

Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft
Office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage
Ufficio federale dell'ambiente, delle foreste e del paesaggio



Landeshydrologie und -geologie
Service hydrologique et géologique national
Servizio idrologico e geologico nazionale

Geologische Berichte – Rapports géologiques – Rapporti geologici
Nr. 21

Geologie und Hydrogeologie der Unteren Süsswassermolasse im SBB-Grauholztunnel bei Bern

J. Dollinger



Landeshydrologie und -geologie
Service hydrologique et géologique national
Servizio idrologico e geologico nazionale

Geologische Berichte – Rapports géologiques – Rapporti geologici
Nr. 21

**Geologie und Hydrogeologie
der Unteren Süsswassermolasse
im SBB-Grauholztunnel bei Bern**

J. Dollinger¹⁾

¹⁾ Geotechnisches Institut AG, CH-3007 Bern

Geol. Ber. Landeshydrol. u. -geol. **21** (1997)
(mit 9 Beilagen)

Herausgabe und Vertrieb:
Landeshydrologie und -geologie, CH-3003 Bern

ISBN 3-906723-13-5
IsSN 1017-1509

VORWORT

Die Landeshydrologie und -geologie (LHG) ist bestrebt, sich über die geologischen Aspekte grosser Bauvorhaben auf dem laufenden zu halten. Solche Vorhaben bieten die Gelegenheit zur Durchführung zusätzlicher erdwissenschaftlicher Untersuchungen. So wurde während des Baus des SBB-Grauholztunnels im Auftrag der LHG die lithologische Abfolge der Unteren Süsswassermolasse (USM) entlang der Tunnelachse detailliert untersucht. Trotz Vortriebs mit einer Tunnelbohrmaschine mit Schild war es möglich, aussagekräftige Profile aufzunehmen. Diese Studie stellt einen Beitrag zum Aufbau eines Datensatzes über die hydrogeologischen Eigenschaften geringdurchlässiger Gesteine dar. Die Ergebnisse dieser Studie ergänzen jene, die in zwei bisherigen Geologischen Berichten der LHG veröffentlicht wurden, nämlich in Nr. 13 «Untere Süsswassermolasse» (Bohrungen Langenthal) sowie in Nr. 16 «USM Erdsondenfeld Burgdorf». Aus technischen Gründen ist dem vorliegenden Bericht nur eine Auswahl der Tunnelaufnahmen beigelegt. Sämtliche im Rahmen des Projektes erstellten Aufnahmen sind jedoch bei der LHG archiviert und können bei der Schweizerischen Geologischen Dokumentationsstelle, wo sie auch auf Mikrofilm erhältlich sind, eingesehen werden.

Allen, die durch ihr Können und ihren Einsatz zu diesem Projekt beigetragen haben, sei an dieser Stelle gedankt. Insbesondere bedanken wir uns bei Herrn J. Dollinger vom Geotechnischen Institut AG (GI), dem Autor der Publikation. Besonderer Dank gilt auch den Schweizerischen Bundesbahnen (SBB) für die Bewilligung zur Durchführung des Projekts und für das Interesse an dieser zusätzlichen erdwissenschaftlichen Untersuchung. Herrn K. Herni, Oberingenieur der Baukreisdirektion II der SBB, sei herzlich für seine Zustimmung zur Veröffentlichung der vorliegenden Untersuchungsergebnisse gedankt. Dank gilt auch den Herren W. Zeder, Sektionschef NBS, und J. Elmiger, Projektleiter der Grauholzlinie bei den SBB, für ihre stete Unterstützung. Für die logistische Unterstützung auf der Baustelle war die örtliche Leitung besorgt. Den Herren P. Scheidegger und M. Schmid vom Ingenieurbüro Balzari und Schudel AG sei an dieser Stelle für die angenehme Zusammenarbeit gedankt. Von seiten der LHG wurde das Projekt von Herrn J.P. Tripet (Sektion Hydrogeologie und geologische Risiken) begleitet. Die Oberaufsicht seitens des Auftragnehmers hatte Herr W. Harsch (GI) inne. Die redaktionelle Bearbeitung erfolgte durch Herrn R. Burkhalter (LHG). Für die wertvollen Hinweise während der Projektabwicklung und bei der kritischen Durchsicht des Manuskripts möchten wir uns bei Herrn Prof. A. Matter (Geologisches Institut der Universität Bern) und Herrn A. Gautschi (Nagra) bedanken.

Für den Inhalt des Textes und der Illustrationen ist der Autor allein verantwortlich.

PREFACE

Le Service hydrologique et géologique national (SHGN) s'efforce de se tenir au courant des grands projets touchant à la géologie. En effet, ceux-ci peuvent offrir des conditions idéales pour procéder à des observations supplémentaires de caractère scientifique et qui ne seraient pas réalisables ailleurs. C'est ainsi que, lors du percement du tunnel CFF du Grauholz (BE), le SHGN a mandaté un levé aussi détaillé que possible de la Molasse d'eau douce inférieure (USM) dans l'ouvrage. En dépit de la présence du tunnelier (avec bouclier), il a été possible de réaliser des levés représentatifs. Cette étude représente une contribution à l'établissement d'une base de données sur les milieux à faible perméabilité d'importance régionale. Les résultats de cette étude complètent des travaux antérieurs, déjà publiés dans deux autres «Rapports géologiques» du SHGN: le No 13, «Untere Süsswassermolasse» (forages de Langenthal) et le No 16, «USM Erdsondenfeld Burgdorf». En raison de contraintes techniques, seul un choix des levés de terrain est annexé. L'ensemble des levés réalisés dans le cadre du projet est cependant archivé au SHGN. Ces documents peuvent être consultés aux Archives géologiques suisses, où ils peuvent également être obtenus sous forme de microfilm.

La liste des personnes ayant participé à la réalisation du projet figure à la page précédente (texte allemand). Il convient de remercier ici tous ceux qui, par leur compétence et leur engagement, ont permis la réalisation de ce projet. Nous remercions en particulier l'auteur de cette publication, M. J. Dollinger, ainsi que les Chemins de fer fédéraux suisses (CFF) pour l'autorisation de réaliser ce projet et pour l'intérêt manifesté pour ces études supplémentaires dans le domaine des sciences de la terre. La Direction locale des travaux a fourni le soutien logistique sur le chantier; nous la remercions de sa collaboration.

L'auteur est seul responsable du contenu du texte et des illustrations.

PREFAZIONE

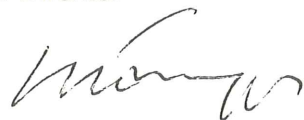
Il Servizio idrologico e geologico nazionale (SIGN) segue con interesse i grandi progetti che riguardano la geologia. Infatti tali progetti offrono l'opportunità di procedere a osservazioni scientifiche particolari che non sarebbero possibili altrimenti. È così, per esempio, che grazie al traforo della galleria ferroviaria del Grauholz (BE), il SIGN ha potuto dare incarico di effettuare un rilevamento, che fosse il più preciso possibile, della Molassa d'acqua dolce inferiore (USM) all'interno dell'opera. Nonostante la presenza della fresa con scudo, è stato possibile realizzare rilevamenti estremamente rappresentativi. Questo studio costituisce un contributo all'allestimento di una serie di dati sulle caratteristiche idrogeologiche delle rocce debolmente permeabili d'importanza regionale. I risultati del presente lavoro completano gli studi anteriori già pubblicati in altri due «Rapporti geologici» del SIGN: il no 13 «Untere Süsswassermolasse» (trivellazioni a Langenthal) e il no 16 «USM Erdsondenfeld Burgdorf». Per motivi tecnici, vengono pubblicati nell'allegato soltanto alcuni rilevamenti scelti. La tota-

lità dei rilevamenti effettuati è conservata nell'archivio del SIGN. Tali documenti possono quindi essere consultati presso l'Archivio geologico svizzero, dove è pure possibile ottenerli sotto forma di microfilm.

L'elenco delle persone che hanno contribuito alla realizzazione del progetto figura alla pagina I (testo tedesco). Cogliamo l'occasione per ringraziare tutti coloro che con la loro competenza e il loro impegno hanno permesso che il progetto andasse in porto. Ringraziamo l'autore di questa pubblicazione, signor J. Dollinger, inoltre anche le Ferrovie federali svizzere (FFS) dell'interesse dimostrato e di averci concesso l'autorizzazione di effettuare i rilevamenti, nonché la Direzione locale dei lavori di averci fornito il sostegno logistico sul cantiere.

Per quanto attiene al contenuto del testo e alle illustrazioni, l'autore se ne assume la piena responsabilità.

Landeshydrologie und -geologie
Der Direktor



Prof. Dr. Ch. Emmenegger

Zusammenfassung

Bei einem Tunneldurchmesser von annähernd 12 m bot sich während des Baus des Grauholtz隧nells die Gelegenheit, die lithologische Abfolge der Unteren Süsswassermolasse (USM) entlang der Tunnelachse zu studieren und die sedimentären Architekturelemente (vgl. KELLER et al. 1990) hydrogeologisch zu charakterisieren. Der bergmännische Vortrieb erfolgte sowohl in den Lockergesteins- wie auch in den Festgesteinsstrecken mit Hilfe einer Tunnelbohrmaschine (Mixschild); im Lockergestein erfolgte der Abbau der Ortsbrust unter Flüssigkeitsstützung (Prinzip Hydroschild), im Festgestein ohne besondere Stützmassnahmen, also im Trockenverfahren (Prinzip konventionelle Tunnelbohrmaschine). Auch bei dieser Vortriebsart war es möglich, aussagekräftige Brustaufnahmen durchzuführen. Da die vollständige Aufnahme der im Schneidrad zugänglichen Stellen der Ortsbrust je nach Komplexität der lithologischen Verhältnisse etwa 3 bis 5 Stunden in Anspruch nahm, mussten die Aufnahmen während Unterhaltsarbeiten, d.h. vorwiegend an Wochenenden, vorgenommen werden. Während des ungefähr 45 Minuten dauernden Tübbingeinbaus konnte ein Überblick gewonnen, jedoch keine detaillierte Aufnahme gemacht werden.

Im Grauholtztunnel dominieren die grobkörnigen Architekturelemente Rinnengürtel und Durchbruchsfächer, die in den 23 Ortsbrustaufnahmen gegen drei Viertel der Fläche einnehmen. Der Tunnel gibt Einblick in die räumliche Anordnung der Architekturelemente: Abschnitte mit geringem Abstand zwischen den Aufschlüssen zeigen, dass die Abfolge vor allem der Architekturelemente Uferwall und Überschwemmungsebene – welche die «Matrix» der USM bilden – grösstenteils komplizierter ist, als es in den Abschnitten mit weit auseinanderliegenden Aufschlüssen den Anschein erweckt.

Die grossflächigen, frischen Aufschlüsse (Ortsbrust- und Nischenaufnahmen) und Bohrungen im Grauholzgebiet zeigen auch interessante fazielle Details: Im Tunnelprofil Nr. 19 (Beilage 5) wurde zum Beispiel in einer mehrphasig geschütteten Rinnengürtelablagerung ein auf einem grossen Schlickgeröll aufgewachsener verkohlter Strauch samt Wurzelstock beobachtet. Daneben enthält dieselbe Ablagerungseinheit auch einen pedogenisierten Horizont mit Kalkknöllchen und quellfähigen Tonmineralien, der nachträglich teilweise aufgearbeitet wurde.

Um eine Grundlage für die Kenntnis der bevorzugten Wasserwegsamkeit zu schaffen, wurden die nicht an Trennflächen gebundenen wasserführenden Zonen kartiert. Diese hydrologischen Aufnahmen ergaben, dass die Architekturelemente Überschwemmungsebene (mit feinkörnigen Paläoböden und Sümpfen) und, mit wenigen Ausnahmen, Uferwall auch mehrere Stunden nach Vortriebsunterbruch noch trocken, die Architekturelemente Rinnengürtel und Durchbruchsfächer hingegen stets mehr oder weniger stark wasserführend waren.

An Gesteinsproben, die an der Ortsbrust und in technischen Nischen entnommen wurden, wurden zusätzlich diagenetische und petrophysikalische Untersuchungen durchgeführt. Hauptziel war es, die Beziehung zwischen Porosität und Permeabilität innerhalb der einzel-

nen Architekturelemente zu bestimmen. In den untersuchten Sandsteinen der Architekturelemente Rinnengürtel, Durchbruchsfächer und Uferwall herrschen Korngrenzporen vor (Poren zwischen den detritischen Körnern mit Öffnungsweiten $>2\ \mu\text{m}$). Die durchschnittlichen Gesamtporositäten der einzelnen Architekturelemente zeigen zum Teil deutliche Unterschiede: Die Rinnengürtelsandsteine weisen durchschnittlich 23,4%, die Sandsteine der Durchbruchsfächer 15,4%, die Feinsandsteine und Siltsteine der Uferwallablagerungen 13,5% und die Schlammsteine der Überschwemmungsebene 11,2% absolute Porosität (Gesamtporosität) auf. Dabei beeinflusst hauptsächlich die Calcizementation den Grad der Gesamtporosität.

Die Permeabilität der Rinnengürtelsandsteine variiert zwischen 3 und $>1800\ \text{md}$ (entspricht $2,8 \cdot 10^{-8}$ und $>1,7 \cdot 10^{-5}\ \text{m/s}$), diejenigen der Sandsteine der Durchbruchsfächer zwischen $<0,05$ und $540\ \text{md}$ (entspricht $<4,7 \cdot 10^{-10}$ und $5,1 \cdot 10^{-6}\ \text{m/s}$). Von den Uferwallgesteinen wiesen lediglich drei Proben eine messbare Permeabilität auf (zwischen 6 und $49\ \text{md}$; entspricht $5,7 \cdot 10^{-8}$ und $4,7 \cdot 10^{-7}\ \text{m/s}$). Die beiden Proben aus den Ablagerungen der Überschwemmungsebene hatten keine messbare Permeabilität. Die Rinnengürtelsandsteine und die Sandsteine der Durchbruchsfächer zeigen eine klare Abhängigkeit der Permeabilität von der Gesamtporosität. Zunehmende Porosität hat eine höhere Permeabilität zur Folge. Ausnahmen konnten auch hier festgestellt werden: Die Erhöhung des Tonmatrix- und Calcitgehaltes als Folge der Pedogenisierung oder eine geringfügig bessere Zementation im Kontakt zu den hangenden und liegenden undurchlässigeren Schichten führt zu einer eindeutigen Reduktion der Gesamtporosität und somit auch der Permeabilität.

Die beiden in technischen Nischen entnommenen Wasserproben wurden auf ausgewählte chemische Parameter und Isotopen untersucht, mit denen die beiden Extreme – grösste vs. geringste Überlagerung, höchste vs. geringste elektrische Leitfähigkeit – erfasst wurden. Die Werte der stabilen Isotope und die Mineralisierung der untersuchten Felsgrundwasserproben ergeben ein konsistentes Bild der Infiltrationsbedingungen und der Verweildauer im Lockergestein und insbesondere im Fels. Der schichtige Aufbau der USM aus relativ gut durchlässigen (Rinnengürtel, Durchbruchsfächer) und schlecht bis undurchlässigen Einheiten (Uferwall, Überschwemmungsebene) lässt auf ein Stockwerkssystem im Felsgrundwasser schliessen, in welchem in vertikaler Richtung nur in beschränktem Ausmass Verbindungen vorhanden sind. So hat beispielsweise das in der technischen Nische KN 106 entnommene Felsgrundwasser länger als 35 Jahre benötigt, um die rund 65 m Molassefelsüberlagerung zu durchströmen.

Résumé

Le percement du tunnel du Grauholz, d'environ 12 m de diamètre, a offert une occasion unique d'étudier la lithologie et les caractéristiques hydrogéologiques des éléments architecturaux de la Molasse d'eau douce inférieure (USM) (v. KELLER et al. 1990). L'excavation a été faite au tunnelier mixte («Mixschild») aussi bien en roche meuble qu'en roche consolidée. Dans les roches meubles, la technique du soutènement hydraulique par bain de bentonite (principe du bouclier à bentonite) a été utilisée. En roche consolidée, en revanche, aucune mesure de protection particulière n'a été utilisée (tunnelier conventionnel, à sec). Même ainsi, des observations intéressantes ont pu être effectuées sur le front de taille. Comme le relevé détaillé des surfaces accessibles à travers la tête foreuse demandait 3 à 5 heures selon la complexité lithologique, celui-ci devait être effectué lors des arrêts pour travaux d'entretien, en général durant les week-ends. Pendant les 45 min nécessaires pour introduire les voussoirs, une rapide observation du front de taille pouvait être faite, mais pas de levé détaillé.

Dans le tunnel du Grauholz, les éléments architecturaux à grain grossier dominants sont les lits de méandres et les dépôts de crevasse qui, sur les 23 levés du front de taille, représentent à peu près les $\frac{3}{4}$ de la surface. Le tunnel permet d'observer la structure des éléments architecturaux dans l'espace: lorsque la distance entre les affleurements est faible, on observe que le passage entre les éléments «levées naturelles» et «dépôts d'inondation» (qui constituent la matrice de l'USM) est généralement plus complexe que les zones à affleurements espacés ne le laissent supposer.

Les affleurements du Grauholz (front de taille, niches), d'une surface importante et non altérés, ainsi que les forages, ont dégagé des détails de faciès intéressants: au profil N° 19 (Annexe 5), on a par exemple pu observer un arbuste carbonisé, enraciné sur un grand galet mou, dans un dépôt de méandre déposé en plusieurs phases. Cette même unité sédimentaire renferme par ailleurs un horizon pédologique riche en nodules calcaires et en minéraux argileux gonflants, en partie remanié après son dépôt.

Les zones perméables non liées à des discontinuités ont été cartographiées dans le but d'améliorer nos connaissances sur les cheminements préférentiels de l'eau. Ces levés hydrologiques ont permis de constater que les éléments architecturaux «dépôts d'inondation» (avec paléosols à grain fin et dépôts de marais) et, sauf exception, «levées naturelles» restaient secs même plusieurs heures après l'interruption des travaux d'excavation, alors que les lits de méandres et les dépôts de crevasse étaient toujours plus ou moins aquifères.

La diagenèse et les paramètres pétrophysiques d'échantillons de roche provenant du front de taille ou de niches ont été étudiés pour déterminer les relations entre la porosité et la perméabilité des différents éléments architecturaux. Dans les grès des lits de méandres, dépôts de crevasse et levées naturelles étudiés, les pores séparant les grains détritiques ont une taille supérieure à 2 μm . La porosité totale moyenne est très différente selon les éléments architecturaux. La porosité absolue (porosité totale) est de 23,4% en moyenne

pour les grès des lits de méandres, de 15,4% pour les grès des dépôts de crevasse, de 13,5% pour les grès fins et les siltites des levées naturelles et de 11,2% pour les pélites des dépôts d'inondation. La porosité totale dépend essentiellement du degré de cimentation par la calcite.

La perméabilité des grès des lits de méandres va de 3 à >1800 md (soit $2,8 \cdot 10^{-8}$ à $>1,7 \cdot 10^{-5}$ m/s), celle des dépôts de crevasse gréseux de <0,05 à 540 md ($<4,7 \cdot 10^{-10}$ à $5,1 \cdot 10^{-6}$ m/s). Seuls trois échantillons de levées naturelles présentent une perméabilité mesurable comprise entre 6 et 49 md ($5,7 \cdot 10^{-8}$ et $4,7 \cdot 10^{-7}$ m/s). La perméabilité des deux échantillons de dépôts d'inondation n'est pas mesurable. Celle des grès des lits de méandres ainsi que celle des grès des dépôts de crevasse dépend nettement de la porosité totale: une porosité élevée entraîne une perméabilité forte. Mais il y a des exceptions: si la teneur en matière argileuse et en calcite a augmenté lors de la pédogenèse, ou si la cimentation est légèrement plus forte au contact avec les couches imperméables du toit ou du mur, la porosité totale, et donc aussi la perméabilité, se trouvent nettement réduites.

Quelques analyses chimiques et des mesures isotopiques ont été effectuées sur les deux échantillons d'eau collectés dans les niches du tunnel, ce qui a permis d'appréhender les conditions extrêmes: couverture et conductibilité électrique maximum et minimum. Les valeurs des isotopes stables et de la minéralisation donnent une image cohérente des conditions d'infiltration et du temps de séjour dans la roche meuble et, surtout, dans la roche consolidée. La stratification de l'USM en couches relativement perméables (lits de méandres, dépôts de crevasse) et en couches peu à très peu perméables (levées naturelles, dépôts d'inondation) permet de conclure à l'existence d'un système aquifère multicouche, dans lequel les communications verticales sont difficiles. Ainsi, il a fallu par exemple plus de 35 ans à l'eau prélevée dans la niche KN 106 pour traverser, en direction de la profondeur, 65 m de molasse.

Inhaltsverzeichnis

	Seite
Vorwort	I
Préface	II
Prefazione	II
 Zusammenfassung	 IV
Résumé	VI
 Verzeichnis der Figuren im Text	 X
Verzeichnis der Tabellen im Text	X
Verzeichnis der Beilagen	XI
 1. Einleitung	 1
 2. Geologischer Überblick	 2
 3. Lithologisch-sedimentologische Aufnahmen der Ortsbrust	 3
3.1 Rahmenbedingungen während der Ortsbrustaufnahmen	3
3.2 Sedimentäre Architekturelemente	4
3.2.1 Rinnengürtel (RG)	5
3.2.2 Durchbruchsfächer und -rinnen (DFR)	7
3.2.3 Uferwälle (UW)	8
3.2.4 Überschwemmungsebene (U)	8
3.2.5 Paläoböden und Sümpfe (/P bzw. /S)	9
3.3 Prozentualer Anteil der Architekturelemente im Tunnelquerschnitt	10
3.4 Entnahme von Gesteinsproben	10
3.5 Aufnahme von hydraulisch wirksamen Trennflächen	10
3.6 Hydrologische Aufnahmen	13
3.7 Entnahme von Wasserproben	13
 4. Lithologisch-sedimentologische Aufnahmen in den technischen Nischen	 14
4.1 Entnahme von Gesteinsproben	15
4.2 Entnahme von Wasserproben	17
 5. Längsausdehnung der Architekturelemente in Richtung der Tunnelachse	 19
 6. Untersuchungsergebnisse	 20
6.1 Resultate der petrophysikalischen Untersuchungen	20
6.2 Vergleich mit Ergebnissen aus anderen Untersuchungsgebieten	24
6.2.1 Gesamtporosität	24
6.2.2 Permeabilität	25
6.3 Resultate der Wasseruntersuchungen	27
 Literaturverzeichnis	 30

Verzeichnis der Figuren im Text

Fig. 1	Einstiegsmöglichkeit zur Ortsbrust durch sechs Luken zwischen Schneidrad und Schild	3
Fig. 2	Vereinfachtes Faziesmodell der USM im nördlichen Molassebecken	5
Fig. 3	Untertagbaustrecke des Grauholztunnels	6
Fig. 4	Abhängigkeit zwischen der an den Probenzylindern gemessenen Gesamtporosität und der Permeabilität	23
Fig. 5	Vergleich zwischen den an Probenzylindern und in Bohrungen im Grauholz gemessenen Durchlässigkeiten der verschiedenen Architekturelemente und den an anderen Untersuchungsstandorten gemessenen Werten	26
Fig. 6	Beziehung zwischen $\delta^{18}\text{O}$ - und $\delta^2\text{H}$ -Gehalten ausgewählter Wasserproben	28

Verzeichnis der Tabellen im Text

Tab. 1	Prozentualer Anteil der Architekturelemente in Richtung der Tunnelachse zwischen Tunnel-km 7,860 und 9,840	10
Tab. 2	Gesteinsproben, die an der Ortsbrust des Grauholztunnels während Vortriebsunterbrüchen entnommen wurden	11/12
Tab. 3	Technische Nischen, die im SBB-Grauholztunnel auf der Festgesteinsstrecke (USM) ausgebrochen wurden	14
Tab. 4	Anzahl der in den verschiedenen Architekturelementen an der Ortsbrust und in den technischen Nischen entnommenen Gesteinsproben	15
Tab. 5	Gesteinsproben aus den technischen Nischen des Grauholztunnels	16
Tab. 6	Wasserprobenentnahmen aus den technischen Nischen im Grauholztunnel	18
Tab. 7	Bohrungen, die in die geologischen Längsprofile Nr. 1–6 integriert wurden	19
Tab. 8	Resultate der petrophysikalischen Untersuchungen	21
Tab. 9	Zusammenhang zwischen Gehalt an authigenem Karbonat, Gesamtporosität und Permeabilität in Rinnengürtelablagerungen	22
Tab. 10	Vergleich der in den verschiedenen Architekturelementen an unterschiedlichen Untersuchungsstandorten gemessenen Gesamtporositäten	25
Tab. 11	Chemische Beurteilung und Messung von Wasserstoff- und Sauerstoffisotopen ausgewählter Wasserproben	27

Verzeichnis der Beilagen

Beilage 1	Geologisches Längsprofil des SBB-Grauholztunnels (oben) und Tunnelbohrmaschine (unten)
Beilage 2	Geologische Tunnelprofile Nr. 5 und Nr. 8
Beilage 3	Geologische Tunnelprofile Nr. 11 und Nr. 12
Beilage 4	Geologische Tunnelprofile Nr. 13 und Nr. 15
Beilage 5	Geologische Tunnelprofile Nr. 18 und Nr. 19
Beilage 6	Geologische Tunnelprofile Nr. 20 und Nr. 22
Beilage 7	Geologische Längsprofile Nr. 6 und Nr. 5
Beilage 8	Geologische Längsprofile Nr. 4 und Nr. 3
Beilage 9	Geologische Längsprofile Nr. 2 und Nr. 1

1. Einleitung

Der Aufbau eines Datensatzes über die geologischen und hydrogeologischen Verhältnisse geringdurchlässiger Gesteine mit grosser regionaler Ausdehnung bildet einen Schwerpunkt im Arbeitsprogramm der Landeshydrologie und -geologie (LHG). Dazu zählt die im schweizerischen Mittelland anstehende «aquitane» Untere Süsswassermolasse (USM), die generell als geringdurchlässig angesehen wird (Aquitard). Ausser der Frage nach der faziellen Gliederung der USM ist eine der zentralen offenen Fragen die Wasserführung in den verschiedenen faziellen Bereichen.

Bei einem Tunneldurchmesser von annähernd 12 m bot sich während des Baus des Grauholtz隧nells eine günstige Gelegenheit, die Abfolge der sedimentären Architekturelemente (KELLER et al. 1990, KELLER 1992, PLATT & KELLER 1992) praktisch dreidimensional zu verfolgen und hydrogeologisch zu charakterisieren.

Im Auftrag der Landeshydrologie und -geologie wurden vom 22. September 1991 bis 14. September 1992 im SBB-Grauholtz隧nel bei Bern geologische und hydrogeologische Aufnahmen der USM ausgeführt. Folgende Aufgabenstellungen standen im Vordergrund:

- Lithologisch-sedimentologische Aufnahme der USM sowie die Aufgliederung in die verschiedenen sedimentären Architektureinheiten (Architekturelemente) nach KELLER et al. (1990).
- Erfassung der Ausdehnung der Architekturelemente in Richtung der Tunnelachse durch die Korrelation der einzelnen Brustbilder, kombiniert mit bestehenden Bohrprofilen und Aufnahmen im Bereich der grossen und kleinen technischen Nischen.
- Aufnahme von hydraulisch wirksamen Trennflächen bezüglich Länge, Öffnungsweite und Verlauf in den einzelnen sedimentären Architekturelementen sowie Kartierung von nicht an Trennflächen gebundenen wasserführenden Zonen als Grundlage zur Abschätzung der bevorzugten Wasserwegsamkeit in der USM.
- Entnahme von Gesteins- und Wasserproben in den verschiedenen Architekturelementen. Konservierung der Gesteinsproben durch Einschweissen in Plastiksäcke.

Insgesamt wurden im genannten Zeitraum 23 geologische Tunnelprofile sowie 8 kleine und 2 grosse technische Nischen im Massstab 1:50 kartiert. Aus der Ortsbrust wurden 43, aus den technischen Nischen 21 Gesteinsproben genommen und in Plastiksäcke eingeschweisst. Zusätzlich wurden aus 3 technischen Nischen insgesamt 5 Wasserproben entnommen.

2. Geologischer Überblick

Der SBB-Grauholztunnel ist Teil der Grauholzlinie, die Bern-Löchligut im Westen mit dem Raum Mattstetten–Hindelbank verbindet und so die bestehende Bahnlinie über Zollikofen entlasten soll. Der Tunnel hat eine Gesamtlänge von 6'294 m, wovon 764 m im Tagbau und 5'548 m bergmännisch mit einem Mixschild vorgetrieben worden sind. In der Beilage 1 ist das Schneidrad des Mixschildes abgebildet, mit dem der bergmännische Vortrieb sowohl in den Locker- als auch in den Festgesteinsstrecken im Grauholztunnel vorgenommen wurde. Im Lockergestein erfolgte der Abbau der Ortsbrust unter Flüssigkeitsstützung (Prinzip Hydroschild) und im Festgestein (USM) ohne besondere Stützmassnahmen, also im Trockenverfahren (Prinzip konventionelle Tunnelbohrmaschine).

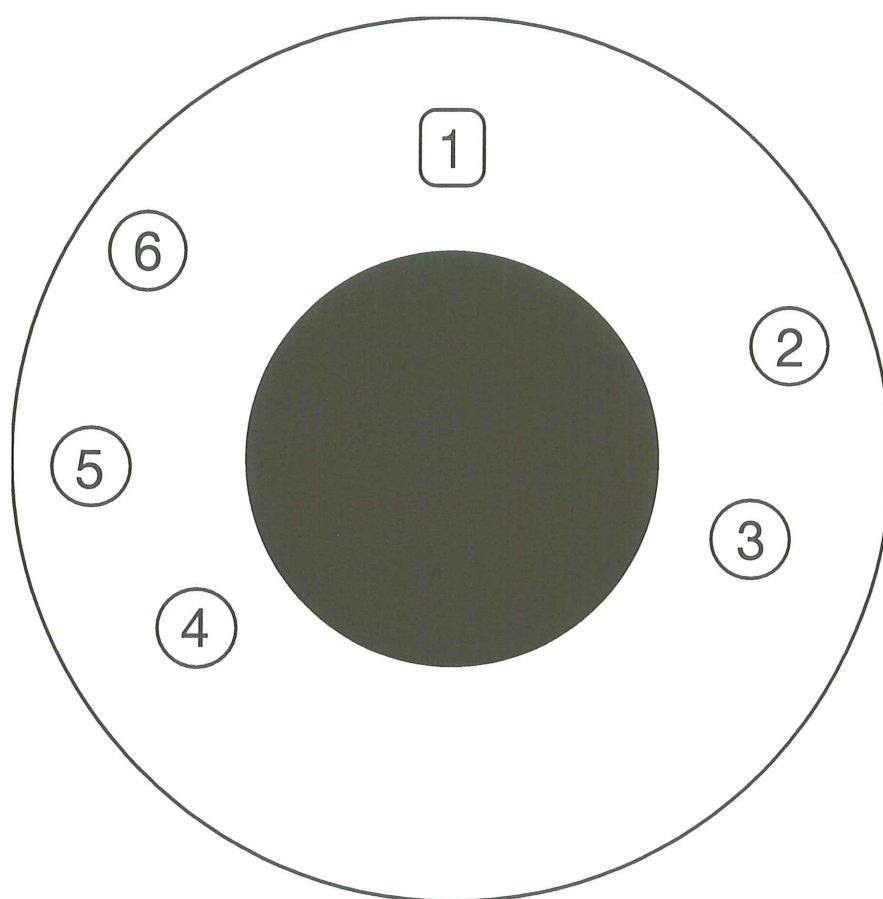
Der bergmännische Vortrieb, der von Nordosten nach Südwesten erfolgte, kann in folgende vier Abschnitte eingeteilt werden (vgl. auch schematisches geologisches Übersichtsprofil in Beilage 1, oben):

- (1) km 11,340–10,620: Lockergesteine (fluviatile Sande und Silte, glaziale und randglaziale Ablagerungen).
- (2) km 10,620–9,600: USM mit geringer Überlagerung und teilweise kleinem Abstand des Tunnelfirstes zum Lockergestein.
- (3) km 9,600–7,840: USM mit grosser Festgesteinsüberlagerung.
- (4) km 7,840–5,820: Lockergesteine (fluvioglaziale, glaziolakustrine und glaziale Ablagerungen).

3. Lithologisch-sedimentologische Aufnahmen der Ortsbrust

3.1 Rahmenbedingungen während der Ortsbrustaufnahmen

Die Aufnahmen der Ortsbrust wurden mehrheitlich an Wochenenden während Vortriebsunterbrüchen parallel zu den regelmässig erforderlichen Unterhaltsarbeiten durchgeführt, da durch die geologischen Untersuchungen der Tunnelvortrieb nicht behindert und keine zusätzlichen Umtriebe für die Bauunternehmung verursacht werden durften. Die Aufnahmen erfolgten zwischen Tunnel-km 9,840 und 7,870, im Abschnitt mit genügender Molasseüberdeckung, wo der Vortrieb ohne Unterstützung durch Stützflüssigkeit und/oder Druckluft ausgeführt werden konnte.



Figur 1: Einstiegsmöglichkeit zur Ortsbrust durch sechs Luken zwischen Schneidrad und Schild. Schwarz markiert ist der nicht begehbare Teil in der Mitte des Schneidrades (M = 1:100).

Der Einstieg zur Ortsbrust war nur durch insgesamt 6 Einstiegsluken zwischen Schneidrad und Schild möglich (Fig. 1 und Beilage 1, unten). Während der Unterhaltsarbeiten war ein Drehen des Schneidrades nicht möglich, so dass der Zugang zur Ortsbrust durch die einzelnen Einstiegsluken je nach Stellung des Schneidrades durch dessen Speichen verhindert wurde. Auf der linken Seite des Schneidrades, in Vortriebsrichtung gesehen, blieb der Zugang zur Luke 4 (Fig. 1) bis und mit Tunnelprofil Nr. 7 verwehrt. Ein Entlüftungsrohr verunmöglichte das Öffnen der Falltüre in einem Gitterrost unterhalb der Luke 5. In den Fällen, in

denen das Schneidrad für die Unterhaltsarbeiten an den Meisseln zu weit in den Schild zurückgezogen worden war, war ein Begehen des untersten Segmentes zwischen den Luken 3 und 4 nicht mehr möglich (Tunnelprofile Nr. 8–10, 12–20). In Figur 1 ist der nicht begehbare Teil des Schneidrades schwarz markiert. Er entspricht dem inneren Teil des Schneidrades, an dem die Speichen befestigt sind (Beilage 1, unten).

Die 6 Einstiegsluken wurden jeweils als Referenzpunkte benutzt, um die Stellung des Schneidrades und damit die Lage der zugänglichen Segmente zu bestimmen. Ohne die Zuhilfenahme von Aluminiumleitern und Halogenlampen wäre die geologische Aufnahme in den einzelnen Segmenten nicht in diesem Detaillierungsgrad möglich gewesen. Beide Hilfsmittel wurden jeweils von der örtlichen Bauleitung zur Verfügung gestellt.

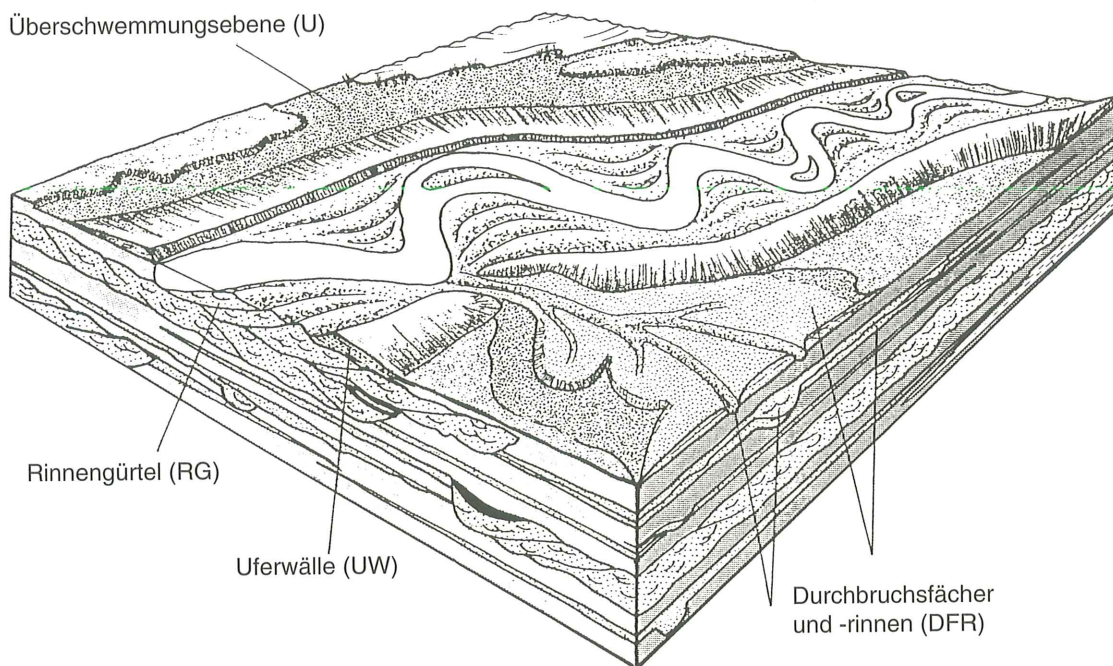
An den Wochenenden vom 7./8. März und 9./10. Mai 1992 wurden im Tunnel keine Arbeiten ausgeführt. In dieser Zeit war der Tunnel abgeschlossen, und es konnten keine Ortsbrustaufnahmen ausgeführt werden.

3.2 Sedimentäre Architekturelemente

In den terrestrischen Ablagerungen der jüngeren USM («Aquitane») können sowohl im Aufschluss wie in Bohrungen im wesentlichen *vier Faziestypen* unterschieden werden (KELLER et al. 1990). Sie sind charakterisiert durch ihre unterschiedliche Genese und eine spezifische Geometrie. Weiter können sowohl in der Petrographie (Korngrösse und mineralogische Zusammensetzung) als auch in der Petrophysik (Porosität und Permeabilität) Unterschiede beobachtet bzw. gemessen werden. Diese Faziestypen werden als *Architekturelemente* der USM bezeichnet und wie folgt abgekürzt: **RG** = Rinnengürtel, **DFR** = Durchbruchsfächer und -rinnen, **UW** = Uferwälle und distale Überschwemmungssande und **UPS** = Überschwemmungsebene mit Paläoböden und Sümpfen (Fig. 2).

Die Anwendung dieser Nomenklatur in der Praxis hat gezeigt, dass es sinnvoll ist, das Architekturelement UPS aufzuteilen in die Architekturelemente **U** (Überschwemmungsebene), **UP** (Paläoböden der Überschwemmungsebene) und **S** (Sümpfe) sowie in **IP** und **IS** für die pedogenisierten bzw. versumpften Bereiche der Architekturelemente RG, DFR und UW. Diese Aufteilung erfolgt vor allem aus petrophysikalischen Gründen: Ein pedogenisierter RG, zum Beispiel, weist eine ganz andere Permeabilität auf als pedogenisierte Sedimente der Überschwemmungsebene.

Die Lage der 23 geologischen Tunnelprofile, die zwischen den Tunnel-km 9,840 und 7,870 aufgenommen wurden, ist in Figur 3 festgehalten. Eine Auswahl von 10 lithologisch-sedimentologischen Aufnahmen ist in den Beilagen 2–6 zusammengestellt. Die Überlagerung mit Molassefels beträgt in den Tunnelprofilen Nr. 1–4 ca. 4 m (Tunnelprofil Nr. 4) bis 7 m (Tunnelprofil Nr. 2). Ab Tunnelprofil Nr. 5 (Überlagerung ca. 14 m) vergrössert sich die Überlagerung stetig bis zu einem Maximum von ca. 85 m im Tunnelprofil Nr. 14. Ab Tunnelprofil Nr. 18 verkleinert sich diese Überlagerung wieder und beträgt im Tunnelprofil Nr. 22 ca. 40 m und im Tunnelprofil Nr. 23 ca. 15 m (GEOTECHNISCHES INSTITUT AG 1987a, b, 1989 und 1991a).

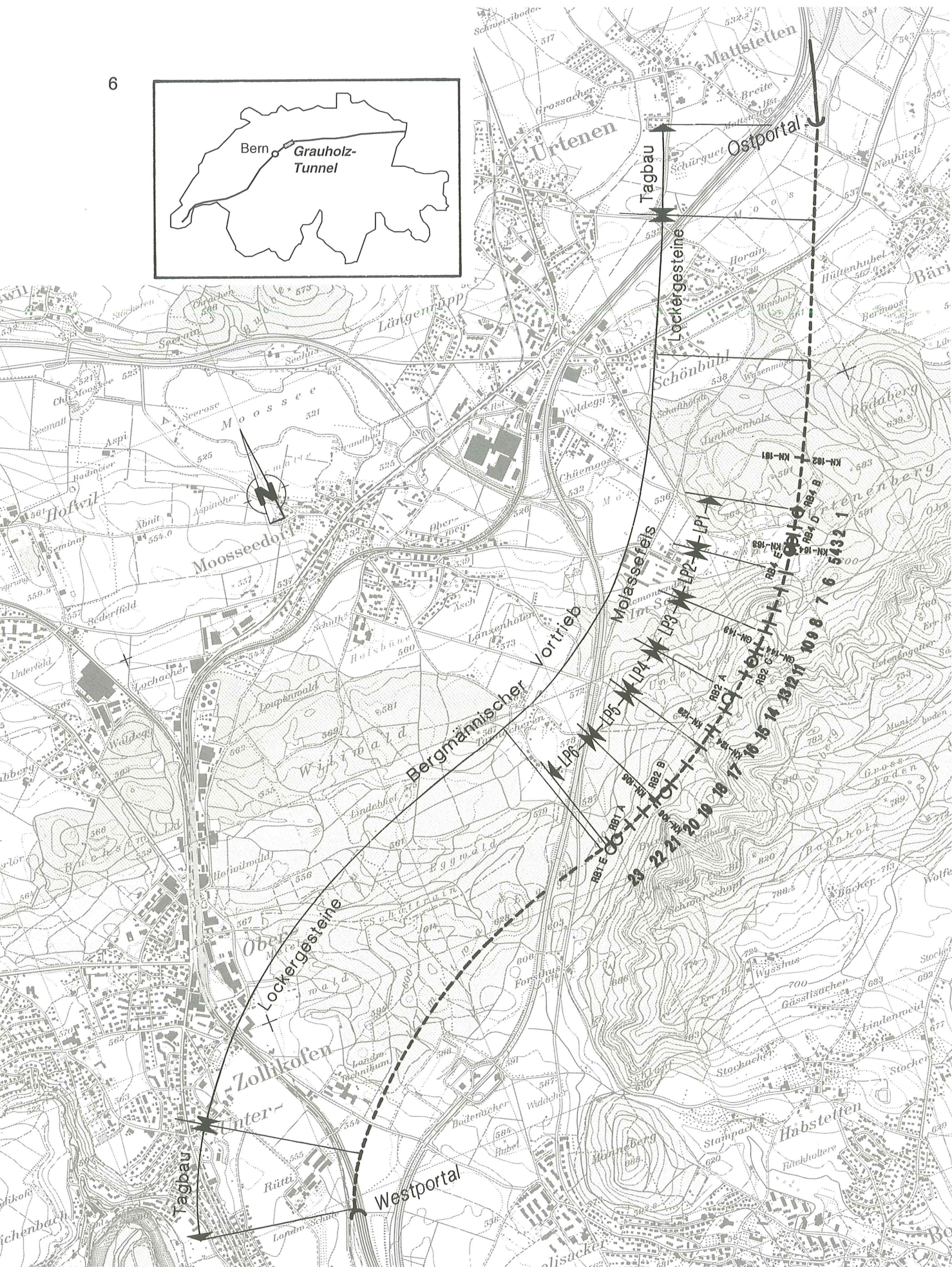


Figur 2: Vereinfachtes Faziesmodell der USM im nördlichen Molassebecken (aus PLATT & KELLER 1992, leicht verändert).

Im Folgenden werden die durch den Grauholztunnel aufgeschlossenen Architekturelemente kurz charakterisiert.

3.2.1 Rinnengürtel (RG)

Rinnenablagerungen bestehen aus mittel- bis grobkörnigen Sandsteinen, deren Mächtigkeit in der Regel mehr als 2 m, aber selten mehr als 6 m beträgt. Dickere Pakete zeigen interne Erosionsflächen. In den Tunnelprofilen wurden die lithologischen Grenzen dicker ausgezogen als die internen Erosionsflächen, welche mit einem dünnen Strich markiert wurden. Die tabularen Körper sind lateral weit ausgedehnt (vgl. dazu auch die geologischen Längsprofile Nr. 1–6 in den Beilagen 7–9). Die Rinnenfüllungen weisen an der Basis eine scharfe Erosionsdiskordanz auf (Tunnelprofile Nr. 5, 8, 13 und 20 in den Beilagen 2, 4 und 6). Im Dach kann auf kurze vertikale Distanz (ca. 0,5–1,0 m) ein gradueller, bioturbierter und/oder pedogenisierter Übergang zum Hangenden festgestellt werden (Tunnelprofile Nr. 18 und 19 in der Beilage 5). Ab und zu kann *trogförmige Schrägschichtung* von *Grossrippeln* (Tunnelprofile Nr. 11, 15 und 22 in den Beilagen 3, 4 und 6) oder an der Basis *Kreuzschichtung* (Tunnelprofil Nr. 22 in Beilage 6) beobachtet werden.



Figur 3: Untertagbaustrecke des Grauholtstunnels (M = 1:25'000). Zwischen Tunnel-km 7,870 und 9,840 wurden 23 geologische Tunnelprofile aufgenommen. LP = geologisches Längsprofil, KN = Kleine technische Nische, GN = Grosse technische Nische, RB = Rotationskernbohrung.

In der «aquitanen» USM können sowohl bodenfracht- wie auch suspensionsfrachtreiche Mischfrachtrinnen unterschieden werden (KELLER et al. 1990). Die bodenfrachtreichen Paläorinnen dominieren in der USM des Grauholzes, sie sind generell breiter und kontinuierlicher als die suspensionsfrachtreichen Rinnen. An der Basis dieser bodenfrachtreichen Mischfrachtrinnen konnten nicht selten cm- bis dm-grosse *Aufarbeitungsgerölle* (Schlickgerölle, selten Extraklasten; Tunnelprofile Nr. 11, 12, 15, und 22 in den Beilagen 3, 4 und 6), häufig auch *Sohlpflaster* (Tunnelprofile Nr. 15, 19, 20 und 22 in den Beilagen 4 bis 6) festgestellt werden. Ebenfalls treten *verkohlte Pflanzenreste* auf (Tunnelprofile Nr. 19 und 20 in den Beilagen 5 und 6). Im Tunnelprofil Nr. 19 (Beilage 5) wurde ein auf einem grossen Schlickgeröll aufgewachsener, verkohlter Strauch samt Wurzelstock beobachtet. Generell sind die Rinnenfüllungen grobkörniger als die Durchbruchsfächer und die Uferwallablagerungen.

3.2.2 Durchbruchsfächer und -rinnen (DFR)

Durchbruchsfächer sind fein- bis mittelsandige tabulare Sedimentkörper. Durchbruchsrinnen wurden in den 23 geologischen Tunnelprofilen keine angetroffen. Durchbruchsfächer sind rasch in die Schwemmebene sedimentierte Hochwasserablagerungen. Sie sind kaum strukturiert. Als Ausnahme wurde im Tunnelprofil Nr. 18 (Beilage 5) *Rippelschichtung* beobachtet. Es können geringmächtige isolierte Sandsteinbänke und mächtigere gestapelte Einheiten unterschieden werden. Die gestapelten Einheiten zeigen eine erosive Basis (Tunnelprofil Nr. 11, Beilage 3). Teilweise sind verschiedene Schüttungen durch aus der Suspension abgesetzte dünne Tonschichten, sogenannte *Tonhäute*, voneinander abgetrennt. Die oft repetiert auftretenden isolierten Bänke (0,5–2,0 m mächtig) werden durch dm-dicke Ton- und Siltsteinbänke der Überschwemmungsebene voneinander getrennt (Tunnelprofil Nr. 5, Beilage 2).

Die Basis gegenüber den Sedimenten der Überschwemmungsebene ist scharf, dafür ist im Hangenden oft ein gradueller Übergang zu diesen Ablagerungen festzustellen (Pedogenisierung). Diese Sandsteine sind im Hangenden häufig marmoriert (Fleckung, «mottling») und zeigen ein blockiges oder prismatisches Gefüge mit vertikalen zylindrischen Röhren von 1–2 mm Durchmesser, die mit rotem oder ockerfarbenem Ton oder Silt aus dem Hangenden verfüllt sind (Wurzelspuren) (Tunnelprofile Nr. 5 und 8, Beilage 2). An der Basis ist gegenüber den Uferwallablagerungen ein allmählicher Wechsel von rippellaminierten Grobsilt- oder Feinsandsteinen zu massigeren Mittel- oder Feinsandsteinen festzustellen. Werden Durchbruchsfächer von Uferwallablagerungen überlagert, ist der Kontakt scharf (Tunnelprofile Nr. 12 und 20, Beilagen 3 und 6).

3.2.3 Uferwälle (UW)

Weil sich in der Praxis die Unterscheidung zwischen Uferwallablagerungen und distalen Überschwemmungssanden (vgl. KELLER et al. 1990) als schwierig erwies, wurden in den geologischen Tunnelaufnahmen nur noch Uferwallablagerungen ausgeschieden. Diese bestehen aus Grobsilt- und Feinsandsteinen. Es sind 10 bis 50 cm mächtige, tabulare Sedimentkörper. Sie sind mit den feinkörnigen Sedimenten der Überschwemmungsebene verfigert (Tunnelprofile Nr. 8, 12, 13 und 18 in den Beilagen 2 bis 5). Lateral sind sie 10 bis 30 m weit, lokal über mehr als 30 m verfolgbar. Häufig sind sie strukturiert: ebene Lamination, Strömungsrippeln, Kletterrippeln, Wulstschichtung, Belastungs- und Entwässerungsstrukturen. Im Tunnelprofil Nr. 18 (Beilage 5) enthalten die *Strömungsrippeln* teilweise *cm-grosse Aufarbeitungsgerölle*.

Kletterrippeln wie auch Wulstschichtung, Belastungs- und Entwässerungsstrukturen zeigen eine rasche Ablagerung dieser relativ feinkörnigen Sedimente auf eine wassergetränkte, schlammige Flussebene an. Die Gemeinschaft mit den zwischengelagerten schwach gefleckten Schlammsteinen deutet auf eine Ablagerung aus suspensionsreichem Hochwasser im Bereich der Uferwälle hin. Über den Ablagerungen der Überschwemmungsebene (Tunnelprofile Nr. 5, 12, 13 und 18 in den Beilagen 2 bis 5) und des Rinnengürtels (Tunnelprofile Nr. 8 und 20, Beilagen 2 und 6) setzen die Uferwallablagerungen mit einem scharfen Kontakt ein. Aus den Ablagerungen der Durchbruchsfächer gehen sie eher graduell hervor. Der Übergang zu den Sedimenten der Überschwemmungsebene ist aufgrund der Pedogenisierung und der Bioturbation mit zunehmender Fleckung fließend.

3.2.4 Überschwemmungsebene (U)

Die Sedimente der Überschwemmungsebene, die feinstkörnigen Ablagerungen der USM-Abfolge (Schlammsteine, «mudstones»), wurden durch Hochwasser in die flussfernen Bereiche der Schwemmebene transportiert und dort aus der Suspension abgesetzt. Sie sind laminiert oder entschichtet (s. u.), stark marmoriert bzw. gefleckt und zeigen eine Vielfalt an Farben: beige, ocker, braun, grün bis graugrün, hell- bis dunkelgrau, fleisch- bis blutrot, purpur oder schwarz. Grund dafür sind Bodenbildungsprozesse und Versumpfung (Kap. 3.2.5).

Das Architecturelement **U** ist selten mächtiger als 2 m. Es besteht aus 10–100 cm dicken Zyklen, bei denen meist eine Zunahme der Fleckung gegen das Hangende bis hin zu roten oder schwarzen Horizonten mit scharfer Obergrenze festzustellen ist. Diese Zyklen entstanden durch komplexe Überlagerung mehrerer, je nach Relief und Entwässerung der Schwemmebene verschieden ausgebildeter Bodenprofile. Das primäre Sedimentgefüge wurde grösstenteils durch Bioturbation, Wurzelaktivität sowie Entschichtung infolge wiederholter Ausdehnung und Schrumpfung von Tonmineralien zerstört.

In nach der Ablagerung noch nicht konsolidierten Schlammsteinen der Überschwemmungsebene wurden im Liegenden von Rinnengürtelablagerungen *Sandlinsen* (Tunnelprofil Nr. 19, Beilage 5) und *Schlickgerölle* (Tunnelprofil Nr. 20, Beilage 6) beobachtet.

3.2.5 Paläoböden und Sümpfe (/P bzw. /S)

Anders als in KELLER et al. (1990) wurden neben feinkörnigen Paläoböden und Sümpfen der Überschwemmungsebene (**UP** bzw. **S**) zusätzlich die aus den Architekturelementen RG, DFR und UW graduell hervorgehenden Paläoböden und Sümpfe ausgeschieden (tonig-siltige Fein- und/oder Mittelsandsteine). Diese werden mit dem Zusatz **/P** für Paläoböden (Tunnelprofile Nr. 13 und 18–20, Beilagen 4–6), oder, wo ein dunkelgrauer oder schwarzer Horizont auf Sumpfbildung hinweist, mit **/S** bzw. **/PS** bezeichnet (Tunnelprofil Nr. 5, Beilage 2).

Die roten Paläoböden können neben röhren- und schnurförmigen Strukturen (mit rotem oder ockerfarbenem Ton oder Silt aus dem Hangenden verfüllte Wurzelspuren) auch rundliche Kalkknöllchen (Caliche, «calcrete») von wenigen mm Durchmesser enthalten (Tunnelprofil Nr. 19, Beilage 5). Caliche entsteht in semiaridem Klima bei tiefem Grundwasserspiegel. Pedogene Rutschspiegelungen («slickensides») dokumentieren schlecht entwässerte, tonmineralreiche Böden. Sie deuten in der Regel auf einen Anteil von mehr als 30% quellfähigen Tonmineralien hin. Die Dauer der Bodenbildung in der Schwemmebene wird allgemein mit mindestens 10'000 Jahren angegeben; reife Caliche-Bildungen benötigen noch längere Zeiträume (vgl. BIRKELAND 1984). In den USM-Bodenprofilen im Grauholzgebiet wurde eine untergeordnete Caliche-Bildung festgestellt, was auf eine hohe Akkumulationsrate oder auf ungünstige klimatische Bedingungen (kühler oder humider) hinweist.

Die dunkelgrauen bis schwarzen Horizonte wurden in sumpfigen Bereichen gebildet, in denen reduzierende Bedingungen herrschten und deshalb organisches Material erhalten blieb. In den im Tunnel angetroffenen Sumpfhorizonten (Tunnelprofil Nr. 5, Beilage 2) wurden keine Fossilien gefunden.

3.3 Prozentualer Anteil der Architekturelemente im Tunnelquerschnitt

In den 23 Ortsbrustaufnahmen besitzen die verschiedenen Architekturelemente in Richtung der Tunnelachse zwischen km 9,840 und 7,860 folgende prozentuale Flächenanteile (Tab. 1):

Architekturelement	Prozentualer Anteil
RG	57,60%
DFR	13,70%
RG/P und DFR/P	1,50%
UW und UW/P	14,80%
U und UP	12,15%
S	0,25%

Tabelle 1: Prozentualer Anteil der Architekturelemente in Richtung der Tunnelachse zwischen Tunnel-km 7,860 und 9,840. Architekturelemente: RG = Rinnengürtel, DFR = Durchbruchsfächer, UW = Uferwall, U = Überschwemmungsebene, UP = pedogenisierte Sedimente der Überschwemmungsebene, /P = pedogenisiert, S = Sümpfe.

Im Grauholz dominieren ganz klar die grobkörnigeren Architekturelemente RG und DFR. Zusammen mit den pedogenisierten Abschnitten nehmen sie in den geologischen Tunnelprofilen gegen drei Viertel der Fläche ein.

3.4 Entnahme von Gesteinsproben

An der Ortsbrust wurde insgesamt 43 Gesteinsproben entnommen (Tab. 2a+b). In den jeweiligen Tunnelprofilen ist die Lage der Probennahmestellen mit einem Quadrat eingezeichnet. Bei der Probennahme wurde der Schwerpunkt auf die durchlässigeren Architekturelemente gelegt. In Tabelle 4 ist die Anzahl der Gesteinsproben, die in den verschiedenen Architekturelementen entnommen wurden, aufgelistet. Die Proben wurden zur Lagerung in Plastik vakuumverpackt.

3.5 Aufnahme von hydraulisch wirksamen Trennflächen

In sämtlichen 23 lithologisch-sedimentologisch untersuchten Tunnelquerschnitten wurden keine hydraulisch wirksamen Trennflächen beobachtet. Mit *Rutschharnischen* belegte Klüfte im Architekturelement RG wurden in den Tunnelprofilen 13 (Beilage 4) und Nr. 21 (in diesem Bericht nicht publiziert) angetroffen. Im Tunnelprofil 21 waren einzelne *Klüfte* auch mit einer *harten Kluftfüllung* belegt. Zwei *geschlossene Klüfte* mit geringer lateraler Ausdehnung in den Architekturelementen DFR und UP wurden im Tunnelprofil Nr. 1 (in diesem Bericht nicht publiziert) angefahren.

Tunnel- profil Nr.	Probe Nr.	Lithologie	Architektur- element	Farbe	Bemerkungen
1	1/1	Fein- und Mittelsandstein	DFR	ocker, grau-grün	
2	2/1	toniger Siltstein mit wenig Feinsand	S	grau-schwarz	
3	3/1	siltiger Fein- und Mittelsandstein	DFR	ocker-braun, grau	mit Tonhaut
4	4/1	Mittel- und Grobsandstein	RG	grau-grün	
5	5/1	Mittel- und Grobsandstein	RG	grau-grün	
6	6/1 6/2	siltiger Feinsandstein Mittel- und Grobsandstein	UW RG	ocker, grau grau-grün	
7	7/1 7/2	Fein- und Mittelsandstein tonig-siltiger Fein- und Mittelsandstein	DFR DFR/P	ocker, grau ocker-braun	
8	8/1 8/2 8/3	Siltiger Feinsandstein und toniger Siltstein Fein- und Mittelsandstein Mittel- und Grobsandstein	UW und UP RG RG	ocker und rot, ocker, grau ocker, grau-grün grau-grün	Wechselagerung UW-UP-UW
9	9/1 9/2	Mittel- und Grobsandstein Fein- und Mittelsandstein mit wenig Grobsand	RG DFR	grau-grün ocker, grau	
11	11/1 11/2	Fein- und Mittelsandstein Mittel- und Grobsandstein	DFR RG	ocker, wenig grau grau-grün	
12	12/1 12/2	Siltstein siltiger Feinsandstein	UP UW	ocker, rot, grau ocker, grau	
14	14/1 14/2	Mittel- und Grobsandstein toniger Siltstein mit wenig Sand	RG UP und U	grau-grün ocker, grau, rot	mit Aufarbeitungsgeröll (U und S)
15	15/1 15/2	Mittel- und Grobsandstein Mittel- und Grobsandstein	RG RG	grau-grün und rötlich grau-grün	

Tabelle 2a: Gesteinsproben, die an der Ortsbrust des Grauholztunnels während Vortriebsunterbrüchen entnommen wurden (Abkürzungen vgl. Tab. 1).

Tunnel- profil Nr.	Probe Nr.	Lithologie	Architektur- element	Farbe	Bemerkungen
16	16/1	Grobsandstein	RG	grau-grün	Basis eines RG
17	17/1	Mittel- und Grobsandstein	RG	ocker-grau	
18	18/1	siltiger Feinsandstein	UW	ocker	
	18/2	Fein- und Mittelsandstein	DFR	grau	
19	19/1	verkohltes Holz mit Sulfid (Pyrit?)	aus RG	schwarz	
	19/2	Fein- und Mittelsandstein	RG	grau	Rippeln
	19/3	siltiger Feinsandstein	UW	grau	
	19/4	siltiger Fein- und Mittelsandstein	RG?, evtl. UW	grau	
	19/5	tonig-siltiger Mittel- und Grobsandstein	RG/P	grün-grau	Kalkknölichen und quellfähige Tonminerale
20	20/1	Fein- und Mittelsandstein mit wenig Grobsand	RG	ocker, grau	
	20/2	Mittel- und Grobsandstein	RG	grau	
	20/3	konglomeratischer Mittel- und Grobsandstein	RG	grau	mit verkohlten Pflanzenresten
21	21/1	Fein- und Mittelsandstein	RG	grau	Kluft mit Füllung und Rutschharnischen
	21/2	Fein- und Mittelsandstein	RG	grau	Parallele Kluft mit Rutschharnischen
	21/3	Fein- und Mittelsandstein	RG	grau	Kluft mit Füllung und Rutschharnischen
22	22/1	Fein- und Mittelsandstein mit wenig Grobsand	RG	grün-grau	Rippelschichtung und Aufarbeitungsgerölle (U)
	22/2	Mittel- und Grobsandstein	RG	grün-grau	
	22/3	Fein- bis Grobsandstein	RG	grün-grau	
	22/4	Mittel- und Grobsandstein	RG	grün	
23	23/1	Fein- bis Grobsandstein	RG	grau	
	23/2	Fein- und Mittelsandstein	RG	ocker, grau-grün	

Tabelle 2b: Gesteinsproben, die an der Ortsbrust des Grauholztunnels während Vortriebsunterbrüchen entnommen wurden (Abkürzungen vgl. Tab. 1).

3.6 Hydrologische Aufnahmen

Um eine Grundlage zur Abschätzung der bevorzugten Wasserwegsamkeit zu schaffen, wurden die nicht an Trennflächen gebundenen wasserführenden Zonen kartiert. Unterschieden wurde zwischen *trockenen*, *feuchten* und *nassen Zonen*. Falls sich beim Stillstand der Tunnelbohrmaschine eine stark wasserführende Zone, beispielsweise ein Rinnengürtel, im obersten Teil des Tunnelquerschnittes befand, so war innerhalb kurzer Zeit die ganze Ortsbrust nass. Deshalb wurde in solchen Situationen nur diese oberste wasserführende Zone ausgeschieden und die Wasserführung der darunterliegenden Architekturelemente offen gelassen (Tunnelprofile Nr. 5, 13 und 20 in den Beilagen 2, 4 und 6). Dies zeigt, dass bei der Ausscheidung der wasserführenden Zonen die Kenntnis der Zeitspanne zwischen dem Unterbruch des Tunnelvortriebes und dem Beginn der Ortsbrustaufnahme sehr wichtig ist. In GEOTECHNISCHES INSTITUT AG (1992d) ist diese Zeit jeweils unter «Bemerkungen» auf der rechten Seite der geologischen Tunnelprofile angegeben. In den ausgewählten Tunnelprofilen in den Beilagen 2–6 wurden diese Angaben weggelassen.

Der maximale Felsgrundwasserspiegel, der von den in verschiedenen Bohrungen auf Tunnelhöhe versetzten Porenwasserdruckgebern ausgeht, liegt zwischen km 9,900 und 9,000 (Bohrung RB 2C, Beilage 8) konstant rund 18 m über dem Tunnelfirst. In der Bohrung RB 2B (km 8,270, Beilage 7) zeigt der im Sohlenbereich des Tunnels versetzte Druckgeber einen maximalen Druckspiegel an, der 8 m über dem Tunnelfirst liegt. Der im Firstbereich dieser Bohrung versetzte Druckgeber zeigt einen maximalen Druckspiegel von 15 m an. Gegen Westen sinkt dieser Druckspiegel in der USM kontinuierlich und liegt bei km 7,900 (Bohrung RB 1A, Beilage 7) noch rund 5 m, bei km 7,850 (Bohrung RB 1E, Beilage 7) rund 2 m über der Tunnelsole (GEOTECHNISCHES INSTITUT AG 1987a, b, 1989, 1991a, b und 1992a).

3.7 Entnahme von Wasserproben

Da eine eindeutige Zuordnung des zwischen Schneidrad und Ortsbrust an der linken und rechten unteren Tunnelwand herabfliessenden Porenwassers zum Aquifer vielfach nicht möglich war und ein vorhergehender Kontakt des Wassers mit der Hintermörtelung der Tübbinge nicht ausgeschlossen werden konnte, wurden an der Ortsbrust keine Wasserproben entnommen. Im Tunnelprofil Nr. 15 (Beilage 4) wurde eine Leitfähigkeit von 445 $\mu\text{S}/\text{cm}$ und eine Temperatur von 11,5°C des Porenwassers eines RG gemessen. Die Messstelle ist mit einem Kreis im Profil eingezeichnet.

4. Lithologisch-sedimentologische Aufnahmen in den technischen Nischen

Im Festgestein (USM) des SBB-Grauholztunnels wurden insgesamt 10 Nischen, d.h. 5 Nischenpaare, im Zeitraum vom März bis September 1992 herausgesprengt (Fig. 3, Tab. 3). Die sich entsprechenden Nischen auf jeder Seite des Tunnels sind um vier Tübbingringe bzw. um 7,2 m gegeneinander versetzt. Die Ausbruchstiefe der Nischen auf der Seite Alpen, südlich bzw. bergseits des Tunnels, betrugen rund 5,8 m für die kleinen technischen Nischen (KN) bzw. rund 7,3 m für die grossen technischen Nischen (GN). Auf der Seite Jura, nördlich bzw. talseits des Tunnels, sind die Nischen jeweils 1,5 m tiefer. Je nach Grösse der Nische bedurfte es 3 bis 5 Abschlüsse (Bohr- und Sprengvorgänge), bis die vorgesehene Endtiefe erreicht wurde. Die Nischenaufnahmen wurden wiederum parallel zu den Ausbruchsarbeiten durchgeführt. Sofort nach Beendigung des Ausbruchs wurde die Nische mit Spritzbeton versiegelt und für die definitive Auskleidung vorbereitet.

Technische Nische	Tunnel-km	Lage zum Tunnel	Überlagerung Molassefels	Längsprofil	Bemerkungen
KN 181 KN 182	10,0926 10,0854	Seite Jura Seite Alpen	~13 m		Wegen der austretenden Wassermengen und Verbrüchen an der Decke v.a. in KN181 (Grenzschicht UW/U) wurden die Nischen nach jedem Abschlag mit Spritzbeton ausgekleidet
KN 163 KN 164	9,6426 9,6354	Seite Jura Seite Alpen	~15 m	Nr. 1	
GN 143 GN 144	9,1386 9,1314	Seite Jura Seite Alpen	75–80 m	Nr. 3	
KN 123 KN 124	8,6346 8,6274	Seite Jura Seite Alpen	~85 m	Nr. 4	
KN 105 KN 106	8,1810 8,1738	Seite Jura Seite Alpen	~65 m	Nr. 6	

Tabelle 3: Technische Nischen, die im SBB-Grauholztunnel auf der Festgesteinsstrecke (USM) ausgebrochen wurden.

Die Überlagerung mit Molassefels über den Firsten der Nischen betrug bei KN 182/183 und KN 164/165 rund 10–15 m, bei den restlichen drei Nischenpaaren im Minimum 60–65 m (GEOTECHNISCHES INSTITUT AG 1987a, b 1989 und 1991a).

Von den grossen technischen Nischen GN 201/202, ungefähr bei Tunnel-km 10,590, wurden keine Aufnahmen angefertigt, weil die Überlagerung mit Molassefels über dem First der Nischen äusserst gering ist (vermutlich <5 m) und deshalb ein spezielles Ausbruchverfahren angewandt wurde.

4.1 Entnahme von Gesteinsproben

In den technischen Nischen wurden nochmals 21 Gesteinsproben aus den verschiedenen Architekturelementen genommen (Tab. 4 und 5). In den geologischen Aufnahmen der Nischen ist die Lage der Probennahmestellen wiederum mit einem Quadrat eingezeichnet. Auch diese Proben wurden zur Konservierung in Plastiksäcke eingeschweisst.

Architekturelement	Ortsbrust	Technische Nischen
RG	26 Proben	10 Proben
DFR	6 Proben	1 Probe
UW	4 Proben	7 Proben
RG/P	1 Probe	–
DFR/P	1 Probe	1 Probe
U und UP	2 Proben	2 Proben
S	1 Probe	–
UW + U	1 Probe	–
verkohltes Holz mit Sulfid (Pyrit?) (aus RG)	1 Probe	–

Tabelle 4: Anzahl der in den verschiedenen Architekturelementen an der Ortsbrust und in den technischen Nischen entnommenen Gesteinsproben (Abkürzungen vgl. Tab. 1).

Nische Nr.	Probe Nr.	Lithologie	Architektur- element	Farbe	Bemerkungen
105	KN 105/1	Fein- und Mittelsandstein mit wenig Grobsand	RG	ocker-grau	
	KN 105/2	Feinsandstein	UW	ocker, wenig grau	direkt über RG
	KN 105/3	Siltstein und siltiger Feinsandstein	UW	ocker, grau	mit Rippeln
	KN 105/4	toniger Siltstein	UP	ocker, rot, grau	
106	KN 105/5	Mittel- und Grobsandstein	RG	grau	Basis eines RG
	KN 106/1	Mittel- und Grobsandstein	RG	grau	
	KN 106/2	siltiger Feinsandstein	UW	ocker, grau	mit Rippeln
123	KN 123/1	Fein- und Mittelsandstein mit Grobsand	RG	grün-grau	
124	KN 124/1	Fein- und Mittelsandstein, an Basis Mittel- und Grobsandstein	RG	grün-grau	
143	GN 143/1	Mittel- und Grobsandstein	RG	ocker, grau-grün	
144	GN 144/1	Mittel- und Grobsandstein	RG	grau-grün, ocker	
163	KN 163/1	siltiger Feinsandstein	UW	ocker, grau, sehr wenig rot	
	KN 163/2	Feinsandstein	DFR/P	dunkelbraun, wenig rot und grau	
181	KN 181/1	Mittel- und Grobsandstein	RG	ocker	
	KN 181/2	toniger Siltstein	U	ocker, grau, sehr wenig rot	
	KN 181/3	Siltstein mit Feinsand	UW	ocker-braun, grau	
	KN 181/4	Fein- und Mittelsandstein	DFR	grau	mit Tonhäuten
	KN 181/5	siltiger Feinsandstein	UW	ocker	mit Rippeln
	KN 182/1	siltiger Feinsandstein	UW	ocker, wenig grau	
	KN 182/2	Fein- und Mittelsandstein	RG	ocker	Kluft mit Belag und Rutschharnischen
182	KN 182/3	Mittel- und Grobsandstein	RG	ocker, grau	Kluft mit Rutschharnischen

Tabelle 5: Gesteinsproben aus den technischen Nischen des Grauholtzunnels (Abkürzungen vgl. Tab. 1).

4.2 Entnahme von Wasserproben

In den kleinen technischen Nischen KN 182, KN 105 und KN 106 wurden jeweils aus dem Architekturelement Rinnengürtel (RG) Wasserproben entnommen (Tab. 6), obwohl die Möglichkeit eines vorhergehenden Kontaktes des Felsgrundwassers mit der Hintermörtelung der Tübbinge auch hier nicht vollständig ausgeschlossen werden kann. Die Wasserprobe wurde deshalb in möglichst grosser Entfernung von den Tübbingen genommen.

In KN 182 beträgt die Überlagerung von Molassefels über dem First der Nische nur rund 10–15 m. Wegen der austretenden Wassermengen und Verbrüchen an der Decke vor allem in KN 181 (Grenzschicht UW/U) wurden KN 181/182 nach jedem Abschlag mit Spritzbeton ausgekleidet. In KN 182 wurde an zwei Stellen je 1 l Felsgrundwasser entnommen. Bei der rund 2,5 m von der Betonauskleidung entfernt genommenen Wasserprobe kann eine Beeinflussung durch den Spritzbeton praktisch ausgeschlossen werden. In dieser Probe wurde eine Leitfähigkeit von 428 $\mu\text{S}/\text{cm}$ und eine Temperatur von 14,5°C gemessen. Bei der weniger als ein Meter von dieser Auskleidung entfernt gelegenen Entnahmestelle kann eine Beeinflussung durch den Spritzbeton nicht von vornherein verneint werden.

In KN105 wurde das in einer Tiefe zwischen 2,5 und 4,0 m an verschiedenen Stellen von der Decke herabtropfende Wasser aus den dort anstehenden Rinnengürtelablagerungen gesammelt. Die rund 1,4 l Wasser wurden nach dem vollständigen Ausbruch der Nische gesammelt, als die austretende Wassermenge bereits stark zurückgegangen war. Bei der Probennahme wurde eine Leitfähigkeit von 436 $\mu\text{S}/\text{cm}$ und eine Temperatur von 15,7°C gemessen.

An der Brust von KN 106 wurde in 4,3 m Tiefe aus den oberen Rinnengürtelablagerungen an vier verschiedenen Stellen je 1 l Wasser gesammelt. Es wurden Leitfähigkeiten zwischen 429 und 444 $\mu\text{S}/\text{cm}$ und Temperaturen zwischen 13,0 und 13,9°C gemessen. Die höheren Wassertemperaturen der Proben aus KN 182 und KN 105 sind darauf zurückzuführen, dass sich die Wassertemperatur, da das Wasser tröpfchenweise gesammelt werden musste, bereits teilweise an die Umgebungstemperatur angepasst hatte. Für die Probe WP 182/2 geben die analysierten stabilen Isotopen keinen Hinweis auf Verdunstung (vgl. Kap. 6.2).

Wasser- probe Nr.	Tunnel- km	Architektur- element	Datum Proben- nahme	Leitfähigkeit [μS/cm]	Temperatur [°C]	Wasser- menge [l]	Bemerkungen
WP 182/1 WP 182/2	10,0854	RG	10.08.92	428	14,5	1 1	Fließend, Probennahmestelle 0,9 m von Auskleidung entfernt Tropfend, Probennahmestelle 2,5 m von Auskleidung entfernt Überlagerung durch Molassefels über Nischenfirst ca. 10–15 m Probenentnahme in der technischen Nische KN182
	8,7622	RG	25.01.92	445	11,5		Messung an der Ortsbrust (Tunnelprofil Nr. 15)
WP 123/1	8,6346	RG	12.06.92				Analyse der Betonaggressivität durch Institut BACHEMA AG (Resultate in GEOTECHNISCHES INSTITUT AG 1992b und 1992d) Probenentnahme in der technischen Nische KN123
WP 105/1	8,1810	RG	04.09.92	436	15,7	1 + ~0,4	Tropfend Überlagerung durch Molassefels über Nischenfirst ca. 60–65 m Probenentnahme in der technischen Nische KN105
WP 106/1 WP 106/2 WP 106/3 WP 106/4	8,1738	RG	14.09.92	429 429 430 444	13,0 13,6 13,9 13,0	1 1 1 1	Fließend Fließend Fließend Fließend Überlagerung durch Molassefels über Nischenfirst ca. 60–65 m Probenentnahme in der technischen Nische KN106

Tabelle 6: Wasserprobenentnahmen aus den technischen Nischen im Grauholtztunnel (Abkürzungen vgl. Tab. 1).

5. Längsausdehnung der Architekturelemente in Richtung der Tunnelachse

In den geologischen Längsprofilen Nr. 1 bis Nr. 6 (Fig. 3, Beilagen 7–9) sind die 23 Tunnelprofile und die 10 Nischenaufnahmen, kombiniert mit 8 Bohrungen (Tab. 7), in der Längsrichtung des Grauholztunnels zu einem zusammenhängenden Profil zusammengefügt. Zur Konstruktion des Längsprofils mit einer Gesamtlänge von 1980 m zwischen den Tunnelprofilen Nr.1 und Nr. 23 stand somit durchschnittlich alle 50 m ein Aufschluss zur Verfügung, wobei der kleinste Abstand (zwischen der Bohrung RB 2C und dem Tunnelprofil Nr. 12) ca. 1 m und der grösste Abstand (zwischen den Tunnelprofilen Nr. 13 und Nr. 14) ca. 120 m betrug. Im Längsprofil Nr. 1 ist zwischen km 9,750 (Tunnelprofil Nr. 2) und 9,620 (Tunnelprofil Nr. 5) durchschnittlich alle 15 m ein Aufschluss vorhanden. Dieser Abschnitt verdeutlicht, dass die Abfolge vor allem der Architekturelemente Uferwall (UW) und Überschwemmungsebene (U), welche die Matrix der USM bilden, grösstenteils komplizierter ist als es in denjenigen Abschnitten der Längsprofile mit weit auseinanderliegenden Aufschlüssen den Anschein erweckt.

Bohrung	Längsprofil	Tunnel-km	Lage zum Tunnel	Bemerkungen
RB 4B	Nr. 1	9,821	in Achse	
RB 4D		9,674	8 m talseits	
RB 4E		9,641	8 m talseits	
RB 2C	Nr. 3	9,035	12 m bergseits	
RB 2A	Nr. 4	8,825	11 m talseits	
RB 2B	Nr. 5	8,268	11 m bergseits	Ablenkung bis 3,7 m nach Norden, Richtung Tunnelachse
RB 1A	Nr. 6	7,894	in Achse	
RB 1E		7,855	9 m bergseits	

Tabelle 7: Bohrungen, die in die geologischen Längsprofile Nr. 1–6 integriert wurden (GEOTECHNISCHES INSTITUT AG 1987a, b, 1989, 1991a, b und 1992a). Die Bohrungen RB 4D, RB 4E und RB 1E wurden nach geotechnischen und lithologisch-sedimentologischen, die übrigen Bohrungen nur nach geotechnischen Kriterien aufgenommen.

6. Untersuchungsergebnisse

6.1 Resultate der petrophysikalischen Untersuchungen

Die Gesteinsproben wurden am Geologischen Institut der Universität Bern diagenetisch und petrophysikalisch untersucht (MÁTYÁS & MATTER 1994). Hauptziel dieser Studie war es, die Beziehung zwischen Porosität und Permeabilität innerhalb der einzelnen Architekturelemente zu bestimmen. Folgende Untersuchungsmethoden kamen zur Anwendung:

- Die *Permeabilität* wird an Zylindern (sog. Plugs) bestimmt, die aus den Gesteinsproben herausgebohrt wurden. Dabei wird die Menge des durchströmenden Stickstoffs pro Zeiteinheit bei gegebenem Druck gemessen. Die Messungen ergeben die spezifische Permeabilität k in Millidarcy (md), die in Durchlässigkeitsbeiwerte K (m/s) umgerechnet werden können.
- Die *absolute Porosität* (= *Gesamtporosität*) wird an den Permeabilitäts-Zylindern gemessen. Sie wird aus dem Verhältnis von Gesteinsdichte (Bestimmung des Auftriebes in Luft und in Quecksilber) und der pyknometrisch bestimmten Heliumdichte bestimmt. Sie beinhaltet die Gesamtheit aller Poren, d.h. sowohl miteinander verbundene/kommunizierende als auch abgeschlossene/isolierte Poren.
- Die *offene Porosität* wird im Dünnschliff ermittelt. Das Dünnschliffklötzchen wird vorgängig vakuiert und mit einem blau eingefärbten Epoxidharz unter Druck imprägniert. Mit dieser Methode wird der verbundene, d.h. kommunizierende Porenraum verfüllt, dessen Flächen-(bzw. Volumen-)anteil dann im Dünnschliff ausgezählt werden kann.

Die Resultate der physikalischen Laboruntersuchungen (absolute Porosität, Permeabilität) sind in Tabelle 8 zusammengefasst.

Unterschiedliche Porentypen wurden in 12 ausgewählten Gesteinsproben mikroskopisch untersucht: 8 Proben aus Rinnengürtelablagerungen (RG), 1 Probe aus einem pedogenisierten Rinnengürtelsandstein (RG/P), 2 Uferwallablagerungen (UW) und 1 Sandstein eines Durchbruchsfächers (DFR). Die Auszählung der verschiedenen Porentypen im Dünnschliff hat gezeigt, dass in den untersuchten Gesteinsproben Korngrenzporen (Poren zwischen den detritischen Körnern mit Öffnungsweiten $>2\ \mu\text{m}$) vorherrschen. Einzig im pedogenisierten Rinnensandstein (Probe Nr. 19/5), der Kalkknöllchen und quellfähige Tonminerale enthält, dominiert die Schichtsilikatporosität (Mikroporen $<2\ \mu\text{m}$ in Tonmineralien). In der Gesteinsprobe Nr. 21/1, die im Bereich von verfüllten Klüften mit Rutschharnischen genommen wurde, herrschen dagegen intragranulare Poren (Lösungsporen) und mechanisch entstandene Kluftporen vor.

Probe Nr.	Architektur- element	Gesteinsdichte [g/cm ³]	Heliumdichte [g/cm ³]	Gesamtporosität [%]	Permeabilität [md]	Permeabilität [m/s]
4/1	RG	2,051	2,69	23,8	–	–
5/1	RG	2,055	2,69	23,6	–	–
6/2	RG	1,999	2,69	25,7	–	–
8/2	RG	2,077	2,73	23,9	–	–
8/3	RG	1,962	2,65	26,0	–	–
9/1	RG	2,110	2,70	21,9	–	–
11/2	RG	2,071	2,69	23,0	–	–
14/1	RG	1,991	2,73	27,1	–	–
15/1	RG	2,046	2,73	25,0	1790	1,7·10 ⁻⁵
15/2	RG	1,960	2,72	27,9	–	–
16/1	RG	2,099	2,70	22,3	–	–
17/1	RG	1,981	2,70	26,6	–	–
19/2	RG	2,107	2,70	22,0	650	6,2·10 ⁻⁶
19/4	RG? evtl. UW	2,075	2,73	24,0	–	–
19/5	RG/P	2,416	2,68	9,8	69	6,6·10 ⁻⁷
20/1	RG	2,005	2,68	25,2	–	–
20/2	RG	2,013	2,68	24,9	–	–
20/3	RG	2,075	2,66	22,0	–	–
21/1	RG	2,355	2,69	12,5	3	2,8·10 ⁻⁸
21/2	RG	2,246	2,71	17,1	–	–
21/3	RG	2,074	2,69	22,9	–	–
22/1	RG	2,000	2,70	25,9	–	–
22/2	RG	2,146	2,73	21,4	–	–
22/3	RG	1,976	2,71	27,1	–	–
22/4	RG	1,935	2,70	28,3	–	–
23/1	RG	2,031	2,68	24,2	–	–
23/2	RG	1,968	2,66	26,0	–	–
KN 105/1	RG	2,021	2,68	24,6	1410	1,3·10 ⁻⁵
KN 105/5	RG	2,188	2,70	19,0	890	8,5·10 ⁻⁶
KN 106/1	RG	2,024	2,73	25,9	–	–
KN 123/1	RG	2,005	2,71	26,0	–	–
KN 124/1	RG	2,103	2,68	21,5	285	2,7·10 ⁻⁶
GN 143/1	RG	2,069	2,72	23,9	–	–
GN 144/1	RG	2,047	2,68	23,6	>1800	>1,7·10 ⁻⁵
KN 181/1	RG	1,938	2,66	27,1	–	–
KN 182/2	RG	2,062	2,72	24,2	–	–
KN 182/3	RG	2,097	2,67	21,5	–	–
1/1	DFR	2,108	2,71	22,2	180	1,7·10 ⁻⁶
3/1	DFR	2,439	2,68	9,0	1,5	1,4·10 ⁻⁸
7/1	DFR	2,413	2,70	10,6	–	–
7/2	DFR/P	2,451	2,70	9,2	<0,05	<4,7·10 ⁻⁹
9/2	DFR	2,115	2,68	21,1	540	5,1·10 ⁻⁶
11/1	DFR	2,049	2,72	24,7	–	–
18/2	DFR	2,137	2,72	21,4	–	–
KN 163/2	DFR/P	2,512	2,66	5,6	<0,05	<4,7·10 ⁻¹⁰
KN 181/4	DFR	2,311	2,70	14,4	9	8,5·10 ⁻⁷
6/1	UW	2,371	2,69	11,9	<0,05	<4,7·10 ⁻¹⁰
8/1	UW und UP	2,497	2,67	6,5	<0,05	<4,7·10 ⁻¹⁰
12/2	UW	2,216	2,71	18,2	6	5,7·10 ⁻⁸
18/1	UW	2,017	2,71	25,6	49	4,7·10 ⁻⁷
19/3	UW	2,227	2,70	17,5	40	3,8·10 ⁻⁷
KN 105/2	UW	2,270	2,73	16,8	<0,05	<4,7·10 ⁻¹⁰
KN 105/3	UW	2,365	2,73	13,4	<0,05	<4,7·10 ⁻¹⁰
KN 106/2	UW	2,367	2,71	12,7	<0,05	<4,7·10 ⁻¹⁰
KN 163/1	UW	2,494	2,71	8,0	<0,05	<4,7·10 ⁻¹⁰
KN 181/3	UW	2,479	2,71	8,5	<0,05	<4,7·10 ⁻¹⁰
KN 181/5	UW	2,325	2,70	13,9	<0,05	<4,7·10 ⁻¹⁰
KN 182/1	UW	2,465	2,71	9,1	<0,05	<4,7·10 ⁻¹⁰
2/1	S	2,159	2,70	20,0	<0,05	<4,7·10 ⁻¹⁰
12/1	UP	2,492	2,67	6,6	–	–
14/2	UP und U	2,499	2,72	8,1	–	–
KN 105/4	UP	2,434	2,66	8,5	<0,05	<4,7·10 ⁻¹⁰
KN 181/2	U	2,375	2,73	13,0	–	–

Tabelle 8: Resultate der petrophysikalischen Untersuchungen (nach MÁTYÁS & MATTER 1994) (Abkürzungen vgl. Tab. 1). – = nicht gemessen, da Kern nicht bohrbar bzw. mit Rissen.

Es ist offensichtlich, dass hauptsächlich die Calcitzementation den Grad der Gesamtporosität beeinflusst. Als Vergleich ist in der Tabelle 9 eine kleine Auswahl von Rinnengürtelsandsteinen aufgelistet, anhand derer dieser Sachverhalt verdeutlicht werden kann. Der Rinnengürtelsandstein Nr. 21/1, in welchem von den ausgezählten Proben der höchste Calcitzementgehalt nachgewiesen wurde, weist die geringste absolute Porosität und dementsprechend auch einen geringen Durchlässigkeitsfaktor auf. Wichtig ist auch, dass sich (Eisen-)Calcit- und Dolomitzement petrographisch unterschiedlich verhalten: Der Calcit sparit kristallisiert hauptsächlich in den Porenräumen, wohingegen der Dolomit mehrheitlich auf den detritischen Dolomitmörnern anwächst. Deshalb ist es klar, dass im Vergleich zum Dolomitzement derselbe Calcitzementgehalt die Verbundenheit der Porenräume und somit auch die hydraulische Leitfähigkeit stärker herabsetzt.

Probe Nr.	Architektur-element	Authigenes Karbonat			Gesamt-porosität [%]	Permeabilität [md]
		Cc-Zement [%]	Do-Zement [%]	Cc-Ersatz [%]		
19/2	RG	2,0	in Spuren	1,6	22,0	650
21/1	RG	6,6	0,7	0,6	12,5	3
105/1	RG	3,0	0,3	1,6	24,6	1410
124/1	RG	2,3	in Spuren	2,3	21,5	285

Tabelle 9: Zusammenhang zwischen Gehalt an authigenem Karbonat, der Gesamtporosität und der Permeabilität in Rinnengürtelablagerungen.

Offensichtlich ist auch, dass die Erhöhung des Tonmatrixanteils und des Calcitgehaltes als Folge der Pedogenisierung bei den Architekturelementen Rinnengürtel und Durchbruchsfächer zu einer eindeutigen Reduktion der Gesamtporosität und somit auch der Permeabilität führt.

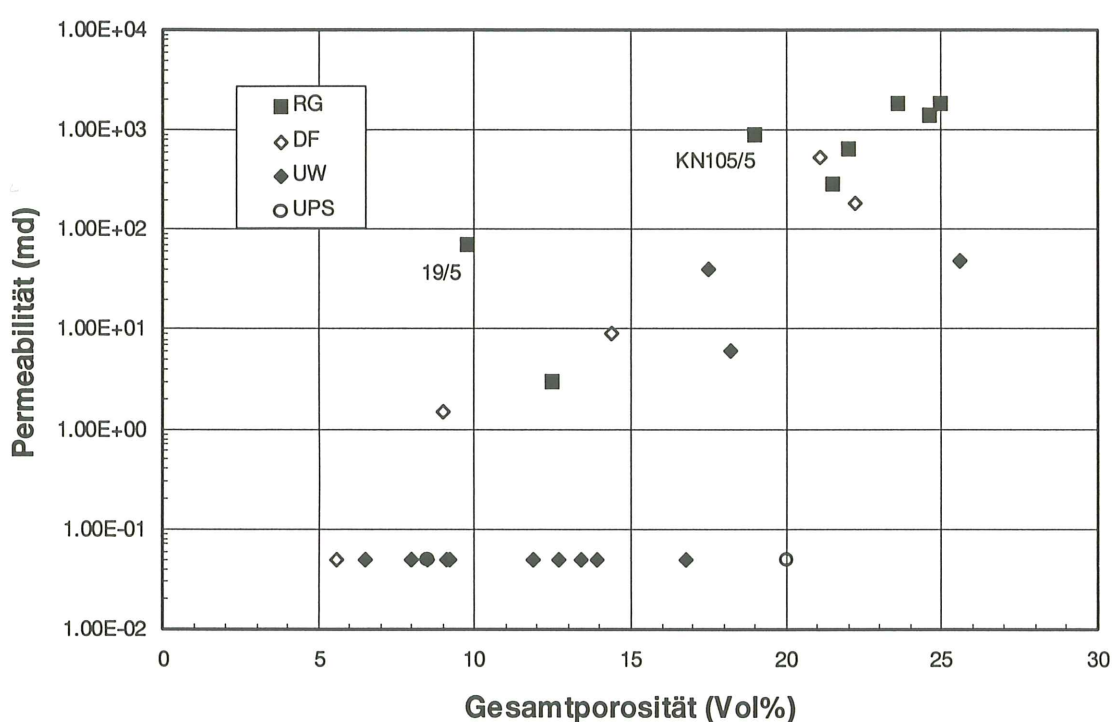
Der Vergleich der durchschnittlichen Gesamtporositäten der einzelnen Architekturelemente zeigt zum Teil deutliche Unterschiede (vgl. dazu Tab. 10). Die Rinnengürtelsandsteine weisen durchschnittlich 23,4 %, die Sandsteine der Durchbruchsfächer 15,4 %, die Feinsand- und Siltsteine der Uferwallablagerungen 13,5 % und die Schlammsteine der Überschwemmungsebene 11,2 % absolute Porosität auf.

Wegen technischer Schwierigkeiten konnte die Permeabilität nicht an allen Proben gemessen werden. Aufgrund der teilweise äusserst schwachen Zementation konnten nur bei wenigen Gesteinsproben Probenzylinder herausgebohrt werden. Die Permeabilität der Rinnengürtelsandsteine variiert zwischen 3 und >1800 md, diejenige der Sandsteine der Durchbruchsfächer zwischen <0,05 und 540 md. Von den Uferwallgesteinen wiesen nur drei Proben eine messbare Permeabilität zwischen 6 und 49 md auf. Die beiden Gesteine der Überschwemmungsebene wiesen keine messbare Permeabilität auf (<0,05 md).

Wegen der nicht-lognormalen Verteilung der Permeabilitätswerte werden für die Aufzeichnung der durchschnittlichen Permeabilitäten der einzelnen Architekturelemente die Medianwerte und nicht die arithmetischen Mittelwerte angegeben. Der Medianwert wird im Ge-

gensatz zum arithmetischen Mittel nicht von Extremwerten beeinflusst. Wie Figur 5 zeigt, liegt der Medianwert für die Rinnengürtelsandsteine im Grauholzgebiet rund 100 höher als derjenige für die Sandsteine der Durchbruchsfächer.

Figur 4 zeigt bei den Rinnengürtelsandsteinen (RG) und den Sandsteinen der Durchbruchsfächer (DFR) eine klare Abhängigkeit der Permeabilität (logarithmisch) von der Gesamtporosität: Zunehmende Porosität hat eine höhere Permeabilität zur Folge. Bei den Rinnengürtelsandsteinen ist dieser Trend allerdings erst ab einer Gesamtporosität von 20 % eindeutig. Ausnahmen bilden die Rinnengürtelsandsteine 19/5 und KN 105/5.



Figur 4: Abhängigkeit zwischen der an den Probenzylindern gemessenen Gesamtporosität und der Permeabilität (logarithmisch).

Bei der Probe 19/5 handelt es sich um einen pedogenisierten Rinnensandstein. Der Gehalt an zum Teil quellfähigen Tonmineralien bewirkt eine Reduktion der absoluten Porosität. Die Probe KN 105/5 wurde an der Basis eines Rinnengürtels genommen. Untersuchungen der USM im Erdsondenfeld Burgdorf (AMMANN et al. 1993) haben gezeigt, dass die Permeabilität im mittleren Teil des Rinnenkörpers am grössten ist und gegen die Basis und das Dach hin abnimmt. Bei mehrphasigen Rinnenfüllungen zeigt sich zu jeder Sohlfläche hin eine Permeabilitätsverminderung. Diese Herabsetzung wird durch eine teilweise nur geringfügig bessere Zementation im Kontakt zu den hangenden und liegenden undurchlässigeren Schichten bewirkt.

6.2 Vergleich mit Ergebnissen aus anderen Untersuchungsgebieten

Das Konzept der Architekturelemente und ihre hydrogeologische Untersuchung wurden in der Praxis bereits mehrere Male angewendet. In den Bohrungen von Langenthal (KELLER et al. 1990), im Ersondenfeld Burgdorf (AMMANN et al. 1993) und im Grauholztunnel (vorliegende Publikation) wurden an Probenzylindern die Durchlässigkeit im Labor bestimmt. Im Grauholztunnel wurden zudem in einzelnen Bohrungen mit Hilfe von Kurz- und Kleinpumpversuchen die hydraulischen Eigenschaften der USM getestet. Im Zuge der hydrogeologischen Eignungsprüfung des Reststoffdeponiestandortes Pieterlen wurden einzelne Architekturelemente gezielt mittels Doppelpacker-Versuchen hydraulisch getestet. Abgesehen von Pieterlen, das bereits zur subjurassischen, aufgerichteten Molasse gehört, liegen die genannten Untersuchungsstandorte innerhalb der USM in tektonisch äquivalenten Positionen.

6.2.1. Gesamtporosität

Die Mittel- und Maximalwerte der Gesamtporosität des Architekturelementes Rinnengürtel (RG) sind im Grauholzgebiet eindeutig höher als in den Untersuchungsstandorten Langenthal und Burgdorf (vgl. Tab. 10). Mit ein Grund für diese Tatsache dürfte die Korngrösse der Rinnensandsteine sein: In Langenthal und Burgdorf handelt es sich vor allem um Mittelsandsteine, wohingegen im Grauholztunnel vor allem Grobsandsteine angefahren wurden.

Für das Architekturelement Durchbruchsfächer und -rinnen (DFR) liegt der Mittelwert der Gesamtporosität im Grauholztunnel zwischen demjenigen von Langenthal und Burgdorf. Auch die Mittelwerte für die Architekturelemente Uferwall (UW) und Überschwemmungsebene (U) sind im Grauholzgebiet höher als in Langenthal und Burgdorf.

In allen drei Gebieten sind die Mittelwerte der Gesamtporosität für die Architekturelemente UW und U (bzw. UPS) kleiner als diejenigen für die Sandsteine der RG und der DFR. Die Uferwallablagerungen und die Schlammsteine der Überschwemmungsebene bestehen aus einem matrixgestützten und nicht aus einem porösen, mehr oder weniger zementierten, korngestützten Komponentenverband wie die Sandsteine der RG und DFR. Dementsprechend sind in den Architekturelementen UW und U die Quarz- und Feldspatgehalte niedriger und der Tonmineral- und Glimmeranteil, aber auch der Calcizementgehalt höher als in den Architekturelementen RG und DFR.

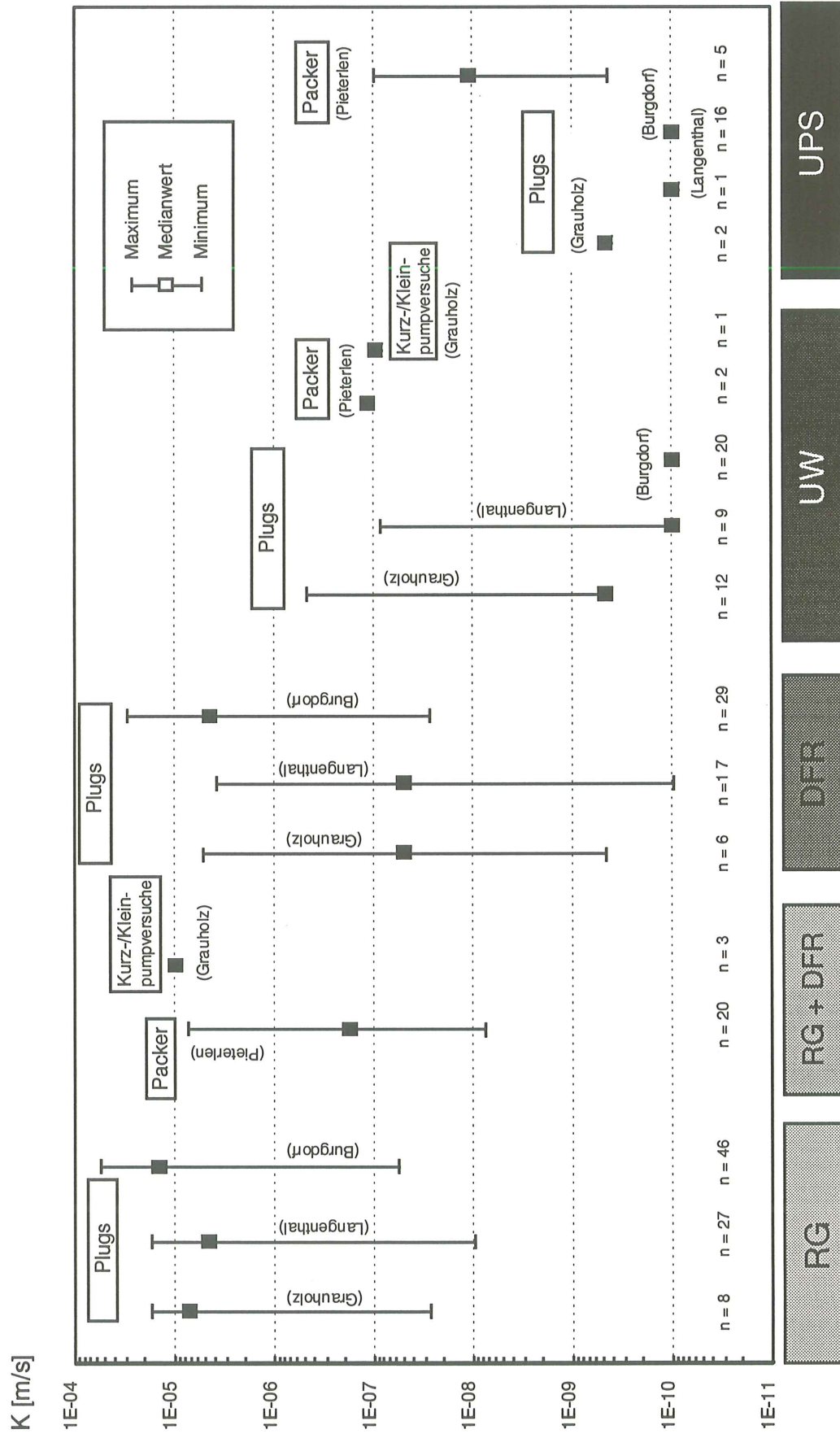
Architektur- element	Statistische Parameter der Gesamtporosität	SBB-Grauholz- tunnel	Langenthal (KELLER et al. 1990)	Burgdorf (AMMANN et al. 1993)
RG	Minimum	9,8	6,4	10
	Maximum	28,3	23,7	25
	Arithmetisches Mittel	23,44	17,47	20,7
	Medianwert	24,0	19,6	21
	Anzahl Proben	37	28	46
DFR	Minimum	5,6	2,6	11
	Maximum	24,7	22,4	24
	Arithmetisches Mittel	15,36	12,37	19,6
	Medianwert	14,4	14,2	20
	Anzahl Proben	9	17	29
UW	Minimum	6,5	2,3	3
	Maximum	25,6	17,9	13
	Arithmetisches Mittel	13,51	8,73	8,2
	Medianwert	13,05	8,2	8,5
	Anzahl Proben	12	9	20
U bzw. UPS	Minimum	6,6	–	2
	Maximum	20,0	–	10
	Arithmetisches Mittel	11,24	–	6,4
	Medianwert	8,5	8,1	6,5
	Anzahl Proben	5	1	16

Tabelle 10: Vergleich der in den verschiedenen Architekturelementen an unterschiedlichen Untersuchungsstandorten gemessenen Gesamtporositäten. Alle Porositätswerte in Vol.-%. (Abkürzungen vgl. Tab. 1).

6.2.2 Permeabilität

In Figur 5 sind die im Labor an Probenzylindern gemessenen Permeabilitätswerte den in Bohrungen mit Hilfe von hydraulischen Packertests, Kurz- sowie Kleinpumpversuchen ermittelten Durchlässigkeitswerten gegenübergestellt. Die in Pieterlen für die Architekturelemente Rinnengürtel und Durchbruchsfächer ermittelten Bereichs-k-Werte wurde in einer Gruppe zusammengefasst, da mit einem statistischen Signifikanztest gezeigt werden konnte, dass sich die mittleren Durchlässigkeitsbeiwerte bzw. deren Logarithmen sowie die Standardabweichung statistisch nicht signifikant unterscheiden (GEOTECHNISCHES INSTITUT AG 1992c).

Bei den im Labor an Probenzylindern ermittelten Permeabilitäten weisen die sandigen Architekturelemente Rinnengürtel (RG) und Durchbruchsfächer und -rinnen (DFR) von den Untersuchungsstandorten Grauholz und Langenthal jeweils ähnliche Medianwerte und Streubreiten auf. In Burgdorf wurden in diesen Architekturelementen durchwegs grössere Durchlässigkeiten bestimmt. Im Gegensatz dazu weisen die feinkörnigeren Architekturelemente UW (Uferwall) und U (Überschwemmungsebene) im Grauholz grössere Durchlässigkeiten auf als in Langenthal und Burgdorf.



Figur 5: Vergleich zwischen den an Probenzylindern (Plugs) und in Bohrungen im Grauholz gemessenen Durchlässigkeiten der verschiedenen Architekturelemente und den an anderen Untersuchungsstandorten gemessenen Werten (Probenzylinder und Doppelpacker-Tests).

Der Vergleich der durch verschiedene Methoden ermittelten Durchlässigkeiten in den Architekturelementen RG, DFR, UW und U zeigt, dass die im Labor gemessenen Permeabilitätswerte im Gegensatz zu den im Bohrloch bestimmten eine eher grössere Streubreite aufweisen. Die Messresultate an den kleinen Probenzylindern sind, wie bereits in KELLER (1992) dargelegt, stärker von kleinräumigen Heterogenitäten beeinflusst.

6.3 Resultate der Wasseruntersuchungen

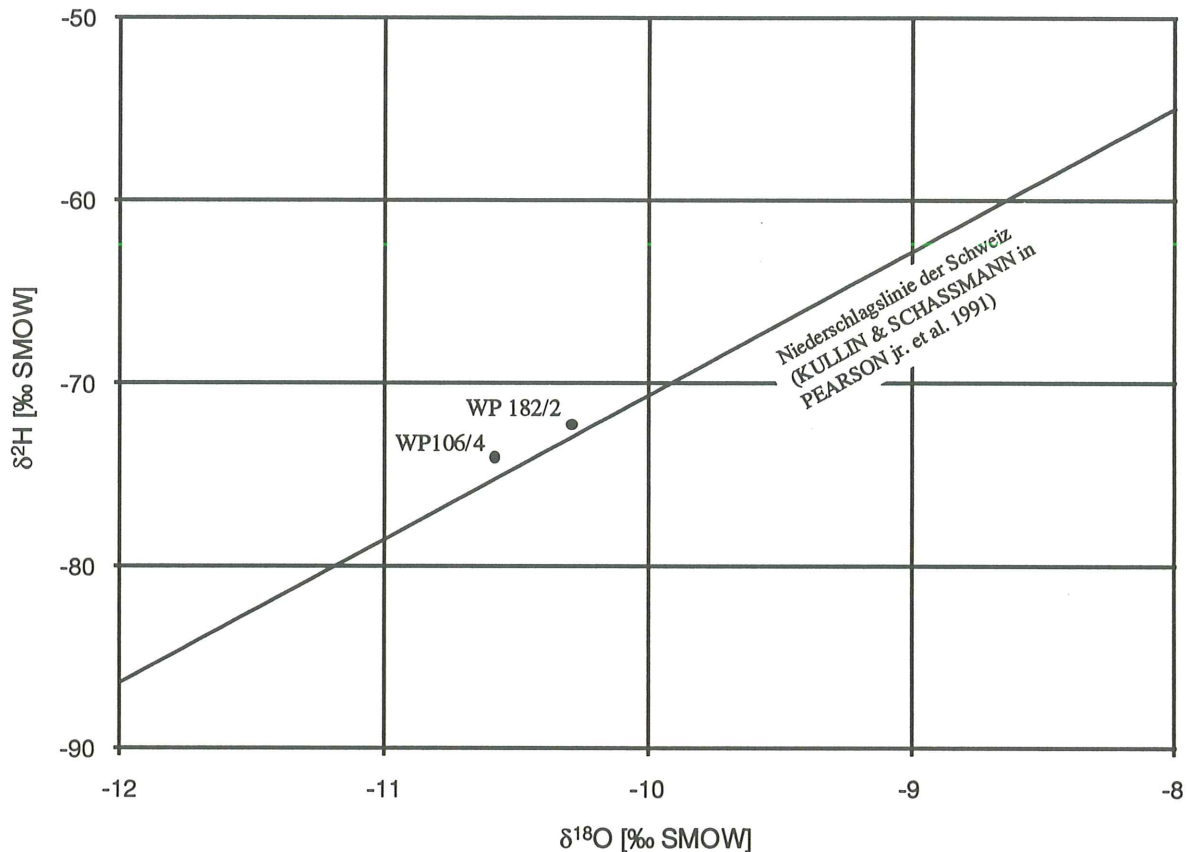
Von den in den technischen Nischen entnommenen Wasserproben wurden WP 182/2 und WP 106/4 auf ausgewählte chemische Parameter und Isotopen untersucht. Durch diese beiden Proben werden die beiden Extreme – grösste vs. geringste Überlagerung, höchste vs. geringste elektrische Leitfähigkeit – erfasst.

Die chemischen Wasseranalysen wurden vom Labor Dr. Meyer in Bern im Februar 1996, die Isotopenuntersuchungen im Physikalischen Institut der Universität Bern (Tritium und Sauerstoff-18) im März 1994 und von der Firma Hydroisotop in Schweitenkirchen, Deutschland (Deuterium) im März 1996 durchgeführt. In Tabelle 11 sind die Resultate der Wasseranalysen aufgelistet.

Physikalische und chemische Parameter		WP 182/2 (Überlagerung durch Molassefels: ~13 m)	WP 106/4 (Überlagerung durch Molassefels: ~65 m)
Temperatur	[°C]	14,5	13,0
Leitfähigkeit	[µS/cm]	428	444
Calcium (Ca ²⁺)	[mg/l]	27	36
Magnesium (Mg ²⁺)	[mg/l]	27	34
Natrium (Na ⁺)	[mg/l]	3,6	9,6
Kalium (K ⁺)	[mg/l]	1,3	1,7
Chlorid (Cl ⁻)	[mg/l]	1,6	1,2
Nitrat (NO ₃ ⁻)	[mg/l]	5,8	<0,2
Sulfat (SO ₄ ²⁻)	[mg/l]	11	7,2
Wasserstoff-2 (δ ² H)	[‰]	-72,3	-74,1
Tritium (³ H)	[TU ± Err]	50,3 ± 3,9	≤3,0 (2σ)
Sauerstoff-18 (δ ¹⁸ O)	[‰]	-10,29	-10,58

Tabelle 11: Chemische Beurteilung und Messung von Wasserstoff- und Sauerstoffisotopen ausgewählter Wasserproben.

Die δ¹⁸O- und δ²H-Werte der Wasserproben WP 106/4 und WP 182/2 deuten auf Wässer, die unter heutigen klimatischen Bedingungen in den Untergrund infiltriert sind. Werden die δ¹⁸O- und δ²H-Werte der beiden Proben gegeneinander geplottet (Fig. 6), so fallen beide Proben in den Fehlerbereich der Regressionslinie rezenter Wässer der Schweiz (Regressionslinie aus 64 Proben, KULLIN & SCHMASSMANN in PEARSON et al. 1991). Die beiden untersuchten Wasserproben sind also weder unter kälteren klimatischen Bedingungen infiltriert noch hat eine Verdunstung während des Infiltrationsprozesses oder während der Probennahme (Tropfwasser) stattgefunden.



Figur 6: Beziehung zwischen $\delta^{18}\text{O}$ - und $\delta^2\text{H}$ -Gehalten ausgewählter Wasserproben.

KULLIN und SCHMASSMANN (in PEARSON et al. 1991) geben auch Beziehungen von Infiltrationshöhe und $\delta^{18}\text{O}$ - bzw. $\delta^2\text{H}$ -Werten für das Mittelland an. Werden zum Beispiel die $\delta^{18}\text{O}$ -Gehalte von WP 106/4 und WP 182/2 in diese Gleichungen eingesetzt, so resultieren Infiltrationshöhen von ca. 670 m ü. M. (WP 106/4) bzw. ca. 570 m ü. M. (WP 182/2). Die Terrainoberfläche über der technischen Nische KN 106 liegt bei ca. 635 m ü. M., diejenige über KN 182 bei ca. 570 m ü. M. Bei beiden untersuchten Wasserproben handelt es sich also um im Grauholzgebiet infiltrierte Wässer.

Der Tritiumwert von ca. 50 TU der Probe WP 182/2 deutet auf ein junges, mehr oder weniger rezent infiltriertes Wasser hin. Der Tritiumgehalt von ≤ 3 TU der Probe WP 106/4 dagegen deutet auf ein älteres, vor mehr als 35 Jahren, d.h. vor den ersten Atombombenversuchen infiltriertes Wasser hin.

Nebst der erhöhten elektrischen Leitfähigkeit von WP 106/4 gegenüber WP 182/2 deuten auch die höheren Kationengehalte an Calcium, Magnesium, Natrium und Kalium auf eine längere Aufenthaltsdauer im Untergrund hin. Der höhere Nitratgehalt in WP 182/2 gibt einen Hinweis auf eine stärkere Oberflächenbeeinflussung. Das tiefere Calcium/Natrium-Verhältnis in WP 106/4 weist auf einen Ionenaustausch an Tonmineralien, der weiter fortgeschritten ist als in WP 182/2.

Die Werte der stabilen Isotopen und die Mineralisierung der beiden untersuchten Felsgrundwasserproben aus Nischen des SBB-Grauholtztunnels ergeben ein konsistentes Bild der Infiltrationsbedingungen und der Verweildauer im Lockergestein und insbesondere im Fels. Der schichtige Aufbau der USM aus relativ gut durchlässigen (Rinnengürtelsandsteine und Sandsteine der Durchbruchsfächer und -rinnen) und schlecht bis undurchlässigen Einheiten (Silt- und Feinsandsteine der Uferwallablagerungen und Schlammsteine der Überschwemmungsebene) lässt auf ein Stockwerkssystem im Felsgrundwasser schliessen, in welchem in vertikaler Richtung nur in beschränktem Ausmass Verbindungen vorhanden sind. Das in der technischen Nische KN 106 entnommene Felsgrundwasser benötigte zum Beispiel länger als 35 Jahren, um die rund 65 m Molassefelsüberlagerung zu durchströmen. Aus diesen Daten kann ein mittlerer vertikaler Durchlässigkeitsbeiwert von ca. $6 \cdot 10^{-8}$ m/s berechnet werden.

Literaturverzeichnis

- AMMANN, M., BIRKHÄUSER, P., BLÄSI, H.-R., LAVANCHY, J.-M., LÖW, S., MEIER, B. & MÜLLER, W.H. (1993): Untere Süsswassermolasse im Erdsondenfeld Burgdorf. – Geol. Ber. Landeshydrol. u. -geol. 16.
- BIRKELAND, P.W. (1984): Soils and Geomorphology. – Oxford University Press, New York.
- GEOTECHNISCHES INSTITUT AG (1987a): SBB Grauholzlinie, Grauholztunnel Los Ost. Zusammenfassender geotechnischer Bericht vom 8.1.1987 (1. Revision) (unveröff.).
- (1987b): SBB Grauholzlinie, Grauholztunnel Los West. Zusammenfassender geotechnischer Bericht vom 8.1.1987 (1. Revision) (unveröff.).
 - (1989): SBB Grauholzlinie, Baulos 5, Tunnel, Lage des Grundwasserspiegels in der Molassefelsstrecke. Bericht vom 26.6.1989 (unveröff.).
 - (1991a): SBB Grauholztunnel, Bohrungen im Sand im Bereich 2. Lockergesteinswanne. Schreiben vom 22.1.1991 (unveröff.).
 - (1991b): SBB Grauholztunnel, Bohrungen im Sand im Bereich 2. Lockergesteinswanne. Ergänzung vom 1.7.1991 zum Schreiben vom 22.1.1991 (unveröff.).
 - (1992a): SBB Grauholztunnel, Bohrungen RB 1D + RB 1E im Abschnitt Übergang Felsstrecke/Lockergesteinsstrecke West. Schreiben vom 27.3.1992 (unveröff.).
 - (1992b): SBB Grauholztunnel, Nachinjektion der Tübbinge: Schreiben vom 24.6.1992 (unveröff.).
 - (1992c): BUWAL/GSA, Kt. Bern, Reststoffdeponie Greuschenhubel Gemeinde Pieterlen/BE. Hydrogeologische Eignungsprüfung (Phase 1). Schlussbericht vom 22.10.1992 mit Ergänzungen zum Schlussbericht vom 30.9.1993 (unveröff.).
 - (1992d): Geologische und hydrogeologische Aufnahmen der Unteren Süsswassermolasse im SBB-Grauholztunnel bei Bern im Rahmen der LHG-Dokumentation über geringdurchlässige Gesteine. Bericht vom 9.11.1992 mit Revisionen vom 16.4.1993 (unveröff.).
- KELLER, B., BLÄSI, H.-R., PLATT, N.H., MOZLEY, P.S. & MATTER, A. (1990): Sedimentäre Architektur der distalen Unteren Süsswassermolasse. – Geol. Ber. Landeshydrol. u. -geol. 13.
- KELLER, B. (1992): Hydrogeologie des schweizerischen Molasse-Beckens; aktueller Wissensstand und weiterführende Betrachtungen. – Eclogae geol. Helv. 85/3, 611–651.
- MÁTYÁS, J. & MATTER, A. (1994): Pilot study on diagenesis of Lower Freshwater Molasse in the Grauholz area (Kanton Berne), Bericht vom 18.4.1994 (unveröff.).

- PEARSON, F.J. jr., BALDERER, W., LOOSLI, H.H., LEHMANN, B.E., MATTER, A., PETERS, T.J., SCHMASSMANN, H. & GAUTSCHI, A. (1991): Applied isotope hydrogeology, a case study in northern Switzerland. – *Studies in Environmental Science* 43, Elsevier Amsterdam.
- PLATT, N.H. & KELLER, B. (1992): Distal alluvial deposits in a foreland basin setting – the Lower Freshwater Molasse (Lower Miocene), Switzerland; sedimentology, architecture and palaeosols. – *Sedimentology* 39, 545–565.

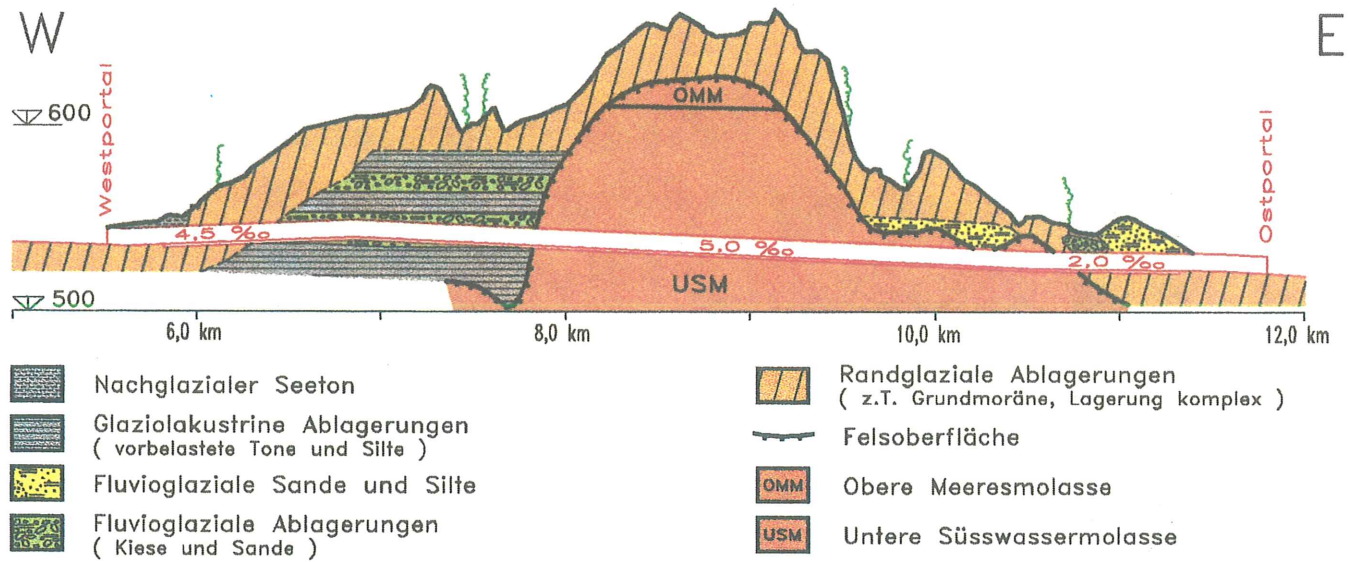
Geologische Berichte Rapports géologiques Rapporti geologici

Vertrieb durch

Landeshydrologie und -geologie, CH-3003 Bern

Nr. 1	1987	TJ. PETERS, A. MATTER, H.-R. BLÄSI, A. GAUTSCHI Sondierbohrung Böttstein – Geologie	Fr. 60.–
Nr. 2	1987	A. ESCHER, H. MASSON, A. STECK Coupes géologiques des Alpes occidentales suisses	vergriffen
Nr. 3	1988	A. PUGIN Carte des isohypses de la base des sédi- ments du Quaternaire	Fr. 10.–
Nr. 4	1988	M. BURKHARD Horizontalschnitt des Helvetikums der Westschweiz	Fr. 10.–
Nr. 5	1988	A. MATTER, TJ. PETERS, CH. ISENSCHMID, H.-R. BLÄSI, H.-J. ZIEGLER Sondierbohrung Riniken – Geologie	Fr. 60.–
Nr. 6	1988	A. MATTER, TJ. PETERS, H.-R. BLÄSI, J. MEYER, H. ISCHI, CH. MEYER Sondierbohrung Weiach – Geologie	Fr. 60.–
Nr. 7	1988	A. ESCHER Structure de la nappe du Grand-Saint- Bernard entre le val de Bagnes et les Mis- chabel	Fr. 10.–
Nr. 8	1988	A. MATTER, TJ. PETERS, H.-R. BLÄSI, F. SCHENKER, H.-P. WEISS Sondierbohrung Schafisheim – Geologie	Fr. 60.–
Nr. 9	1989	TJ. PETERS, A. MATTER, H.-R. BLÄSI, CH. ISENSCHMID, P. KLEBOTH, CH. MEYER, J. MEYER Sondierbohrung Leuggern – Geologie	Fr. 60.–
Nr. 10	1989	TJ. PETERS, A. MATTER, J. MEYER, CH. ISENSCHMID, H.-J. ZIEGLER Sondierbohrung Kaisten – Geologie	Fr. 60.–
Nr. 11	1989	P. JEANBOURQUIN, M. BURRI La zone de Sion-Courmayeur dans la région du Simplon	Fr. 10.–
Nr. 12	1990	H. DRONKERT, H.-R. BLÄSI, A. MATTER Facies and Origin of Triassic Evaporites from the NAGRA Boreholes, Northern Switzerland	Fr. 50.–

Nr. 13	1990	B. KELLER, H.-R. BLÄSI, N.H. PLATT, P.S. MOZLEY, A. MATTER Sedimentäre Architektur der distalen Unter- en Süßwassermolasse	vergriffen
Nr. 14	1992	P. DIEBOLD, H. NAEF, M. AMMANN Zur Tektonik der zentralen Nordschweiz (regionale Seismik, Oberflächengeologie und Tiefbohrungen)	Fr. 80.-
Nr. 15	1992	A. SPICHER (†) Verzeichnis der geologischen und tektoni- schen Karten und Kartenskizzen der Schweiz 1930-1950 (Neudruck)	Fr. 20.-
Nr. 16	1993	M. AMMANN, P. BIRKHÄUSER, H.R. BLÄSI, J.-M. LAVANCHY, S. LÖW, B. MEIER, W.H. MÜLLER Untere Süßwassermolasse im Erdsondenfeld Burgdorf. Charakterisierung mittels Geolo- gie, Petrophysik und Fluid Logging	Fr. 40.-
Nr. 17	1994	Y.P. BONANOMI, E.R. MÜLLER, W.K. NABHOLZ, H. SCHEIWILLER Zur Hydrogeologie des Bergsturzgebietes im Raum Flims	Fr. 25.-
Nr. 18	1994	M. THURY, A. GAUTSCHI, M. MAZUREK, W.H. MÜLLER, H. NAEF, F.J. PEARSON S. VOMVORIS, W. WILSON Geology and Hydrogeology of the Crystalli- ne Basement of Northern Switzerland	Fr. 80.-
Nr. 19	1996	C. SCHINDLER, C. BEER, D. MAYER-ROSA, E. RÜTTENER, J.-J. WAGNER, J.-M. JAQUET, C. FRISCHKNECHT Integrierte Auswertung von seismischen und bodenspezifischen Parametern: Gefähr- dungskarten im Kanton Obwalden	Fr. 25.-
Nr. 20	1996	C. BOLLINGER, F. NOVERRAZ Vereinheitlichung der Aufnahme von Natur- gefahren in der Schweiz, Pilotstudie, Kar- te der Bodenbewegungsgefahren 1:25'000, Blatt 1247 Adelboden	Fr. 35.-



Vereinfachtes geologisches Längsprofil des SBB-Grauholtztunnels.



Eingesetzte Tunnelbohrmaschine bei der Montage. Durchmesser des Schneidrades: 11.65 m.

Die Untere Süsswassermolasse im SBB-Grauholztunnel

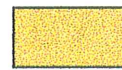
LEGENDE

Tunnelprofile

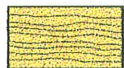
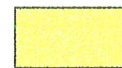
Geologische Längsprofile



Rinnengürtel (RG)



Durchbruchsfächer (DF)



Uferwall (UW)



Überschwemmungsebene (U)
mit Paläoböden (UP)



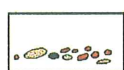
Paläoböden (/P): RG-, DF- oder UW/P



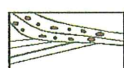
Sümpfe (S)



Rippel- und Kreuzschichtung



Aufarbeitungsgerölle /
Sohlpflaster (U, S und UW)



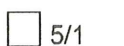
Rippeln, teilweise mit
Aufarbeitungsgeröllen



Sedimente der Überschwemmungsebene
mit Sandlinsen



Verkohlte Pflanzenreste (K)

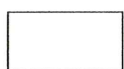


5/1

Gesteinsprobe (Nr.)



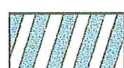
Messstelle Porenwasser



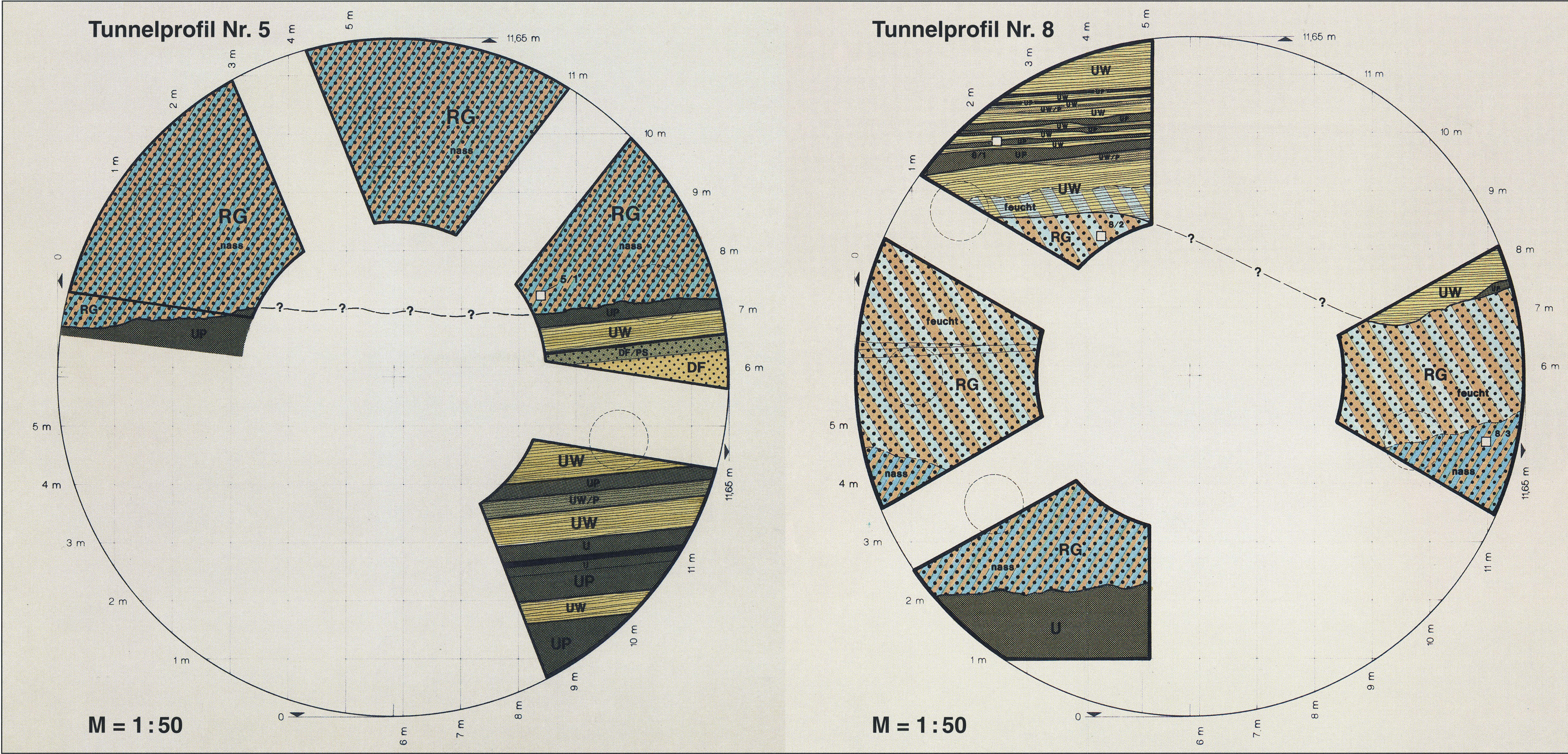
trocken

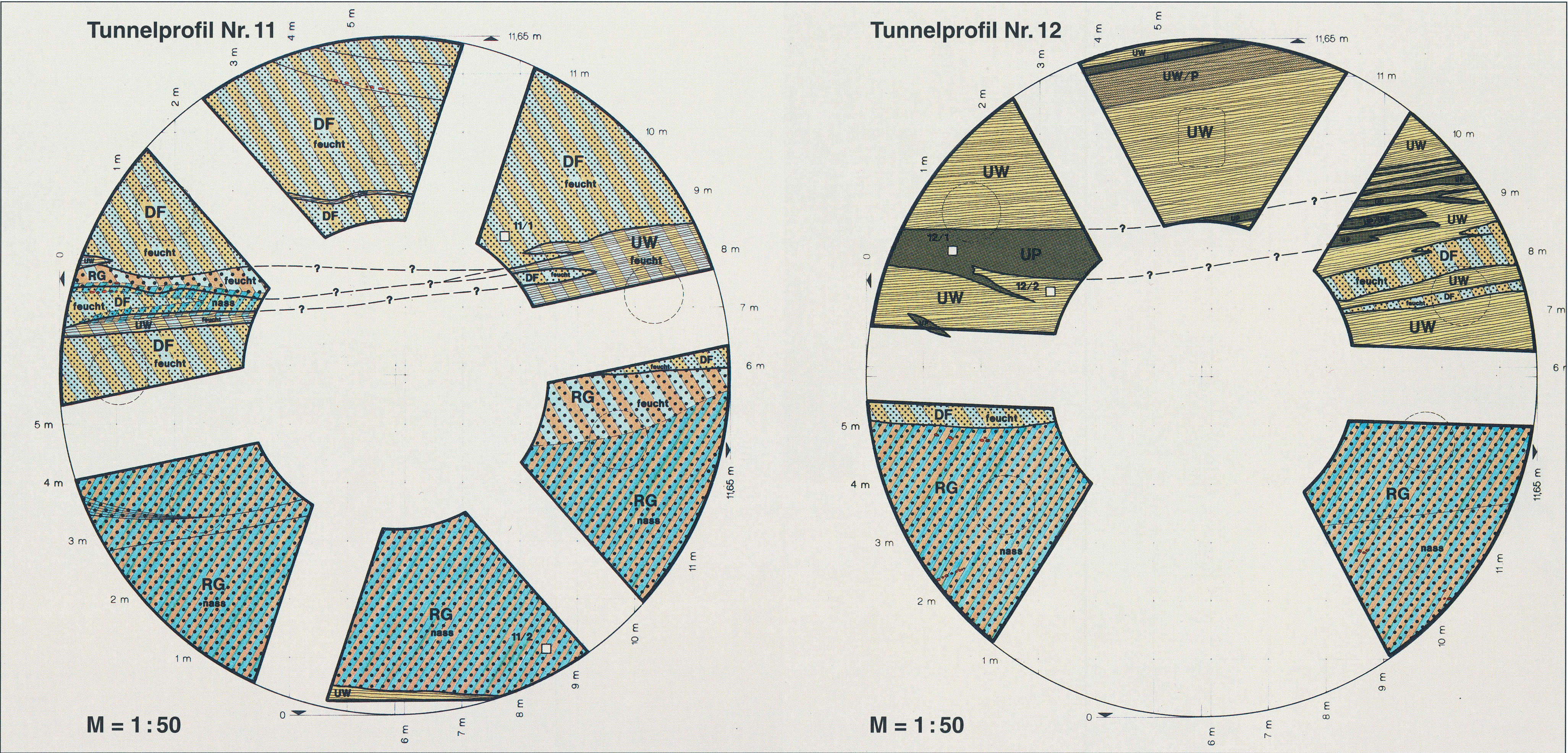


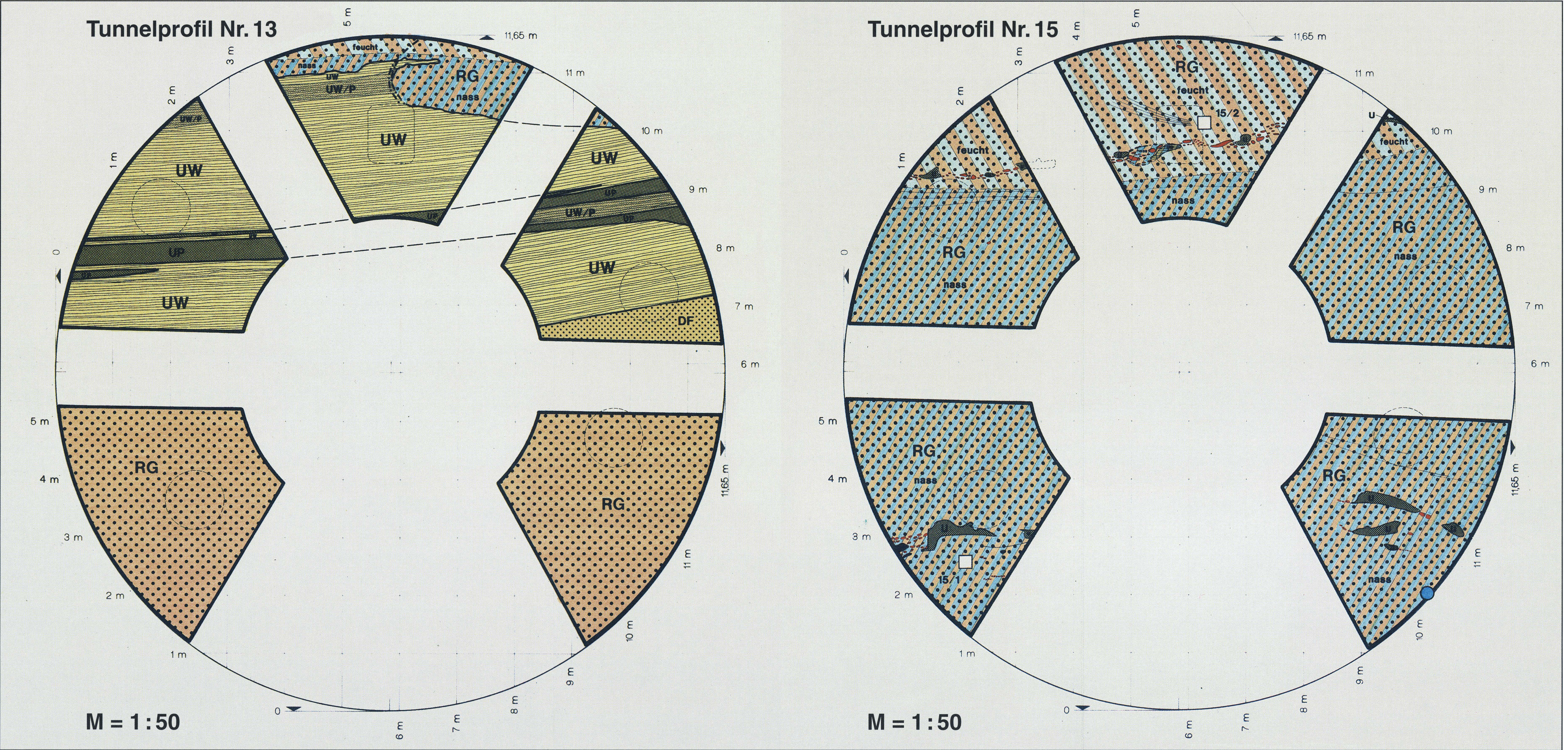
feucht

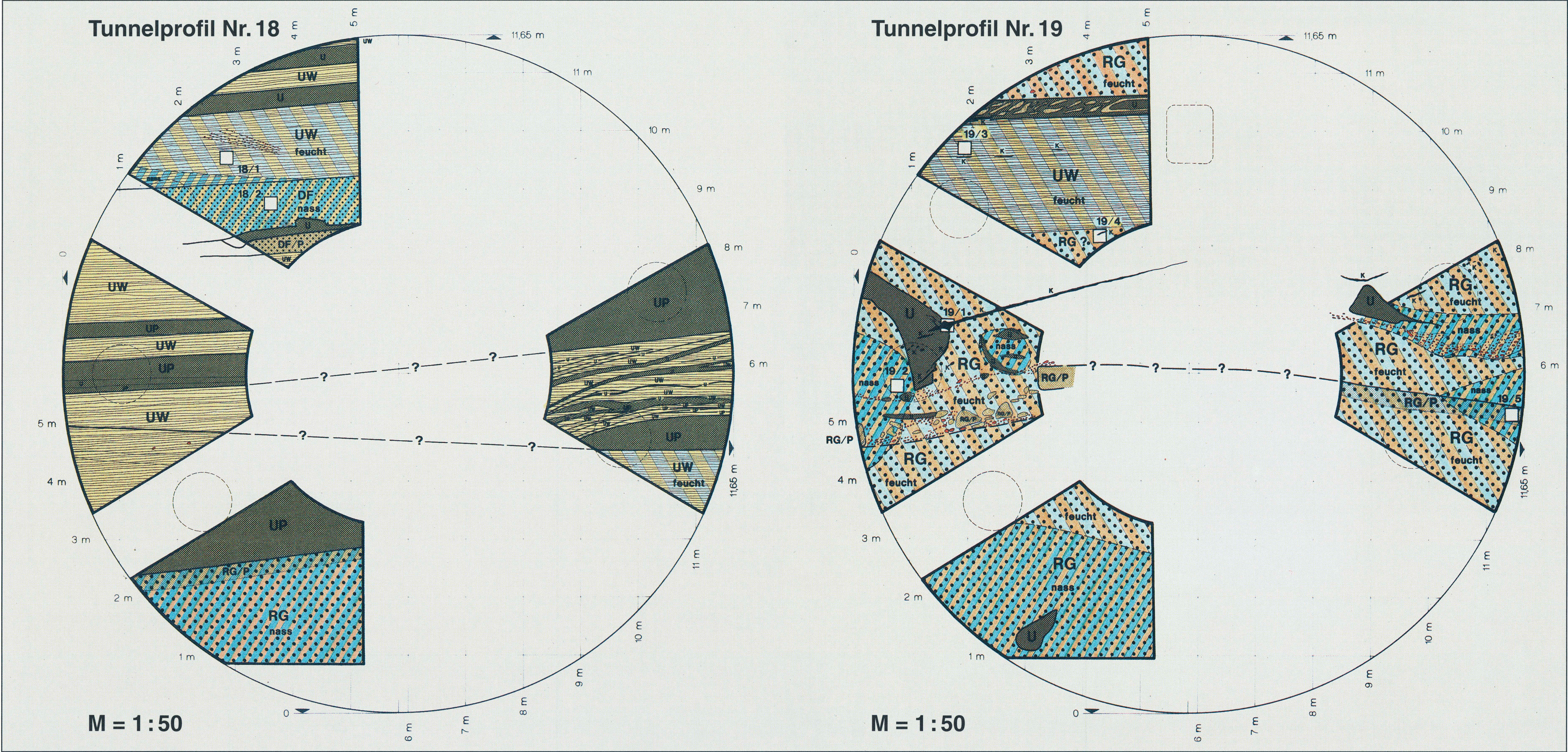


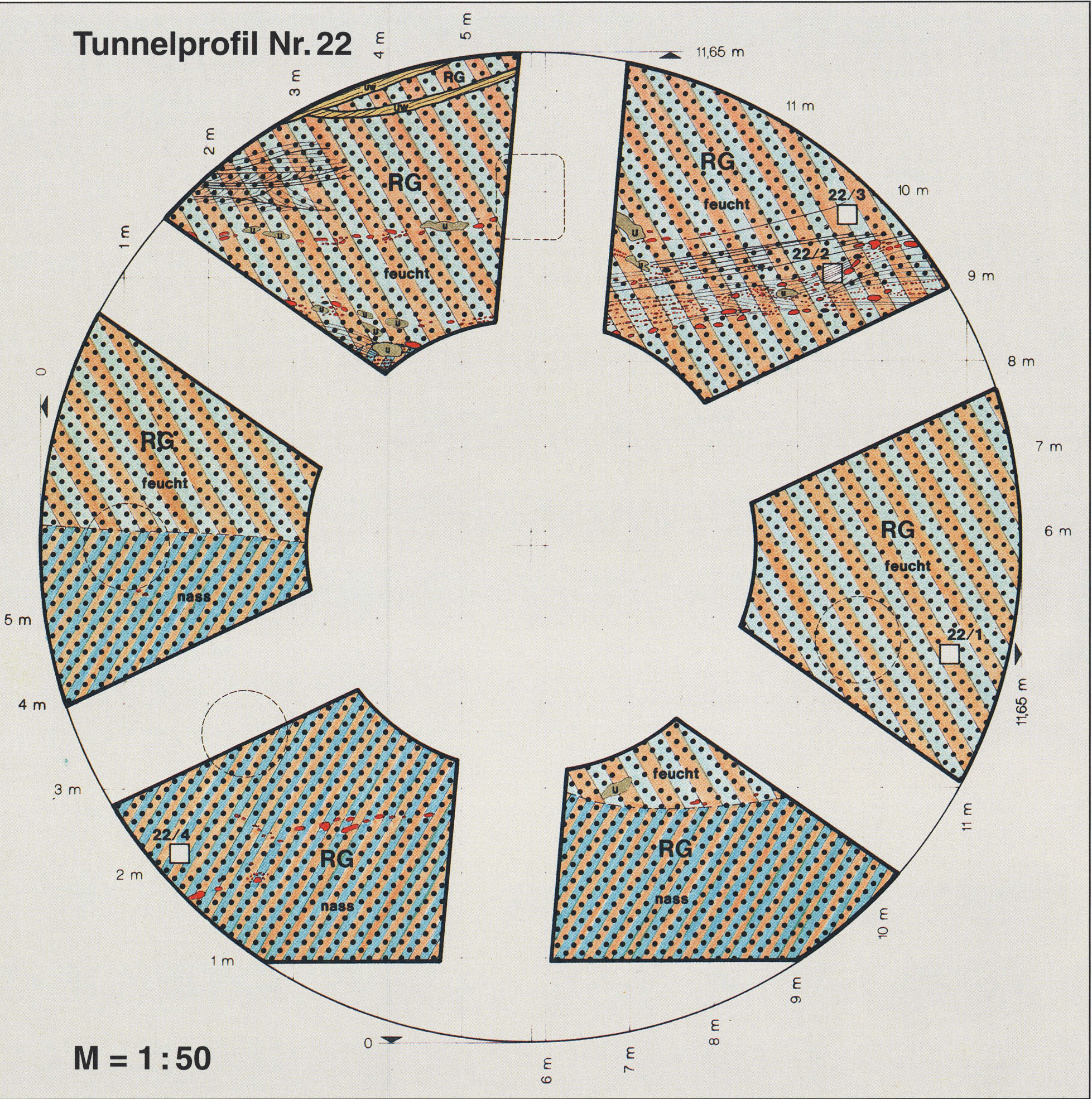
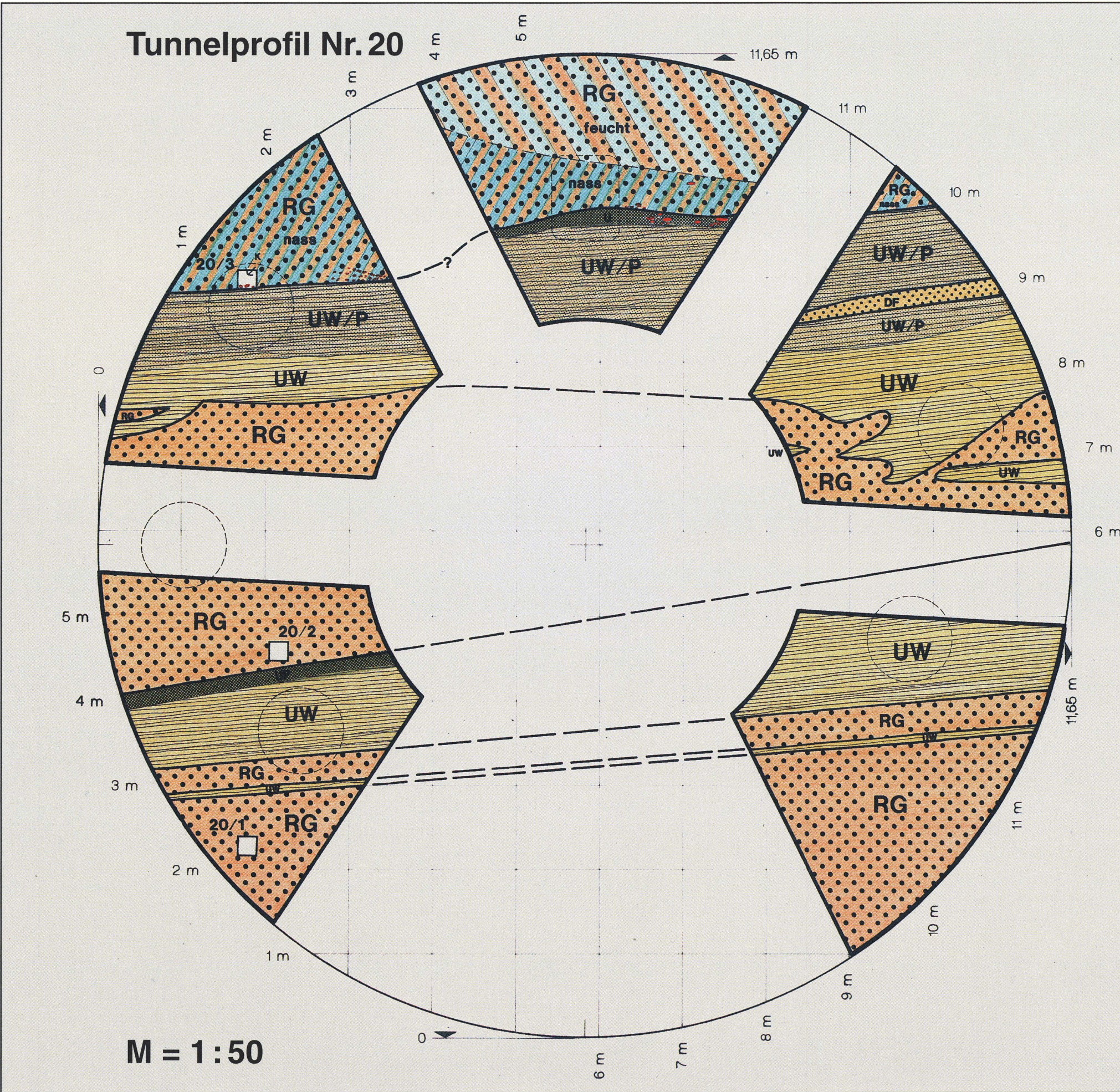
nass





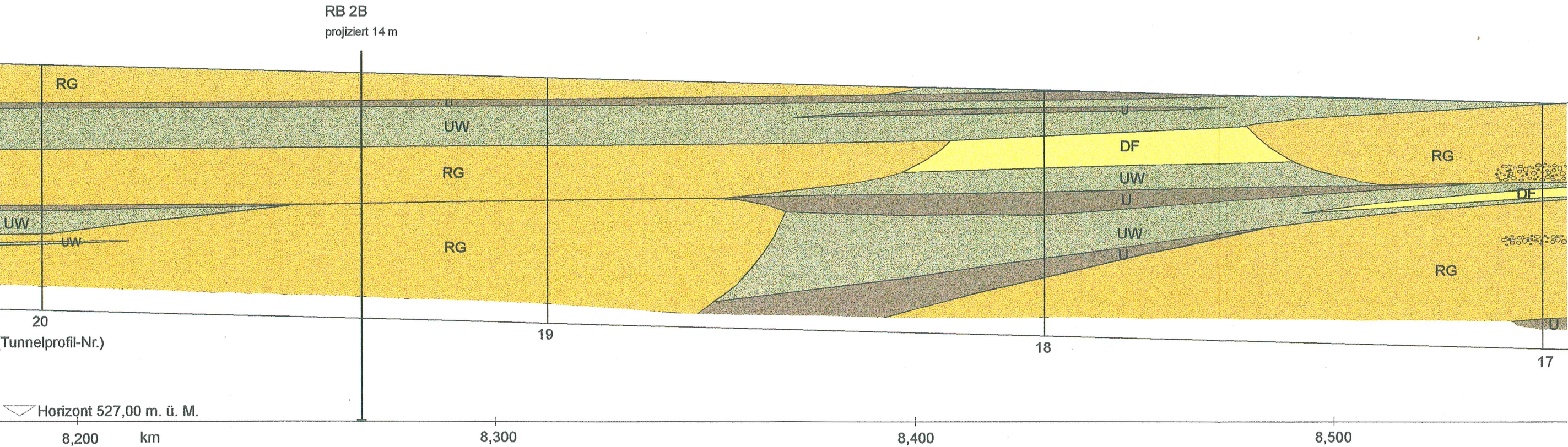
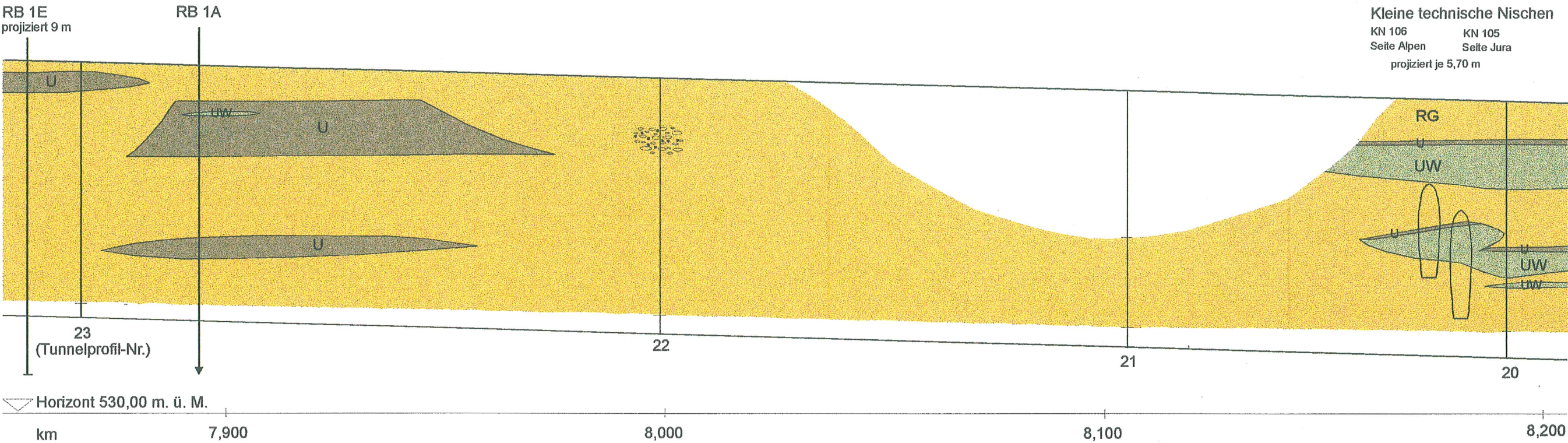






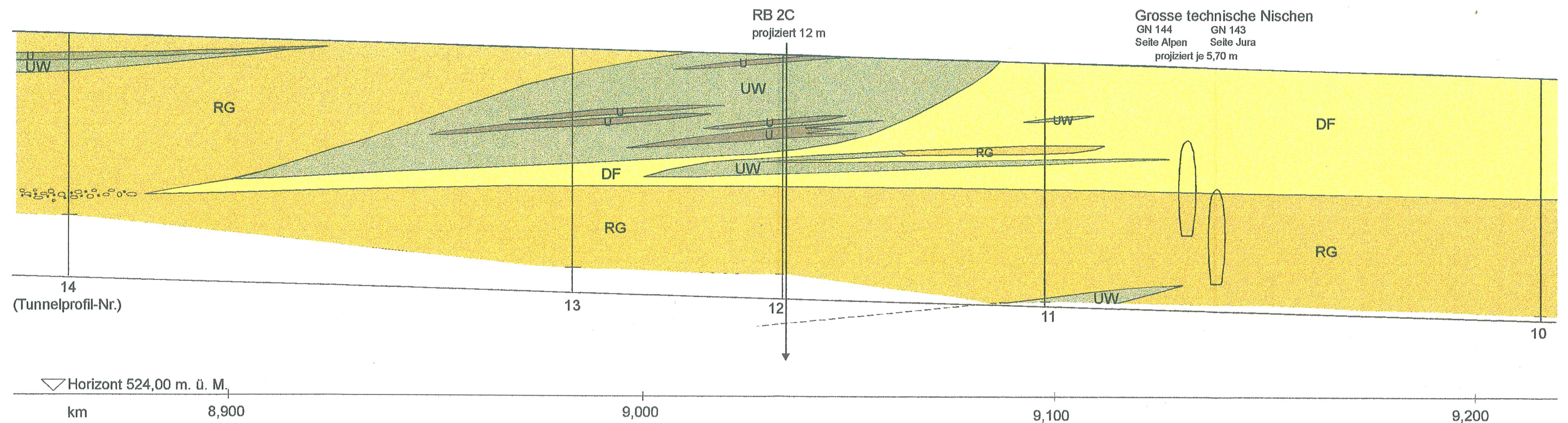
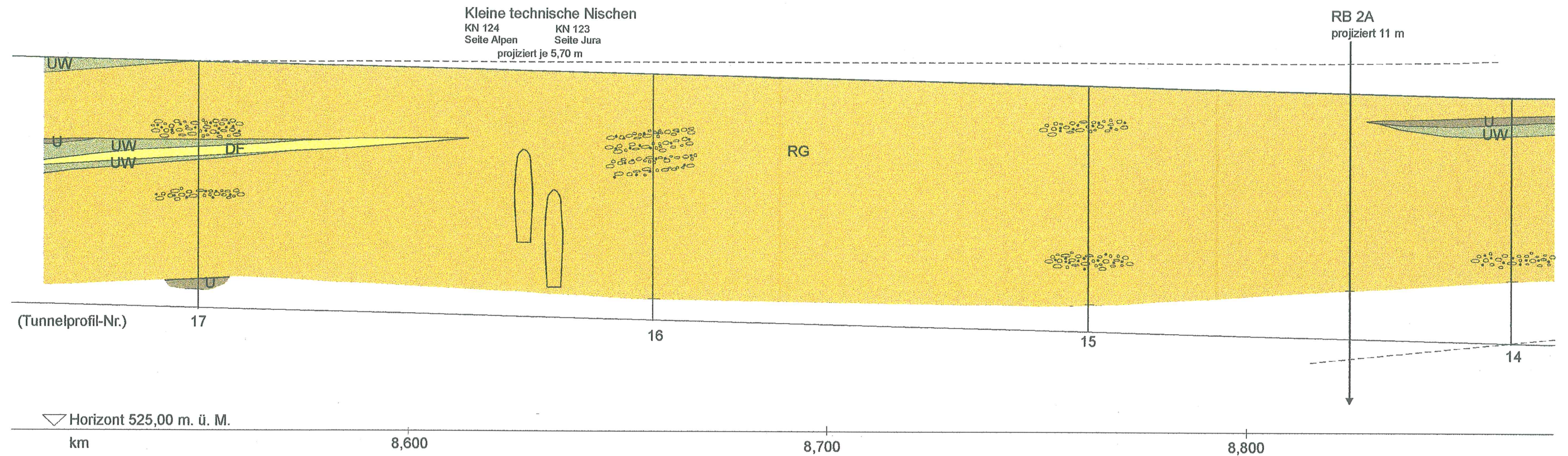
Geologische Längsprofile Nr. 6 und Nr. 5

M = 1 :1000 (horizontal) / 1:200 (vertikal)



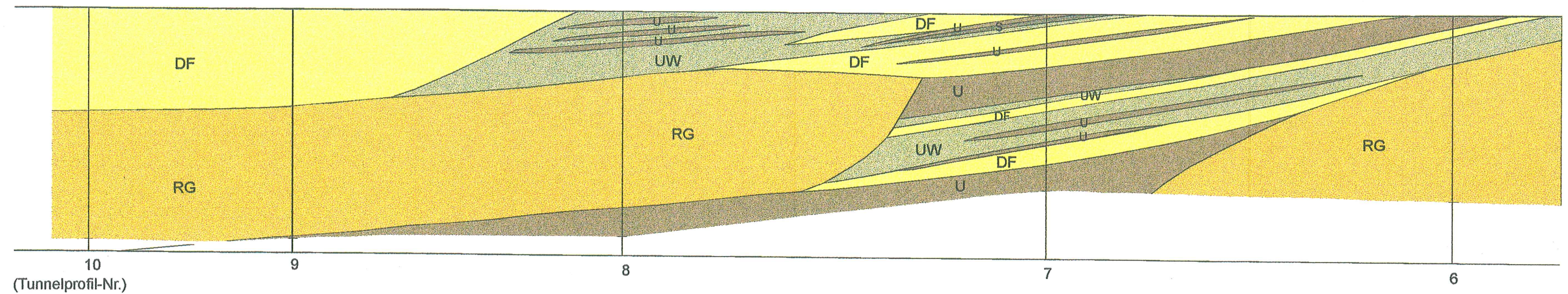
Geologische Längsprofile Nr. 4 und Nr. 3

M = 1: 1000 (horizontal) / 1:200 (vertikal)



Geologische Längsprofile Nr. 2 und Nr. 1

M = 1: 1000 (horizontal) / 1:200 (vertikal)

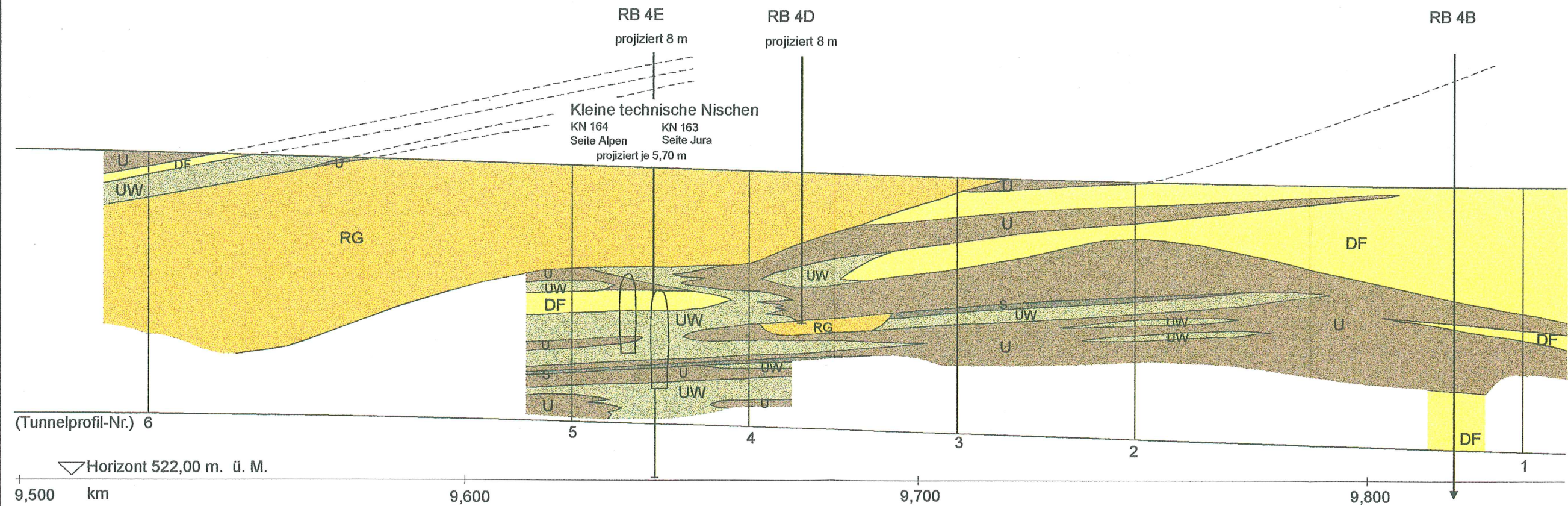


▽ Horizont 530,00 m. ü. M.
9,200 km

9,300

9,400

9,500



(Tunnelprofil-Nr.) 6

▽ Horizont 522,00 m. ü. M.

9,500 km

9,600

9,700

9,800

ISBN 3-906723-13-5
ISSN 1017-1509