelwand.

Diskussion

Deformation D1 wurde als Extension in den unteranisischen Gutensteiner bzw Thörler Kalken identifiziert. Die Streckung im Thörler Kalk wurde mit 20%, bezogen auf einen Meter Länge, bestimmt. Kalzitgefüllte Extensionsspalten konnten nur in diesen beiden Formationen gefunden werden. Dieses spröd-duktile Ereignis beschränkt sich also nur auf das Unteranis. Unklar ist aber das Vorkommen des mittelostalpinen Thörler Kalkes im Norden des Kaltenberges im Hangenden des unterostalpinen Dolomitmarmors.

Deformation D2 wurde als NW gerichtete Überschiebung der aufrechten Karbonatabfolge der Mürz-Tachenberg Faltendecke durch das mittelostalpine Altkristallin der Tratenkogel Deckscholle bestimmt. Dieses mittelostalpine Kristallin mit unterlagernden Quarzit liegt als inverse Schichtfolge vor. Für die inverse Lagerung sprechen rote Quarzitgerölle, die im Quarzitfenster zwischen Windmantel und Wanzenbühel gefunden worden sind und in der Literatur (H. P. CORNELIUS, 1952b) zur Basis des Quarzites gestellt werden. Das mittelostalpine Kristallin könnte somit einen Faltenkern darstellen, dessen Liegendschenkel der Quarzit bildet. Aus Bohrung 408, welche im Rahmen der Erkundung für den Semmeringbasistunnel abgeteuft wurde, konnte festgestellt werden, daß unter dem Kristallin sofort der Quarzit anschließt. Daraus resultiert natürlich die Frage, wo befindet sich der sonst zwischengeschaltete

Alpine Veruccano in Form des Tattermannschiefers? Tattermannschiefer kommen im Hangenden der unterostalpinen Karbonate vor. Stellen diese Tattermannschiefer, die in Quarzit (Haakogel) und Thörler Kalk übergehen, den abgescherten Hangendschenkel dieser mittelostalpinen Falte dar? Eine weitere Möglichkeit wäre, daß der Quarzit ein eigenständiges Element darstellt und mit dem Kristallin in keinerlei stratigraphischer Verbindung steht. Weitere Hinweise für einen NW gerichteten Überschub der Tratenkogel Deckscholle findet man im SE Einfallen des Quarzitvorkommens beim Windmantel und als ENE-WSW streichende b-Achsen in den unterostalpinen Bändermarmoren im Liegenden des Altkristallins.

Deformation D3 ist primär ein als reine dextrale Blattverschiebung angelegtes, NW-SE streichendes Störungssystem, welches in einer jüngeren Deformationsphase (D6) als dextrale Schrägaufschiebung reaktiviert wurde. Die kinematische Auswertung der Harnischflächen zeigt ein N-S kompressives Spannungsfeld, welches zur Anlage dieses Systems führte. Das dextrale System ist nur mehr reliktisch aufgeschlossen, es wurde von den jüngeren Störungen versetzt. Auch die Versatzweite ist unbekannt, sie ist aber, da es keine großen lithologischen Unterschiede im Bereich der Störungen gibt, nicht sehr groß.

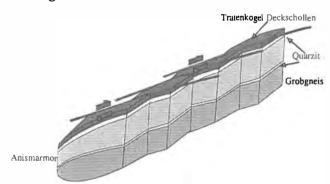


Abbildung 14 veranschaulicht Deformationsphase D3 der Mürz Tachenberg Decke. Der linke Block wird relativ zum rechten dextral nach vorne bewegt. Die Versatzweite ist unbekannt, dürfte aber, da es keine lithologischen Unterschiede im Kontaktbereich der Blöcke gibt, nicht sehr groß sein.

Zu diesem NW-SE streichende System findet man ein konjugiert ausgebildetes NE-SW streichendes System. An den Harnischeflächen sind subhorizontale Lineare, die von einem jüngeren, schrägabschiebenden Linear überprägt wurden (siehe D5). Da die Bewegung immer nur an einer Störungsrichtung stattfinden kann, wurden hier abwechselnd das dextrale NW-SE bzw. das sinistrale NE-SW streichende System als reine Scherung aktiviert. Das NW-SE streichende System ist markant ausgebildet im Gebiet NE von Spittal/Semmering. Hier findet man mächtige Störungsflächen, deren Bewegungslineation eine pure dextral strike-slip Deformation zeigen. Diese N-S Kompression führte zum Abscheren der Hangendschenkel der unterostalpinen Faltendecken und zum Zusammenstauchen dieser am Südrand der Kalkalpen. Diese Hangendschenkel mit aufrechter Schichtfolge liegen in Form von einzelnen Schuppen vor.

Deformation D4 stellt die Anlage der E-W sinistral streichenden Talhofstörung dar. Die Anlage dieser pure sinistral strike-slip Deformation gehört zu jenem NE-SE kompressiven Ereignis, zu dem auch die Bildung der SEMP und Mur-Mürztallinie zuzuschreiben ist. Das Alter ist daher mit Mittel Miozän anzusetzen. Die Talhofstörung trennt somit das sich im Süden befindende mittelostalpine Altkristallin von den nördlichen unterostalpinen Karbonateinheiten.

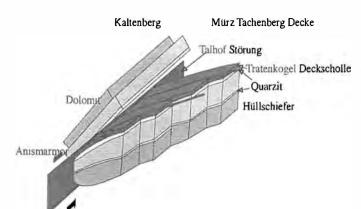


Abbildung 15. Die Talhofstörung bewegt den Karbonatblock des Kaltenberges sinistral zur südlichen Mürz Tachenberg Decke. Die Breite der Störungsfläche liegt zwischen 20 und 200m. Das dextrale Störungssystem wird versetzt. Der linksseitige Versatz wird mit 16-20 km angenommen.

Es gibt einige Gebiete im Kartierungsgebiet, in denen der genaue Verlauf ungewiß ist. So einen Bereich stellt der Kaltenberg dar. Hier wird die Störung am Kontakt mittelostalpines Altkristallin zu Semmeringquarzit vermutet. Grund für diese Annahme ist eine Karstdoline SE des Talhofes, in welcher der Überlauf eines Fischteichs verschwindet. Der Kaltenberg selbst wird als Fortsetzung der Adlitzschuppe mit aufrechter Schichtfolge gedeutet. Hinweise dafür gibt es in mehreren Aufschlüssen im SE des Berges. Folgt man dem Kammbereich des Kaltenberges Richtung Westen, so findet man Aufschlüsse, die auf Existenz einer E-W streichenden, steilstehende Falte mit fast vertikal stehender Faltenebene hinweisen. Die Annahme einer solchen Isoklinalfalte verkompliziert die Tektonik aber ungemein. Semmeringquarzit und Rauhwacke würden somit invers auf dem gegen S einfallenden Faltenschenkel liegen. Interpretiert man aber den Kaltenberg als Fortsetzung der östlichen Adlitzschuppe, so ergibt sich hier ein einfacheres tektonisches Gesamtbild. Man erkennt im digitalen Höhenmodell (Abb. 17). daß die fast senkrecht stehenden Störungsflächen der Adlitzschuppe durch ein jüngeres Störungssystem versetzt wurden. Es wird jeweils der westliche Block sinistral zum östlichen versetzt. Die Versatzweite dieses Systems beträgt vermutlich 16-20 km. Grund für diese Annahme ist das komplette Fehlen permomesozoischer Bedeckung der Hüllschiefer im SE von Gloggnitz. Diese Serien könnten gegen N gerichtet abgeschert worden sein und durch die sinistrale Blattverschiebungsdeformation nun in der heutigen Position vorliegen.

Deformation D5 zeigt durch seine sinistralen Schrägabschiebungen die Geometrie eines Extensionsduplexes. Bemerkenswert ist das kontinuierliche, in Abständen von oft weniger als 100m zueinander parallele Auftreten dieser Strukturen. Die nördliche Fortsetzung geht weit in die Kalkalpensüdfront hinein. Die Anlage erfolgte an dem durch D3 entstandenen NE-SW streichenden Störungssystem. Aus dem Satellitenbild erkennt man ein sigmoidales Einlenken dieser Struktur in die Mur-Mürz Linie.

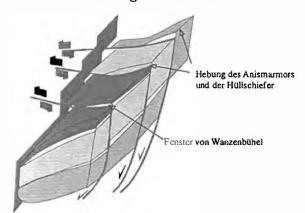


Abbildung 16: Durch die schrägabschiebende Bewegung an den listrischen Duplexflächen kommt es zur relativen Hebung der jeweils östlichen Bereiche des Gebietes (siehe Abb. 17). Die Talhofstörung bzw. das dextrale Störungssystem werden versetzt.

Die nördliche Fortsetzung erfolgt weit in die Kalkalpenfront hinein. Die Entstehung dieser Geometrie erfolgte vermutlich über synthetische Riedel der zwei sinistralen Großstörungen SEMP und der sich im Süden befindenden Mur-Mürztal Linie. Die Talhofstörung und die Duplexgeometrie resultieren somit aus einer NE-SW Kompression. Der Vergleich mit den Paläostressrichtungen der Nördlichen Kalkalpen zeigt eine Übereinstimmung mit dem Ereignis T3. Aufgrund der Analogien zum Wiener Becken, welches die gleiche Genese unter demselben Paläostresszustand aufweist, wird das gleiche Alter, nämlich mittleres Miozän, determiniert. Die abschiebende Bewegung an den sinistralen Störungen bewirkt im südlichen Gebiet ein Nebeneinanderliegen von Tratenkogel Deckscholle, der karnischen Rauhwacke altkristallinen unterostalpinen Hüllschiefer. Weiters kommt es zur Hebung des Quarzitzuges im Liegenden des mittelostalpinen Altkristallin, welcher nun fensterartig zwischen Wanzenbühel und Windmantel liegt (siehe Abb.16). Die Fortsetzung in die Tiefe erfolgt über die Geometrie einer negativen flower-structure. Das bedeutet, daß die listrische Ausbildung der Störungsflächen in die Tiefe flacher wird und schließlich in eine Hauptstörung einmündet. Der Gesamtversatz an diesen ± parallel zueinander streichenden Störungen beträgt 450-500m. Dieser Betrag konnte aus der Verstellung der Harnischwände östlich des Ebenen Waldes, aus dem Versatz der Thörler Kalke am Haakogel und der Dolomite nördlich der Stiegerinhütte errechnet werden.

Deformation D6 reaktiviert das NE streichende Störungssystem als dextrale Schrägaufschiebung (reverse sinistral oblique-slip). Die Überschneidung des subhorizontalen Linears durch das schrägaufschiebende zeigt, daß diese Deformation jünger als D3 ist. Weiters findet man Störungsflächen eines NW streichenden Systems, die sinistrale Schrägaufschiebungen zeigen. Beide Systeme sind konjugiert ausgebildet. Sie zeigen im P/T -Achsenplot eine N-S Kompression. Es wurde aber auf keiner der gemessenen Duplexstörungsflächen, welche ja sinistrale Schrägabschiebungen zeigen, ein jüngeres schrägaufschiebendes Linear aufgefunden. Es stellt sich hier nun die Frage, wieso es zu keiner Reaktivierung der Duplexgeometrie kam.

Deformation D7 sind SE bzw. NW gerichtete reine Schrägabschiebungen. Das Bewegungslinear ist subvertikal zum Streichen der Störungsfläche orientiert. Die Störungsflächen sind konjugiert ausgebildet. Diese Deformation resultiert aus der Umstellung von σ_1 horizontal zu σ_1 vertikal und führt somit zu einer SE bzw. NW Extension.

Deformation D8 sind NW-SE streichende, sinistrale Schrägabschiebungen. Die Harnischflächen dieser Deformationsphase zeigen subvertikale Bewegungslineare, die von jüngeren, sinistral schrägabschiebenden überprägt werden. Die Abschiebungen resultieren somit aus einer NE-SW Streckung. Die Reaktivierung als sinistrale Schrägabschiebung kann einer beliebigen Deformationsphase angehören. Betrachtet man Abb. 11, so erkennt man, daß ab T4 alle älteren Richtungen als oblique-slip Deformation reaktiviert werden.

Deformation D9 bildet N-S streichende konjugierte Abschiebungen. Vergleicht man die errechneten Paläospannungstensoren mit denen der nördlichen Kalkalpen (Abb. 11-4), so ist dieses Ereignis einer mittelmiozänen E-W Extension zuzuschreiben. Diese laterale Extrusion wird auf eine Kombination von N-S Verkürzung und gravitativem Kollaps der

verdickten Kruste zurückgeführt (RATSCHBACHER et al., 1991b). Verantwortlich dafür ist die mittelmiozäne plattentektonische Entwicklung im pannonischen bzw. im Karpartenraum.

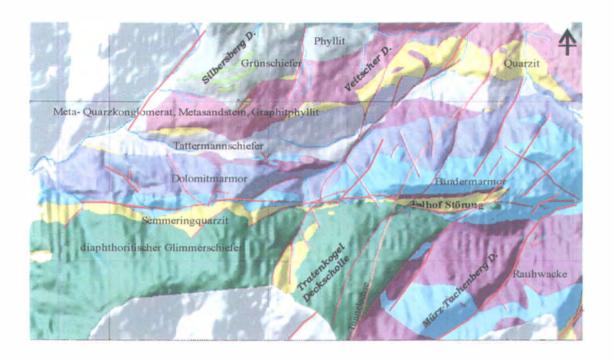


Abbildung 17: Das digitale Höhenmodell zeigt deutlich den E-W streichenden Verlauf der Talhofstörung (D4) und die NE-SW streichende Geometrie des Duplexes (D5). Die Talhofstörung trennt den nördlichen Karbonatblock (blau) vom südlichen Kristallin der Tratenkogel Deckscholle (grün), die am Unterostalpin aufliegt. DEM: Amt d. LR Steiermark; Kartierung: Gmeindl Markus.

Literatur

- ANGELIER, J.: Fault slip analyses and palaeostress reconstruction.- in: PAUL HANCOCK: Continental Deformation, Pergamon press, 1994.
- ANGELIER, J. & MECHLER, P: Sur une methode graphique de recherche des contraintes principales egalement utilisable en tectonique et enseismologie: la methode des diedres droits.- Bull. Soc. Geol. France, 7, 19: 1309-1318; Paris, 1969.
- BARNIK, H.: Die Kapellener Schiefer im unterostalpinen Mesozoikum.- Mitt. Geol. Ges. Wien, 59, Heft 2, S. 121-138, Wien 1966.
- CORNELIUS, H. P.: Die Geologie des Mürztalgebietes.- Jb. geol. B.-A., Sdb. 4, 94 S., Wien 1952a.
- CORNELIUS, H. P.: Gesteine und Tektonik im Ostabschnitt der nordalpinen Grauwackenzone, vom Alpen-Ostrand bis zum Aflenzer Becken.- Mitt. Geol. Ges. Wien, 42-43, Wien 1952b.
- MOHR, H.: Versuch einer tektonischen Auflösung des Nordsporns der Zentralalpen.- Denkschr. Akad. Wiss. Wien, math.-natw. Kl., 88, 1 Kt., Wien 1912.
- NEUBAUER, F., HANDLER, R., HERMANN, S., PAULUS, G.: Revised Lithostratigraphy and Structure of the Eastern Graywacke Zone.- Mitt. Österr. Geol. Ges., 86, S.61-74, Wien 1994.

- PERESSON, H., DECKER, K.: The tertiary dynamics of the northern Eastern Alps: changing palaeostresses in a collisional plate boundary.- Tectonophysics 272 (1997), 125 157.
- PETIT, J. P.: Criteria for the sence of movement on fault surface in brittle rocks.- in: PAUL HANCOCK: Continental Deformation, Pergamon press, 1994.
- RATSCHBACHER, L., FRISCH, W., LINZER, H., MERLE, O.: Lateral extrusion in the Eastern Alps, part II. Structural analyses.- Tectonics, 10(2): 257-271, 1991b.
- RIEDMÜLLER, G.: Genese und Charakteristik der Rauhwacken im Pittental (Niederösterreich).- Geol. Rundschau, 65, 290-332, Stuttgart, 1976.
- TOULA, F.: Petrefaktenkunde im Wechsel-Semmeringgebiet.- Verh. geol. R.-A., 1877, 195-197, Wien 1877a.
- TOLLMANN, A.: Geologie von Österreich. Bd. 1, Wien, 1977.
- TURNER, F. J.: Nature and dynamic interpretation of deformation lamellae in calcite of three marbles.-Am. J. Sci., 251, 276-298, San Francisco, 1953.
- TWISS, R. & MOORES, E.: Structural Geology, 1992.
- WOODCOCK, N., FISCHER, M.: Strike- slip duplexes.- Journal of structure geologie, Vol.8, No.7, pp.725-735, Great Britain, 1986.

Autor:

Vertrags-Ass. Mag. Markus GMEINDL Institut für Angewandte Geologie A-1190 Wien, Peter Jordan-Straße 70 gmeindl@edv1.boku.ac.at

Wasserhaushalt und mineralogische Charakteristik der Böden im Einzugsgebiet der Union- und Thomasquelle am Dobratsch in Kärnten

(Zusammenfassung der Diplomarbeit)

Sabine Maria GREIFENEDER

Einleitung

Das Karstmassiv des Dobratsch liegt westlich der Stadt Villach und trennt Gail und Drau kurz vor ihrem Zusammenfluß. Die Stadt Villach und einige Streusiedlungen in der Umgebung nutzen die am N- und NO-Fuß des Dobratsch entspringenden Quellen für ihre Wasserversorgung. Die Trinkwasserbereitstellung erfolgt durch das Wasserwerk Villach, wobei zur Zeit über 80 % der Versorgung von Villach das in der Unionquelle zutage tretende Karstwasser des Dobratsch stellt.

In den vergangenen Jahren traten bei der Trinkwasserversorgung immer wieder Probleme auf: Zur Zeit der Schneeschmelze etwa wurden Trübungen durch aus den Karsthohlräumen ausgespülte Feinsedimente und zu verschiedenen Zeiten immer wieder Verkeimung fäkalen Ursprungs durch die Beweidung der Almen im Quelleneinzugsgebiet festgestellt. Da das Wasser auf seinem Weg durch die Karsthohlräume vor seinem Austritt als Quelle keinerlei Filterung mehr erfährt und die Verweildauer im Berg nur wenige Tage bis Wochen beträgt, besteht das Risiko der Verunreinigung durch pathogene Keime und Schadstoffe.

Als typisches Karstmassiv zeigt der Dobratsch einen deutlichen Gegensatz zwischen der trockenen Hochfläche ohne jedes Gewässer und den großen Quellaustritten über den Werfener Schichten an seinem Fuß. Die unterirdische Entwässerung ist durch das Einfallen dieser wasserstauenden Gesteine nach Norden, Nordosten und Osten gerichtet. Daher treten am Ostfuß des Buchberges die bedeutendsten Quellen zutage: Die Nötschbach-, die Union- und die Thomasquelle. Diese Quellen entwässern zusammen einen Großteil der Nordostflanke des Dobratsch bis hinauf zur Roßtratte. Die am meisten kontaminationsgefährdeten Flächen liegen in den Bereichen des verkarsteten Wettersteinkalks auf der Roßtratte und in der verstärkt wasserwegigen Störungslinie des Waagtals.

Da die dem Karstmassiv auflagernden Böden die einzigen Filter für die in den Berg eintretenden Niederschlagswässser darstellen, beschäftigen sich die vorliegenden Untersuchungen mit dem Wasserhaushalt, den Adsorptions- und Filtereigenschaften der Böden im Einzugsgebiet der Union- und Thomasquelle.

Das Spektrum der Böden im Untersuchungsgebiet zeigt die vollständige Bodencatena auf Karbonatgestein: In geschützten Muldenlagen reliktische Lehme (Braunlehme und rubifizierte Braunlehme, 38% der Einzugsgebietsfläche) und durch deren Umlagerung entstandene Pseudorendzinen (29%), Pararendzinen (5%), in exponierten Kuppenlagen Eurendzinen (28%) und durch menschlichen Eingriff bedingte Planierohböden (1%).

Methoden

Im Labor wurde die Korngrößenverteilung durch Siebanalyse, der Gehalt an organischer Substanz durch Veraschung im Muffelofen, die Feststoffdichte pyknometrisch und die Lagerungsdichte durch Ofentrocknung einer ungestörten Zylinderprobe festgestellt. Um die bodenphysikalischen Parameter am möglichst ungestörten Boden ermitteln zu können, wurden im Gelände Lysimeter und Saugkerzen eingebaut. Daneben wurde die gesättigte Wasserleitfähigkeit der Böden im Gelände mittels Guelph-Permeameter gemessen, um Vergleichsmöglichkeiten zu den im Labor an Zylinderproben gewonnen Werten zu erhalten.

Die Saugspannungs-Wassergehaltsbeziehungen der einzelnen Bodentypen in Form von pF-Kurven wurden für die niedrigeren Druckstufen mittels Unterdruck-Kapillarimeter, für die höheren durch Entwässerung von Kleinzylinderproben bei definierten Überdrücken in einer Druckplattenapparatur ermittelt. Daraus wurde die Porenausstattung (Volumsanteile der verschiedenen Porengrößen) rechnerisch abgeleitet.

Für die Ermittlung der chemischen und mineralogischen Eigenschaften der Böden wurden mittels Hohlbohrer Bohrkerne entnommen. An den entnommenen Proben wurden pH-Wert, Karbonatgehalt nach Scheibler, Kationenaustauschkapazität und der Gehalt an Eisenoxiden ermittelt. Gesamt- und Tonminerale wurden röntgendiffraktometrisch bestimmt, die gesamte austauschaktive Oberfläche mittels Methylenblauadsorption abgeschätzt.

Ergebnisse

Die effektivsten Wasserspeicher sind die reliktischen Lehmböden. Sie sind charakterisiert durch einen geringen Grobporenanteil und einen hohen Mittel- und Feinporenanteil. Durch die intensive Beweidung entsteht allerdings in etwa 15 cm Tiefe eine Weidestausohle, die einen "Flaschenhalseffekt" verursacht: Auch ein Anstieg der Durchlässigkeit im Unterboden bewirkt keine höhere Infiltrationsleistung. Vor allem die Lehmböden der Roßtratte sind daher oft von Niederschlagswasser eingestaut zu beobachten.

Pararendzinen und Planierohböden weisen die höchste Infiltrationsleistung auf. Mit ihrer Porenausstattung verhält es sich genau umgekehrt: Einem geringen Feinporenanteil steht ein hoher Grobporenanteil gegenüber. Flächenmäßig von Bedeutung ist die ebenfalls hohe Infiltration der seichtgründigen Rendzinen. Insgesamt ist die Filterleistung der Bodendecken im Untersuchungsgebiet als eher gering zu betrachten, da es aufgrund der verdichteten Oberböden zu Oberflächenabfluß kommt, der an Stellen mit fehlender Bodendecke oder anstehendem klüftigem Gestein schnell und ungefiltert versickert. Dies ist der Grund für die häufig wiederkehrenden Probleme der hohen Trübstofffracht und der Verunreinigung des Quellwassers mit coliformen Bakterien.

Aus den Ergebnissen der Berechnung der Saugspannung-Wassergehalt-Beziehung (pF-Kurven) wurden die absoluten Volumina der verschiedenen Porengrößenklassen im

gesamten Untersuchungsgebiet berechnet. Es ergaben sich ein Feinporenanteil von 36%, ein Mittelporenanteil von 38%, der Anteil der engen Grobporen im Untersuchungsgebiet belief sich auf 9% und derjenige der weiten Grobporen auf 17%. Bei völlig entleertem, pflanzenverfügbarem Speicherraum sind im Durchschnitt des Einzugsgebietes 11 mm Niederschlag nötig, um wieder Feldkapazität zu erreichen. Darüber hinaus eintreffender Niederschlag wird direkt in die Karsthohlräume abgeleitet.

Mittels der Versuchsanordnungen im Gelände konnte eine Bilanz für die die Böden passierenden Wassermengen ermittelt werden. Der mittlere Gebietsniederschlag, gemessen in der meteorologischen Station Villacher Alpe (Dobratschgipfel), beträgt 1181 mm. Demgegenüber steht eine mittlere potentielle Verdunstung von 566 mm/Jahr (nach dem Modell von Penman-Monteith). Die mittlere jährliche Schüttung der beiden Quellen, an der Unionquelle gemessen, für die Thomasquelle aufgrund der starken Korrelation im Schüttungsverhalten berechnet, beträgt 1051 mm bezogen auf das Einzugsgebiet. Dies ergibt als Differenz zwischen Niederschlag und Schüttung eine aktuelle Verdunstung von 130 mm. Unter der Annahme, daß das festgesetzte Untersuchungsgebiet dem Einzugsgebiet entspricht, ergäbe das eine Umsetzung von potentieller in aktuelle Verdunstung von nur 23 %.

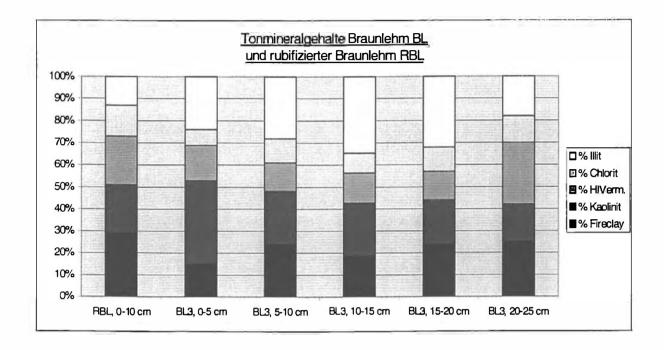
Da jedoch die Lysimeterversuche im Gelände einen Wert für die aktuelle Verdunstung ergeben, der den in der meteorologischen Station Villacher Alpe gemessenen Wert für die potentielle Verdunstung in seiner Dimension bestätigt, ist anzunehmen, daß entweder das Einzugsgebiet deutlich größer ist als bisher angenommen wurde oder die Quellen zusätzlich durch größere unterirdisch zufließende Wassermengen gespeist werden.

Der zweite Schwerpunkt der Arbeit liegt auf der mineralogischen und tonmineralogischen Charakterisierung der reliktischen Lehme im Untersuchungsgebiet. Die Korngrößenverteilungen der Braunlehme und rubifizierten Braunlehme zeigen ein deutliches Maximum im feinschluffigen Bereich, die Sandfraktion ist kaum vorhanden. Dies deutet ebenso wie der Schwermineralbestand darauf hin, daß das Bodenausgangsmaterial nicht Lösungsrückstände des hochreinen Wettersteinkalkes darstellt, sondern äolisch eingetragene Stäube.

Die Gehalte an gut kristallisierten Eisenoxiden lassen auf ein tertiäres Alter der Böden schließen. Ihre Aktivitätsgrade liegen zwischen 0,3 und 0,6. Diese Werte können als typisch betrachtet werden für Reliktböden, die unter den Bedingungen des humidgemäßigten Klimas rezent überprägt wurden.

Der Tonmineralbestand zeigt hohe Gehalte an nicht quellbaren Tonmineralen sowie Umwandlungsformen von Vermikulit zu Hydroxy Interlayer-Vermiculite. Die semi-quantitative Bestimmung der Tonmineralgehalte zeigt für alle Braunlehme hohe Gehalte an Kaolinit, davon etwa zur Hälfte schlecht kristallisierte (Fireclay), und Illiten. Daneben finden sich geringere Anteile von Chloriten, HIV-Tonmineralen, Gibbsit, Hämatit und Spuren von Böhmit. Aufweitbare Tonminerale wie Smektite und Vermikulite fehlen völlig, dieser Umstand weist auf hohe Verwitterungsintensitäten, wie sie in tropischen Klimaten herrschen, hin, denen das Reliktbodenmaterial ausgesetzt war.





Da das sedimentierte Material mit seinen Gehalten an gut kristallisierten Eisen- und Aluminiumoxiden deutliche Anzeichen von Rubifizierung und Lateritisierung aufweist, muß es bereits bodenbildende Prozesse durchgemacht haben, bevor es im Zuge der alpidischen Auffaltung in die alpine Stufe gehoben wurde. Es kann somit ebenso wie die Reliktböden der Rax als Indikator für eine tertiäre Landoberfläche betrachtet werden.

Die reliktischen Bodenbildungen unterlagen in weiterer Folge den eiszeitlichen Klimabedingungen, nur in den höheren Lagen blieben sie von der erodierenden Wirkung der Gletscher verschont. Das quartäre Klima der alpinen Höhenstufe bewirkte die rezenten Veränderungen der Böden und der Humusformen, es entstanden die humid überprägten Braunlehme.

Autorin:

Dipl.Ing. Sabine Maria GREIFENEDER A-1150 Wien, Toldgasse 3/15 h9340447 @ edv1.boku.ac.at

Hydrogeologische Untersuchungen im Einzugsgebiet der Maltsch und Oberen Feldaist im nordöstlichen Mühlviertel

(Zusammenfassung der Diplomarbeit)

Christian HASSLER

Grundlage der Untersuchungen ist eine von der Oberösterreichischen Landesregierung in Auftrag gegebene Projektarbeit. Dabei wurde im Zeitraum von Juli 1999 bis Juli 2000 ein Untersuchungsgebiet von 122 km² im nordöstlichen Mühlviertel hydrogeologisch bearbeitet. Das Gebiet erstreckt sich von der Stadt Freistadt bis zur Staatsgrenze zu Tschechien und reicht von der Gemeinde Rainbach im Westen bis zur Gemeinde Sandl im Osten.

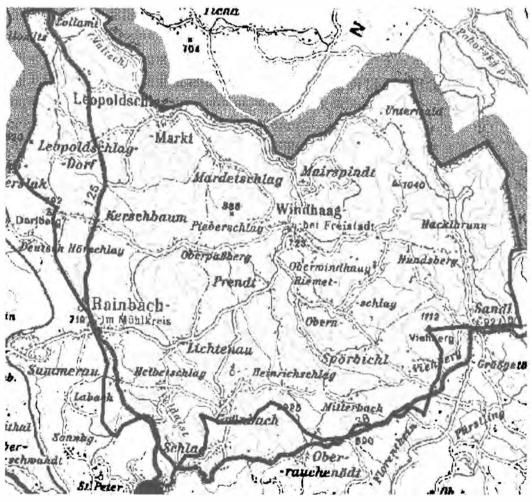


Abb. 1: Lage des Untersuchungsgebietes im NE' Oberösterreich. M: 1:250 000. Die Linie zeigt die Grenzen des UG. Der Punkt (unten) markiert Freistadt.

Die geologischen Verhältnisse im Untersuchungsgebiet werden von Granitoiden beherrscht. Nur lokal finden sich Flinzmulden beziehungsweise quartäre oder rezente Sedimentbecken. Der Flinz kennzeichnet ein tertiäres Verwitterungssediment der Granitoide von lehmig-sandiger Zusammensetzung, welches unter subtropischen bis tropischen Klimaverhältnissen durch vor allem chemische Verwitterung entstanden ist. Bei den dominierenden Granitoiden handelt es sich um den Weinsberger Granit und den Mauthausner Granit. Ferner treten Schiefergneise, Granodiorite (Freistädter) und diverse Granite mit nur lokaler Verbreitung auf. Aus diesem Grunde wurde der Überbegriff Feinkorngranite eingeführt, unter welchem der Mauthausner Granit sowie einige weitere feinkörnige Granitoide (Freistädter Granodiorite, Grabengranit, u.a.) ähnlichen Typus zusammengefaßt werden.

Ausgehend von einer hydrogeologisch mehr oder weniger bedeutenden Kluftwegigkeit der Gesteine, liefert diese Arbeit Erklärungen und Hinweise für die hydrogeologischen Unterschiede zwischen den einzelnen Granitoiden. Die lokal wirksamen Porenaquifere können aufgrund ihrer Erstreckung allgemein als nur von geringer Bedeutung angesehen werden. Der wesentliche Unterschied der Granitoide zeigt sich in einer intensiveren Klüftung des gröberkörnigen Weinsberger Granits. Im Gegensatz dazu sind die hydrogeologischen Verhältnisse des Feinkorngranits zweigeteilt. Das im Westen des Untersuchungsgebietes gelegene Gebiet ist nahezu flächendeckend drainagiert und dadurch einer intensiven landwirtschaftlichen Nutzung zugeführt worden. Somit wird der Großteil anthropogen unbeeinflußter Quellwässer bereits für eine Trinkwasserversorgung genutzt. Anders verhält es sich im Osten, dort bedecken ausgedehnte Waldgebiete den Feinkorngranit. Daher finden sich in diesen Bereichen zahlreiche frei austretende Wasserspenden.

In der ersten Projektphase wurde zwischen Juli und September 1999 eine hydrogeologische Basisaufnahme mit Wiederholungsmessungen an Wasserspenden und ausgewählten Vorfluterpunkten durchgeführt. Dabei wurden sämtliche Wasserspenden hinsichtlich elektrischer Leitfähigkeit, pH-Wert, Sauerstoffgehalt, Schüttung und Temperatur untersucht.

Dabei zeigen sich hydrogeologische Unterschiede der einzelnen Granitoide. Das führt dazu, daß die beprobten Wasserspenden nach den untersuchten Parametern klassifiziert werden können.

Dies ergibt ein hydrogeologisches Modell, in dem die Wasserspenden in 4 Haupttypen eingeteilt und graphisch dargestellt werden:

• Typ 1, anthropogen verunreinigte Wasserspenden

Wässer dieses Typs zeichnen sich durch erhöhte Leitfähigkeits- und pH-Werte aus. Bedingt ist dies meist durch eine landwirtschaftliche Nutzung der umliegenden Flächen (erhöhte Nitratwerte) bzw. durch die winterliche Salzstreuung (erhöhte Chloridwerte) im Nahbereich von Bundesstraßen.

Typ 2, Wasserspenden aus dem Gebiet des Feinkorngranits

Diese Wasserspenden sind meist durch eine geringe Mineralisation gekennzeichnet. Der dadurch verursachte Wert einer niedrigen elektrischen Leitfähigkeit wird von einem saurem pH-Wert begleitet, welcher im allgemeinen unter jenem von Wasserspenden aus dem Weinsberger Granit liegt. Beispielgebend sind elektrische Leitfähigkeiten von um die 50μ S/cm und ein pH-Wert zwischen 5,0 und 6,0. Dies deutet bereits auf die örtlich im Feinkorngranit-Gebiet auftretenden Moore hin.

Typ 3, Wasserspenden aus dem Gebiet des Weinsberger Granits

Im Gegensatz zu den vorhin behandelten Wässern des Typs 2, zeigen die Wasserspenden des Weinsberger Granits höhere Mineralisation, um 100 μ S/cm, und höhere pH-Werte an. Letztere liegen im sauren Bereich, vorwiegen zwischen 6,30 und 6,90.

• Typ 4, anthropogen unbeeinflußte Wasserspenden aus den restlichen Granitoiden

Aufgrund nur lokaler Verbreitung gewisser Granitoide und dem Auftreten von hydrogeologischen Besonderheiten im Freistädter Granodiorit mußte ein weiterer Typ generiert werden, welcher ein relativ weites Spektrum hinsichtlich der Meßparameter aufweist.

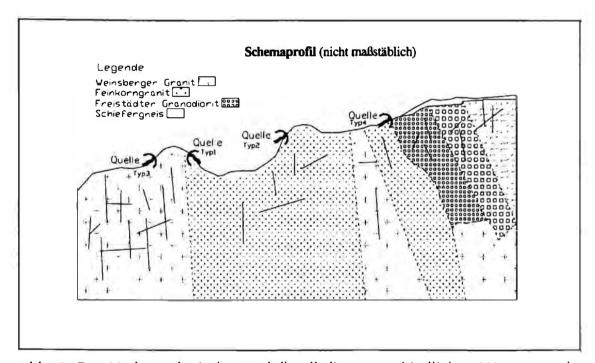


Abb. 2: Das Hydrogeologische Modell soll die unterschiedlichen Wasserspenden hinsichtlich ihrer Lage und ihres Einzugsgebietes veranschaulichen.

Die weiteren Untersuchungen im hydrologischen Jahr zeigen eine deutlich konstantere und quantitativ größere Schüttung der Wasserspenden aus dem Weinsberger Granit gegenüber jenen aus dem Feinkorngranit. Die Kluftwegigkeit im Weinsberger Granit weist daher eine größere Erstreckung auf. Das außergewöhnliche hydrologische Verhalten des Feinkorngranit-Gebietes rund um den Viehberg mit mehreren Quellen von beträchtlicher Schüttung, ergibt sich aus einer größeren Niederschlagsmenge und hat keine geogenen Ursachen.

Hydrochemische Untersuchungen an ausgewählten Wasserspenden machen eine genauere Unterscheidung der anthropogen beeinflußten Wässer, in Chlorid- Natrium-dominierte und Nitrat-führende, möglich. Erstere sind durch elektrische Leitfähigkeitswerte von mehreren hundert μ S/cm gekennzeichnet. Im Gegensatz dazu weisen die Nitratwässer lediglich Werte um 100-300 μ S/cm auf.

Die hydrochemischen Untersuchungen lassen einerseits eine genauere Unterscheidung der Granitoide zu, geben allerdings keine eindeutigen Hinweise auf eine längere Verweilzeit der beprobten Wässer. Hier könnten Isotopenuntersuchungen einen besseren Aufschluß ergeben.

Die Untersuchung der Vorfluter im Untersuchungsgebiet spiegelt im wesentlichen die Niederschlagssituation mit einem ausgeprägten Ost-West-Gefälle wider. Die Qualität der Wässer ist, mit Ausnahme der Feldaist im landwirtschaftlich intensiv genutzten Bereich im Westen, als gut zu bezeichnen. Hervorgerufen wird dies durch die großen Mengen an Oberflächenabfluß in den Waldgebieten im Osten.

Somit kann als Folge dieser Ergebnisse eine Bohrkampagne erstellt werden. Dabei sind die Bohrungen nach hydrogeologischen Gesichtspunkten abzuteufen. Als Hoffnungsgebiete gelten sowohl die Bereiche um den Viehberg als auch die Gebiete der breiten Talsenke der Feldaist um Paßberg.

Autor:

Mag. Christian HASSLER
A-1080 Wien, Langegasse 48/31
a9506506 @ unet.univie.ac.at

ILF bearbeitet interdisziplinäre Projekte als Gesamtplaner in den Bereichen Verkehr - Energie - Wasser.

SCHWERPUNKT GEOLOGIE & GEOINFORMATIK

Aktuelle Referenzprojekte

BAUGEOLOGIE - GEOTECHNIK

NBS Nürnberg-Ingolstadt

Eisenbahnachse Brenner - Ausbau Unterinntal

Marka-Tunnel / Jordanien

Verbindung Stuben-Lech - Erzbergtunnel

Pipeline Burgas/Bulgarien - Alexandropolis/Griechenland

A9 Phyrnautobahn - Selzthaltunnel

SS12 Bozen/Leifers-Branzoll / Südtirol

Braniskotunnel / Slowakei

S16 Arlberg-Schnellstraße - Strenger Tunnel

Südumfahrung Landeck - Landecker Tunnel

HYDROGEOLOGIE - WASSERWIRTSCHAFT
Hochwasserschutz Bodensee-Rheintal
Speicherprojekte Burkina Faso
Wasserwirtschaftliche Beweissicherung - Ausbau Unterinntal
Wasserversorgung Innsbruck - Mühlauer Quellen
Hydrogeologisch - wasserwirtschaftliche Untersuchungen Innsbruck, Ischgl, Achensee

GEORISIKOMANAGEMENT - ALPINTECHNOLOGIE Moserstein-Schwaz - Felsabtrag Eiblschrofen - Schutzmaßnahmen, Monitoring Galtür Lawinenschutzdamm - Statik Bahnhof St. Anton Schutzmaßnahmen S16 Arlberg-Schnellstraße - Murverbauung Pettneu A13 Brenner-Autobahn - Brennersee Schutzdamm Wartschenbach / Lienz Grundlagenerhebung







BERATENDE
INGENIEURE
CONSULTING
ENGINEERS
INGENIEURS
CONSEILS



www.ilf.com

A-6020 Innsbruck Framsweg 16 Telefon 0043/512/2412-0 Fax 0043/512/2412-200 E-Mail info@ibk.ilf.com

A-6850 Dornbirn Badgasse 18 Telefon 0043/5572/21519-0 Fax 0043/5572/21519-12 E-Mail info@dornbirn:ilf.com

> A-4020 Linz Lustenauerstr. 9 Telefon 0043/732/784663 Fax 0043/73Z/784924 E-Mail info@linz.ilf.com

A-1030 Wien Hainburger Str. 31/2 Telefon 0043/1/7139232-0 Fax 0043/1/7139232-444

Baugeologie - Geotechnik - Hydro(geo)logie - Umwelt

Machbarkeitsstudien, Entwurf, Genehmigungsplanung, Ausschreibung, Ausführungsplanung, Überwachung, Projektmanagement

