

Ingenieurgeologische Aspekte des 124 MW Wasserkraftwerkprojektes *Dagachhu* in Bhutan / Himalaya

Engineering Geological Aspects of the 124 MW Hydropower Plant *Dagachhu* in Bhutan

Reinhold Steinacher¹

¹ Mag.rer.nat. Reinhold Steinacher, Bernard Ingenieure ZT GmbH, reinhold.steinacher@bernard-ing.com

Zusammenfassung

Beim 124 MW *Dagachhu*-Wasserkraftwerk werden 10.400 m Tunnel sowie zwei Kavernen in kristallinen Gesteinen des indischen Schildes konventionell im NATM-Vortrieb aufgeföhren. Erschwert werden die Arbeiten durch die abgeschiedene Lage der Baustelle im südlichsten Teil des Königreichs Bhutan sowie durch saisonale Starkregenereignisse und dadurch bedingte Versorgungsschwierigkeiten. Die in den Vortrieben angetroffene Geologie und Gebirgsqualität entspricht einer durchschnittlichen kristallinen Einheit der Ostalpen (z.B. Silvretta Kristallin) in der Nähe einer Deckengrenze. Die Verwendung von Indexwerten zur Felsklassifikation und Ausbaufestlegung wird kritisch gesehen, da nur bedingt repräsentative Aussagen getroffen werden können.

Schlüsselworte: Bhutan, Himalaya, Wasserkraft, Felsklassifikation

Abstract

The 124 MW *Dagachhu Hydropower Project* comprises 10,400 m tunneling and excavation of two caverns in the Higher Himalaya Crystalline Complex. The NATM excavation is done by an indian contractor. Works are hampered by the isolated location of the site in the southernmost Kingdom of Bhutan, seasonal monsoon events with large rain quantities and supply difficulties. The encountered geology and rock mass quality is comparable to alpine crystalline nappes (i.e. Silvretta Crystalline Complex) near major fault contacts. The use of index-values to describe rock mass quality and support measures is seen critically as different geologists may produce completely different values.

Keywords: Bhutan, Himalaya, Hydropower, rock mass classification

1 Einleitung

Das Königreich Bhutan, mit einer Fläche ungefähr so groß wie die Schweiz, will bis zum Jahr 2020 zusätzliche 10.000 MW Strom hauptsächlich für den Export nach Indien produzieren. Um dieses Ziel zu erreichen wird intensiv am Bau von zwei großen (1.000 – 1.200 MW) und zwei kleineren (124 – 670 MW) Wasserkraftwerken gearbeitet. Sieben weiterer Projekte mit Einzelleistungen bis zu 2.500 MW sind in der Planungs- bzw. Vorbereitungsphase.

Eines der bereits in Bau befindlichen Ausleitungskraftwerke ist das *Dagachhu Hydropower Project* (siehe Abb. 1 & Abb. 2). Ein 20 m hoher Damm mit 18 m Kronenbreite leitet das Wasser des *Dagachhu*-Flusses über Tunnel (Durchmesser *Headrace Tunnel* ca. 5 m) und Hangkanäle ins Krafthaus (*Powerhouse*). Die Gesamtlänge des Triebwasserweges beträgt 9.100 m. Der Kraftabstieg ist ein vertikaler 270 m tiefer, gepanzerter Druckschacht, der im *Raise-Boring* Verfahren mit 4 m Durchmesser erstellt wurde. Der Krafthaus-Komplex besteht aus der eigentlichen Krafthaus-Kaverne, in der die zwei *Pelton* Turbinen installiert werden, sowie der Transformator-Kaverne. Über den ca. 650 m

langen *Tailrace-Tunnel* wird das Wasser ca. 10 km nach seiner Ausleitung dem Fluss wieder zurück gegeben. Zusammen mit Hilfs- und Zugangsstollen ergibt sich eine Gesamtlänge der Tunnelvortriebe von über 10.400 m. Die maximale Überlagerung beträgt 625 m bei den Tunnelvortrieben und 280 m bei den Kavernen. Im Dezember 2012 sind ca. 75% der Vortriebsarbeiten im Triebwasserweg (*HRT-Headrace Tunnel*) sowie beide Kavernen fertig ausgebrochen und gesichert. Der Einbau der Turbinen hat bereits begonnen. Wasserschloss (*Surge Tank*), Druckschacht (*Pressure Shaft*) und *Tailrace-Tunnel* sind ebenfalls fertig gestellt. Bernard Ingenieure ZT-GmbH ist als Konsulent des Bauherren, der DHPC (*Dagachhu Hydropower Project Corporation*), tätig.

Nach einer Einführung in die Geologie des Projektraumes werden ingenieurgeologische Aspekte der Bauausführung erläutert. Neben Erfahrungen und Erschwernissen von Großbaustellen in logistisch schwer erreichbaren Gebieten wird v.a. die Verwendung von Felsklassifikationen mit Indexwerten im Tunnelbau diskutiert.



2 Geologie des Projektraumes

2.1 Geologische Übersicht

Der östliche Himalaya wird von mehreren großen Ost-West streichenden Störungssystemen durchzogen und bildet einen

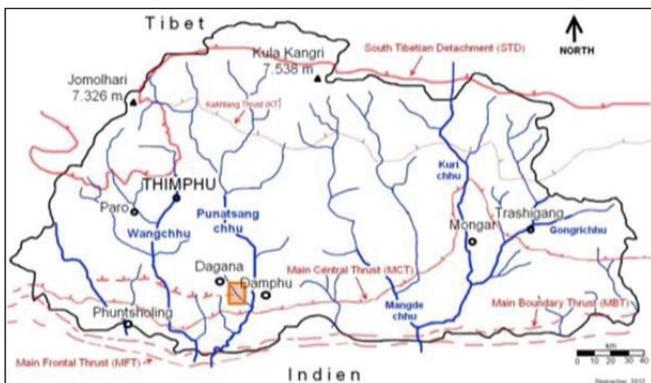


Abb. 1: Das Königreich Bhutan: Der Projektstandort bei Dagana ist farbig hinterlegt. Die geologischen Großstrukturen durchziehen Bhutan von Ost nach West (Strukturen nach LONG et al. 2011).

Fig. 1: The Kingdom of Bhutan with the project site near Dagana and the main geological structures (modified after LONG et al. 2011).

gegen Süden rücküberschobenen fold-thrust-belt. Von Süd nach Nord trifft man auf die Main Frontal Thrust (MFT), Main Boundary Thrust (MBT), Main Central Thrust (MCT), die Kakhtang Thrust (KT) und das South Tibetan Detachment (STD) (siehe Abb. 1 & Abb. 3). Alle diese Störungssysteme mit Ausnahme der STD zeigen Top nach Süd gerichtete Scherung und intensive Duplexbildung. Südlich oder im Liegenden der MCT finden sich Einheiten des Niederen Himalaya (Lesser Himalaya) sowie des Subhimalaya. Der Subhimalaya stellt die Molasseentwicklung dar, während der Niedere Himalaya aus Metasedimenten der flyschoiden Fazies des indischen Schildes besteht. Zwischen der MCT und der STD liegen die Gesteine des Hohen Himalaya (Greater Himalaya, Higher Himalayan Crystalline). Diese über 17 km mächtige Kristallindecke zeigt eine auffallende umgekehrte Metamorphose, die nordwärts zu- und zum STD wieder abnimmt. Auf diesem Kristallin des Hohen Himalaya liegen isolierte Becken aus Tethys-Sedimenten. Die STD begrenzt den Hohen Himalaya im Norden und bringt die Tethys Sedimente als Hangendes über das Kristallin des Hohen Himalaya. Die Verkürzung quer zum Orogen beträgt zwischen 70% und 75% bzw. zwischen 344 und 405 km (GANSSER 1993, GRUJIC et al. 1996, McQUARRIE et al. 2008, LONG et al. 2011).

Im Kristallinkomplex des Hohen Himalaya (Greater Himalayan Crystalline) zwischen MCT und STD erzeugen zwei rechtwinklig zueinander stehende, Ost-West und Nord-Süd streichende Faltenysteme kartenmaßstäbliche dome and basin Strukturen. Kartenmaßstäblich handelt es sich um kleinamplitudige Falten mit großen Wellenlängen. Das Projektgebiet liegt in den kristallinen Gesteinen des Hohen Himalaya ca. 15-20 km nördlich der MCT (siehe Abb. 3).

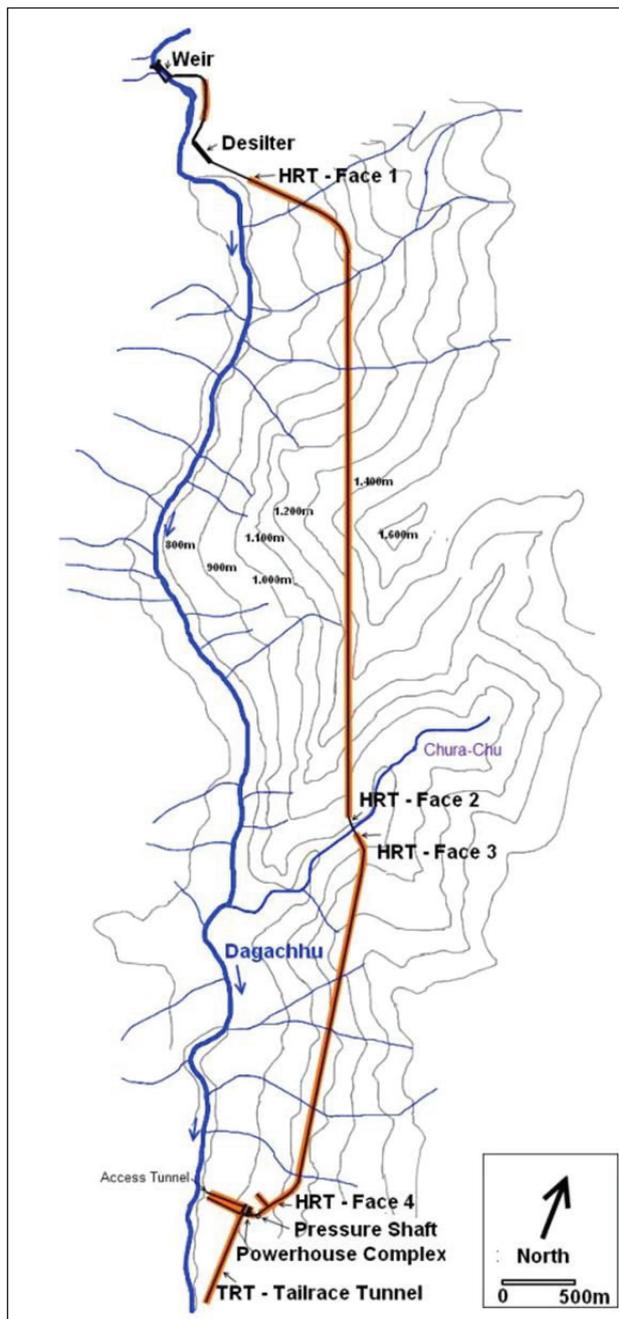


Abb. 2: Übersicht über die Anordnung der Bauwerke. Farbig hinterlegte Bereiche sind Untertagebauwerke. HRT...Headrace Tunnel.

Fig. 2: Project outline. Coloured sections show the underground structures. HRT...Headrace Tunnel.

2.2 Baugeologische Verhältnisse

2.2.1 Gesteinstypen

Die angetroffenen Gesteine sind quarzreiche, teils phyllitische Granat-Glimmerschiefer bis Quarz-Glimmer Schiefer, Quarzite, Augen- und Paragneise. Gegen Norden sind in den Glimmerschiefern neben Granat makroskopisch Kyanit- und Staurolith-Kristalle zu erkennen. Eine Wechsellagerung zwischen Glimmerschiefern, Paragneisen und Quarziten dominieren den Headrace Tunnel sowie die beiden Kavernen (siehe Abb. 4 und Abb. 5). Meist ist eine enge Wechsel-

lagerung zwischen den Gesteinen im Zentimeter- bis Dezimeterbereich entwickelt. Im *Surge Tank* werden Paragneise in Wechsellagerung mit dünnen Glimmerschieferlagen angetroffen.

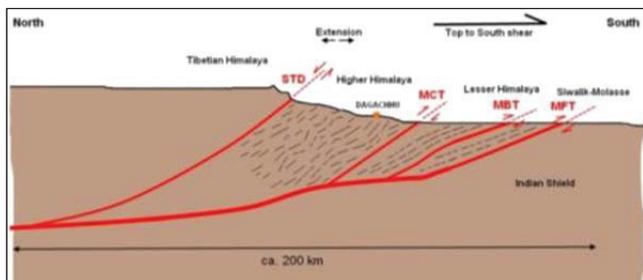


Abb. 3: Stark vereinfachte Darstellung der geologischen Großstrukturen des östlichen Himalaya im Längsschnitt (kompiliert nach versch. Autoren – siehe Text).

Fig. 3: Section showing the main geological structures of the Eastern Himalaya (references see text).

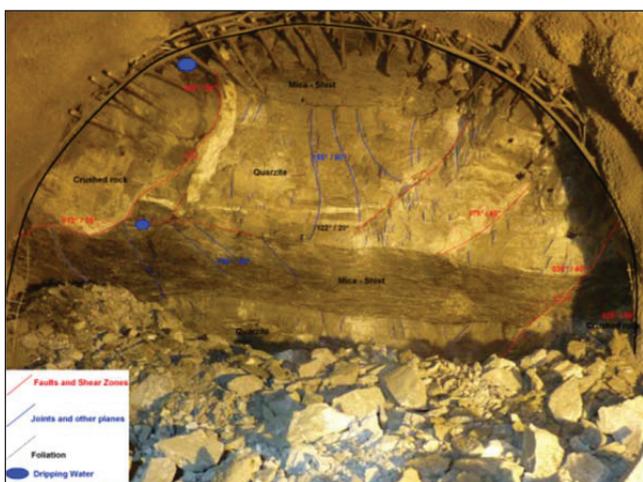


Abb. 4: Glimmerschiefer und Quarzite an der Ortsbrust (HRT).

Fig. 4: Mica-Schists and Quartzites at a typical face of HRT.

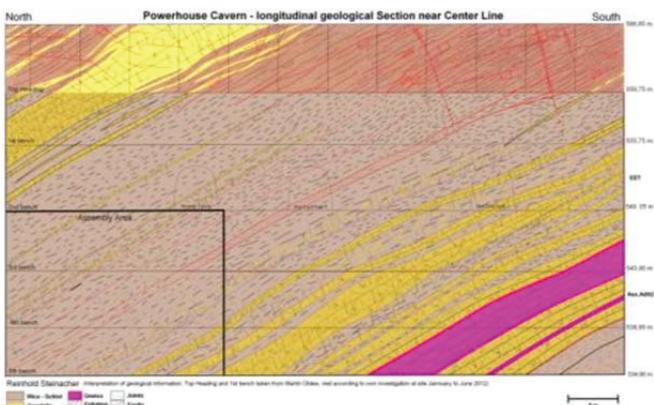


Abb. 5: Längsschnitt durch die Powerhouse Kaverne (braun: Glimmerschiefer, gelb: Quarzite, magenta: Gneise). Die Aufnahme der Kalotte wurde von Martin Übleis übernommen (andersfarbig).

Fig. 5: Longitudinal section along Powerhouse axis (brown: Mica-Schist, yellow: Quartzite, magenta: Gneiss).

2.2.2 Trennflächen

Schieferung:

Die Gesteine zeigen ausgeprägte mylonitische Strukturen. Mehrere duktile, koaxiale Faltungsphasen erzeugten eine durchdringende Schieferung sowie eine isoklinale Verfaltung mit Achsenebenen subparallel zur Schieferung.

Im südlichen Projektgebiet fällt die Schieferung einheitlich flach bis mittelsteil gegen Norden bzw. Nord-Osten ein. Im nördlichen Projektgebiet ist anhand der Einfallwerte eine wannenartige Struktur erkennbar, welche durch kartennaßstäbliche, Ost-West-streichende, offene Falten verursacht wird (Abb. 9).

Die Schieferungsflächen sind in allen angetroffenen Lithologien mit Biotit und/oder Muskovit besetzt. Schieferungsparallel sind Tonbestege oder mehrere Zentimeter bis Dezimeter mächtige Zonen mit *fault gouge* ausgebildet. Diese Zonen treten lokal wie regional v.a. in den Glimmerschiefern in Wechsellagerung mit Lagen spröder Quarzite oder Gneise auf.

Klüftung:

Vor allem in den spröden Quarziten und (Para)Gneisen sind zwei bis drei Klüftsysteme zu beobachten. Ein mit Abweichungen Nord-Süd streichendes sowie ein Ost-West streichendes Joint System dominieren (siehe Abb. 6).

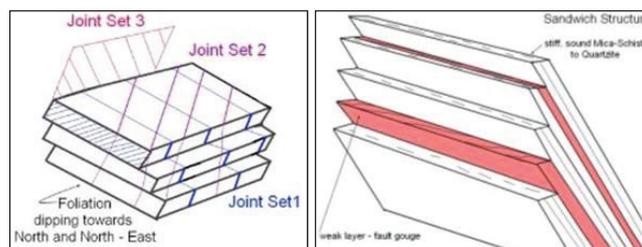


Abb. 6 (li.): Schematisierte Darstellung der Klüftsysteme.

Abb. 7 (re.): Hart-auf-Weich: schieferungsparallele Störungen.

Fig. 6 (le.): Sketch showing alignment of Joint Sets.

Fig. 7 (ri.): Sandwich-Structure by foliation parallel shear zones.

Störungen:

Im *Headrace Tunnel* wurden mehrere Störungszonen zwischen 10 und 100 m angetroffen. Hierbei wurden v.a. Nord-Ost / Süd-West und Nord-West / Süd-Ost streichende Störungsflächen als Hauptrichtungen erkannt. Anhand systematischer Dokumentation von Kleinstrukturen bei Ortsbrustaufnahmen wurden folgende Beobachtungen gemacht (siehe Abb. 2, Abb. 5, Abb. 6):

- Das Auftreten, schieferungsparalleler bzw. subparallel zur Schieferung einfallender Störungszonen
- Abschiebungen gegen Süden bzw. Süd-Ost und Süd-West. Im Norden des Projektgebietes herrschen Abschiebungen gegen Süd-West vor, im südlichen Projektgebiet Abschiebungen gegen Süd-Ost
- Gegen Nord-Ost einfallende Störungssysteme
- Gegen West bzw. West-Süd-West einfallende Störungsflächen



2.2.3 Bergwasser

Alle aufgefahrene Untertagebauwerke liegen unterhalb des Bergwasserspiegels. Tropfwasser bis leicht rinnende Zutritte sind auf ca. 30 – 35% der bisher aufgefahrene Strecke vorhanden. Vor allem in Zusammenhang mit Störungszonen traten Wasserzutritte zwischen 0,5 und mehreren Litern pro Sekunde (l/sec) auf. In einem einzelnen Fall wird von bis zu 10 l/sec berichtet. Nur vereinzelt blieben die Zutritte langfristig in ihrer Schüttmenge stabil. Die Zutritte zeigen generell eine Tendenz zur raschen Abnahme der Quantität.

Im Durchschnitt treten ca. 0,5 bis 0,7 l/sec pro 100 m Tunnelstrecke auf. In den beiden Kavernen zusammen sind nach Fertigstellung ca. 2 – 3 l/sec an permanenten Zutritten vorhanden.

2.2.4 Verwitterung

In den Untertagebauwerken wurden im nicht gestörten Gebirge ausschließlich unverwitterte Gesteine angetroffen. Im Zusammenhang mit Störungen war kleinräumig leichte Verfärbung der Gesteine sichtbar. Im 45 m tiefen *Surge Tank* wurden in stark geklüfteten Paragneisen mit Glimmerschieferzwischenlagen noch 65 – 70 m unterhalb der Geländeoberfläche teils vollkommen verwitterte Gesteine angetroffen. Die Verwitterungserscheinungen drangen dem Trennflächensystem folgend in den Untergrund ein und betrafen v.a. die Glimmerschiefer (siehe Abb. 8).

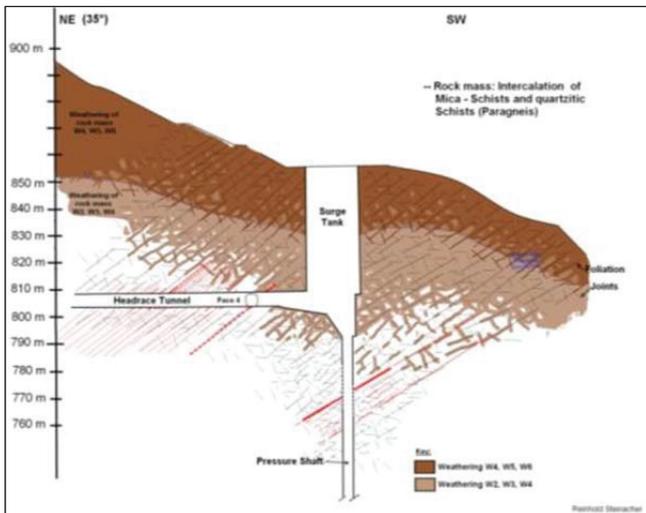


Abb. 8: Visualisierung tiefgründiger Verwitterung (dunkelbraun: verwittert W4/W5/W6; hellbraun: angewittert W2/W3; weiß: unverwittert W1).

Fig. 8: Visualization of deep reaching weathering (brown colours: completely weathered to slightly weathered; white: unweathered).

3 Felsklassifikation mit Indexwerten im Tunnelbau

3.1 Stützmittelklassen im Bauvertrag

Die Positionen für die Untertagearbeiten wurden im Leistungsverzeichnis gebirgsabhängig nach Stützmittelklassen ausgeschrieben. In Anlehnung an die österreichische Norm ON 2203-1 wurden für die im Vollausschub aufgefahrene Tunnelvortriebe fünf solcher Stützmittelklassen (*Support Class = SC*) entworfen, deren Anwendung durch kostenbeeinflussende Unterscheidungsmerkmale definiert wurden (HOLZLEITNER & FISH, 2012):

- Die Abschlagslänge zur Erreichung hoher Sicherheit für Arbeiter und Bauwerk sowie akzeptabler Profildgenauigkeit.
- Die Stützmittelmenge zur Erreichung eines sekundären Gleichgewichtszustandes gekennzeichnet durch die Abnahme bzw. dem Aufhören der Gebirgsverschiebungen.
- Die Abfolge der Arbeiten bei Ausbruch und Stützung des Hohlraumes

Die Stützmittelklassen SC1 und SC2 sind für kompetentes und (stark) geklüftetes Gebirge vorgesehen, bei dem der primäre Spannungszustand die Gebirgsfestigkeit nicht überschreitet. SC3 wird in sehr stark geklüftetem, zerbrochenem bis leicht geschertem Gebirge angewendet. Der primäre Spannungszustand ist gleich der Gebirgsfestigkeit oder überschreitet sie leicht. Die Stützmittelklassen SC4 und SCL (*Support Class Loose*) sind für stark geschertes und/oder verwittertes Gebirge mit lockermaterialähnlichen Eigenschaften (Störungsgesteine, Störungsbreuzien) vorgesehen bei denen der primäre Spannungszustand die Gebirgsfestigkeit wesentlich überschreitet. Als Stützmittel stehen je nach Stützmittelklasse 3 bis 4 m lange SN bzw. Swellex-Anker, 10 – 25 cm Spritzbeton, ein bis zwei Lagen Baustahlgitter und ab der Stützmittelklasse SC3 Spieße mit 3 bis 4 m Länge zur Voraussicherung zu Verfügung.

Für die Kavernen wurden der Ausbruch und die Hohlraumstützung auf Basis von Berechnungsergebnissen unveränderlich vorgegeben. Die Stabilisierungstendenz wurde jeweils durch geodätische Messungen nachgewiesen.

3.2 Vorgangsweise

Die Festlegung der Stützmittel vor Ort muss laut Vertrag in Übereinstimmung zwischen dem Geologen des Auftragnehmers und dem Geologen des Auftraggebers erfolgen. Da der indische Auftragnehmer das Q-System nach BARTON et al. (1974) für die Gebirgseinschätzung verwendet, wurden Bereiche von Q-Werten gutachterlich festgelegt, die den in Kapitel 3.1 beschriebenen Stützmittelklassen am ehesten entsprechen (SCHOLZ 2010, siehe Tabelle 1). Die Bereiche überlappen sich, um im Zweifelsfall oder bei Eintreten besonderer geologischer Verhältnisse trotzdem eine stärkere Ausbauklasse wählen zu können (z.B. Spieße bei stark geklüfteten Gesteinen in der Krone bei sonst guten Verhältnissen).

Tab. 1: Korrelation zwischen Stützmittelklassen und Q-Werten.

Tab. 1: Correlation between Support Classes and Q-values

| Support Class (SC) | Rock Classification | Range of Q-values |
|--------------------|---------------------|-------------------|
| SC1 | Competent | 11 > 130 |
| SC2 | Jointed | 1 - 13 |
| SC3 | Weak/fractured | 0,4 – 1,75 |
| SC4 | Faulted/sheared | <0,006 – 0,4 |
| SCL | Loose ground | 0 |

3.3 Der Q-Wert

Mit dem Q-System errechnet man aus sechs optisch abgeschätzten Einflussgrößen (RQD, Anzahl der Kluftscharen J_n , Kluftraugigkeit J_r , Kluftzustand J_a , Kluftwasser J_w , Spannungszustand des Gebirges SRF) drei Terme, die ein Maß für die Blockgröße, die Scherfestigkeit an Klüften und den aktiven Spannungszustand beschreiben sollen. Die Multiplikation dieser drei Terme ergibt den Q-Wert, der die Gebirgsqualität beschreiben soll. ANAGNOSTOU & PIMENTEL (2012) äußern Kritik an der Verwendung solcher Indexwerte zur Festlegung der Stützmittel. Bemängelt werden eine dürftige empirische Basis und zu große Bandbreiten in den Festlegungsdiagrammen.

Beim Projekt *Dagachhu* wurden Q-Werte durch zwei unabhängig voneinander arbeitende Geologen aufgenommen und verglichen (siehe Tabelle 2). Die Werte differierten oft erheblich. Bei der Bestimmung des RQD sowie des Kluftzustandes (*Joint Alteration Number*) wurden die größten Variationen beobachtet. Wasserzutritte, die Anzahl der Kluftscharen, der Spannungszustand im Gebirge und die Kluftraugigkeit wurden eher einheitlich angegeben. Trends in der Entwicklung waren ebenfalls einheitlich.

In 46% der Fälle wurde ein annähernd gleicher Q-Wert (+/-1) ermittelt. Die Varianz der Q-Werte war bei guter Gebirgsqualität sehr viel größer als bei schlechter Gebirgsqualität. Durch die in Tabelle 1 festgelegten Bereiche, die gerade bei guter Gebirgsqualität große Spannbreiten haben, wurde nur selten keine Übereinstimmung bei der Festlegung der Ausbauklasse erreicht. Im Zweifelsfall wurde diese nach ausführlicher Diskussion durch einen Vertreter des Bauherren gutachterlich festgelegt.

Tab. 2: Prozentsatz der gleich/ähnlich ermittelten Werte.

Tab. 2: Percentage of similar evaluated values.

| Q | RQD | J_n | J_r | J_a | J_w | SRF |
|-----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 46% | 45,8% | 62,5% | 50% | 41,7% | 93,7% | 54,1% |

Q...absolute Q-value +/-1; RQD...Rock Quality Designation +/-10;
 J_n ...Joint Set Number; J_r ...Joint Roughness Number;
 J_a ...Joint Alteration Number; J_w ...Joint Water Factor;
 SRF...Stress Reduction Factor;

4 Erfahrungen und Erschwernisse

Folgende Faktoren konnten als zeit- und kostenrelevante Erschwernisse erkannt werden und sollten in zukünftigen Projekten berücksichtigt werden:

- Monsun: von Juni bis September gehen teils enorme Regenmengen nieder und erschweren den Transport von Menschen und Material. 2012 wurden im Projektgebiet bis zu 172 mm/24h, 301 mm/72h und 476 mm/7d Niederschlag gemessen. In anderen Gebieten gingen Wochenniederschläge bis 1115 mm nieder. Bei der Unwetterkatastrophe 2005 in Tirol betrug die Niederschläge zwischen 120 – 200 mm/24h bzw. 300 mm/72h.
- Zufahrtsstraßen: Der Fahrbahnzustand der Zufahrtsstraßen war über große Wegstrecken sehr schlecht. Ein enormer Verschleiß an Material sowie ein erhöhter Zeitaufwand waren die Folgen. Auch die Sohlausbildung in den Vortrieben war mangelhaft und führte über die Zeit zu ständigem Maschinenausfall und erhöhtem Zeitaufwand.
- Die Wasserhaltung ober- wie untertage war teils Grund für die schlechte Qualität der Zufahrtsstraßen. Der Mangel an Tauchpumpen verstärkte dieses Problem. Der Auftragnehmer konnte erst sehr spät überzeugt werden, dass ein ständiges Mitziehen einer betonierten Sohle von Vorteil ist.
- Ersatzteile: Die Entlegenheit der Baustelle, die schwierige wirtschaftliche Situation Bhutans sowie die Logistik des Auftragnehmers führte zu einem Mangel bzw. Unterversorgung mit Ersatzteilen. Wochenlanges Warten auf z.B. Ersatzreifen für LKW's war keine Seltenheit.
- Bewitterung, Hitze, Luftfeuchtigkeit: Die Bewitterung der Vortriebe v.a. in der heiß-feuchten Sommerzeit war durch die teils kilometerlangen Zugangswege zu den Vortrieben mangelhaft. Das Fehlen von Ersatzteilen bzw. geeigneteren, stärkeren Belüftungsgeräten, die schlampige Führung der Lutte und die immer wieder ausfallende Stromversorgung verschärften das Problem.
- Qualifizierte Arbeiter waren rar. Durch die Entlegenheit der Baustelle hatte der Auftragnehmer Schwierigkeiten mit der Rekrutierung. Ein ständiger Personalwechsel machte Versuche des „Ausbildens“ schwierig bis unmöglich. Dadurch wurde v.a. beim Übergang zwischen den einzelnen Arbeitsschritten des konventionellen Vortriebes viel Zeit verloren. Der Einbau der Stützmittel wurde dadurch verzögert und schuf Folgeprobleme.
- Geologie: Flach liegende Schieferung und schieferungsparallele Störungszonen führten teils auch im sonst guten Gebirge zu lästigen Überbrüchen und zusätzlichem Aufwand.
- *Machinery Type*: Die richtige Wahl der Maschinentypen wurde durch den Auftragnehmer verabsäumt. Geschüttet wurde mit „normalen“ LKW's, die den harten Bedingungen in den Vortrieben nicht standhielten. Kleinwerkzeug, Tunnelbagger und Zusatz- bzw. Spezialgeräte waren unbekannt.
- Stromausfall, Internet, Kommunikation: Die ständige Versorgungsunsicherheit von Strom und Internet erschwerten die Arbeiten und die Kommunikation.
- Das geotechnische Monitoring konnte durch die meist späte Nullmessung nicht im Sinne der NATM zur „Voraussicht“ genutzt werden sondern war ein langfristiges „Überprüfungswerkzeug“ für die Stabilität der gewählten Ausbauklasse.
- Der Auftragnehmer zeigte eine gewisse Beratungsresistenz, die teils zur Verzögerung bei der Umsetzung wichtiger Maßnahmen führte.



5 Schlussfolgerungen und Ergebnisse

5.1 Felsklassifikation mittels Q-Wert

Der Q-Wert stellt eine gute Diskussionsgrundlage dar und kann die Kommunikation zwischen Geologen, Ingenieuren und Nicht-Fachmännern vereinfachen. Die Vermittlung von komplexen geologischen Gegebenheiten mittels eines Wertes ist allerdings schwer möglich und auch nicht wünschenswert. Der Vergleich absoluter Q-Werte zwischen zwei unabhängig voneinander agierenden Geologen ist nur bedingt möglich und hängt von deren Ausbildung und Erfahrung ab. Das Erkennen von Entwicklungstrends im Gebirge ist bei Ortsbrustaufnahmen alle 5 bis 10 m möglich und hilfreich. Idealerweise sollten zum Vergleich mehrere Systeme parallel nebeneinander angewendet werden. Der

geologische Hausverstand und eine gutachterliche Festlegung können dadurch allerdings nicht ersetzt werden.

5.2 Gebirgsqualität

10 bis 15 % der bisher aufgefahrenen Tunnelmeter können als stark gestört, 30 % als gestört bezeichnet werden. Dieses Ausmaß entspricht in den Augen des Verfassers nicht einem ungestörten kristallinen Gebirge sondern einem Gebirge im Nahbereich einer Deckengrenze oder Großstörung (siehe Abb. 9 bis Abb. 12). Die angetroffenen Störungssysteme (Kapitel 2.2.2) entsprechen den in der Fachliteratur beschriebenen Strukturen und sind skizzenhaft in Abb. 12 dargestellt. Hauptsächlich wurden große Abschiebungen gegen Süden bzw. Südwesten, schieferungsparallele Störungszonen sowie Nord-Süd streichende, gegen Osten einfallende Störungen beobachtet.

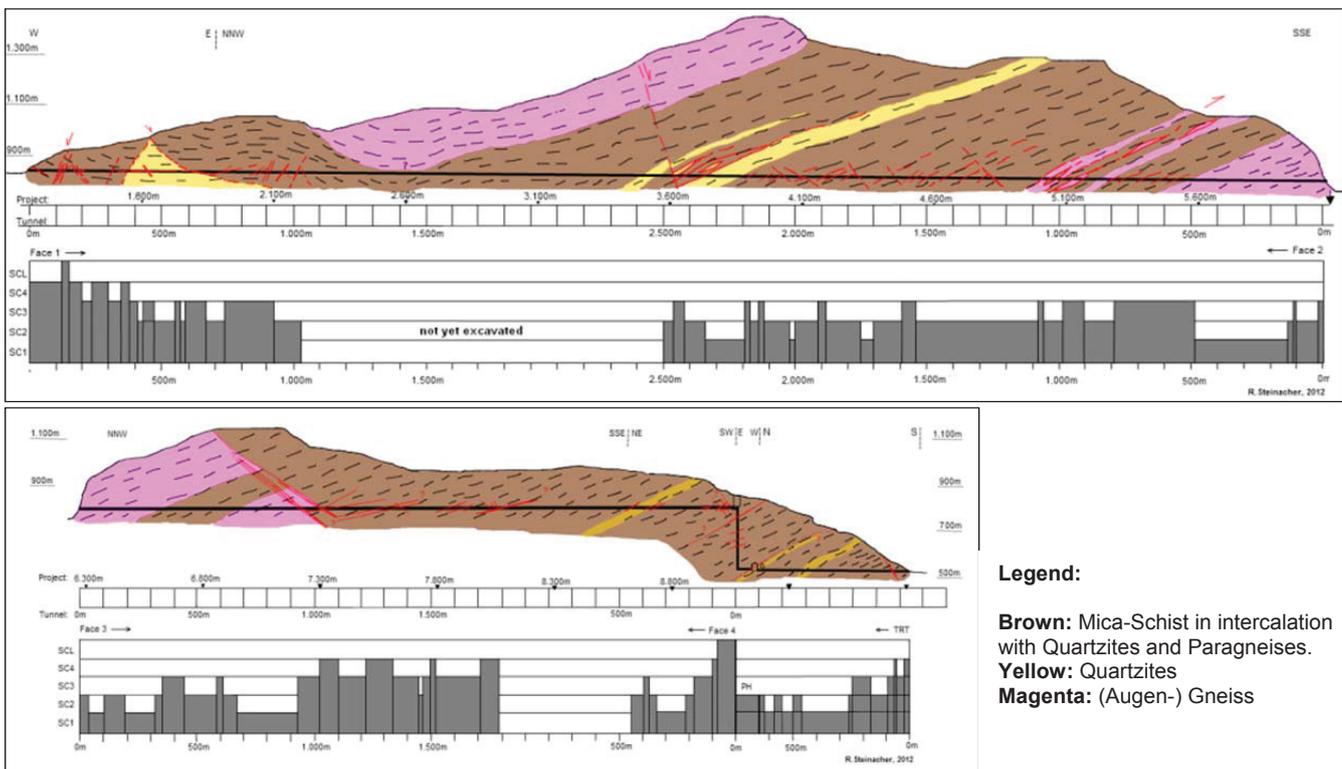


Abb. 9 & 10: Längsschnitt nach bisherigen Ortsbrustaufnahmen.

Fig. 9 & 10: Longitudinal section according to face logs.

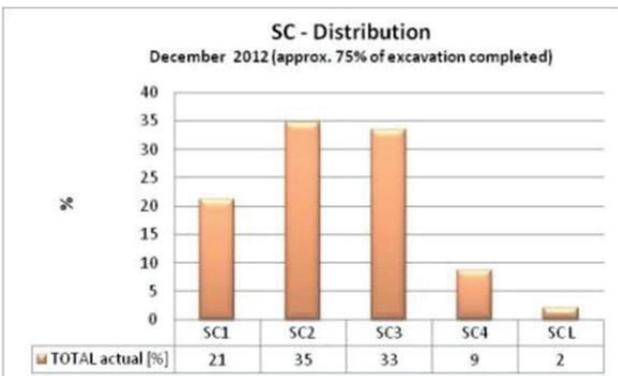


Abb. 11: Verteilung der Ausbauklassen (SC) im Headrace Tunnel.

Fig. 11: Support Class Distribution in Headrace Tunnel.

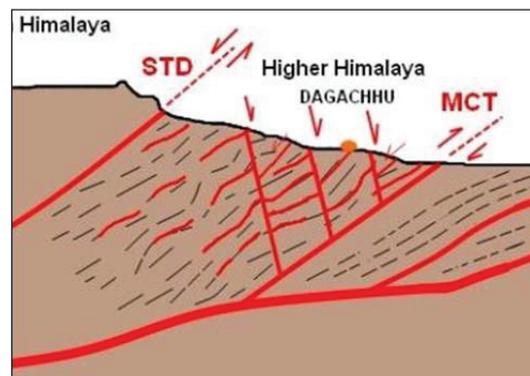


Abb. 12: Skizzierte Großstrukturen im Hohen Himalaya.

Fig. 12: Sketch of geological structures in the Higher Himalaya.

Die in Kapitel 4 angeführten Erkenntnisse sollten in zukünftigen Bauverträgen berücksichtigt werden. So könnte das zwingende Vorschreiben bestimmter Maschinentypen die Arbeiten vor Ort wesentlich erleichtern.

Literatur

- ANAGOSTU, G. & PIMENTEL, E. (2012): Zu den Felsklassifikationen mit Indexwerten im Tunnelbau. – *Geotechnik*, **35** (2): 83-93.
- BARTON, N.R., LIEN, R. & LUNDE, J. (1974): Engineering classification of rock mass for design of tunnel support. – *Rock Mechanics and Rock Engineering*, **6** (4): 189-236.
- HOLZLEITNER, W. & FISH, M., (2012): NATM Untertagebauwerke des KW Dagachhu / NATM Underground Structures of the Dagachhu HPP. – **In:** Stipek, W., Galler, R., Bauer, M. (eds.): 50 Years NATM – Experience Reports, ITA Austria, Wien: 163-168.
- CAROSI, R., MONTOMOLI, C., RUBATTO, D. & VISONA, D. (2006): **In:** LAW, R.D., SEARLE, M.P. & GODIN, L. (eds.): Channel Flow, Ductile Extrusion and Exhumation in Continental Collision Zones. – *Geol. Soc. London Spec. Public.*, **268**: 425-444.
- GANSSER, A. (1993): The Himalayas seen from Bhutan. – *Jb.Geol.B.-A.*, **136**: 335-346.
- GRUJIC, D., CASEY, M., DAVIDSON C., HOLLISTER, L.S., KÜNDIG, R., PAVLIS, T., SCHMID, S. (1996): Ductile extrusion of the Higher Himalayan Crystalline in Bhutan: evidence from quartz microfabrics. – *Tectonophysics*, **260**: 21-43.
- HOLLISTER, L.S. & GRUJIC, D. (2006): Pulsed Channel Flow in Bhutan. – **In:** LAW, R.D., SEARLE, M.P. & GODIN, L. (eds.): Channel Flow, Ductile Extrusion and Exhumation in Continental Collision Zones. – *Geol. Soc. London Spec. Public.*, **268**: 415-423.
- LONG, S., MCQUARRIE, N., TOBGAY, T. & GRUJIC, D. (2011): Geometry and crustal shortening of the Himalayan fold-thrust belt, eastern and central Bhutan. – *Geol.Soc.Am.Bulletin*, **123** (7-8): 1427-1447.
- MCQUARRIE, N., ROBINSON, D., LONG, S., TOBGAY, T., GRUJIC, D., GEHRELS, G., DUCEA, M. (2008): Preliminary stratigraphic and structural architecture of Bhutan: Implications for the along strike architecture of the Himalayan system. – *Earth and Planetary Science Letters*, **272**: 105-117.
- SCHOLZ, M. (2010): Report on Geological Rock Mass Classification and Support Classification. – projektinterner Bericht, unpubliziert.