Umfahrungstunnel Twann (A5) : Druckversuche in einem aktiven Karst

Autor(en): **Bollinger, Daniel / Kellerhals, Peter**

Objekttyp: **Article**

Zeitschrift: **Bulletin für angewandte Geologie**

Band (Jahr): **12 (2007)**

Heft 2

PDF erstellt am: **27.05.2024**

Persistenter Link: https://doi.org/10.5169/seals-226379

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.
Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.
Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Ein Dienst der *ETH-Bibliothek*
ETH Zürich, Rämistrasse 101, 8092 Zürich, Schweiz, www.library.ethz.ch

http://www.e-periodica.ch

Bull. angew. Geol. Vol. 12/2 Dezember 2007 S. 49-61

Umfahrungstunnel Twann (A5): Druckversuche in einem aktiven Karst

Daniel Bollinger[1], Peter Kellerhals[2]

Stichworte: Faltenjura, aktiver Karst, Karsthöhlen, hydraulische Druckversuche, Untertagebau

Zusammenfassung

Beim Umfahrungstunnel Twann der A5 handelt es sich um eine Verlängerung des bestehenden Ligerztunnels in östlicher Richtung. Wegen karsthydrogeologischer und geotechnischer Fragen wurde in den Jahren 1988-1989 ein 517 m langer Sondierstollen gebaut. Dieser verläuft weitgehend in den teils stark verkarsteten Schichten der Twannbach-Formation (Malm). Er befindet sich mehrheitlich im Schwankungsbereich des Karstwasserspiegels. Durch den Sondierstollen wurde ein künstlicher Vorfluter geschaffen, der eine starke Erosion bestehender Karstwasserfliesswege bewirkte. Während der ersten Jahre nahmen die erosionsbedingten Wasserzuflüsse in den Stollen deutlich zu, flachten aber anschliessend ab. Es kann davon ausgegangen werden, dass sich diesbezüglich ein neuer Gleichgewichtszustand einstellt. Im Stollen wurden mehrere Druckversuche durch Einstau des zufliessenden Karstwassers durchgeführt. Dabei wurde die Entwicklung des Karstwasserspiegels an verschiedenen Beobachtungsstellen (Quellen, Höhlen, Piezometer) verfolgt. Durch die Druckversuche wurden alte, verlehmte Karstfliesswege aktiviert. Ebenso entstanden nicht prognostizierbare Umläufigkeiten, welche zu Wasseraustritten an der Erdoberfläche führten.

Résumé

Le tunnel de contournement de Twann (A5) constitue le prolongement direction est du tunnel existant de Gléresse. Afin d'éclaircir des questions relatives à l'hydrogéologie karstique et à la géotechnique, une galerie de reconnaissance d'une longueur de 517 m avait été construite entre 1988 et 1989. Celle-ci traverse pour une majeure partie les couches fortement karstifiées de la formation de Twannbach (Malm). La galerie se trouve principalement dans la marge de fluctuation du niveau phréatique. Avec cette galerie, un émissaire artificiel fût crée qui provoqua une érosion importante au niveau des passages d'eau karstiques existants. Les premières années, les afflux d'eau dans la galerie résultant de l'érosion ont fortement augmenté pour finalement se stabiliser. L'on suppose à ce sujet qu'un nouvel équilibre s'est installé. Plusieurs essais de pression ont été réalisés par la rétention des afflux d'eau karstique. Lors de ces essais, l'évolution du niveau phréatique a été suivie au niveau de divers points d'observation (sources, grottes, piézomètres). Ces essais de pression ont activé d'anciens passages d'eau colmatés par des limons. Ces essais ont également provoqué des résurgences d'eau en surface non pronostiquées.

[1] Ausserberg, 3035 Frieswil, ehemals Kellerhals + Haefeli AG, Kapellenstrasse 22, 3011 Bern

[2] Brügi 18, 3035 Frieswil, ehemals Kellerhals + Haefeli AG, Kapellenstrasse 22, 3011 Bern

1. Einleitung

Die 1969-1973 erstellte linksufrige Bielerseestrasse (A5) verläuft in einem kulturlandschaftlich äusserst sensiblen Umfeld. Die Rebberge und die alten Winzerdörfer verleihen dem Jurasüdfuss am Bielersee einen besonderen Charme. Wegen der knappen Platzverhältnisse wird das zum Inventar der schützenswerten Ortsbilder der Schweiz gehörende Winzerdorf Ligerz seit dem Jahr 1989 mittels eines rund 2.5 km langen Tunnels umfahren. Nebst der Umfahrung von Ligerz stand stets auch die Forderung nach einer Umfahrung des Dorfes Twann im Raum. Eine bergseitige Umfahrung von Twann sah sich jedoch mit erheblichen karsthydrogeologischen Problemen konfrontiert, welche seitens der Bauherrschaft (Tiefbauamt des Kantons Bern) zu folgenden Fragestellungen führte:

1. Ist der Twanntunnel ohne Beeinträchtigung des Twannbach-Holiloch-Karstsystems machbar?
2. Ist eine Beeinträchtigung der öffentlich genutzten Brunnmühle-Karstquellen zu befürchten? Wenn ja: Wie könnte dieser begegnet werden?
3. Ist der Twanntunnel mit verantwortbaren technischen Risiken (unter anderem Unterquerung der tief in den Fels eingeschnittenen Twannbachschlucht) und vertretbaren Kosten realisierbar?

Die Beantwortung dieser Fragen sollte mit einem Sondierstollen erfolgen, welcher 1988 und 1989 durch das Hauptkarstsystem und unter dem Twannbach hindurch im Sprengvortrieb erstellt wurde.

2. Geologische Übersicht

Der Ligerz- und der projektierte Twanntunnel befinden sich im Südschenkel der NE-SW verlaufenden Seekette. Diese ist als südöstlichste Antiklinale des Neuenburger-Berner-

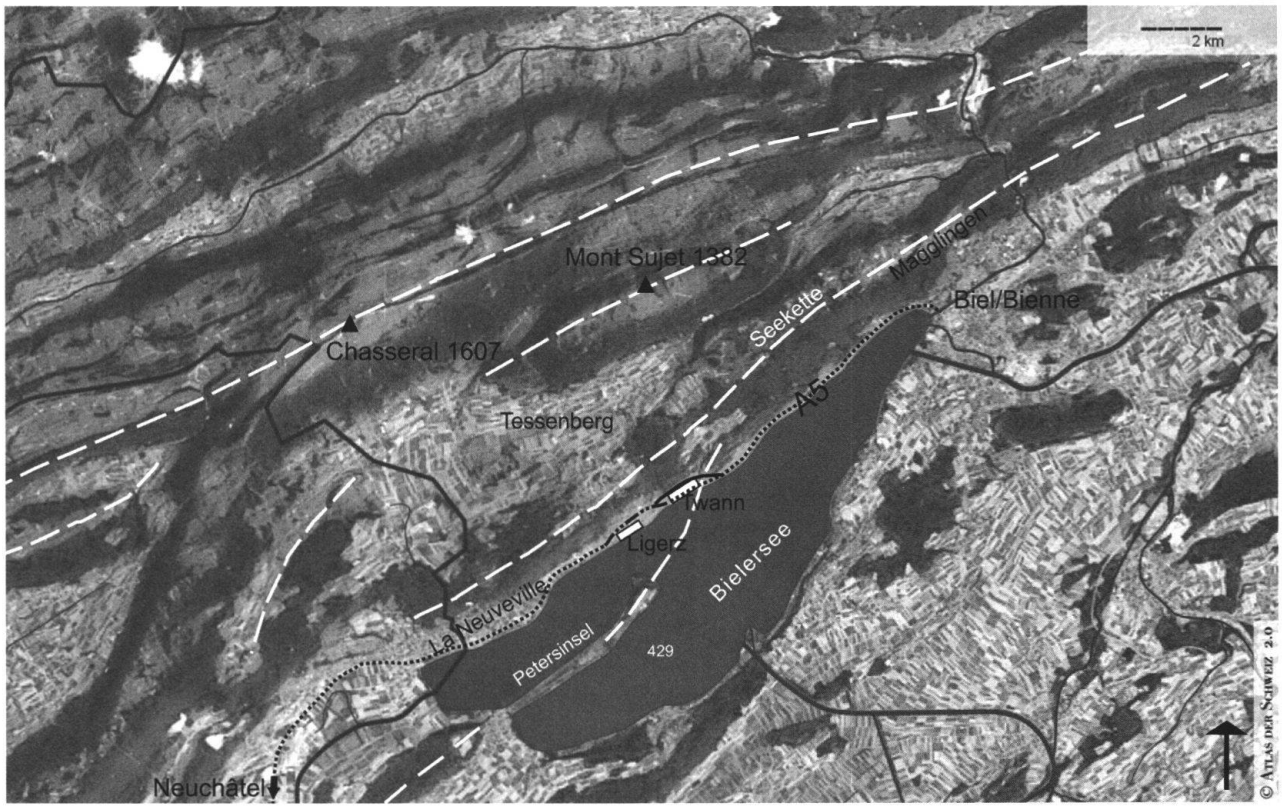


Fig. 1: Allgemeine Übersicht (Satellitenbild reproduziert mit Bewilligung von swisstopo BA081039). Gepunktete Linie: Nationalstrasse A5 (durchschnittlicher täglicher Verkehr im Jahre 2005: 13'700 Fahrzeuge; Tendenz steigend, vor allem nach der zukünftigen Inbetriebnahme der Umfahrung Biel). Strichpunktiert: Ligerztunnel; durchgezogen: Twanntunnel; weiss gestrichelt: wichtigste Antiklinalen.

Faltenjuras der Chasseral- und Mont Sujet-Antiklinale vorgelagert (Fig. 1). Zwischen Twann und Gaicht spaltet sich davon eine in südwestlicher Richtung unter die Lockergesteine bei Twann abtauchende Sekundärfalte ab, die Chapf-Antiklinale. Dabei handelt es sich um eine asymmetrische Falte mit mittelsteil gegen den See zu einfallendem SE-Schenkel und steil bis senkrecht gestellter, lokal sogar überkippter NW-Flanke. Die Chapf-Antiklinale ist von der Seekette durch die tektonisierte, zerquetschte Synklinale von Chros getrennt und setzt sich vermutlich über die Petersinsel in die Jolimont-Antiklinale bei Erlach fort. Im Südschenkel der Seekette treten im Bereich der Mulde von Chros zwei NNW-SSE verlaufende Querbrüche auf, wovon einer als gesichert gelten kann. Es sind zwei steil stehende Kluftsysteme ausgebildet. Das eine streicht NE-SW, das andere ungefähr NW-SE.

Der Felsuntergrund besteht im Bereich des Ligerz- und Twanntunnels aus Schichten des Malm, der unteren Kreide und – in der Synklinale von Chros – der Molasse.

Der Schichtaufbau geht aus Tab. 1 und Fig. 2 hervor. Die Lithologien sind ausführlich beschrieben in Häfeli 1966.

Im Nahbereich des Twanntunnels ist der Fels überwiegend von Lockergestein bedeckt (Gehängelehm, lehmiger Gehängeschutt, Moräne). Mit bis zu 20 m erreichen diese die grössten Mächtigkeiten im Bereich der Kreide- und Molasseschichten.

3. Hydrogeologische Übersicht

Im Felsuntergrund bestehen zwei voneinander durch Stauer getrennte Karstgrundwasserleiter. Als oberer, tunnelbautechnisch unbedeutender Leiter wirken die Kalke der Unteren Kreide, deren Speisung durch Niederschlagsinfiltrat wegen der kleinen

		Lithologie	Mächtigkeit
Tertiär	Untere Süsswassermolasse	Wechsellagerung von fein- und dünnbankigen, in-situ oft stark zerscherten Mergeln, Kalkmergeln, Sandkalken sowie Ton- und Sandsteinen. Untergrenze diskordant, lokal eozäne siderolithische Bildungen.	> 30 m
Untere Kreide	«Hauterivien»	Fein- bis mittelbankige, mergelige Kalksandsteine und mergelige Sandkalke mit tonig-sandigen Mergelzwischenlagen	ca. 30 m
	Calcaire Roux, Marnes d'Arzier	Teils dichte, teils spätige, mittelbankige Kalke mit Mergelzwischenlagen (Marnes d'Arzier).	5-8 m
	Marbre Bâtard	Grobbankige bis massige Kalke; teils dicht, teils oolithisch; mit wenigen Mergelzwischenlagen; verkarstet.	ca. 30-35 m
	«Mergel- und Kalkzone»	Wechsellagerung von Kalken ähnlich dem Marbre Bâtard, mergeligen Kalken und kalkigen Mergeln.	5-10 m
	Goldberg-Fm. («Purbeckien»)	Unregelmässige Wechsellagerung von zerscherten Mergeln, Mergelkalken, Kalken, Tonmergeln und einzelnen Dolomitbänken.	8-20 m, je nach tektonischer Beanspruchung
Jura (Malm)	Twannbach-Fm.:		
	• Obere Twannbachkalke	Mittel- bis grobbankige Kalke, teils dicht, teils brecciös; verkarstet.	15-18 m
	• «Dolomitzone»	Wechsel von Kalken, dolomitischen Kalken und teils kreidigen, in einzelnen Lagen zuckerkörnigen Dolomiten.	ca. 30 m
	• Untere Twannbachkalke	Vergleichbar den Oberen Twannbachkalken.	> 50 m

Tab. 1: Schichtabfolge im Bereich von Ligerz- und Twanntunnel (Südschenkel der Seekette). Grau hinterlegt: hauptsächliche Stauer.

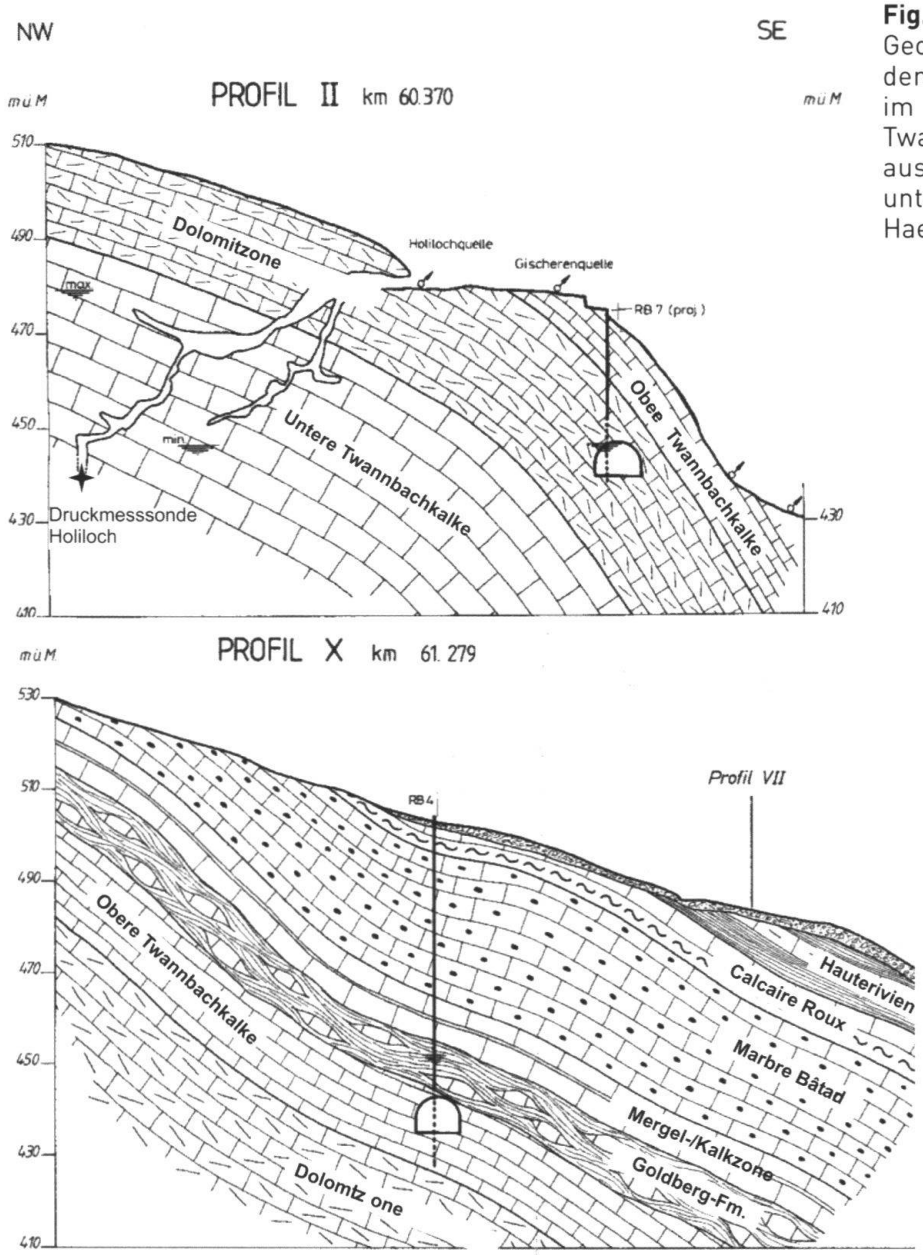


Fig. 2:
Geologische Profilschnitte durch den Südschenkel der Seekette im Bereich des projektierten Twanntunnels. Profile II und X aus unpublizierten Projektunterlagen (P. Kellerhals & Ch. Haefeli).

Aufschlussfläche und der Hangneigungen sehr bescheiden ist. Im Bereich des Ligerztunnels wird er durch diesen weitgehend drainiert. Den Stauer bilden die Schichten des «Hauterivien» und der Unteren Süsswassermolasse im Hangenden, jene der Goldberg-Fm. im Liegenden.

Karsthydrogeologisch von grosser Bedeutung ist die über 400 m mächtige Kalkabfolge des Malms, von der im Twann- und Ligerztunnel mit der Twannbach-Fm. der oberste Teil durchfahren wird. Diese bilden ein bedeutendes, grossräumiges Karstwasserreservoir, im Liegenden gestaut durch die Effinger Schichten. Das Einzugsgebiet umfasst grosse Teile der Seekette zwischen Châtillon (nördlich La Neuveville) im Westen und Hohmatt (westlich Magglingen) im Osten, die Mont Sujet-Antiklinale und ausgedehnte Bereiche der Südflanke der Chasseral-Antiklinale (Fig. 1). Innerhalb dieses Areals liegt in der Synklinale zwischen der Chasseral-Antiklinale und der Seekette die Ebene des Tessenbergs. Diese entwässert sich oberirdisch, da in der Mulde die stauenden Molasse- und Kreideschichten noch erhalten sind.

Das Malm-Karstwasserreservoir besitzt im Raum Twann-Brunnmühle den Basisauslauf, wo zahlreiche Quellen den am tiefsten gelegenen Aufschlüssen des Karstleiters ent-

springen. Zwischen den Quellen und dem Ufer des Bielersees liegt die abdichtende, von gering durchlässigen Lockergesteinen bedeckte Goldberg-Fm., welche das Karstwasser an dieser Stelle überlaufen lässt.
Im Wesentlichen sind zwei Quellgruppen zu unterscheiden: einerseits die der Trinkwasserversorgung und Energiegewinnung (Kleinkraftwerk) dienenden Brunnmühle-Quellen, andererseits die heute ungenutzten Quellen im Bereich des Twannbachfalls. Zu letzteren zählt auch das Karsthöhlensystem von Holiloch und Gischere.
Die Wasserzirkulation erfolgt bevorzugt entlang von verkarsteten Klüften und Brüchen. Diesbezüglich besonders ausgeprägt sind NW-SE bis NNW-SSE verlaufende, subvertikale Klüfte und Brüche. So ist auch die markante Quellkluft bei der Brunnmühle dieser Trennflächenschar zuzuordnen (Fig. 3). Die Anlage der hydraulisch kommunizierenden Karsthöhlen Holiloch und Gischere (Fig. 6) ist durch NNW-SSE verlaufende Klüfte und das Schichtstreichen gegeben. An der Intersektion von Schichtfugen und Klüften ist die Verkarstung oft besonders ausgeprägt. Besonders viele, teils bis zu 20 cm weit geöffnete Schichtfugen sind in den weichen, kreidigen Dolomiten der «Dolomitzone» feststellbar. Es ist denkbar, dass die kreidigen Dolomitlagen ursprünglich als lokale, durch Klüfte zerschnittene Stauer wirkten und das kreidige Felsmaterial durch den Wasserfluss vor allem mechanisch erodiert wurde.
Die Fliessgeschwindigkeiten längs verkarsteter Trennflächen können beträchtlich sein. Nach einem Färbversuch mit Fluorescein in einer Doline westlich von Les Prés d'Orvin, 5.5 km nördlich von Twann, konnte die Substanz nach vier Tagen in der Brunnmühlequelle nachgewiesen werden.

4. Karstsystem Brunnmühle und Twannbach-Holiloch

Die mittlere Ergiebigkeit des Karstleiters beträgt 0.5 m^3/s, die minimale etwa 0.1 m^3/s (Brunnmühlequelle). Die maximale, nach lang anhaltenden und heftigen Niederschlägen oder bei starker Schneeschmelze feststellbare Ergiebigkeit liegt bei ca. 15 m^3/s beim Twannbach-Holilochsystem und 1 m^3/s im Brunnmühlegebiet. Während die Brunnmühlequellen den Basisauslauf des Karstleiters in den Malmkalken darstellen, dienen die verschiedenen Quellen am Twannbach zwischen ca. Kote 435.5 m ü.M. und 478.1 m ü.M. (Gischere) der Entlastung der Hochwasserspitzen. Im Toskessel des Twannbachfalls

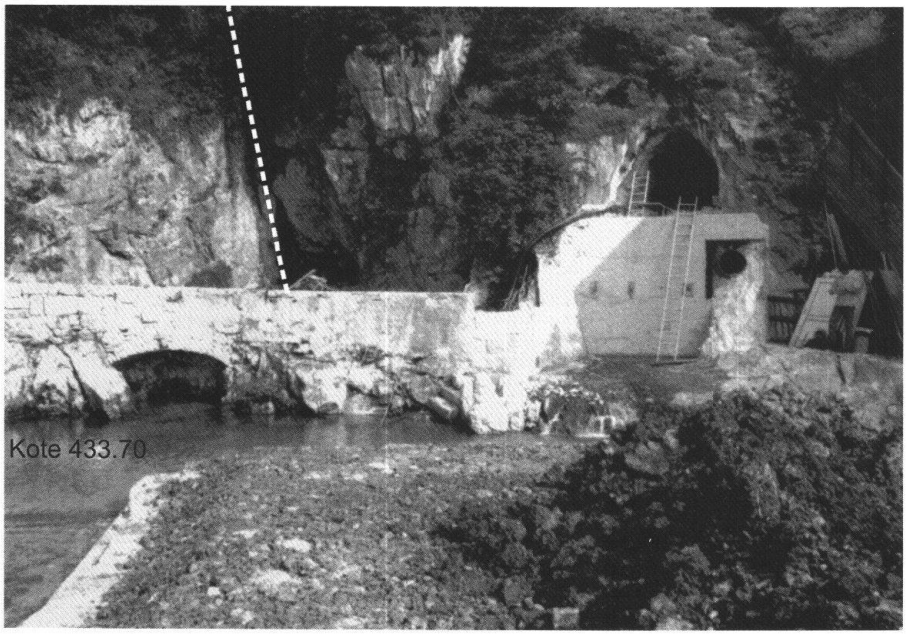
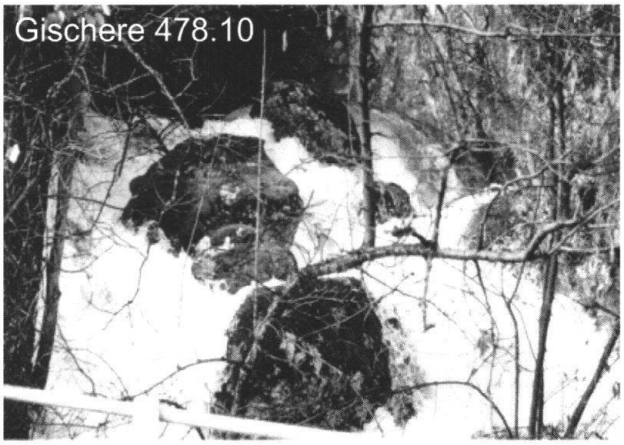


Fig. 3:
Quellteich der Brunnmühlequelle mit der subvertikalen, NNW-SSE streichenden Quellkluft (gestrichelte Linie) in den Oberen Twannbachkalken. Rechts erkennbar der heute zugemauerte Zugangsstollen zum Ligerztunnel.

sind die stauenden Schichten der Goldberg-Fm. bis mindestens auf Kote 435.5 m ü. M. abgetragen (Kote Quellteich Brunnmühle 433.70 m ü. M., ca. 5 m über Seeniveau).
Maximale Schüttungen werden in der Regel im Winterhalbjahr bei anhaltenden Niederschlägen, begleitet von Schneeschmelze auf dem Chasseral (Westwind-Tauwetterlagen), registriert. Dann springen auch die am höchsten gelegenen Quellen an, wie der Schüttstein (Kote 477.55 m ü. M.; Fig. 4), das Holiloch (Kote 477.68 m ü. M.; Fig. 4) oder die Gischere (Kote 478.10 m ü. M.; Fig. 4, 5). Kurze Intensivniederschläge (Sommergewitter) zeigen meist wenig Auswirkungen auf die Quellschüttungen.
Während extremen Trockenperioden schütten einzig die am tiefsten gelegenen Brunnmühlequellen sowie kleinere Quellen unter dem Wasserspiegel des Tosbeckens beim Twannbachfall.



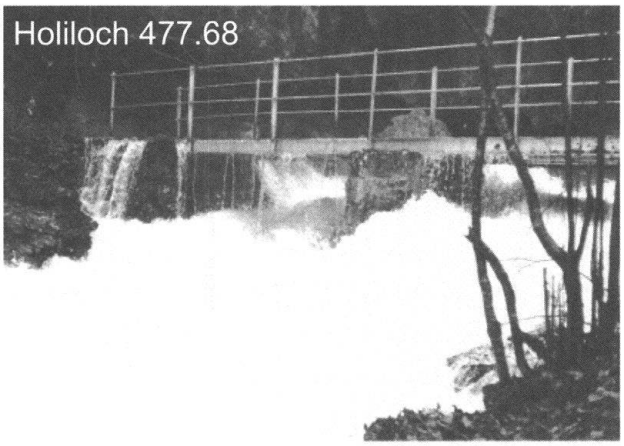


Fig. 4: Die Karstquellen Gischere, Holiloch und Schüttstein während einer Hochwasserphase (Zahlen: Überlaufkoten in m ü. M.).

5. Sondierstollen Umfahrungstunnel Twann

Der Sondierstollen wurde in den Jahren 1988 und 1989, vor der Eröffnung des Ligerztunnels, im Sprengvortrieb erstellt (Ausbruchquerschnitt 14 m^2). Mit ihm sollten die in Kap. 1 gestellten Fragen und somit die Machbarkeit des Umfahrungstunnels Twann geklärt werden. Der Sondierstollen folgt der Linienführung des zukünftigen, 1.8 km langen Twanntunnels. Dieser soll etwa 300 m westlich des Portals Twann schleifend vom 2.5 km langen Ligerztunnel abzweigen, was während der Bauphase eine einjährige Sperrung des heutigen Tunnels zur Folge hätte. Die Achse des von West nach Ost ansteigenden Sondierstollens wurde über einen Verbindungsstollen erschlossen, durch welchen das anfallende Bergwasser über ein Absatzbecken direkt in den Brunnmühle-Quellteich abgeleitet wurde. Der Sondierstollen befindet sich durchwegs im Schwankungsbereich des Karstwasserspiegels.
Der Sondierstollen verläuft auf langer Strecke in den Gesteinen der Twannbach-Fm. Im Bereich der Querung der Twannbachschlucht wurde die Felsoberfläche mittels mehrerer Sondierbohrungen im Stollenfirst erkundet, wodurch auch die Machbarkeit der Unterquerung der Twannbachschlucht geklärt ist (Frage 3, Kap. 1). Nach der Twannbachquerung gelangt der Stollen in die Schichten der «Dolomitzone» und der Obe-

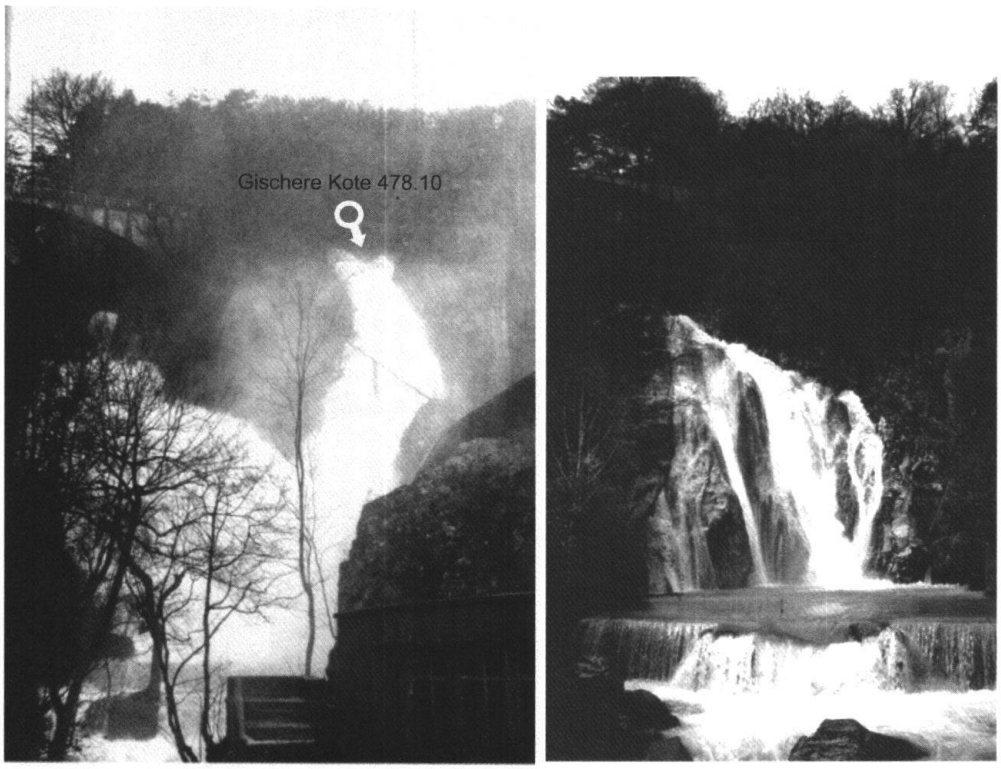


Fig. 5:
Links: Hochwassersituation am Twannbach (15. Februar 1990). Bei über $^4/_5$ des Wassers im Twannbach-Wasserfall handelt es sich um Karstwasser aus dem Holiloch und den angrenzenden Quellen. Rechts: normale Abflussverhältnisse.

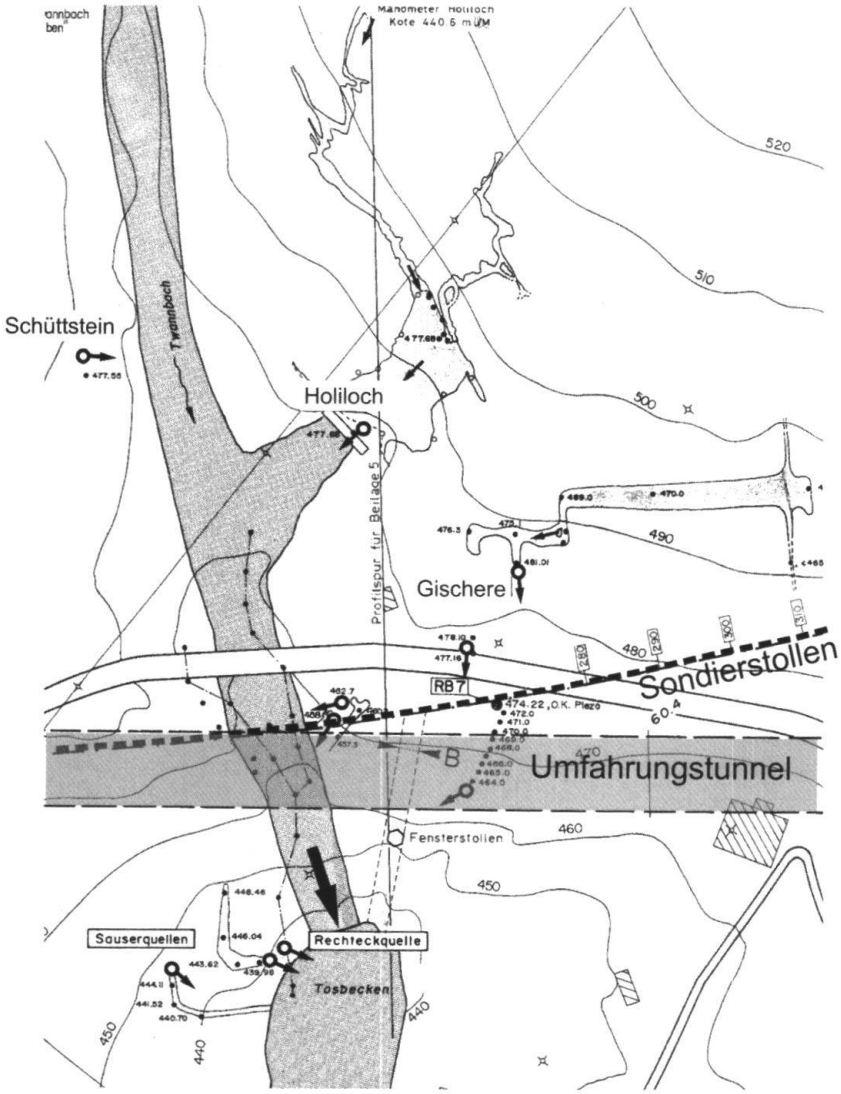


Fig. 6:
Situation der Quellen und der Karsthöhlen im Bereich des Twannbachfalls (Pfeil). Die Höhlen sind als Umrisse (Projektion) dargestellt.

ren Twannbachkalke. Auf etwa 120 m Länge ist die Verkarstung dort stark ausgeprägt, speziell in der «Dolomitzone». Mit einem Färbversuch konnte eine direkte Verbindung mit dem Gischere- und Holiloch-Höhlensystem nachgewiesen werden. Während eines Hochwasserereignisses flossen dem Stollen auf kurzer Strecke grosse Karstwassermengen zu (2.5-3 m^3/s), welche den Stollen überfluteten und den weiteren Vortrieb erschwerten. Deshalb wurde beschlossen, das anfallende Karstwasser mittels eines Fensterstollens direkt in den Twannbach abzuleiten, um beim weiteren Vortrieb die Karstwasserzuflüsse auf dem kürzest möglichen Weg zu evakuieren (Fig. 7, 8). Zusammen mit dem Sondierstollen drainiert der Fensterstollen einen Teil des Wassers, das ursprünglich den Quellen am Fuss des Twannbachfalls, dem Holiloch und der Gischere zufloss.

Im fortgesetzten Vortrieb wurden weitere aktive Karstfliesswege erschlossen. Da der weitere Vortrieb nahezu in der Streichrichtung der stark verkarsteten Schichten verlief, musste mit einem noch grösseren Karstwasserzufluss gerechnet werden. Sowohl bautechnisch als auch hinsichtlich der Auswirkungen auf das Karstsystem wurde dies als heikel betrachtet. Daher wurde beschlossen, die stark verkarsteten Schichten zu verlassen und in die als Stauer wirkende Goldberg-Fm. auszuweichen (Fig. 7). Der Sondierstollen wurde in den weitgehend trockenen Schichten der Goldberg-Fm. bis zum Tunnelmeter 517 vorgetrieben, unter Inkaufnahme einer allerdings etwas knappen Felsüberdeckung.

6. Druckversuche im Sondierstollen

Zur Abklärung der in Kap. 1 gestellten Fragen wurden im Stollen in den Jahren 1989-1991 verschiedene Druckversuche ausgeführt. Für die Druckversuche wurden im Sondier- und Fensterstollen massive Drucktore eingebaut. Dasjenige im Fensterstollen wurde jeweils als letztes ferngesteuert geschlossen. Nachfolgend wird der Verlauf des Druckversuchs vom 24.-25. April 1990 erläutert, der in der Folge eines «durchschnittlichen» Niederschlagsereignisses erfolgte. Aufgezeichnet wurden die Drücke an den Drucktoren, Piezometer in Sondierbohrungen, der Abfluss im Twannbach oberhalb der obersten («Twannbach oben») und unterhalb der untersten («Twannbach unten») Karstwasserzuflüsse, das Druckniveau im Holiloch (Druckmesssonde in der

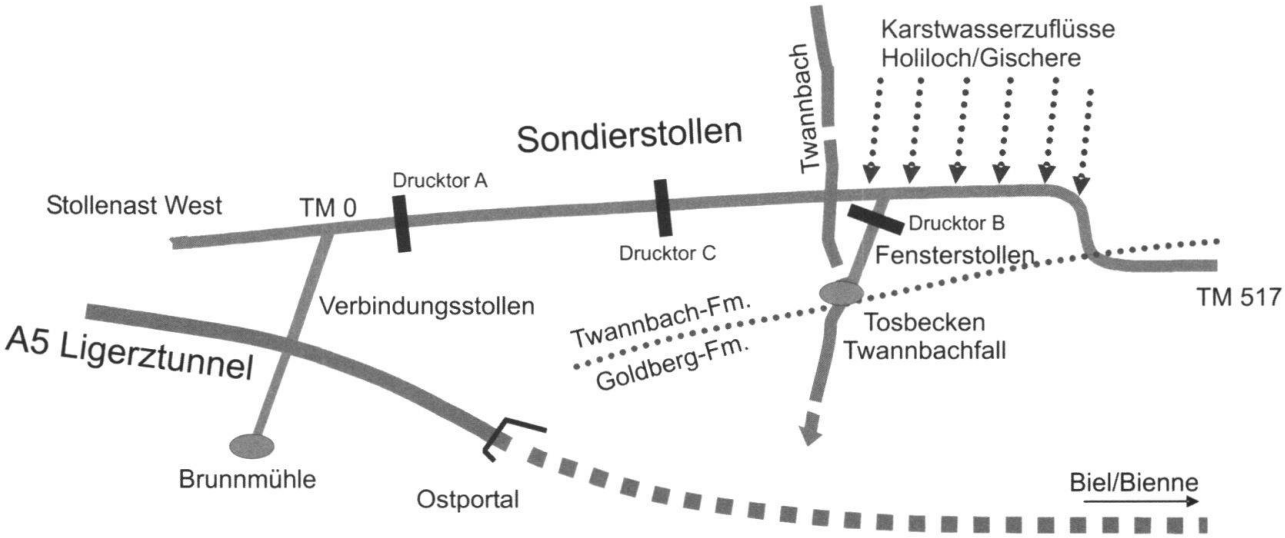


Fig. 7: Situation des Sondierstollens für den Umfahrungstunnel Twann (sehr schematisch, nicht massstäblich).

Höhle auf ca. Kote 440 m ü. M., was ungefähr der Kote der Tunnelsohle entspricht) und der Karstwasserspiegel am Höhlenausgang der Gischere. Fig. 9 zeigt folgendes:

- Die höchsten Wasserstände wurden witterungsbedingt bereits in der Nacht vom 23. auf den 24. April registriert. Der Karstwasserspiegel im Holiloch überschritt knapp die Kote von 477 m ü. M. Das Holiloch schüttete in den Twannbach (Überlaufkote 476 m ü. M.). In der Gischere konnte ein weniger ausgeprägter, verzögerter Anstieg des Karstwasserspiegels festgestellt werden. Nach Aussetzen der Regenfälle nahmen die Abflüsse im Twannbach sukzessive ab. Auch in den Karsthöhlen sanken die Druckspiegel ab.
- Etwa 50 Minuten nach dem Schliessen der Drucktore A und B mittags am 24. April war der Sondierstollen vollständig gefüllt (Fig. 7; das Drucktor C war damals noch nicht installiert). Ab diesem Moment wurde an den Messstellen im Stollen ein sehr rascher Druckanstieg auf Kote 456.5 m ü. M. registriert (etwa 1.6 bar ab Stollensohle). Etwa zum selben Zeitpunkt begannen die bei Versuchsbeginn noch trockenen Quellen am Fuss des Twannbachfalls zunehmend zu schütten. Die Kote der Wasseraustritte stieg sukzessive an.
- Im Verlauf des Anstiegs wurde Restluft im Stollen unter Druck aus einer direkt im Sondierstollen endenden Bohrung ausgepresst. Dabei wurde längs der Bohrlochwandung herunter fliessendes Karstwasser in Form einer Fontäne aus dem Ringraum zwischen Fels und Piezometer ausgestossen (Fig. 10).
- Mit dem Druckaufbau im Stollen ging unverzögert auch ein solcher in der Gischerenhöhle einher, abgeschwächt, aber auf den Originalganglinien gut erkennbar, ebenfalls einer im Holiloch.

Fig. 8: Ergiebige Karstwassereintritte in den Sondierstollen aus Schichten im Oberen Twannbachkalk.

- Am Twannbach oben nahm der Abfluss witterungsbedingt weiter ab, während er unten vorerst markant absank (Wegfall der durch den Fensterstollen abgeleiteten Karstwasserzuflüsse im Sondierstollen nach Schliessen der Drucktore), um dann aber nach kurzer Zeit wieder anzusteigen. Dieser Anstieg ist der einsetzenden Schüttung von zuvor trockenen Karstquellen am Fuss des Twannbachfalls zuzuschreiben. Gleichzeitig sank das Druckniveau in der Gischeren deutlich ab, was auf eine direkte Kommunikation dieser Quellen mit der Gischerenhöhle hinweist. Das plötzliche Auftreten von starker Trübung im Tosbecken des Wasserfalls deutete zudem darauf hin, dass alte, verlehmte Karstfliesswege infolge des Druckaufbaus im Stollen reaktiviert wurden. Dies zeigte sich nach Beendigung des Druckversuches auch visuell im Sondierstollen, indem zwischen dem Stollen und der Gischerehöhle eine Sichtverbindung entstand.
- Nach einer kurzen Phase konstanten Druckes stieg das Druckniveau im Stollen erneut an, ebenso in der Gischere und – schwach erkennbar – im Holiloch.
- In der Nacht vom 24. auf den 25. April kam es in der Ankerwand beim Ostportal des Ligerztunnels zu deutlichen Wasseraustritten. Bei einem früheren Druckversuch im Herbst 1989 bildeten sich dort plötzlich Quellen mit einer Schüttung bis zu 12 l/s (Fig. 10). Durch den fortgesetzten Druckaufbau bildeten sich offensichtlich Umläufigkeiten (Distanz zum nächstgelegenen Drucktor: >100 m), welche aus Sicherheitsgründen den unverzüglichen Abbruch des Druckversuches bedingten. Im Stollen baute sich bis zu diesem Zeitpunkt ein Druck von gegen 2 bar über der

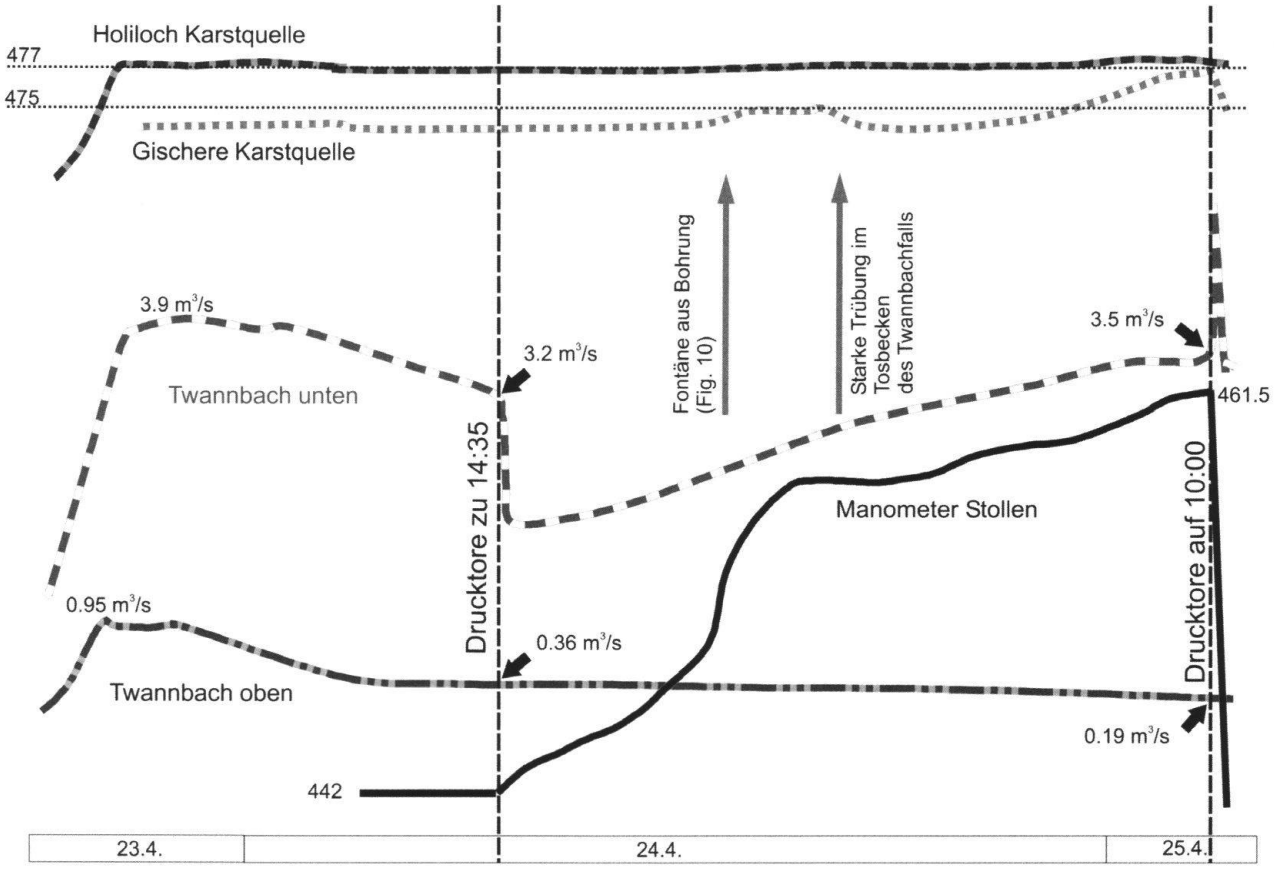


Fig. 9: Ganglinien des Druckversuchs vom 24.-25. April 1990 (Darstellung ohne Skalierungen; gemessen wurde in folgenden Masseinheiten: Karstwasserspiegel für Holiloch und Gischere in m ü. M., m³/s für die Abflüsse im Twannbach, Druckniveau im Stollen in m ü. M.).

Tunnelsohle auf. In der Gischere stieg das Druckniveau während des Versuchs um knapp 3 m, im Holiloch um wenige Dezimeter.

7. Folgerungen aus den Druckversuchen

- Die durch den Stollen drainierten Quellen am Fuss des Twannbachfalls begannen im Verlaufe des Einstaus wieder zu schütten. Die natürlichen Abflussverhältnisse konnten bei diesen Quellen durch den Druckaufbau wieder annähernd hergestellt werden.
- Die im Sondierstollen angefahrenen Karste kommunizieren mit den Karsthöhlen Gischere und Holiloch.
- Bemerkenswert ist der relativ rasche Druckabfall in der Gischere, welcher mit der Trübung im Twannbach korreliert. Etwas verzögert und stark abgeschwächt ist die Druckabnahme auch im Holiloch festzustellen. Die aufgetretene Trübung und die plötzliche Druckentlastung deuten darauf hin, dass durch den Druckaufbau alte und bis zu diesem Zeitpunkt unwirksame, verstopfte Fliesswege reaktiviert wurden. Zwischen dem Stollen und der Gischerehöhle entstand eine Sichtverbindung.
- Die Manometer- und Piezometermessungen zeigen im Stollen einen raschen, mehr oder weniger kontinuierlichen Druckanstieg. Ein eigentlicher Druckstoss fand nicht statt.
- Während der Druckversuche wurden alte Fliesswege reaktiviert und eventuell neue (Wasseraustritte beim Ostportal des Ligerztunnels) geschaffen. Letztere zeigen, dass sich auch über grössere Entfernungen Umläufigkeiten bilden können. Solche sind dort heikel, wo unkontrollierte Übertritte ins Lockergestein erfolgen, woraus sich Rutschungen entwickeln können.
- Im wenig zerklüfteten und verkarsteten Fels entstehen nur relativ geringe Umläufigkeiten. So führte der Einstau des Stollens beim Drucktor A auf wenigen Metern zu einer Druckdifferenz von gegen 2.3 bar. Dabei kam es zu geringen, aber langsam zunehmenden Umläufigkeiten. Vermutlich liessen sich solche mittels Injektionen reduzieren und stabil halten. Beim Drucktor B im Fensterstollen in relativ gebrächem und verkarstetem Gestein führten die Druckdifferenzen hingegen zu deutlichen und zunehmenden Umläufigkeiten,

Fig. 10:
Druckversuch vom 24.-25. April 1990: Aus dem Sondierstollen ausgepresste Wasser-Luft-Fontäne (links). Druckversuch vom Herbst 1989: Unkontrollierte Wasseraustritte aus der Ankerwand beim Ostportal des Ligerztunnels (rechts).

trotz vorgängiger mehrphasiger Injektionen mit Schaum und Harz. Es bleibt offen, inwieweit diese Umläufigkeiten durch Nachinjektionen hätten wirksam und dauerhaft eingedämmt werden können.

- Aus technischen Gründen (das fern gesteuerte Drucktor liess sich nicht schliessen) versagte der Druckversuch vom 15. Februar 1990, anlässlich eines extremen Hochwassers (Fig. 5). Aufgrund der anderen Druckversuche kann jedoch angenommen werden, dass sich dabei im Holiloch ein Druckniveau auf rund 488 m ü. M. hätte bilden können, also etwa 48 m über der Stollen- bzw. zukünftigen Tunnelsohle.
- Gegen den See zu fällt der Karstwasserspiegel rasch ab (Holiloch maximal ca. Kote 488 m ü. M., Quellen am Fuss des Twannbachfalls maximal ca. Kote 440 m ü. M., auf etwa 140 m Distanz). Auf kurzen Strecken können grosse Druckdifferenzen bestehen.
- Im Rahmen der Druckversuche wurden auch die Brunnmühlequellen beobachtet, aber es konnten keine eindeutigen Reaktionen festgestellt werden, weder in Bezug auf die Schüttung, noch hinsichtlich der Trübung. Die Existenz einer natürlichen hydraulischen Verbindung zwischen Gischere-Holiloch und den Brunnmühlequellen bleibt somit ungeklärt.

8. Drainagewirkung des Sondierstollens

Durch den Bau des Sondierstollens wurden zahlreiche aktive Karste angefahren, ebenso inaktive, die mit Lehm verstopft waren. Im Nahbereich des Stollens wurden alle denkbaren Fliesswege innert weniger Jahren nach dem Ausbruch durch Erosion stark ausgeschwemmt, was letztlich eine deutliche Erhöhung der Gebirgsdurchlässigkeit zur Folge hatte. Dies kann auch visuell bestätigt werden, denn nahezu alle ehemals verstopften, im Sondierstollen angefahrenen Karste sind heute aktiv und sauber. In den ersten Jahren nach dem Stollenausbruch wurden nach jedem Hochwasser neue Geröllablagerungen, darunter auch gerundete Komponenten, festgestellt. Die Säuberung der Fliesswege kann anhand einer verkarsteten Kluft beim Übergang vom Verbindungs- zum Sondierstollen exemplarisch gezeigt werden: Kurz nach dem Anfahren im Jahre 1989 schüttete die Kluft bei mittleren Karstwasserständen rund 100 l/min. Innerhalb von zehn Jahren verfünffachte sich die Schüttung bei gleichen hydrologischen Randbedingungen.

Die Erosion der Fliesswege erfuhr in den letzten Jahren eine deutliche Abschwächung. So zeigen Messungen ab dem Jahre 1998 nur mehr eine geringe Zunahme der Karstwasserzuflüsse in den Stollen. Es wird davon ausgegangen, dass die Bergwasserverhältnisse, bezogen auf die aktuelle Stollengeometrie, einem neuen Gleichgewichtszustand zusteuern.

9. Fazit

Durch den Sondierstollen wurde ein künstlicher Vorfluter geschaffen, der die Wasserwegsamkeit im Karst lokal stark veränderte. Diese lokalen Veränderungen müssen als irreversibel und bleibend bezeichnet werden. Sie sind nur in geringem Mass abhängig vom Stollen- oder Tunnelquerschnitt. Die Antwort auf Frage 1 der Problemstellung (Kap. 1) lautet demnach, dass der projektierte Twanntunnel die heutigen Verhältnisse der Karstquellen des Holiloch-Gischere-Systems kaum weiter beeinträchtigen wird, da die Linienführung im stark verkarsteten Abschnitt talseits des Sondierstollens verläuft. Die heutigen Verhältnisse entsprechen lokal indes nicht mehr denjenigen vor 1988.

Durch die Druckversuche gelang es, die durch den Sondierstollen drainierten Quellen wieder zu aktivieren, allerdings nicht genau im gleichen Mass, wie es ohne Son-

dierstollen der Fall gewesen wäre. Gleichzeitig entstanden auch neue, nicht prognostizierbare hydraulische Verbindungen.
Ursprünglich war vorgesehen, den Twanntunnel im Bereich des Holiloch-Twannbach-Quellgebietes nicht drainierend, sondern in Form einer durch Karstwasser umflossenen Druckröhre zu bauen. Dies wäre unmittelbar nach dem Ausbruch, vor dem Einsetzen der massiven Erosion der vorhandenen Karstfliesswege, möglich gewesen. Nach Jahren der inneren Erosion müsste beim Bau einer Druckröhre von nicht prognostizierbaren Fliesswegen und Umläufigkeiten ausgegangen werden, was bei nahe an der Terrainoberfläche verlaufenden Untertagebauten wegen der möglichen Entstehung von Hanginstabilitäten als heikel zu bezeichnen wäre. Diese Aussage gilt allgemein für Untertagebauten, die sich im Schwankungsbereich des Karstwasserspiegels oder darunter befinden.
Es gibt keine Anzeichen einer Beeinträchtigung der öffentlich genutzten Brunnmühlequellen (Frage 2, Kap. 1). Hinsichtlich der Belange des Gewässerschutzes werden die Linienführung, das Längsprofil und die Lage der Ausstellbuchten im Ausführungsprojekt weitestgehend optimiert.
Die Unterquerung der Twannbachschlucht ist auch bei grösserem Ausbruchquerschnitt machbar (Frage 3, Kap. 1), bedingt aber wegen der geringen Felsüberdeckung einen der Situation angepassten Vortrieb und zusätzliche Sicherungsmassnahmen.

Dank

Wir danken dem Tiefbauamt des Kantons Bern und besonders Herrn Stefan Graf, die langjährigen Untersuchungsresultate in diesem Artikel veröffentlichen zu dürfen.

Literatur

Haefeli, Ch. 1966: Die Jura/Kreide-Grenzschichten im Bielerseegebiet (Kt. Bern). Dissertation Univ. Bern, 1964. Eclogae geol. Helv. 59/2. 565-695.
Kellerhals, P. 1998: N5 Twanntunnel – UVB Geologie und Hydrogeologie. Unpublizierter Bericht Dr. phil. nat. Peter Kellerhals, 25 S.