

# Die geologisch-ingenieurgeologischen Verhältnisse beim Vortrieb des Meisterntunnels Bad Wildbad/Schwarzwald

Ralf J. Plinninger<sup>1</sup>

## Zusammenfassung

In den Jahren 1994 bis 1996 wurde als Teilsortsumfahrung der Kurstadt Bad Wildbad im Schwarzwald der insgesamt 1684 m lange Meisterntunnel vorgetrieben. Der NÖT-Vortrieb durchörterte in seiner gesamten Länge klastische Sedimentfolgen des Perms, die bis dahin im Untersuchungsgebiet kaum aufgeschlossen waren. Die im Auftrage der bauausführenden ARGE dokumentierten geologischen Verhältnisse ließen eine erstmalige, detaillierte Beschreibung der lokalen permischen Ablagerungsfolge zu. Die damit verbundenen ingenieurgeologischen Untersuchungen ergaben ebenfalls neue Erkenntnisse zur Bohr- und Fräsbarkeit klastischer Sedimentgesteine.

## Abstract

In 1994 to 1996 the 1684 m long „Meisterntunnel“ was built as a traffic bypass for Bad Wildbad, a health resort located in the Northern Blackforest. The tunnel was driven using the NATM. Throughout the tunnel's total length the excavation-works encountered clastic permian sediments, that were only little known before. The geological documentation of the situation during the advance work allowed for the first time a detailed description of the local permian stratigraphic sequence. The geotechnical research has also led to some new findings referring to the drillability of clastic sediments and their excavation with roadheaders.

## 1 Einführung: Projekt „Meisterntunnel Bad Wildbad“

Der Thermalkurort Bad Wildbad, der auf eine über 600 Jahre alte Kurtradition zurückblicken kann, liegt im Herzen des Nordschwarzwaldes, etwa eine halbe Autostunde südlich von Pforzheim (Baden-Württemberg). Die Enge des rund 300 m tief eingeschnittenen Enztales führt dazu, daß im Ort selbst die Interessen von Individualverkehr und ruhesuchendem Kurgast auf engstem Raum kollidieren. Zur Verbesserung des Kurambientes wurde bereits in den frühen 60er Jahren das Konzept einer immissionsverringenden Teilsortsumfahrung geboren, für die 1991 die Planfeststellung abgeschlossen werden konnte. Die im September 1994 begonnenen Vortriebsarbeiten für den 1338 m langen Hauptabschnitt in bergmännischer Bauweise konnten schließlich Ende 1996 abgeschlossen werden. Der Anfang Juni 1997 dem Verkehr übergebene, zweispurige „Meisterntunnel“ umfährt heute den Kurort in einer insgesamt 1684 m langen, S-förmigen Schleife (siehe auch Abbildung 1).

Tabelle 1: Wichtige Projektdaten des Meisterntunnels in Kurzform.

Übersicht	Meisterntunnel/Bad Wildbad
Zweck	Ortsumfahrung der L 350
Länge	1684 m, davon 1338 m in bergmännischer Bauweise
Vortriebsweise	Neue Österreichische Tunnelbauweise in konventionellem Bohr- und Sprengvortrieb. Fräsvortrieb in Probestrecken
Ausbruchsquerschnitt	Kalotte ca. 45 m <sup>2</sup> , Größter Gesamtquerschnitt (Lüfterkaverne) bis 140 m <sup>2</sup>
Bauzeit (Vortrieb)	September 1994 bis Oktober 1996
Bauherr	Stadt Bad Wildbad (mitfinanziert durch Bund und Land Baden-Württemberg)
Planung	ILF Beratende Ingenieure, München
Bauausführung	Arbeitsgemeinschaft Entlastungstunnel Bad Wildbad: Beton- und Monierbau, Heitkamp, Stetzler Ingenieur- und Tiefbau

<sup>1</sup>Dipl.-Geol. R.J. Plinninger, Lehrstuhl für Allgemeine, Angewandte und Ingenieur-Geologie, Technische Universität München, Lichtenbergstr. 4, 85747 Garching, Tel. 089/2891-3171 Fax -3168

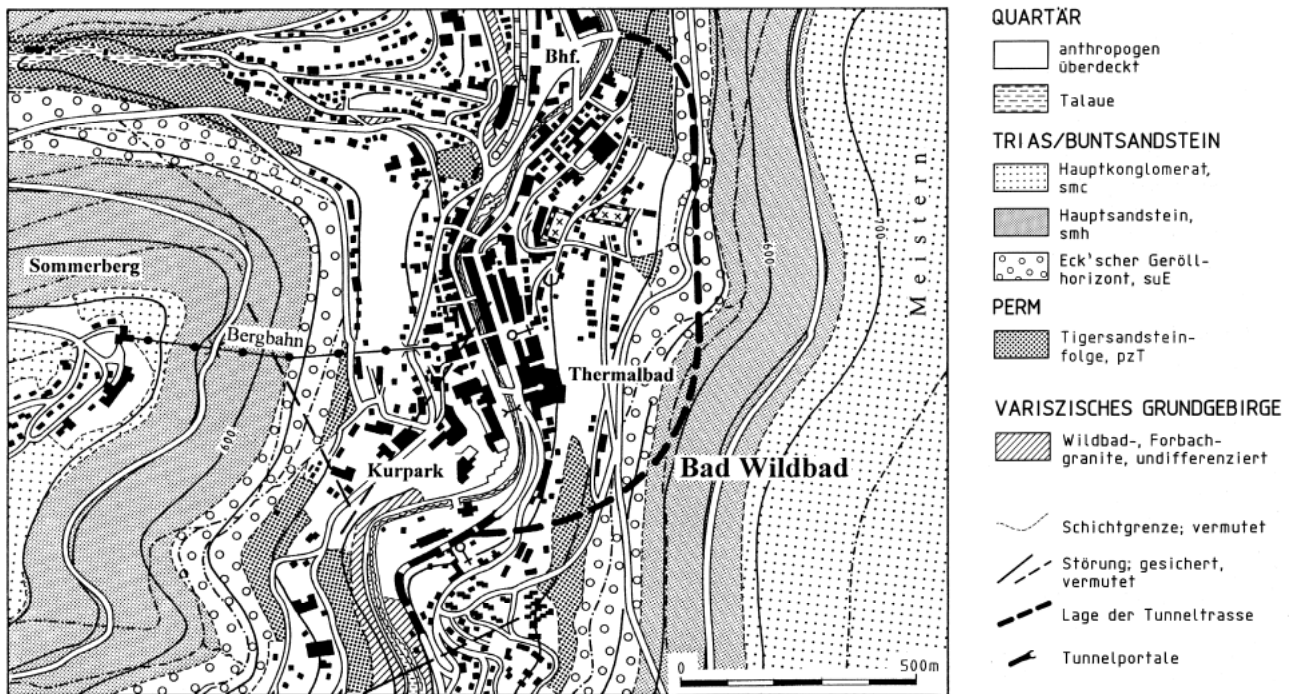


Abbildung 1: Geologische Übersichtskarte von Bad Wildbad mit der Lage des Meisterntunnels (umgezeichnet nach PLININGER, 1997)

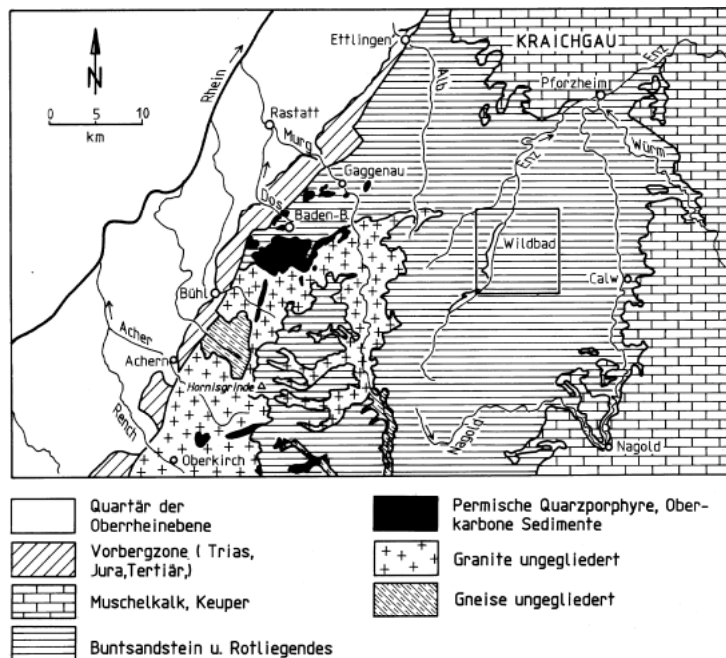


Abbildung 2: Geologisch-petrographische Übersichtskarte des nördlichen Schwarzwalds (umgezeichnet nach: METZ, 1977, Abb. 3, S. 13).

## 2 Geologisch-geographischer Überblick

Die Übersichtskarte (Abb. 2) veranschaulicht die Lage Bad Wildbads im geologisch auch als „Buntsandsteinschwarzwald“ bezeichneten, östlichen Teil des Nordschwarzwalds. Die ursprünglich vermutlich bis zum Malm reichende Schichtfolge wurde im Raum Wildbad seit der Kreide erodiert. Die heute ausgeprägt eben verlaufende Hochfläche der Enz-Nagold-Höhen verdankt ihre Entstehung zum einen der leichten Erodierbarkeit der überwiegend tonig-schluffigen Ablagerungen des oberen Buntsandsteins (Röt), zum anderen den überaus verwitterungsresistenten Sandsteinen des Hauptkonglomerats (smg) des mittleren Buntsandsteins. Im Untersuchungsgebiet selbst fehlen die Schichtglieder des oberen Buntsandsteins aufgrund großräumiger Erosion völlig, während die „wetterfeste Decke“ des meist gut silikatisch zementierten Hauptkonglomerates die Plateaus der Erhebungen bildet. Infolge der wahrschein-

lich heute noch andauernden Vorgänge der Rheingraben-Entwicklung weist die Schichtfolge eine nord-östliche Neigung von nur wenigen Grad auf.

Die noch vorhandenen Buntsandstein-Sedimente des Schwarzwalds werden gegen Osten nur noch in den Flußtälern der Nagold (bei Liebenzell) und der Großen Enz (bei Bad Wildbad) bis auf ihr Liegendes „durchragt“. Dort, wo die meist rot gefärbten Sand- und Ton-Schluffsteine nicht direkt dem Grundgebirge auflagern, zeigen sich auch ältere - permische - Ablagerungen, das sog. „Rotliegende“. Im Liegenden dieser klastischen Sedimente treten im Untersuchungsgebiet der sudetisch intrudierte Wildbadgranit sowie die asturisch datierten Forbachgranite (DRACH, et al., 1974) auf, die dem sog. „Nord-schwarzwälder Granitmassiv“ zugerechnet werden. Besondere Bedeutung für den Thermalkurort besitzt der Forbachgranit als Lieferant der fluoridhaltigen Akrato-Thermen: Ausschließlich aus geöffneten Klüften dieses Zweiglimmergranites strömen den Tiefbohrungen der Kuranlagen heute täglich rd. 1200 m<sup>3</sup> des im Mittel 40 °C warmen Thermalwassers zu.

### 3 Angetroffene geologische Verhältnisse

Der Meisterntunnel liegt auf der gesamten Länge seiner bergmännischen Bauweise in klastischen Sedimenten des Perms (Abb. 3). Die Lage der Tunneltrasse sowie deren Gradiente wurde dabei aufgrund der Voruntersuchungsergebnisse so gewählt, daß ein Anfahren des thermalwasserführenden Grundgebirges im Liegenden verhindert werden konnte: Da die Trasse die engeren Heilquellenschutzgebiete (HQSG II-IV) durchquert, war im Falle eines „Anschneidens“ einer Granitschwelle eine qualitative und quantitative Beeinflussung der Thermen zu befürchten (siehe auch WENDT, 1997).

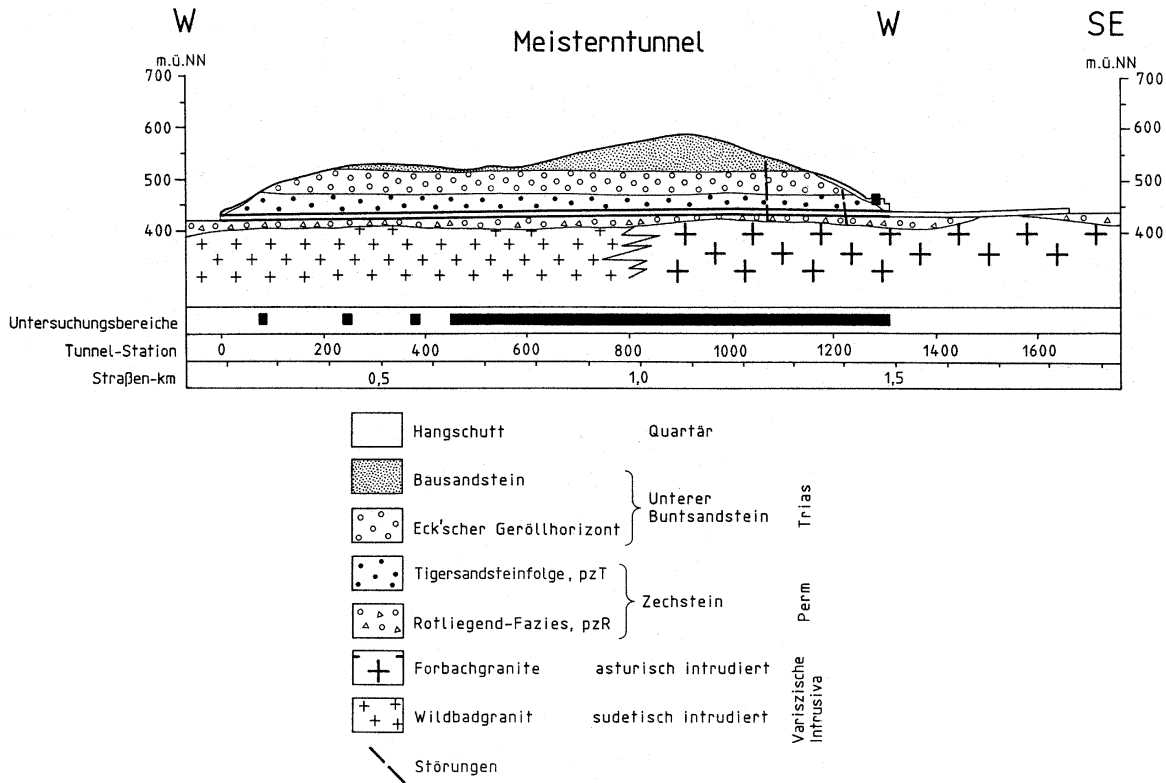


Abbildung 3: Schematisches geologisch-bautechnisches Profil durch den Meisterntunnel.

Bei der Dokumentation der geologischen Verhältnisse konnten aufgrund ihrer unterschiedlichen lithofaziellen und geomechanischen Eigenschaften die folgenden beiden Einheiten unterschieden werden:

- Im Liegenden: Gesteine der **Rotliegend-Fazies, pzR** die bisher als „Oberes Rotliegend“ bezeichnet wurden und jetzt stratigraphisch vor allem dem Zechstein zugeordnet werden. Es handelt sich hierbei um meist ungeschichtete, überwiegend grobklastisch ausgebildete, terrigene Sedimente von fast ausschließlich dunkelroter Farbe.

Diese Schichten nahmen bis etwa Baustation 200 m den gesamten Querschnitt des Tunnels ein und wanderten dann aus dem Kalottenquerschnitt heraus. Sie verlassen den Querschnitt jedoch nie gänzlich.

- Im Hangenden: Gesteine der **Tigersandstein-Formation, pzT**, früher als „*Unterer Buntsandstein*“ im Sinne von ECK, 1875 bezeichnet. Diese intern deutlich feingeschichteten, grauen und hellroten Sandsteine sind zeitlich ebenfalls ins Perm (Zechstein) zu stellen.

### 3.1 Perm in Rotliegend-Fazies

#### 3.1.1 Mächtigkeit

Die Sedimente in Rotliegend-Fazies treten diskordant über den variszischen Graniten auf. Die Abrasionsfläche im Liegenden der Sedimente repräsentiert dabei eine Erosionsphase von fast 20 Mio. Jahren, in denen metamorphes Nebengestein und Intrusiva von vermutlich mehreren km Mächtigkeit der Abtragung zum Opfer fielen. Obertägige Kartielergebnisse und Bohrungen weisen auf ein ausgeprägtes, kleinräumiges Relief mit z.T. nur wenige 100 m messenden Senken und Schwellen hin (siehe auch Abb. 3). Die Mächtigkeit der Rotliegend-Fazies schwankt infolgedessen erheblich, von 0 m über Schwellen bis maximal 25 m in Senkenbereichen.

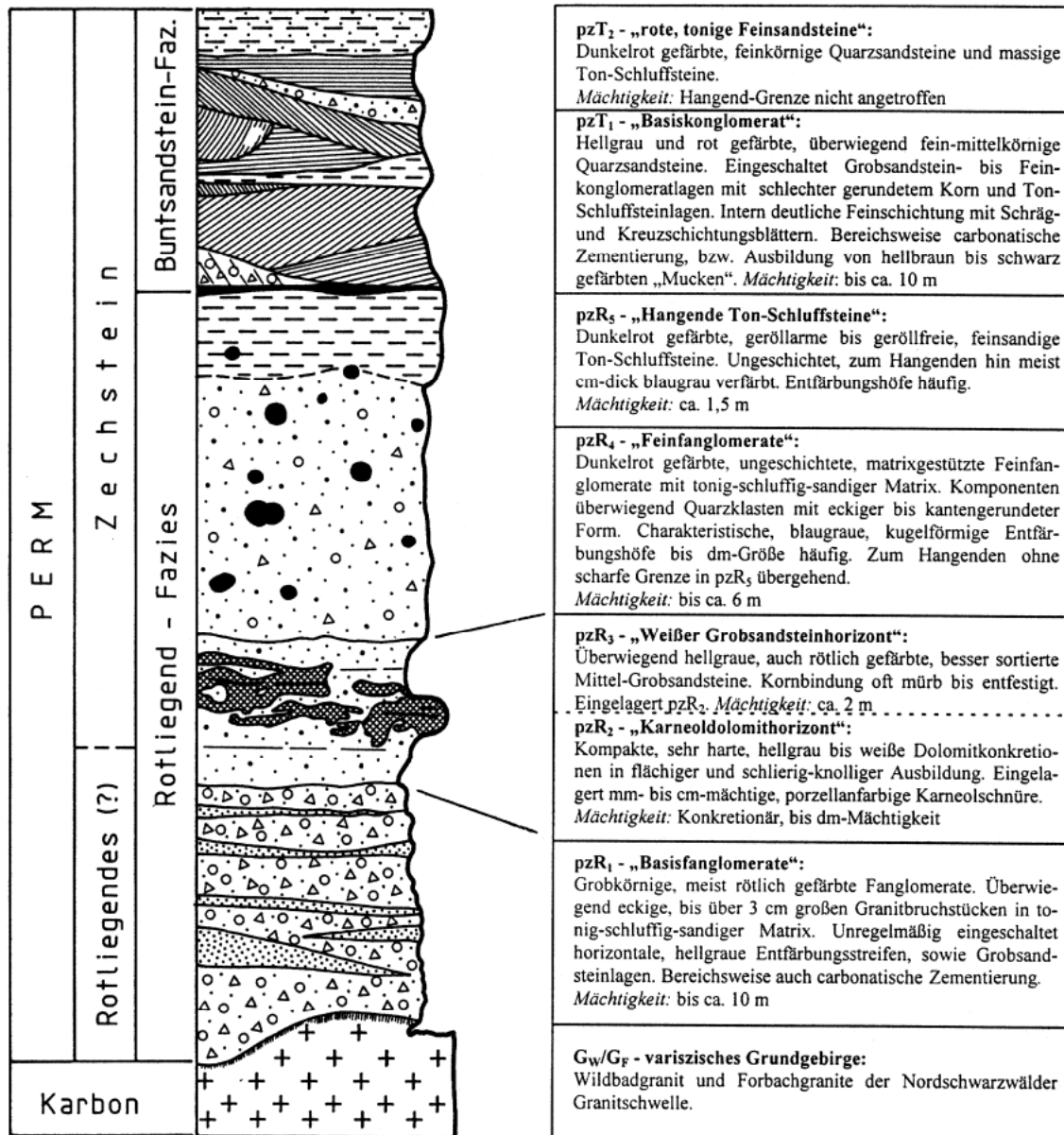


Abbildung 4: Zusammengesetzte, schematische Schichtsäule der Gesteinsabfolge in Rotliegend-Fazies während des Meisterntunnel-Vortriebs.

#### 3.1.2 Gesteinsausbildung

Vom Liegenden zum Hangenden konnten 5 lithofazielle Untereinheiten (pzR<sub>1</sub>- pzR<sub>5</sub>) ausgeschieden werden (siehe Abb. 4). Generell handelt es sich bei den überwiegend kräftig rot gefärbten, überwiegend grobklastischen Sedimenten um terrestrische Bildungen, die unter wüstenhaften Bedingungen in Schuttfächern („alluvial fans“) abgelagert wurden. Die dabei ständig wechselnden und sehr kleinräumigen

Ablagerungsverhältnisse führten dazu, daß sich in nur wenigen Metern mächtigen Lagen mürbe, tonig gebundene Fanglomerate mit festen Ton-Schluff-Steinen und unterschiedlich gut zementierten Sandsteinen abwechseln. Das granitische Ausgangsmaterial bedingte dabei Quarzgehalte von bis über 75 %. Zusätzlich wurden in der Abfolge konkretionäre Lagen von kompaktem, sehr hartem Dolomit (Abb. 5) sowie darin eingelagertem kryptokristallinem Quarz („Karneol“) angetroffen. An diesen Konkretionen durchgeführte Point-Load-Tests ergaben einaxiale Gesteinsdruckfestigkeiten von bis zu 150 MPa. Die von RÖPER (1980) im Mittelschwarzwald rekonstruierten Bildungsvorgänge zeigen, daß es sich bei diesen Konkretionen und Lagen um fossile Caliche-Krusten handelt, die unter den damaligen semiariden Umweltbedingungen an der Erdoberfläche entstanden (Abb. 6). Es wird angenommen, daß sich durch ein Zusammenspiel von aszendenten (in Verwitterungsprozessen mineralisierte Lösungen und hydrogencarbonathaltige Bodenwässer) als auch deszendente Lösungen (wie mineralisierte Niederschläge, carbonathaltiger Staub oder Nebel) Lösungen zunächst calcitische Krusten bildeten. Vermutlich frühdiagenetisch erfolgte dann eine Dolomitisierung der Kalkkrusten sowie die Bildung der porzellanfarbigen Karneolschnüre durch lokale Ausfällung gelöster Kieselsäure. RÖPER vertrat 1980 aufgrund klimatologischer Schlußfolgerungen die Meinung, daß die Karneolhorizonte an der Perm/Buntsandstein-Grenze terrestrische Äquivalente zu den marinen Zechstein-Evaporiten sind - eine Auffassung, die heute angesichts der Befunde von Gamma-Strahlungsmessungen und magnetochronographischen Methoden als gesichert angenommen wird (GEYER & GWINNER, 1986, S. 61; WALTER, 1994, S. 364).

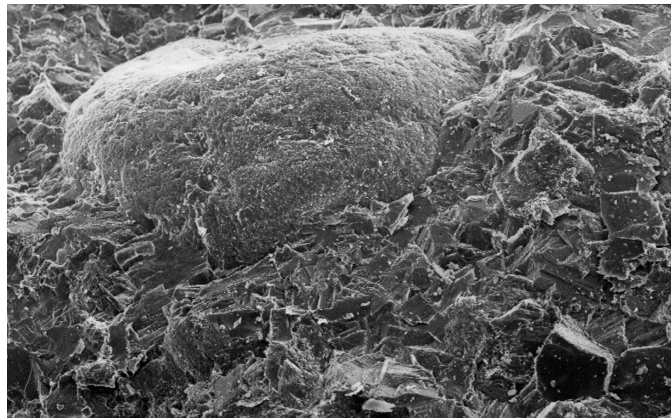


Abbildung 5: Karneol-Dolomit, pzR2. REM-Aufnahme einer dolomitischen Konkretion mit äußerst dichtem Gefügeverband aus überwiegend Dolomit, Tonen bzw. Glimmer und wenigen eingebetteten, großen Quarzsandkörnern (Bildmitte). 25 kV; Untere Bildkante 1,6 mm.

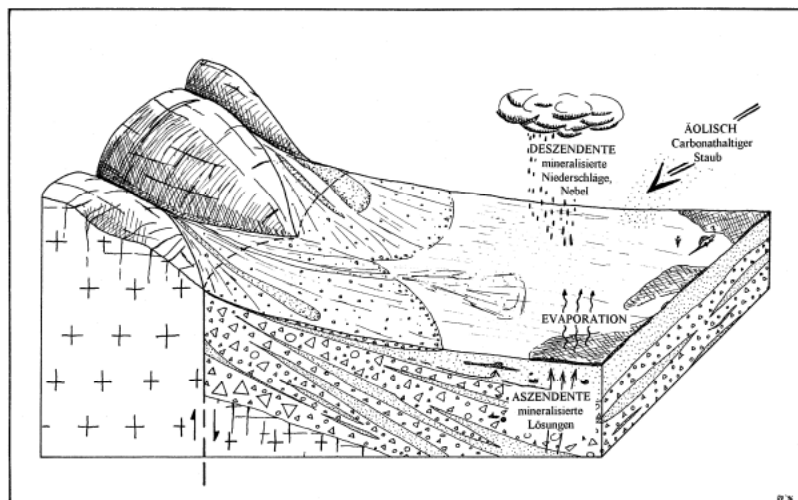


Abbildung 6: Schematisches Blockbild zur Genese der Karneoldolomitkonkretionen. Dargestellt sind die ionenliefernden aszendenten und deszendenten Faktoren in einem Ablagerungsraum, wie er zur Zeit des Perm im Untersuchungsraum ausgesehen haben mag.

### 3.1.3 Verhalten im Gebirgsverband

Die ungeschichteten Gesteine der Rotliegend-Fazies traten im Gebirge zumeist auch ungeklüftet auf, was besonders in Hinblick auf den Schutz des Thermalwassers im darunterliegenden Grundgebirge von Vorteil war. Das Gebirgsverhalten war über weite Bereiche als „*stark nachbrüchig*“ bis „*gebrüch*“ (RABCEWICZ, PACHER, GOLSER, erweitert durch SPAUN; in: SPAUN, 1986) zu klassifizieren. Abschnitte, in denen ausgeprägte Kluftflächen erkennbar waren, beschränkten sich auf wenige, meist eng begrenzte Bereiche („Störungszonen“). Diese, in Hinblick auf Thermalquellenschutz und Hohlraumstabilität überaus günstigen Verhältnissen hatten jedoch auch nachteilige Auswirkung - auf die Gebirgslösung: Wie in Abschnitt 4 noch näher erläutert, sank die Vortriebsleistung der für den Tunnelvortrieb vorgesehenen Teilschnittmaschine aufgrund des geringen Durchtrennungsgrades des Gebirges und hohen Gesteinsdruckfestigkeiten (u.a. im Karneoldolomithorizont, s.o.) so weit ab, daß schließlich auf einen konventionellen Bohr- und Sprengvortrieb umgestellt werden mußte.

## 3.2 Perm der Tigersandstein-Formation

### 3.2.1 Mächtigkeit

Die Maximalmächtigkeit der gesamten Tigersandstein-Formation beträgt im Untersuchungsgebiet etwa 50 m. Während des Tunnelvortriebes wurden Gesteine dieser Einheit auf einer Strecke von etwa 1100 m Länge durchfahren, wobei jedoch aufgrund des schleifenden Anschnitts lediglich eine maximale Mächtigkeit von 8 Metern aufgeschlossen wurde.

### 3.2.2 Gesteinsausbildung

Bei den Sedimenten der Tigersandstein-Formation handelt es sich um intern deutlich feingeschichtete, graue und hellrote Sandsteine vor allem limnisch-fluvialer Genese. Die Tigersandstein-Formation setzt sich im gesamten Nordschwarzwald aus drei Teilgliedern ( $pzt_1$ ,  $pzt_2$ ,  $pzt_3$ ) zusammen, die sich faziell vertreten können.

Das „*Basiskonglomerat*“,  $pzt_1$  setzt mit einem lithologisch scharfen Schnitt über den bereits beschriebenen Sedimenten ein. Es handelt sich vorwiegend um hellgraue, auch hellrot gefärbte, meist fein- bis mittelkörnige Quarzsandsteine. An der Basis sind häufig „Groschüttungslagen“ eingeschaltet, deren Farbe, Kornrundung und Zusammensetzung auf eine Herkunft aus bereits abgelagerten Sedimenten der Rotliegend-Fazies hinweist. Offensichtlich handelt es sich hierbei um „Rotliegend“-Material, das in der näheren Umgebung exponiert war, von den Gewässern erodiert und dann resedimentiert wurde. Jede dieser Lagen unterscheidet sich durch interne Feinschichtung jedoch deutlich von den ungeschichteten Ablagerungen der Rotliegend-Fazies selbst. Die Häufigkeit dieser Lagen nimmt zum Hangenden rasch ab.

Zum Hangenden hin gewinnen allmählich meist dunkel- und hellrot gefärbte Feinsandstein- und Tonschluffsteinlagen an Bedeutung. Es handelt sich hierbei um den unscharfen Übergang zu den „*roten tonigen Feinsandsteinen*“,  $pzt_2$ . Fossile Trockenrisse konnten sowohl im Abdruck als auch auf Schichtflächen nachgewiesen werden. Vor allem der  $pzt_2$  zeigt in weiten Bereichen überaus deutliche bioturbate Texturen: In den Sandstein-Tonschluffstein-Wechselfolgen sind auf den Oberflächen der verwitterungsresistenteren Sandsteine zahlreiche, hervorragend ausgebildete Invertebraten-Wühlspuren erhalten geblieben. Neben silikatischer und tonig-ferritischer Kornbindung tritt auch kleinräumige carbonatische Zementierung auf, die an der Erdoberfläche zur Bildung von „Mucken“ führt: Die bei der Verwitterung der Fe- und Mn-haltigen Carbonate entstehenden Oxide und Hydroxide bilden mm-große, mürbe, bräunlich-schwarze Sprengel, die dem „Tigersandstein“ auch seinen - nicht ganz schlüssigen - Namen gaben.

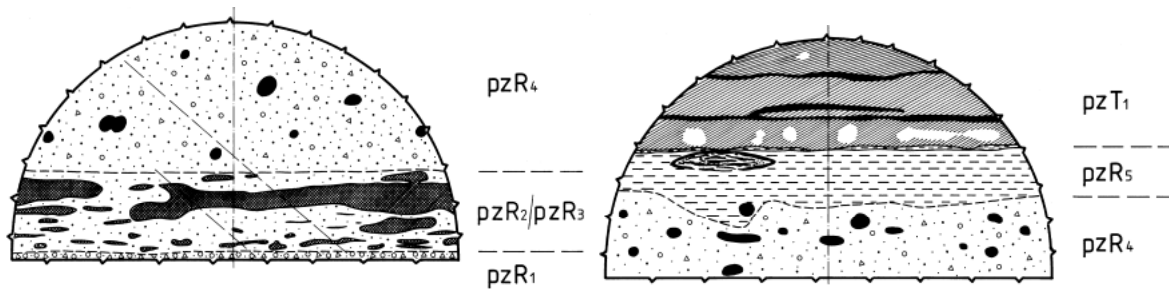


Abbildung 7: Ortsbrustaufnahmen aus dem Meisterntunnel, Kalottenvortrieb. Links bei Baustation 87,0 m. Die nahezu ungeklüftete Ortsbrust liegt zur Gänze in Schichten der Rotliegend-Fazies und zeigt die Ausbildung der Horizonte pzR1 bis pzR4. Rechts die Ortsbrust bei Baustation 462,5 m, jeweils zur Hälfte in Feinganglomeraten und Ton-Schluff-Steinen der Rotliegend-Fazies (pzR4, pzR5), und Sandsteinen der Tigersandsteinfohle (nach Aufnahmen ARGE Entlastungstunnel, 14.11.94 und 3.3.95).

### 3.2.3 Verhalten im Gebirgsverband

Obwohl in der Tigersandstein-Formation des Untersuchungsgebietes mehrere obertägige Aufschlüsse existieren, zeigte der Vortrieb, daß das Aussehen und Verhalten der Sandsteine sich untertage oftmals deutlich von den obertägigen Beobachtungen unterschied: In Oberflächenaufschlüssen zeigen die Gesteine der Tigersandsteinfohle generell eine regelmäßige, überwiegend mittelständige Klüftung. Auch klaffende Klüfte sind keine Seltenheit. Das während des Vortriebs angetroffene Gebirge war dagegen über weite Strecken als „kompakt“, mit Kluftabständen von  $> 2,0$  m zu klassifizieren. Die wenigen Bereiche besserer Durchtrennung beschränkten sich auf meist wenige dekameter-breite Abschnitte, in denen zudem oft Flächen ein- und derselben Orientierung stark dominierten. Dies führte dazu, daß das Gebirgsverhalten über weite Bereiche als „stark nachbrüchig“ bis „gebrüch“ (RABCEWICZ, PACHER, GOLSER, erweitert durch SPAUN; in: SPAUN, 1986) zu klassifizieren war. Die unterschiedliche Intensität der ober- und untertägigen Durchtrennung des Schichtverbandes legt den Schluß nahe, daß die tektonisch angelegte Klüftung zwar generell (auch untertage) vorhanden ist, jedoch die deutliche Zergliederung nur übertage - wahrscheinlich durch Erweiterung und Öffnung der Klüfte infolge von Entspannungs-, Auflockerungs- und Kriechvorgängen - sichtbar wird. Ebenfalls deutliche Unterschiede zeigten sich in karbonatisch zementierten Partien der Sandsteinfohle: Eine charakteristische Sprengelung mit „Mucken“ war vor allem entlang von Klüften zu beobachten, während in intakten Bereichen nur spätig glitzernde Bruchflächen auf das karbonatische Bindemittel hinwiesen. Zahlreiche dieser „frisch“ im Vortrieb entnommenen Proben verfärbten sich an der Luft innerhalb von wenigen Monaten gelblich-bräunlich.

## 4 Ingenieurgeologisch-bautechnische Verhältnisse

### 4.1 Fräsleistung

Zunächst war vorgesehen, den Vortrieb mit einer 300 kW starken Teilschnittmaschine Paurat E 242B mit Längsschneidkopf (Abb. 8) durchzuführen. Nach zwei kurzen Probeabschnitten, die geringe Bruttoschneidleistungen von rund  $13 \text{ m}^3/\text{h}$  ergeben hatten, ließ man dieses Vortriebskonzept jedoch fallen und stellte auf einen konventionellen Bohr- und Sprengvortrieb um. Das bereits im vorhergehenden Abschnitt beschriebene, weitgehend ungeklüftete Gebirge und horizontbeständig auftretenden Lagen von bis zu 150 MPa festem Karneoldolomit und bis 90 MPa festen Ton-Schluff-Steinen führten dazu, daß die Schneidleistung der Teilschnittmaschine unter die Grenze der Wirtschaftlichkeit rutschte (Abb. 9).



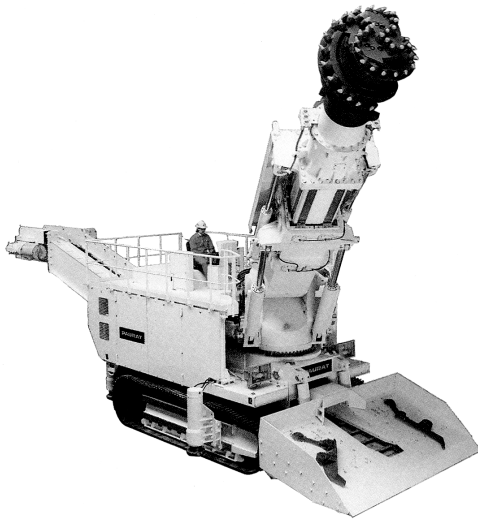


Abbildung 8: Ansicht der Teilschnittmaschine Paurat E 242B. Tunnelvortriebsmaschine mit teleskopierbarem Längsschneidkopf, 300 kW installierter Schrämleistung und 120 t Gesamtgewicht. (aus: PAURAT, Firmenprospekt).

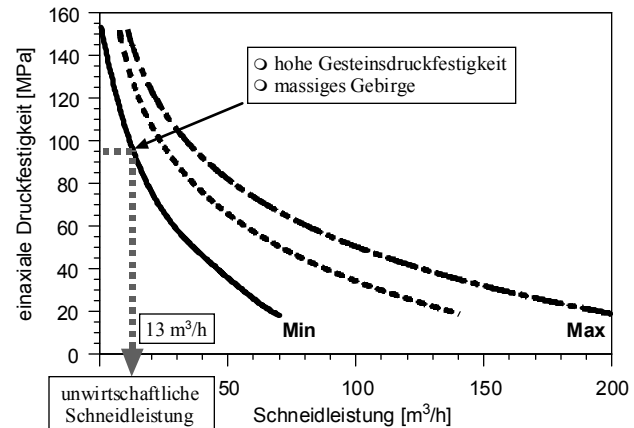


Abbildung 9: Schneidleistungsdigramm der Teilschnittmaschine E 242B. Die geomechanischen Eigenschaften des angetroffenen Gebirges führten zu einer nicht wirtschaftlichen Fräsleistung von rd. 13 m³/h (aus: THURO & PLINNINGER, 1998).

Nachdem man auf einen konventionellen Vortrieb umgestellt hatte, verlief der weitere Vortrieb problemlos. Zum Einsatz kam ein Bohrwagen vom Typ Atlas-Copco Rocket Boomer 352 mit zwei Bohrlafetten, die mit jeweils einem Bohrhämmer COP 1440 bestückt waren (Abb. 10). Auch den hohen Anforderungen, die die Unterfahrung einer in Betrieb befindlichen Kurklinik bei einer äußerst geringen Felsüberlagerung von nur etwa 15 m stellte, wurde diese Vortriebsweise dank sprengtechnischer Maßnahmen und ständiger Überwachung gerecht (siehe auch ARNOLD 1995). Die weiterhin baubegleitend durchgeführte ingenieurgeologische Baudokumentation erbrachte jedoch zahlreiche Ergebnisse, die nicht in das bekannte Schema zu passen schienen.

## 4.2 Bohrgeschwindigkeit

Üblicherweise besteht zwischen der Bohrgeschwindigkeit, die ein Bohrgerät erreicht und den geomechanischen Gesteinseigenschaften ein enger Zusammenhang. Die Zerstörungsarbeit (THURO 1996, SPAUN & THURO, 1996) stellt dabei ein hochsignifikantes Maß für die zu erwartende Bohrleistung dar (Abb. 11). Im Falle des Meisterntunnel-Vortriebes liegen die ermittelten Punkte jedoch so weit außerhalb der Norm, daß weder die natürliche Wertestreuung, noch Meßfehler eine Erklärung liefern konnten. Ein ebenfalls ungewöhnliches Phänomen stellt die stark differierende Bohrgeschwindigkeit zweier baugleicher, jedoch unterschiedlich stark abgenutzter Bohrkronen dar, die auf identischen Bohrhämmern eingesetzt wurden. Entgegen der Erwartungen erzielten Bohrkronen, die bereits seit mehreren Abschlängen eingesetzt wurden, erheblich höhere Bohrgeschwindigkeiten als fabrikneue Kronen.

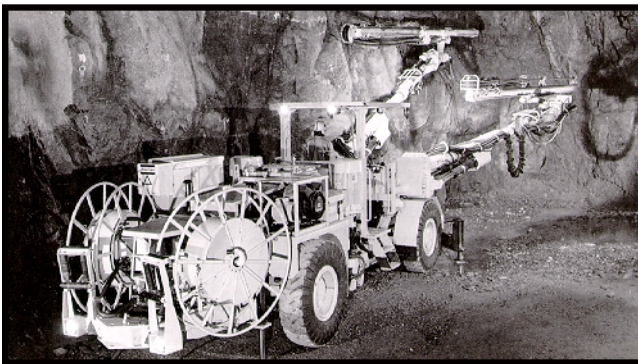


Abbildung 10: Bohrwagen Atlas-Copco Rocket-Boomer 352 mit zwei drehschlagenden Hydraulikhämmern COP 1440 (aus: ATLAS-COPCO, Firmenprospekt)

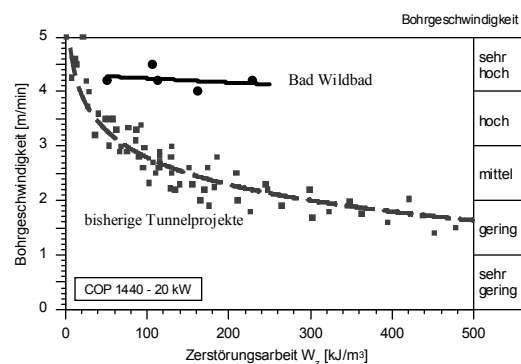


Abbildung 11: Zusammenhang von Bohrgeschwindigkeit und Zerstörungsarbeit für bisher untersuchte Tunnelprojekte (gestrichelt) und das Projekt Meisterntunnel/Bad Wildbad.



### 4.3 Bohrkronenverschleiß

Auch bei der Begutachtung der Verschleißform der Stiftbohrkronen stellten sich ungewöhnliche Formen des Werkzeugverschleißes heraus: Generell handelte es sich um einen für weniger harte Sandsteine typischen Verschleiß des Werkzeugträgermaterials. Das Ungewöhnliche bei diesem Projekt war jedoch eine trompetenförmige Erweiterung der an der Stirnseite der Krone austretenden Spüllöcher. Wie die Schnitte (Abb. 12) zeigen, ging dies bei 8-Stift-Kronen bis hin zur völligen Abtragung des Kronenzentrums. Bei allen Kronen führte dieser Effekt sehr frühzeitig zum Verlust der zentralen Hartmetallstifte.

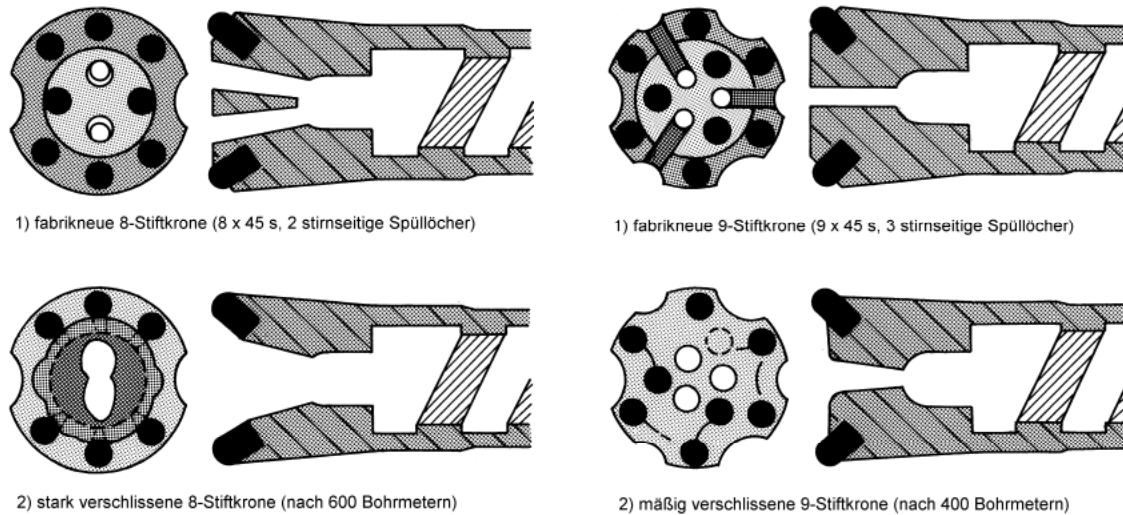


Abbildung 12: Schematische Schnitte durch Stiftbohrkronen  $\varnothing$  45 mm mit typische Verschleißformen aus dem Meisterntunnel-Vortrieb. Vor allem bei der 8-Stift-Krone (links) wird die trompetenförmige Erweiterung der zentralen Spülöffnungen deutlich.

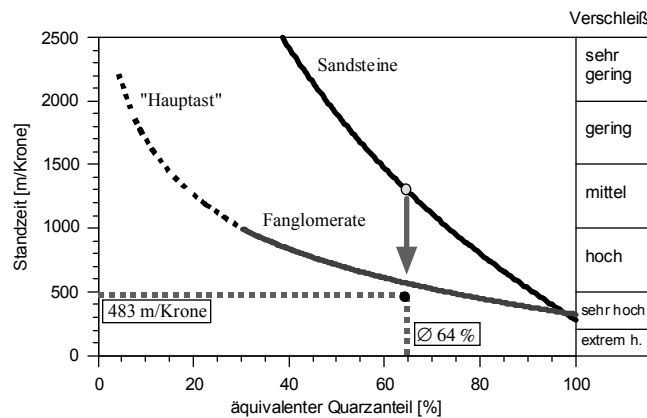


Abbildung 13: Bohrkronenverschleiß (als Gesamtstandlänge, d.h. Standzeit) in Abhängigkeit des äquivalenten Quarzanteils in Sandsteinen und Fanglomeraten. Der in den Gesteinen des Meisterntunnels ermittelte äquivalente Quarzanteil ist als schwarzer Punkt eingetragen (Sandsteine), der für diese Gesteine charakteristische Schätzwert als grauer Punkt auf dem Sandstein-Ast.

Dieser - bisher tatsächlich nur am Meisterntunnel beobachtete - Effekt bot aber auch eine Erklärung für all die bisher beschriebenen Phänomene. Diese „von innen angreifende“ Abrasion der Spüllöcher scheint durch feinstkörnige Quarzpartikel verursacht worden sein, die im Spülwasser mitgeführt wurden. Als Spülwasser wurde beim Vortrieb ausschließlich Tunnelsickerwasser verwendet, das in offenen Gerinnen abgeleitet wurde. Hier konnte sich feiner Quarzstaub niederschlagen, der auch durch ein Absetzbecken nicht vollständig aus dem Wasser entfernt werden konnte. Durch die Erweiterung der Spülöffnungen könnte sich das Spülsystem soweit verbessert haben, daß sich in den überwiegend tonig gebundenen Sedimenten tatsächlich verbesserte Bohrleistungen ergaben. Als negative Folge dieses nicht nur von der Gebirgsseite, sondern zusätzlich auch von Innen heraus angreifenden Verschleißvorgangs sank jedoch auch die Standzeit der Einzelbohrkronen auf knapp 500 m/Krone (Abb. 13).

## 5 Schlußfolgerung

Der Vortrieb des Meisterntunnel hat durch die hervorragenden Aufschlußverhältnisse untertage einen Einblick in die regionale Ausbildung der permischen Schichtfolge gegeben. In diesem Zusammenhang erwähnenswert ist vor allem der Nachweis eines dolomitisch und silikatisch ausgebildeten Karneoldolomithorizontes. Dieser stellt bis heute eines der nördlichsten Vorkommen im Schwarzwald dar.

In ingenieurgeologischer Hinsicht wird deutlich, daß die Wirtschaftlichkeit des Teilschnittmaschinen-Vortriebs weitaus stärker von den hohen Gesteinsdruckfestigkeiten beeinträchtigt wurde, als der konventionelle Bohr/Spreng-Vortrieb. Zur Bohrbarkeit ist anzumerken, daß in diesem speziellen Fall die Bohrgeschwindigkeit höher und weniger von den geomechanischen Gesteinseigenschaften gesteuert wurde, als dies die Laboruntersuchungen erwarten ließen. Der bisher nach eigener Ansicht unterschätzte Einfluß des Spülsystems auf die Gesamtleistung eines Bohrgeräts wird u.a. durch die Verschleißform und deren Auswirkung deutlich.

## 6 Danksagungen

Hr. Dr. K. Thuro, Hr. Dr. J. Müller, den bauausführenden Firmen der ARGE Entlastungstunnel und allen voran Hr. Prof. Dr. G. Spaun sei für die tatkräftige Unterstützung während des Projektes und meiner damit verbundenen Diplomarbeit gedankt. Ich bedanke mich bei der Stadtverwaltung Bad Wildbad für die Erlaubnis zur Publikation der vorliegenden Ergebnisse.

## 7 Literatur

- ARNOLD, K. (1995): Sprengvortrieb eines Verkehrstunnels bei extremen Bedingungen für den Immissionsschutz. - Nobel Hefte, **3**, 100-111.
- DRACH, V.V., LIPPOLT, H.J. & BREWER, M.S. (1974): Rb-Sr-Altersbestimmungen an Graniten des Nordschwarzwaldes.- N. Jb. Miner. Abh., **123**, 38-62; Stuttgart.
- ECK, H.v. (1875): Zur Gliederung des Buntsandsteins.- N. Jb. Min. Geol. Paläont.; Stuttgart.
- GEYER, O.F. & GWINNER, M.P. (1986): Geologie von Baden-Württemberg, 254 Abb., 26 Tab; Stuttgart (Schweizerbart).
- PLINNINGER, R.J. (1997): Meisterntunnel Bad Wildbad/Schwarzwald: Regionalgeologische und ingenieurgeologische Erkenntnisse im Zuge der Auffahrung des Innerstädtischen Entlastungstunnels. - 130 S., 69 Abb., 30 Tab., 12 Anlg., 4 Beilagen, Dipl.Arb. und Dipl.Kart. TU München (unveröff.).
- PLINNINGER, R.J. & THURO, K (1998): Die geologischen Verhältnisse beim Vortrieb des Meisterntunnels Bad Wildbad/Nordschwarzwald.- Z. dt. geol Ges., Hannover (in Drucklegung)
- RÖPER, H.-P. (1980): Zur Petrographie und Genese des Karneoldolomithorizontes (Grenze Rotliegendes/Buntsandstein) im Gebiet des Mittleren Schwarzwaldes.- 288 S., unveröff. Inaug.-Diss. Rupr.-Karl- Univ. Heidelberg.
- SPAUN, G. (1986): Geologische Gesichtspunkte bei der Klassifizierung des Gebirges.- in: WICHTER, L. (1986): Tunnelbau.- Reihe Kontakt & Studium, Bauwesen, **184**, S. 1-13, Sindelfingen.
- THURO, K. & SPAUN, G. (1996): Geologisch-felsmechanische Parameter zur Erfassung der Bohrbarkeit beim konventionellen Sprengvortrieb. - Taschenbuch für den Tunnelbau 1997, 21, 63-106; Dt. Ges. für Geotechnik e.V., Essen (Glückauf).
- THURO, K. (1996): Bohrbarkeit beim konventionellen Sprengvortrieb. Geologisch-felsmechanische Untersuchungen anhand sieben ausgewählter Tunnelprojekte.- 145 S.; Münchner Geologische Hefte, Reihe B: Angewandte Geologie, B1, I-XII, München.
- THURO, K. & PLINNINGER, R. J. (1998): Geotechnische Auswirkungen klastischer Sedimentgesteine auf den Tunnelvortrieb.- Tagber. 11. Nat. Tag. Ing.-Geol. Würzburg 1997, 298-312; Essen (Glückauf).
- WALTER, R. (1994): Geologie von Mitteleuropa, 364 S; Stuttgart (Schweizerbart).
- WENDT, O. (1997): Hydrogeologie - Heilquellenschutz.- STADT BAD WILDBAD (1997): Meistern-Tunnel: Chronik-Dokumentation-Perspektiven 1994-1997, Bad Wildbad (Hrsg. Stadtverwaltung Bad Wildbad).