

Sonderdruck aus:

PLINNINGER, R.J., THURO, K. & BRUELHEIDE, TH. (1999): Geotechnische Auswirkungen von Inhomogenitäten im Keupersandstein auf Tunnelvortriebe der U-Bahn Nürnberg. – Berichte von der 12. Nat. Tag. Ing.-Geol., 12.-16. April 1999, Halle (Saale), Fachsektion Ingenieurgeologie, 326-336.

Geotechnische Auswirkung von Inhomogenitäten im Keupersandstein auf Tunnelvortriebe der U-Bahn Nürnberg

Dipl.-Geol. R. J. Plinninger¹, Dr. rer. nat. K. Thuro¹ & Dipl.-Geol. T. Bruelheide²

¹Technische Universität München, Lehrstuhl für Allgemeine, Angewandte und Ingenieur-Geologie

²Dyckerhoff & Widmann AG, Hauptniederlassung München, Tiefbauabteilung

Zusammenfassung

Für die Erweiterung der bestehenden Linie U2 zum Flughafen der Stadt Nürnberg (Bayern) waren Tunnel mit einer Gesamtlänge von 3,3 km in überwiegend bergmännischer Bauweise zu errichten. Die Vortriebe verliefen überwiegend in Sandsteinen und Ton-Schluffsteinen des sog. „Sandsteinkeupers“ (Obere Trias). Die inhomogene Zusammensetzung dieser Formation führte in einigen Baulosen zu Problemen beim Ausbruch mit Teilschnittmaschinen. In zwei Fallbeispielen soll aufgezeigt werden, wie einerseits harte Konkretionen („Quackenlagen“), andererseits aber auch gehäuft auftretende Ton-Schluffsteinlagen auf ganz unterschiedliche Weise in der Lage waren, sich äußerst ungünstig auf die Vortriebsleistung des Maschinensystems auszuwirken.

Abstract

In order to extend the already existing subway line U2 to the airport of Nuremberg (Bavaria) tunnels of a total length of 3.3 km had to be built. The advance works encountered mainly sandstones and clay-siltstones of the „Keuper“ formation (upper triassic). In some lots the inhomogeneous composition of the sediments led to problems in roadheader excavation. Two case studies are supposed to show how layers of hard calcrete (so-called „quacken“ layers) as well as soft clay-siltstone-layers reduced the efficiency of the roadheader excavation system.

1 Einleitung: Projekt und geologische Situation

Um eine bessere Anbindung des Flughafens an das bereits bestehende U-Bahn-Netz der Stadt Nürnberg zu gewährleisten, wurde im Jahre 1995 mit den Baumaßnahmen für die Verlängerung der Linie U2 Nord begonnen (Tabelle 1). Kernstück der Maßnahme sind die insgesamt 3,3 km langen, untertägigen U-Bahn-Tunnel mit

30 m² bzw. 35 m² Querschnitt (GROß, 1998). Die Vortriebsarbeiten konnten auf allen Baulosen Mitte 1998 abgeschlossen werden.

Das Gebiet der Stadt Nürnberg ist Teil des süddeutschen Schichtstufenlandes. Durch die flache Verkipfung des mesozoischen Schichtenstapels nach Süden hin und die

darauffolgende, intensive Erosion seit der Kreide sind im Untergrund der Stadt vor allem Sandsteinen und Ton-Schluffsteinen des germanischen Keuper (Obere Trias) anzutreffen. Die bei den Baumaßnahmen angetroffenen, klastischen Sedimente werden stratigraphisch den Schichtgliedern

Coburger Sandstein und Burgsandstein zugerechnet, die wiederum dem mittleren oder „Sandsteinkeuper“ angehören. Eine bis zu 1,5 m mächtige Decke aus pleistozänen Flugsanden verhüllt diese Gesteine meist jedoch an der Oberfläche (Abbildung 1).

Tabelle 1: Wichtige Projektdaten der U2 Nord-Erweiterung in Kurzform.

Übersicht	U2 Nürnberg Nord -
Zweck	Ausbau der U2 Nord zum Flughafen Nürnberg
Länge	3300 m in bergmännischer Bauweise
Vortriebsweise	Neue Österreichische Tunnelbauweise im Fräsvortrieb
Ausbruchsquerschnitte	eingleisiger Tunnel: bis 35 m ² gesamt zweigleisiger Tunnel (mit Masse-Feder-System): bis 70 m ² gesamt
Bauzeit (Vortrieb)	1995 bis 1998
Bauherr	Stadt Nürnberg
Planung	U-Bahnreferat der Stadt Nürnberg
Bauausführung	BA 4.1: Wayss & Freytag AG BA 4.2: Dyckerhoff & Widmann AG

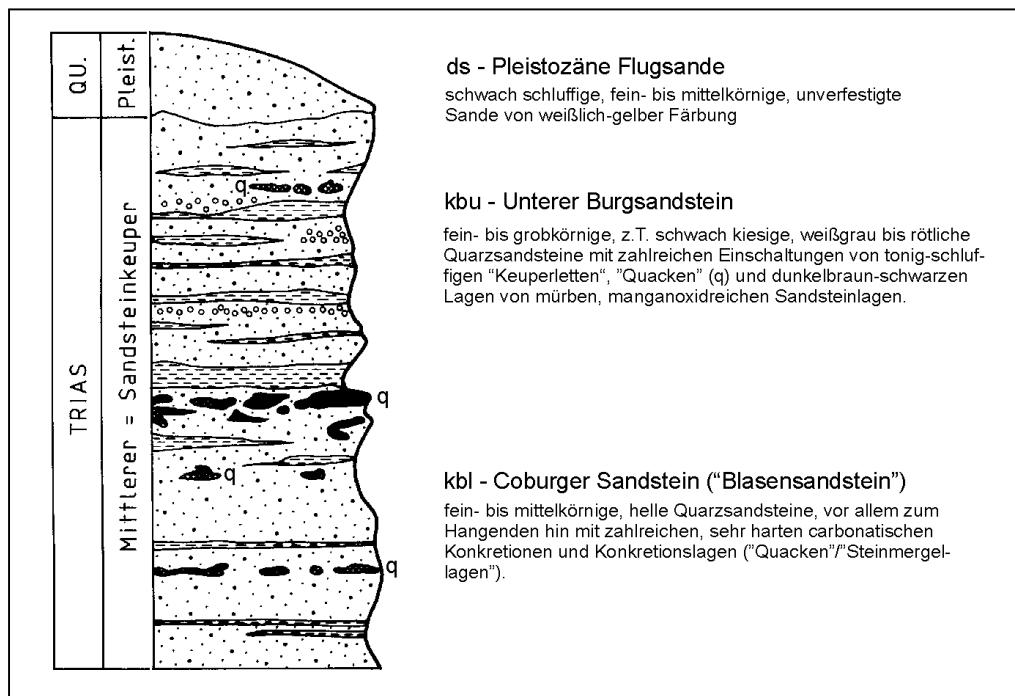


Abbildung 1: Schematische Schichtsäule der während der Vortriebsarbeiten für die Erweiterung der U-Bahn-Linie U2 Nürnberg angetroffenen Schichtfolge.

Die während des Keupers stark wechselnden, teils terrestrischen, teils limnisch-fluviatilen Ablagerungsverhältnisse führten zu einem Schichtverband, der von einer äußerst kleinräumigen, inhomogenen Zusammensetzung geprägt wird: Lagen von mittel- bis grobkörnigen Sandsteinen wechseln mit Ton-Schluffsteinlagen („Keuperletten“) und Grobschüttungshorizonten ab, deren Komponenten bis in Kieskorngröße reichen. In einigen Bereichen führte eine nachträgliche carbonatische Zementierung zu wechselnd mächtigen Lagen oder Knollen, die als „Steinmergellagen“ oder „Quacken“ bezeichnet

werden. Die nachfolgend abgebildeten Aufnahmen mit dem Rasterelektronenmikroskop (Abbildung 2) zeigen den extrem dichten Gefügeverband, der aus einzelnen, gerundeten Quarzklasten besteht, die nahezu vollständig von einer feinkristallinen Dolomit-/Calcit-Matrix umgeben werden. Bereits die Beobachtung, daß Quarzkörner transgranular gebrochen sind, der Bruch also nicht etwa um das Korn herum in der Grenzfläche Korn/Matrix verläuft, ist ein deutlicher Hinweis auf die extrem gute Kornbindung in den Konkretionen, die sich auch in einaxialen Druckfestigkeiten von bis zu 180 MPa niederschlägt.

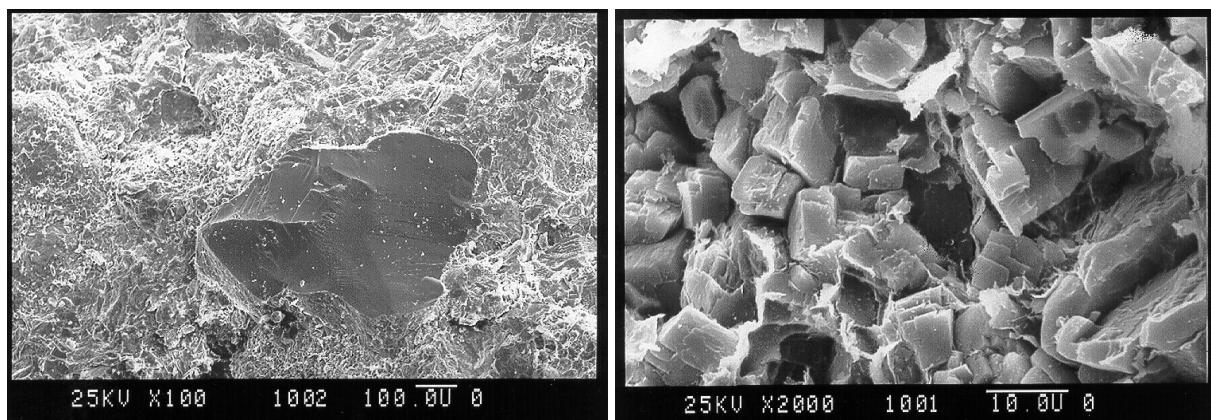


Abbildung 2: REM-Aufnahmen von „Quacken“: Die Übersichtsaufnahme (links) zeigt die muschelige, transgranular gebrochene Oberfläche eines gerundeten Quarzkorn in der äußerst dichten, carbonatischen Matrix. Die Detailansicht dieser Matrix (rechts) zeigt, daß überwiegend Dolomit mit typischen, rhomboedrischen Kristallformen und nur untergeordnet Tonminerale (kleinere, schuppenförmige Aggregate) auftreten (Aufnahmen Dr. J. Froh, TUM).

2 Das Vortriebskonzept Teilschnittmaschine

Die vorliegenden Untergrundverhältnisse - in der Hauptsache wenig feste Sandsteine - favorisierten im Zusammenhang mit den gesteigerten Ansprüchen des innerstädtischen Tunnelbaus an den Immissions-

schutz klar den Einsatz von schweren Teilschnittmaschinen gegenüber einem konventionellen Bohr- Sprengvortrieb. Auf mehreren Baulosen wurden daher zum Vortrieb Teilschnittmaschinen des Typs AC-Eickhoff ET 380 (200 kW Leistung, 105 t Gesamtgewicht) mit Längs- und Querschneidkopf eingesetzt (GROß, 1998).

Ganz generell erfolgt der Vortrieb mit einer Teilschnittmaschine zyklisch in den aufeinanderfolgenden Arbeitsschritten Gebirgslösung (Fräsen/Schneiden) - Schuttern des gelösten Materials - Einbau der Sicherung (Abbildung 3). Dabei bestimmt jeder einzelne dieser Arbeitsschritte die Leistungsfähigkeit des Gesamtvortriebs (THURO & PLINNIGER, 1998b). Unter Aussparung des Arbeitsgangs der „Sicherung“ ergeben sich daher für eine Teilschnittmaschine die in Tabelle 2 dargestellten, typischen Probleme.

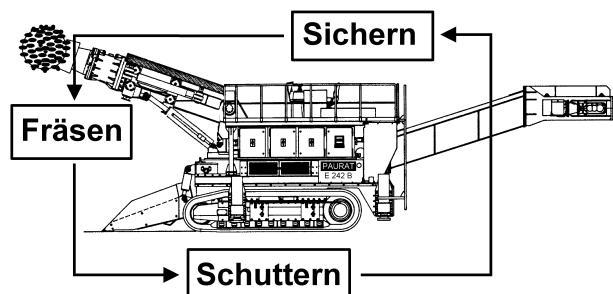


Abbildung 3: Schematische Darstellung des Arbeitsablaufs beim TSM-Vortrieb. Probleme bei einem Arbeitsschritt wirken sich immer negativ auf den Gesamtvortrieb aus.

Tabelle 2: Spezifische Probleme beim Einsatz einer Teilschnittmaschine.

Arbeitsgang	Mögliche Probleme
Fräsen (Schneiden)	niedrige Schneidleistung
	hoher Werkzeugverschleiß
	Verschmieren des Schneidkopfes
Schuttern	Fördern erschwert aufgrund flüssiger bis breiiger Konsistenz des Schneidgutes
	Fördern erschwert aufgrund zu großer Blöcke im Haufwerk

Einige dieser Probleme traten auch bei den Vortriebsarbeiten für die Erweiterung der U2 Nürnberg auf und führten dazu, daß die ansonsten erfolgreiche Vortrievsmethode in einigen Abschnitten spürbare Einbußen in ihrer Leistungsfähigkeit und Wirtschaftlichkeit hinnehmen mußte.

3 Hoher Werkzeugverschleiß

Während der Vortriebsarbeiten für ein Baulos trat extrem hoher Werkzeugverschleiß an den Rundschaftmeißeln des Schneidkopfes auf, der Spitzenwerte von 508 Meiβel/Tag erreichte. Bezogen auf die ausgebrochene Kubatur bedeutet dies einen spezifischen Meiβelverschleiß von bis zu rd. 4 Meiβel/m³(fest).

3.1 Untersuchungsprogramm

Ein kombiniertes Versuchsprogramm, bestehend aus Feld- und Laboruntersuchungen sollte über die Ursachen dieser hohen Verschleißraten Aufschluß geben. Die Untersuchungen vor Ort umfaßten dabei Auswertung und Dokumentation von Werkzeugverschleißraten und Verschleißformen sowie Erfassung der geologischen Verhältnisse. Das überwiegend auf die Untersuchung der „Quacken“ ausgerichtete Laborprogramm umfaßte einaxiale Druckversuche, Point-Load-Tests, Dünnschliffanalysen und Untersuchungen mit dem Rasterelektronenmikroskop.

3.2 Ursachen

Die Begutachtung von etwa 100 verschlissenen Meiβeln zeigte bald, daß in den überwiegenden Fällen der Hartmetallstift gebrochen oder gar aus dem Trägermaterial

herausgerissen worden war (Abbildung 4). Dieses Verschleißbild entspricht einem Verschleiß der Verschleißklassen 4 und 5 (nach THURO & PLINNINGER, 1998b, siehe Abbildung 5). Zwischen enorm hohem Verschleiß und dem Auftreten dickerer Quackenlagen schien ein eindeutiger Zusammenhang zu bestehen: Die höchsten Verschleißraten wurden dabei in einem Abschnitt erzielt, in dem zwei 0,5 m und 0,9 m mächtige, massive Konkretionshorizonte angetroffen wurden.

Obwohl mit den Untersuchungen in den Quacken hohe Quarzanteile von bis zu

60 % nachgewiesen werden konnten, geben die Verschleißformen zu der Vermutung Anlaß, daß der immense Verschleiß an Rundschaftmeißeln in erster Linie nicht durch die Abrasivität der Konkretionen verursacht wurde. Den Hauptversagensmechanismus stellt der Sprödbruch, bzw. Ausbruch des Hartmetalleinsatzes dar, eine Verschleißform, die vor allem auf hohe Schlagimpulse zurückzuführen ist.



Abbildung 4: Gegenüberstellung fabrikneuer und typisch verschlissener Rundschaftmeißel zweier Hersteller bei einem Vortrieb mit mehreren, bis zu 1,5 m mächtigen „Steinmergellagen“. Jeweils links der fabrikneue Meißel, mittig ein durch Aus- oder Sprödbruch des Hartmetallstifts verschlissener Meißel, rechts ein fortgeschrittenes Stadium mit einseitiger Abnutzung infolge des Sprödbruchs.

Da bei diesem Vorgang weniger ein kontinuierlicher Materialabtrag (durch „Schleifen“) als vielmehr ein katastrophales Versagen (Bruch) stattfindet, sind weniger die abrasiven Eigenschaften des Gesteins, als vielmehr dessen Festigkeit, Verteilung und Durchtrennung im Gebirgsverband ausschlaggebend.

Die Anfälligkeit der Rundschaftmeißel für ein solches Versagen liegt dabei an der Konstruktion selbst. Während die aus

Wolframcarbidlegierungen hergestellten Hartmetallstifte zwar relativ widerstandsfähig gegenüber Abrasion (Materialabtrag durch ritzende Beanspruchung) sind, machen ihre relativ spröden mechanischen Eigenschaften sie um so anfälliger gegenüber Schlagbeanspruchung. Gerade solchen Schlägen waren die Meißel aber immer dann ausgesetzt, wenn der Schneidkopf aus einer wenig festen Sandsteinlage ($UCS < 25 \text{ MPa}$) heraus in eine harte Qua-

ckenlage ($UCS_{Max} = 180 \text{ MPa}$) eindrang. Die primäre Folge waren Splitterbrüche und Ausbrüche der Hartmetallstifte, die in der Folge jedoch auch einen frühzeitigen Ausfall des gesamten Meißels bedingten,

da der fehlende Hartmetallstift nun nicht mehr in der Lage war, den Werkzeugträger effektiv vor Abnutzung - auch durch die Quarzsandsteine - zu schützen.

Verschleißklasse	Verschleißklasse
Neuer, unversehrter Rundschaftmeißel mit Hartmetallspitze	4 Sprödbruch: Sprödbruch des Hartmetalleinsatzes infolge zu hoher Scherspannung
1 Normaler Verschleiß: Symmetrische Abnutzung der Hartmetallspitze und des Trägermaterials	5 Totalausbruch: Der ganze Hartmetalleinsatz ist aus dem Werkzeugträger herausgerissen
2 Asymmetrischer Verschleiß: Meißel, die einseitig abgenutzt sind. Beschädigung der Meißelhalter möglich!	6 Totalverschleiß: Der Meißel wurde bis über die Basis des Hartmetalls hinaus abgenutzt
3 Trägerverschleiß: Kaliberverschleiß des Werkzeugträgers als Folge des Zerkleinerungsprozesses	7 Meißelschaftbruch: Der Meißel wurde unterhalb des Trägerkegels am Schaft und damit oberhalb des Meißelhalters abgebrochen

Abbildung 5: Verschleißklassifizierung für Rundschaftmeißel (nach THURO & PLINNINGER, 1998b)

4 Lösen und Schuttern veränderlich fester Ton-Schluffsteine

In einem benachbarten Baulos blieb die Vortriebsleistung deutlich hinter den kalkulierten Werten zurück. Es stellte sich bald heraus, daß es sich hierbei um ein komplexes Problem beim Lösen und

Schuttern von Gebirgsbereichen mit häufigen Ton-Schluffsteinlagen handelte.

4.1 Untersuchungsprogramm

Das unverzüglich eingeleitete geotechnische Untersuchungsprogramm umfaßte neben einer detaillierten ingenieurgeologischen Aufnahme der Situation vor Ort

auch umfangreiche Laboruntersuchungen. Sowohl an Proben aus der Ortsbrust als auch an Proben des Schneidgutes wurden Korngrößenanalysen (kombiniertes Sieb / Schlamm-Verfahren), Wasseraufnahmeverweise, Pulverquellversuche und Dünnenschliffanalysen durchgeführt.

4.2 Ursachen

Die durchgeföhrten Untersuchungen ergaben, daß zwischen den täglichen Vortriebsleistungen und dem Feinkorngehalt im angetroffenen Gebirge ein klarer Zusammenhang bestand. Abbildung 6 zeigt, wie die Gesamtvortriebsleistungen (Netto und Brutto) in Abhängigkeit des Ton- Schluffgehalts steil absanken.

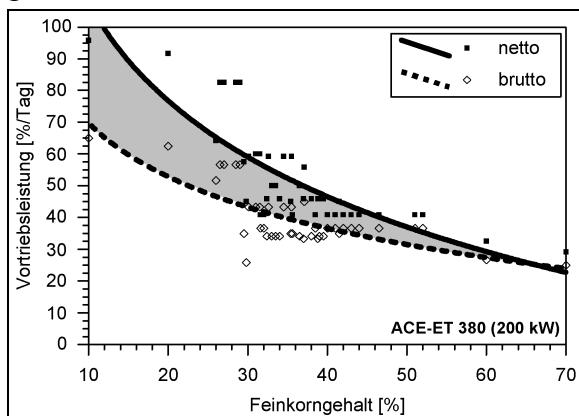


Abbildung 6: Netto- und Bruttovortriebsleistung in Abhängigkeit vom Ton- und Schluffgehalt in Keuperformationen.

Das Zusammentreffen von veränderlich festen Ton-Schluffsteinlagen („Keuperletten“) in der Sandsteinfolge und Bergwasserzutritten von rd. 2-5 l/sec nahm dabei in mehrfacher Weise ungünstigen Einfluß auf das Vortriebssystem „Teilschnitt-maschine“:

- Beim Schneidvorgang: War der Fräskopf bis über die Basis der Rundschaftmeißel mit der Ton-Schluff-Masse zugesetzt, so behinderte dies den

Schneidvorgang, da der Schneidkopf nur noch mit den Meißelspitzen ins Gebirge eingreifen konnte. Durch eine verminderte Penetration sank die Schneidleistung am Schneidkopf der Teilschnittmaschine ab.

- Beim Abtransport des Schneidgutes mit dem Fräskopf: Das Schneckengewinde eines Längsschneidkopfes gewährleistet normalerweise einen effektiven Abtransport des gelösten Gesteins, indem das Haufwerk durch die Rotation des Schneidkopfes nach hinten auf den Ladetisch der Maschine aufgegeben wird. Gerade dieses Schneckengewinde wurde jedoch besonders schnell vom Schneidgutbrei verklebt, so daß die Fähigkeit des Schneidkopfes zum Materialabtransport stark vermindert wurde.
- Beim Schuttern mit dem Schutter-system: Aufgrund der breiigen Konsistenz des Schneidgutes war es für den Ladetisch der TSM unmöglich, die geschnittene Kubatur abzufördern. In regelmäßigen Abständen mußte daher der Schneidvorgang unterbrochen werden, um der Vortriebsmannschaft Gelegenheit zu geben, den sich bildenden „Matsch“ händisch auf den Kettenförderer zu schaufeln (Abbildungen 7, 8).

Schneidkopf: Es zeigte sich, daß bereits bei einem Anteil von 10-15 % Anteil Keuperletten am Gesamtquerschnitt der Feinkornanteil im Fräsgut so ungünstig erhöht wurde, daß bereits nach kurzer Fräsdauer der Schneidkopf völlig zugesetzt werden konnte. Abbildung 9 zeigt in einer zeichnerischen Gegenüberstellung einen gereinigten, sowie einen zugesetzten Längs-

schneidkopf. Deutlich wird, daß die Verklebung des Schneidkopfkörpers nicht nur die Schneidleistung (durch Herabsetzen der Penetration) beeinträchtigt, sondern (durch Verkleben des Schneckengewindes) vor

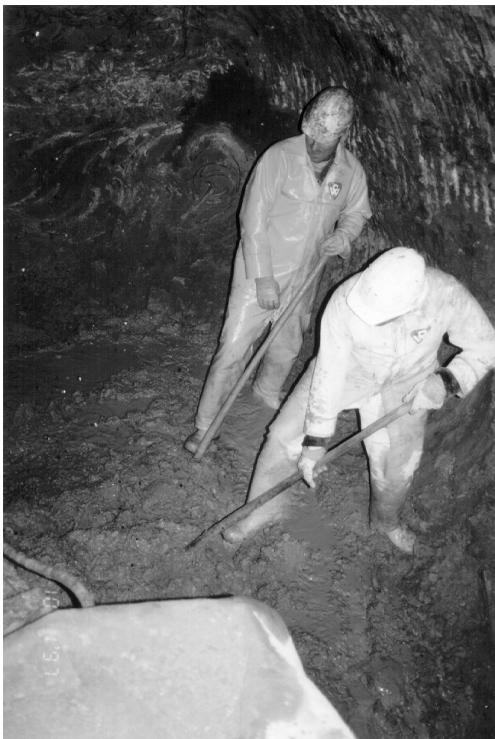


Abbildung 7: Arbeiter schaufeln während einer Stillstandsphase der TSM den Erdbrei, der sich in der Sohle gebildet hat, händisch auf das Förderband der Maschine (Foto: DYWIDAG/Bruelheide).

allem auch die guten Fördereigenschaften des Längsschneidkopfes zunichte gemacht werden.



Abbildung 8: Ansicht der Situation vor dem Ladetisch: Die Ladescheiben der TSM sind nicht in der Lage, den Erdbrei in den Förderkanal zu transportieren. Im Hintergrund ist der stark zugesetzte Längsschneidkopf der TSM zu erkennen. (Foto: DYWIDAG/Bruelheide)

Schuttersystem: Der rekonstruierte Gebirgslösungsvorgang kann auch die Probleme erklären, die beim weiteren Abtransport auftraten: Die an der Ortsbrust in festem und trockenem Zustand vorliegenden Ton-Schluffsteinlagen wurden beim Schneidvorgang in kleine Partikel zerfräst, die auf die Sohle rieselten. Dabei vermischtete sich das Fräsgut mit dem Sand aus den Sandsteinlagen, der - ungünstigerweise - eine hohe Wasserdurchlässigkeit besaß.

Dieses Gemisch war nun in der Lage, sich mit dem in Mengen von 2-5 l/sec anfallenden Bergwasser innerhalb kürzester Zeit zu einen wassergesättigten Schlamm zu vermischen. Vor allem im Bereich der etwa 2 m vorausliegenden Kalotte trug auch das Verkleben des Schneckengewindes und die damit einhergehende Verminderung der Abfuhrleistung erheblich dazu bei, daß sich die Verhältnisse vor Ort zusehends verschlechterten: Das Schneidgut konnte

von der Kalottensohle nicht schnell genug abgefördert werden und durchsetzte sich immer mehr mit demandrängenden Bergwasser. Der sehr ineffektive Einsatz des Schneidkopfs zum Abtransport des Schneidgutes brachte eine erneute Durchmischung mit sich, durch die die Konsistenz des Schneidgutes bald im breiigen Bereich lag. Dieser „Erdbrei“ konnte vom Ladetisch der TSM nicht mehr aufgenommen werden. Die unausweichliche Folge dieser Vorgänge waren Unterbrechungen des Schneidbetriebes, die dazu genutzt wurden, das Material mit Schaufeln in das Fördersystem zu transportieren oder den Schneidkopf und die Fördereinrichtungen von der Ton-Schluffmasse zu reinigen.

Das vorgestellte Modell kann ebenso die Kurvenverflachung erklären, die in Abbildung 6 bei höheren Feinkorngehalten beobachtbar wird: Mit steigendem Gehalt an Ton und Schluff im Schneidgut nimmt umgekehrt der Anteil an Sand ab, wodurch die Wasserwegsamkeit im Schneidgut reduziert wird. Als Effekt dieser Reduzierung benötigt die Mischung länger, um sich mit Wasser aufzusättigen.

Die Kombination von veränderlich festem Gestein und Wasserzutritten unter Tage kann darüberhinaus noch weiterreichende Auswirkungen auf Maschine und Arbeitsschritte haben, die an dieser Stelle nur angedacht werden sollen:

- An einem verklebten Schneidkopf können die Rundschaftmeißel u.U. nicht mehr in ihrer Meißelhalterung rotieren, was eine asymmetrische Abnutzung und vorzeitigen Ausfall durch Verschleiß bedingen kann

- Auch der Förderkanal, die Räumerkette und die Übergabe auf das im hinteren Bereich aufgehängte Förderband sind anfällig für Verkleben und können, wenn der Durchmesser verengt ist, zur Verminderung der Förderleistung beitragen.
- Hohe Maschinengewichte können im Zusammenspiel mit Vibrationen während des Fräsvorgangs die maximale Bodenpressung überschreiten, was unweigerlich zu einem Einsinken der Maschine und Problemen beim Verfahren führen würde.

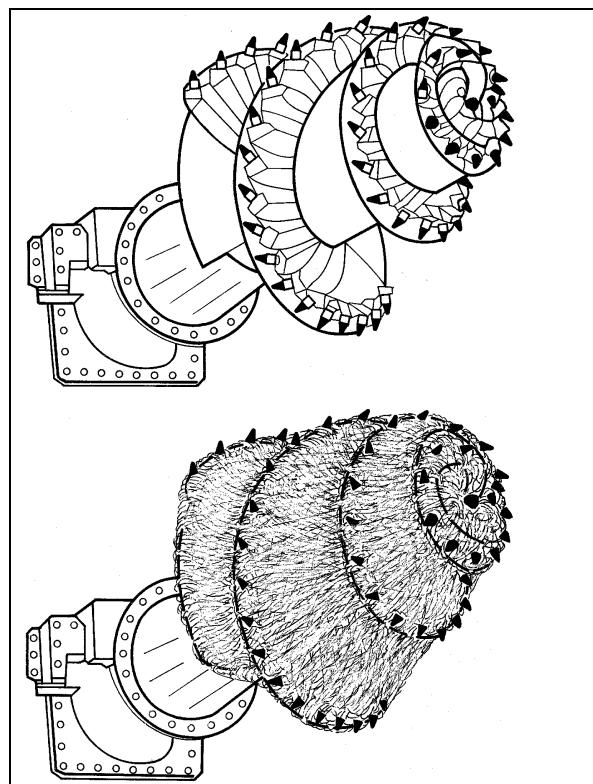


Abbildung 9: Gegenüberstellung eines gereinigten (oben) und mit einer Ton-Schluff-Masse verklebten TSM-Längsschneidkopfes (unten), wie er beim Vortrieb U2 Nord Nürnberg durch gehäuft auftretende Ton-Schluffsteinlagen auftrat. Vor allem Penetration und Förderverhalten des Längsschneidkopfes werden durch die Masse beeinträchtigt.

5 Schlußbetrachtung

Obwohl der Einsatz von schweren Teilschnittmaschinen bei den Vortriebsarbeiten zur Erweiterung der U2 Nord Nürnberg an sich hätte problemlos sein sollen, führten dennoch Inhomogenitäten in den Keupersandsteinen zu empfindlichen Leistungseinbußen des Vortriebssystems „Teilschnittmaschine“. Aus den gemachten Erfahrungen lassen sich jedoch folgende verallgemeinerte Schlußfolgerungen ziehen:

1. Wie auch die Erfahrungen aus anderen Projekten zeigen, wird vor allem der Werkzeugverschleiß einer Teilschnittmaschine von den härtesten Partien innerhalb der Schichtfolge gesteuert. Der Verbrauch an Rundschaftmeißeln steigt besonders bei einer Wechsellagerung von sehr harten mit weichen Partien oder Lagen im Gebirge stark an. Dabei ist typischerweise eine Zunahme von Hartmetallbrüchen (Verschleißklassen 4,5) zu beobachten.
2. Manchmal verursacht jedoch auch das „schwächste Glied der Kette“ Probleme - vor allem in Kombination mit Wasser. Mürbe, sehr tonreiche Sandsteine bzw. Sandstein-Tonschluffstein-Wechselfolgen können zwar meist gut geschnitten werden, sind jedoch in geschnittenem Zustand in der Lage, zusammen mit bereits geringen Wassermengen einen schwer förderbaren Schlamm zu bilden. Der erzeugte Schlamm kann durch herkömmliche Ladeeinrichtungen nur schwer gefördert und abtransportiert werden, insbesondere dann, wenn die Verhältnisse nicht vohergesehen sind und ein Umbau der

TSM vor Ort nicht mehr möglich ist. Die in solchen Untergrundverhältnissen üblicherweise hervorragenden Netto-schneidleistungen werden durch die Schutterprobleme de facto zunichte gemacht.

3. Auch die Schneidfähigkeit selbst kann durch das Vorhandensein feinkornreicher Sedimente stark herabgesetzt werden: Ton- Schluffsteine mit ungünstiger Konsistenz können unter Umständen zum Verschmieren des Schneidkopfes und der Lösewerkzeuge führen, so daß kein wirksames Eindringen in die Ortsbrust mehr möglich ist. Vor allem die Vorteile, die der Einsatz eines Längsschneidkopfes in Bezug auf den Auswurf des Schneidgutes bietet, können in solchen Verhältnissen durch Zusetzen des Schneckengewindes zunichte gemacht werden.

Die stetige Weiterentwicklung der Teilschnittmaschinentechnik stellt dem Tunnel- und Stollenbau ein immer effektiver werdendes Werkzeug zur Verfügung, mit dem Ziel auch in Fels den - in Bezug auf Vortriebsleistung, Minimierung der Gebirgsauflockerung oder Immisionsschutz - steigenden Anforderungen gerecht zu werden. Gerade der vermehrte Einsatz dieses Vortriebsverfahrens zeigt jedoch immer wieder Grenzen und Probleme auf. Der richtigen Einschätzung der geomechanischen Eigenschaften des zu lösenden Gebirges im Vorfeld der Planung kommt daher vor allem beim Einsatz von Teilschnittmaschinen zur Beurteilung der Vortriebsleistung und Werkzeugkosten eine entscheidende Bedeutung zu.

6 Danksagungen

Die Autoren bedanken sich bei Hr. Prof. Dr. G. Spaun (TU München), Hr. Dipl.-Ing. Schütz (DYWIDAG), Hr. Dipl.-Ing. Merkl (Wayss & Freytag AG) sowie dem

Bauherrn und seinen Vertretern für Ihre Unterstützung und die Genehmigung zur Publikation der vorliegenden Ergebnisse.

Literatur

BRUELHEIDE, TH. (1998): Fotodokumentation Baustelle U2 Nord Nürnberg, BW 230.3, Los 4.2.1 Dyckerhoff & Widmann AG, 50 S., München (unveröffentlicht).

FUCHS, B. (1956): Erläuterungen zur Geologischen Karte von Bayern 1:25.000, Blatt 6532 Nürnberg.- 24 S., 1 Abb., München (Bayer. Geol. Landesamt).

GROß, G. (1998): Schwere Teilschnittmaschinen im Einsatz U-Bahntunnelvortrieben in den Städten Nürnberg und Fürth.- in: Messe München International

(ed): Berichte 5. Int. Tunnelbausymposium, bauma München 1998: S. 101-106. Rotterdam (Balkema).

THURO, K. & PLINNINGER, R.J. (1998a): Geological limits in roadheader excavation.- Proc. 8th IAEG Congress, Vancouver/Canada, Vol. 5: S. 3545- 3552, Rotterdam, Brookfield (Balkema).

THURO, K. & PLINNINGER, R.J. (1998b): Geologisch-geotechnische Grenzfälle beim Einsatz von Teilschnittmaschinen.- Felsbau, 16: S. 358-366, Essen (Glückauf).