

Zeitschrift: Bulletin für angewandte Geologie

Herausgeber: Schweizerische Vereinigung der Petroleum-Geologen und –Ingenieure; Schweizerische Fachgruppe für Ingenieur-Geologie

Band: 1 (1996)

Heft: 2

Artikel: Ingenieurgeologische Beobachtungen beim Vortrieb des Habsburgtunnels

Autor: Rick, Beat

DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-219183>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 18.01.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Ingenieurgeologische Beobachtungen beim Vortrieb des Habsburgtunnels*

mit 7 Figuren

BEAT RICK¹⁾

Zusammenfassung

Der Habsburgtunnel durchörtert mit zwei parallelen, je ca. 1.54 km langen Röhren den sog. Wülpelsberg. Geotechnisch besonders heikel waren in der nördlichen Felsstrecke (mit Querung der Jura-Hauptüberschiebung) die tiefgründig verwitterten Gesteine des Keupers (alte Dolinen, fliessende Übergänge von Fels- zu Lockergesteinscharakter). In der mit einem offenen Schild aufgefahrenen Lockergesteinsstrecke führten v.a. mehrere Meter mächtige Sandlagen zu Vortriebsproblemen und zahlreichen Niederbrüchen. Die ingenieurgeologischen Tunnelaufnahmen zeigten ein differenziertes Bild der eiszeitlichen Hochterrassenschotter und dienten als Grundlage für die Diskussion von Lösungsansätzen für während dem Bau aufgetretene Fragestellungen (z.B. Injektionskonzept, Beurteilung der Standfestigkeit etc.).

Abstract

The motorway tunnel «Habsburgtunnel» with an overall length of about 1.54 km is part of the national highway N3. In this paper sedimentological as well as engineering geological observations during excavation are discussed. In its northern part the tunnel passed through triassic rock formations of the Tabular und the Folded Jura and therefore showed an excellent insight into the nature of the detachment zone (Jura-Overthrust). Related to a considerably deep local weathering in the gypsumiferous marls and shales of the Gipskeuper various geotechnical problems occur (e.g. sinkholes, gradual disintegration of the weathered lithology, ambiguities in the interpretation of the soil/rock boundary). More than 90% of the Habsburgtunnel had to be builded in glaciofluvial deposits called «Hochterrassenschotter». Sand layers with thickness over 6 meters caused to great difficulties during excavation by an open tunnel shield. Engineering geological observations set up the basic for discussion of the stability and possibilities of soil amplification (i.e. the selection of a suitable injection method).

1. Vorbemerkung

Im Herbst 1996 wurde die N3-Teilstrecke Frick-Birrfeld im Kanton Aargau dem Verkehr übergeben und damit eine weitere Lücke im Nationalstrassennetz geschlossen. Um die optimale Linienführung war in diesem Abschnitt aus politischen und naturwissenschaftlichen Gründen über Jahrzehnte gerungen und zuweilen mit heftiger Opposition gekämpft worden. Ausgehend von einer bereits 1958 vorgelegten Variante der eidgenössischen Planungskommission wurde zwischen Umiken/Brugg und Schinznach-Bad ein ganzes Variantenspektrum der Aaretalquerung studiert und das 1982 öffentlich aufgelegte Projekt bis zum Baubeginn 1988 weiter verbessert (z.B. Überdeckung im Bereich Schinznacherfeld, spezielle Schutzmassnahmen für die Therme Bad Schinznach). Die Dr. von Moos AG, die

* Erweiterte Fassung des Vortrags gehalten an der Tagung der Schweiz. Fachgruppe der Ingenieurgeologen in Bern am 20.9.95 «Geologie grosser Infrastrukturbauten»

¹⁾ Dr. von Moos AG, Bachofnerstr. 5, 8037 Zürich

im Eröffnungsjahr ihr 40-jähriges Bestehen feiern kann, war bereits von Anfang an an der 1958 beginnenden geologischen Bearbeitung diverser Linienführungen beteiligt, ab 1978 wurden schwergewichtig die hydrogeologischen und geotechnischen Fragestellungen beim Bau des Abschnittes Bözberg-Birrfeld bearbeitet. Von einigen interessanten ingenieurgeologischen Beobachtungen und Erfahrungen während der Baubegleitung des Habsburgtunnels soll in diesem Artikel berichtet werden. Allgemeine Hinweise zum technischen Projekt (Matter & Andraskay 1991) und eine geologische Übersicht der zu erwartenden Verhältnisse in den beiden Tunnelröhren sind bereits früher publiziert worden (Freimoser 1989; Freimoser & Rick 1991).

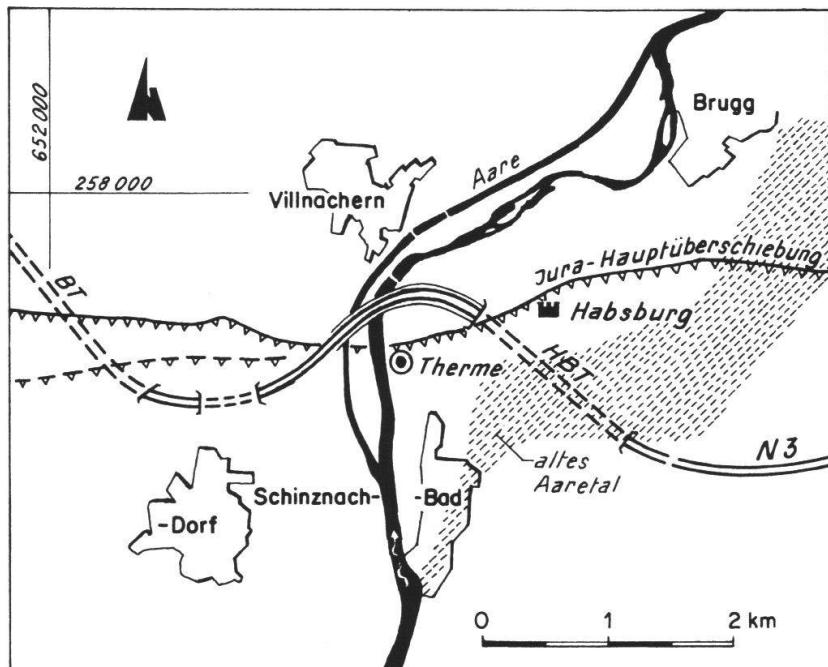


Fig. 1:
Situation der N3 im Bereich des Aaretals.
(HBT = Habsburgtunnel;
BT = Bözbergtunnel).

2. Geologische Übersicht

Im Anschluss an eine 1.3 km lange Brücke, welche in luftiger Höhe die Flusslandschaft der Aare überquert, führt der 1.540 km lange Strassenabschnitt des Habsburgtunnels mit zwei Tunnelröhren (Normalprofil Ø ca. 11.4 m) vom Aaretal auf die rund 70 m höher gelegene Ebene von Scherz-Lupfig hinauf. Bergmännisch wurden ca. 75% der Gesamtlänge aufgefahren (rund 350 m' Spritzbetonbauweise im Teilausbruch, rund 1890 m' Schildvortrieb). Im Süden schliesst eine Tagbaustrecke mit einer Baugrubenlänge von rund 400 m an (vgl. Figur 1).

Der Tunnel durchquert ein geologisch interessantes und vielfältiges Gebirge mit teilweise hydrogeologisch oder geotechnisch heiklen Verhältnissen (Stichworte: Schutz der Therme Bad Schinznach, sulfatführende Festgesteine mit Dolinen und tiefgründiger Verwitterung, Quellproblematik, sehr heterogene Lockergesteine). Im nördlichen Tunnelabschnitt mit konventionellem Vortrieb im Teilausbruchverfahren wurde der Bereich der Hauptüberschiebung des Falten- auf den Tafeljura bzw. dessen Vorfallenzone schön aufgeschlossen. Die Gliederung des Schichtstosses im Bereich der Habsburgstruktur und die im Tunnel aufgefahrenen Lithologien sind aus Figur 2 ersichtlich. Ein vereinfachtes Längenprofil des geologischen Befundes zeigt Figur 3.

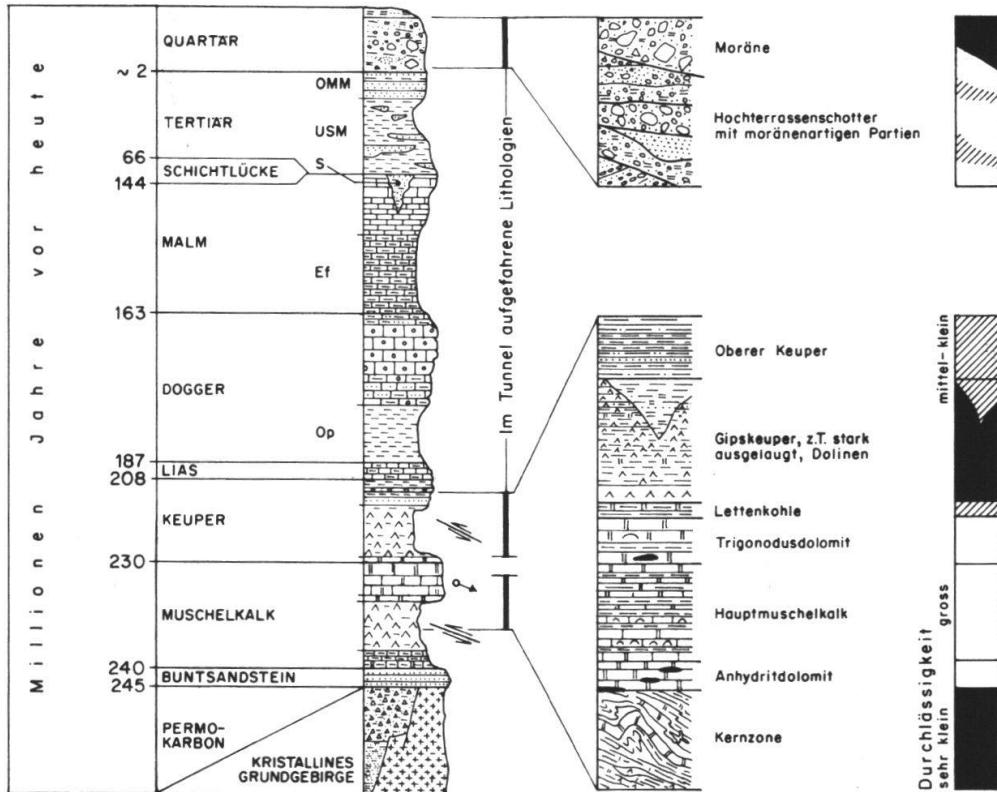


Fig. 2: Gliederung des Schichtstosses im Bereich der Habsburgstruktur mit Angabe der im Tunnel aufgefahrenen Abschnitte (OMM: Obere Meeressolasse, USM: Untere Süßwassermolasse, S: Siderolithikum, Ef: Effinger Schichten, Op: Opalinuston). Der obere Muschelkalk fungiert bei der Therme Bad Schinznach als Thermalwasserleiter; die Evaporite des mittleren Muschelkalks und des Keupers dienten als Abscherungshorizonte bei der Jurafaltung.

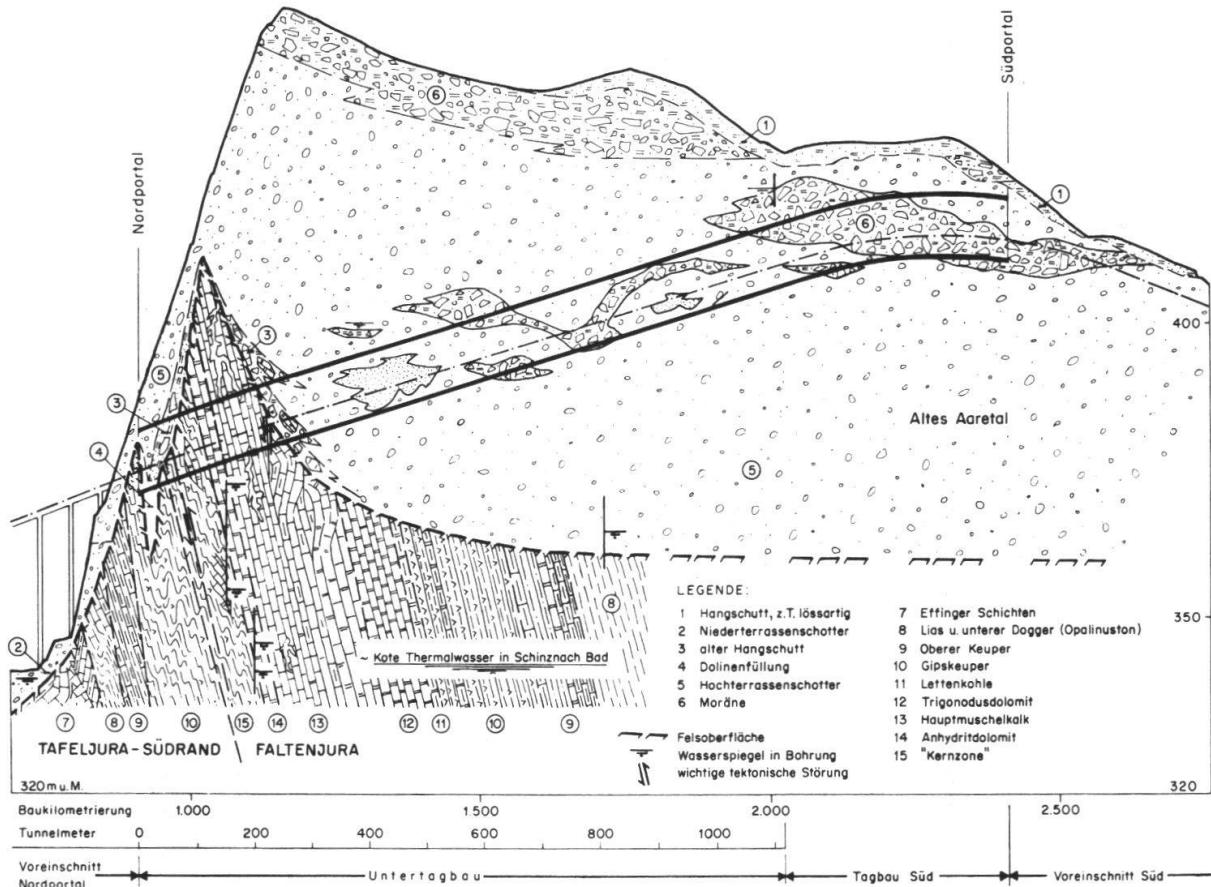


Fig. 3: Übersichtslängenprofil entlang dem Habsburgtunnel mit vereinfachtem geologischem Befund (10-fach überhöht).

3. Fels im Tunnelbereich

3.1 Nordportalbereich

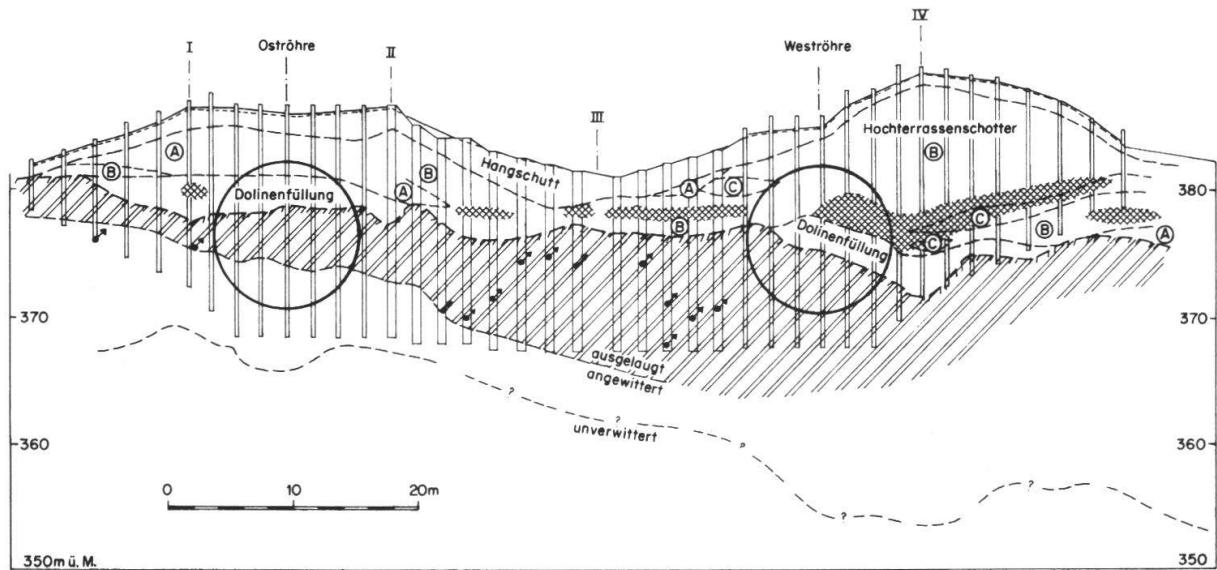
Obwohl in der Nordflanke des Wülpelsbergs, wie der Juraausläufer mit der stolzen Habsburg auch genannt wird, noch jüngere Gesteine anstehen, wurden im Tunnelprofil in der Felsstrecke nur triassisches Gestein durchfahren. Von den Felsgesteinen der Habsburgstruktur sind im Tunnel nämlich nur noch kleine Erosionsrelikte vorhanden, nur je ca. 10% der beiden Bergbautunnelröhren liegen vollständig im Fels (135 bzw. 90 Tunnelmeter), der Rest in gemischter Geologie, bzw. mehrheitlich im Lockergestein. Die letzten Felssreste der Habsburgstruktur tauchen in beiden Röhren nach 250 bzw. 260 m unter die Tunnelsohle ab.

Von Norden her kommend durchörtert der Habsburgtunnel zuerst die zerscherten und steilgestellten Schichten des **Tafeljura-Südrandes**. Es sind dies bunte, sandige Mergel des Oberen Keupers, denen sulfatführende, dolomitische Tone des Gipskeupers folgen. Infolge der starken Zerscherung und Klüftung nahe der Jura-Hauptüberschiebung konnte das Oberflächenwasser im sonst mehrheitlich dichten Gestein zirkulieren. Dabei wurde das Sulfat, welches ursprünglich als Anhydrit vorlag, in die wasserhaltige Varietät Gips umgewandelt und schliesslich tiefgründig ausgelaugt (vgl. Rick 1991). Lokal führte dies zur Ausbildung einer sehr unruhigen Felsoberfläche mit Hohlräumen und einer damit verbundenen, ausgeprägten Auflockerung der überlagernden Lockergesteine. Bereits bei den Voruntersuchungen wurde erkannt, dass im Tunnelbereich mit nachgebrochenem Fels und Lockergestein verfüllte Dolinen vorkommen. Einen Einblick in die geologischen Verhältnisse beim Nordportal vermittelt Figur 4.

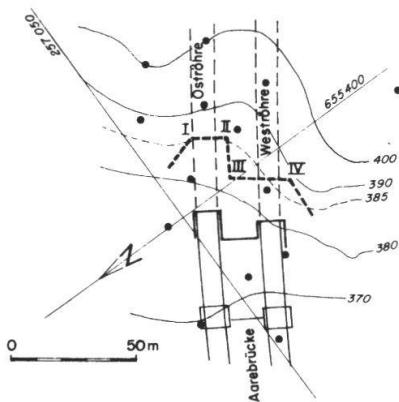
Der Vortrieb in diesem weichen, mehrheitlich stärker verwitterten Fels brachte keine nennenswerten Probleme. Grössere Bedenken entstanden jedoch bezüglich der Fundationsmöglichkeiten der Portale und des Betriebsgebäudes Nord im verwitterten Keuper-Fels. Die starke Verwitterung der tonig-mergeligen Schichtglieder, verbunden mit der erwähnten tiefgründigen Auslaugung in den sulfatführenden Gesteinen führte zur «Aufweichung» des Schichtverbandes und zu fliessenden Übergängen von fels- zu lockergesteinsähnlichem Verhalten dieser Schichten. Die Frage der Bedeutung und Darstellung der **Felsgrenze** in geologischen Profilen gab auch hier Anlass zu Diskussionen und bedarf bei der geotechnischen Umsetzung z.B. im Zusammenhang mit der Definition der Einbindetiefe von Pfählen der Interpretationshilfe durch den Ingenieurgeologen:

Aus geologischer und sedimentologischer Sicht kann die Felsoberfläche beim lithologischen Wechsel von Lockergesteinen (z.B. Hochterrassenschotter) zu Felsgesteinen mit erkennbarer Schichtung und Klüftung (z.B. Ton- und Siltsteinen der Keuperformationen) angesetzt werden. Mit der Grenzziehung assoziiert der Ingenieur jedoch gerne einen markanten Wechsel in den geotechnischen Eigenschaften, was hier zu Missverständnissen führen muss. Das Verwitterungsprofil im Fels, wie es u.a. durch Ausbildung und Ausmass der Auflockerungszone und/oder chemischer Veränderungen klassifiziert werden kann (vgl. Einsele et al. 1985; Rick 1991), ist bekanntlich lithologieabhängig und im Tiefgang lokal unterschiedlich. Die geotechnischen Eigenschaften (Stichworte u.a.: Scherfestigkeit, Elastizitätsmodul) sind jedoch über das Verwitterungsprofil nicht konstant und mit denen der unverwitterten Lithologie nachgewiesenermassen nicht identisch. Würde sich dieser Grenzbereich zwischen den geotechnischen «Endgliedern» Lockermaterial und Fels (vom Bauingenieur wird darunter normalerweise die unverwitterte Lithologie verstanden) - wie in vielen Fällen - auf höchstens wenige Dezimetern konzentri-

Abwicklung Baugrubenrückwand



Situation



Legende Profil

| | | |
|-----------------------------|---|--|
| Hochterrassenschotter - Typ | Ⓐ | Kiese und Kies-Sande mit siltig-tonigem Bodensatz verklebt |
| " | Ⓑ | saubere Kiese und Kies-Sande |
| " | Ⓒ | saubere Sande, oft sehr feinkörnig |
| ~~~~~ | | Felsoberfläche |
| ☒ | | calcatisch verkitte Partien |
| ↗ | | Wasseraustritt (Tropfwater) |

Legende Situation

| | |
|-------|-------------------|
| • | Bohrung |
| - - - | Baugrubenrückwand |

Fig. 4: Geologischer Befund im Bereich des Habsburg-Nordportales (Abwicklung der Baugrubenrückwand). Man beachte die tiefgreifende, unruhige Verwitterungszone. Die alten Dolinen, die mit nachgestürztem Material verfüllt sind, wurden in der Baugrubenrückwand randlich angeschnitten.

ren, so wäre dies wohl eher von akademischem Interesse als von praktischer Bedeutung. Im Falle der Felsgesteine des Keupers aber, wie sie im Nordportalbereich des Habsburgtunnels angetroffen wurden, schwankte die Tiefenlage des unverwitterten Fels auf kurze Distanz um mehrere Meter. Der unter der Felsoberfläche liegende Felsbereich, wo die Lithologie aufgelockert und durch ein feinmaschiges Netz von tektonischen und durch die Entspannung hervorgerufenen Trennflächen in feine Kluftkörper zerlegt ist (deshalb «lockergesteinsähnlich»), erreichte Mächtigkeiten von mehr als 10 Meter (vgl. Figur 4). Deshalb trat hier das auf den ersten Blick kurios anmutende Problem auf, dass die Pfählung bis weit unter die «Felsoberfläche», d.h. bis in den unverwitterten Fels geführt werden musste.

3.2 Jura-Hauptüberschiebung im Tunnelbereich

Ähnlich wie der Bözbergtunnel (Hauber 1994) durchquert auch der Habsburgtunnel den Bereich der Jura-Hauptüberschiebung. Dieser Bereich erwies sich in Boh-

rungen als stark gestört, verschuppt und ausgelaugt. Extrem starke Verfaltung der duktilen Schichten, interne Überschiebungen bis hin zu einer Verdoppelung der Schichtpakete in unmittelbarer Nähe dieser tektonischen Überschiebungsfläche sind auch aus der 10 km südlich gelegenen NAGRA-Tiefbohrung Schafisheim (Matter et al. 1988) sowie der 1996 abgetieften Geothermiebohrung Schinznach bekannt (Fehr 1996) und aufgrund geophysikalischer Untersuchungen zwischen Schinznach Bad und Baden postuliert worden (Gorhan & Griesser 1988). Was in Bohrungen und an der Oberfläche selten schön zu sehen ist, zeigte sich im Habsburgtunnel klar: Die Grenze zwischen Tafel- und Faltenjura ist im oberflächennahen Bereich der Habsburgstruktur, wie ihn der Tunnel durchörtert, nicht als deutlicher Schnitt ausgebildet. Vielmehr handelt es sich um eine relativ breit ausgebildete Zone (wir hatten sie schon in der Prognose «Kernzone» genannt) mit intensiv verfalteten Tonen, dolomitischen Mergeln, Sulfat - soweit dieses nicht bereits ausgelaugt ist - sowie einigen spröd deformierten, in grössere Falten gelegten oder eingespiessten Schichtpaketen mit Silex-führenden Dolomiten und dünnen, dolomitischen Ton-Zwischenlagen.

Auffallend ist die starke Deformation dieser Schichten (Überprägung der sedimentären Strukturen durch Deformationsstrukturen, mit sekundärem Gips verheilte Haarrisse, viele schichtparallele Gleitharnische in tonigen Schichten). Interessant ist in diesem Zusammenhang der röntgenographische Nachweis der feinkristallinen Quarzvarietät Cristobalit, die in den optischen Kennzeichen leicht mit Gips verwechselt werden könnte. Die Ausbildung dieses feinfaserigen Minerals als Zement zwischen deformierten Gesteinsklasten weist auf den Zusammenhang seiner Bildung mit der tektonischen Deformation dieser Gesteine im Bereich der Jura-Hauptüberschiebung hin (mündl. Mitt. R. Nüesch).

3.3 Faltenjura

Der durch den Habsburgtunnel aufgefahrene Schichtstoss des Faltenjura im Südteil der Habsburgstruktur ist vergleichsweise relativ einfach aufgebaut. Er besteht auf gut 100 Tunnelmetern im wesentlichen aus einer mächtigen, mit einer konstanten Neigung von 30-40° gegen Süden hin abfallenden Platte. Sie umfasst stratigraphisch die Einheiten des Anhydritdolomits und des Hauptmuschelkalks. In seiner Ausbildung wie seiner durchschnittlichen Mächtigkeit von 12 m entsprach der Anhydritdolomit den prognostizierten Verhältnissen und der regionalen Ausbildung (vgl. Matter et al. 1988). In Anlehnung an Merki (1961) waren in der Tunnelprognose der Trochitenkalk und der Plattenkalk noch einzeln ausgeschieden worden. Die Zusammenfassung der mehrheitlich kalkigen Serien zwischen den Dolomitsequenzen Anhydritdolomit im Liegenden und Trigonodusdolomit im Hangenden (in Bohrungen nachgewiesen, im Tunnel nicht mehr erreicht) unter der Bezeichnung Hauptmuschelkalk ist hier aber vorzuziehen. Zum einen unterscheiden sich die lithologischen Merkmale sehr wenig und das Kriterium der Grenzziehung (Häufigkeit von Mergelzwischenlagen) erweist sich bei den Tunnelaufnahmen (kein Anwitterungsprofil) als unzweckmässig. Zum andern hat diese Unterteilung geotechnisch keine Bedeutung und wurde von den Tunnelbauern kaum bemerkt. Die Kalke waren zwar meist gut geklüftet, einzelne Klüfte korrosiv aufgeweitet und im unteren Teil auch mit bis nussgrossen, drusigen Hohlräumen durchsetzt. Eine eigentliche Verkarstung und grössere kavernöse oder zusammenhängende Hohlräume, wie dies in den Prognosebohrungen angezeigt schien, wurden im Tunnelbereich jedoch nicht nachgewiesen.

In ihren jüngeren Anteilen enthielten die Kalke häufig tonig-mergelige Zwischenlagen, auf denen immer wieder polierte, tektonische Gleitflächen beobachtet wurden. In beiden Röhren wurde nach rund 90 m Tunnelvortrieb im sonst recht monoton südwärts fallenden Hauptmuschelkalk ein tektonisch intensiv gestörter und zerbrochener Felsbereich beobachtet mit starker Schichtverstellung und kleinen Faltenbildungen mit zerhacktem und abgescherterem Inversschenkel. Diese Zone ist demnach als «Faltenbildung» in der Habsburgstruktur zu verstehen, wobei die Falte - wie dies für den östlichen Faltenjuraausläufer nicht ungewöhnlich ist - nicht vollständig ausgebildet sondern durch eine Überschiebung abgelöst wird.

Aufgrund der im tieferen Felsuntergrund vorhandenen verschiedenen Gasmuttergesteine wäre ein Aufstieg von Kohlenwasserstoffen in die Habsburgstruktur theoretisch möglich. Die Gefahr, dass sich das im Normalfall nur in geringen Konzentrationen aufsteigende **Gas** in Fallen sammeln und zu explosionsfähigen Gemischen aufkonzentrieren könnte, ist bei den vorliegenden geologischen und strukturellen Verhältnissen jedoch als sehr gering eingeschätzt worden. In der Trias der NAGRA-Tiefbohrung Schafisheim wurden Ölimprägnationen und erhöhte Methanwerte beobachtet. Außerdem trat das giftige Gas Schwefelwasserstoff auf, das auch für die Muschelkalkwässer der Thermen von Baden und Bad Schinznach charakteristisch ist. In den Felsstrecken beider Tunnelröhren durch die Habsburgstruktur wurden jedoch weder Austritte von Kohlenwasserstoff noch von Schwefelwasserstoff registriert.

Bereits in frühen Planungsphasen wurde auf eine mögliche Gefährdung der **Therme Bad Schinznach** durch die Tunnelbauarbeiten der N3 hingewiesen, wobei das Risiko im Falle des Bözbergtunnels allgemein deutlich höher eingeschätzt wurde. Die Vortriebsarbeiten wurden im «kritischen» Felsbereich deshalb besonders intensiv hydrogeologisch begleitet. Ein durch den Experten der Schätzungskommision geleitetes, intensives und aufwendiges Überwachungsprogramm vor, während und nach den Tunnelbauarbeiten lieferte interessante Beiträge zum besseren Verständnis dieses Naturphänomens, der Therme Bad Schinznach. Das Thermalwasser, eine Mischung mehrerer unterschiedlich mineralisierter Grund- und Tiefenwässer, ist bezüglich seiner chemischen Zusammensetzung und seiner Temperatur grösseren, vermutlich auch klimatisch gesteuerten Schwankungen unterworfen (Ryf 1994). Eine Beeinflussung der Therme durch die Bauarbeiten wurde jedoch - wie erwartet - nicht festgestellt.

4. Hochterrassenschotter

4.1 Ausbildung und Beziehung zu Moränenlagen

Wie auf dem Längenprofil (Figur 2) ersichtlich, verläuft der Habsburgtunnel mehrheitlich im Lockergestein (Hangschuttbildungen, alte Dolinenfüllungen, Hochterrassenschotter). Den grössten und wesentlichsten Anteil unter den Lockergesteinen im Tunnel nehmen eiszeitliche Schotter ein. Diese sog. Hochterrassenschotter (inkl. vergesellschaftete Moränen) füllen hier ein **altes Aaretal** mit flacher Muldenform (ungefährer Verlauf Bahnhof Schinznach-Galgenhübel-Hausen-Windisch, vgl. Figur 1). Dessen Felsunterlage wurde unter dem Habsburgtunnel im Bereich der mutmasslichen Talachse bereits auf Kote 361 m ü.M. erbohrt, die aufgrund älterer Refraktionsseismik minimal um Kote 330 m ü.M. angenommene Felsoberfläche (Gorhan & Griesser 1988) scheint uns deshalb als eher zu tief angegeben. Der Grundwasserspiegel in diesen Lockergesteinen liegt min. 30 m unter Tunnelni-

veau, bzw. rund 77 m unter dem Schotterplateau von Scherz. Die aufgefahrenen Tunnelstrecken im Hochterrassenschotter (in beiden Röhren 850 bzw. 870 m³) waren deshalb zum überwiegenden Teil trocken. Die - im allgemeinen wenig ergiebigen- Tropfwasserstellen konzentrierten sich auf Obergrenzen von Moränenlagen oder an Stellen, wo durch Gebirgsauflockerung und/oder Niederbrüche über dem Firstbereich höher gelegene «Stauer» mit schwebenden Grundwassertaschen aufgebrochen wurden.

Unter der «Einheit» **Hochterrassenschotter** sind sehr unterschiedliche Schichten mit unruhigem Aufbau zusammengefasst, die gletschernah wahrscheinlich im Vorfeld des «riss»eiszeitlichen Reuss-Gletschers abgelagert und von diesem wieder überfahren wurden. Die ingenieurgeologischen Aufnahmen während dem Tunnelvortrieb mit offenem Schild bzw. in der Tagbaustrecke Süd erlaubten auf über 1.3 km Tunnelstrecke interessante Einblicke in die komplexe Entstehungsgeschichte dieser eiszeitlichen Schotter. Einige Punkte sollen nachfolgend kurz kommentiert werden.

In den Schotterfluren finden sich schräggeschichtete Kiese und Kies-Sande wechselnder Zusammensetzung (z.T. mit Fehlkörnungslagen), Rinnen und Linsen mit sauberen Sandlagen, aber auch beinharte Grundmoränen, verschwemmte Moränenlagen und eiszeitliche Seeablagerungen sowie sehr häufig Schotterlagen, die stark mit eingeschwemmten Feinanteilen durchsetzt sind, teils nur in Kornzwickeln, teilweise den Porenraum praktisch vollständig ausfüllend. Um in die Vielfalt der sedimentären Erscheinungen eine auch praktisch anwendbare Gliederung zu bringen, wurden die Lockergesteine bei den geologischen Aufnahmen im Tunnel aufgrund der Kornabstufung in sedimentär wie geotechnisch relevante Lithotypen zusammengefasst:

- Typ A: Kiese und Kies-Sande mit siltig-tonigem Bodensatz verklebt, gut bis undeutlich geschichtet
- Typ B: Saubere Kiese und Kies-Sande, oft gut geschichtet
- Typ C: Saubere Sande, oft sehr feinkörnig, teils fein geschichtet
- Typ S: Tonige Silte bis siltig-tonige Sande, sehr fein geschichtet, teils warvenartig
- Typ M: Matrixgestützte Kies-Sande, schlecht gerundet, ohne erkennbare Schichtung (Moräne)

Vorkommen von praktisch sauberen, d.h. feinanteilfreien Schotter-Typen wie Kiese und Kies-Sande mit Steinen, sowie Linsen und Bänke von oft feinkörnigem Sand bereiteten beim Tunnelvortrieb etliche Mühe. Weitaus am meisten vertreten war jedoch der sog. Typ A «mit Feinanteilen durchsetzte Kies-Sande». Dieser Typ enthält auch lokal vorkommende, in lehmiger Matrix eingeschlossene Blocklagen. Normalerweise ist in diesem Lithotyp eine Schichtung sichtbar, wenn auch zuweilen nur noch andeutungsweise. Mit zunehmender Nähe zu Moränenlagen wird die Schichtung verwischt und der Porenraum zwischen den Kieskörnern praktisch vollständig durch Feinanteile ausgefüllt. Ebenso sind Übergänge zu verschwemmt Moräne festzustellen, was die gletschernah Bildung dieser Lockergesteine unterstreicht. Durch Calcitbrücken zu Nagelfluh verkittete Kiesnester waren nur gelegentlich zu beobachten. Die meisten Hinweise der Tunnelbauer auf «verkittete Schichten» erwiesen sich als mit einem lehmigen Bodensatz verklebte Schichten (Typ A). Dieser siltig-tonige Bodensatz klebt in den Kornzwickeln und kann als Infiltrat von Gletschermilch in eine Sanderflur gedeutet werden. Einen Eindruck der schnellen Wechsel der Lithotypen vermittelt Figur 5.

Als eigentliche Moränenlagen konnten matrixgestützte Lockergesteine ausgeschieden werden, bei denen keine interne Schichtung mehr erkennbar ist und wo

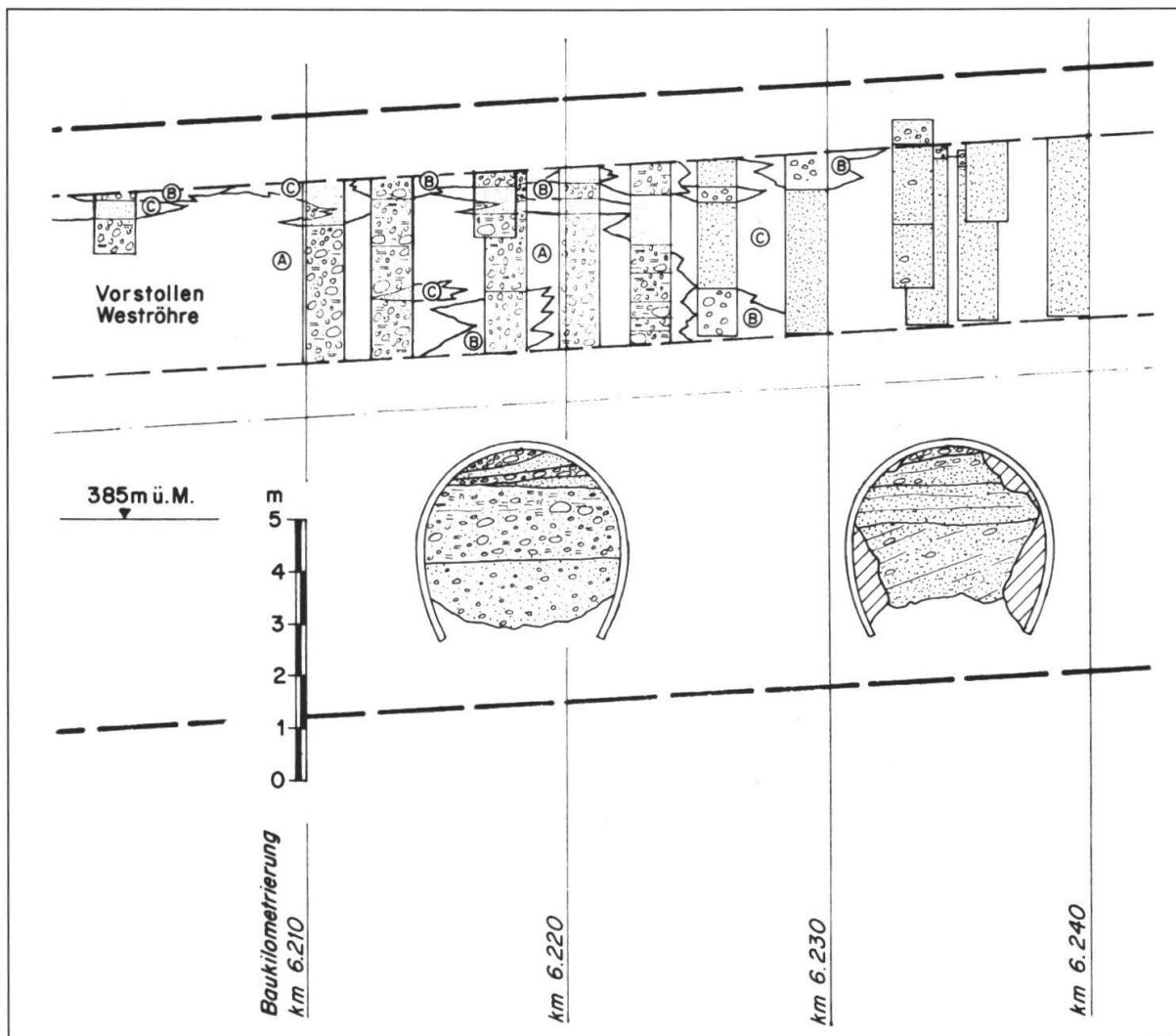


Fig. 5: Ausschnitt aus dem geologischen Befund im Vorstollen der Weströhre.

die Kieskomponenten gegenüber dem Hochterrassenschotter-Typ A einen deutlich schlechteren Rundungsgrad aufweisen. Harte Grundmoränen, wie sie in beiden Röhren auf den letzten 250 m vor dem Bergbauportal und in der Tagbaugrube Süd schön aufgeschlossen waren, runden das Spektrum der glazialen Ablagerungen ab. Im Bereich von stauenden Moränenlagen waren lokal auch feinkörnige, silig-tonige Sande mit feiner bis warvenartiger Schichtung zu beobachten (Typ Seeablagerungen). Dabei handelt es sich wohl um unter Wasser deponierte Ablagerungen, wobei die Wasserflächen durch Moräne und/oder Eisreste aufgestaut werden sein könnten. Einstreuungen von kiesigem, verschwemmt Moränenmaterial zeugen auch hier von der nahen Lage des Gletschers.

Eine Aussage über das Alter der Moränenlagen ist schwierig; Funde von Holz oder Knochenreste, die eine Datierung des Schichtstosses erlauben würden, liegen aus dem Habsburgtunnel nicht vor. Im Bereich des Südportals ist eindeutig ein Moränenstand dokumentiert. Bekannt ist durch Moränenlagen an der Oberfläche ebenfalls ein späterer Vorstoss bis gegen das Aaretal, aber auch ältere Vorstösse innerhalb der Hochterrassenschotter sind im Tunnel nachgewiesen. Alle diese Moränenablagerungen liegen ausserhalb des letzteiszeitlichen Maximums mit den Wallmoränen bei Mellingen (vgl. Dick et al. 1996).

Im Tunnel konnten wir **glazialtektonische Deformationen** der Lockergesteine ähnlich den früher in der nahen Kiesgrube Götschel (Strasse Schinznach-Birr) aufgeschlossenen Verhältnissen beobachten. Typischerweise treten falten- und schlierenartige Stauchungs- und kleinmassstäbliche Abscherungsscheinungen auf. Zweifellos war zu ihrer Bildung ein komplexes Zusammenwirken verschiedenster Faktoren notwendig; zur Ausbildung von «plastisch» deformierten Kieslinsen dürften infolge Permafrostbedingungen gefrorene Lockergesteinskörper einen wesentlichen Beitrag liefern (Schindler et al. 1978), aber auch mit Toteis zusammenhängende Phänomene könnten lokal eine Rolle spielen.

4.2 Bautechnische Erfahrungen

Der Vortrieb in den Hochterrassenschottern bereitete den Tunnelbauern zeitweise grosse Mühe, Fehlschläge fanden schnell ihren Nachhall in der Tagespresse. Die ersten Probleme traten beim Erstellen des Jettinggewölbes im Nordportalbereich mit der Säulengeometrie auf (Durchmesser sehr variabel und meist erheblich kleiner als erwartet, Bohrgenauigkeit auf die 16 m langen Jet-Bohrungen ungenügend). Das mangelhafte Gewölbe und Ortsbrustinstabilitäten führten zu Niederbrüchen und schliesslich zu einem Tagbruch (Beusch 1991).

Die Felsstrecke wurde im Sprengvortrieb problemlos gemeistert. Am 2.4.90 begann der Vortrieb mit einem offenen Schild in der Oströhre (zeitraubender Felsabbau, langsamer Vortrieb in gemischter Geologie). Besonders grosse Probleme stellten sich beim Durchfahren feinkörniger, trockener Sandrinnen ein. Diese waren zuerst nur meterdick, machten dann auch bis zur Hälfte des Tunnelprofils aus (vgl. Fig. 2) und waren in dieser Mächtigkeit bei den Voruntersuchungen nicht angetroffen worden. Die Stabilitätsprobleme in diesen Sandlagen konnten auch durch Kunstharzinjektionen nicht wesentlich entschärft werden und kulminierten nach mehreren Niederbrüchen in einem Einbruch von rund 600 m³ Gesteinsmaterial mit vorläufigem Schildstillstand.

In der Folge wurde beschlossen, in beiden Röhren je einen Vorstollen bis in «standfeste Geologie» (d.h. Schotter mit höherem Anteil an moränenartigen, bzw. mit silig-tonigen Feinanteilen verklebten Schichten des Typs A) vorzutreiben, von dem aus durch Injektionen der Baugrund verfestigt werden sollte. Der Schildvortrieb konnte anschliessend wieder aufgenommen und im Durchlaufbetrieb bis zum Südportal ohne vergleichbare Vortriebsschwierigkeiten - auch in Abschnitten ohne Vorstollen - bewerkstelligt werden. Ganz anders waren die «Probleme» beim Tagbau Süd in den Hochterrassenschottern: Dank der hier auftretenden Dominanz von moränenartigen Schotterlagen und echten Grundmoränen war hier die Standfestigkeit kein Thema. Die einhellige Freude über den geotechnisch gutartigen Baugrund wurde jedoch durch die schlechtere Vermarktbarkeit des Aushubmaterials etwas getrübt. Auch beim Habsburgtunnel musste erfahren werden, dass uns die Natur selten den Gefallen tut, dass bindiger Feinanteil gerade ausreichend vorhanden ist, sodass die Standfestigkeit genügend hoch, die Verklebung (bzw. der Abbauwiderstand) jedoch so klein ist, dass das Material leicht abgebaut werden kann. Oft genug erforderten beim Vortrieb des Tunnels in den Hochterrassenschottern harte Moränenlagen den Einsatz von hydraulischen Abbauhämmern, während darüber liegende rollige Kiese und Sande stabilisiert werden mussten.

Oft röhren Schwierigkeiten im Tunnelbau von misslichen Wasserverhältnissen her. In dieser Beziehung ist die Situation beim Habsburgtunnel recht günstig. Sowohl

im Felsbereich wie in den Hochterrassenschottern liegt der Bergwasserspiegel deutlich unter Tunnelniveau. Es überrascht deshalb nicht, dass sich der Tunnel auf weite Strecken als praktisch trocken erwiesen hat. Die Ergiebigkeit auch der grössten «Quellen» lag immer weit unter einem Minutenliter. Lediglich im September 1990 entleerte sich in der Oströhre eine über dem Tunnel gelegene Wassertasche murgangartig und füllte den Schild mit ca. 120 m³ schlammig-kiesigem Material ein. Gipshaltiges, betonaggressives Tropfwasser tritt - wie erwartet wurde - im Felsbereich auf (Kernzone und Gipskeuper). Mineralisiertes Wasser, das mit dem Bad Schinznacher Thermalwasser in Zusammenhang gebracht werden könnte, wurde jedoch nicht festgestellt.

5. Umsetzung des geologischen Befundes

Überraschungen sind beim bergmännischen Tunnelbau wohl nie restlos zu vermeiden: Die Datendichte auf Tunnelniveau ist naturgemäß unausgeglichen und die Sondierungen müssen sich auf die wesentlichsten Problemzonen konzentrieren (im Fall Habsburgtunnel stand die Frage eines optimalen Schutzes der Therme Bad Schinznach projektmässig und politisch im Vordergrund). So standen bei Baubeginn aus den Vorabklärungen für den Felsbereich 16 Bohrungen im Nahbereich des Tunnels zur Verfügung, während für die 8x längere Lockergesteinsstrecke gerade noch die Hälfte an Bohrungen genügen musste. Durch die detaillierte geologische Begleitung des Tunnelvortriebs konnte aber neben einer Verifizierung des Baugrundmodells auch eine laufende Verfeinerung der geotechnischen Grundlagen für während dem Bau auftretende Fragestellungen bereitgestellt werden.

Deutlich wurde beim Vortrieb in den Hochterrassenschottern einmal mehr die Schwierigkeit der Umsetzung der ingenieurgeologischen Grundlagen aus den Voruntersuchungen auf bautechnisch interessierende Fragestellungen wie z.B. Standfestigkeit, Stabilität der Tunnelbrust, Vortriebsleistung, Injzierbarkeit etc. Auch die Problematik der Interpretation von Kornverteilungen aus Kernbohrungen in bezug auf den Feinanteilgehalt und daraus abgeleitete geotechnische Annahmen wurde wieder einmal evident. Figur 6 zeigt die **Kornverteilungen** verschiedener Lithotypen in den Hochterrassenschottern. Deutlich wird am Beispiel des häufigsten Typs, der ohnehin den höchsten natürlichen Feinanteilgehalt hat, der grosse Unterschied in der Beurteilung der Kornverteilung aus Bohrproben und den Verhältnissen in-situ. Leider entzieht sich diese Differenz einer Korrekturmöglichkeit; der Unterschied im Feinanteilgehalt ist nämlich nicht nur von der Lithologie, sondern auch von im Einzelnen nicht quantifizierbaren Faktoren wie Bohrtechnik, Erfahrung des Bohrmeisters, Kerndurchmesser etc. abhängig.

Bis letztlich ein Stabilisierungskonzept (Matter & Waldmeyer 1995) in den sehr heterogen aufgebauten, glazial vorbelasteten Hochterrassenschottern erfolgreich durchgeführt werden konnte, waren etliche Fragen bezüglich Wahl des Injektionsmittels, Injektionskonzept, Auswahl von Versuchsstrecken etc. in enger Zusammenarbeit von Bauherr, Injektionsspezialisten, Geologe und Projektingenieur zu klären. Die detaillierten geologischen Aufnahmen in den Vorstollen bildeten u.a. die Grundlage für die Abgrenzung von **Injektionsbereichen**, in denen der Injektionsfärcher der Lithologie angepasst wurde. Dabei galt es vordringlich Bereiche mit grossem Sandanteil zu verfestigen. Im Habsburgtunnel konnten in-situ Vorversuche durchgeführt werden, was sich sehr bewährte: Die Injektionsbereiche aus dem Vorstollen der Weströhre wurden in Sondierschlitten ausgegraben und bezüglich Ausmass und Wirkung der Verfestigungsmittel beurteilt (Figur 7). Die Qualität

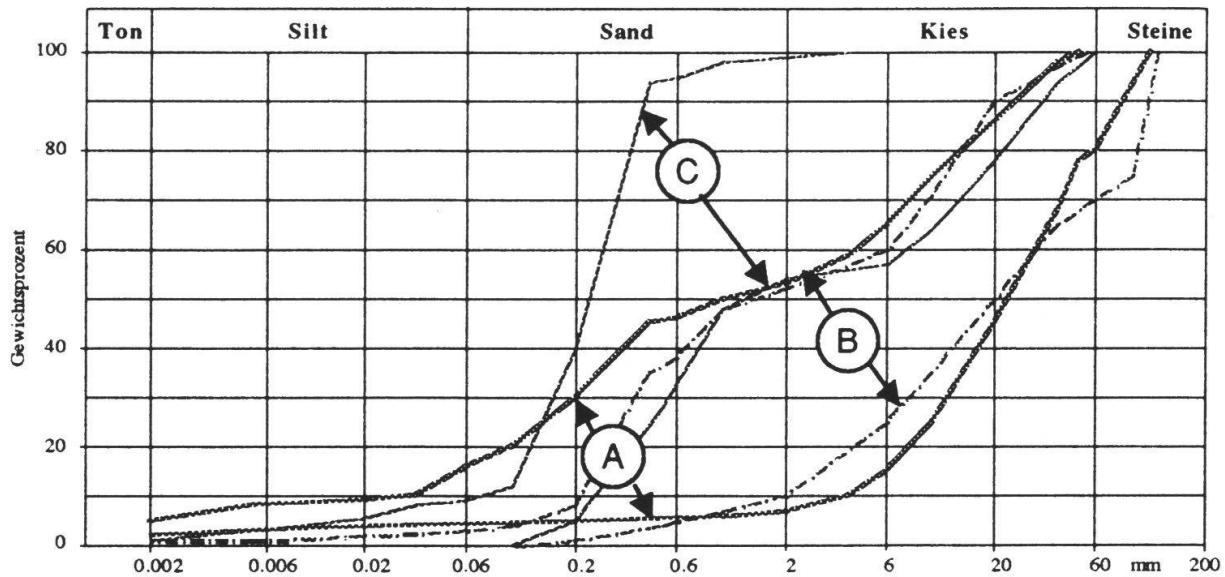


Fig. 6a

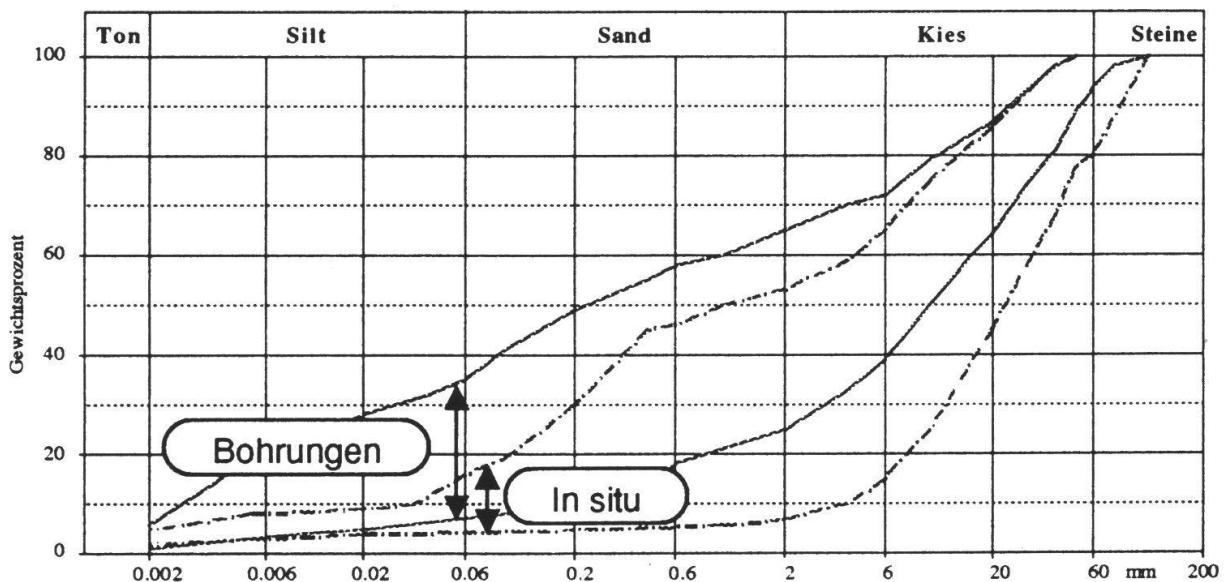


Fig. 6b

Fig. 6: Kornverteilungsspektrum in den Hochterrassenschottern.

6a: Korngrößenbereiche verschiedener Lithotypen (alle Proben in-situ aus dem Tunnelausbruch),

Typ A: Kies-Sande mit Steinen, mit siltig-tonigem Bodensatz verklebt

Typ B: saubere Kies-Sande mit Steinen

Typ C: saubere Sande

6b: Vergleich der Kornverteilung im Lithotyp A:

Proben aus Bohrungen (Voruntersuchungen) bzw. Entnahme in-situ während Vortrieb.

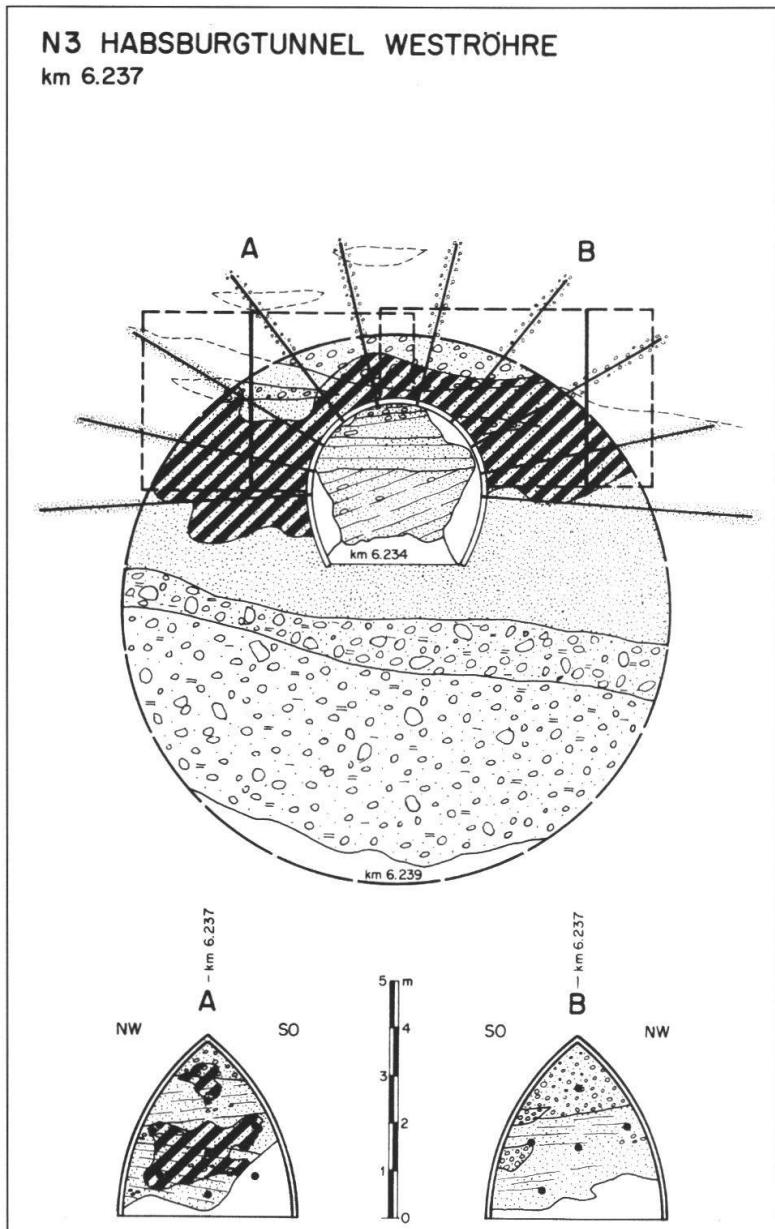


Fig. 7:
Geologischer Befund im Bereich der Injektionsversuche aus dem Vorstollen der Weströhre. Die Injektionsbereiche der Vorversuche (km 6.237) wurden in quer zur Vortriebsrichtung stehenden Stollen ausgegraben und die injizierten Bereiche (schraffiert) je Injektionsmittel beurteilt (Brustbilder in den Positionen A und B); nach Ausführung der Hauptinjektionen wurden beim nachfolgenden Schildvortrieb die Geologie und das Ausmass der Injektionen im Ausbruchquerschnitt aufgenommen.

der zu erwartenden Resultate konnte so vor Ort überprüft und der Injektionsraster auf die örtlichen Gegebenheiten abgestimmt werden. Mit Blick auf den Grundwasserschutz war natürlich auch der Aspekt der Umweltverträglichkeit zu beachten. Hier bot der Spezialzement Micron-S, der schliesslich zum Einsatz kam (Siliziumrauch und micronisierter Kalk, Maximalkorn 8μ), gegenüber Silikatgel (trotz guter Verfestigung) oder Kunstarzen eindeutige Vorteile.

6. Schlussbemerkung

Erfolg oder Misserfolg einer Vortriebsmethode hängen vom Zusammenspiel diverser - bei weitem nicht nur geologischer - Faktoren ab. Bei der Bewertung der Einflussgrösse «Geologie» in der bautechnischen Umsetzung durch Projektverfasser und Unternehmung ist ein intensiverer Dialog mit dem Ingenieurgeologen

während allen Projekt- und Ausführungsphasen erstrebenswert (Frage des Interpretationspielraumes, Prognostizierbarkeit von kritischen Schichten). Gerade in schwierigen geologischen Verhältnissen zeigt es sich, dass die enge Zusammenarbeit aller am Bau beteiligten Planer, Spezialisten und Mineure sowie die allseitige Bereitschaft, den jeweiligen Befund direkt wieder in eine angemessene Bauweise umzusetzen, letztlich zu einem erfolgreichen Abschluss der Tunnelbauarbeiten führen.

Verdankungen

Dem Baudepartement des Kantons Aargau sei für die freundliche Erlaubnis zur Veröffentlichung dieser Resultate, dem geotechnischen Büro Dr. von Moos AG für die interessante Arbeit und die Unterstützung der Publikation herzlich gedankt.

Literatur

- BEUSCH, E. 1991: Anwendung des Jetting beim Tunnelbau. SIA-Dokumentation D074; unveränderter Nachdruck in Mitt. Schweiz. Ges. Boden- und Felsmechanik Nr. 123, 69-75.
- DICK, K.A., GRAF, H.-R., MÜLLER, B., HARTMANN, P. & SCHLÜCHTER, CH. 1996: Das nordalpine Wasserschloss und seine eiszeitgeologische Umgebung. Eclogae geol. Helv. 89/1, 635-645.
- EINSELE, G., HEITFELD, K.-H., LEMPP, CH. & SCHETELIG, K. 1985: Auflockerung und Verwitterung in der Ingenieurgeologie: Übersicht, Feldansprache, Klassifikation. In: Ingenieurgeologische Probleme im Grenzbereich zwischen Locker- und Festgestein (Ed. by Heitfeld, K.-H.). Springer, Berlin, 2-23.
- FEHR, A. 1996: Geothermieprojekte in der Schweiz. Geothermie Nr. 2/96, 2.
- FREIMOSER, M. 1989: Zur Geologie des Habsburgtunnels. N3-Info Nr. 5, April 1989.
- FREIMOSER, M. & RICK, B. 1991: Geologie des Habsburgtunnels. SIA-Dokumentation D074; unveränderter Nachdruck in Mitt. Schweiz. Ges. Boden- und Felsmechanik Nr. 123, 55-60.
- GORHAN, H.L. & GRIESSER, J.C. 1988: Geothermische Prospektion im Raum Schinznach Bad - Baden. Beitr. geol. Schweiz, Geotech. Ser. 76.
- HAUBER, L. 1994: Die Geologie des Bözbergtunnels der Nationalstrasse N3. Brugger Neujahrsblätter 104, 85-104.
- MATTER, A., PETERS, Tj., BLÄSI, H.-R., SCHENKER, F. & WEISS, H.-P. 1988: Sondierbohrung Schafisheim, Geologie. Bundesamt für Umweltschutz, Landeshydrologie und -geologie, Geol. Ber. Nr. 8.
- MATTER, J. & ANDRASKAY, E. 1991: Habsburgtunnel: Projektkonzept. SIA-Dokumentation D074; unveränderter Nachdruck in Mitt. Schweiz. Ges. Boden- und Felsmechanik Nr. 123, 61-67.
- MATTER, J. & WALDMAYER J.P. 1995: Stabilisierungskonzept im Habsburgtunnel. SIA 1995/8, 189-192.
- MERKI, P. 1961: Der obere Muschelkalk im östlichen Schweizer Jura. Eclogae geol. Helv. 54/1, 137 -220.
- RICK, B. 1991: Geotechnische und hydrochemische Folgen der Verwitterung sulfathaltiger Gesteine (Gipskeuper des Schweizer Jura). Beitr. geol. Schweiz, Geotech. Ser. 80.
- RYF, W. 1994: Thermen auf dem Prüfstand. N3-Info Nr. 15, Februar 1994.
- SCHINDLER, C., RÖTHLISBERGER, H. & GYGER, M. 1978: Glaziale Stauchungen in den Niederterrassen-Schottern des Aadorfer Feldes und ihre Deutung. Eclogae geol. Helv. 71/1, 159-174.