

ZUR GEOLOGIE DES TUNNELS PFAFFENSTEIN BEI REGENSBURG

von

Alfred Buchner ⁺⁾

Mit 8 Abbildungen und 2 Tabellen

Inhalt

1. Einleitung
2. Der geologische Schichtenaufbau der Winzerer Höhen im Bereich der Tunnelstraße
3. Die Ausbildung der einzelnen Schichtglieder im Aufschlußstollen
- 3.1. Jura
Massenkalk
- 3.2. Kreide
Schutzfelsschichten
Grünsandstein
Eibrunner Mergel
Reinhausener Schichten
- 3.3. Tertiär
- 3.4. Quartär
4. Die Tektonik im Aufschlußstollen
- 4.1. Die Gesteinsklüftung
- 4.2. Störungen
5. Bergwasserführung
6. Stollentemperaturen
7. Meßprogramm und Meßergebnisse

Literatur

⁺⁾ Dr. Alfred Buchner, 84 Regensburg, Autobahnbauamt München,
Bauleitung Regensburg, Zollerstraße 1.
Privat: 84 Regensburg, Alfons-Bayerer-Straße 14/I

1. Einleitung:

Der geplante etwa 970 m lange Tunnel Pfaffenstein liegt im Bereich der sog. Westumgehung Regensburg, die sich im Zuge der Bundesfernstraße 16 befindet (s. Abb. 1). Die sog. Westumgehung Regensburg stellt ein Teilstück der zukünftigen Bundesautobahn München - Regensburg - Pfreimd dar (ALTINGER 1965). Mit seinem südlichen Ende schließt der Tunnel Pfaffenstein unmittelbar an die 540 m lange Donaubrücke an, die im November 1967 voll verkehrswirksam wurde. Die Lage des südlichen Tunnelportales ist durch die vorhandene Brücke der Höhe und Richtung nach bestimmt.

Die kontinuierliche Dokumentation der geologischen und gefügekundlichen Verhältnisse bei den Aufschlußarbeiten für den Tunnelbau und die Beratung bei den damit im Zusammenhang auftretenden geotechnischen Fragen wurde mir vom Straßen-Neubauamt in Regensburg vom April 1966 bis Juni 1968 übertragen.

Die Voruntersuchungen für den Bau des Tunnels Pfaffenstein können nun als abgeschlossen betrachtet werden. Die dabei gewonnenen geologischen Erkenntnisse sollen in dieser Arbeit erläutert werden.

2. Der geologische Schichtenaufbau der Winzerer Höhen im Bereich der Tunneltrasse:

Zur Klärung des geologischen Schichtenaufbaues der Winzerer Höhen wurden in den Jahren 1962/63 23 Kernbohrungen mit einem Anfangsdurchmesser zwischen 140 und 170 mm und einem Enddurchmesser zwischen 56 und 112 mm bis unter die geplante Tunnelsohle abgeteuft. Die Auswertung dieser Bohrkerne erfolgte durch das Bayerische Geologische Landesamt München.

Weitere drei Bohrungen wurden Ende 1966 im Nordteil der Tunneltrasse, ca. 30 m SW bzw. 30-45 m NE des Pfälzer Weges durchgeführt. Sie dienten ebenfalls als Aufschlußbohrungen. In erster Linie waren die Bodenproben jedoch dafür bestimmt, aus den gestörten und ungestörten Entnahmen die bodenphysikalischen Kennziffern zu ermitteln, die zur Festlegung der Böschungsneigungen im nördlichen Voreinschnitt notwendig waren. Die von der Geländeoberkante aus abgeteuften insgesamt 26 Bohrungen haben eine Gesamtlänge von 1 110.45 m.

Um zusätzliche Aufschlüsse über die Gebirgsfestigkeit zu erhalten, die von Schichtung, Klüftigkeitsgrad, Kluftstellung und Wasserführung abhängig ist, wurden einige Bohrlöcher mit einer Fernsehbohrlochsonde ausgespiegelt. Anschließend wurden die Bohrlöcher, mit Ausnahme der Ende 1966 vorgenommenen Bohrungen, bis etwa 5 m über die Obergrenze des Eibrunner Mergels bei einem Druck von etwa 10 atü mit Zementmilch verpreßt, um ein Aufweichen des Mergels durch Wasserzutritt zu verhindern.

Die gewonnenen Bohrkerne und Bohrproben wurden geologisch aufgenommen. Aus den einzelnen ausgewerteten Bohrungen konnte nun entlang der Tunneltrasse ein geologisches Längsprofil konstruiert werden (die anstehenden Schichtglieder sowie Gesteinsausbildung und Mächtigkeit

sind der Tabelle 1 zu entnehmen).

Von Proben aus dem Eibrunner Mergel, dem wichtigsten und bautechnisch schwierigsten Schichtglied im Bereich des Tunnels, wurden am Bayerischen Geologischen Landesamt München die bodenphysikalischen Kennziffern wie Trockenraumgewicht, Porenraum, natürlicher Wassergehalt, Quelleigenschaften, Fließgrenze, Ausrollgrenze, Bildsamkeit, Konsistenz, einachsiale Druckfestigkeit, Scherfestigkeit, Winkel der inneren Reibung usw. bestimmt.

Die aus den Bohrkernen erarbeiteten geologischen Befunde und technischen Daten genügten jedoch für das so umfangreiche Tunnel-Projekt keineswegs (Kostenschätzung für zwei Tunnelröhren ca. 35 Millionen DM). Eine infolge lückenhafter geologischer und boden- bzw. felsmechanischer Erkenntnisse falsch angenommene und ausgeschriebene Vortriebsweise oder Tunnelkonstruktion, die womöglich während der Baudurchführung geändert werden muß, könnte erhebliche Kostenerhöhungen nachsichziehen. Außerdem läßt sich aus der Gesteinsfestigkeit der Bohrkern nur bedingt auf die Gebirgs- bzw. Verbandsfestigkeit schließen.

Zur einwandfreien Beurteilung des Gebirgsverhaltens während des Vortriebes sowie nach Fertigstellung des Ausbruchs und zur Verdichtung der geologischen Erkenntnisse (Schichtlagerung, Tektonik) wurde durch die Winzerer Höhen von Mai 1966 bis Juni 1967 ein 970 m langer Aufschlußstollen (Querschnitt: 7.50 m²) getrieben.

In geologisch strittigen Bereichen wurden vom Aufschlußstollen aus außerdem weitere 18 Sohl-, Schräg- (unter 45° nach Westen) und Firstkernbohrungen (Bohrkronendurchmesser: 76 mm) mit insgesamt 186, 72 Bohrmeter durchgeföhrt.

Der Aufschlußstollen verläuft im Ostteil der späteren westlichen Tunnelröhre (s. Abb. 8). Beim Ausbruch des eigentlichen Tunnels kann er als Förderstollen verwendet werden.

3. Die Ausbildung der einzelnen Schichtglieder im Aufschlußstollen

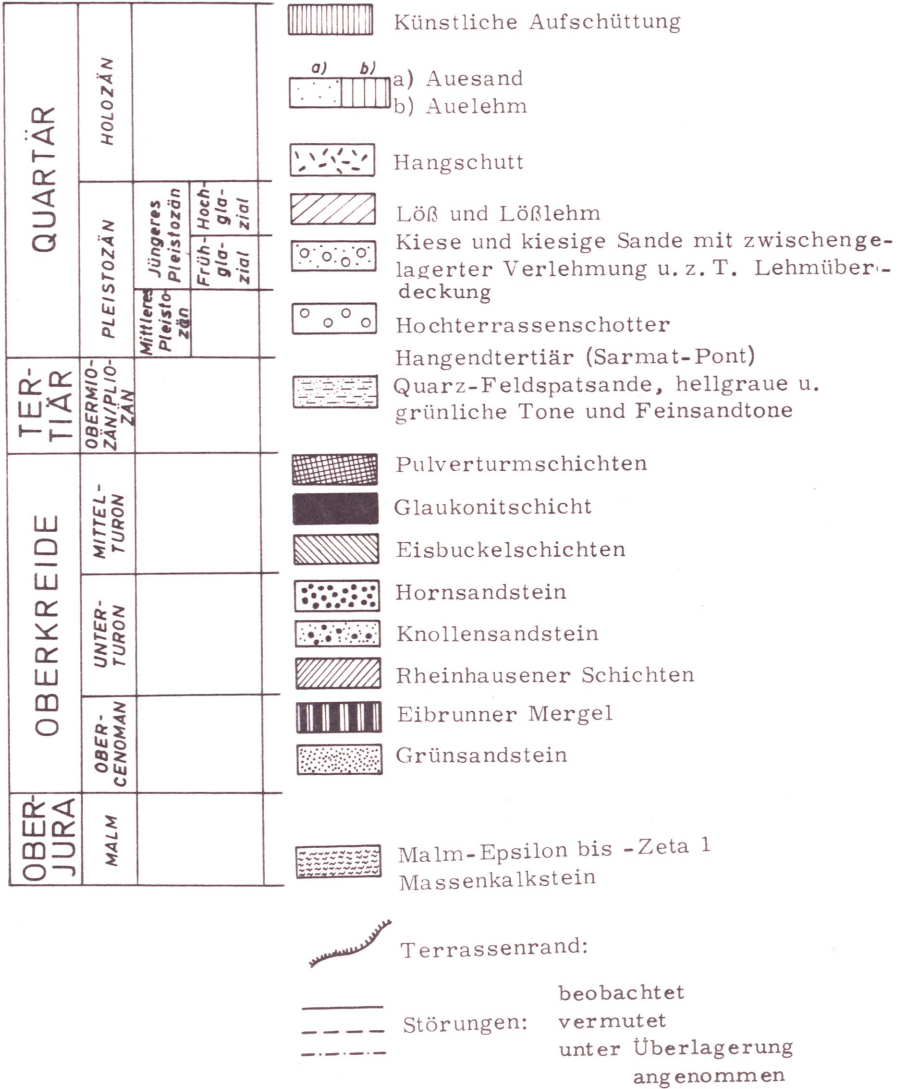
Beim Vortrieb des Aufschlußstollens von SSW nach NNE wurden Kalke, Sande, Sandsteine, Mergel und Tone angefahren, die überwiegend marinen Sedimentgesteinen angehören. Sie können folgenden Schichtgliedern zugeordnet werden (Lagerungsverhältnisse wie Schichtgrenzenverlauf und Schichtmächtigkeiten werden aus dem geologischen Längsprofil der Abb. 2 ersichtlich).

3.1 Jura:

Massenkalk

Der zum Oberen Jura gehörende Massenkalk (Malmkalkstein) stellt das älteste Schichtglied dar. Es handelt sich um einen gelblich-weißen bis weißgrauen, dichten, ungeschichteten, splitterig brechenden, durchaus standfesten Kalkstein. Gelegentlich finden sich im Kalkstein kleine farbig gebänderte Hornsteinbildungen.

Legende zur Abb. 1:



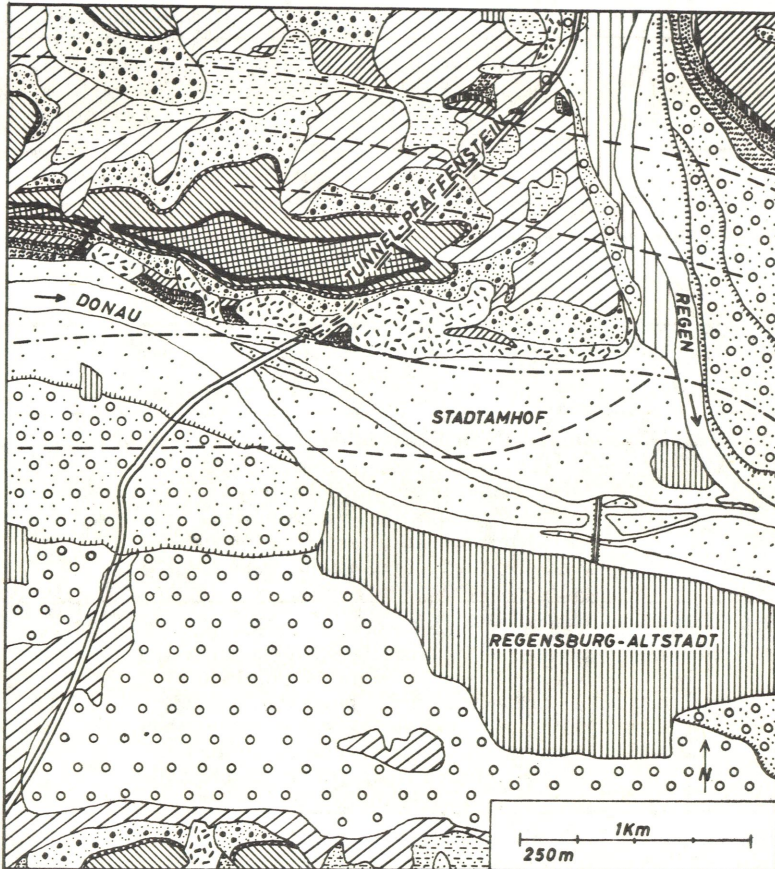


Abb. 1 : Ausschnitt aus der Geologischen Karte von Bayern
 1:25 000, Blatt 6938 Regensburg (siehe nebenstehende
 Legende).
 Von Südwesten nach Nordosten verläuft ein Teilstück
 der sog. Westumgehung Regensburg mit dem geplanten
 Tunnel-Pfaffenstein.

Tabelle 1: Der geologische Schichtenaufbau der Winzerer Höhen im Bereich der Tunneltrasse

Alter		Schichtglied	Ausbildung	Mächtigkeit	
O B E R E R E I D E	TURON	mittleres Turon	Pulverturm- schichten	Kalkmergelsteine bis feinkörnige Mergelsandsteine, plattige Abson- derung, grau bis gelblichgrau	2.50-5.00 m (oberer Bereich ist erodiert)
			Glaukonit- schicht	Tonmergel bis Kalkmergel, sandig, glaukonitreich, mürbe bis locker, dunkelgrau bis grün	0.80-1.25 m
			Eisbuckel- schichten	Kalksteine bis Mergelkalksteine, schwach sandig, hellgrau bis grau- braun	7.20-7.80 m
		unteres Turon	Hornsandstein	Quarzsandstein, quarzitisches, sehr grobkörnig, fest, hellgrau bis braungrau bis grünlich	1.60-2.50 m
			Knollensand- stein	Quarz-Feldspatsandsteine, kalkig, seltener auch kieselig gebunden, feinmittel- bis grobmittelkörnig, fest, hellgrau bis gelblich; infolge Verwitterung und Wassereinwirkung teilweise auch als knolliger lockerer, gelber Sand	20.00-25.00 m
			Reinhausener Schichten	Kalkstein bis Kalksandstein, fein- körnig, z.T. kieseliges Bindemittel, fest, hellgrau bis schwach gelblich bis bräunlich; in den untersten 1-2 m herrschen Tonmergel-, Sandmergel- steine und sandige Mergelkalke vor, unterschiedlich fest, graubraun bis gelbbraun bis grünlich	13.00-17.00 m
	CENOMAN	oberes Cenoman	Eibrunner Mergel	Tonmergel, Mergelkalke bis Kalk- mergel, dicht, ungeschichtet, braun bis dunkel- bis schwarzgrau, (z.T. pyrithaltig)	3.50-10.00 m; im Durchschnitt 6.00-7.00 m
			Grünsand- stein	Sandsteine, fein-, mittel- bis gro- körnig, kalkgebunden, glaukonit- führend, überwiegend fest und un- geschichtet, hell- bis mittelgrau- braun bis grün	5.00-7.00 m
		mittl.	Schutzfels- schichten	Tone, Schluffe, Sande mit Kies- einstreuung, locker bis verfestigt buntgefärbt	0-2.00 m
	Oberer JURASS	MALM Malm E	Malmkalkstein (Massenkalk)	Kalkstein, fest und dicht, massig; gelblich weiß bis weißgrau	über 20.00 m (Schichtpaket nicht durchteuft)

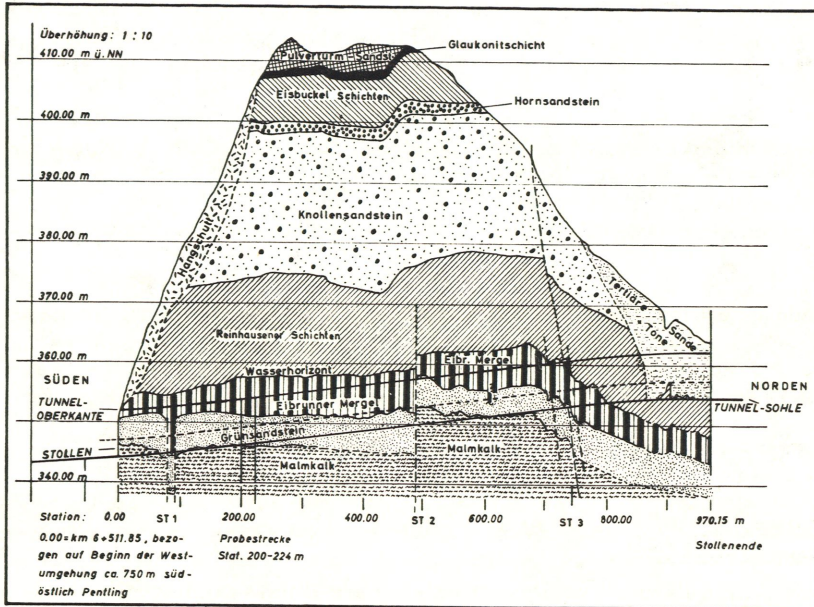


Abb. 2. Geologischer Längsschnitt durch die Winzerer Höhen im Bereich der Tunneltrasse.

Der obere Teil des Profiles zeigt die sich aus den Tiefkernbohrungen ergebende Schichtlagerung. Im unteren Teil sind die Lagerungsverhältnisse dargestellt wie sie beim Vortrieb des Aufschlußstollens und durch Kernbohrungen vom Stollen aus ermittelt wurden.

Die Oberfläche des Malmkalksteines, die eine alte Landoberfläche darstellt, weist häufig ein unruhiges Relief auf.

Im Kalkstein treten vereinzelt unregelmäßig in unterschiedlicher Größenordnung Hohlräume bzw. Spalten auf, die auf eine Verkarstung zurückzuführen sind.

Eine im Querschnitt ovale (2.70 m lang, 1.40 m breit) 8 m tiefe Spalte wurde z. B. an der Westulme bei Stollenmeter 660 angefahren. Sie wurde im angeseilten Zustand untersucht. Die Spaltenwände waren trocken, gut ausgewaschen, glattflächig und z. T. mit Rasen von Calcitkriställchen überzogen. Im untersten Teil der Spalte lagen lockere, bergfeuchte, lehmige Sande, Kalkbrocken und Kalksplitter. Vom unteren Spaltenende aus verlief in nordöstlicher Richtung ein weiterer Gang (0,30 x 0,50 m), der noch auf ca. 6 m Länge zu beobachten war. Im oberen Teil (in Höhe der Aufschlußstollensohle) war auch im Grünsandstein eine höhlenförmige Auswaschung vorhanden, von der aus ein weiterer stufenförmig nach oben in den Grünsandstein hinein verlaufender Gang (0,50 x 0,70 m) auf eine Länge von etwa 4 m eingesehen werden konnte. Diese Beobachtung macht wahrscheinlich, daß die Erosion bzw. Korrosion durch Wasser erst frühestens nach der Ablagerung des unteren Grünsandsteinpaketes erfolgte.

Nachdem das Spaltensystem dokumentiert und vermessen war, wurde es mit dem beim Vortrieb anfallenden Schuttermaterial verfüllt.

Die genaue Mächtigkeit des Massenkalkes kann nicht angegeben werden, da dieser bei den Bohrungen nicht durchteuft wurde. Sie ist aber mit Sicherheit weitaus größer als 20 m.

Im Malmkalkstein konnten keine Makrofossilien gefunden werden.

3.2 Kreide: Schutzfelsschichten

Bei den Schutzfelsschichten handelt es sich um limnisch-fluviatile Sedimente, die durchwegs nur lokal vorkommen.

Sie setzen sich aus buntgefärbtem Lockergesteinsmaterial (Tone, Schluffe, Sande, kleine Quarzgerölle) zusammen. Die Tone, Schluffe und Sande - z. T. liegt reiner Quarzsand vor - sind teils stärker verkittet, teils rollig, mürbe und weich. Die Schutzfelsschichten bilden das Füllmaterial der infolge Verkarstung des Massenkalkes an der Oberfläche und im Innern entstandenen Taschen, Rinnen und Hohlräume. Das Füllmaterial kann auch glaukonitführend sein (Grünsandstein-Material).

Die beobachtete Mächtigkeit der Spalten- und Hohlraumfüllungen war im Bereich des Aufschlußstollens immer kleiner als 2 m. In der Literatur werden jedoch Mächtigkeiten bis zu 80 m angegeben (OSCHMANN 1958, S.60).

In den Schutzfelsschichten wurden bei der nur makroskopischen Untersuchung weder pflanzliche noch tierische Fossilien festgestellt.

Grünsandstein

Der Grünsandstein ist als hell- bis mittelgraubrauner bis grüner wechselnd fein- bis mittel- und grobkörniger, kalkgebundener, glaukonit-führender Sandstein bis Kalk (sand)stein ausgebildet. Die Körnigkeit des Sandsteines sowie der Glaukonitgehalt nehmen im Vertikalprofil von unten nach oben hin ab, die Festigkeit ist im oberen Teil durchwegs größer als im unteren.

Der Grünsandstein stellt überwiegend ein standfestes Gebirge dar. Nur im Bereich von Störungen ist er häufig bergfeucht und von unterschiedlicher Festigkeit (fest, mürbe, weich, rollig).

Lokale Kluftauswaschungen und die daraus resultierenden Hohlräume kommen nicht nur im Malmkalkstein und im unteren Teil des Grünsandsteines vor, sondern auch im oberen Grünsandstein. So war bei Station 743 m an der Sohle, 1.80 m östlich der Stollenachse, ein ca. 5-7 m³ großer Hohlraum aufgeschlossen.

Die aus Grob- (Korndurchmesser z.T. sogar größer 2 mm) und Mittelsanden bestehenden Sandsteinbereiche setzen sich vorwiegend aus kantengerundeten oder eckigen Quarzkörnern, seltener aus Feldspat- und Glaukonitkörnern zusammen. Vereinzelt wurden im unteren und mittleren Teil des Grünsandsteines bis zu 0.40 m mächtige feste Aufarbeitungslagen, bestehend aus eckigen, dichten und sehr festen Kalk(sand-)steintrümmern und kalkig verkitteten Grobsandresten (z.T. als Zwickelausfüllung) beobachtet.

Eine Bankung ist im frisch aufgefahrenen Gebirge nur schwer erkennbar. Die nicht selten eingeschalteten 0.20 bis 1.00 m mächtigen, mäßig festen, blätterig-schieferigen Lagen lassen aber dennoch ein schwaches Schichtgefüge erkennen.

Der Sandstein bricht uneben bis muscheliger und splitterig. Die frischen Bruchflächen sind meist rau.

An der Grenze Massenkalk - Grünsandstein wurde an mehreren Stellen ein geringmächtiges, relikartig erhaltenes Basalkonglomerat (mit aufgearbeitetem Malmkalkstein) beobachtet, das bei der Transgression des "Grünsandstein-Meeres" gebildet wurde.

Die Mächtigkeit des Grünsandsteines schwankt im Bereich der Tunneltrasse zwischen 5 und 7 m.

Die Fossilführung des Regensburger Grünsandsteines ist überwiegend auf Muscheln (Exogyren und Pecten) beschränkt. Die Muscheln treten als Einzelindividuen (Einzelklappen oder Doubletten) oder in Gruppen auf.

Eibrunner Mergel

Beim Eibrunner Mergel können hinsichtlich seiner Färbung deutlich zwei verschiedene Typen unterschieden werden, und zwar hellbraune bis grünliche bis gelblichbraune, gefleckte Mergel und mittelgraue bis dunkel- und schwarzgraue, gefleckte Mergel.

In beiden Fällen handelt es sich um stark tonige (unter den Tonmineralien überwiegt der Montmorillonit) bis sandige kalkhaltige (Calcitkristalle und Schalenfragmente) Schluffe.

Materialunterschiede zwischen beiden Typen sind makroskopisch nicht erkennbar.

Der braune bis grünliche bis gelbbraune Mergel ist im Vertikalprofil fast immer auf die unteren 0,40 - 1,00 m beschränkt und steht somit unmittelbar über der Grünsandsteinoberkante an. Darüber folgt mit ziemlich scharfer, horizontal verlaufender Grenze (nur vereinzelt kommen unregelmäßige Sprünge vor) der graue bis dunkel- bis schwarzgraue Eibrunner Mergel. In manchen Fällen kann jedoch der braune bis gelbbraune Mergel im Vertikalprofil des dunkel- bis schwarzgrauen Types unregelmäßig und in größerer Mächtigkeit (bis 3 m) eingeschaltet sein.

Im dunklen Mergel tritt des öfteren Pyrit (= FeS_2) auf. Er kommt in Form von Einzelkristallen vor; außerdem wurde er als feinkristalline Rasen, in Nestern als feinkörnige kugelige Aggregate oder als feinverteilte Imprägnationen beobachtet.

Der braune bis grünliche bis gelbbraune Mergeltyp ist als dichter Tonmergel bzw. Mergelkalk bis Kalkmergel ausgebildet. Er ist i. allg. etwas weicher als die dunkle Ausbildungsart und z. T. steif bis zähplastisch. Der dunkelgraue bis schwarzgraue verhältnismäßig schwere Mergeltyp ist, von einzelnen weicheren blätterigen bis schieferigen Lagen abgesehen, überwiegend als dichter und fester Steinmergel ausgebildet. Beide Typen sind jedoch durch eine geringe Mohs'sche Ritzhärte (mit Fingernagel ritzbar) gekennzeichnet. Verschiedentlich sind im grauen Mergel härtere Partien (Ritzhärte größer als 2) unregelmäßig eingeschaltet, ohne makroskopisch als solche erkennbar zu sein.

Während fast alle braunen und dunkelgrauen bis schwarzgrauen Mergelstücke je nach Porenvolumen und Wassergehalt an der Sonne unter Bildung eines Netzes von Trockenrissen unterschiedlich stark aufblättern und zerfallen, verändert sich der zuletzt beschriebene Typ mit felsartigem Charakter nicht.

Obwohl die Verbandsfestigkeit des Eibrunner Mergels durch die z. T. sowohl im Handstückbereich als auch im Großbereich vorhandenen wirt und meist unter $30-60^\circ$ steilen Einfallswinkeln (siehe Abschnitt 4.1. Gesteinsklüftung) verlaufenden, gewölbten, glatten, gestriemten (s. Abb. 3) un: speckig glänzenden Trennflächen herabgesetzt ist, kann der Mergel bei kleiner Hohlraumöffnung ($6-8 \text{ m}^2$) und bei Abschlagstiefen von ca. $0.80 - 0.90 \text{ m}$ noch als verhältnismäßig standfest bis schwach nachbrüchig bezeichnet werden. Bleiben jedoch die Mergelflächen mehrere Stunden offen und ungesichert, so lösen sich bevorzugt an der Firste immer wieder kleinere bis größere Mergelbrocken bzw. dünnchalige Mergelplatten ab.

Der Eibrunner Mergel ist massig, eine Schichtung ist fast nie erkennbar. Der Bruch ist scherbig bis ebenflächig. Die Bruchflächen sind teils unregelmäßig und rau, teils gebogen, glatt oder gestriemt. Das beim Sprengen entstehende Haufwerk ist unregelmäßig klein- bis großblockig.



Abb. 3. Stollenmeter 386:

Sicherung der Firse durch Abräumen des sich beim Sprengen aufgelockerten dunkel- bis schwarzgrauen Eibrunner Mergels. Man beachte die ausgeprägten gestriemten Harnischflächen.

Die Mächtigkeit des Schichtpaketes der Eibrunner Mergel schwankt zwischen 3.50 und 10.00 m. Im Mittel liegt sie zwischen 6 und 7 m.

Die Makrofossilführung der Eibrunner Mergel ist spärlich. Neben Schalenresten wurden Muscheln (z. T. in Nestern angereichert), vereinzelt Haifischzähne und Fischeschuppen beobachtet. (Außerdem wurden drei involute, z. T. deformierte Ammoniten, Durchmesser: 10-15 cm, mit kräftigen geraden Rippen gefunden. Die Fundstücke sind nur als Steinkerne erhalten). Die Sprengelung des Mergels ist aller Wahrscheinlichkeit nach auf Weidespuren von Organismen zurückzuführen.

Proben für die mikropaläontologischen Untersuchungen im Vertikalprofil des Grünsandsteines und Eibrunner Mergels wurden dem Paläontologischen Institut der Universität München zur Verfügung gestellt.

Reinhausener Schichten

Die Reinhausener Schichten treten im Nordteil, etwa ab Station 770 m in das Profil des Aufschlußstollens. Sie sind in ihren untersten 1-2 m als graubraune bis gelbbraune bis grünliche, nur schwach geschichtete

Tonmergel-, Sandmergelsteine oder sandige Mergelkalke ausgebildet. Ihre Grenze zum Eibrunner Mergel hin ist infolge der ähnlichen Ausbildung nicht genau festzulegen. Sie wurde dort gezogen, wo die Farbe von dunkel- bis schwarzgrau nach grau- bis gelbbraun umschlug.

Die unteren Partien der Reinhausener Schichten weisen sehr unterschiedliche Gesteins- und Verbandsfestigkeiten (Einwirkung von Bergwasser) auf. Feste, brüchige und mürbe bis lockere (rollige) Bereiche kommen nebeneinander vor und wechseln in vertikaler und horizontaler Richtung unregelmäßig ab. Zum Hangenden hin nimmt die Festigkeit zu. Hier überwiegen ungeschichtete graue bis gelbliche bis bräunliche Kalksteine und feinkörnige Kalksandsteine. Das Gesteinsbindemittel ist meist kalkig, seltener kieselig.

Die Mächtigkeit der Reinhausener Schichten schwankt zwischen 13 und 17 m. Im nordöstlichen Teil der Trasse ist sie infolge Abtragung bis auf 5 m reduziert.

In den aufgefahrenen Bereichen der Reinhausener Schichten wurden keine Fossilien beobachtet.

3.3 Tertiär

Tertiäre Sedimente - Schluffe, Sande und Tone - wurden nur im nord-nordöstlichen Abschnitt der Stollentrasse angetroffen, wo sie die während des Jungtertiärs durch Erosion der Oberkreidesedimente entstandene Hohlform auffüllen. Im beobachteten Bereich liegen sie immer über z. T. stark zersetztem Reinhausener Kalk(sand-)stein, dessen Oberkante sehr unregelmäßig verläuft.

Da im Längsschnitt der Abb. 2 die Lagerungsverhältnisse der tertiären Schichten infolge des unruhigen Verlaufes innerhalb des Stollenquerschnittes und in der Stollenrichtung nur ungenau darzustellen sind, werden sie im folgenden Text erläutert.

Zwischen Station 826 und 836 m treten im oberen Teil des Stollenquerschnittes im Reinhausener Kalkstein vereinzelt lockere Sandeinschaltungen auf. Bei Station 868, 50 m stehen an der Westulme des Stollens rollige, aber dichtgelagerte, trockene bis schwach bergfeuchte, karbonatfreie bis karbonathaltige, braune Feinmittelsande an, die zwischen 870 und 891 m, mit Ausnahme eines kleinen Kalksteinhöckers an der Basis bei 873 m und einer Toneinschaltung (vermischt mit Sand, Zerreibsel und Kalkknollen) im Firstbereich bei 881 m, die Westulme und die westliche Hälfte des Stollenquerschnittes einnehmen. Die östliche Stollenbrusthälfte und die Ostulme befinden sich dagegen im festen Reinhausener Kalkstein.

Die stratigraphische Zuordnung (Oberkreide-Knollensande oder Tertiär?) dieser Sande war problematisch; sie war jedoch für die weiteren Vortriebsarbeiten belanglos. Eine bei Station 871 m an der W-Ulme unter 45° Steigung angesetzte Kernbohrung verlief bis auf eine Länge von 12 m (hier wurden die Bohrarbeiten eingestellt) in feuchten bis nassen, gelb- bis rostbraunen, teilweise hellgrauen Fein- bis Feinmittelsanden (mit Quarzgerölleinstreuung, Korndurchmesser: 3-5 mm). Es handelt sich bei diesen Sanden sehr wahrscheinlich um Tertiärsande. Die Vermutung

liegt nahe, daß auch die anderen direkt über dem Reinhausener Kalkstein lagernden Sande ins Tertiär zu stellen sind.

Im Bereich zwischen 891 und 897 m verläuft der Aufschlußstollen in einem trockenen bis schwach bergfeuchten, rolligen, aber dicht gelagerten, kalkhaltigen Feinmittelsand. Nur an der Sohle sind vereinzelt noch kleine Kalksteinnasen (z. B. bei Station 895 m) aufgetreten.

Beim weiteren Stollenvortrieb nimmt nun der Anteil des Reinhausener Kalksteines, in dem z. T. Sande (vereinzelt auch kieselige Knollen) lagig oder in Klüften bzw. Spalten eingeschaltet sind, von unten her wieder kontinuierlich zu. Der restliche darüberliegende Teil wird von Sanden aufgebaut. Zwischen Station 904 und 906 liegt der gesamte Aufschlußstollen zum letzten Mal im festen Reinhausener Kalkstein.

Etwa ab 906 m bis 912 m stehen die Stollensohle und die östliche Ortsbrusthälfte in einem festen Kalkstein, während die westliche Brusthälfte aus einem größtenteils bis zum Sand zersetzten, mürben, jedoch dichtgelagerten "Kalk- bis Kalksandstein" besteht. Darüber folgen gelbbraune, dichtgelagerte Sande, die aber im Gegensatz zu dem darunterliegenden Gesteinsmaterial stärker nachbrüchig sind.

Zwischen 912 und 921 m befindet sich die Sohle und z. T. auch der untere Bereich des Stollens in einem festen, zähen Reinhausener Kalkstein. Unmittelbar darüber folgen dichtgelagerte, schwach nachbrüchige, schluffige Sande, in denen Kalksteinknollen regellos eingeschaltet sind (stark zersetzter Reinhausener Kalkstein!). Nach oben hin schließen sich trockene bis schwach bergfeuchte, dichtgelagerte, z. T. lehmige Feinmittelsande mit schaliger Ablösung und stärkerer Nachbrüchigkeit an.

Ab Station 921 bis 925 m umfassen diese Feinmittelsande den gesamten Stollenquerschnitt. Bei 925 m wurde in der oberen Ortsbrusthälfte ein sehr zäher, plastischer, dicht- bis festgelagerter, standfester Ton angefahren, in dem sandige Lagen bzw. Linsen und Nester, Stüßwasserquarzitgerölle, kohlige Schmitzen und Brauneisenknollen enthalten sind. Diese Toneinschaltung nimmt bis 936 m durchgehend etwa 50-80 % des Querschnittes ein und hebt bis Stollenmeter 939 allmählich nach oben aus. Die untere bis unterste Brustfläche besteht bis 936 m aus einem in einzelnen Lagen feuchten bis nassen, farbig gebänderten, graubraunen, teils lockeren, aber dicht im Verband liegenden, teils fest verkitteten Feinmittel- bis Grobsand.

Etwa bei 936 m gehen diese Sande in ein heteroklastisches, sehr buntfarbiges, dichtgelagertes, sandig-lehmiges, z. T. schwach bergfeuchtes Material über, in dem feste bis stark zersetzte Kalksteinknollen eingestreut sind (stark verwitterter tertiärer Blockschutt?). Zwischen Station 940 und 954 m ist dieses Material, in dem an einer Stelle im Firstbereich ein plastischer, blättriger-bröckeliger Ton linsenförmig eingeschaltet ist, nur mehr in der oberen Ortsbrusthälfte aufgeschlossen, während die untere Hälfte durchgehend bis 970 m (Stollenende) aus homogenen, dichtgelagerten, trockenen bis bergfeuchten, schwach plastischen, lehmigen, braunen bis gelbbraunen schluffigen Feinsanden besteht, die vereinzelt weiße Kalkknollen enthalten.

Der Reinhausener Kalkstein tritt bis 946 m vereinzelt noch an der Stollensohle auf. Im letzten Streckenbereich wurde er dagegen nicht mehr beobachtet.

Der obere Teil des Stollens verläuft ab 954 m bis zum nordöstlichen Stollenende erneut in einem dicht- bis festgelagerten, sehr zähen, plastischen und speckigen Ton (mit Einstreuungen von grauen, tonig-schluffigen, feuchten bis schwach wasserführenden schmierigen bis plastischen Feinmittel- bis Grobsanden und gelbbraunem sandigem Lehm. In dem im Anschluß an das Stollenende folgenden offenen ca. 12 m langen Einschnitt sind die Verhältnisse, mit Ausnahme einer über der Tonlage eingeschalteten Braunkohlenschicht (rasche Wechsellagerung von Kohle, Ton und Sand) ähnlich.

Die Mächtigkeit der tertiären Sedimente schwankt etwa zwischen 5 und 12 m. Eine Fossilführung wurde bis auf vereinzelte Schalenfragmente nicht beobachtet.

3.4 Quartär

Jungquartäre Ablagerungen liegen in Form von Hangschutt nur auf dem Südabhang der Winzerer Höhen. Beim südlichen Stollenantrieb und im Stollen selbst wurden sie aber nicht angetroffen.

Der Hangschutt, in dem auch schluffig-lehmige Lagen eingeschaltet sind, besteht aus eckigen bis schwach kantengerundeten, unterschiedlich großen Gesteinskomponenten der anstehenden Oberkreide-Sedimente.

Die Mächtigkeit dieser Hangschuttdecke beträgt ca. 2-5 m.

4. Die Tektonik im Aufschlußstollen

4.1. Gesteinsklüftung

Die Klüftstellungen in den durchfahrenen Gesteinen sind aus den Abb. 4-7 ersichtlich. Die Konstruktion der Diagramme erfolgte so, daß zunächst alle Klüftflächenmessungen (Einfallrichtung (!) und Einfallswinkel) eines Schichtgliedes als Flächenlotpunkte auf dem Schmidt'schen Netz (untere Lagenkugel) eingetragen wurden. Durch Auszählen der einzelnen Punkte konnten schließlich Felder gleicher Besetzungsdichte ermittelt werden.

In den beiden Grünsandstein-Diagrammen (Abb. 4 und Abb. 5) bilden sich trotz des starken Streubereiches der Meßwerte zwei steilstehende, mit $75-90^\circ$ nach SE- bzw. NW- und SW-bzw. NE-einfallende, quer zur Stollenachse (Schnittwinkel schwankt zwischen 5 und 85°) verlaufende Hauptklüftscharen (Besetzungsdichte $>4\%$) heraus.

Ihre beiden Hauptstreichrichtungen liegen zwischen $040-090^\circ$ und $130-170^\circ$.

Die eingemessenen Klüfte können größenordnungsmäßig, bezogen auf den Stollenquerschnitt, als Großklüfte bezeichnet werden. Sie sind meist über Strecken von mehr als 3 m zu verfolgen.

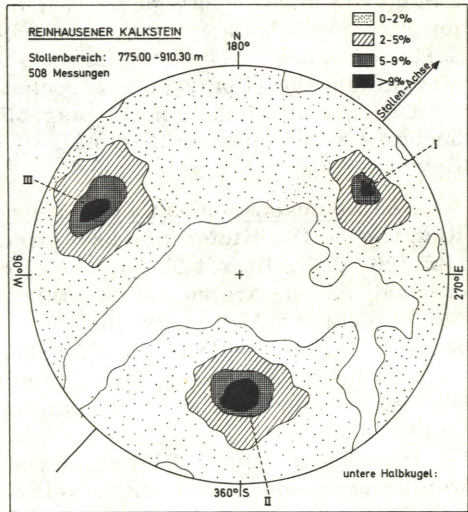
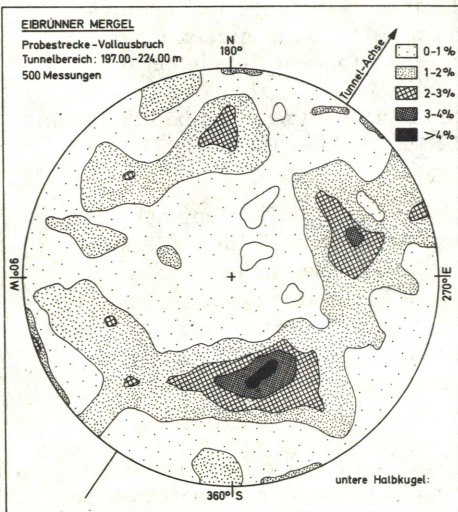
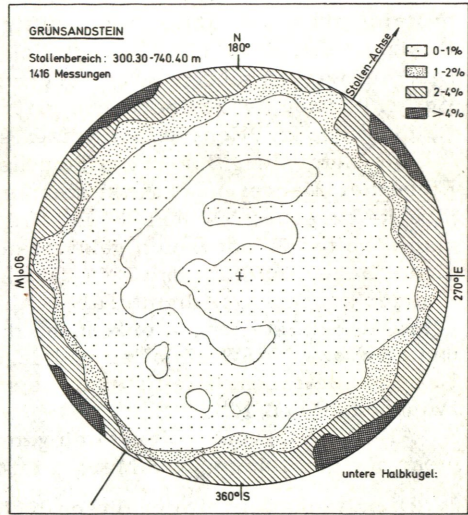
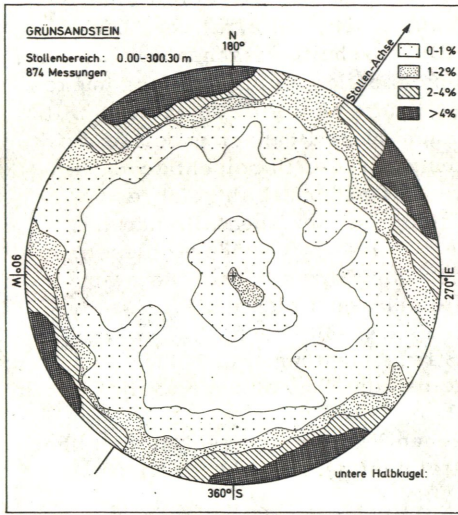


Abb. 4-7: Die Kluftstellung - Einfallsrichtung und Einfallswinkel

Die Klufstabstände betragen 0.10 - 1.50 m. Es herrscht somit eine mitteldichte bis weitmaschige Klüftigkeit (0.1 - 10 Klüfte/m) vor. Die Öffnungsweite der Klüfte bewegt sich im Durchschnitt zwischen 0 und 1 mm. Die Klufflächen sind trocken, überwiegend ebenflächig bis schwach buckelig, z.T. rauh, vereinzelt auch glatt. Die Klüfte sind teils leer, teils mit Calcit verheilt. Nicht selten weisen sie auch dünne Brauneisenbeläge auf.

Die Ermittlung der Trennflächenstellung (Preß-, Harnischflächen) im Eibrunner Mergel beschränkt sich auf die im Großprofil aufgefahrene Strecke zwischen 197 und 224 m. Die Klüftung ist hier ebenfalls durch einen breiten Streubereich gekennzeichnet. Felder mit größerer Besetzungsdichte liegen im SSE- und ENE-Quadranten des Netzes sowie, wenn auch weniger ausgeprägt, diametral (s.Abb.6). Man kann also wieder zwei bevorzugte Kluffstellungen erkennen, die mit ca. 40-60° nach NNW- bzw. SSE und ENE bzw. WSW einfallen und deren Streichrichtungen 060-085° und 150-180° betragen. Die Hauptklüfte schneiden die Tunnelachse unter Winkeln zwischen 26 und 64°.

Alle im Eibrunner Mergel eingemessenen Flächen erstrecken sich über mehr als 1 m Länge. Der Mergel ist mitteldicht geklüftet (1-10 Klüfte/m).

Die Beschaffenheit der Trennflächen variiert von ebenflächig - glatt - gewölbt - gebogen - gestriemt. Die Öffnungsweiten schwanken zwischen 0 und 2 mm. Die fast durchwegs trockenen und nur im Firstbereich vereinzelt feuchten Trennflächen (Sickerwasser) sind mit 1 - 5 mm dicken Calcitbelägen bedeckt, z.T. sind sie auch leer. In kluffnahen Bereichen ist der Mergel manchmal stärker zerbrochen.

Die im Grünsandstein gut ausgebildeten Klüfte setzen sich häufig, wenn auch mit etwas anderer Kluffstellung und Klufflächenausbildung, in den Eibrunner Mergel fort.

Der Reinhausener Kalkstein zeigt eine ausgeprägte Klüftung nach drei Richtungen. Die Kluffschar I ist etwas schwächer ausgebildet. Sie streicht 135-150° und fällt mit 55-70° nach SW ein. Infolge des hohen Durchtrennungsgrades treten die Hauptkluffscharen II und III (s.Abb.7) im Stollen sehr deutlich in Erscheinung. Ihre Streichrichtungen streuen zwischen 075-100° (Einfallswinkel: 40-60° Norden) und 015-040° (Einfallswinkel: 55-75° Südosten). Die Klüfte verlaufen zur Stollenachse unter Winkeln zwischen 3 und 88°, dominierend sind Winkelwerte zwischen 10 und 60°.

Die eingemessenen Klüfte erstrecken sich über mehr als 3 m Länge. Der Reinhausener Kalkstein ist mitteldicht geklüftet. Die Öffnungsweiten der Klüfte variieren zwischen 0 und 15 mm. Die Klufflächen sind überwiegend eben bis schwach buckelig bis rauh und nicht selten feucht bis naß. Die Klüfte sind teils mit sandig-mergeligem, tonigem oder lehmigem Material gefüllt, teils sind sie leer.

Durch die oben beschriebenen Gesteinstrennflächen werden der Grünsandstein und der Reinhausener Kalkstein in säulige, blockige, würfelige und quaderige Teilkörper unterschiedlicher Größe zerlegt. Im Eibrunner Mergel sind diese Teilkörper infolge seiner anderen Verhaltensweise bei mechanischen Beanspruchungen noch vielgestaltiger.

Die Klüftigkeit des Grünsandsteines und des Reinhausener Kalksteines hat beim Vortrieb des 7.5 m² großen Aufschlußstollens mit Ausnahme von kleineren durch die Klüftung bedingten Mehrausbrüchen keine unangenehmen Begleiterscheinungen wie z.B. Auftreten von Gebirgsdruck verursacht. Dagegen waren die Vortriebsarbeiten in dem von zahlreichen klein-, großflächigen, glatten, gebogenen und gestriemten Trennflächen durchsetzten Eibrunner Mergel häufig von für die Mannschaft unangenehmen kleineren bis größeren Gesteinsablösungen begleitet.

4.2 Störungen

Beim Vortrieb des Aufschlußstollens von Südwesten nach Nordosten wurden drei Verwerfungen nachgewiesen, die etwa parallel zu dem herzynisch streichenden Donaurandbruch verlaufen.

Zwischen Station 80 und 92 m (St₁, Abb.2) ist das Schichtpaket des Grünsandsteines in Stollenrichtung über eine Länge von 12 m um den Vertikalbetrag von ca. 5 m eingesunken. Die Erstreckung dieses sog. Grabenbruches senkrecht zur Stollenachse ist nicht bekannt. Im Nahbereich der steilverlaufenden Grabenränder, jeweils ca. 2 m vor dem Einbruch, ist die Festigkeit des Grünsandsteines gering. Es treten lockere, mürbe und schwach bergfeuchte Abschnitte auf, in denen festere und härtere Partien eingeschaltet sind.

Der entstandene Graben wurde während der Sedimentation der Eibrunner Mergel wieder aufgefüllt, so daß nach Abschluß der Mergelablagerung die Störung kompensiert war (s. Abb.2; die Mächtigkeit des Eibrunner Mergels beträgt im Grabenbereich etwa 10 m). Der Grabeneinbruch erfolgte vor dem Absatz des Eibrunner Mergels.

Eine weitere Verwerfung kündigte sich etwa ab Station 465 m in der abnehmenden Gesteinsfestigkeit des Grünsandsteines und des im First- bzw. Kalottenbereich des Stollens anstehenden Eibrunner Mergels an. Der Sandstein wurde mürbe, bröckelig und locker bis rollig. Ein ausgeprägtes paralleles eng- bis mittelständiges quer zur Stollenachse verlaufendes Kluftsystem sowie kleinere Vertikalverschiebungen bis zu 0.60 m weisen auf tektonische Vorgänge hin. Während die Ortsbrust bei 490 m noch in stark durchbewegtem Grünsandstein und Eibrunner Mergel stand, lag sie nach dem nächsten Abschlag bei 492 m über dem gesamten Querschnitt in festem, dichtem, weißem bis weißgrauem Malmkalkstein. Die Verwerfung, die mit 110/85° SSW quer zur Stollenachse verläuft und wahrscheinlich sämtliche Schichtglieder der Winzerer Höhen erfaßt, liegt etwa bei 491 m (St₂, Abb.2). Die vertikale Sprunghöhe beträgt 4-5 m, wobei die südliche Scholle um diesen Betrag abgesunken ist. Durch diesen Abbruch wird nun bedingt, daß die Schichten ab 491 m, trotz der mit 1.2 % nach Nordosten ansteigenden Gradienten, nochmals in derselben Abfolge durchörtert werden wie zwischen 0 und 491 m.

Der aus den Kernbohrungen konstruierte Längsschnitt zeigte zwischen 440 und 480 m im gesamten Vertikalprofil einen deutlichen, auf eine Störung hinweisenden Schichtgrenzensprung. Die genaue Festlegung der Störung war aber schwierig, da der Längsschnitt Verzerrungen aufwies,

die darauf beruhten, daß die z. T. außerhalb der Tunneltrasse liegenden Kernbohrungen in die Trasse hineinprojiziert wurden.

Bei der geologischen Auswertung der Bohrungen wurde auch im Nordteil der Trasse eine Störung festgestellt. Beim Vortrieb des Stollens stellte sich heraus, daß dieser Abbruch der nördlichen Scholle nicht scharf verläuft, sondern schwach treppenförmig (Zerrungs- und Brucherscheinungen). Der Abbruchbereich, der sich über eine Länge von 65 m hinzieht, liegt zwischen Station 700 und 765 m (St₃, Abb. 2). Die gesamte vertikale Sprunghöhe beträgt ca. 3-6 m. Die im übrigen Teil des Stollens flach gelagerten Gesteinsschichten, sind auf der abgesunkenen Nordscholle um 3-5° nach Norden gekippt.

Mit Ausnahme einer kleinen Brucherscheinung zwischen Station 610 und 615 m (vertikaler Versetzungsbetrag ca. 2m) liegen in dem Gebirgsstock zwischen 491 und 700 m keine Anzeichen tektonischer Bewegungen vor. Dieser Mittelteil ist als Horst stehengeblieben, während die südliche und nördliche Scholle abgesunken sind.

5. Bergwasserführung

Der Malmkalkstein und der Grünsandstein sind in den im Stollen aufgefahrenen Bereichen trocken und frei von Bergwässern. Im Schichtkomplex des Eibrunner Mergels treten auf Trennflächen vereinzelt, besonders im oberen Teil feuchte bis nasse Stellen (Sickerwasser) auf; zirkulierende Bergwässer fehlen aber auch hier. Dagegen bildet die Schichtgrenze Eibrunner Mergel (Grundwasserstauer) - Reinhausener Schichten (Grundwasserleiter) einen wassertragenden Horizont (s. Abb. 2), der vom Aufschlußstollen aus an mehreren Stellen angebohrt und im nördlichen Stollenteil unmittelbar angefahren wurde.

Am Südatnachhang der Winzerer Höhen streicht der Wasserhorizont zutage aus. Dies wird durch eine Reihe von Quellaustrittsstellen dokumentiert. Einzelne stärker schüttende Quellen davon sind gefaßt und dienen der Wasserversorgung von Kager und Niederwinzer. Die Schüttungen der einzelnen Quellen wurden vom Straßen-Neubauamt Regensburg in dem Zeitraum zwischen April 1964 und September 1967 in monatlichen Abständen gemessen. Sie schwanken zwischen 0.04 und 0.50 l/sek.

Zwischen Station 766 und 890 m, dort also wo der wasserführende Bereich vom Stollen angeschnitten wird, trat das Wasser an vielen Stellen aus den Klüften des Reinhausener Kalksteines (Kluftwasser) und an der westlichen Ulme und Brusthälfte zwischen 870 und 890 m auch aus den dichtgelagerten Sanden teils als rinnendes Wasser, teils als Sickerwasser aus. Die Austrittsstellen sind hauptsächlich auf die untere Hälfte der Ulmen und der Stollenbrust beschränkt. Die zulaufende Wassermenge beträgt 0.05-0.30 l/sek. Die Wasserführung im geklüfteten Kalkstein ist stärker als im Sandbereich.

Im Februar 1967 wurde der Wasserhorizont auch bei Station 230 m im Aufbruchschacht angeschnitten. Das Wasser wurde in Plastikschläuchen abgeleitet. Die auslaufende Gesamtwassermenge (Umfang des angeschnittenen Bereiches: 14 m) betrug anfänglich 0.35 l/sek. Diese Menge verringerte sich im Laufe von 14 Monaten auf 0.17-0.20 l/sek.

Tabelle 2: Der Chemismus des im Reinhausener Kalkstein zirkulierenden Kluftwassers

Station	pH-Wert	Gesamthärte dGH	Karbonathärte dKH	Sulfate mg/l	Chloride mg/l
13 m Westulme	7.3	16.7	15.1	47	16
85 m First- bohrung	7.3	18.4	12.2	45	17
230 m First- bohrung	7.4	18.0	12.0	41	20
232 m Aufbruch- schacht	7.4	18.2	12.7	43	15
309 m First- bohrung	7.1	32.6	13.9	275	18
600 m First- bohrung	7.0-7.1	17.6	11.2	51	26
803 m Orts- brust	7.2	18.6	10.7	60	40
831 m Ostulme	7.2	18.8	11.5	60	30

Die wasserführende Zone wurde auch bei Firstbohrungen mehrmals angefahren. Bei Bohrlöchern mit 40 mm Durchmesser betrug die austretende Wassermenge 0.05-0.40 l/sek.

Zur Beurteilung der Beton-Aggressivität des in den Klüften des Reinhausener Kalksteines zirkulierenden Grundwassers ist die genaue Kenntnis des Chemismus erforderlich. Das Straßen-Neubauamt Regensburg ließ deshalb 8 Wasserproben, die im Aufschlußstollen an mehreren Stellen entnommen wurden, quantitativ chemisch, eine davon auch bakteriologisch, untersuchen. Die wichtigsten Ergebnisse sind in Tabelle 2 zusammengestellt.

Das Wasser weist Trinkwasserqualität auf. Es ist farblos, klar (kein Bodensatz) geruchlos und ziemlich hart und enthält weder Huminverbindungen noch überschüssige, aggressive Kohlensäure. Ammoniumverbindungen kommen, wenn überhaupt, nur in Spuren vor. Der Gehalt an organischen Substanzen ist minimal; die zu ihrer Oxydation notwendige Kaliumpermanganatmenge liegt unter 12 mg/l.

Auf Grund seiner chemischen Zusammensetzung kann das analysierte Kluftwasser nach neuesten betontechnischen Untersuchungen von LOCHER (1967) als "nicht betonangreifend" bezeichnet werden.

6. Stollentemperaturen

Vor dem Stollendurchstich im Nordteil lagen die Durchschnittstemperaturen bei Station 510 m (etwa Stollenmitte) bei einer Gebirgsüberlagerung von 57 m zwischen 11° und 13°C. Der jahreszeitliche Gang der Außentemperaturen blieb ohne wesentlichen Einfluß auf die Temperatur in Stollenmitte. Temperaturschwankungen zwischen 4 und 10°C traten erst auf, als der Stollen an beiden Mundlöchern geöffnet war.

Damit das Gebirge vor durch Temperaturschwankungen bedingten Spannungen möglichst verschont bleibt, wurde das nördliche Stollenmundloch im Dezember 1967 durch eine Stahlblechtüre verschlossen. Seitdem sind die Temperaturen in Stollenmitte wieder nahezu konstant. Sie liegen zwischen 9 und 12°C. Äußere Temperaturschwankungen wirken sich nur minimal aus.

7. Meßprogramm und Meßergebnisse

Die Abschätzung des bei Hohlrumbauteen auftretenden Gebirgsdruckes ist schwierig und problematisch. Die konventionelle Tunnelbautechnik stützt sich bei der Berechnung zur Bemessung der Auskleidungsstärken größtenteils auf Annahmen und Erfahrungswerte. Die moderne Tunnelbautechnik baut ihre Berechnungen zusätzlich auf Meßergebnissen auf, die bei Großversuchen gewonnen werden.

Durch genaue Messungen der in der Umgebung von Hohlräumen an repräsentativen Stellen des Gebirges als Funktion der Zeit auftretenden Verformungen und Drucke ist es besonders bei homogenem Gebirge möglich, die Auskleidungsstärken entsprechend des gewonnenen räumlichen Kräftebildes richtig zu bemessen. Kostspielige und unnötige Überdimensionierungen, aber auch zu schwache Bemessungen der Auskleidungsstärken können so vermieden werden.

Aus diesem Grunde wurde auch für das Projekt Tunnel Pfaffenstein ein Meßprogramm durchgeführt, das hier kurz erläutert wird. Einzelheiten über das Meßprogramm und die Meßmethoden können im Rahmen dieser Arbeit nicht behandelt werden.

Das Versuchsprogramm stand unter der Leitung eines Gutachtergremiums. Zur Durchführung des Programms wurde eine 24 m lange, im Querschnitt der späteren Tunnelröhre entsprechende Probestrecke aufgeföhren (s. Abb. 8).

Die Probestrecke wurde zwischen Station 200 und 224 m gelegt, da in diesem Bereich die geologischen Verhältnisse hinsichtlich der Ausbildung und Lagerung - Grünsandstein im unteren Teil, Eibrunner Mergel im oberen Teil - in etwa repräsentativ sind für einen größeren Streckenbereich der späteren Tunnelröhre.

Die beim Ausbruch der Probestrecke an der Tunnelaibung auftretenden Verformungen wurden mit Hilfe von 4 vorher in die Randzone der Tunnelröhre (Ulme, Kämpferbereich, Firste) eingebauten Deformationsindikatoren elektrisch gemessen.

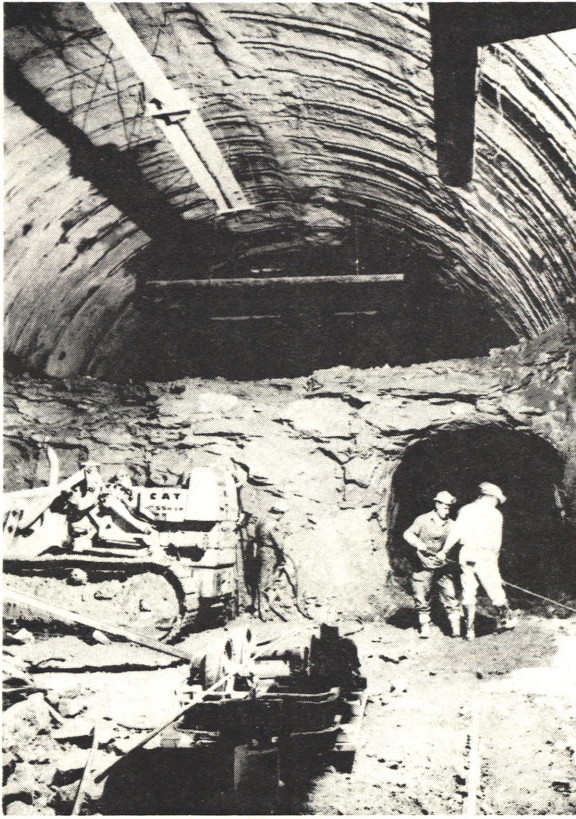


Abb. 8. Probestrecke (Querschnitt 82 m^2). Auf der Ostseite (rechte Bildseite) erkennt man den $7,50 \text{ m}^2$ großen Aufschlußstollen. Die Probestrecke ist im vorderen Teil bereits voll ausgebrochen und ausgebaut. Im hinteren Teil ist nur der Kalottenbereich (Eibrunner Mergel) ausgebrochen und gesichert, während die untere Tunnelhälfte noch im Grünsandstein steht.

Die Ermittlung der zwischen dem Gebirge und der Spritzbetonauskleidung wirksamen Radialdrucke und der im Spritzbeton auftretenden Tangentialdrucke erfolgte hydraulisch mittels Druckmeßdosen, die unmittelbar nach dem Ausbruch in regelmäßigen Abständen an der Laibung bzw. auf der ersten Spritzbetonschicht senkrecht zur Tunnelachse befestigt wurden.

Die Deformationsmessungen (= 4 je Meßquerschnitt und die Druckmessungen (= 20 je Meßquerschnitt; 10 für Radial- und 10 für Tangentialdruck) wurden in zwei 8 m voneinander entfernten Meßquerschnitten durchgeführt.

Die Deformationsmessungen wurden in dem Zeitraum zwischen Juli 1967 und März 1968 (Abschluß der Messungen) durchgeführt. Innerhalb dieses Zeitraumes betragen die zum Hohlraum hin gerichteten maximalen Deformationen im Firstbereich (Eibrunner Mergel) 55 mm, im Kämpferbereich (Eibrunner Mergel) 52 mm in radialer Richtung bzw. 21 mm in tangentialer Richtung und im unteren Bereich der Ulme (Grünsandstein) 1 mm.

Die Druckmessungen erfolgten zwischen September 1967 und März 1968 (Abschluß der Messungen). Die während dieser Zeit gemessenen Radialdrücke schwankten zwischen 0,2 - 8 kp/cm²; im Durchschnitt lagen sie jedoch zwischen 1-3 kp/cm².

Die Tangentialdrücke streuten zwischen 3 - 70 kp/cm²; ihre Durchschnittswerte lagen zwischen 10 - 50 kp/cm².

Im Kalottenbereich waren die Radial- und die Tangentialdrücke durchwegs höher als im Ulmenbereich.

Die Auswertung der Meßergebnisse, die bei der Fertigstellung des Manuskriptes im August 1968 noch nicht abgeschlossen war, ist in einem ingenieurgeologischen Aufsatz in den Erläuterungen zur Geologischen Karte 1:25 000, Blatt Regensburg Nr. 6938, zusammengestellt.

Literatur

- ALTINGER, L. : Die WESTUMGEHUNG Regensburg. - Verein Deutscher Ingenieure - Düsseldorf, VDI-Z. Bd.107 Nr. 33, 1573-1612, Düsseldorf 1965.
- LOCHER, F.W. : Chemischer Angriff auf Beton. - Betontechnische Berichte 1967/1, 17-19, 1967/2, 47-50, Beton-Verlag, Düsseldorf 1967.
- OSCHMANN, F. : Erläuterungen zur Geologischen Karte von Bayern 1:25 000, Blatt Nr. 7038 Bad Abbach, München 1958.