

Zeitschrift: Bulletin für angewandte Geologie
Herausgeber: Schweizerische Vereinigung der Petroleum-Geologen und –Ingenieure;
Schweizerische Fachgruppe für Ingenieur-Geologie
Band: 2 (1997)
Heft: 2

Artikel: Wie sicher sind geologische Prognosen?
Autor: Löw, Simon
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-219963>

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: 26.01.2026

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

Wie sicher sind geologische Prognosen ?¹⁾

mit 12 Figuren und 1 Tabelle

SIMON LÖW ²⁾

Zusammenfassung

Insbesondere in 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.

Résumé

Depuis quelques décennies, la fiabilité des pronostics géologiques établis dans le cadre de grands projets de construction (tunnels, décharges, centrales (hydro)électriques) ou d'évaluation de risques naturels est mise en question. Cet article résume les connaissances nécessaires à la compréhension de la fiabilité des pronostics géologiques et présente des méthodes visant à surmonter leurs incertitudes. Les causes des incertitudes et les méthodes utilisées pour les estimer de manière tant qualitative que quantitative sont expliquées à l'aide d'exemples suisses et étrangers.

1. Einleitung

Der „Bergsturz“ von Linthal

Am 20. November 1930 erliess der Regierungsrat des Kantons Glarus den Beschluss, aufgrund eines drohenden Bergsturzes vom Kilchenstock das Gebiet von Linthal zu räumen (Fig. 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 kontinuierliche geodätische Vermessungen des Abrissgebietes mit horizontalen Messlatten, photogrammetrischen Aufnahmen, trigonometrischen Vermessungen und Fernmessungen beschlossen.

¹⁾ Antrittsvorlesung ETH Zürich vom 28.5.1997

²⁾ Professur für Ingenieurgeologie, ETH-Hönggerberg, 8093 Zürich

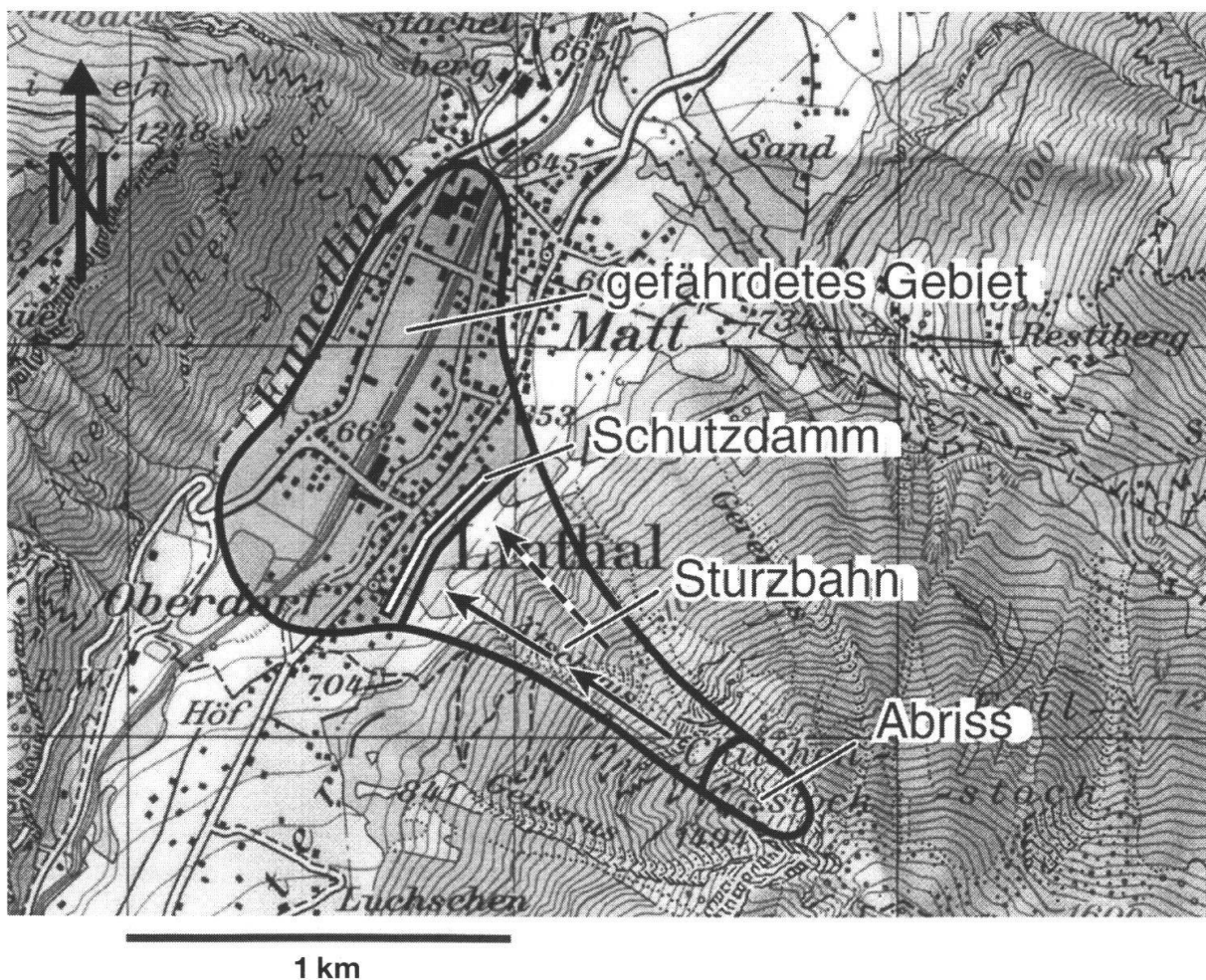


Fig. 1: Abrissgebiet, Sturzbahn und gefährdetes Gebiet des potentiellen Bergsturzes von Linthal (Be-
willigung der Landestopographie vom 6.11.97).

Die Felsen des Kilchenstocks bestehen aus einer subhorizontalen Wechsellagerung von quarzitischen Sandsteinen und Tonschiefern des nordhelvetischen Flyschs, die durch eine vertikale Klüftung und gegen Linthal einfallende Brüche durchtrennt werden (Fig. 2). Die geodätischen Messungen zeigten zwei sich langsam hangabwärts bewegendende Sandstein-Massen von insgesamt 15 - 25 m Mächtigkeit, 350 m Länge und ca. 100 m Breite (Heim 1932). Die Fallrichtung betrug im Mittel 33 Grad gegen NW (d.h. auf Linthal zu). Bis zum Jahr 1932 wurden zunehmend höhere Bewegungs-Geschwindigkeiten festgestellt (siehe Fig. 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-Geologen Prof. R. Staub und Prof. A. Heim prognostizierten eine Sturzmasse von insgesamt mindestens 250'000 m³, die sich insbesondere via einer schmalen Hauptsturzfurche (Ätschrüns, Fig. 1) bergsturzartig über ein grösseres Gebiet links- und rechtsseitig der Linth ausbreiten würde (Heim 1932). Im November 1930 empfahlen Heim und Staub die Räumung des gefährdeten Gebietes.

Doch auch schon zu dieser Zeit gab es unterschiedliche Interpretationen desselben geologischen Befundes. So schrieb der ETH Professor H. Schardt in einem Gutach-

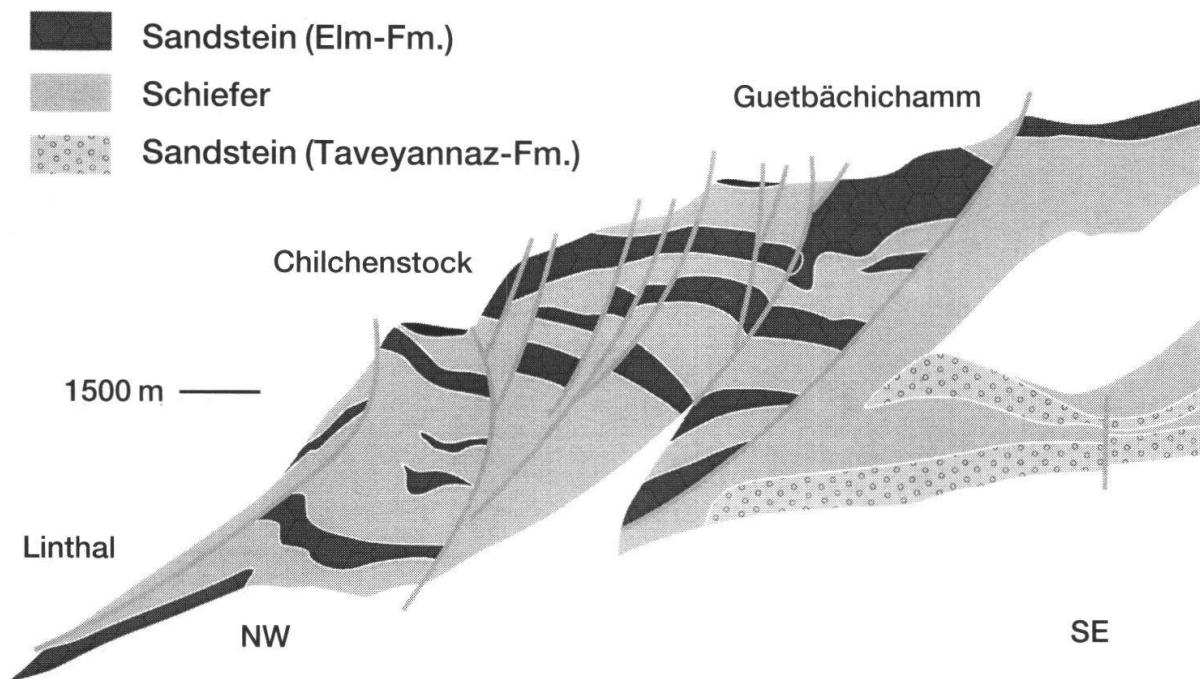


Fig. 2: Schematisches geologisches Profil durch den Kilchenstock (nach Schielly 1990, unpubl.).

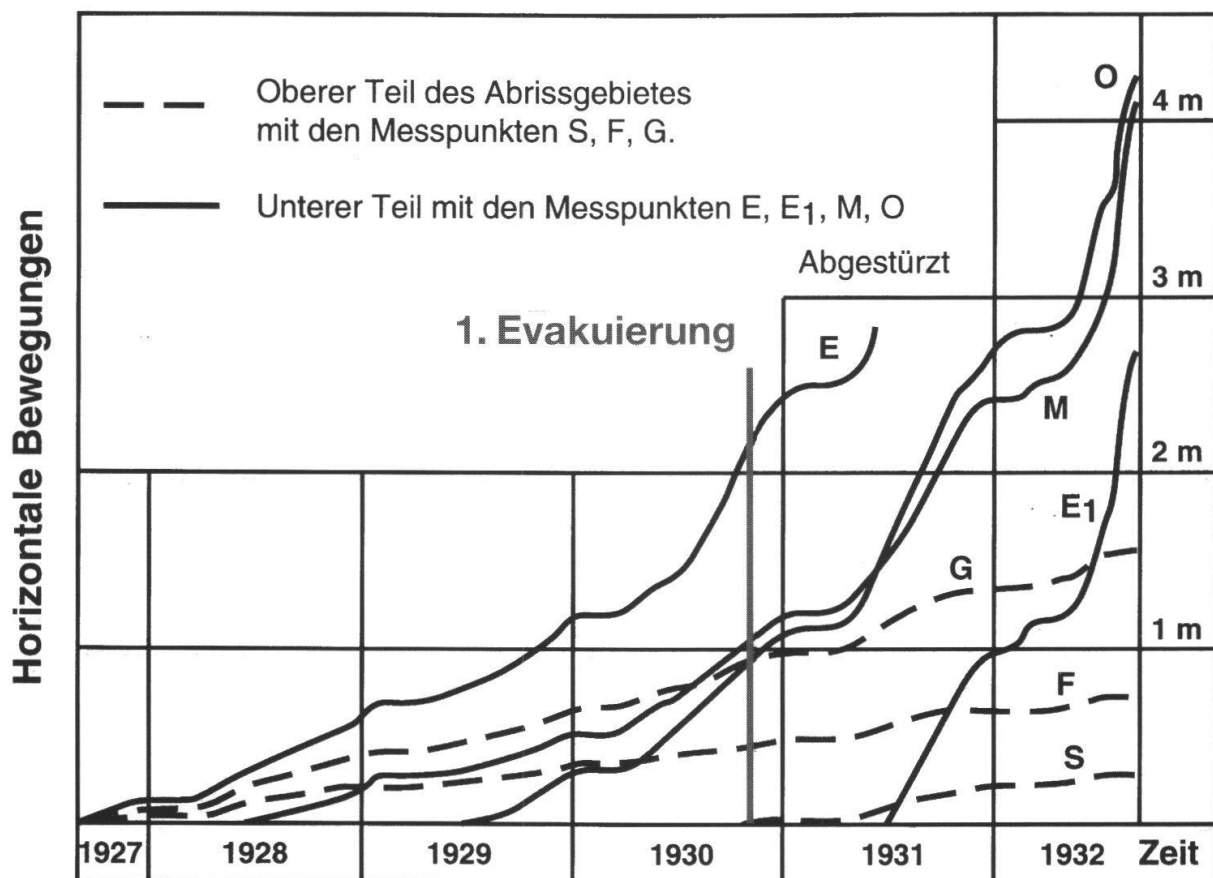


Fig. 3: Horizontale Bewegungen verschiedener Messpunkte im Abrissgebiet des Kilchenstocks in der Zeitperiode 1927-1932 (nach Heim 1932).

ten des Jahres 1928 (Schardt 1928), dass kein Grund vorhanden sei, das 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 im Jahre 1930 ein 500 m langer Schutzdamm errichtet (Fig. 1).

Nach dem Entscheid zur Räumung von Linthal im November 1930 häuften sich die kleinen Felsstürze (Fig. 4, nach Angaben in Frey 1962), es erreichten jedoch nur wenige Steinblöcke den Talboden. Auch die Murgänge nahmen in ihrer Häufigkeit zu (Fig. 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 (Fig. 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.

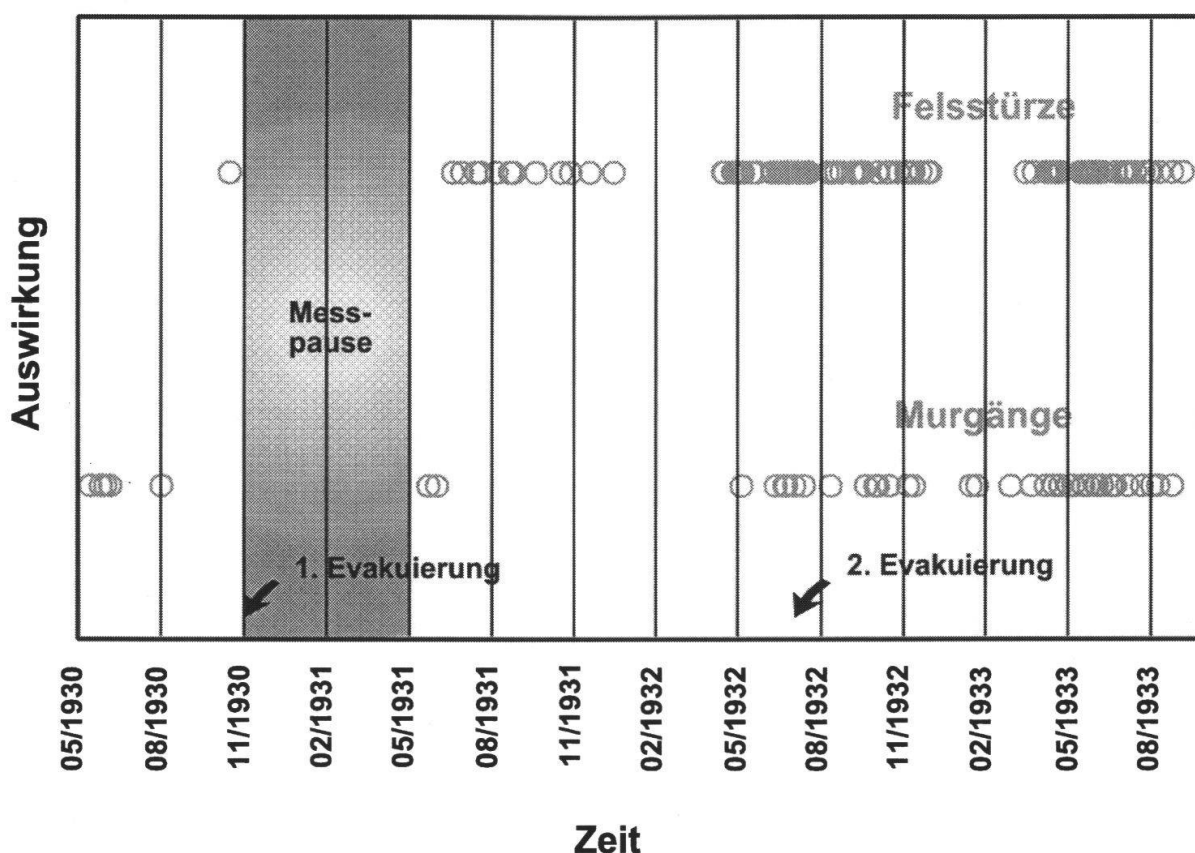


Fig. 4: Murgänge und Felsstürze des Kilchenstocks in der Zeitperiode 1930-1933 (Daten aus Frey 1962).

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 geologischen Systemzuständen und Systemreaktionen. Für Bauvorhaben und die Nutzung von Ressourcen wie Kohlenwasserstoffe und Wasser ist darum die Kenntnis

- (i) der Geometrie geologischer Einheiten,
- (ii) der Materialeigenschaften geologischer Einheiten und
- (iii) der Prozesse und Stoffgesetze (konstitutive Beziehungen) unter natürlichen und künstlichen Bedingungen von grosser Wichtigkeit (vergl. Fig. 5 oben).

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 (Fig. 5 unten), da es sich bei solchen Prognosen zum Teil um sehr lange Prognosezeiträume handelt (zum Beispiel 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: (i) Woher rühren Fehler in geolo-

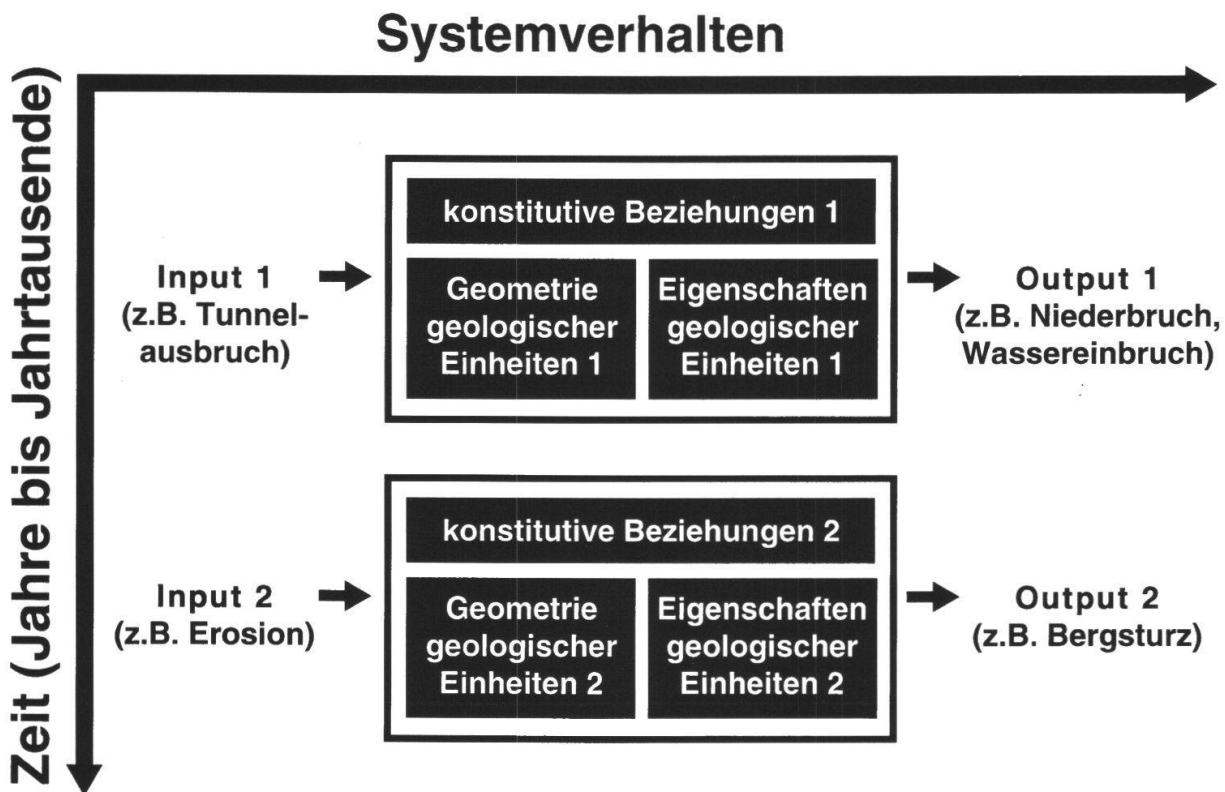


Fig. 5: Wichtige Komponenten geologischer Prognosen in Raum und Zeit.

gischen Prognosen? (ii) Wie können die Unsicherheiten in geologischen Prognosen quantifiziert werden?

2. 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 Zustandes auf einer Kombination von

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

Wie weiter unten und in Tabelle 1 noch genauer ausgeführt wird, beziehen sich ingenieurgeologische Messungen oft auf kleine Probenvolumina, d.h. sie sagen etwas über den mikroskopischen (Sandkorn, Mineral) und makroskopischen (z.B. Bohrkern) Grössenbereich aus. Allgemeine Kenntnisse beziehen sich sowohl auf Messungen wie Beobachtungen im Projektmassstab, das heisst auf das Verhalten von grösseren megaskopischen Gebirgs- oder Gesteinskörpern. Formalisierte Schätzverfahren werden in der Praxis oft eingesetzt um aus kleinräumigen Punktwerten (z.B. Messungen von Erzgehalten in Gesteinsproben) auf den megaskopischen Massstab (d.h. die Erzverteilung in einem Gebirge) zu extrapolieren. Für geologische Prognosen in der ingenieurgeologischen Praxis werden in der Regel immer Beschreibungen (Parameter, geologische Einheiten) im mega (und giga)-skopischen Massstab benötigt. Die mit diesen verschiedenen Methoden verbundenen Unsicherheiten stellen sich wie folgt dar:

Direkte und indirekte Beobachtungen (Messungen)

Ein Vergleich der in verschiedenen typischen ingenieurgeologischen Versuchen charakterisierten Volumina zeigt Tabelle 1. Insbesondere Versuche zur Bestimmung von gesteinsmechanischen Eigenschaften 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) konfrontiert. Typische Variationen der gesteinsmechanischen Parameter, welche an kleinen Probevolumen von wenigen cm^3 bestimmt wurden, liegen für 1 m lange, geologisch relativ homogene und ungestörte Untersuchungsintervalle im Bereich bei 20 bis 100 % (z.B. Rankin and May 1996). Vergleichbare Permeabilitätswerte streuen im Bereich von bis einer halben Grössenordnung (500 %, z.B. Dryer et al. 1990), da dieser Parameter nicht linear sondern logarithmisch verteilt ist. Ein Beispiel der enormen Variabilität hydraulischer Transmissivitäten im

Skala	Typische Einheit	Typische Messmethode	Erfasstes Volumen pro Messwert
Mikro	Poren, Sandkorn, Mineral	Mikrosonde Mikroskop	
Makro	Laborprobe Handstück Bohrkern	Triaxial-Versuch Permeameter Sonic Log (Porosität) Packerversuch (10 m) $K = 10^{-13}$ m/s $K = 10^{-9}$ m/s	10^{-5} (bis 10^{-2}) m ³ 10^{-4} (bis 10^{-6}) m ³ 10^{-2} m ³ 1 m ³ 10^4 m ³
Mega	Baugrund (10^5 m ³) Tunnel	Konvergenzmessungen Zuflussmessungen	10^2 bis 10^4 m ³ 10^5 bis 10^9 m ³
Giga	Reservoir (10^8 - 10^{10} m ³)	Pumpversuch ¹⁾	10^7 bis 10^9 m ³
¹⁾ H = 100 m, Ss = 10^{-7} m ⁻¹ , t = 1 d, K = 10^{-5} - 10^{-7} m/s			

Tab. 1: Grössenskalen und Vergleich der mit verschiedenen ingenieurgeologischen und hydrogeologischen Messmethoden erfassten Probevolumina.

100 m-Bereich, zeigt Figur 7 (Löw et al. 1996). Die für jeweils 100 m lange Tunnelabschnitte in verschiedenen Grundgebirgseinheiten der Zentralmasse bestimmten Werte reflektieren in diesem Fall die grosse Auswirkung 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 einfach dem Mittelwert kleinräumiger Punktwerte entsprechen; der Parameterwert ist abhängig von der Grösse der Messskala (z.B. Rovey and Cherkauer 1995, Clauser 1992). So nimmt für verschiedene Gesteinstypen die ermittelte Durchlässigkeit für von 0.1 m auf 100 m zunehmende Probegrössen (z.B. Testradien und eine Bohrung) um etwa 2 - 3 Grössenordnungen zu und scheint anschliessend für noch grössere Messskalen konstant zu bleiben. 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. Auch Transporteigenschaften von Schadstoffen im Grundwasser zeigen eine ähnliche Skalenabhängigkeit.

Allgemeine geologische Kenntnisse, Analogstudien

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

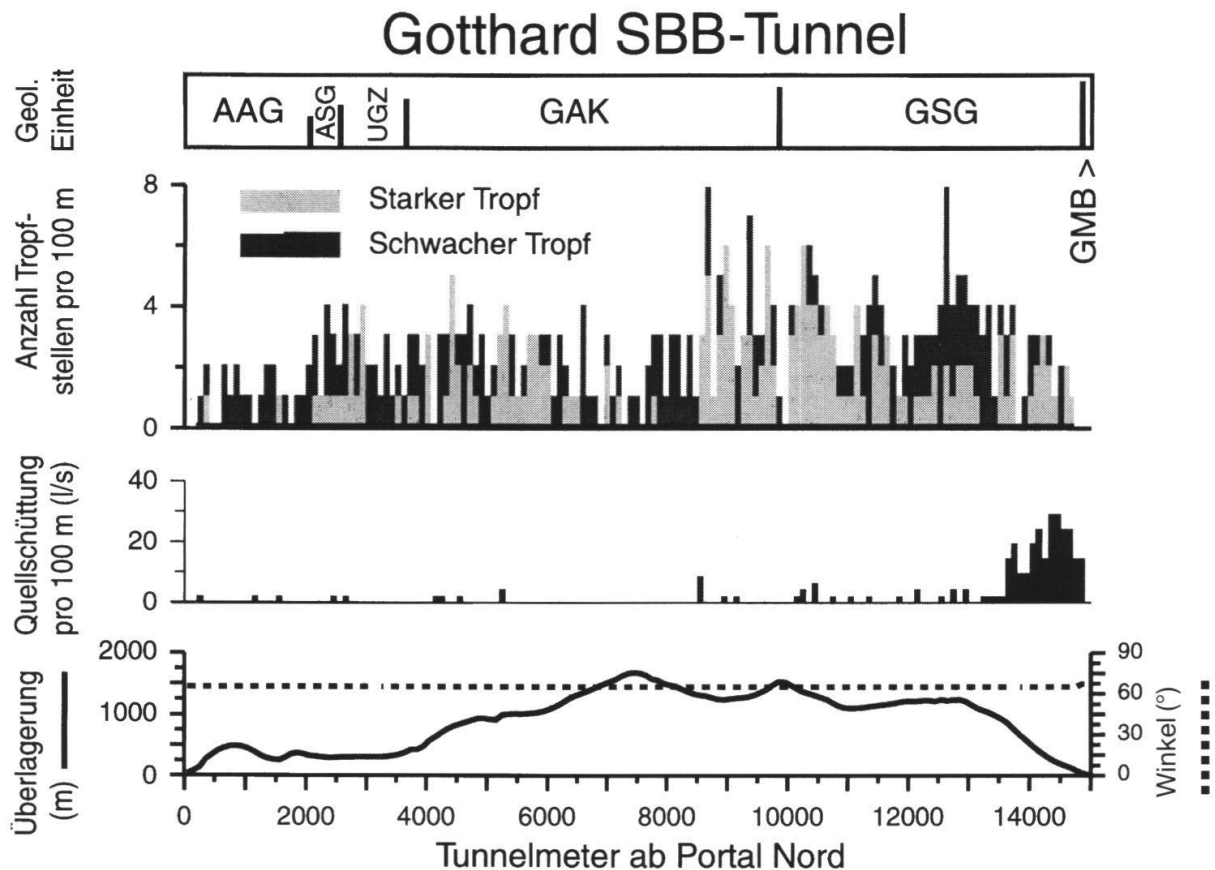


Fig. 6: Hydrogeologische Grundlagendaten des Gotthard-SBB-Tunnels (AAG: Zentraler Aaregranit, ASG: südliches Altkristallin Aarmassiv, UGZ: Urseren-Garvera-Zone, GAK: nördliches Altkristallin Gotthard-„Massiv“, GSG: südliches Altkristallin Gotthard-„Massiv“, GMB: südliche Sedimentbedeckung Gotthard-„Massiv“).

Als Beispiel betrachten wir den geplanten NEAT-Basistunnel des Gotthards, dessen geologische und hydrogeologische Prognose unter anderem auf Analogvergleichen mit einer grossen Anzahl anderer Tunnelbauwerke in der Region Gotthard beruht (Löw et al. 1996). Figur 6 zeigt stellvertretend die aus alten Unterlagen des vor rund 100 Jahren gebauten SBB-Tunnels zusammengestellten geologischen Beobachtungen als Funktion der Tunnelmetrierung ab Nordportal: (i) den Verlauf geologischer Schichtgrenzen auf Tunnelniveau, (ii) den beobachteten Wasseranfall in Form von Tropfstellen und Quellen, (iii) die Tunnelüberlagerung und (iv) den Winkel zwischen Tunnel und Schichtverlauf.

Aus der grossen Anzahl anderer vergleichbarer Tunnelbeobachtungen haben wir statistisch repräsentative Gebirgsparameter für die verschiedenen geologischen Einheiten, welche vom geplanten neuen Gotthard-Basistunnel durchfahren werden, ermittelt (Ehrminger et al. 1993b). Figur 7 zeigt für zwei verschiedene geologische Einheiten die Tiefenverteilung der für jeweils 100 m lange Tunnelstrecken berechneten Transmissivitäten (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 die-

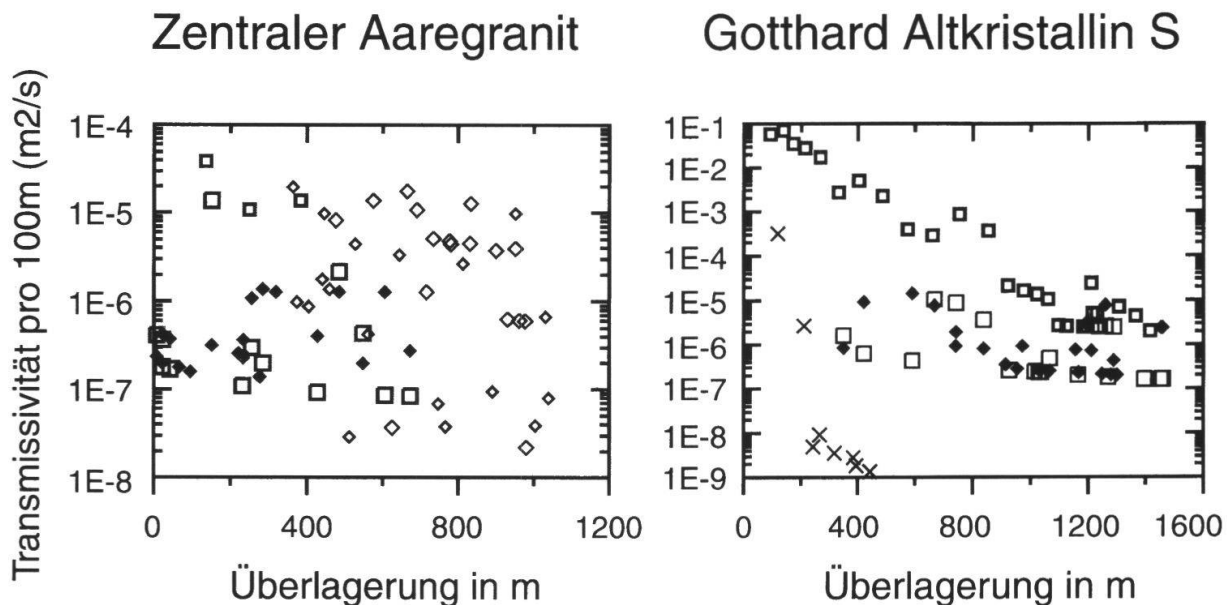


Fig. 7: Korrelationsdiagramme der Gebirgsüberlagerung mit den Transmissivitäten 100 m langer Tunnelabschnitte im zentralen Aaregranit (links) und dem südlichen Altkristallin des Gotthard-„Massivs“ (rechts). Die verschiedenen Symbole kennzeichnen unterschiedliche Tunnel.

sen Einheiten rund 2000 m, d.h. tiefer als die bestehenden Beobachtungen im Projektgebiet), und zweitens ist oft nicht das gut fassbare Mittelwertverhalten für ein Tunnel-Projekt 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 weiter 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 gesteinshydraulischer Parameter bestimmt wurde. Für viele Aufgabenstellungen soll nun die Verteilung des Parameterwertes v für Stellen zwischen den Probenahmepunkten geschätzt werden (Fig. 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 Korrelationen 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-

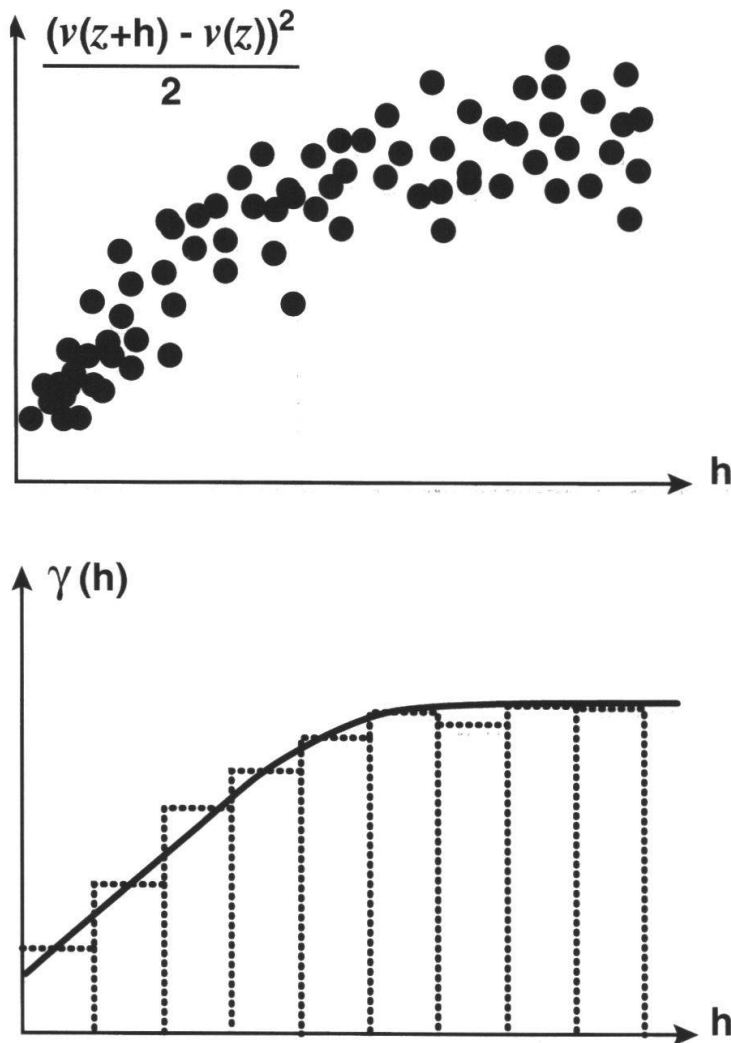


Fig. 8:
Experimentelles Variogramm
(oben) und Variogramm-Modell
(unten).

Funktion beschrieben werden. Die Variogramm-Funktion wird aus den n gemessenen Daten selbst ermittelt, indem die quadrierte Differenz des Parameterwertes aller Punktepaaire bestimmt und als Funktion der Distanz dieser Punkte, in Figur 8 als h bezeichnet, aufgetragen wird. Eine Ausgleichgerade mit durch die in verschiedene Klassen von Separationsdistanzen h aufgeteilte mittlere Differenz von Parameterwerten gemäss

$$\gamma(h) = \frac{1}{2n} \sum_{i=1}^n [v(z+h) - v(z)]^2$$

stellt das Modell-Variogramm (Figur 9 unten) dar, welches wichtige Informationen über das Verhalten von Parametern im Nahbereich bei kleinen Separationsdistanzen h (z.B. ein Untergrundrauschen bei Messungen) und Informationen über das Verhalten im Fernbereich von Stützpunkten gibt (z.B. Korrelationslänge von Parametern). Mittels solcher Variogramme können nun Schätzwerte zwischen den Stütz- oder Messpunkten im ein- oder mehrdimensionalen Raum interpoliert werden (Figur 9 unten), wobei die Gewichte dieser Interpolation aus der Variogramm-funktion ermittelt werden. Auf diese Art kann die Struktur der Messdaten besser wiedergegeben werden als durch herkömmliche lineare oder andersartige Interpolationsfunktionen (Figur 9 Mitte). Ein Nachteil solcher Verfahren, die als Kriging

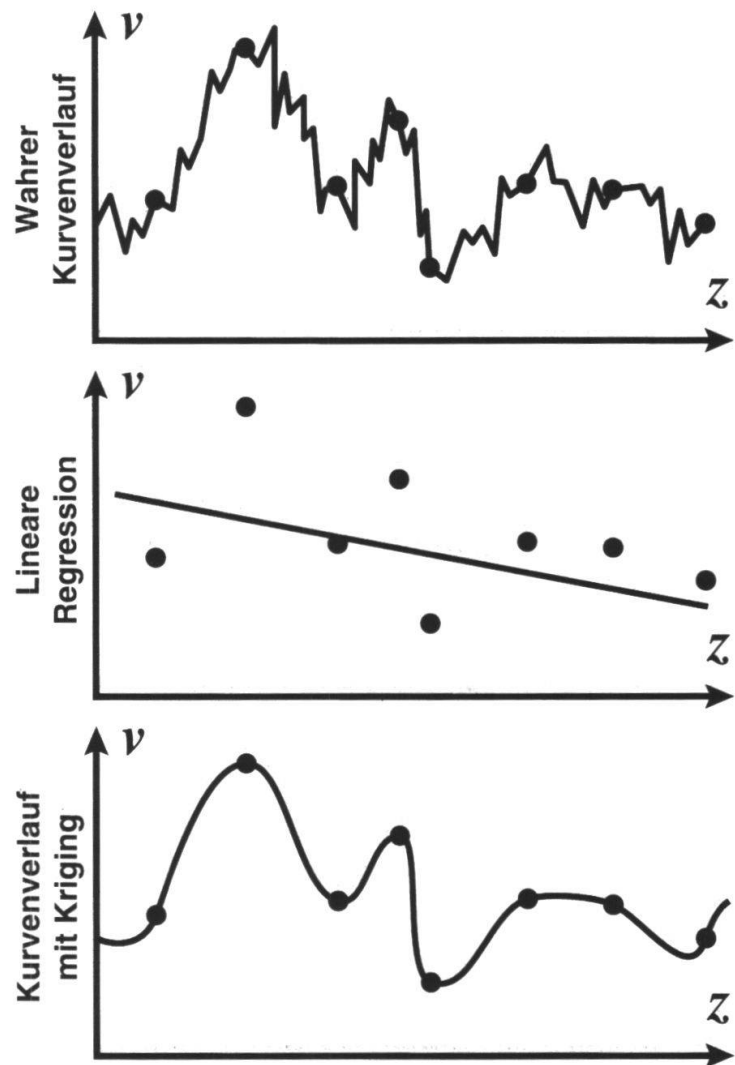


Fig. 9:
Natürliche eindimensionale geologische Heterogenität mit Stützpunkten (oben), lineare Interpolation (Mitte) und Schätzung mittels Kriging (unten).

bezeichnet werden, ist, dass die natürliche Heterogenität (schematisch in Figur 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 (Blanchin and Chilès, 1992). Die für einen TBM-Vortrieb idealen Kreidekalke des Cenoman liegen durchgehend in geeigneter Tiefenlage unter dem Ärmelkanal (Figur 10, Margon 1996), 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 so weit wie möglich in der Kreidekalk-Formation 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.

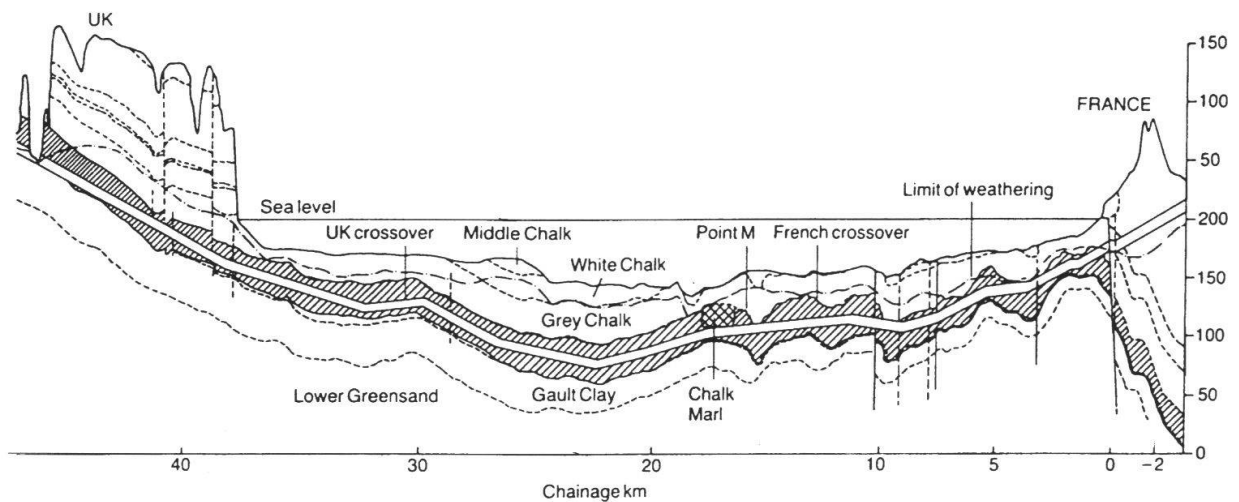


Fig. 10: Geologisches Längsprofil des Ärmelkanaltunnels (aus Margon 1996).

Die Grundlagen zur Bestimmung der Lage 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.

3. 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 Figur 11 die beiden Prognose-Varianten zur Wasserführung eines Teils des 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 (Ehrminger et al. 1993a). 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 Quanti-

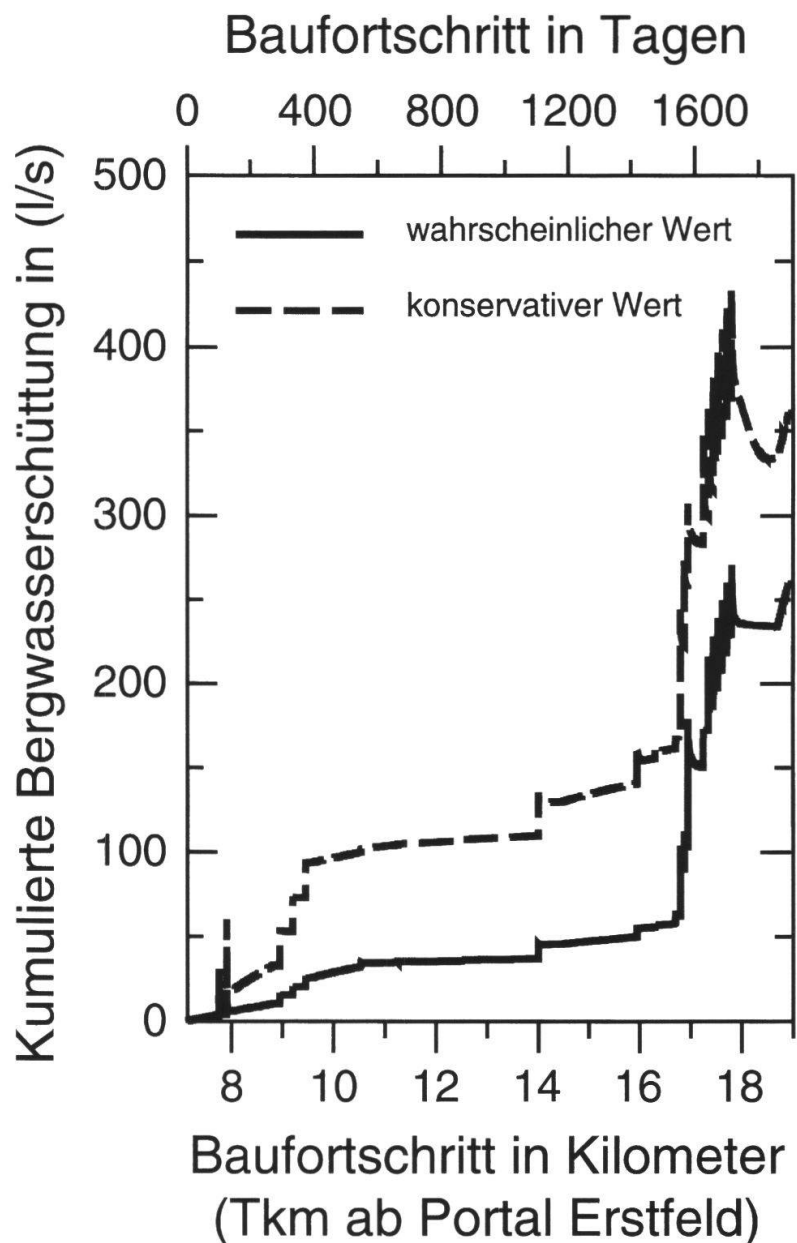


Fig. 11: Wahrscheinliche und konservative Prognose des Baufortschritt-abhängigen, kumulierten Wasseranfalls an der Basis des Zwischenangriffs Erstfeld (Gotthard-Basistunnel, Stand 1994).

zierung 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 liegt die berechnete Standardabweichung zwischen 2 und 6 Metern, entlang dem Tunneltrasse mit höherer Bohrdichte liegt der geschätzte Fehler in der Regel zwischen 2 und 3 m, maximal bei 4 m. Ausgeprägte Minima ergeben sich nahe den geophysikalischen Profilen und Bohrungen. Die berechnete Unsicherheit nimmt von Süden nach Norden zu, da die Tiefe zum Zielhorizont in dieser Richtung, und damit verbunden die Unsicherheit in der geophysikalischen Interpretation, zunimmt. Die einfache a-priori geschätzte Standardabweichung entlang der Tunnelachse auf der französischen Seite (km 1-14) lag bei 2.85 m.

Während dem Tunnelvortrieb wurden aus einem voreilenden Servicetunnel systematisch nach unten geneigte Vorbohrungen abgeteuft, um die aktuelle Lage der Basis der Kreidekalkformation zu bestimmen. Auf der französischen Tunnelseite

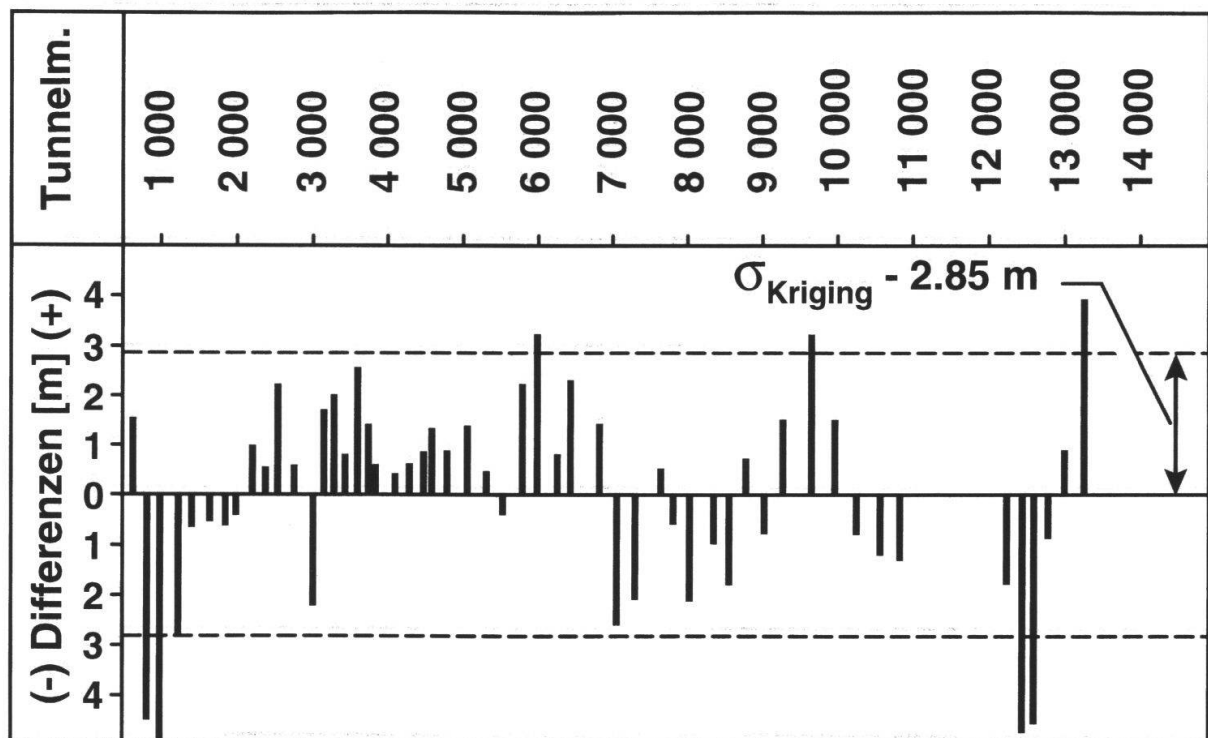


Fig. 12: Differenz tatsächliche Tiefenlage minus Prognose der Basis der Kreidekalke im französischen Abschnitt des Ärmelkanaltunnels (nach Blanchin and Chilès 1992).

wurden in den ersten 13 km 54 Bohrpaare (auf der britischen Seite 31 Bohrpaare) abgeteuft. Die Unterschiede zwischen tatsächlicher Tiefenlage und Prognose der Kreidekalkbasis zeigt Figur 12 (nach Blanchin und Chilès, 1992). 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 von 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.

4. 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 sind. Relativ geringe geologische Unsicherheiten resultieren (i) bei einer systematischen Integration aller vorhandenen Informationen unterschiedlicher Qualität (Messungen, Analogdaten, stochastische Schätzverfahren), (ii) bei einer hohen Messdatendichte relativ zur geologischen Heterogenität, (iii) bei einer expliziten Berücksichtigung von Heterogenitäten und Skaleneffekten, und (iv) 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.

Verdankung

Spezieller Dank gilt Steve Shulist, Liane Schlickenrieder 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. Klemenz, S. Flury und T.R. Schneider erarbeitet. Schliesslich möchte ich mich für wichtige unpublizierte Informationen und Daten zum Kilchenstock bei H. Stüssi herzlich bedanken.

Literatur

- BLANCHIN, R. AND CHILES J.P. 1992: Channel Tunnel: The Geostatistical Prediction of the Geological Conditions and its Validation by the Reality. In: 4th intern. Geostatics Congress, Terra Abstracts 4 Suppl. 3, Blackwell Scientific Publications.
- CLAUSER, C. 1992: Permeability of Crystalline Rocks, EOS Transactions, Amer. Geophys. Union Vol 73 No 21, 233-240
- DREYER T., SCHEIE, A. AND WALDERHAUG O. 1990: Minipermeameter-Based Study of Permeability Trends in Channel sand Bodies, Amer. Assoc. of Petroleum Geol. Bull. Vol. 74 No 4, 359-374.
- EHRMINGER, B., GILBY, D. and LÖW, S. 1993a: Gotthard-Basistunnel, Hydrogeologische Modellierung Vorprojekt: 3. Bergwasserzuflüsse zum GBT und Beeinflussung des Bergwasserspiegels: Baden, Colenco Power Consulting AG, p. 1-25.
- EHRMINGER, B., KLEMENZ, W. and LÖW, S. 1993b: Gotthard-Basistunnel: Quantitative Analyse hydrogeologischer Aufnahmen von Stollen- und Tunnelbauten im Gebiet Aar-Massiv - Gotthard-»Massiv« - Leventina: Baden, Colenco Power Consulting AG, p. 1-122.
- FREY, F. 1962: Erinnerungen an den Kilchenstock, Amtsblatt des Kantons Glarus Nr. 46, 116. Jahrgang.
- HEIM, A. 1932: Bergsturz und Menschenleben, Vierteljahresschrift der Naturforschenden Gesellschaft Zürich, Gebr. Fretz A.G. Zürich, pp 218.
- LÖW, S., EHRMINGER, B., KLEMENZ, W. & GILBY, D. 1996: Abschätzung der Bergwasserzuflüsse und Oberflächenauswirkungen am Beispiel des Gotthard-Basistunnels: in Oddsson, B. (ed.), Instabile Prozesse und andere risikoreiche natürliche Prozesse: Basel, Birkhäuser Verlag, Proceedings of the Centro Stefano Franscini, Flühler, H. (series-ed.), p. 353-376.
- MARGON, P. 1996: General Geology and Geotechnical Considerations. in: Harris, C.S., Hart, M.B., Varley P.M. and Warren C.D., Engineering Geology of the Channel Tunnel, Thomas Telford Publishing.
- RANKIN W.J. and MAY R.E. 1996: Geotechnical Properties. in: Harris, C.S., Hart, M.B., Varley P.M. and Warren C.D., Engineering Geology of the Channel Tunnel, Thomas Telford Publishing.
- ROVEY C.W. II, CHERKAUER D.S. 1995: Scale Dependency of Hydraulic Conductivity Measurements. Ground water Vol 33, No 5, 769-780.
- SCHARDT, H. 1928: 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.

