Tunnelbau in einer Großrutschung – Wuyi Tunnel der Hochgeschwindigkeitsbahnstrecke Hefei-Fuzhou, VR China

V. Stingl, P. Neumann und H. Kirschner

Zusammenfassung Der fast 5 km lange Wuyi-Tunnel der Hochgeschwindigkeitsstecke von Hefei nach Fuzhou wurde 2010 von beiden Portalen und einem Zugangsstollen aus angeschlagen. Der 200 m lange Südvortrieb liegt in einer Großrutschung, die bei der Planung nicht berücksichtigt wurde. Dementsprechend traten große Probleme (enorme Deformationsraten, Verbrüche, Setzungen) auf, die nur mit extrem aufwendigen Maßnahmen bewältigt werden konnten. Das Fehlen von ausführlichen geologischen Vorerkundungen, von qualifizierter geologisch-geotechnischer Betreuung, sowie die unzureichende Vermessungsarbeit erschwerten zusätzlich die Vortriebsarbeiten. Die Bauzeit für den 200 m langen Abschnitt betrug dadurch drei Jahre. Letztlich konnte am Beispiel des Wuyi-Tunnels wieder einmal die Bedeutung einer intensiven geologischen Vorerkundung und einer qualifizierten Vermessung aufgezeigt werden.

1 Einleitung

Der Ausbau der chinesischen Infrastruktur mit Tausende von Kilometern langen Hochgeschwindigkeitsbahnen für den Personenverkehr bietet seit vielen Jahren Tätigkeitsfelder für ausländische Ingenieure, Geotechniker und Ingenieurgeologen. Diese sind zum Beispiel als externe Berater (Foreign Quality Representatives) oder als Bauüberwacher (Supervisors) in den verschiedensten Baulosen involviert – sei es in den dicht besiedelten Metropolen im Osten und Süden Chinas oder aber in ländlichen Gebieten, von den Schwemmebenen der großen Flüsse bis in gebirgige Regionen.

Projekte dieser Art und Größe, noch dazu in einem fremden und fremdsprachigen Umfeld, stellen mannigfaltige Herausforderungen an die projektbegleitenden „Foreign Experts“ aus allen Gewerken, wie zum Beispiel Erdbau, Brücken- oder Tunnelbau [1]. Ein großes Aufgabenfeld ist hierbei der Baugrund und seine Behandlung, Erkundung und Bewertung vor dem Hintergrund des oftmals geringen Stellenwerts dieser Leistungen im Rahmen des lokalen Projekt- und Bauwesens.

Dr. Volkmar Stingl
Technisches Büro für Erdwissenschaften
Andreas-Hofer-Straße 51, 6020 Innsbruck, Österreich
volkmar.stingl@uibk.ac.at, Tel. 0043–676 3419287

Hubert Kirschner, M. Sc.
HKI Geo-Engeneering
Erzherzog-Eugen-Straße 10/8, 6020 Innsbruck, Österreich
hubert.kirschner@gmail.com, Tel. 0043–7418 479979

Dr. Peter Neumann
Baugeologisches Büro Bauer
Domagkstraße 1a, 80807 München
peter.neumann@baugeologie.de, Tel. 089 36040 467

Bild 1. Regionale Lage der HeFu PDL und des Mingan-Bauüberwachungsloses in Südostchina, Wuyishan-Gebirge, Fujian Provinz, und großtektonische Einordnung
Fig. 1. Regional position of HeFu PDL and of Mingan supervision lot in Southeastern China, Wuyishan mountains, Fujian province, and its large-scale tectonic classification

Der vorliegende Artikel will dies am Beispiel des Baus des Wuyi Tunnels im Wuyishan-Gebirge Südostchinas darstellen. Der Wuyi Tunnel ist Teil einer Hochgeschwindigkeitstrasse von Hefei nach Fuzhou durch die Provinzen Anhui, Jiangxi und Fujian und liegt in geologisch sensiblem Gebiet. Der in seichter Lage erstellte Süd-Vortrieb hatte mit nicht erkundeten und daher unerwarteten Auswirkungen einer großräumigen Hangbewegung zu kämpfen. Bauzeit und -aufwand haben sich extrem erhöht.

Im Folgenden wird einerseits die Ingenieurgeologie des Projektgebiets erläutert und auf geologische Erwartungen und tatsächlich angetroffene Zustände eingegangen. Andererseits wird das Zusammenspiel von Projektbeteiligten, baupraktischen Möglichkeiten vor Ort und der Einflussnahme ausländischer Experten bei der Problembewältigung ausgeführt.

2 Projektvorstellung

Die Strecke Hefei-Fuzhou ist Teil des derzeit in Bau befindlichen Hochgeschwindigkeits-Bahnnetzes in der Volksrepublik China. Diese N-S-Verbindung („HeFu-PDL“ = Hefei-Fuzhou Passenger Dedicated Line) hat eine Länge von 810 km (**Bild 1**) und ist für Geschwindigkeiten bis zu 350 km/h ausgelegt. Die Strecke durchmisst die drei Provinzen Anhui, Jiangxi und Fujian. Bauherr ist die zum chinesischen Eisenbahnministerium (jetzt Transportministerium) gehörige JingFu Company mit Sitz in Fuzhou.

Im Jahr 2010 wurde PEC+S Germany Ltd. (vor Ort PEC+S Beijing) beauftragt, in den zwei nördlichsten Baulosen der Provinz Fujian (Baulos IV und V) die Bauüberwachung im Rahmen eines Joint-Venture-Vertrages mit dem SSDI (Second Survey and Design Institute) zu leiten (BÜ-Los III, Mingan Lot) sowie Beratertätigkeit durchzuführen. PEC+S stellte im Projekt den Chief Engineer der Bauüberwachung und mehrere Experten (Professional Supervision Engineers) für Tunnel-, Brücken- und Erdbau sowie Oberbauarbeiten. Zwei der ausländischen Experten fungierten zudem zusammen mit zwei chinesischen Ingenieuren als Leiter der BÜ-Stationen in Jianyang und Wuyishan.
Die beiden von PEC+S betreuten Baulose der HeFu-PDL in Fujian haben eine Gesamtlänge von 101,9 km und durchqueren eine stark gebirgige Region (Wuyishan-Gebirge), daher sind Tunnels in diesem Abschnitt die Hauptbauwerke (Gesamtlänge der Tunnelstrecken 58,4 km). Das BÜ-Los wird auch als „Mountain PDL“ bezeichnet. Insgesamt wurden 37 Tunnel (mit zusätzlichen sechs Zugangsstollen bis zu 1,3 km Länge) mit Längen zwischen 136 m und 7 508 m aufgefahren (Nordgrenze von Baulos IV bei km DK 528+450 in der Mitte des circa 15 km langen Nord-Wuyishan-Tunnels, Südgrenze von Baulos V bei km DK 630+331). Los IV wird von Tunnelbauwerken dominiert (39,8 km bzw. 80,25 %). In Los V stellen 18,6 km Tunnel (35,5 %) ebenfalls einen großen Anteil an den Bauwerken.
Die Vortriebsarbeiten an den Tunnels begannen im Juni 2010 und wurden 2013 abgeschlossen. Die Inbetriebnahme der Strecke ist im März 2015 erfolgt.

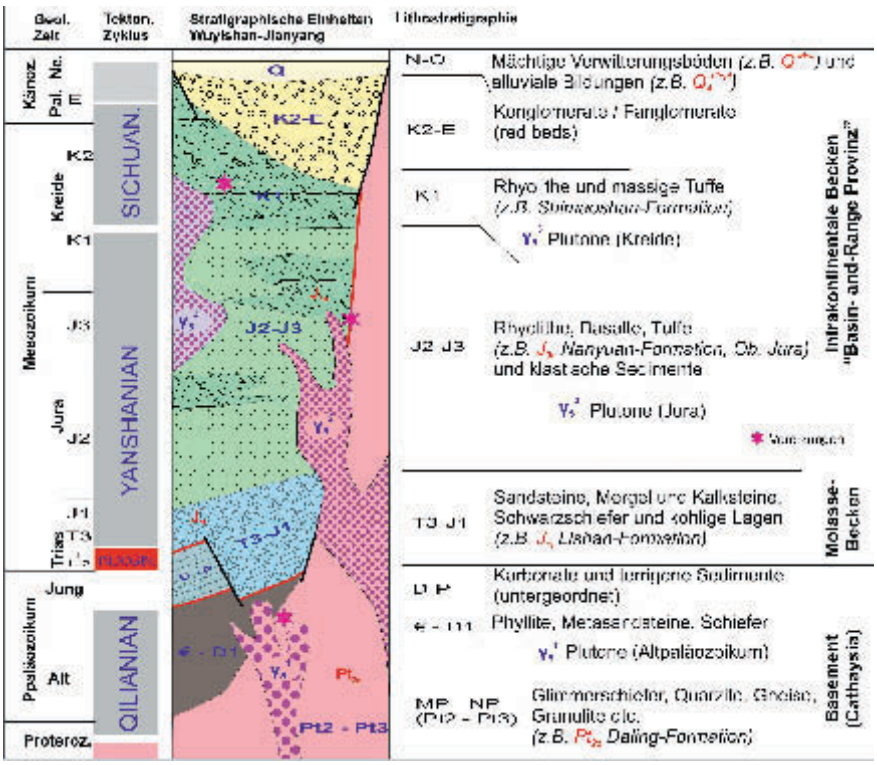

Bild 2. Baugrundmodell und Tektonostratigraphie im Mingan-Baulos der HeFu PDL, Provinz Fujian. Rote Schrift: Formationen im Wuyi Tunnel
Fig. 2. Ground model and tectono-stratigraphy of the Mingan construction lot of HeFu PDL, Fujian province. Red letters: geologic formations in Wuyi tunnel

3 Geologie der nördlichen Fujian Provinz

Aus geologischer Sicht quert die HeFu PDL den Wuyi-Orogengürtel, der zum Südchinesischen Block beziehungsweise Kraton gehört [2]. Als Folge der Kollision des Nordchinesischen mit dem Südchinesischen Block (Cathaysia im weiteren Sinne) während der Indosinischen Phase kam es in der Obertrias zu intensiver Faltung und anschließender Beckenbildung [3]. Diese post-orogenen Becken wurden bis in den mittleren Jura mit teilweise mächtigen Sedimenten und Vulkaniten aufgefüllt [4]. Im Mesozoikum und Känozoikum entwickelte sich eine klassische Basin-and-Range-Geologie [5]. In der Phase des Yanshanian (mittlerer Jura bis untere Kreide) zeichnet schließlich eine intensive tektono-magmatische Aktivität verantwortlich für mächtige rhyolitische Effusiva (mit häufigen Ignimbriten) sowie speziell in der Unterkreide teilweise ausgedehnte granitische Intrusionen [6], [7].
Die komplexe Tektonostratigraphie des Gebirges von Wuyishan ist in **Bild 2** vereinfacht dargestellt und kann als General-Baugrundmodell für das gesamte BÜ-Los angesehen werden.

4 Designierte Hochrisikotunnels

Schon von Beginn an waren einige Tunnelvortriebe mit größeren Problemen konfrontiert, die in den speziellen geologisch-geotechnischen Bedingungen begründet waren. Generell geringe Überlagerung (vor allem in Los V), seichte Talunterquerungen, nicht prognostizierte Störungszonen und starke Wasserzutritte waren die Hauptursachen für die Schwierigkeiten beim Vortrieb. Speziell die Portalbereiche wiesen die größten Probleme aufgrund der tiefgreifenden tropischen Verwitterung und damit in Zusammenhang stehenden schlechten geotechnischen Eigenschaften der durchörterten Materialien auf. Die für Verwitterungsmaterial typischen teilgesättigten Zustände und die Tendenz, Wasser zu absorbieren, verursachen oft eine rasche Veränderung der Festigkeitseigenschaften des Bodens. Durch den Verlust der Konsistenz und einer eventuell falschen Vortriebs- und Ausbaumethode kommt es zu einem erhöhten Risiko an First- oder Ortsbrustversagen.
Ein weiteres Problem für einen Teil der Tunnels stellte das Ignorieren von Planungserfordernissen und Bauüberwachungsanordnungen [8] durch die ausschließlich chinesischen Baufirmen dar. Diese Zusammenhänge (schwieriges Baugrundverhalten, riskant agierende Baufirma, unzureichende chinesische Bauüberwachung) führten zum Beispiel in Lot V in Tunnels mit geringer Überlagerung aus verwittertem Material zu mehreren First- und Ortsbrustversagen, was schließlich den Bauherrn veranlasste, die Bauüberwachung während des Vortriebes hinsichtlich Sicherheit und Qualität drastisch durch die intensive Einbeziehung der ausländischen Experten zu verstärken.
Nachdem man die meisten Probleme in den Griff bekommen hat, blieben in einer späteren Bauphase nur mehr we-

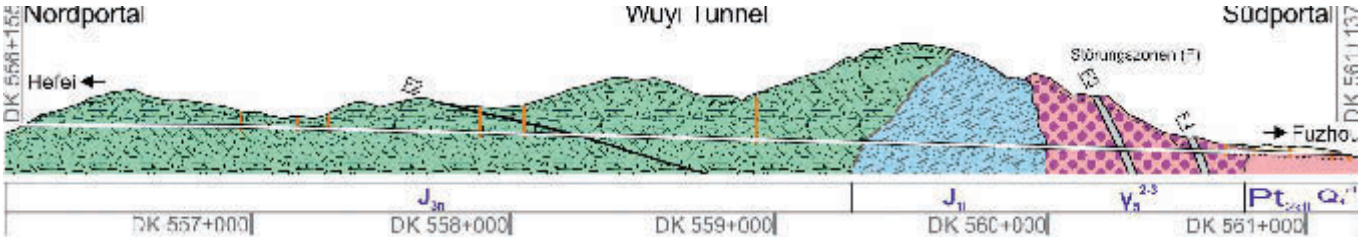

Bild 3. Schematischer Längsschnitt des Wuyi Tunnels, nach Design-Unterlagen. Beschreibung der Geologie im Text. Orange: Erkundungsbohrungen der Ausführungsplanung. Punktierte Linie: Verwitterungstiefe

Fig. 3. Schematic longitudinal section of Wuyi tunnel according to design. Description of geology in the text. Orange color: exploration drillings according to construction design. Dotted line: weathering depth

nige Tunnel mit bautechnisch schwierigen und geologisch risikoreichen Bedingungen übrig: In Los V wurden vier Tunnel durch die JingFu Cpy. als Hochrisiko-Tunnel eingestuft (Cangchuanlong Tunnel #1, Fenghuangshan Tunnel, Tongyou Tunnel, Pujian Tunnel), in Los IV drei Tunnelbauwerke (Baimashan Tunnel, Guanshan Tunnel, Wuyi Tunnel). Die Erfordernisse des Bauherrn umfassten umfangreiche Begleitmaßnahmen, um die Sicherheit und zeitgerechte Fertigstellung mit höchstmöglicher Qualität zu gewährleisten. In diesem Rahmen mussten die ausländischen Bauüberwacher sämtliche Abnahmeverfahren im Schichtbetrieb ohne Unterbrechung übernehmen und dafür verantwortlich zeichnen.

Als Resultat konnten fast alle Hochrisikotunnels durch die intensivierte Begleitung ohne größere Probleme und unfallfrei bis Mitte 2013 durchgebrochen werden. Lediglich der Südvortrieb des Wuyi Tunnels mit seinen speziellen geologischen Bedingungen erforderte einen exzessiven Mehraufwand vor allem hinsichtlich temporärem Ausbau und zusätzlichen gebirgsverbessernden Maßnahmen während des Vortriebes, damit verbunden auch einen entsprechend größeren Zeitaufwand.

5 Wuyi Tunnel

Der Wuyi Tunnel unterquert ein Bergmassiv circa 2 km bis 3 km östlich der Kreisstadt Wuyishan in der Präfektur Nanping, Provinz Fujian. Seine Gesamtlänge beträgt 4 981 m. Er wird von den Portalen und von einem Zugangsstollen (Xishan access tunnel) aus vorgetrieben. Der Nordvortrieb sowie die beiden Vortriebe vom Zugangsstollen aus wurden in standfestem Gebirge ohne nennenswerte Schwierigkeiten im vorgesehenen Zeitrahmen bewältigt (**Bild 3**).

Dagegen repräsentiert der nur wenig mehr als 200 m lange Südvortrieb (von DK 561+137 bis 560+920) des Wuyi Tunnels in der Nähe des Dorfes Xiamei den geologisch-geotechnisch schwierigsten und gefährlichsten Tunnelabschnitt im Projekt. Seit dem Baubeginn im Jahr 2010 (inklusive einer halbjährigen Bauunterbrechung) konnten bis Mitte 2013 nur circa 190 m aufgefahren werden, bedingt durch extreme Setzungen (bis 1,5 m Gesamtsetzung) und Konvergenzen (bis zu 1 m), die durch vorwiegend einseitigen Druck hervorgerufen werden. Im Zuge des Vortriebes kam es auch mehrmals zu größeren Verbrüchen (auch Tagbrüche).

Der Durchschlag erfolgte am 15. September 2013 nach über drei Jahren Bauzeit.

5.1 Ursprüngliche Planung des Südvortriebs

Eine sehr kurze Vorlaufzeit für Erkundung und Planung ist auch bei großen Bauprojekten in China charakteristisch. Der Aufwand für geologisch-hydrogeologisch-geotechnische Vorerkundung wird möglichst gering gehalten, und es wird vielfach auf Erfahrungen aus anderen Projekten mit ähnlichen Voraussetzungen zurückgegriffen. Hauptgrund ist, dass der gesamte Zeitrahmen von Planungsbeginn bis Fertigstellung wie auch die Finanzplanung vom Auftraggeber strikt vorgegeben sind und nach Möglichkeit nicht überschritten werden sollten. Somit bleibt kaum Spielraum für die Bewältigung unvorhergesehener Ereignisse und Erschwernisse. Wie aus der Praxis bekannt, kommt es durch unzureichende Vorerkundungen zu groben Fehleinschätzungen des Untergrundes und seinem Verhaltens.

In der ursprünglichen Planung für den Wuyi Tunnel Südvortrieb war der gesamte Abschnitt einheitlich als Gebirgsgüteklasse V (Ausbauklasse Vb) eingestuft, der Vortrieb sollte mit 4-stufiger CRD-Methode (Cross Diaphragm Method) geschehen. Die Gebirgsklassifikation basiert auf den dürftigen Ergebnissen der Vorerkundungen, die aus zwei Bohrungen im Portalbereich (DK 561+137) und einer Bohrung bei DK 560+930, sowie aus seismischen Untersuchungen gewonnen wurden. Allerdings hat sich die Kenntnis der geologischen Verhältnisse als völlig unzureichend erwiesen. Die Lage des gesamten Abschnittes innerhalb einer großen Massenbewegung wurde nicht erkannt und daher auch nirgends erwähnt. Offensichtlich wurde für die Vorerkundung auf die Auswertung von Luft- oder Satellitenbildern, die die Verhältnisse in dem von dichter Vegetation bedeckten Bereich klar darstellen würden (**Bild 4**), verzichtet. Im Zuge des Vortriebes musste daher durch wiederholte Planänderungen versucht werden, die Ausbruchsmethode und den Ausbau immer wieder an die gerade herrschenden Bedingungen anzupassen, was aber aufgrund der mangelhaften Kenntnis der geologischen Verhältnisse nur bedingt erfolgreich war. Einer der Schwachpunkte im chinesischen Tunnelbau ist auch die Art der Gebirgsklassifikation, die hauptsächlich nur die Gesteinsfestigkeiten berücksichtigt, aber nicht die Zusammenhänge mit strukturellen, geotechnischen und hydrogeologischen Kriterien, und somit eigentlich nur eine Gesteinsklassifikation darstellt. Eine Gebirgscharakterisierung in Gebirgsverhaltenstypen entsprechend der NAT-Methode findet hier keinen Eingang. Ebenso Klassifizierungen mittels Q-system, RMR-system oder GSI werden nicht angewendet. Zudem finden die großräumigeren geologischen Verhältnisse außerhalb des Trassenverlaufes kaum bis keine Beachtung, weshalb die lokale Situation am Wuyi Tunnel Südvortrieb nur unvollständig be-

Bild 4. Südportalbereich des Wuyi Tunnels in großräumiger Rutschmasse. Links: Blick von Süden auf das Portal und die unbewaldete Rutschmasse. Rechts: Satellitenbild (Abb.: googlemaps) mit Lage des Tunnels und Ausdehnung der Rutschung
Fig. 4. South portal area in large-scale mass movement. Left: view from south to the portal and the unwooded sliding mass. Right: satellite image (source: GoogleMaps) with position of the tunnel and extension of the landslide.

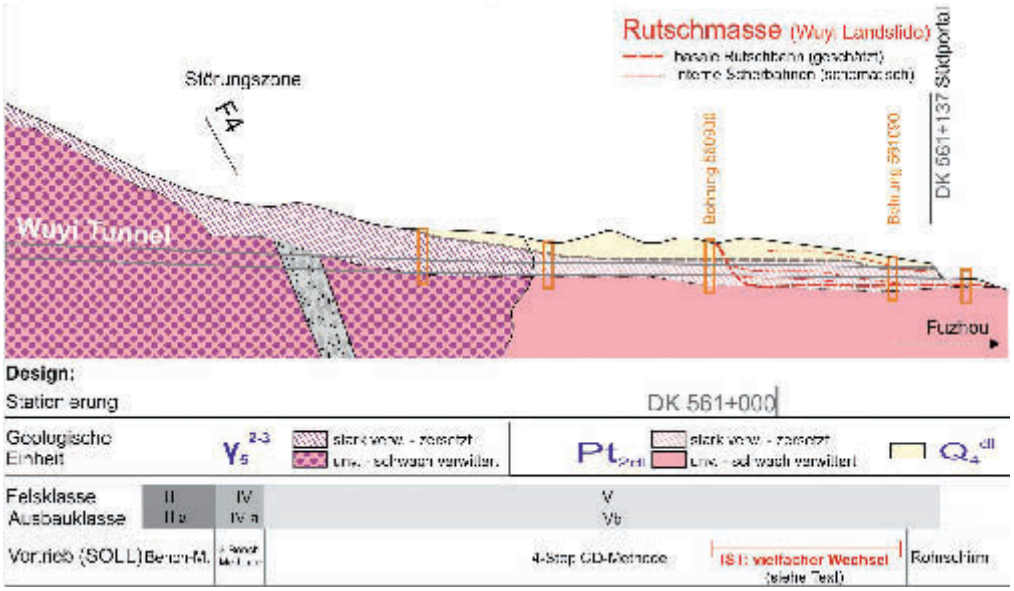

Bild 5. Längsschnitt und vereinfachtes Tunnelband durch den Südportalbereich des Wuyi Tunnels gemäß Design (SOLL). In Rot ist die nicht erkundete Rutschung eingetragen sowie der Bereich mit stark vom SOLL abweichendem Vortrieb
Fig. 5. Simplified longitudinal geological section along the south portal area of Wuyi tunnel according to design (SOLL). Red: not investigated landslide and area that differs widely from SOLL

kannt und für die Ausführungsplanung nicht richtig interpretierbar war.

5.2 Erwartete und angetroffene Geologie im Südvortrieb

Der Wuyi Tunnel quert von Norden nach Süden im Großteil seiner Trasse rhyolitische Vulkanite (Quarzporphyre und Tuffe) des Yanshanian (Bild 2 und Bild 3), lediglich im Bereich des Südvortriebs sind auf circa 400 m Länge mesoproterozoische Metamorphite (vorwiegend Gneise und Glimmerschiefer) der Tailing-Formation aus der sehr alten proterozoischen Beckenbasis erschlossen (**Bild 5**). In diesen finden sich auch kleine granitisch-pegmatitische Körper der jura- und kreidezeitlichen Intrusionen.

Die Gesteinsoberfläche ist durch eine tiefgreifende subtropisch-tropische Verwitterungsschwarte gekennzeichnet, die je nach Exposition unterschiedliche Mächtigkeiten bis zu 15 m aufweisen kann. Oberflächliche Umlagerungsprozesse betreffen normalerweise nur die oberste Schicht der Verwitterungszone.

In der ursprünglichen Planung ist nur wenig geologische Information beinhaltet: Oberflächlich sollen nur wenige Meter mächtige siltige Tone mit einem geringen Anteil an Steinen und Blöcken vorliegen (im Schnitt 3 m Eluvium), die nur im Portalbereich ins Tunnelprofil reichen. Der Großteil des Südvortriebes soll von genannten Metamorphiten der Tailing-Formation eingenommen werden. Der Verwitterungsgrad soll von schwach bis komplett reichen. Bei kompletter Verwitterung soll ein vorwiegend sandiger Boden mit hoher Wasserempfindlichkeit vorliegen. Ansonsten wird die hohe Festigkeit des schwach bis unverwitterten Gesteins betont, sowie Intrusionskontakte zu Graniten der Unterkreide erwähnt.

Schon bald nach Anschlag des Südportals zeigten sich die ersten großen Probleme durch starke Deformationsraten, die zusätzlich durch verstärkte Wasserzutritte während der Regenzeit verschärft wurden. Oberflächliche Injektionsbohrungen sowie die Aufschlüsse im Vortrieb erschlossen nicht nur 3 m eluviale Überlagerung und darunter den stark verwitterten Untergrund, sondern durchgehend bis unter Sohlniveau stark bindigen, wasserempfindlichen schluffig-tonigen Boden mit teilweise großen Blöcken von weniger verwitterten Metamorphiten. Die unterschiedliche Schieferungslage der Metamorphitblöcke bewies die chaotische Lagerung des Blockwerkes in dieser extrem deformierbaren Grundmasse. Diese Lockergesteinsmasse wurde von Scherflächen in unterschiedlichen Niveaus in mehr oder

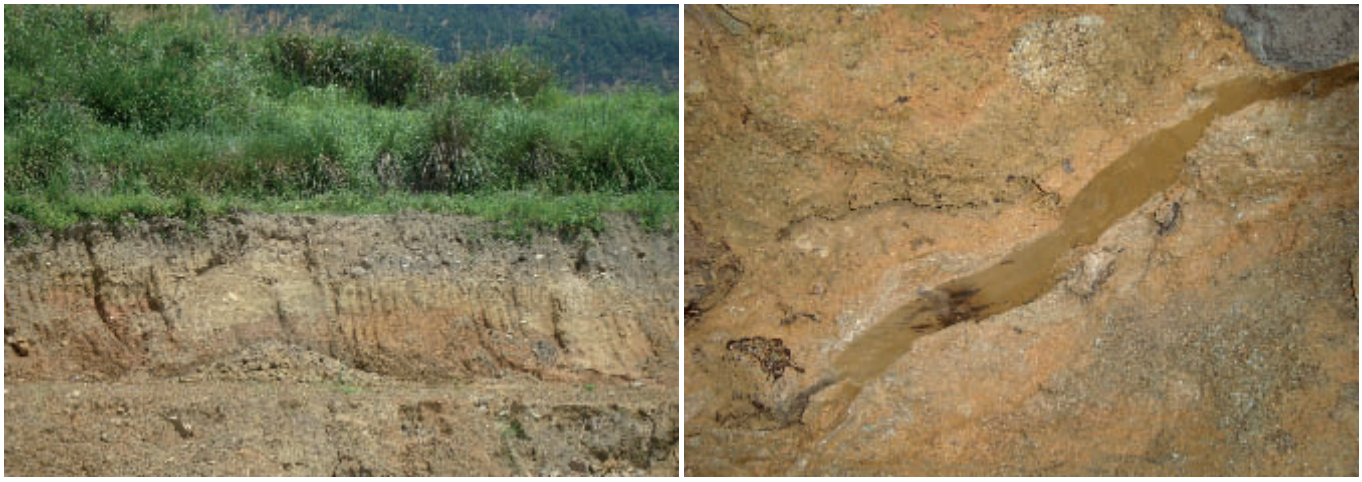

Bild 6. Typische Gebirgsausbildung. Links: Grobkörnige Schuttmassen im Portalbereich. Rechts: Vollkommen zersetztes Kristallin mit Harnischfläche im Vortrieb
Fig. 6. Typical rock conditions. Left: coarse-grained matrix.supported debris in the portal area. Right: totally decomposed crystalline rock with slickenside in the heading

weniger subhorizontaler Lage durchzogen, an denen sich auch fallweise die Wasserzutritte konzentrierten (**Bild 6**).
Aufgrund des unzugänglichen Gebietes (dichte tropische Vegetation) wurden durch die ausländische Bauüberwachung Satellitenbilder ausgewertet, die deutlich zeigten, dass der gesamte Bereich der ersten 200 m des Südvortriebes in einer großen Massenbewegung liegt (Bild 4 und 5). Das Südportal ist ebenfalls am S-Rand der Großrutschung nahe deren Stirn positioniert. Die Abrissnische ist deutlich in 500 m bis 600 m Entfernung westlich der Tunneltrasse am Berghang zu erkennen, die Stirn liegt nur wenige Zehnermeter östlich des Portalbereiches. Die Bohrung bei DK 560+930 liegt am Fuß eines kleinen Hügels am N-Rand der Rutschung, der einen nur wenig verwitterten Felskern aufweist, und daher die Rutschmasse nicht mehr oder nur randlich erfasst. Wie sich später im Vortrieb gezeigt hat, ist dieser Felskern sowie dessen Verwitterungsmantel tatsächlich zwischen DK 560+920 und +930 vor allem im talseitigen Teil der Kalotte angefahren worden. Die geologischen Verhältnisse in diesem Randbereich der Rutschung spiegelten sich im völlig unterschiedlichen Verhalten der Ortsbrust wieder. Die westliche (bergseitige) Hälfte wies immer noch extreme Zerscherung auf, die wiederholt zu kleineren Ausbrüchen aus der Ortsbrust und vor allem aus dem Kämpfer führte, während in der östlichen Hälfte schon stabile Verhältnisse in stark verwittertem Gestein mit pegmatitischen Schlieren herrschten.
Die Massenbewegung scheint zumindest noch gering aktiv zu sein, was an diversen Deformationskriterien im Tunnel und an der Oberfläche abgelesen werden kann. Über Bewegungsraten und Phasen der Zunahme oder Abnahme können keine Aussagen getroffen werden, da ein entsprechendes Vermessungsnetz nicht vorhanden ist und zusätzliche empfohlene Maßnahmen zur Erfassung nicht berücksichtigt wurden.
Oberflächengewässer sind im Trassenverlauf nicht vorhanden, allerdings ist geringe Wasserführung innerhalb des Rutschungskörpers aus dem Bereich der Abrissnische vorhanden, die sich vor allem an distinkten internen Scherflächen konzentriert. Zusätzlich machten sich die temporären Starkniederschläge in der Regenzeit in einer nur wenig verzögerten Zunahme der Wasserführung bemerkbar, was darauf hinweist, dass auch Versickerung durch Bewegungsrisse an der Oberfläche rasch stattfindet.

5.3 Deformation und Setzung

Schon sehr früh – nach den ersten 30 m Vortrieb – stellten sich relativ hohe Deformations- und Setzungsraten ein: Konvergenzen erreichten bis zu 54 mm/d, Setzungen bis 15 mm/d. Die oberflächlichen Bodenverbesserungsmaßnahmen auf den ersten 42 m der bergmännischen Tunnelstrecke umfassten einen groben Raster von Injektionsrohren bis auf Firsthöhe sowie eine Spritzbetonversiegelung der Oberfläche gegen Versickerung. Diese Spritzbetonversiegelung zeigte ebenfalls schon Risse bis zu 10 m Länge und bis 4 cm Öffnungsbreite, wobei deutlich zu erkennen war, dass Risse rechtwinkelig zur Tunnelachse auf Setzungen durch den Vortrieb im Vorfeld der Ortsbrust zurückzuführen waren, achsparallele Risse (vor allem talseitig der Trasse) jedoch waren eindeutig Bewegungen innerhalb der Rutschungsmasse zuzuordnen.
Von der ausländischen Bauüberwachung wurde schon sehr früh auf die tatsächlichen geologischen Verhältnisse (Massenbewegung), und mehrfach auf die Wichtigkeit einer erweiterten Erkundung der Rutschmasse hingewiesen, und entsprechende Maßnahmen wie Vertikalinklinometer, bergseitige Entwässerungsbrunnen, sowie Druckmessdosen zur längerfristigen Beobachtung vorgeschlagen. Keine dieser Empfehlungen wurde umgesetzt, sodass jede weitere Änderung von Ausbruchs- und Stützmaßnahmen nur auf den Beobachtungen während des Tunnelvortriebes beruhte. Außerdem ist nach derzeitigem Stand langfristig keine Möglichkeit gegeben, das Bewegungsverhalten der Rutschmasse und deren Einfluss auf das Tunnelbauwerk zu überwachen und rechtzeitig auf Extremsituationen zu reagieren.
Die Intensität der Deformationen nahm generell bis circa DK 561+000 zu (ungefähre Mitte des Südvortriebes). Tägliche Konvergenzen in diesem Bereich erreichten bis zu 260 mm, die Setzungen verstärkten sich bis zu 632 mm pro Tag. In diesem zentralen Abschnitt wurden Gesamtsetzungen bis zu 1,5 m und Gesamtkonvergenzen bis zu 1 m gemessen. Die Konvergenzen sind hauptsächlich auf einseitigen Druck durch die Rutschung zurückzuführen, entsprechend war vor allem der bergseitige (westliche) Ulm davon

Bild 7. Typische Deformationen im Wuyi Tunnel
Fig 7. Typical deformations in Wuyi tunnel

Bild 8. Injektionsarbeiten zur Gebirgsverbesserung
Fig. 8. Injection works for strengthening the rock mass

betroffen. Insgesamt zeigte das Deformationsverhalten deutlich, dass die stärksten Bewegungen im mittleren Teil der Gleitmasse und dort vor allem in deren höherem Teil stattfanden. Diese starken Druckbeanspruchungen äußerten sich in extremer Verformung der Stahlbögen (**Bild 7**), in Rissen im Spritzbeton bis hin zu Abplatzungen, Eindringen der Außenschale in den Raum für die Innenschale, und letztlich auch in Verbrüchen, wobei auffallenderweise neben Firstverbrüchen vor allem die bergseitige Tunnelhälfte zum Nachbrechen neigte. Einzelne Verbrüche pausten sich bis an die Oberfläche durch und produzierten Senkungstrichter. Die Firstverbrüche sowie mehrfaches Ausgleiten der Ortsbrust wurde durch meist feuchte Scherflächen, die aus der Ortsbrust fallen, begünstigt.

Im zentralen Bereich des Südvortriebes führten die andauernden Deformationen dazu, dass trotz vorgehaltenem Überprofil von 60 cm dreimal die Stahlbögen getauscht und das Profil aufgeweitet werden mussten. Die Verteilung der Intensität der Deformation mit einem Maximum im mittleren Bereich der Massenbewegung und die deutliche Koinzidenz mit subhorizontalen Scherflächen unterstützt deren Deutung als Rutschkörper.

Erst nach Umstellung der Ausbruchsmethode auf manuellen Vortrieb und Einbau von temporären Sohlen mit Stahlbögen und Spritzbeton auf allen Vortriebsebenen, sowie v.a. stark intensivierten Hochdruckinjektionsmaßnahmen aus dem Tunnel und von der Oberfläche und verstärktem Kopfschutz konnte die Deformationsrate auf ein wesentlich geringeres Maß bis maximal 7 mm unmittelbar nach Ausbruch und 0 mm bis 2 mm pro Tag im ausgebauten Bereich verringert werden.

Bezüglich der Lagestabilität der Tunnelachse konnten während der Bauzeit keinerlei Abweichungen festgestellt werden. Jeder Messvorgang der Tunnelachse und der Sohlhöhe wurde auf Fixpunkte bezogen, die deutlich außerhalb der Massenbewegung installiert wurden. Aussagen über die Langzeitstabilität können aber derzeit aufgrund fehlender Informationen über das Gesamtverhalten der Rutschung nicht getroffen werden. Entsprechende Warnungen und Empfehlungen wurden durch die ausländischen Tunnelexperten von Beginn an unterbreitet.

5.4 Vortriebsmethoden und Stützmaßnahmen

Vor Beginn des Vortriebes wurden gemäß der Originalplanung auf den ersten 42 m der Tunnelstrecke oberflächliche Verbesserungsmaßnahmen des Bodens durchgeführt. In einem Zwei-Meter-Raster wurden stählerne perforierte Injektionsrohre bis auf 3 m unter Sohlniveau seitlich des Tunnelprofils, und bis auf Firstniveau im Profil niedergebracht und mit 0,4 MPa bis 0,7 MPa verpresst. Diese nicht sehr erfolgreiche Maßnahme wurde sehr bald durch zusätzliche Manschettenrohrinjektionen mit 0,8 Mpa ergänzt. Die von der ausländischen Bauüberwachung empfohlenen Hochdruckinjektionen des gesamten Tunnelprofils wurden vorerst nicht durchgeführt. Lediglich die zu injizierende Strecke wurde vorerst verlängert. Ab dem setzungskritischen Bereich wurden schließlich Hochdruckinjektionen mit 1,6 MPa bis 1,8 MPa begonnen, nachdem in Testfeldern der optimale Injektionsdruck und –abstand erhoben wurde und der Erfolg durch Bohrkernauswertung bestätigt wurde. Allerdings reichten die Manschettenrohre im Profil immer noch nur bis zur Firste. Erst nachdem immer noch keine wesentliche Verbesserung der Situation im Tunnel eingetreten ist, wurde der gesamte Tunnelquerschnitt wie vorgeschlagen ab 8 m über Firste bis auf 36 m Tiefe bis DK 560+920 (Nordrand der Massenbewegung) mit 1,8 MPa injiziert (1,2 m Bohrabstand), was letztendlich zusammen mit den anderen Maßnahmen den gewünschten Erfolg brachte (**Bild 8**). Als Injektionsmaterial kam eine Zement-Wasserglas-Mischung zum Einsatz. Der Injektionserfolg konnte in der Ortsbrust und in der Tunnelleibung deutlich nachgewiesen werden (Bild 8).

Zusätzlich zu den Bodenverbesserungen an der Oberfläche wurden im Vortriebsbereich versucht mittels verbesserten bautechnischen Maßnahmen die Verformungen zu reduzieren. Um die Wasserführung im Tunnel zu verringern, wurden vereinzelt Entlastungsbohrungen durchgeführt, die allerdings aufgrund des dichten und bindigen Materials nicht sehr erfolgreich waren. Auf den empfohlenen Einsatz von Vakuum-Lanzen wurde von Firmen- und Bauherrenseite aus verzichtet.

Der Vortrieb wurde entsprechend der ursprünglichen Planung mit vier-stufiger CRD-Methode begonnen (vom Planer fälschlicherweise als CD-Methode bezeichnet). Aufgrund der wechselhaften Verhältnisse wurde mehrfach um-

gestellt auf sechs-stufige CRD-Methode (**Bild 10**), 3-bench-Methode mit temporärer Sohle (Kalotte, zwei Strossen, Sohle) sowie 3-bench-7-step-Methode (Kalotte und zwei Strossen mit Stützkern, Sohle; **Bild 11**). Der Abbau an der Ortsbrust erfolgte hauptsächlich mit Bagger. Um einen raschen Ringschluss zu gewährleisten, wurde auf die strikte Einhaltung der in China vorgeschriebenen Sicherheitsabstände (Gebirgsgüteklasse V: Ortsbrust-Sohlschluss max. 35 m, Ortsbrust-Innenschale max. 70 m) geachtet. Von Baufirmenseite aus wurde versucht, diese Abstände noch weiter zu verringern, um die erforderliche Stabilität zu erreichen.
In der letzten Phase wurde auf sechs-stufige CRD-Methode mit verringerter Stufenhöhe sowie auf händischen Vortrieb umgestellt. Zusätzlich wurde auf Empfehlung der ausländischen Bauüberwachung der Brustkeil auf der Kalotte belassen, um die Gefahr des Ausgleitens der Ortsbrust zu verringern. Die temporäre Sohle wurde deshalb nur bis maximal 3 m hinter der Ortsbrust eingebaut, was aber eine ausreichende Aussteifung mit wesentlich verringerter Konvergenzrate brachte. Erst diese letzte Umstellung ermöglichte eine ausreichend gebirgsschonende Vorgangsweise, um die Nachbrüchigkeit zu beherrschen. Pro Abbaufeld konnten auf diese Weise trotzdem zwei Abschläge pro Tag (entspricht 1,3 m) erreicht werden. Durch den extensiven temporären Ausbau und die stark verringerten Verformungsraten konnten auch die Sicherheitsabstände wieder bis an ihre Grenzen ausgenutzt werden. Dadurch konnte wieder ein akzeptabler Baufortschritt gewährleistet werden.
Bezüglich der Maßhaltigkeit des Profils sei noch einmal auf die hohen Deformationsraten hingewiesen, die ein Vorhalten von 60 cm Überprofil nötig machten. Dieser Vorhalt wurde allerdings mehrfach durch die Intrusion der Tunnelleibung aufgebraucht, und weitere Aufweitungsmaßnahmen mit Bogenaustausch und neuerlichem Überprofil wurden notwendig. Schonende Aufweitung mit Austausch des Ausbaues war je nach Abschnitt bis zu dreimal nötig.
Der Aufbau der Außenschale erfolgte klassisch mit Stahlbögen (Walzstahlbögen I22), Stahlgittern (vor Ort fabrizierte Gitter mit 20 cm Maschenweite), Spritzbeton, sowie Fußankern in Form von 5 m langen Injektionslanzen (50 mm Durchmesser). Felsanker wurden nicht eingebaut. Die Fußanker wurden in den Strecken mit der größten Deformation durch Rohrschirmrohre mit 89 mm Durchmesser ersetzt, um deren Stabilität zu erhöhen, und bei Platzmangel wurde die Anzahl der Fußanker verdoppelt. Zusätzlich wurden radiale Hochdruckinjektionen mit einer Länge von 5 m in einem Abstand von 1,5 m durchgeführt. In Bereichen mit instabiler Ortsbrust (aus der Ortsbrust fallende Scherflächen mit Ausgleiten von Gesteinskörpern) wurden zusätzliche Injektionslanzen in der Ortsbrust gesetzt. Als Kopfschutz in den Ausbruchsabschnitten mit 3-bench-Methode kamen Rohrschirme (9 m bis 18 m Länge, 108 mm Durchmesser) zum Einsatz, in den CRD-Abschnitten wurden aufgrund des Platzmangels überlappende Injektionsschirme (5 m Länge, 50 mm Durchmesser, jeder zweite Abschlag) über die gesamte Kalotte eingebaut.

Bild 9. Nachweis des Injektionserfolgs in der Firste
Fig. 9. Evidence for injection success in the arch head

6 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Trotz der Lage innerhalb einer großen Massenbewegung konnte der Südvortrieb des Wuyi-Tunnels mit enormem Aufwand vorangetrieben werden. Extreme Deformationen sowie Verbrüche konnten durch einen exzessiven temporären Ausbau aufgefangen werden. Im Bauzustand konnte durch einfache bautechnische Maßnahmen in entsprechen-

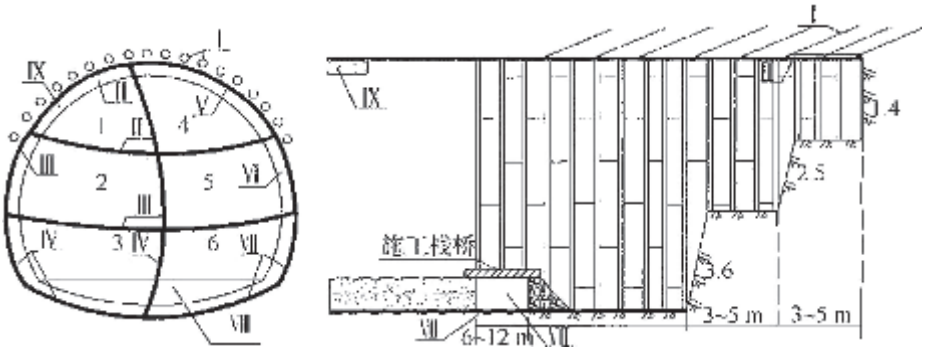

Bild 10. Schema der 6-stufigen CRD Methode: 1–3 linksseitiger Vortrieb mit 3 m bis 5 m breiten Stufen, 4–6 rechtsseitiger Vortrieb mit 10 m bis 15 m Verzug
Fig. 10. Schematic drawing of 6-step CRD method: 1–3 left-side excavation with 3 m to 5 m wide steps, 4–6 right-side excavation with 10 m to 15 m lagging

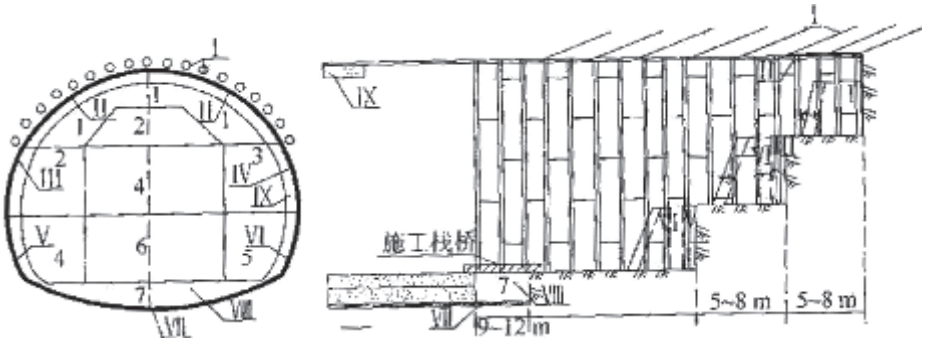

Bild 11. Schema der 3-bench-7-step Methode: 1–7 Ausbruchsstufen
Fig. 11. Schematic drawing of 3-bench-7-step method: 1–7 excavation steps

dem Ausmaß gerade noch eine weitgehende Stabilisierung des Vortriebsbereiches erreicht werden. Hinsichtlich des Langzeitverhaltens der Massenbewegung sowie der Tunnelröhre sind aber derzeit keine Aussagen möglich.
Am Wuyi-Tunnel Südvortrieb kann auch die Wichtigkeit bestimmter Faktoren aufgezeigt werden, die zumindest in der chinesischen Tunnelplanung in ihrer Bedeutung noch unterbewertet sind.

1) Geologische Vorerkundung: Dieser Faktor kann derzeit wegen der extrem kurzen Vorlaufzeit nur in ungenügendem Maß erfüllt werden. Dazu kommen die Schwierigkeiten der schlechten Begehbarkeit des Tunnelumfeldes und der Trasse durch die dichte tropische Vegetation. Diese einschränkenden Voraussetzungen erfordern zumindest die Implementierung aller möglichen Vorerkundungsmaßnahmen [9] und die Kombination von Ergebnissen verschiedenster Methoden, um zu einem einigermaßen schlüssigen Bild der lokalen geologischen Verhältnisse zu kommen. Auf diese Art können nicht nur die geplanten Maßnahmen schon im Vorfeld besser auf die herrschenden Verhältnisse abgestimmt werden, sondern auch der Arbeits- und Zeitaufwand entsprechend verringert werden.
2) Laufende geologische Dokumentation und Prognose: Diese wird derzeit laut chinesischen Vorschriften [9] durch die Baufirma durchgeführt und von der örtlichen Bauüberwachung nur auf ihre Durchführung überprüft [8], [10], [11]. Die Qualität ist also ausschließlich von der Ausbildung und Qualifikation des durchführenden Ingenieurs abhängig und daher enorm unterschiedlich. Dokumentation und Vorschau sind aber grundlegende Kriterien für die von der Baufirma anzusuchenden Planänderungen im Falle von Problemen. Die letzten Entscheidungen werden allerdings ausschließlich nach den sporadischen Besuchen des Planungsgeologen getroffen. Am Wuyi-Tunnel konnte gut gezeigt werden, dass das Fehlen eines ständig anwesenden geologischen Experten sich massiv auf die Qualität der Planänderungen niederschlägt.
3) Baumaßnahmen: Mit einer entsprechenden Vorerkundung und baubegleitenden Dokumentation hätte zumindest das Ausmaß der erforderlichen Maßnahmen (im Wesentlichen Injektionen) möglicherweise eingeschränkt oder zumindest besser gesteuert werden können. Änderungen der Vortriebsmethoden oder der Sicherungsmaßnahmen sind in China erst nach Planänderung und Genehmigung des Planungsbüros erlaubt. Planänderungen gelten jeweils nur für 10 m oder 20 m, sodaß für eine vollständige Umstellung und Implementierung kaum genügend Platz vorhanden ist. Gleichzeitig ist wieder eine Planänderung für die dahinter liegende Strecke zu beantragen. Diese unbefriedigende Situation führt dazu, dass die Baufirmen sich über Planänderungen oder Bauüberwachung-Anweisungen einfach hinwegsetzen, um Zeit zu sparen (auf Kosten der Sicherheit und trotz hohen Risikos eines Baustopps und hoher Geldstrafen). Forderungen der ausländischen Bauüberwachung nach Änderung dieses Systems wurden allgemein ignoriert.
4) Geotechnische Messungen und Überwachung: Außer den selbstverständlichen Deformations- und Bewegungsmessungen im Tunnel und an der Oberfläche wurden kaum geotechnische Messungen während des Vortriebes durchgeführt. Ebenso wurde kein geotechnisches Überwachungsprogramm in Hinblick auf die langfristige Entwicklung implementiert. Somit basieren sämtliche Aussagen über das Gebirgsverhalten fast ausschließlich auf Erfahrungswerten von anderen Baustellen und der Erfahrung der am Bau beteiligten Personen.

Danksagung

Für die gute Zusammenarbeit sowie die ständige Ermunterung, Problemlösungen auch abseits der Vorschriften zu suchen, danken wir dem Bauherrn JingFu Company, Fuzhou. Die Akzeptanz der ausländischen Bauüberwachung durch die Baufirma (24th Bureau) zeigte sich unter anderem in lebhaften Diskussionen und der Bereitschaft, auch unkonventionelle Ideen umzusetzen. Die volle Unterstützung vor Ort durch die örtliche Bauleitung, die Mannschaften und durch die örtliche Bauüberwachung, muss betont werden. Die enge Kooperation aller beteiligten Parteien sowie deren pragmatische Vorgangsweise gehören zu den prägendsten Erfahrungen in diesem Projekt. Die Eindrücke, die man als Beteiligter in verantwortungsvoller Position in diesem Großprojekt mit circa 60 km Tunnels auf 100 km Strecke sammeln konnte, sind in jeder Hinsicht unbezahlbar.

Literatur

[1] *Stingl, V. et al.:* Jin Shazhou-Tunnel der HGV-Strecke Wuhan-Guangzhou – eines der anspruchvollsten Tunnelprojekte in China. *In:* Bauingenieur, 85 (2010), Heft 3, S. 105–111.

[2] *Charvet, J. et al.:* Structural development of the Lower Paleozoic belt of South China: Genesis of an intracontinental orogen. *In:* Journal of Asian Earth Sciences, Vol. 39 (2010), Iss. 4, pp. 309–330.

[3] *Shu, L.S. et al.:* Late Paleozoic-Early Mesozoic geological features of South China: Response to the Indosinian collision events in Southeast Asia. *In:* Comptes Rendus Geoscience, Vol. 340 (2008), Iss. 2, pp. 151–165.

[4] *Shu, L.S. et al.:* Mesozoic tectonic evolution of the Southeast China Block: New insights from basin analysis. *In:* Journal of Asian Earth Sciences, Vol. 34 (2009), Iss. 3, pp. 376–391.

[5] *Wang, D.; Shu, L.:* Late Mesozoic basin and range tectonics and related magmatism in Southeast China. *In:* Geoscience Frontiers, Vol. 3 (2012), Iss. 2, pp. 109–124.

[6] *Pirajno, F.; Bagas, L.:* Gold and silver metallogeny of the South China Fold Belt: a consequence of multiple mineralizing events? *In:* Ore Geology Reviews, Vol. 20 (2002), Iss. 3–4, pp. 109–126.

[7] *Zhou X. et al.:* Petrogenesis of Mesozoic granitoids and volcanic rocks in South China: A response to tectonic evolution. *In:* Episodes, Vol. 29 (2006), Iss. 1, pp. 26–33.

[8] Ministry of Railways of the Peoples Republic of China: Provisional standard for quality acceptance in railway engineering of PDL. Industry Standard of PRC for railway construction, Beijing, 2005/160.

[9] Ministry of Railways of the Peoples Republic of China: Guidance of Railway tunnel geological prediction technology. Industry Standard of PRC for railway construction, Beijing, 2008/105.

[10] Ministry of Railways of the Peoples Republic of China: The main work points in railway engineering construction, conclusive lists. Industry Standard of PRC for railway construction, Beijing, 2009/185.

[11] Ministry of Railways of the Peoples Republic of China: Technical guide for construction of high-speed railway tunnel engineering. Industry Standard of PRC for railway construction, Beijing, 2010/241.