

# Wie sicher sind geologische Prognosen?

Autor(en): **Löw, Simon**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Schweizer Ingenieur und Architekt**

Band (Jahr): **116 (1998)**

Heft 23

PDF erstellt am: **12.07.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-79517>

## **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.

Simon Löw, Zürich

## Wie sicher sind geologische Prognosen?

**Insbesondere im Zusammenhang mit Tunnelvorhaben, Naturgefahren, Energie- und Deponieprojekten hat sich in den letzten Jahrzehnten immer wieder die Frage nach der Zuverlässigkeit geologischer Prognosen gestellt. Der vorliegende Artikel fasst Erkenntnisse zum Verstehen der Zuverlässigkeit geologischer Prognosen und neuere Methoden zur Bewältigung ihrer Unsicherheiten zusammen. Die Ursachen geologischer Unsicherheiten und die Methoden ihrer qualitativen und quantitativen Bewertung werden anhand einer Anzahl von Beispielen aus der Schweiz und dem Ausland erläutert.**

Am 20. November 1930 erliess der Regierungsrat des Kantons Glarus den Beschluss, aufgrund eines drohenden Bergsturzes vom Kilchenstock das Gebiet von Linthal zu räumen (Bild 1). Mit Unterstützung des Militärs wurden am 21. und 22. November 68 Familien umgesiedelt, 61 Häuser vollständig und 25 Häuser teilweise evakuiert.

Seit etwa 100 Jahren hatten sich zuvor kleinere bis mittlere Felsstürze und Murgänge vom Kilchenstock ereignet, die bis an den südöstlichen Dorfrand vorstießen, aber das Dorf selbst nicht tangierten. Gegen Ende der 20er Jahre wurde von der Bevölkerung eine Intensivierung solcher Ereignisse beobachtet. Im Herbst 1926 wurde man darauf aufmerksam, dass die oberste gegen Linthal geneigte Felskuppe des Kilchenstocks viele neue Risse aufwies. Im Jahr 1928 wurden durch die Geologen zunehmende Öffnungsbeträge solcher Risse festgestellt und durch eine beratende Versammlung eine kontinuierliche geodätische Vermessung des Abrissgebiets mit horizontalen Messlatten, photogrammetrischen Aufnahmen, trigonometrischen Vermessungen und Fernmessungen beschlossen.

Die Felsen des Kilchenstocks bestehen aus einer subhorizontalen Wechselagerung von quarzitäen Sandsteinen und Tonschiefern des nordhelvetischen Flyschs, die durch eine vertikale Klüftung und gegen Linthal einfallende Brüche durchtrennt werden (Bild 2). Die geodätischen Messungen zeigten zwei sich lang-

sam hangabwärts bewegende Sandsteinmassen von insgesamt 15–25 m Mächtigkeit, 350 m Länge und rund 100 m Breite [1]. Die Fallrichtung betrug im Mittel 33 Grad gegen NW (d.h. auf Linthal zu). Bis zum Jahr 1932 wurden zunehmend höhere Bewegungsgeschwindigkeiten festgestellt (Bild 3). Die im November 1930, dem Zeitpunkt des Beschlusses der Räumung von Linthal, festgestellten Bewegungsgeschwindigkeiten waren die damals grössten je gemessenen Werte.

Die beigezogenen und in bezug auf Bergstürze und Geologie der Schweiz hochqualifizierten ETH-Professoren Staub und Heim prognostizierten eine Sturzmasse von insgesamt mindestens 250 000 m<sup>3</sup>, die sich insbesondere via eine schmale Hauptsturzfurche (Ätschrun, Bild 1) bergsturzartig über ein grösseres Gebiet links- und rechtsseitig der Linth ausbreiten würde [1]. Im November 1930 empfahlen Heim und Staub die Räumung des gefährdeten Gebiets.

Doch auch schon zu dieser Zeit gab es unterschiedliche Interpretationen desselben geologischen Befundes. So schrieb der ETH-Professor Schardt in einem Gutachten des Jahres 1928 [2], dass kein Grund vorhanden sei, dass Schlimmste (d.h. einen grossen Bergsturz) vorauszusehen. Ohne besondere Massnahmen würde sich der Felsabsturz nur partienweise während langen Jahren vollziehen. Um dieser relativ kleinen Gefährdung vorzubeugen, und als Schutz gegen Murgänge, wurde 1930 ein 500 m langer Schutzdamm errichtet (Bild 1).

Der vorliegende Artikel stellt eine gekürzte Zusammenfassung der Antrittsvorlesung des Autors an der ETH Zürich vom 28.5.1997 dar.

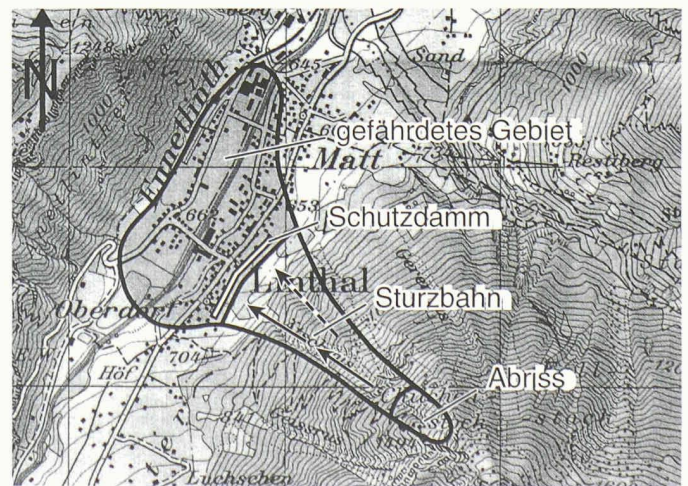
Nach dem Entscheid zur Räumung von Linthal im November 1930 häuften sich die kleinen Felsstürze (Bild 4, nach [3]), es erreichten jedoch nur wenige Steinblöcke den Talboden. Auch die Murgänge nahmen in ihrer Häufigkeit zu (Bild 4), sie wurden jedoch vom Schutzdamm wirkungsvoll zurückgehalten. Die Bewegungsgeschwindigkeit der Felsmasse im Anrissgebiet verstärkte sich noch massiv und führte zu totalen horizontalen Verschiebungsbeträgen in den Jahren 1927–1932 von bis zu 4 m (Bild 3). Im Juli 1932 wurde eine zweite Evakuierung beschlossen.

Wie von Schardt angekündigt, verlief der Abbruch durchwegs in kleinen ungefährlichen Portionen. Ein Bergsturz im Sinne der Prognose von Heim traf nie ein. Wichtig in der Bewertung dieses «Falles» ist die Feststellung, dass der Kilchenstock der erste potentielle Bergsturz mit umfassenden präzisen Vermessungsdaten über einen längeren Zeitraum war. Erfahrungswerte in der Bewertung solcher Messdaten lagen zu diesem Zeitpunkt nicht vor; die entsprechenden Bewegungsabläufe konnten zu dieser Zeit noch nicht quantitativ behandelt werden.

### Charakteristiken geologischer Prognosen

Eine zentrale Aufgabe des Ingenieurgeologen sind Prognosen über den geologischen Aufbau von Projektregionen und über das Verhalten von Gebirgen, oder anders ausgedrückt: die Charakterisierung von heutigen und zukünftigen geologi-

1  
Abrissgebiet, Sturzbahn und gefährdetes Gebiet des potentiellen Bergsturzes von Linthal (reproduziert mit Bewilligung des Bundesamts für Landestopographie vom 6.11.97)



schen Systemzuständen und -reaktionen. Für Bauvorhaben und die Nutzung von Ressourcen wie Kohlenwasserstoffe und Wasser ist darum die Kenntnis

- der Geometrie geologischer Einheiten,
- der Materialeigenschaften geologischer Einheiten und
- der Prozesse und Stoffgesetze (konstitutive Beziehungen) unter natürlichen und künstlichen Bedingungen von grosser Wichtigkeit (Bild 5).

Bei der Bewertung von Naturgefahren (z.B. Bergstürze, Erdbeben) und dem Langzeitverhalten von Deponien und Endlagern ist zudem die Kenntnis zukünftiger geologischer Abläufe und Materialeigenschaften von Bedeutung. Diese können von den heute ablaufenden Prozessen abweichen oder durch andere Systemeigenschaften als den heute wirksamen gesteuert werden (Bild 5, unten), da es sich bei solchen Prognosen zum Teil um sehr lange Prognosezeiträume handelt (z.B. erhöhte Erosionsraten über einem Endlager bei verändertem Klima).

Alle derartigen geologischen Prognosen werden auch in der Zukunft immer mit Unsicherheiten behaftet sein, da auch mit modernsten Methoden nie eine umfassende Charakterisierung eines geologischen Systems möglich sein wird. Für den Umgang mit dieser inhärenten Unsicherheit ist das Verständnis ihrer Ursachen und die Quantifizierung derselben von grosser Wichtigkeit. Darum wird im folgenden auf zwei Fragenkomplexe näher eingetreten:

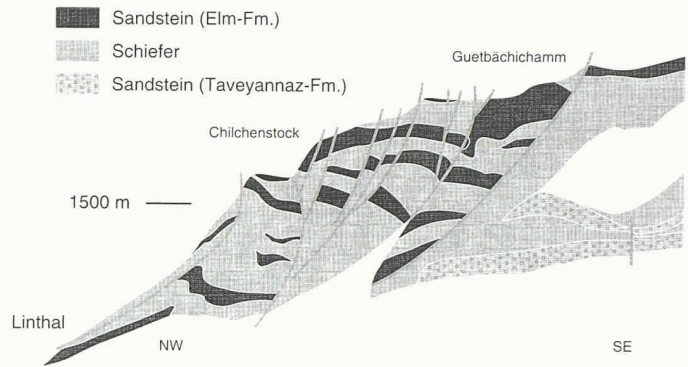
- Woher rühren Fehler in geologischen Prognosen?
- Wie können die Unsicherheiten in geologischen Prognosen quantifiziert werden?

**Ursachen von Unsicherheiten geologischer Prognosen**

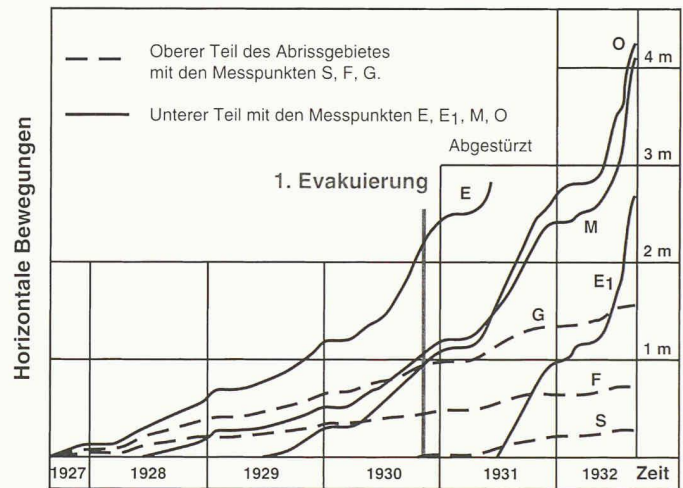
Die Ursache von Unsicherheiten in geologischen Prognosen hat einen direkten Bezug zu den Grundlagen und Methoden, die der Geologe zur Beschreibung eines geologischen Systems einsetzt. Verallgemeinert basiert die Beschreibung eines geologischen Zustands auf einer Kombination von

- direkten und indirekten Beobachtungen (deterministische Methoden, oft als «Messungen» bezeichnet),
- allgemeinen geologischen Kenntnissen (oft als «Erfahrung» bezeichnet, auch spezielle Studien an analogen, d.h. vergleichbaren Standorten umfassend) und
- formalisierten Schätzverfahren mit stochastischen Ansätzen.

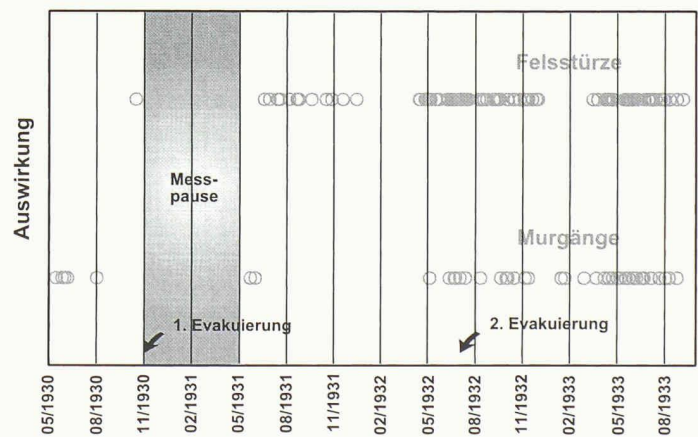
2 Schematisches geologisches Profil durch den Kilchenstock (nach Schielly 1990, unpubl.)



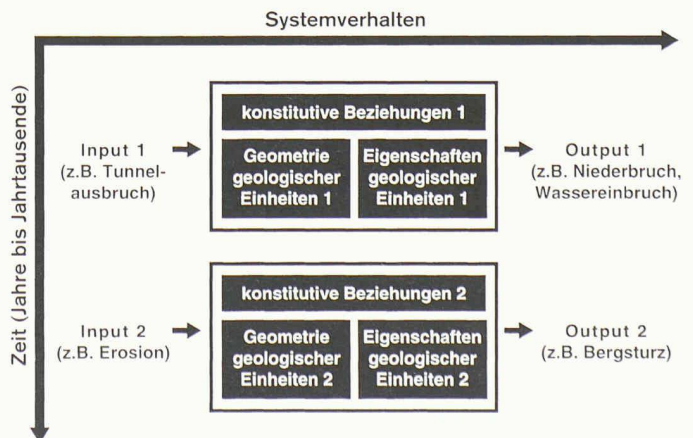
3 Horizontale Bewegungen verschiedener Messpunkte im Abrissgebiet des Kilchenstocks in der Zeitperiode 1927-1932 (nach [1])



4 Murgänge und Felsstürze des Kilchenstocks in der Zeitperiode 1930-1933 (Daten aus [3])



5 Wichtige Komponenten geologischer Prognosen in Raum und Zeit



Skala	Typische Einheit	Typische Messmethode	Erfasstes Volumen pro Messwert
Mikro	Poren, Sandkorn, Mineral	Mikrosonde Mikroskop	
Makro	Laborprobe	Triaxialversuch	$10^{-5}$ (bis $10^{-2}$ ) m <sup>3</sup>
	Handstück	Permeameter	$10^{-4}$ (bis $10^{-6}$ ) m <sup>3</sup>
	Bohrung	Sonic Log (Porosität)	$10^{-2}$ m <sup>3</sup>
		Plattendruckversuch	1-10 m <sup>3</sup>
		Packerversuch (10m)	
Mega	Baugrund (10 <sup>5</sup> m <sup>3</sup> )	Konvergenzmessungen	$10^2$ bis $10^4$ m <sup>3</sup>
	Tunnel	Zuflussmessungen	$10^5$ bis $10^9$ m <sup>3</sup>
		K=10 <sup>-13</sup> m/s	1 m <sup>3</sup>
		K=10 <sup>-9</sup> m/s	10 <sup>4</sup> m <sup>3</sup>
Giga	Reservoir (10 <sup>8</sup> -10 <sup>10</sup> m <sup>3</sup> )	Pumpversuch <sup>1)</sup>	$10^7$ bis $10^9$ m <sup>3</sup>

<sup>1)</sup>H=100 m, Ss=10<sup>-7</sup> m<sup>-1</sup>, τ=1 d, K=10<sup>-5</sup>-10<sup>-7</sup> m/s

6

Grössenskalen und Vergleich der mit verschiedenen ingenieur- und hydrogeologischen Messmethoden erfassten Probevolumina

Die mit diesen verschiedenen Methoden verbundenen Unsicherheiten stellen sich wie folgt dar.

**Direkte und indirekte Beobachtungen**

Ein Vergleich der in verschiedenen typischen ingenieurgeologischen Versuchen charakterisierten Volumina zeigt Bild 6. Insbesondere Versuche zur Bestimmung von gesteinsmechanischen Eigenschaften (z.B. Triaxialversuch, Plattendruckversuch) erfassen in der Regel nur kleine Volumina. Zur Bestimmung gesteinshydraulischer Eigenschaften (z.B. der Wasserdurchlässigkeit) liegen Messmethoden vor, die ganz unterschiedliche Probevolumina erfassen und somit in der Lage sind, projektrelevante Grössenbereiche zu charakterisieren.

Die Ermittlung grossräumiger Werte aus kleinräumigen Messungen, eine Situation, die oft nicht umgangen werden kann, ist mit fundamentalen Schwierigkeiten (oder Unsicherheiten) behaftet. Typische

Variationen der gesteinsmechanischen Parameter, die an kleinen Probevolumen von wenigen cm<sup>3</sup> bestimmt wurden, liegen für 1 m lange, geologisch relativ homogene und ungestörte Untersuchungsintervalle im Bereich von 20 bis 100% [4]. Vergleichbare Durchlässigkeitswerte streuen im Bereich von bis einer halben Grössenordnung (500%, z.B. [5]), da dieser Parameter nicht linear, sondern logarithmisch verteilt ist. Ein Beispiel der enormen Variabilität hydraulischer Durchlässigkeiten im 100-Meter-Bereich, zeigt Bild 8 [6]. Die für jeweils 100 m lange Tunnelabschnitte in verschiedenen Grundgebirgseinheiten der Zentralmasse bestimmten Werte reflektieren in diesem Fall die grossen Auswirkungen von spröden Diskontinuitäten (Klüften, Störzonen) auf die hydraulischen Gebirgseigenschaften.

Neben dieser substantiellen Heterogenität ergibt sich eine weitere Prognoseunsicherheit aus der Tatsache, dass grossräumige Gebirgsparameter oft nicht ein-

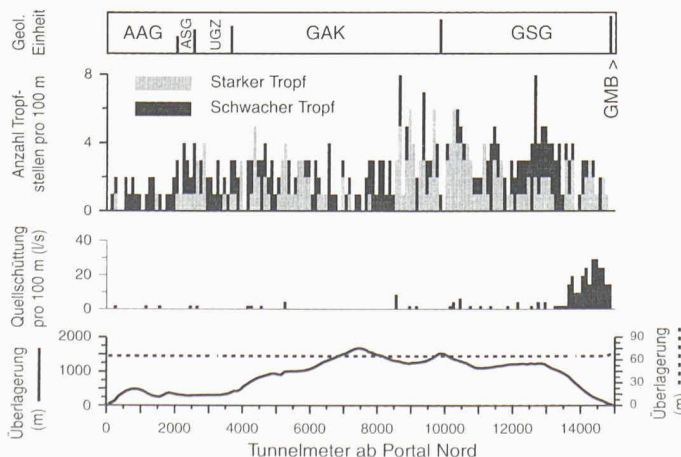
fach dem Mittelwert kleinräumiger Punktwerte entsprechen; der Parameterwert ist abhängig von der Grösse der Messskala (z.B. [7], [8]). So nimmt für verschiedene Gesteinstypen die ermittelte Durchlässigkeit für von 0,1 auf 100 m zunehmende Probegrössen (z.B. Testradien und eine Bohrung) um etwa zwei bis drei Grössenordnungen zu und scheint anschliessend für noch grössere Messskalen konstant zu bleiben ([7], [8]). Der Grund für diese skalenabhängige Durchlässigkeit scheint wiederum in der Heterogenität geologischer Medien begründet zu sein: Im kleinen Massstab ist der Grundwasserfluss in der Regel von seltenen Heterogenitäten (z.B. einem grossem Bruch) mit speziell hoher Durchlässigkeit unbeeinflusst. Oder in anderen Worten, die Wahrscheinlichkeit, dass eine kleinräumige Messung eine seltene hoch permeable Zone erfasst, ist unproportional klein zum Ausmass, mit dem diese Heterogenität die regionale Durchlässigkeit erhöht.

**Allgemeine geologische Kenntnisse, Analogstudien**

Die zweite Grundlage geologischer Prognosen, weiter oben als allgemeine geologische Kenntnisse beschrieben, umfassen Kenntnisse aus geologisch analogen Gebieten mit guter Datengrundlage (oft auch als Erfahrung bezeichnet), systematische Studien der geologischen Prozesse in der geologischen Vergangenheit und allgemeine Kenntnisse über geologische Abläufe.

Als Beispiel betrachten wir den geplanten Neat-Basistunnel des Gotthards, dessen geotechnische und hydrogeologische Prognose unter anderem auf Analogvergleichen mit einer grossen Anzahl anderer Tunnelbauwerke in der Region Gotthard beruht [6]. Bild 7 zeigt stellvertretend die aus alten Unterlagen des vor rund 100 Jahren gebauten SBB-Tunnels zusammengestellten geologischen Beobachtungen als Funktion der Tunnelmetrierung ab Nordportal: den Verlauf geologischer Schichtgrenzen auf Tunnelniveau, den beobachteten Wasseranfall in Form von Tropfstellen und Quellen, die Tunnelüberlagerung und den Winkel zwischen Tunnelachse und Schichtverlauf.

Aus der grossen Anzahl anderer vergleichbarer Tunnelbeobachtungen haben wir statistisch repräsentative Gebirgsparameter für die verschiedenen geologischen Einheiten, die vom geplanten neuen Gotthard-Basistunnel durchfahren werden, ermittelt [9]. Bild 8 zeigt für zwei verschiedene geologische Einheiten die Tiefenverteilung der für jeweils 100 m lange Tunnelstrecken berechneten Transmissivität



7

Hydrogeologische Grundlegendaten des Gotthard-SBB-Tunnels (AAG: Aaregranit, ASG: südliches Altkristallin Aarmassiv, UGZ: Urseren-Garvera-Zone, GAK: nördliches Altkristallin Gotthard-Massiv, GSG: südliches Altkristallin Gotthard-Massiv, GMB: südliche Sedimentbedeckung Gotthard-Massiv)

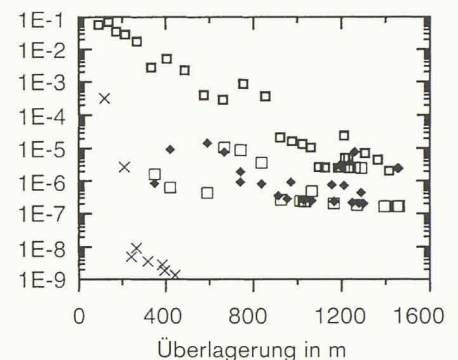
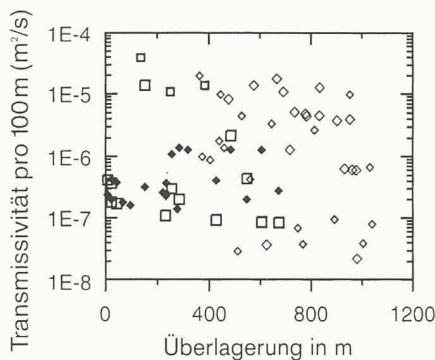
ten (Mass für das Produkt aus Mächtigkeit und hydraulischer Durchlässigkeit) wasserführender Strukturen (insb. Klüfte und Störzonen). Die verschiedenen Symbole spezifizieren das entsprechende Tunnelbauwerk, von dem die Daten herrühren. Solche Analogdaten sind sehr wertvoll, sie beinhalten aber wiederum Unsicherheiten, die sich in der Prognose niederschlagen: Erstens sind ein Teil der Randbedingungen von analogen Beobachtungen oft nicht auf das betroffene Projektgebiet übertragbar (so ist z.B. die Tiefenlage des Gotthard-Basistunnels in diesen Einheiten rund 2000 m, d.h. tiefer als die bestehenden Beobachtungen im Projektgebiet), und zweitens ist oft nicht das gut fassbare Mittelwertverhalten für ein Tunnelprojekt ausschlaggebend, sondern singuläre Ereignisse wie grosse Niederbrüche und Wassereinbrüche. Aus Analogvergleichen ist wohl ein solches singuläres Ereignis an und für sich prognostizierbar, es kann aber nur schwer aus solchen Informationen quantifiziert werden.

**Formalisierte Schätzverfahren**

Wie oben beschrieben wurde, sind die Eigenschaften geologischer Einheiten heterogen und auch auf kleinster Skala stark variabel. Da die gesamte Heterogenität nie direkt messbar ist, muss sie aus einer begrenzten Anzahl von Proben oder Fixpunkten geschätzt werden. Als Beispiel einer eindimensionalen Situation stelle man sich eine Bohrung oder Tunnelachse (Messachse z) vor, entlang derer Proben genommen und ein gesteinsmechanischer oder -hydraulischer Parameter bestimmt wurde. Für viele Aufgabenstellungen soll nun die Verteilung des Parameterwerts v für Stellen zwischen den Probenahmepunkten geschätzt werden (Bild 9).

Eine solche Schätzung kann deterministisch oder geostatistisch erfolgen. Die deterministische Schätzung setzt die Kenntnis genetischer Beziehungen oder das Vorhandensein eindeutiger Korrelationen mit anderen bekannten Grössen wie z.B. dem Gesteinstyp voraus. Oft sind Gesteinseigenschaften aber nur sehr grob aus einer Korrelation mit dem Gesteinstyp abschätzbar. Die direkte genetische Herleitung von Gesteinseigenschaften ist heute auch nur sehr beschränkt möglich.

Darum werden solche Gesteinseigenschaften in der Erzprospektion schon seit mehreren Jahrzehnten als sogenannte Zufallsvariablen behandelt. Das Verhalten dieser Zufallsvariablen im Raum oder in der Zeit kann durch eine Variogramm-funktion beschrieben werden, die aus den gemessenen Daten selbst ermittelt und von Parametern im Nah- und Fernbereich von Stützpunkten (z.B. Korrelationslän-



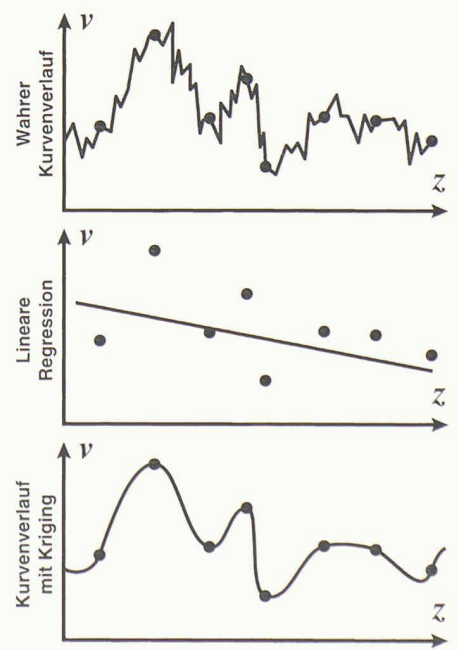
8 Korrelationsdiagramme der Gebirgsüberlagerung mit den Transmissivitäten 100 m langer Tunnelabschnitte im zentralen Aaregranit (links) und dem südlichen Altkristallin des Gotthard-«Massivs» (rechts). Die verschiedenen Symbole kennzeichnen unterschiedliche Tunnel

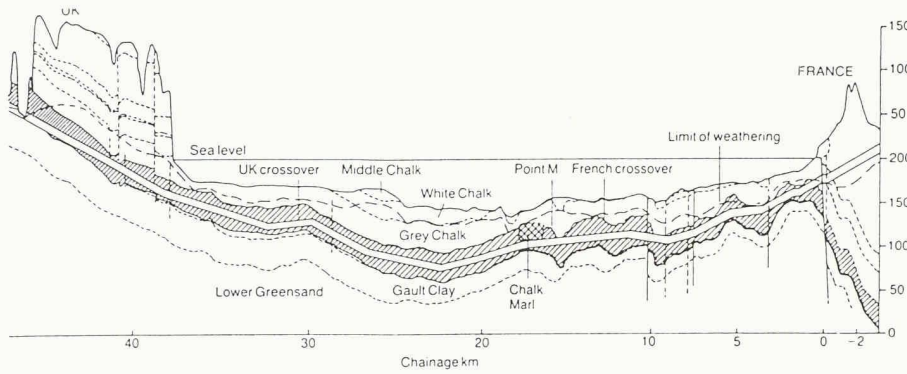
ge) kontrolliert wird. Mittels modellmässiger Variogramme können nun Schätzwerte zwischen den Stütz- oder Messpunkten im ein- oder mehrdimensionalen Raum interpoliert werden (Bild 9, unten). Auf diese Art kann die Struktur der Messdaten besser wiedergegeben werden als durch herkömmliche lineare oder andersartige Interpolationsfunktionen (Bild 9, Mitte). Ein Nachteil solcher Verfahren, die als Kriging bezeichnet werden, ist, dass die natürliche Heterogenität (schematisch in Bild 9, oben, dargestellt) in der so geschätzten neuen Verteilung verloren gegangen ist. Der grosse Vorteil liegt darin, dass mit solchen Verfahren wichtige Informationen zur Datenstruktur verwendet werden können und dass gleichzeitig verschiedene Typen von Informationen (z.B. Geophysik, Bohrdaten, Kartierungen) für die Schätzung eines einzelnen Parameters verwendet werden können.

Ein Paradebeispiel des Einsatzes solcher Verfahren in der Ingenieurgeologie stellt die geologische Prognose des Ärmelkanaltunnels dar [10]. Die für einen TBM-Vortrieb idealen Kreidekalk (Chalk Marl) liegen durchgehend in geeigneter Tiefenlage unter dem Ärmelkanal (Bild 10, [11]), werden durch einen porösen, teilweise geklüfteten und verwitterten, durchlässigen Kalk (Grey Chalk) überlagert und liegen selbst einem Ton (Gault Clay) auf, der problematische geotechnische Eigenschaften aufweist. Die Auslegung des Tunneltrassees geschah darum primär nach geologischen Kriterien, indem der Tunnel soweit wie möglich in der Kreidekalkformation liegen sollte. Da diese Formation (bei einem Tunneldurchmesser von 8 m) nur 30 m mächtig ist, in verschiedene Richtungen einfällt und entlang Brüchen versetzt ist, war eine ausserordentlich präzise Prognose zur Lage dieser Formationen entlang des gesamten Trassees zu erarbeiten.

Die Grundlagen zur Lagebestimmung der Basis der Kreidekalkformation bestanden aus 1500 km seismischer Profile (inkl. Meerestiefenvermessungen) und 109 Bohrungen. Die Interpolation der Kreidekalkbasis zwischen den erbohrten Messpunkten erfolgte mit Kriging unter gleichzeitiger Berücksichtigung aller vorhandenen geophysikalischen, geologischen und bathymetrischen Informationen. Hierbei wurden die Unsicherheiten in den einzelnen Datensätzen detailliert bewertet und in der Prognose berücksichtigt. Die Genauigkeit dieser geologischen Prognose war, wie weiter unten gezeigt wird, sehr hoch.

9 Natürliche eindimensionale geologische Heterogenität mit Stützpunkten (oben), lineare Interpolation (Mitte) und Schätzung mittels Kriging (unten)





10  
Geologisches Längsprofil des Ärmelkanaltunnels (aus [11])

**Quantifizierung der Sicherheit geologischer Prognosen**

Die Sicherheit oder Zuverlässigkeit der geologischen Prognosen muss immer diskutiert und - soweit möglich - quantifiziert werden. Hierzu ist es auch wesentlich, dass die Geologen in realen Projekten die Möglichkeit erhalten, nicht nur Prognosen auszuführen, sondern diese auch gegenüber der Realität zu überprüfen und den Befund zu dokumentieren.

Klassischerweise erfolgt die Behandlung solcher geologischer Unsicherheiten,

indem aufgrund bisheriger Kenntnisse zum Systemverhalten wahrscheinliche und pessimistische Szenarien (Prognosen) erarbeitet werden. Als Beispiel zeigt Bild 11 die beiden Prognosevarianten zur Wasserführung eines Teils des geplanten Gotthard-Basistunnels (Stand 1994). Die beiden Varianten zum Wasseranfall an der Basis eines Zwischenangriffs (Erstfeld) als Funktion des Baufortschritts ergeben sich aus Modellrechnungen, die wir für verschiedene Parametersätze durchgeführt haben [12]. Die Wahl des konservativen (pessimistischen) Parametersatzes erfolgte aufgrund subjektiver Einschätzungen. Der Nachteil einer solchen Behandlung der Unsicherheiten ist, dass die Wahrscheinlichkeit einer pessimistischen Prognose nicht quantifiziert werden kann. Der Grad der Unsicherheit bleibt somit unbekannt.

Kriging als probabilistische Methode ermöglicht nicht nur die Interpolation von Parameterwerten zwischen bekannten Messpunkten, sondern auch die Quantifizierung des Fehlers (oder der Unsicherheit) dieser Schätzwerte. Im Falle des Ärmelkanaltunnels wurde die Unsicherheit in der prognostizierten Tiefenlage der Kreidekalkbasis flächendeckend entlang des Trassees ermittelt. Im gesamten Gebiet

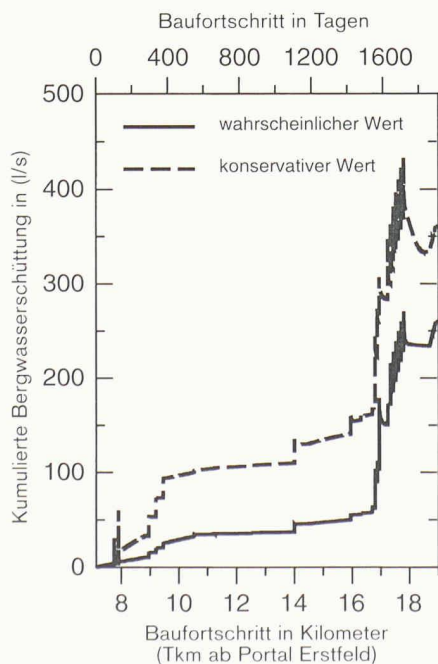
lag die berechnete Standardabweichung zwischen 2 und 6 Metern, entlang dem Tunneltrasse mit höherer Bohrdichte lag der geschätzte Fehler in der Regel zwischen 2 und 3, maximal bei 4 m. Die einfache, a priori geschätzte Standardabweichung entlang der Tunnelachse auf der französischen Seite (km 1-14) lag bei 2,85 m.

Während des Tunnelvortriebs wurden aus einem voreilenden Servicetunnel systematisch nach unten geneigte Vorbohrungen abgeteufelt, um die aktuelle Lage der Basis der Kreidekalkformation zu bestimmen. Auf der französischen Tunnelseite wurden in den ersten 13 km 54 Bohrpaare (auf der britische Seite 31) abgeteufelt. Die Unterschiede zwischen tatsächlicher Tiefenlage und Prognose der Kreidekalkbasis zeigt Bild 12 [10]. Der mittlere algebraische Prognosefehler betrug nur 48 cm, die Standardabweichung (gegenüber 0) 2,02 m. Die Verteilung der gemessenen Differenzen stimmt sehr gut mit dem a priori (aus Kriging) geschätzten Fehler von 2,85 m überein. Alle Differenzen liegen unterhalb der doppelten a priori geschätzten Standardabweichung, die deutliche Mehrzahl liegt unterhalb einer Standardabweichung. Für die britische Seite ergaben sich sehr ähnliche, ausserordentlich positive Resultate. Es war also im Falle des Ärmelkanals nicht nur möglich, eine geologische Prognose mit ausserordentlicher Präzision durchzuführen, sondern die Unsicherheit in dieser Prognose auch korrekt zu quantifizieren.

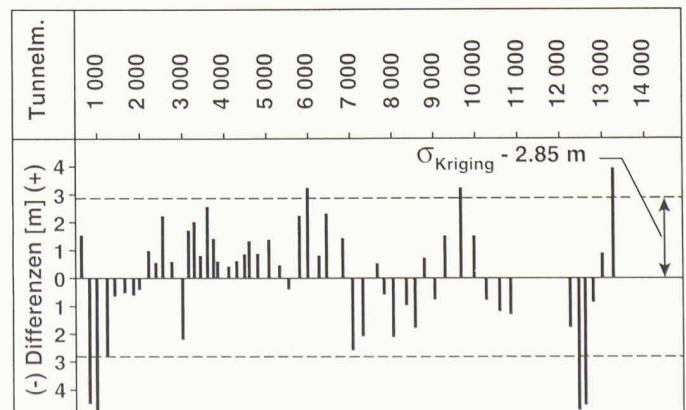
**Dank**

Spezieller Dank gilt Steve Shulist, Liane Schlickerrieder und Urs Gerber für die Erstellung einer grossen Anzahl neuer Figuren. Resultate und Daten zum Gotthard-Basistunnel wurden in verdankenswerter Zusammenarbeit mit B. Ehrminger, W. Klemen, S. Flury und T.R. Schneider erarbeitet. Schliesslich möchte ich mich für wichtige unpublizierte Informationen und Daten zum Kilchenstock bei H. Stüssi herzlich bedanken.

11  
Wahrscheinliche und konservative Prognose des baufortschrittabhängigen, kumulierten Wasseranfalls an der Basis des Zwischenangriffs Erstfeld. Angenommene Vortriebsgeschwindigkeit: 6,6 m/Tag (Gotthard-Basistunnel, Stand 1994)



12  
Differenzen tatsächlicher Tiefenlage minus Prognose der Basis der Kreidekalk im französischen Abschnitt des Ärmelkanaltunnels (nach [10])



## Schlussfolgerungen

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass alle geologischen Prognosen mit Unsicherheiten behaftet sind, da die Messdaten die natürliche geologische Heterogenität nie vollständig abzubilden vermögen und da das Verhalten geologischer Systeme nicht vollständig deterministisch beschreibbar ist. Relativ geringe geologische Unsicherheiten resultieren

- bei einer systematischen Integration aller vorhandener Informationen unterschiedlicher Qualität (Messungen, Analogdaten, stochastische Schätzverfahren),
- bei einer hohen Messdatendichte relativ zur geologischen Heterogenität,
- bei einer expliziten Berücksichtigung von Heterogenitäten und Skaleneffekten
- bei guten geologischen Prozesskenntnissen.

Geologische Unsicherheiten müssen bei allen Prognosen bewertet und - soweit möglich - quantifiziert werden. Neuere probabilistische Werkzeuge dazu werden in Erz-, Erdöl- und Grundwasserprojekten schon seit Jahrzehnten mit Erfolg eingesetzt. Sie sind auch auf eine Vielzahl von ingenieurgeologischen Fragestellungen übertragbar. Die klassische Ingenieurgeologie im Sinne einer qualitativen «Kunst» wird so in der Zukunft noch weiter durch eine systematisch nachvollziehbare «exakte Wissenschaft» ergänzt werden.

Adresse des Verfassers:

Simon Löw, Dr. phil. II, Ord. Professur für Ingenieurgeologie, ETH Hönggerberg, 8093 Zürich

## Literatur

- [1] Heim A.: Bergsturz und Menschenleben. Vierteljahresschrift der Naturforschenden Gesellschaft Zürich, Gebr. Fretz AG Zürich 1932, 1-218
- [2] Schardt H.: Geologische Gutachten über die Felsbewegung am Kilchenstock, 17.12.1928. ETH-Hauptbibliothek, Wissenschaftshistorische Sammlungen, Nachlass H. Schardt, P919859-230, Hs 389, Dossier LVII/1, Nr. 523, 1928
- [3] Frey F.: Erinnerungen an den Kilchenstock. Amtsblatt des Kantons Glarus Nr. 46, 116. Jahrgang, 1962
- [4] Rankin W.J., May R.E.: 1996, Geotechnical Properties. In Harris C.S., Hart M.B., Varley P.M., Warren C.D.: Engineering Geology of the Channel Tunnel. Thomas Telford Publishing 1996
- [5] Dreyer T., Scheie A., Walderhaug O.: Minipermeability-based Study of Permeability Trends in Channel Sand Bodies. American Association of Petroleum Geol. Bulletin, Vol. 74 No. 4, 1990, 359-374
- [6] Löw S., Ehrminger B., Klemenz W., Gilby, D.: Abschätzung der Bergwasserzuflüsse und Oberflächenauswirkungen am Beispiel des Gotthard-Basistunnels. In Oddsson B. (ed.): Instabile Prozesse und andere risikoreiche natürliche Prozesse. Birkhäuser Verlag Basel, Proceedings of the Centro Stefano Franscini, Flüeler, H. (series ed.), 1996, 353-376
- [7] Rovey C.W. II, Cberkauer D.S.: Scale Dependency of Hydraulic Conductivity Measurements. Ground water Vol. 33, No. 5, 1995, 769-780
- [8] Clauser C.: Permeability of Crystalline Rocks, EOS Transactions, American Geophysical Union Vol. 73, No. 21, 1992, 233-240
- [9] Ehrminger B., Klemenz W., Löw S.: Gotthard-Basistunnel: Quantitative Analyse hydrogeologischer Aufnahmen von Stollen- und Tunnelbauten im Gebiet Aar-Massiv-Gotthard-«Massiv»-Leventina. Colenco Power Consulting AG Baden, 1993, 1-122
- [10] Blanchin R., Chiles J.P.: Channel Tunnel: The Geostatistical Prediction of the Geological Conditions and its Validation by the Reality. 4th International Geostatics Congress, Terra Abstracts 4 Suppl. 3, Blackwell Scientific Publications, 1992
- [11] Margon P.: General Geology and Geotechnical Considerations. In: Harris et al. [4]
- [12] Ehrminger B., Gilby D., Löw S.: Gotthard-Basistunnel, Hydrogeologische Modellierung. Vorprojekt: 3. Bergwasserzuflüsse zum GBT und Beeinflussung des Bergwasserspiegels. Colenco Power Consulting AG Baden, 1993, 1-25