

**Zeitschrift:** Wasser Energie Luft = Eau énergie air = Acqua energia aria  
**Herausgeber:** Schweizerischer Wasserwirtschaftsverband  
**Band:** 84 (1992)  
**Heft:** 5-6

**Artikel:** Quelldeformation der Anhydritgruppe im Gipsbergwerk Felsenau  
**Autor:** Gysel, Martin  
**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-940558>

#### Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

#### Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

#### Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

**Download PDF:** 10.02.2026

**ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>**

# *Quelldeformationen der Anhydritgruppe im Gipsbergwerk Felsenau*

Martin Gysel

*Das Langzeit-Deformationsverhalten der Anhydritgruppe des Tafeljuras konnte 1970 bis 1983 im Gipsbergwerk Felsenau bei Leibstadt, Schweiz, durch In-situ-Messungen mittels Extensometer- und Konvergenzmessungen sowie durch nivellitische Messungen beobachtet werden. Es zeigte sich, dass sich die Quelldeformationen an unverkleideten Hohlräumen mit einer gleichbleibenden zeitlichen Rate über zehn Jahre immer weiter entwickelten und beim Messende offenbar noch nicht abgeschlossen waren. Aus den Extensometermessungen wird geschlossen, dass die Quellungen mit der Zeit vom Ausbruchrand her auch tieferliegende Zonen erfassen.*

## *Abstract:*

*Between 1970 and 1983 the long-term deformations of the anhydrite of the Tabular Jura have been monitored in the Felsenau Gypsum Mine near Leibstadt, Switzerland, by means of extensometric and convergency as well as geodetic measurements. It turned out that the deformations, which are interpreted as swelling deformations, developed themselves at a constant rate over ten years or more. Apparently, the swelling started in the vicinity of the free edge of the experimental cavern and later migrated into deeper rock zones as interpreted from the extensometric observations. Apart from the anisotropy of the subhorizontal rock strata the loosened zone due to the excavation by blasting played an important role for the formation of the main swelling zones at the invert and in the crown area.*

## **1. Einleitung**

Im Gipsbergwerk Felsenau der Gips-Union in Reuenthal AG wurden durch die Nordostschweizerischen Kraftwerke AG, Baden, ab 1970 verschiedene hydrologische und felsmechanische Messungen durchgeführt. Diese wurden ab 1977 im Auftrag der Nagra, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, weitergeführt und 1983 abgeschlossen. Darunter befanden sich Langzeit-Deformationsmessungen über fast 14 Jahre. Sie geben Aufschluss über das Deformations- und das Quellverhalten der anhydritischen Schichten des Muschelkalkes im Tafeljura.

Die Nagra entschloss sich 1977, einen Versuchsstollen in der Felsenau zu bauen und mit Messgeräten zu instrumentieren, um in situ das Deformations- und Quellverhalten des Anhydrits grossmassstäblich in einem Felslabor zu studieren. Auch diese Messungen und Versuche wurden Ende 1983 abgeschlossen.

Im Verlaufe der Monate Mai/Juni 1977 wurde der Versuchsstollen ausgebrochen; die notwendigen Bohrlöcher wurden ausgeführt, und die felsmechanischen Messinstrumente wurden angekauft, eingebaut und in Betrieb genommen. Darauf konnte mit dem Messbetrieb begonnen werden. Die periodischen Ablesungen ergaben bis Ende 1983 eine Messreihe, die sich über sechs Jahre erstreckt. Der Verfasser (damals bei Motor-Columbus Ingenieurunternehmung AG, 5401 Baden) hat dieses Versuchsprogramm entwickelt, durchgeführt und ausgewertet.

## **2. Bedeutung und Zweck der felsmechanischen In-situ-Versuche**

Der Zweck der felsmechanischen Messungen im Versuchsstollen 77 in der Felsenau bestand in der Erfassung des

langzeitlichen Deformationsverhaltens eines Stollens im Anhydritgebirge. Die Versuche sollten grossmassstäblich erfolgen und die natürlichen Deformationsvorgänge aufzeigen, die sich an Stollen in Anhydrit abspielen können. Dabei stand das Studium der *Quellvorgänge* des Anhydritgestein im Vordergrund. Die anhydrit- und tonhaltigen Gesteine weisen oft eine erhebliche Quellfähigkeit auf, die durch Veränderungen des Gebirgsspannungszustandes und dadurch einsetzende Wasserzirkulation hervorgerufen wird; siehe Gassmann et al. (1979).

Die Aufgabenstellung gliederte sich wie folgt:

Die Messungen sollten darüber Aufschluss geben, ob die Stabilität unverkleideter oder gegebenenfalls leicht gesicherter Stollen über längere Zeit gewährleistet ist. Es war bekannt, dass der Versuchsstollen Felsenau wegen seiner nur mässigen Tiefenlage auf die vorgenannte Frage nur teilweise Antwort geben würde. Immerhin hoffte man, durch eine gewisse Extrapolation auch Hinweise auf das Verhalten von Stollen in grösserer Tiefe zu gewinnen.

Zum Deformationsverhalten des Anhydrits erhoffte man sich neue Erkenntnisse über folgende Aspekte: Verschiedentlich wurde schon vermutet, dass durch Sprengen aufgelockerte Zonen im Stollen in vermehrtem Mass zum Aufquellen neigen. Durch in die Tiefe des Felsens gestaffelte Messpunkte sollte diese Hypothese überprüft werden. Je nach Ergebnis wäre dann die Forderung nach möglichst schonenden Ausbruchverfahren zu stellen.

Die Messungen sollten zudem zeigen, wie die Wechselseitige Beeinflussung von Anhydrit mit anderen Gesteinen das Quellverhalten beeinflusst. Nach den Erfahrungen von ausgeführten Tunnelbauten sind die Quellerscheinungen um so geringer, je massiver und uniformer der Anhydrit ansteht.

Die geometrische Anisotropie eines wechselgelagerten Gebirges (Gerichtetheit der Schichtung) kann sich eventuell auch auf die Verteilung der Quellhebungen am Stollenumfang auswirken. Diese Vermutung sollte ebenfalls durch die Messungen überprüft werden. Zu beachten ist dabei, dass sich auch ohne eine Schichtung, rein aufgrund des Verhältnisses zwischen den horizontalen und den vertikalen primären Gebirgsspannungen, eine anisotrope Verteilung der Quellungen einstellen kann. Zudem muss geklärt werden, ob der Sohlenbereich der Stollen stärker quellanfällig ist, weil von aussen oder innen zufließendes Wasser an der Sohle anfällt und somit das Quellen der Stollensohle am meisten begünstigt.

Die In-situ-Messungen sollten die Entwicklung der Quellhebungen in Funktion der Zeit aufzeigen. Aus der Form der gemessenen Quellkurve (linear weitergehend oder asymptotisch gegen einen Grenzwert strebend) sollte geklärt werden, ob das Gebirge durch Quellen mit der Zeit abgedichtet wird («self-healing»), indem Risse und Klüfte durch die Volumenausdehnung der Gesteinsmasse bzw. durch Ausscheiden von in Gips umgewandeltem Anhydrit geschlossen werden.

Form, Stärke und Schnelligkeit der Entwicklung der Quellhebungen sollten zudem mit Werten aus Laborversuchen verglichen werden, um den Einfluss der wirklichen Feldstruktur, der wirklichen Spannungsverteilung und der Möglichkeiten der Wasserzufluss durch den Felskörper hindurch zu erfassen.

Neben der Wasserzufluss intern im Gebirge von Kompressionszonen hin zu Dekompressionszonen und neben Wasser, das eventuell anderweitig auf der Stollensohle fließt, könnte für das Quellen der Stollenoberfläche auch die Raumfeuchtigkeit eine Rolle spielen. Auch darüber sollte der Versuchsstollen 77 Aufschluss geben.

An den Gesamtdeformationen um den Stollen hat nicht nur das Quellen teil; auch aus der elastischen und/oder plastischen Deformation des Gebirges nach dem Stollenausbruch oder aus Felskriechen unter den resultierenden Spannungen können Felsverschiebungen eintreten. Die Auswertung der Messungen sollte zeigen, ob diese Deformationsanteile gegenüber dem Quellen bedeutend sind. Ein letzter, aber nicht unwichtiger Zweck des Versuchsstollens bestand darin, die Eignung der angeordneten Messkonfigurationen und der Messgeräte zu prüfen.

Die Untersuchungsziele für den Versuchsstollen 77 können durch die folgenden Fragen zusammengefasst werden:

1. Wie ist das Deformationsverhalten und insbesondere das Quellverhalten grossmassstäblich im Langzeitversuch am Stollen?
2. Wie verhält sich die Stabilität unverkleideter Stollen in der Anhydritgruppe?
3. Spielen sich die Quellvorgänge vor allem in der Sprengauflockerungszone ab?
4. Hat die Wechselleagerung von Anhydrit und anderen Gesteinen einen Einfluss auf das Quellen?
5. Quellen massive Partien aus Anhydrit weniger?
6. Ist die Stollensohle dem Quellen am stärksten ausgesetzt?
7. Bewirken die Quellungen mit der Zeit ein Abdichten, oder reisst das Gebirge immer mehr auf?
8. Wie schnell und wie stark entwickeln sich die Quellhebungen in situ im Vergleich zu Laborversuchen? Es werden Korrelationswerte gesucht.
9. Beeinflusst die Raumfeuchtigkeit das Quellen?
10. Sind neben dem Quellen noch andere Vorgänge massgeblich an den Gesamtdeformationen beteiligt?
11. Wie bewähren sich die angeordneten Messkonfigurationen und Messgeräte?

### 3. Planung, Bau und Instrumentierung des Versuchsstollens

#### Lage des Versuchsstollens

Bei der Wahl der Lage des Versuchsstollens 77 für das geplante felsmechanische Langzeitmessprogramm musste berücksichtigt werden, dass neben dem Vorhandensein geeigneter Gebirgsformationen (Anhydrit) und genügender Abstände von bestehenden Stollen ebenso eine gute Zugangsmöglichkeit gewährleistet und dass die ausgewählte Lage des Versuchsstollens für die Belange der Gips-Union annehmbar sein musste. So musste sich der Versuchsstollen insbesondere in das Abbauprogramm der Gips-Union einfügen lassen.

Die Lage des Versuchsstollens geht aus Bild 1 hervor. Der Stollen liegt auf Kote 317,80 m (Sohlenkote des Eingangs) und ist etwa 300 m Richtung SSE vom Eingangsportal ins Gipsbergwerk entfernt. Der Abstand vom Rhein beträgt 1100 m. Die Sohle des Versuchsstollens befindet sich einige Meter über dem höchsten Rheinwasserspiegel. Die vertikale Gebirgsüberlagerung über dem Versuchsstollen beträgt etwa 100 m.

Aus Bild 1 geht auch die Lage der sogenannten NOK-Versuchsstollen DK und EK hervor, deren Sohlenkoten sich auf etwa 307,00 m ü.M. bzw. etwa 297,00 m ü.M., d.h. rund 100 bzw. 110 m unter Terrain, befinden. Die alten, langjährigen Deformationsmessungen in diesen Stollen werden zu Vergleichszwecken herangezogen.

#### Abmessungen des Versuchsstollens

Bei der Planung der Stollenabmessungen bestand der Wunsch, den Querschnitt möglichst gross zu wählen, um durch den Stollenausbruch einen möglichst grossen Felsbereich zu beeinflussen. Aus Kostengründen und basierend auf den Erfahrungen der Gips-Union betreffend die Standfestigkeit von ungesicherten Stollen, wurde ein Stollendurchmesser von 5 m angestrebt. Für die spätere Interpretation der Messresultate hätte ein runder Stollen die übersichtlichsten Verhältnisse geboten. Aus Rücksicht auf die Ausbruchgeräte der Gips-Union und auf die ausgeprägte subhorizontale Schichtung wurde schliesslich ein rechteckiger Stollen von etwa 5 m Breite und 4,5 m Höhe gewählt. Der theoretische Querschnitt des Versuchsstollens ist in Bild 3 dargestellt.

Der Versuchsstollen ist etwa 20 m lang. Diese Länge sollte genügen, um 2 bis 3 Messquerschnitte anzurufen. Bild 2 zeigt den vom Zugangsstollen C19 aus parallel zu der Schichtung rund 3° nach SSE fallenden Versuchsstollen.

#### Messkonzept

Das Deformationsverhalten von Stollen und Tunnels und der sie umgebenden Felsschicht wird üblicherweise untersucht, indem einzelne, senkrecht zur Stollenachse stehende Messquerschnitte angelegt werden. Dieses Vorgehen ist auch für den Versuchsstollen 77 befolgt worden, und es wurden 2 Hauptmessquerschnitte M1 und M2 definiert. Die Deformationen der Stollenoberfläche und weiterer Punkte innerhalb der Felsschicht wurden in den Ebenen der Messquerschnitte verfolgt.

Die Messquerschnitte wurden möglichst rasch instrumentiert, sobald sie durch den Stollenvortrieb freigelegt waren, so dass die einsetzenden Deformationen möglichst von Anfang an erfasst werden konnten.

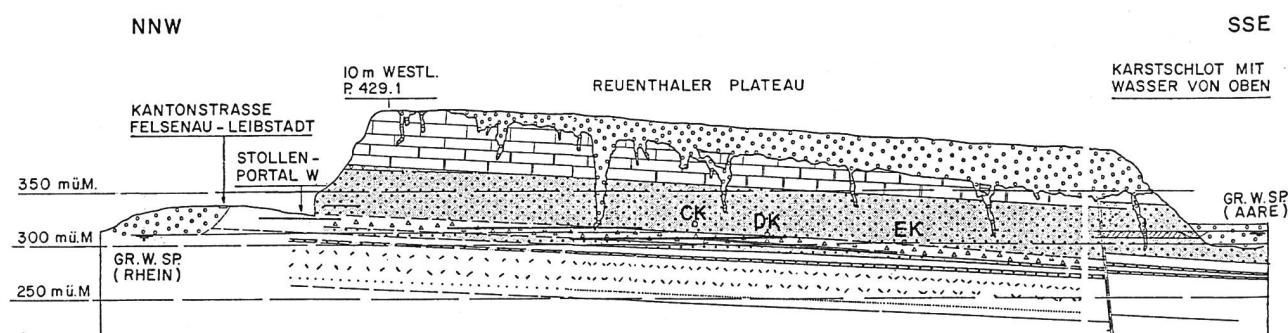


Bild 1. Geologisches Profil durch das Gipsbergwerk Felsenau (Jäckli 1969). Lage der Versuchsstollen CK der Nagra sowie der Messstollen DK und EK der NOK.

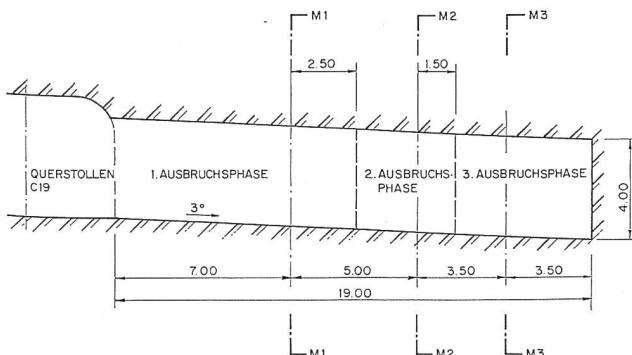


Bild 2. Längsschnitt durch den Versuchsstollen. Messquerschnitte M1, M2 und M3.

Die Instrumentierung der Messquerschnitte wurde im Prinzip folgendermassen vorgesehen:

#### Konvergenzmessungen

Zur Messung von Verschiebungen der Felsoberfläche selbst, d.h. der Stollenlaibung, wurde an derselben, verteilt über den Umfang, eine Anzahl Messbolzen gesetzt. Durch wiederholte Ausmessung der Abstände zwischen den Bolzen konnte die zeitliche Entwicklung der Deformation der Stollenoberfläche aufgenommen werden. Im allgemeinen äussert sich diese Deformation als Konvergenz, d.h. in einem Kleinerwerden des Profils, so dass von Konvergenzmessungen gesprochen wird. Zur Messung dienten gespannte Invardrähte, die mit einem Längen- und Kraftmessgerät kombiniert wurden.

#### Extensometermessungen

Die Konvergenzmessungen geben nur Auskunft über die Bewegungen der Stollenlaibung, nicht aber über Bewegun-

gen im Felsmantel in verschiedenen Tiefenstufen. Zudem kann bei einer Konvergenzmessung nicht unterschieden werden, wie sich z.B. eine gemessene vertikale Stollenkonvergenz auf Sohlhebung und Firstenkung verteilt. Aus diesen Gründen wurde das System der Konvergenzmessstrecken mittels in den Fels hinausreichender Extensometer vervollständigt.

Mit den Bohrloch-Extensometern lassen sich Verschiebungen längs einer Bohrlochachse bestimmen. Beim gewählten Typ des Stangenextensometers wurden 4 Messgestänge, die zur Gewährleistung der Längsverschiebbarkeit mit Kunststoffrohren umhüllt sind, mit der Spitze in verschiedenen Tiefen (2, 4, 8, 16 m) im Fels verankert. An der Oberfläche des Bohrlochs ist ein Messkopf am Fels befestigt. Die Verankerungen an der Spitze der Gestänge und der Messkopf bilden die Basisendpunkte der Messstrecken. Zwischen diesen Punkten liegen die freien Messlängen.

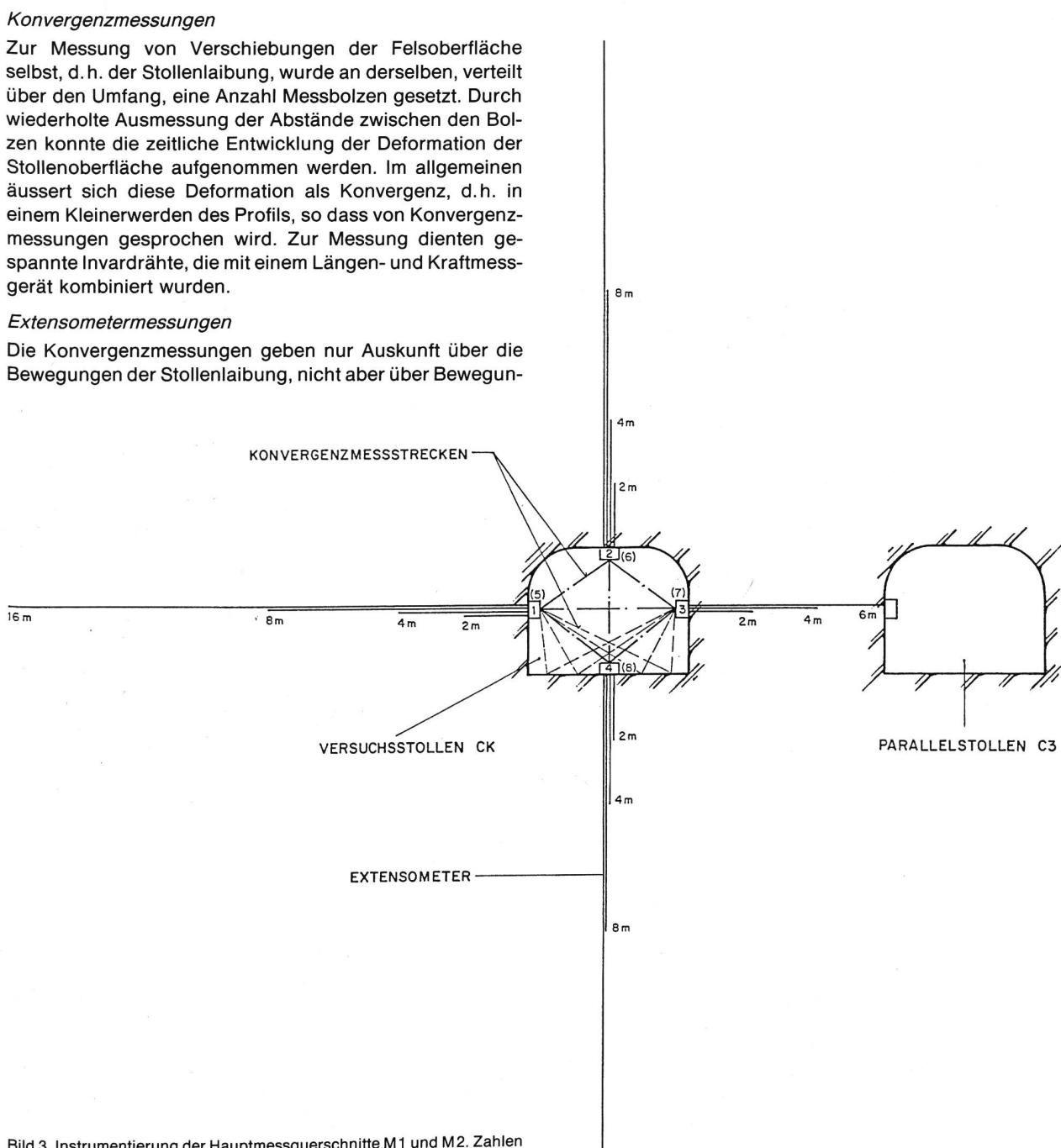


Bild 3. Instrumentierung der Hauptmessquerschnitte M1 und M2. Zahlen in ( ) beziehen sich auf M2.

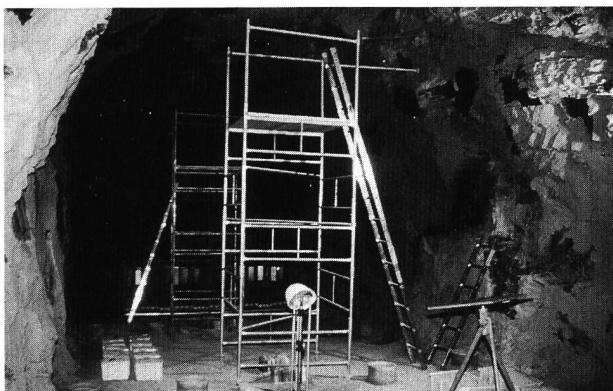


Bild 4. Versuchsstollen CK vom Eingang her gesehen. Hilfsgerüst für die Durchführung der Messungen.

Gemessen wurde die Bewegung der freien Gestängeenden relativ zum Messkopf.

Durch die Tiefenstaffelung der Verankerungspunkte der einzelnen Messpunkte kann die räumliche Verteilung der Deformation im Fels gemessen werden. Es kann aufgegliedert werden, wie gross die Deformationsbeiträge der einzelnen Tiefenstufen an die Gesamtdeformation an der Stollenlaibung sind. Die 2-m-Messgestände sind zur Beobachtung des Nahbereiches mit vermuteten Einflüssen aus der Sprengauflockerung angeordnet worden.

#### Präzisionsnivelllement

Zur Kontrolle der Konvergenz- und Extensometermessungen wurden einige Messpunkte mit Präzisionsnivelllement kontrolliert, wobei die Setzungen oder Hebungen relativ zu einem ausserhalb des Bergwerks gelegenen Fixpunkt gemessen wurden.

#### Messquerschnitte

Nach dem Prinzip der drei erwähnten Messmethoden wurden zwei identische Hauptmessquerschnitte M1 und M2 geplant und instrumentiert (Bild 3). Bei der Platzierung von M1 und M2 wurde darauf geachtet, dass für sie im Endzustand des ausgebrochenen Messstollens ebene Verschiebungszustände galten, d.h., die Messquerschnitte mussten genügend weit vom Querstollen C19 bzw. vom Ende des Versuchsstollens entfernt sein.

Die Messquerschnitte M1 und M2 waren mit First-, Sohlen- und Ulmenextensometern mit Verankerung der Messstangen in 2, 4, 8 und 16 m Tiefe versehen.

Es wurde angenommen, dass die tiefsten Messpunkte (16 m) nur noch wenig vom Stollenausbruch und den nachfolgenden Deformationen beeinflusst wurden und somit bei der Auswertung der Messungen in erster Näherung als unverschieblich betrachtet werden können.

Direkt auf den Messköpfen der Extensometer befanden sich die Messbolzen für die Konvergenzmessungen, womit eine direkte gegenseitige Kontrolle der beiden Messsysteme ermöglicht wurde. Durch die diagonalen Messstrecken konnte zudem die tangentiale Verschiebungstendenz der Stollenlaibung ermittelt werden. Zusätzliche Messpunkte auf Kurzankern, verteilt über die Stollensohle, erlaubten die detaillierte Beobachtung der Sohlendeformationen.

Der Messquerschnitt M3 bestand nur aus einem einzigen horizontalen 3fach-Extensometer, der vom bestehenden Parallelstollen C3 aus versetzt und abgelesen werden sollte (Bild 3). Er wurde schon vor dem Ausbruch des neuen Versuchsstollens in Betrieb genommen. Mit diesem Vorgehen wurde versucht, die sofortigen Deformationen, welche schon während des Auffahrens des Stollens im umliegenden Fels durch Spannungsumlagerung und Druckentlastung ausgelöst werden, zu erfassen.

#### Felsmechanische Aussagemöglichkeiten der gewählten Messanordnung

Aus der Messung der kompletten Deformationskurven, die in Funktion der Zeit zuerst die elastischen bzw. elastoplastischen Deformationen infolge Spannungsumlagerung und Druckentlastung beim Stollenausbruch und danach weitere Deformationen infolge Quellsen oder Kriechens des Gebirges zeigen, können theoretisch folgende Aussagen erhalten werden:

##### a) Elastizitätsmodul des Grossbereichs

Aus der durchschnittlichen Konvergenz (Mittel aus verschiedenen Durchmessermessungen) infolge Spannungsumlagerung kann der Elastizitätsmodul des Gebirges im Grossbereich angegeben werden. Dazu sind allerdings Angaben über die Intensität der primären Gebirgsspannungen und die Querdehnungszahl notwen-

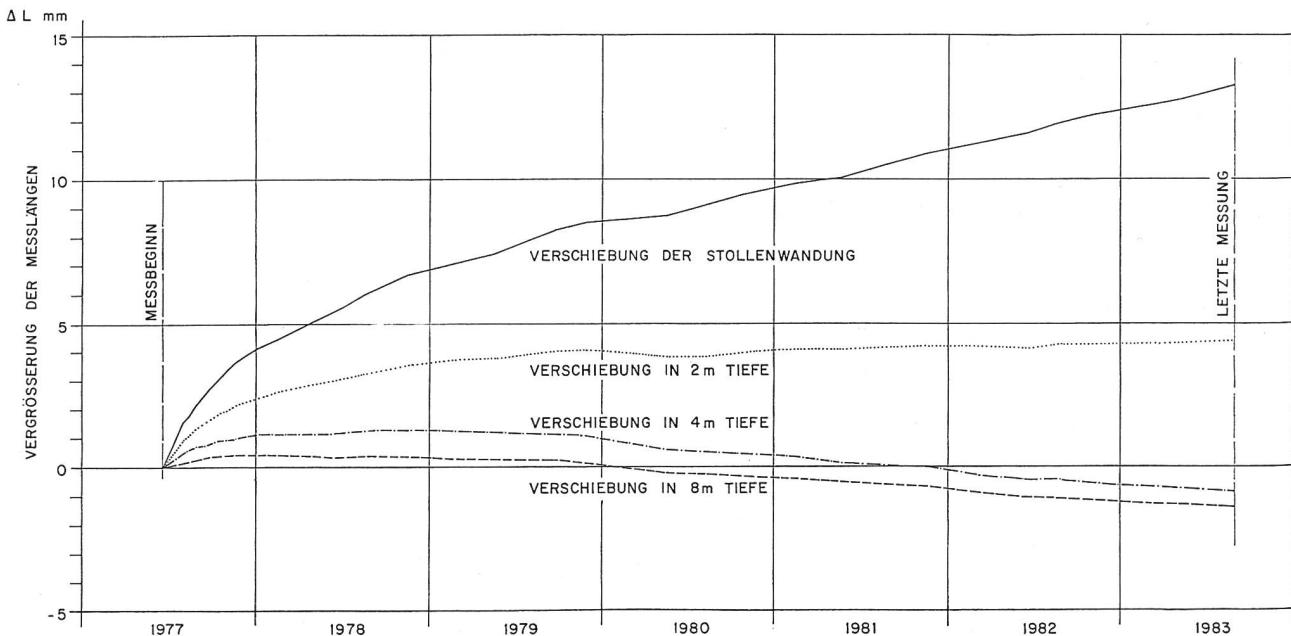


Bild 5. Langzeitdeformationen: Messungen Juni 1977 bis August 1983 am Beispiel des Extensometers E4 (Sohle) im Messquerschnitt M1.

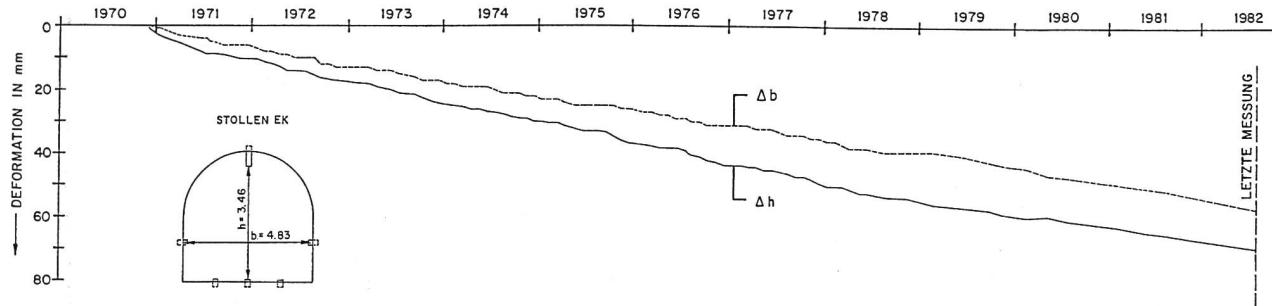


Bild 6. Deformationen des Stollens EK der NOK Ende 1970 bis August 1982.

dig. Zudem ist die Methode nur für isotrope und homogene Gebirgsverhältnisse anwendbar.

b) Messung bzw. Kontrolle des primären Gebirgsspannungszustandes

Wenn der Elastizitätsmodul des Gebirges schon anderweitig bestimmt wurde, kann ein zur Methode a) duales Verfahren angewendet werden, wodurch der primäre Gebirgsspannungszustand bestimmt werden kann. Zudem können Bohrloch-Spannungsmessungen direkt kontrolliert werden: Die *gemessene* Stollenkonvergenz muss mit der aus den Spannungsmessungen erwarteten *berechneten* Konvergenz übereinstimmen. Diese ist übrigens vom Elastizitätsmodul unabhängig, wenn dieser über den ganzen betrachteten Messquerschnitt konstant ist.

Die Auswertungsverfahren a) und b) stützen sich auf die übertragene Anwendung einer Theorie von *De la Cruz* und *Goodman* (1969). Beim Messprogramm Felsenau standen diese Verfahren nicht im Vordergrund. Es wird hier jedoch auf sie hingewiesen, da sie bei anderen Versuchsstollen von Interesse sein könnten.

c) Langzeitverhalten

Für die Messungen in der Felsenau konzentrierte man sich vor allem auf Aussagen über das Langzeitverhalten des Gebirges und hier wiederum über die Phänomene des Quellens.

#### Instrumentierung der Messquerschnitte

Bei der Anschaffung der Messgeräte für die Instrumentierung der Messquerschnitte ist neben der Leistungsfähigkeit (Auflösungsvermögen) auch auf die einfache und sichere Bedienung der Instrumente geachtet worden. Die Wahl fiel auf das Konvergenzmessgerät «Distometer ISETH» nach *Kovari et al.* (1974) und auf den Extensometer «Unirod-ISETH», die beide am Institut für Strassen-, Eisenbahn- und Felsbau (ISETH) der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich entwickelt worden sind. Die beiden Geräte konnten in den Messquerschnitten im Baukastenverfahren miteinander kombiniert werden.

Die Messuhren am Kraftmessteil sowie am Längenmessteil des Distometer-ISETH wurden durch die Messequipe direkt vor Ort abgelesen. Die Genauigkeit der Messungen mit dem Distometer-ISETH betrug im Versuchsstollen bei Drahtlängen  $< 20 \text{ m} \pm 0,02 \text{ mm}$ .

Der Extensometer wird mechanisch mit einem Setzdeflektometer abgelesen. Dieser besteht aus einem Taststift und einer Messuhr. Mit einer Kontrollhülse wurde der Setzdeflektometer geeicht. Seine Messgenauigkeit ist  $0,01 \text{ mm}$ ; sein Messbereich beträgt  $50 \text{ mm}$ , er konnte bei nachträgli-

chem Bedarf durch Nachstellen des Messgestänges erhöht werden.

#### Bau des Versuchsstollens und Instrumentierung

##### Ausbruch des Versuchsstollens

Der Versuchsstollen wurde in drei Etappen ausgebrochen. Wie in Bild 2 gezeigt, wurden die drei Etappen so festgesetzt, dass die Messquerschnitte jeweils möglichst früh hinter der momentanen Ortsbrust instrumentiert und zum erstenmal abgelesen werden konnten.

Die Vortriebsarbeiten wurden von der Gips-Union durch Bohren und Sprengen in Abschlägen von 1,50 bis 2,00 m ausgeführt. Die hohe Standfestigkeit des Gebirges (Ausbruchsklasse I) erlaubte ein Auffahren ohne Ausbau.

##### Bohrarbeiten

Für den Einbau der Extensometer waren horizontale und vertikal nach oben und nach unten gerichtete Bohrlöcher von 76 mm Durchmesser auf eine Tiefe von max. etwa 16 m zu bohren. Die rund 120 Bohrmeter wurden im Rotationskernverfahren gebohrt. Dabei durfte nur trocken gebohrt werden, um nicht durch Einleitung von Bohrwasser unbedachte, unkontrollierte Quellungen zu verursachen.

Die harten Anhydritschichten erlaubten im Trockenbohrverfahren lediglich eine Bohrgeschwindigkeit von 0,5 bis 0,8 m/h. Im übrigen konnten die Bohrarbeiten jedoch problemlos ausgeführt werden.

Die Anordnung der Bohrlöcher geht aus Bild 3 hervor.

##### Ausführung der Instrumentierung

Nach Abschluss der ersten Ausbruchsetappe (Bild 2) und der betreffenden Bohrarbeiten für die Extensometer wurden Mitte Juni 1977 die Extensometer der Messquerschnitte M1 und M3 versetzt.

Auf den Messköpfen der Extensometer befanden sich, wie bereits erwähnt, auch die Hauptmessbolzen für die Konvergenzmessungen. Somit konnte nach dem Versetzen der Extensometer sofort mit den ersten Ablesungen der Extensometer selbst und der Konvergenzmessstrecken begonnen werden. In diesem Zeitpunkt befand sich die Ortsbrust des Versuchsstollens 2,50 m vor dem Messquerschnitt M1 (Bild 2).

Die Extensometer im Messquerschnitt M2 wurden Mitte Juli 1977 1,50 m hinter der momentanen Ortsbrust des Versuchsstollens eingebaut.

Das Ausinjizieren der Extensometer musste mit grösster Vorsicht ausgeführt werden, da die Zuverlässigkeit des Extensometers mit der richtigen Verankerung der blanken, nicht umhüllten Gestängeenden und des Messkopfes steht oder fällt. Das Injektionsgut wurde durch einen Injektions-

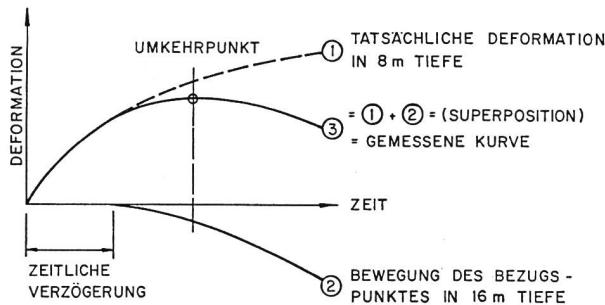


Bild 7, links. Deformation mit und ohne Berücksichtigung der Bewegung des Verankerungspunktes in 16 m Tiefe. Bild 8, rechts. Kupplungsstück zwischen Extensometer und Konvergenz-Messstrecke.

schlauch ins Bohrloch gepresst. Bei der vollständigen Verfüllung des Bohrloches trat Injektionsgut aus dem Entlüftungsrohr aus und zeigte das Ende des Injektionsvorganges an. Injektions- und Entlüftungsrohr wurden zusammen mit dem Stangenbündel ins Bohrloch geschoben. Die zusätzlichen 2 × 4 Kurzanker mit Messbolzen in den Messquerschnitten M1 und M2 für Konvergenzmessungen zur detaillierten Erfassung der Quellhebungen an der Stollensohle wurden schliesslich am 19. Februar 1978 versetzt.

#### Hilfseinrichtungen

In den Messquerschnitten M1 und M2 wurden Stahlrohrgerüste erstellt, um auf erhöhten Arbeitsplattformen gefahrlos an den Firstextensometern messen und vom Firstextensometer ausgehende Konvergenzmessstrecken einrichten zu können. Der Stollen konnte für die Ausführung der Messungen elektrisch gut ausgeleuchtet werden. Im weiteren ist am 31. Oktober 1977 der Stollen mit Plastikfolie abgeschlossen worden, um das Auftreten von Kondenswasser an den Felsoberflächen des Stollens zu eliminieren. Der Stollen wurde nicht gesichert, da er im grossen und ganzen standfest war. Um gefährliche Auswirkungen einzelner sich ablösender Gesteinspartien zu vermeiden, hat die Gips-Union in periodischen Abständen lockere Felspartien entfernt.

#### 4. Geologische Verhältnisse am Standort des Versuchsstollens

Das Gipsbergwerk Felsenau liegt im Muschelkalk des östlichen aargauischen Tafeljuras, unmittelbar westlich der Aaremündung in den Rhein. Die Lagerung des Schichtverbandes ist generell subhorizontal. Das Stollensystem des Gipsbergwerkes erschliesst vorwiegend die *Anhydritgruppe* des mittleren Muschelkalkes. Teilweise reichen die Stollen bzw. die vorhandenen Bohrungen ins Wellengebirge und in den darunter liegenden Buntsandstein hinab. Darunter folgt das permische Rotliegende.

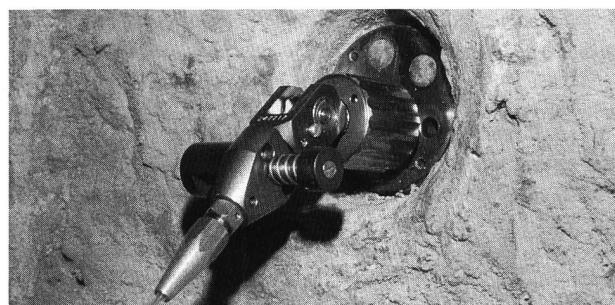
Die beschriebene Sedimentüberlagerung liegt auf dem kristallinen Grundgebirge des Schwarzwaldes, das unter der Felsenau etwa auf 200 m ü.M., d.h. etwa 110 m unter dem Wasserspiegel des Rheins, ansteht.

Diese Verhältnisse sind in Bild 1 dargestellt, wobei sich diese Darstellung auf Jäckli (1969) stützt.

Der Versuchsstollen selbst liegt höhenmässig ziemlich genau in der Mitte der Anhydritgruppe. Aufgrund des Stollenaufschlusses und der Rotationskernbohrungen für die Extensometer hat Ryf (1977) die geologischen Verhältnisse am Stollenstandort aufgenommen und beschrieben, woraus wir auszugsweise zitieren:

«Der Stollen wurde in anhydritischen Schichten angesetzt. Doch handelt es sich nicht um ein petrographisch ganz homogenes Vorkommen.

Die untere Hälfte des Stollens liegt in relativ massigem Anhydrit, der jedoch in 1,5 bis 2 m über der Stollensohle eine



tonhaltige, feingeschichtete Einlagerung enthält. Schichtparallel sind dünne Fasergipseinlagerungen eingeschaltet, und auch die eigentliche Anhydritschicht enthält gelegentlich noch etwas Gips.

Die obere Hälfte des Stollens liegt in feingebändertem bis geschichtetem Anhydrit, welcher dünne Lagen von Fasergips und Ton enthält. Im obersten Teil ist der Anhydrit leicht salzhaltig (Leckprobe, nicht analytisch untersucht).

Im hintersten Teil des Stollens erscheint im First mit scharfer Grenze ein schwarzer, salzhaltiger Ton mit Gipsbrocken. Es handelt sich dabei bereits um die über der Anhydritschicht folgende sogenannte «Obere Gipsbreccie», welche unerwünschterweise angefahren wurde, da dort offenbar lokal ein etwas stärkeres Schichtfallen auftritt, das vorher nicht zu erkennen war.

Die Bohrungen zeigen, dass die vom Stollen durchfahrene Anhydritschicht nur unwesentlich mächtiger als die Stollenhöhe selbst ist, trafen die Bohrungen doch unmittelbar nach dem Ansatzpunkt bereits andere Gesteine der liegenden bzw. der hangenden Schichten.

Die gegen oben gerichteten Bohrungen P2 und P6 durchfuhren zuerst die rund 5 m mächtige sogenannte «Obere Gipsbreccie» (vom Stollenfirst im hintersten Stollenteil angefahren), darüber eine Wechselleagerung von Gips und Anhydrit mit tonigen und dolomitischen Einlagerungen.

Die gegen unten führenden Bohrungen P4 und P8 trafen unmittelbar unter der Stollensohle einige Meter Gips, welcher dann von der «Unteren Gipsbreccie» unterlagert wird. Diese weist eine Mächtigkeit von 11 bis 13 m auf. Die unteren erbohrten Schichten waren wieder Gips und Anhydrit. Die horizontalen Bohrungen blieben erwartungsgemäss ganz in anhydritischen Schichten, z.T. mit tonigen Lagen.» Zur Veranschaulichung der lithologischen Verhältnisse im Bereich des Versuchsstollens dient Bild 1.

Die NOK-Deformationsmesskavernen DK und EK befinden sich in ähnlichen lithologischen Verhältnissen wie die Versuchskaverne der Nagra, d.h. ebenfalls in Gips und Anhydrit. DK und EG sitzen aber näher auf der unteren Gipsbreccie.

#### 5. Diskussion und Interpretation der Messresultate

In Kurzform sind die Messresultate der verschiedenen Deformationsmessungen in den Tabellen 1 und 2 zusammengestellt. Dargestellt ist die Messperiode vom Beginn der Messungen im Juni bzw. Juli 1977 bis August 1983.

#### Extensometermessungen

Tabelle 1 zeigt die Messresultate der Extensometermessungen. Da ja die Messquerschnitte M1 und M2 gleich instrumentiert wurden, sind zum Vergleich jeweils die entsprechenden Messgeräte gerade hintereinander angegeben.

Tabelle 1. Zusammengefasste Messresultate der Extensometer in den Messquerschnitten M1 und M2.

Messquerschnitt	Extensometer	Lage	Oberflächenpunkt	2 m Tiefe	4 m Tiefe	8 m Tiefe	Kurvenverlauf
M1 M2	E1 E5	links horiz.	+4,5 +7,1	+2,0 (44 %) +0,6 (8 %)	+0,4 (9 %) +0,6 (8 %)	+0,4 (9 %) +0,6 (8 %)	linear zunehmend fast linear zunehmend
M1 M2	E2 E6	Scheitel	+14,1 (+55)* +0,3 (+38)*	-3,0 (-21 %) -0,9 (-300 %)	-3,0 (-21 %) -1,2 (-400 %)	-2,5 (-18 %) -1,0 (-333 %)	Abklingen nach einigen Monaten; dann Beschleunigung asymptotischer Anstieg in einigen Monaten, dann Umkehr und linearer Abfall
M1 M2	E3 E7	rechts horiz.	+7,0 +8,1	+5,7 (81 %) +6,6 (81 %)	+3,0 (43 %) +4,5 (55 %)	-	leicht beschleunigt zunehmend leicht beschleunigt zunehmend
M1 M2	E4 E8	Sohle	+13,2 (+10)* +8,0 (+4)*	+4,2 (33 %) -1,6 (-20 %)	-0,8 (-6 %) -3,6 (-45 %)	-1,4 (-11 %) -2,8 (-35 %)	An Oberfläche noch lineare Zunahme; asymptotisches Abklingen bei 2 m. Bei 4 und 8 m Umkehr von + auf - nach ca. 2 1/2 Jahren asymptotisches Abklingen an Oberfläche. In 2, 4, 8 m Umkehr von + auf - nach ca. 2 1/2 Jahren

M1: Messperiode 20.06.1977 – Ende August 1983 (ca. 74 Monate)

M2: Messperiode 20.07.1977 – Ende August 1983 (ca. 73 Monate)

Angaben in mm; in Klammern sind die Verschiebungen in % der Verschiebung des Oberflächenpunktes angegeben.

+ bedeutet Bewegung in Stollen hinein

\* aus Präzisionsnivelllement (Messbeginn erst 28.12.1977)

#### Horizontale Deformation

In M1 zeigt der linke Extensometer E1 an der Stollenoberfläche eine Einwärtsbewegung von 4,5 mm relativ zur Verankerung in 16 m Tiefe an. Der analoge Wert in M2 beträgt 7,1 mm. Die Deformationen in zunehmender Tiefe im Fels betragen in M1 und M2 (Klammerwerte) in 2,4 und 8 m Tiefe 44% (8%), 9% (8%) des Oberflächenwertes. Diese Deformationen entwickelten sich zeitlich fast linear. Pro Zeiteinheit ist also keine Abnahme der Bewegungen zu verzeichnen. Die rechten horizontalen Extensometer E3 und E7 ergeben an der Stollenoberfläche eine Einwärtsbewegung von 7,0 mm bzw. 8,1 mm. In 2 m Tiefe wurden 81% (81%) und in 4 m Tiefe noch 43% (55%) der Oberflächenwerte gemessen. Die Deformationen entwickelten sich zeitlich linear.

#### Vertikale Deformationen

Die Scheitelsenkungen in M1 und M2 betragen gemäss den Extensometern E2 und E6 14,1 mm bzw. 0,3 mm. 2,4 und 8 m über dem Scheitel wurden -11% (-300%), -21% (-400%) und -18% (-333%) der Oberflächenwerte festgestellt.

Die zeitliche Entwicklung der Scheitelsenkungen in M1 zeigte einige Monate nach Messbeginn ein deutliches Abklingen. Ab etwa zwei Jahren nach Messbeginn wurde eine Beschleunigung verzeichnet.

Die Entwicklung der Scheitelsenkungen in M2 zeigte in den ersten Monaten ein asymptotisches Abklingen; dann trat eine Umkehr der gemessenen Relativbewegungen auf. Im weiteren war eine fast lineare Abnahme der Messwerte (re-

Tabelle 2. Vergleich der Messresultate aus Extensometer- und Konvergenzmessungen sowie Nivellement.

	Horizontale Stollenkonvergenz		Vertikale Stollenkonvergenz	
	M1	M2	M1	M2
Extensometermessung	+11,5	+15,2	+27,3	+8,3
Konvergenzmessung (Distometer)	-1,4	+0,2	+74,0	+51,0
Präzisionsnivelllement (Messbeginn erst 28.12.1977)			+65,0	+42,0
Konvergenzmessung EK-NOK (zum Vergleich in gleich langer Messperiode)	+30,0		+43,0	

+ bedeutet Verkürzung der Messstrecke

lative Hebung) zu beobachten. Auf dieses eigenartig erscheinende Verhalten – das auch an der Stollensohle zu sehen ist – kommen wir beim Vergleich der Extensometer-, Distometer- und Nivellementmessungen zurück.

*Die Sohlenhebungen* in M1 und M2 betragen gemäss den Extensometern E4 und E8 13,2 mm bzw. 8,0 mm. 2,4 und 8 m unter der Sohle wurden 33% (-20%), -6% (-45%) und -11% (-35%) der Oberflächenwerte gemessen.

Die Sohlenhebung in M1 zeigt ein sehr deutliches asymptotisches Abklingen über die ganze Messperiode. In 2 m Tiefe haben die Bewegungen fast aufgehört. In 4 und 8 m Tiefe ist etwa 2½ Jahre nach Messbeginn eine Umkehr der relativen Bewegungen von plus (Hebung) auf minus (Senkung) zu verzeichnen.

Auch in M2 zeigt die Sohlenhebung ein asymptotisches Abklingen. In 2,4 und 8 m Tiefe ist ebenfalls eine Umkehr der Messwerte von plus auf minus etwa 2½ Jahre nach Messbeginn feststellbar.

#### *Vergleich der Extensometermessungen mit den Konvergenzmessungen und den nivellitischen Kontrollmessungen (Tabelle 2)*

##### *Horizontale Stollenkonvergenz*

Die gemessene totale horizontale Stollenkonvergenz beträgt in M1 -1,4 mm sowie in M2 +0,2 mm. Überraschenderweise wurde eine leichte Verbreiterung des Stollens festgestellt. Überraschend deshalb, weil aus den horizontalen Oberflächenwerten der Extensometer in M1 eine Stollenverengung von +11,5 mm und in M2 eine solche von +15,2 mm berechnet wird.

Diese Diskrepanz kann durch folgende Modellvorstellung des Bewegungsbildes behoben werden: Das linke (östliche) Felsparament des Versuchsstollens zeigt ein normales Deformationsverhalten. Die Extensometer E1 und E5 zeigen an, dass die Stollenoberfläche um 4,5 mm bzw. 7,1 mm horizontal hineingewandert ist. Mit zunehmender Tiefe nach links in den Fels hinein nehmen die Deformationen sehr rasch ab, wie die schon aufgeführten Prozentzahlen zeigen. Anders steht es mit dem rechten (westlichen) Felsparament, das ja nur aus einem 6 m dicken Felspfeiler besteht, wobei dahinter ein Nachbarstollen anschliesst. Offenbar hat die horizontale Dicke dieses Felspfeilers gemäss den Extensometern E3 und E7 um 7,0 mm bzw. 8,1 mm zugenommen. Die Ausdehnung ist aber in Richtung des Nachbarstollens erfolgt, wobei sich der Felspfeiler als ganzes gegen Westen verschoben hat. Die Verschiebungen erfolgen so, dass überall dieselbe horizontale Dehnung herrscht. Als Grund für dieses Deformationsverhalten kann die Vergrösserung der Druckspannungen auf den Felspfeiler nach dem Aushub des Versuchsstollens angenommen werden. Dass die Deformationen asymmetrisch gegen den Nachbarstollen gerichtet sind, ergibt sich wohl daher, weil die starken Sohlen- und Scheitelquellungen am Versuchsstollen die Tendenz haben, den seitlichen Felspfeiler wegzuschieben.

##### *Vertikale Stollenkonvergenz*

Die gemessene totale vertikale Stollenkonvergenz beträgt in M1 +74,0 mm und in M2 +51,0 mm. Aus den nivellitischen Kontrollmessungen kann für eine etwas kürzere Messperiode eine Stollenkonvergenz von +65,0 mm für M1 und +42,0 mm für M2 interpretiert werden. Aus den Extensometermessungen berechnen sich für M1 nur +27,3 mm sowie für M2 +8,3 mm.

Die direkten Konvergenzmessungen mit dem Distometer liefern Resultate, die als gut gesichert gelten können, da sie auf keinerlei Hypothesen bezüglich des Verhaltens von

Bezugspunkten (Fixpunkten) beruhen. Zudem zeigen die nivellitischen Kontrollmessungen eine übereinstimmende Grössenordnung der vertikalen Konvergenz an.

Aus den Extensometermessungen werden nun aber wesentlich geringere Konvergenzen berechnet. Es muss deshalb gefolgert werden, dass die Fixpunkte der Extensometer in 16 m Tiefe in Tat und Wahrheit nicht fest sind, sondern sich auch noch bewegen, d.h. immer noch im Einflussbereich des Versuchsstollens liegen.

Diese Feststellung kann noch weiter verfeinert und dazu benutzt werden, um zu erklären, warum über dem Scheitel und unter der Sohle im Laufe der Zeit zum Teil eine Umkehr der relativen Bewegungsrichtungen auftrat.

In Bild 7 gibt die Kurve 3 die relative Bewegung in 8 m Tiefe an, wie sie erhalten wird, wenn man sie – wie das üblich ist – bei der Auswertung auf den tiefsten Extensometerfixpunkt (in 16 m Tiefe) bezieht. Die tatsächliche Deformation in 8 m Tiefe, bezogen auf einen raumfesten Nullpunkt, wäre aber durch Kurve 1 gegeben. Die gemessene Kurve 3 zeigt eine Umkehr der Bewegung, weil sich mit einer zeitlichen Verzögerung auch der Fixpunkt in 16 m Tiefe in Bewegung gesetzt hat.

Die zeitliche Verzögerung bedeutet nun, dass nach dem Stollenausbruch eine gewisse Zeit verstrich, bis die weiter weg liegenden Felsgebiete sich zu deformieren begannen. Das Einsetzen der Deformationen wandert somit mit der Zeit vom Ausbruchrand weg ins Gebirge hinein. Wenn nur die Kurve 3 bekannt ist, kann die ungefähre Verzögerungszeit aus dem Umkehrpunkt (horizontale Tangente) abgeschätzt werden.

## **6. Schlussfolgerungen**

Zu den Untersuchungszielen (Fragen 1 bis 11) der Deformationsmessungen im Gipsbergwerk Felsenau können abschliessend folgende Antworten gegeben werden:

1.

Das grossmassstäbliche Quellverhalten am Versuchsstollen ist über die 74 Messmonate durch eine ziemlich lineare Zunahme der quellbedingten Stollenkonvergenzen charakterisiert. Die Konvergenzbewegungen des ganzen Durchmessers betragen in vertikaler Richtung rund 0,75 mm bis 1,0 mm pro Monat. In horizontaler Richtung sind die Deformationen kleiner.

Der Messstollen EK der NOK (Bild 6) zeigt, dass die Stollenkonvergenzen selbst noch nach 12 Jahren immer mit gleichbleibender monatlicher Zuwachsrate linear weitergehen. Im NOK-Stollen beträgt die monatliche Zuwachsrate in vertikaler Richtung rund 0,4 mm, in horizontaler Richtung rund 0,375 mm. Wie beim Nagra-Versuchsstollen ist die vertikale Konvergenz grösser als die horizontale. Doch ist das Anisotropieverhältnis im NOK-Stollen weniger ausgeprägt.

Diese langjährige Entwicklung steht in Übereinstimmung mit Messungen an anderen Bauwerken. So sind z.B. am Wagenburgtunnel in Stuttgart gemäss dem Bundesministerium für Verkehr (1975) an gewissen Stellen dieses Tunnels, der im Gipskeuper liegt, von 1962 bis 1974 Hebungen beobachtet worden, die am Ende der Messperiode noch keineswegs abgeklungen waren. Bei genügend stark verkleideten Tunneln können die Hebungen beschränkt werden, und auch die Quelldrücke scheinen dann einem Endwert zuzustreben, weil der durch die Auskleidung erzeugte Gegendruck oft eine stabilisierende Wirkung auf die Quellvorgänge ausübt, Gyse (1987) und Grob (1972). Letzterer hat vom Belchentunnel berichtet, wo im Gipskeuper langfristige Quelldruckentwicklungen stattfanden. Demgegenüber quellen Mergel und Tone oft viel rascher.

2.

Die langfristige Stabilität des unverkleideten Stollens kann unter den gegebenen Verhältnissen bejaht werden. Immerhin sind in der 6jährigen Beobachtungszeit immer wieder kleine Niederbrüche eingetreten. Zur Erhöhung der Sicherheit müsste eine leichte Felssicherung vorgesehen werden. Die Felssicherungen müssten so flexibel sein (Anker und Netze), dass sich die Quellungen unbehindert entwickeln können. Es hätte keinen Sinn, die Quellungen verhindern zu wollen, weil dazu viel zu aufwendige, aber auch unnötige Massnahmen notwendig wären (sehr dicke, starre Betonauskleidungen).

Quellungen in der Größenordnung von 10 mm/Jahr am Durchmesser gefährden die Benutzung der Stollen für verschiedene Zwecke über Jahre nicht.

3.

Die Messungen zeigen, dass die ersten Meter (2 bis 3 m) am Ausbruchrand weitaus am stärksten quellen. Dieses Resultat konnte durch den Einsatz der Mehrfachextensometer gewonnen werden. Es wird angenommen, dass die Sprengauflockerung und die grösste Spannungsumlagerung in der Nähe des Stollens dafür Ursache sind.

Weiter aussen liegende Gebirgspartien quellen viel schwächer. Jedoch scheinen mit der Zeit auch weiter aussen liegende Schichten anzufangen zu quellen. Überraschenderweise sind selbst in 16 m Entfernung vom Stollen – der nur einen Durchmesser von etwa 4,5 m aufweist – noch beachtliche Bewegungen feststellbar.

4.

Die Messungen zeigen, dass die Wechsellegerung von Anhydrit und anderen Gesteinen einen bedeutenden Einfluss auf das Quellverhalten ausübt. Senkrecht zur Schichtung ist das Quellen viel ausgeprägter als parallel dazu. Deshalb sind die Quellungen im Versuchsstollen in vertikaler Richtung viel grösser als in horizontaler Richtung. Dieses Verhalten wird durch den besseren Wasserzutritt auf vielen engständigen Schichtflächen bewirkt.

5.

Die Messungen zeigen, dass massive Partien aus Anhydrit viel schwächer quellen als wechselgelagertes Anhydritgebirge. Dies zeigt sich aus den horizontalen Extensometer- und Konvergenzmessungen, die im Versuchsstollen stark durch eine relativ massive Anhydritschicht auf dem Stollenniveau beeinflusst wurden. Damit ist bestätigt, dass der für das Quellen benötigte Wasserzutritt bei massigem Gesteinscharakter stark verhindert ist.

6.

Im Falle des Versuchsstollens quillt die Stollensohle nicht stärker als der Stollenscheitel. Von der Quelldrucktheorie her ist das zu verstehen, da Sohle und Scheitel dieselben sekundären Spannungsverhältnisse aufweisen. Am Versuchsstollen kommt dies wahrscheinlich schöner heraus als anderswo, weil kein Wasser auf der Stollensohle fliesst. Aufgrund der nivellitischen Kontrollmessungen quillt der Scheitel sogar stärker als die Sohle. Aus der Geologie kann dies erklärt werden, weil die obere Gipsbrecce (über dem Stollen gelegen) viel weniger mächtig ist als die untere Gipsbrecce (unter dem Stollen gelegen) und weil über der oberen Gipsbrecce gleich wieder Wechsellegerungen von Anhydrit und Gips anschliessen.

7.

Darauf, ob das Gebirge durch die Quellungen abgedichtet wird oder nicht, geben die Messungen keine direkte Antwort. Es kann aber festgestellt werden, dass die vom Quellen betroffenen Gebiete am Ende der Messungen noch zunahmen und sich ins Gebirge hinein ausbreiteten. Eine di-

rekte Beobachtung einer Abdichtungswirkung infolge der Quellungen war nicht möglich, weil der Versuchsstollen von Anfang an trocken war. Die einzige Tropfwasserstelle (Firstextensometer in M1) ist durch das betreffende Bohrloch verursacht worden und hat etwa gleichbleibend immer etwas Tropfwasser gebracht.

Messtechnisch könnte die Dichtheit des Gebirges in Funktion der Zeit mittels Ultraschall-Laufzeitmessungen auf festen Messstellen von Bohrloch zu Bohrloch überwacht werden. Eine im Laufe der Zeit durch periodische Nachmessungen festgestellte Geschwindigkeitserhöhung entspräche einer durch das Quellen verursachten Schliessung von Klüften und Rissen usw. mit der entsprechenden Abdichtung.

Dieses Verfahren wurde schon angewendet, um den Erfolg von Konsolidations- und Abdichtungs injektionen zu überprüfen. Die Methode sollte im Auge behalten werden, da Ultraschallprofile (etwa 2 m Bohrlochabstand) theoretisch bessere Aufschlüsse über die Vorgänge in den Quellzonen ergeben sollten als etwa punktuelle Wasserabpressversuche in Bohrlöchern.

8.

Vergleich mit Quellversuchen im Labor: Aus Quelluntersuchungen, welche die Nagra am Institut für Grundbau und Bodenmechanik (IGB) der ETH Zürich durchführen liess, *Amberg* (1977), konnte das Quellverhalten von Anhydritproben aus Ryburg und von der Wandfluh untersucht werden. Die untersuchten unbehandelten Proben stammen zum Teil aus ähnlichen Verhältnissen, wie sie in der Felsenau vorliegen, so dass Vergleiche sinnvoll erscheinen.

Im einjährigen, nicht abgeschlossenen Quellhebungsversuch traten im Labor monatliche Hebungs räten von 0,5 bis 2,5% in anfänglich destilliertem Wasser auf.

Im Feldversuch Felsenau traten an der Sohle folgende Hebungs räten im Nagra-Versuchsstollen auf:

0,05% pro Monat, bezogen auf 4 m Schicht unter Sohle  
0,07% pro Monat, bezogen auf 2 m Schicht unter Sohle

Es zeigt sich also, dass die Hebungen im Feld mindestens zehnmal langsamer ablaufen. Es wird angenommen, dass dies auf der langsameren Zufuhr des für die Umwandlungsprozesse benötigten Wassers beruht.

In einem Beispiel kann versucht werden, aus dem einjährigen Laborversuch die Queldeformation im NOK-Stollen EK nach 10 Jahren vorauszusagen:

Annahmen:

- Vom einjährigen Laborversuch wird angenommen: Zuwachsrate 0,5% pro Monat.
- Die Geschwindigkeit im Feld beträgt  $\frac{1}{10}$  der Laborgeschwindigkeit.
- Die Hauptquellungszone unter der Sohle hat eine Dicke von rund 4 m. Dies kann aus Tabelle 1 geschlossen werden. (Die Sohlen des NOK-EK-Stollens und des Nagra-Stollens sind etwa gleich breit. Die Gebirgsüberlagerung stimmt fast überein. Die Abweichung beträgt nur 10%).

Daraus berechnet sich die Sohlhebung im Stollen nach 10 Jahren zu:

$$0,5\% \text{ pro Monat} \times 12 \text{ Monate} \times \frac{1}{10} (\text{Jahre}) \times 4000 \text{ mm} = 24 \text{ mm}$$

Ein Vergleich mit dem Messprotokoll zeigt, dass die gemessene Sohlhebung nach 10 Jahren 30 mm beträgt.

Für die Quellverhältnisse in der Anhydritgruppe des Tafeljuras scheint es also möglich zu sein, entsprechende Modelle aufzustellen, um aus zeitlich befristeten Laborversuchen auf die Grösse von langjährigen Quellungen im Stollen zu schliessen.

Für abschliessende Urteile bei der Übertragung von Laborwerten auf die Stollenverhältnisse müsste dafür gesorgt werden, dass einige Laborversuche bis zum völligen Abklingen der Quellungen zu Ende geführt werden können. Mit dem gefundenen Zeitmassstab wurde ein zeitlicher Korrelationswert für die Quellgeschwindigkeiten im Labor und im Stollen gefunden. Es wurde zudem festgestellt, dass mit der notwendigen Anschauung der wirklichen Abläufe auch die Grösse der Quellungen des Stollens aus dem Laborversuch abgeschätzt werden kann.

9.

Einfluss der Raumfeuchtigkeit: Durch die Abtrennung des Versuchsstollens durch eine Plastikfolie konnte die Raumfeuchtigkeit im Versuchsstollen erheblich gesenkt werden. Dies zeigte sich dadurch, dass die vorher durch Kondenswasser feucht gewordenen Felsoberflächen im hinteren Teil des Stollens austrockneten und die ganze Stollenoberfläche seither trocken war. Die Luftfeuchtigkeit wurde im Versuchsstollen danach ständig kontrolliert. Die jahreszeitlich bedingten Schwankungen der Luftfeuchtigkeit zeigen keinen signifikanten Einfluss auf die Quelldeformationen. Dies wird darauf zurückgeführt, dass keine merkliche Kondensation mehr an der Felsoberfläche stattfand. Zudem dürfte die freie (staubbedeckte) Stollenoberfläche gegenüber der im Gestein wirksamen inneren Oberfläche eine geringe Rolle in bezug auf die gesamten Quellungen spielen. Für einen Lagerstollen dürfte jedoch auf jeden Fall ein Lüftungsregime vorteilhaft sein, das so ausgelegt wird, dass Auskondensationen an der Stollenoberfläche vermieden werden.

10.

Die Frage, ob die gemessenen Deformationen vorwiegend als Quelldeformationen angesprochen werden dürfen oder ob noch andere Vorgänge massgeblich an den Gesamtdeformationen beteiligt sind, kann wie folgt beantwortet werden:

Über die mit der Spannungsumlagerung während des Ausbruchs des Stollens verbundenen elastischen bzw. elasto-plastischen Verformungen gibt der seitlich vom Nachbarstollen versetzte Extensometer E9 gute Auskunft. Die Spannungsumlagerung verursachte Radialverschiebungen von etwa 1 mm.

Bei den gemessenen Konvergenzen von 40 bis 70 mm (20 bis 35 mm Radius) müssen also andere Mechanismen im Spiel sein. Die oft fast lineare Zunahme der Deformationen könnte ein langsames Kriechen des Gesteins unter den wirkenden Spannungen vermuten lassen. Dazu müsste die Langzeit-Scherfestigkeit des Gesteins unter der wirkenden Last dauernd überschritten sein. Einfache Abschätzungen zeigen, dass dies wohl nicht der Fall ist. Die Gesteinsscherfestigkeit wird im Gesteinsring am Stollenrand unter einem isotropen oder auch anisotropen, primären Gebirgsspannungszustand nicht überschritten (bei einer Überlagerung von 100 m).

Die Spannungen haben aber doch eine Höhe, bei der nicht ausgeschlossen werden kann, dass gewisse mergelige-tonige Gesteinspartien leicht kriechen. Es wird jedoch angenommen, dass 10 mm/Jahr nicht annähernd erreicht würden. Deshalb wird gefolgert, dass die gemessenen Deformationen hauptsächlich durch Quellvorgänge hervorgerufen werden.

11.

Bewährung der angeordneten Messkonfigurationen und Messgeräte:

Die Anordnung von zwei identisch ausgerüsteten Messquerschnitten M1 und M2 hat sich bewährt. Damit konnte

klar festgestellt und kontrolliert werden, ob bestimmte Messwerte das Gebirgsverhalten wiedergeben oder ob messtechnische Fehler auftraten.

Die Kontrollmöglichkeiten, die durch den teils parallelen Einsatz von verschiedenen Messsystemen erreicht wurden (Extensometer-, Konvergenzmessungen, Nivellements), haben äusserst nützliche Kontrollen erlaubt. Zudem konnten durch diese Überbestimmung offene Fragen durch den Vergleich der Messresultate beantwortet werden.

Der in M3 vom Nachbarstollen aus versetzte Extensometer hat sich gut bewährt zur Erfassung der Gebirgsdeformationen infolge Spannungsumlagerung beim Vortrieb des Versuchsstollens. Schon bevor der Stollen die Messebene des Extensometers erreicht hatte, traten erhebliche Deformationen ein. Dieses Resultat ist tunnelbautechnisch interessant und bestätigt die vermuteten Vorgänge im noch jungfräulichen Gebirge vor dem an kommenden Tunnel.

Die Verankerung der Extensometer war mit 16 m Tiefe zu wenig tief, um ausserhalb des Einflussbereichs des 4,5-m-Stollens zu liegen. Diese Aussage gilt vor allem für die vertikal versetzten Extensometer, die senkrecht durch das Schichtpaket hindurchfahren.

Die Mehrfach-Stangenextensometer des IETH funktionieren tadellos, und ihre Ablesung ist einfach. Der Distometer für die Konvergenzmessungen arbeitet gut. Es ist allerdings eine Messequipe von drei Mann erforderlich, um Geräte und Drahtrollen zu manipulieren und um die Messungen zu protokollieren. Reproduzierbarkeit und Genauigkeit sind sowohl für die Extensometer wie auch für den Distometer sehr gut und entsprechen den Angaben der Hersteller. Reparaturen wurden nur selten notwendig; am ehesten kam der Fall vor, dass eine Messuhr des Distometers ersetzt werden musste. Ansonsten sind die gewählten Geräte sehr robust und haben die in sie gesetzten Erwartungen bezüglich Haltbarkeit usw. erfüllt.

*Amberg, G. (14.12.1977): Quelluntersuchungen an Anhydritgestein. Bericht des Instituts für Grundbau und Bodenmechanik der ETH, Nr. 3622*

*Bundesministerium für Verkehr, Abt. Strassenbau, Bonn (1975): Durchführung eines felsmechanischen Grossversuches in der Nordröhre des Wagenburgtunnels in Stuttgart. «Schriftenhette Strassenbau und Strassenverkehrstechnik» Heft 184*

*De la Cruz, R., Goodman, R. (1969): The Borehole Deepening Method of Stress Measurement. International Symposium on the Determination of Stresses in the Rock Masses, Lisbon*

*Gassmann, J., Gysel, M., Schneider, J.F. (1979): Anhydrit als Wirtsgestein für die Endlagerung radioaktiver Abfälle in der Schweiz. Nagra, Technischer Bericht 12*

*Grob, H. (11.-14.9.1972): Schwelldruck im Belchentunnel. In: H. Grob und K. Kovari Berichte, Internationales Symposium für Untertagebau, p. 98-119 Luzern*

*Gysel, M. 1987: The Design of Tunnels in Swelling Rock. «Rock Mechanics and Rock Engineering»*

*Jäckli, H. (22.8.1969): Einlagerung von radioaktiven Rückständen im Gipsbergwerk Felsenau (Gde. Reuenthal AG). Bericht an die NOK*

*Kovari, K., Amstad, Ch., Grob, H. (1974): Messung von Verschiebungen und Deformationen an Bauwerken mit dem Distometer IETH. «Schweizerische Bauzeitung» 92, Heft 36*

*Ryf, W. (20.10.1977): Versuchsstollen Nagra 1977 im Gipsbergwerk Felsenau der Gips-Union. Geologische Aufnahme. Bericht Büro Dr. H. Jäckli an die Nagra*

Der Nagra, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, danken wir für die Erlaubnis, diese Zusammenfassung aus dem internen Bericht 85-07 «Die Deformationsmessungen im Gipsbergwerk Felsenau, Schlussbericht vom Mai 1985» der Motor-Columbus-Ingenieurunternehmung AG, Baden, hier zu veröffentlichen.

Adresse des Verfassers: Dr. Martin Gysel, dipl. Ing. ETHZ, Locher & Cie AG, Pelikanplatz 5, CH-8022 Zürich.