

Ingenieurgeologie und Vortriebstechnik im Untertagebau

Von Hans K. HELFRICH

Mit 2 Tabellen im Text

Eingelangt am 7. Dezember 1989

Zusammenfassung: Ingenieurgeologische Arbeiten und deren Prognosen müssen während des gesamten Projektablaufes technisch-wirtschaftliche Fragen in den Vordergrund stellen. Aussagen sind in diesem Sinne auf ihre Gültigkeit zu prüfen und den Arbeitseinsatz mit der erwünschten Präzision auf diese abzustimmen.

1. Einführende Betrachtungen

Voraussetzung für mein Hochschulstudium war ein Lehrer mit Instinkt für die „Angewandte Geologie“, der, zusammen mit einer geeigneten theoretischen Ausbildung, zu einer praktischen Denkweise geführt hat, die zur Grundlage meiner beruflichen Laufbahn wurde.

Seit 1948, mehr als 40 Jahre, wurde ich im Berg-, Tunnel- und Kavernenbau mit ingenieurmäßigem Denken konfrontiert. Als Resultat liegt eine Arbeitsweise vor, die vom Großen über das Kleine wieder zum Großen – den technisch-wirtschaftlichen Konsequenzen – führt. Einzelheiten, wichtig für den wissenschaftlich arbeitenden Geologen, verschwinden oft angesichts ihres Dezimalcharakters im weiteren Betrachtungsbereich geologischer Vielfältigkeit.

Das oben Gesagte gilt im besonderen für den Untertagebau, wo es gilt, Wesentliches und Unwesentliches trennen zu können, damit Prinzipentscheidungen über beispielsweise die Vortriebstechnik gefaßt werden können. Zu entscheiden ist, ob konventionell (Bohren und Sprengen), mechanisch mit TBM oder mit Fräsvortrieb (Roadheader) gearbeitet werden soll.

Entscheidende Kriterien sind:

- Aufbau und Bohrbarkeit der Gesteine und des Gebirges
- Nettobohreffekte
- Potentielle Schwächezonen im Gebirge
- Standzeitproblematik
- Zu erwartende Sicherungs- und Ausbaurbeiten

Ein Teil dieser Randbedingungen soll am Beispiel des Wasserkraftwerkes Kymmen in Zentralschweden beleuchtet werden.

Für die Beantwortung dieser Frageliste steht ein reichhaltiges Arsenal von Geo-Untersuchungen zur Verfügung, deren Auswahl nicht nur von den geologischen Voraussetzungen, sondern auch von der technisch-wirtschaftlichen Zielsetzung abhängig ist.

Letzteres wird leider oft vergessen (oder unterlassen), weil es nicht selbstverständlich ist zu fragen: Führt die Bearbeitung einer Einzelheit oder Gruppen solcher durch eine bestimmte Methode oder finanziellen Einsatz zur gewünschten Lösung?

Vielleicht liegt gerade darin die Tatsache begründet, daß viele Untersuchungen oft nur Ballast darstellen, aber manche notwendige Untersuchungen nicht ausgeführt wer-

den, weil der Ingenieur vom Wert oder Unwert geologischer Resultate, oft durch den Geologen selbst, verunsichert wird. Die Diskussion beim Salzburger Kolloquium 1988 hat deutlich gezeigt, wo der Schuh drückt. Hier ist viele schmerzhaft Arbeit zu leisten.

2. Geologische Voraussetzungen

Der Standort des Kraftwerkes Kymmen mit 16 km Tunnel und Stollen, Untertagekaverne, Schächte und Staudamm, liegt in präkambrischen Gneisen der Gräsmark-Formation (LINDH 1974, LUNDEGÅRDH 1977).

Der Charakter dieser Gneise (80% des Untergrundes) wechselt von grobkörnig (fast granitisch) bis feinkörnig (leptitisch) und zeigt eine kluffreiche, schuppig-blockige Ausbildung mit einem bevorzugten NW-SE Streichen der Parallelstruktur, die wechselnd steil gegen SW einfällt.

Die Vollständigkeit der Parallelstruktur wechselt stark, was die Geschlossenheit des Kontaktes der Glimmerminerale betrifft (Glimmergefüge-Index nach BÜCHI 1984).

Dieser Gneisformation sitzen zahlreiche hyperitische Lagergänge (im Verhältnis zur Parallelstruktur), Gabbro-Linsen und begrenzte granitische Abschnitte auf.

Der Aufschlußgrad wurde auf etwa 5% geschätzt. Aufgrund regionalgeologischer Betrachtungen wurde davon ausgegangen, daß der Gebirgscharakter für den gesamten Betrachtungsbereich als typisch zu bezeichnen ist.

Die topographische Karte 1:50.000 ließ das Vorhandensein eines Strukturreliefs erkennen, welches zusammen mit regionalen Erkenntnissen zu einem gutdefinierten Strukturmodell führte. Hauptträger dieses sind ein persistentes Kluftsystem mit zwei Hauptkluftscharen und einzelner regionaler und mylonitischer Störungen.

Ältere refraktionsseismische Untersuchungen (ab 1950) einer initialen Untersuchung im Frühstadium dieses Projektes indikierten eine bedeutende Störungszone im Bereich des St. Finnsjö's (Einzugsbereich des Überlaufstollens).

Die Gesamtheit der gesteinskundlichen und strukturellen Beobachtungen ermöglichten die Erstellung eines gebirgstechischen Erwartungsmodelles, verbunden mit einer Sicherungs- und Ausbauprognose, die aufgrund des begrenzten Aufschlußgrades zwar als unsicher zu klassifizieren war (die regionale Gesteinsverteilung und die Persistenz des Strukturbildes kompensieren den niederen Aufschlußgrad), die Durchführbarkeit des Projektes jedoch keineswegs in Frage stellte, wie es beispielsweise von der engeren Bevölkerung durch eine falsche Interpretation einer wissenschaftlichen Arbeit Lundegård's behauptet wurde und in zahlreichen Gemeinderatssitzungen widerlegt werden mußte.

3. Geologische und geophysikalische Erkundung

Die schwachen Stellen im Erwartungsmodell (Geländevertiefungen, Seen und Störungseinflüsse sowie die plötzlich aufgetauchte Erwägung, mit TBM arbeiten zu wollen – eine passende Maschine war gerade arbeitslos –) führten zur Erstellung eines Untersuchungsprogrammes, das drei Kernbohrungen von etwa je 50 m und einige Kilometer Refraktionsseismik vorsah.

Ausgangspunkt war eine Feldbegehung und Besichtigung einzelner Aufschlüsse entlang der Projekttrasse. Dabei kam so richtig der Gegensatz im ingenieurmäßigen Denken zum Ausdruck: es genüge, daß es sich um Gneis handelt als Tunnelbaumaterial, während alle technischen Details bis ins einzelne berechnet, kalkuliert und geplant werden.

Für den konventionellen Betrieb kann man sich zur Not mit Improvisationen helfen

Anders ist es beim mechanischen Vortrieb, der nicht die gleiche Flexibilität hat. Es müssen genauere Daten erarbeitet werden, damit die technischen Möglichkeiten und deren wirtschaftliche Konsequenzen genügend genau erfaßt werden können.

Mittelpunkte für die TBM Alternative waren die Erkundung der Gesteins- und Gebirgsseigenschaften und vortriebserschwerender Störungszonen. Zu nennen sind Festigkeiten (Druck-, Zug-, Scher-), Quarzgehalt (Cerchar Abrasion Index), das Gefüge, sowie Lagen und Eigenschaften solcher Störungen, die eine Abstützung der Maschine beeinträchtigen oder unmöglich machen, eine Bruchgefahr beinhalten, oder gar einen temporären „händischen“ Vortrieb notwendig machen können. Erfahrungen aus dem TBM-Betrieb zeigen, daß die Standzeit für den mechanischen Vortrieb viel kritischer ist als für den konventionellen Betrieb (siehe unten).

Von den drei Bohrlöchern entlang der Tunneltrassen lag nur eines im Stollenabschnitt, der für die TBM-Maschine ausgewählt wurde (oberer Teil des Überlaufstollens zwischen Rottnan und Granån), der Teil, der die erwartete St.-Finnsjö-Störung zu durchörtern hatte. Für die Wahl dieses Streckenabschnittes waren ausschließlich technisch-wirtschaftliche Faktoren ausschlaggebend (Länge, Zufahrt, Möglichkeit, konventionell der Maschine entgegenkommen zu können).

An der Technischen Hochschule in Luleå wurden die gesteintechnischen Tests ausgeführt und eine Prognose über die gebirgsabhängigen Vortriebsleistungen und Verschleißkosten erstellt (SUNDIN 1987, 1988). Ergänzt wurden diese Tests durch Versuche mit VLF, Magnetometrie und Widerstandsmessung von Obertage aus das Störungsnetz zu erkunden (THUNEHEID et al 1986, ANDERSSON-NILSSON 1987).

Die geologische Kartierung beschränkte sich auf eine übersichtliche Begehung vorhandener Aufschlüsse und generelle Erfassung des Makrogefüges. Lediglich im Bereich der Kaverne wurde mittels detaillierter Refraktionsseismik und Kernbohrung (Untertage) die günstigste Lage erarbeitet.

4. Prognose

Die Prognosenerstellung erfolgte in verschiedenen Projektabschnitten. Eine erste Prognose wurde ohne Bohrung und Geophysik erstellt, ausschließlich auf regionale Erkenntnisse aufgebaut und war auf konventionellen Betrieb ausgerichtet.

Dieses erste „Erwartungsmodell“ bildete die Unterlage für das spätere Untersuchungsprogramm, welches bereits auf einen möglichen TBM-Betrieb einer Teilstrecke Bezug nahm.

Während die erste Prognose drei Gebirgsklassen mit Bezug auf Sicherung und Ausbau für den konventionellen Betrieb enthielt, mußte die zweite Prognose bereits Angaben über eine erwartete Nettobohrleistung (m/h) enthalten. Da die Vortriebsleistungen nicht unwesentlich von der Gebirgsstruktur (Klüftung und Schieferung) abhängig sind (WANNER 1980, BÜCHI 1984), bedarf es auch einer Aussage über die Ausbildung von Glimmerflächen (Anisotropiegrad), deren Häufigkeit und Orientierung. Dabei muß von Bohrkernen auf einen vollen Stollendurchmesser geschlossen werden. Hier muß auf ein Größenverhältnis aufmerksam gemacht werden.

Bringt man den Bohrlochdurchmesser von 56 mm (Kerndurchmesser 42 cm) in ein Verhältnis zum Stollendurchmesser von 4.570 mm, so entsprechen einem Bohrkern von 10 cm Länge etwa 800 cm Stollen. Bei diesem Verhältnis macht das Kernvolumen etwa 0,0001% des entsprechenden Stollenvolumens aus. Wie homogen muß da das Gebirge sein, damit Bohrkern repräsentativ sein können? Die Maschine arbeitet ja gleichzeitig

Dabei ist ein Bohrkern von 10 cm Länge wohl der kleinste Betrachtungsbereich einer Bohrung (RQD). Nimmt man längere Kerne, so müßte auch der Stollenabschnitt entsprechend verlängert werden. Mit diesem Vergleich soll zum Ausdruck gebracht werden, wie klein die Beobachtungsgrößen als Prognosenunterlage verglichen mit den Betriebsabmessungen sind.

Für die Prognose wurde das Gebirge in sechs Zonen geteilt, denen erwartete Leistungen zugeordnet wurden (SUNDIN 1988). In der nachstehenden Tabelle sind diese mit den erzielten verglichen (Tabelle 1).

Tabelle 1: Erwartete und erzielte Vortriebsleistungen

Tunnelabschnitt (m)	Prognose (m/h)	Erzielt (m/h)
0- 600	2,46	2,88
-2200	1,86	1,94
-3300	4,66	2,25
-3900	1,45	1,44
-4400	1,71	1,92
-4526	1,59	1,41
0-4526	2,13	1,98

Das sind Durchschnittswerte mit wechselhaften Abweichungen. Die erzielten Vortriebsleistungen lagen zwischen 0,4 und 7,2 m/h. Im Endeffekt gleicht sich alles aus und gibt eine gute Übereinstimmung.

Die Vortriebsleistung wurde für jeden Stollenmeter gemessen bzw. errechnet. Für die Analyse der Wirtschaftlichkeit mag eine solche detaillierte Dokumentation technischer Daten vielleicht notwendig sein (?). Dem Techniker werden viele Zahlen gegeben, und das befriedigt.

Für den Prognosenvergleich und die Prognosenerstellung genügen, wenn schon gewünscht, Schichtleistungen. Besser noch wäre ein Vergleich mit der wöchentlichen Nettoleistung, ein Vergleich, der für die gebirgstechnische Analyse vollkommen ausreicht. Es ist nicht nötig, mit größerer Präzision zu arbeiten, als im Endeffekt realistisch ist.

Eingangs wurde festgehalten, daß die Kenntnis über das Vorhandensein von stark zerrüttetem Gebirge (Störungszonen) eine Notwendigkeit darstellt. Die erwartete St.-Finnsjö-Störung erwies sich richtig als eine sehr intensive Schwächestelle mit Mylonitbildung, Tonumwandlung und äußerst kurzer Standzeit. Sie beeinflusste den Stollen über eine Strecke von 137 m, innerhalb derer mehrere Verbrüche auftraten, jeweils bedingt durch zu hoher Vortriebsgeschwindigkeit bzw. zu später Sicherung.

Alles das war aus dem geologischen Gutachten zu ersehen, wurde aber nicht ernst genommen. Resultat: große Schwierigkeiten, Verspätung, die dann nur dadurch ausgeglichen werden konnte, daß man der Maschine konventionell entgegenkam. Die Störungszone hat 13% der gesamten Betriebszeit der Maschine beansprucht, machte aber nur etwa 1,5% (66 m mit Mylonitisierungserscheinungen) der TBM-Strecke aus. Darüber hinaus erforderten 2,5% geringe Sicherung und 96% des Stollens blieben unverstärkt.

Zum Vergleich sei angeführt, daß von den 850 m mit konventionellem Vortrieb (der TBM entgegen) 75% zu sichern waren (Spritzbeton und Ankerung), obwohl diese Strecke im gleichen geologischen Milieu vorgetrieben wurde.

Die Oberflächengeophysik konnte mit Ausnahme der Refraktionsseismik keinen entscheidenden Beitrag liefern. Allerdings zeigte auch die VLF-Messung über der St.-Finnsjö-Störung eine ausgedehnte Anomalie, ohne aber etwas über ihre Intensität aussagen zu können. Kleinere Anomalien fanden keine entsprechenden Störungszonen auf dem Stollenniveau.

Wie nicht anders zu erwarten war, reduzierte sich die Ausbreitung an der Oberfläche registrierten Anomalien gegen die Teufe zu, was vor allem durch eine Abnahme des Verwitterungseinflusses zurückzuführen ist.

Was die Prognose nicht verhindern konnte, war das Anfahren einer Grundmoräne im Auslaufbereich des Überlaufstollens (in einen See). In diesem Projektabschnitt wurde ein refraktionsseismisches Profil verlegt, um die Gebirgsoberfläche über dem seicht liegenden Stollen zu erkunden.

Übersehen wurde dabei, daß die Planung zu einem späteren Zeitpunkt die Trasse des Stollens verlegte und das seismische Profil keine Gültigkeit mehr hatte (der Gültigkeitsbereich eines seismischen Profils nimmt von der Profillinie aus rasch ab: direkter Beobachtungs-Meßbereich – indirekter Betrachtungsbereich).

Es stellte sich nachträglich heraus, daß es sich um einen Grundmoränentrog handelte, der unterfahren werden mußte. Mit nachträglicher Hammerbohrung und Detailseismik wurde der Abschnitt untersucht und der konventionell vorgetriebene Stollen entsprechend abgetaucht.

Schließlich noch einige Worte zur regionalen Störung südlich des Zulaufstollens. Es wurde der Verdacht ausgesprochen, daß Ausläufer der selben bzw. störungsparallele Schwächezonen oder Anhäufungen von Kluftscharen den Tunnel durch seine notwendige ungünstige Orientierung mit umfangreichen Sicherungsmaßnahmen belasten könnten.

Dieser Verdacht erfüllte sich nur zum Teil. Zwei begrenzte Mylonitzonen wurden durchfahren, der Rest zeigte keine Besonderheiten. Allerdings wurde die Tunneltrasse aufgrund des Verdachtes soweit als möglich gegen Norden verlegt, was zur günstigeren Situation beigetragen haben kann.

5. Schlusssätze

Voraussetzung für eine erfolgreiche ingenieurgeologische Arbeit ist eine gut definierte technisch-wirtschaftliche Fragestellung, auf die ein geologisches Erwartungsmodell ausgerichtet werden kann. Das vorgegebene Beispiel mit sowohl konventionellen als auch mechanischen Vortrieb zeigt sehr wohl die Unterschiede, die beachtet werden müssen, als auch die innige Verflechtung von geologischen und technischen Fragen und Konsequenzen. Nichts Neues, aber oft vergessen.

Sind sich deren die Gesprächspartner bewußt und über diese Gegebenheiten im Klaren, und können sie eine gemeinsame Sprachenbrücke bauen, die eine klare Kommunikation ermöglicht, dann müßte die Arbeit zum gesteckten Ziel führen.

Die geologischen und geophysikalischen Untersuchungen sowie die abgeteufte Bohrungen zeigten, daß die Kombination konventionelle und mechanische Vortriebsweise eine wirtschaftliche Durchführung der Untertagearbeiten ermöglichten. Nur mechanisch wäre unwirtschaftlich gewesen.

Für den mechanischen Vortrieb wäre gebirgstechisch ein anderer Stollenabschnitt günstiger gewesen (keine bedeutenden Störungszonen). Es zeigte sich weiter, daß der Sicherheits- und Ausbaubedarf bei mittleren Gebirgsqualitäten im TBM-Betrieb unbedeutend ist, es entfällt ja die Auflockerung durch Kluftinitiation beim Sprengen, die

beim konventionellen Betrieb im gleichwertigen Gebirge zu umfassenden Maßnahmen führen kann.

Hingegen wird im schlechten Gebirge keine Verbesserung der Standzeit erzielt. Dieselbe reicht oft nicht aus, um mit dem Bohrkopf den einsturzgefährdeten Gebirgsbereich zu durchhörern, um dann erst die schon früher notwendige Sicherung ausführen zu können. Das bedeutet Verschüttungen, notwendige vorausseilende Maßnahmen, beides führt zu Verzögerungen und Stillständen des riesigen Maschinenapparates (alles unwirtschaftlich, wenn nicht von Anfang an entsprechende Bereitschaftsmaßnahmen – Anpassung der Maschine an die Gebirgsverhältnisse – ergriffen werden). Das sind Dinge, die im konventionellen Betrieb durch entsprechende Vortriebsmaßnahmen (Abschlagtiefe, Teilausbruch, Teilsicherung) ausgeglichen werden können (LAUFFER 1988).

Es ist also offenbar die Frage der Standzeit im schwachen Gebirge (Störungsbereiche) beim TBM-Betrieb besonders kritisch.

Abgesehen von der geologischen Erkundung – Abgrenzung typischer Gesteins- und Strukturbereiche, vorzugsweise großräumig – und der gesteintechnischen Analyse, die vorerst Richtlinien für die maschinelle Vortriebsleistung geben, sind es geophysikalische Vorerkundungen mit nachfolgenden Bohrungen, die entsprechende Aufschlüsse über Einschränkungen für den mechanischen Vortrieb geben.

Bei der „Ingenieurgeophysik“ sind es VLF-Messungen, die als rasche und billige Rekognoszierung dienen und refraktionsseismische Messungen, die letztlich über den Charakter (Intensität der Laufzeitherabsetzung) der Schwächezonen Aufschluß geben. Allerdings gilt das bevorzugt für steilstehende Strukturen. Im Spezialfall kann auch auf das Vorhandensein von flachen Überschiebungszonen geschlossen werden, wenn das geologische Strukturmodell solche erwarten läßt.

Wie in der Gefügekunde Daten auf einen abgegrenzten Bereich bezogen werden und Gültigkeit haben, so muß das auch für eine Prognose gelten. Prognosen sollen daher auf Einzelfaktoren, je nach Aussagekraft (Informationsniveau, Gültigkeitsgrad) auf den Bereich bezogen werden, für den sie gelten: Beobachtung, Messung, Schätzung, Spekulation und Grenzwerte angeben (HELFRICH 1978, 1979). Je weiter von der Beobachtung oder Messung weg, je unsicherer wird die Aussage und größer deren technisch-wirtschaftliche Streuung. Das sind Realitäten, die man gerne unter den Teppich schiebt, die aber das Kernproblem der Verunsicherung ausmachen.

Die Erfahrungen von TBM-Betrieb können wie folgt zusammengefaßt werden:

- Längs der Tunneltrasse ist das Gebirge in großräumige Zonen zu gliedern, Ausnahmen: Gebirge mit extremen Eigenschaften.
- Verschiedene Gesteine können gleiche Vortriebsleistungen geben. Der strukturelle Inhalt ist daher wichtiger als die Identität und Entstehung des Gebirges. An Hand von speziellen Untersuchungsabschnitten wurden folgende Abhängigkeiten zwischen Kluffrequenz und Nettobohrfortschritt festgestellt (Tabelle 2):

Tabelle 2: Abhängigkeit zwischen Kluffrequenz und Bohrfortschritt

Kluftabstand cm	Vortriebsintervall m/h	Durchschnitt m/h
< 6	2,4 – 7,2	3,7
6 – 20	1,8 – 5,4	2,9
20 – 60	0,5 – 4,0	2,0
60 – 200	0,5 – 1,5	1,0
> 200	Keine Beispiele	

- Eine Kluftanalyse scheint nicht den gleichen Aussagewert zu haben wie im gesprengten Tunnel. Wahrscheinlich deshalb die große Streuung der Vortriebsgeschwindigkeiten.
- Registrierung der Maschinenleistung per Schicht oder Woche. Eine größere Präzision ist nicht erforderlich.
- Bei der Prognose ist es wichtiger, Bohrbarkeitsbereiche abzugrenzen als Gesteinsgrenzen zu finden.
- Aussagen über die Tiefenentwicklung von potentiellen Schwächezonen im Gebirge sind erforderlich.
- Die Detailaufnahme (Dokumentation) soll an die Prognosenvoraussetzungen angepaßt werden und für den Bestand des Bauwerkes wichtige Informationen enthalten.
- Fortdauer des Gespräches mit dem Ingenieur bis zum Abschluß der Nachanalyse.

Literatur

- ANDERSSON E., HELFRICH H. K., NILSSON L. und THUNEHEH H. 1986. Geofysiska undersökningar vid Kymmen. Geo-bygg Nr. 1. Stockholm.
- ANDERSSON E. und NILSSON L. 1987. Geofysiska mätningar för bedömning av bergkvalitén längs en tunnelsträckning i Värmland. Högskolan i Luleå, Examensarbete 090 E. Luleå.
- BJÖRKMAN M., HELFRICH H. K., und SUNDIN N-O. 1987. Fullortsborrning av Kymmentunneln. Bergsprängningskommittén, Diskussionsmöte, Stockholm.
- BÜCHI E. 1984. Einfluß geologischer Parameter auf die Vortriebsleistung einer Tunnelbohrmaschine. Dissertation. OFKO AG, Bern.
- HELFRICH H. K. 1978. The Engineering-Geologic Expectation Model as a Basis for the Prognosis in Underground Construction. Rock Mechanics, Suppl. 7.
- HELFRICH H. K. et al. 1979. Förundersökningars värde och omfattning. BeFo-rapport 18, Stockholm.
- HELFRICH H. K. 1986. Kymmen - Ingenjörgeologiska förutsättningar för TBM-drift. BeFo-Bergmekanikdag, Stockholm.
- LAUFFER H. 1988. Zur Gebirgsklassifizierung bei Fräsvortrieben. Felsbau Jg 6 (1988) Nr. 3. Verlag Glückauf.
- LINDH A. 1974. The Mylonite Zone in south-western Sweden (Värmland). G. F. F. Vol 96, Part 2. Stockholm.
- LUNDEGÄRDH P. H. 1977. The Gräsmark Formation in Western Central Sweden. S. G. U. Serie C Nr. 732, Stockholm.
- SUNDIN N-O. 1988. TBM-driven tunnel in the Kymmen area, western Sweden. BeFo 140:1. Stockholm.
- WANNER H. 1980. Klüftigkeit und Gesteins-Anisotropie beim mechanischen Tunnelvortrieb. Rock Mechanics, Suppl. 10.

Anschrift des Verfassers: Univ.-Prof. Dr. Hans K. HELFRICH, Brunnsvägen 5, S-18245 Eneyberg, Schweden.