

**Eidgenössisches Verkehrs- und Energiewirtschaftsdepartement
Bundesamt für Strassenbau**

**Département fédéral des transports, des communications et de l'énergie
Office fédéral des routes**

**Dipartimento federale dei trasporti, delle comunicazioni e delle energie
Ufficio federale delle strade**

Vorabklärungen zur Vorauserkundung an der Ortsbrust im Tunnelbau

**Forschungsauftrag 61/90 auf Antrag der
SIA-Fachgruppe für Untertagbau FGU**

**Ch. Amstad, dipl.Ing.ETH/SIA
Institut für Geotechnik, ETH Zürich**

Zürich, November 1992

INHALTSVERZEICHNIS

Zusammenfassung	5
1. Einleitung	8
2. Problemstellung	9
2.1 Die Unsicherheiten geologischer Prognosen	9
2.2 Randbedingungen für die Treffsicherheit einer geologischen Prognose	10
2.2.1 Oberflächennaher Tunnelbau	11
2.2.2 Tunnel- und Stollenabschnitte mit mittlerer Gebirgsüberlagerung	11
2.2.3 Tiefliegende Stollen, Tunnel und Schächte	12
2.3 Randbedingungen für die Vorauserkundung an der Ortsbrust im Tunnelbau	12
2.3.1 Die Vorfeldprognose bei offener Ortsbrust	13
2.3.2 Die Vorfeldprognose bei verdeckter Ortsbrust	13
2.3.3 Einfluss der Vortriebsleistungen auf die Vorfeldprognose	16
3. Systeme zur Vorauserkundung an der Ortsbrust im Tunnelbau	17
3.1 Das Vorbohrverfahren	17
3.1.1 Die Anwendung des Vorbohrverfahrens beim konventionellen Vortrieb	18
3.1.2 Die Anwendung des Vorbohrverfahrens beim mechanischen Vortrieb	18
3.2 Seismik	19
3.2.1 Praktische Erfahrungen mit Seismik im Felslabor Grimsel (GTS)	21
3.2.2 Praktische Erfahrungen mit Seismik im Centovallibahn-Tunnel	21
3.2.3 Praktische Erfahrungen mit Seismik im Tunnel Leissigen	22
3.2.4 Zusammenfassung der bisherigen Erfahrungen mit der seismischen Vorauserkundung	22
3.3 Weitere Messverfahren	24

4.	Das Georadar-Messverfahren	25
4.1	Theoretische und methodische Grundlagen des Georadar-Verfahrens	25
4.1.1	Die Geschwindigkeit der Radarwellen im Ausbreitungsmedium	27
4.1.2	Die Reichweite von Radarwellen in das Ausbreitungsmedium	28
4.1.3	Das Auflösungsvermögen	28
4.1.4	Die Dämpfung aufgrund der Reflexionen an den Schichtgrenzen	29
4.1.5	Radar-Messverfahren	29
4.2	Bisherige Erfahrungen mit dem Georadar-Messverfahren	29
4.2.1	Erfahrungen mit Georadar beim Leitungsbau und bei der oberflächennahen Erkundung	29
4.2.2	Erfahrungen mit Georadar bei der Kontrolle von Tunnelverkleidungen	31
4.2.3	Anwendung von Georadar bei einem Schildvortrieb	33
5.	Die von der FGU veranlassten Testmessungen mit Georadar	34
5.1	Vorversuche mit Georadar im Umfahrungstunnel Leissigen	34
5.1.1	Geologie	34
5.1.2	Messdisposition	36
5.1.3	Die Messapparatur (Radar mit synthetischen Pulsen)	38
5.1.4	Messresultate Georadar Leissigen	40
5.1.5	Zusammenfass. der im Tunnel Leissigen gewonnenen Erfahrungen mit Georadar	44
5.2	Seismik-Messungen im Umfahrungstunnel Leissigen	44
5.3	Vorversuche mit konventionellem Georadar im Umfahrungstunnel Wattwil	45
5.3.1	Geologie	45
5.3.2	Messdisposition	46
5.3.3	Die Messapparatur	47
5.3.4	Messresultate Georadar Wattwil	48
5.3.5	Zusammenfassung der im Tunnel Wattwil gewonnenen Erfahrungen	53
6.	Modellversuche	57
6.1	Ziel der Modellversuche und Untersuchungsprogramm	57

7.	Ausblick: Integration von Georadar in eine TBM	59
7.1	Entwurf eines Abbildungsverfahrens	59
7.2	Konzept zur Integration der Georadar-Messeinrichtung in eine Tunnelbohrmaschine sowie zur Durchführung der Messungen	60
7.2.1	Die Anordnung der Antennen in der TBM	60
7.2.2	Einbau der Antennen im Schildbereich	61
7.2.3	Ankopplung der Antennen an das Gebirge	63
7.2.4	Erfassung von Radarprofilen bei einem TBM Vortrieb	63
7.3	Vorschlag zur Weiterführung des Forschungsprojektes	63
7.3.1	Mögliches Konzept eines zukünftigen Forschungsprojektes	63
7.3.2	Antennen	65
7.3.3	Modellbetrachtungen	65
7.3.4	Aufbau des Messsystems	68
7.3.5	Signaltheorie	68
7.3.6	Zielsetzung	68
7.3.7	Bau eines Prototyps	69

ANHANG TEIL 1

Modellmessungen zur Vorauserkundung an der Ortsbrust im Tunnelbau

Prof. Dr. Ing. V. Hansen, Institut für Hochfrequenztechnik, Ruhr Universität Bochum¹⁾

1.	Einleitung: Simulation des Gebirges mit Modellversuchen	70
2.	Theoretische Grundlagen der Fortpflanzung von Radarwellen im Gebirge	71
2.1	Gesteinsparameter	71
2.2	Dämpfung aufgrund der dielektrischen Verluste	74
2.3	Dämpfung aufgrund der Reflexionen an den Schichtgrenzen	77
2.4	Das Auflösungsvermögen	80
2.5	Festlegung des Frequenzbereiches	80

1) Autorisierte Kurzfassung des Schlussberichtes [24]

3. Modellbetrachtungen	82
3.1 Theoretische Grundlagen	82
3.2 Festlegung der Modellparameter	83
4. Das Antennensystem	84
4.1 Anforderungen an das Antennensystem	84
4.2 Untersuchte Antennentypen	85
4.3 Auswahl einer Antenne für die Modellversuche	85
5. Untersuchungen an einem TBM-Modell	86
5.1 Das Meßverfahren	86
5.2 Messergebnisse	88
5.2.1 Messungen im freien Raum	88
5.2.2 Messungen im Sand	92
6. Zusammenfassende Beurteilung der Modellversuche	92

ANHANG TEIL 2

Schlussbemerkungen und Ausblick	95
Dr. F. Caspers, CERN, Genf	
Literaturverzeichnis	98

Zusammenfassung

Der Vortrieb eines Stollens- oder Tunnels, aber auch das Abteufen eines Schachtes wird von einer Spannungsumlagerung im Gebirge begleitet. Diese äussert sich in einer statischen Wechselwirkung zwischen Ausbau und Gebirge. Das Element "Ausbau" kann dabei durch eine gezielte Wahl der Materialeigenschaften sowie der Form und Grösse der Ausbauelemente beeinflusst und bestimmt werden. Im Gegensatz dazu wird beim Vortrieb der oft wenig bekannte Baustoff "Gebirge" vorgefunden. Insbesondere im Falle einer komplexen Geologie und bei grosser Gebirgsüberlagerung sind mit fortschreitendem Vortrieb laufend Ungewissheiten bezüglich dem Baustoff "Gebirge" vorhanden.

Ein weiteres potentiell Überraschungselement für den Tunnelbauer stellt das Bergwasser dar, welches, je nach Menge und Druck, einerseits die Materialeigenschaften des Gebirges verschlechtern, andererseits die Vortriebsarbeiten erschweren kann. Besonders kritische Situationen entstehen durch Wasser- und Schlammereinbrüche.

Es ist daher verständlich, dass eine verbesserte Kenntnis der Gebirgsverhältnisse und des Wasservorkommens vor und seitlich der Ortsbrust eines Tunnelvortriebes sehr erstrebenswert ist. Manche Schadensfälle in Form von Gesteinsniederbrüchen, Schlamm- und Wassereinbrüchen hätten bei genauerer Kenntnis der geologischen und hydrologischen Verhältnisse vor der Ortsbrust vermieden oder zumindest in ihrer Auswirkung gemildert werden können. Derartige, oft schlagartig auftretende Schadensereignisse können die Vortriebsarbeiten nachhaltig beeinträchtigen, was zu einer Verlängerung der Bauzeit bzw. zu erheblichen Kostensteigerungen führen kann. In Einzelfällen war man gar gezwungen, den Tunnelvortrieb auf der geplanten Achse einzustellen und eine neue Linienführung zu suchen. Das überraschende Auftreten derartiger Ereignisse hat schon des öfteren zu Todesopfern geführt.

Die Voraussage der Gebirgs- und Wasserverhältnisse im Ortsbrustbereich beruhte bis anhin vorwiegend auf der von der Geländeoberfläche aus vorgenommenen geologischen Erkundung. Die geologische Prognose bezweckt die möglichst zutreffende Beschreibung der Gebirgseigenschaften und der Wasservorkommen entlang der Projektachse eines Stollens, Tunnels oder Schachtes. Grosse Gebirgsüberlagerungen oder sehr wechselhafte geologische Verhältnisse können jedoch die Genauigkeit und die Zuverlässigkeit der Voraussage beeinträchtigen. Zudem steigen die Kosten für die geologische Erkundung bei zunehmender Gebirgsüberlagerung stark an, da längere Erkundungsbohrungen notwendig sind und geophysikalische Methoden nur beschränkt angewendet werden können.

Für derartige Fälle besteht im Tunnelbau der Bedarf nach einem Erkundungsverfahren, welches die Lokalisierung von geologischen Irregularitäten bzw. lokalen Schwächezonen im Gebirge, aber auch die Ortung von bergseits der Ortsbrust gespeicherten Wasservorkommen aus dem laufenden Vortrieb ermöglicht. Voraussetzung ist jedoch, dass das gesuchte, laufend angewendete Erkundungsverfahren die Vortriebsarbeiten nicht behindert, insbesondere beim maschinellen Tunnelvortrieb mit entsprechend hohen Vortriebsleistungen. Anzustreben ist eine vollständige Integration und Automatisierung der für die Vorfelderkundung notwendigen apparativen Installationen in die Vortriebseinrichtung.

Kann eine Störzone rechtzeitig in ihrer Lage und Grösse erkannt werden, so besteht die Möglichkeit, den Vortrieb anzuhalten und die Störzone mit besonderen, aus dem Ortsbrustbereich eingesetzten Bauhilfsmassnahmen zu überwinden. Auch eine Änderung der Bauweise oder gar des Bauverfahrens kann dabei erforderlich sein. Eine bewährte und oft angewandte Methode zur Vorfeldprognose ist das

"Vorböhrverfahren" mit oder ohne Kerngewinnung. Dieses Verfahren wird sowohl bei konventionellen wie auch bei maschinellen Vortrieben angewendet. Die Ergebnisse sind jedoch oft nur nadelstichartige Informationen. Je nach Anzahl und Länge der Vorbohrungen werden die Vortriebsleistungen mehr oder weniger stark beeinflusst. In jüngster Zeit werden auch geophysikalische Erkundungsmethoden im Vortrieb eingesetzt. So wurden Versuche mittels Seismik aus dem laufenden Vortrieb vorgenommen, um das Vorfeld der Ortsbrust zu erkunden.

Die Fachgruppe für Untertagebau (FGU) des Schweizerischen Ingenieur- und Architektenvereins befasste sich eingehend mit diesem Thema und war Initiant des vorliegenden Forschungsprojektes. Das Projekt hatte zum Ziel, Vorabklärungen betreffend der Entwicklung einer auf Radar basierenden Messmethode zur Erkundung des Vor- und Umfeldes an der Ortsbrust im Tunnelbau zu treffen und für das weitere Vorgehen Entscheidungsgrundlagen zu erarbeiten.

Beim Georadar-Verfahren handelt es sich um eine relativ junge geophysikalische Messmethode. Sie wurde Anfangs der 70-er Jahre erstmals in einer amerikanischen Kohlenmine angewendet und anschliessend zur Erkundung von Salzdomen eingesetzt. Parallel dazu fand das Georadar-Messverfahren bei der zerstörungsfreien Erkundung von oberflächennahen Erdschichten und Strukturen Verbreitung, insbesondere zur Ortung von Leitungen oder zur Zustandskontrolle von Tunnelverkleidungen.

Eine Georadar-Apparatur besteht aus einer zentralen Sende- und Empfangseinheit und den Antennen. Während des Messvorganges werden von der Sendeantenne elektromagnetische Impulse in den Baugrund eingeleitet. An geologischen Schichtflächen oder Objekten, wo sprungartige Änderungen der elektrischen Impedanz auftreten, werden die Wellen reflektiert oder gestreut. Dabei können sie zurück zur Empfangsantenne gelangen. Die Lokalisierung der Reflexionen erfolgt durch die Messung der Laufzeit und der Amplitude der verstärkten Signale.

Angeichts der hohen Kosten der Entwicklung einer auf Radar basierenden Messmethode zur Erkundung des Vor- und Umfeldes an der Ortsbrust im Tunnelbau wurden die Forschungsrisiken durch ein schrittweises Vorgehen minimiert. In diesem Sinne wurden von der FGU in einem ersten Schritt Vorversuche im Ortsbrustbereich bei zwei sich in der Vortriebsphase befindlichen Tunneln in Auftrag gegeben, wobei die konventionelle Radarmethode dem Verfahren mit synthetischen Pulsen in einem praktischen Versuch unter Tunnelvortriebsbedingungen gegenüber gestellt wurde. Bei diesen Testmessungen ging es primär um die Überprüfung der praktischen Einsetzbarkeit der zur Zeit handelsüblichen Messapparaturen, um die Interpretierbarkeit der Messdaten und um Erfahrungen mit spezialisierten Firmen. Erst in zweiter Linie wurde die Erreichung grösserer Reichweiten angestrebt.

Die wesentlichsten Erkenntnisse dieser Testmessungen waren:

- Die Verwendung von offenen Dipolantennen im Stollen oder Tunnel führte zu einem direkten Übersprechen von Sender und Antenne und zu Reflexionen durch die Tunnelwand, die Ortsbrust und durch Baustellenfahrzeuge. Die mangelnde Kopplung von Antenne und Gebirge führte zu Energieverlusten und reduzierte die Reichweite.
- Mit dem Einsatz von konventionellem Georadar mit einer Frequenz von 60 MHz und offenen Dipolantennen konnten in einem Sedimentgestein, bestehend aus Nagelfluh, Sandstein, Siltstein und Mergel, Reichweiten von 3 bis 5 m erreicht werden.
- Die mit synthetischem Pulsradar mit einer Versuchsapparatur durchgeführten Messungen ergaben bei einer mittleren Frequenz von 28 MHz mit offenen Dipolantennen in einer Wechsellagerung aus Kalksandsteinen und Mergelschiefen im Reflexionsmodus eine maximale Reichweite von 17 m.

In einem zweiten Schritt wurden Modellversuche mit synthetischen Pulsen durchgeführt. Modellversuche sind in der Elektrotechnik ein wertvolles und oft verwendetes Hilfsmittel. Das Ziel dieser Modellversuche war die Entwicklung eines Abbildungssystem für Tunnelbohrmaschinen. Messungen an einem Modell sind bei der Einhaltung der Transformationsregeln exakt durchführbar. Es waren vor allem ökonomische Gründe, welche dazu führten, dass weitere Abklärungen nicht im Massstab 1:1, sondern an Modellen mit einem Verkleinerungsfaktor von 1:50 vorgenommen wurden. Die an der TU Bochum durchgeführten Versuche ergaben neue Erkenntnisse betreffend dem Einsatzbereich von Georadar im Tunnelvortrieb und betreffend der Realisierbarkeit eines geeigneten Abilverfahrens.

Die Erfahrungen mit Georadar haben gezeigt, dass im Nahbereich der Ortsbrust interessante Resultate erzielbar sind. Die gegensätzlichen Forderungen einer grossen Reichweite, welche im Falle von Georadar mit niedrigen Frequenzen erreicht werden, und einem guten Auflösungsvermögen, welches hohe Frequenzen erfordert, führt zur Wahl eines Radar-Frequenzbandes von ca. 10 MHz bis 70 MHz. In-Situ Versuche und Modellbetrachtungen haben ergeben, dass insbesondere tonhaltiges oder stark wasserhaltiges Gestein eine hohe Dämpfung der Radarwellen bewirkt und die Reichweite des Verfahrens einschränken. In stark tonhaltigen Sedimentgesteinen beträgt diese nur noch ca. 5 m. Andererseits stellen Wassereinschlüsse in trockenem Gestein, wie z.B. Karsthöhlen, sehr gute Reflektoren dar und können auf grössere Distanzen noch erkannt werden.

Die Erfolgchancen für die Entwicklung einer auf Georadar basierenden Vorfeldprognose werden unterschiedlich beurteilt. Einerseits lassen die zusammenfassende Beurteilung der Modellversuche von Herrn Prof. Dr. Hansen (Uni Bochum) sowie die Schlussbemerkungen und der Ausblick von Herrn Dr. Caspers (CERN, Genf) vom Standpunkt der Elektrodynamik eine kritische, doch grundsätzlich positive Beurteilung der Erfolgchancen entnehmen. Dieser vorsichtige Optimismus äussert sich in einem, diesem Bericht angefügten Vorschlag zur Realisierung des nächsten Forschungsschrittes.

Andererseits betrachtet der Vorstand der Fachgruppe für Untertagbau des SIA aufgrund der bisherigen Arbeiten zur Vorabklärung der Vorauserkundung an der Ortsbrust im Tunnelbau die Aussichten für die erfolgreiche Entwicklung eines praktisch anwendbaren Gerätes zur Zeit als gering, kosten- und zeitintensiver als prognostiziert, sodass eine weitere Unterstützung dieses Vorhabens durch FGU-eigene bzw. öffentliche Mittel nicht vertreten werden kann. Die Entwicklung einer praxisgerechten Anlage ist nach Auffassung des Vorstandes FGU mit einem hohen Risiko verbunden und es wird angezweifelt, ob die tunnelbautechnisch relevanten Informationen aus den Messwerten wirklich und dazu noch mit vertretbarem Zeitaufwand erbracht werden können.

1. Einleitung

Der Vorstand der Fachgruppe Untertagbau (FGU) des Schweizerischen Ingenieur- und Architektenvereins (SIA) war Initiant des Forschungsprojektes, dessen Abschlussbericht die vorliegende Arbeit darstellt. Im Rahmen der Forschungsförderung durch die FGU hat sich ein Ausschuss des Vorstandes eingehend mit der Frage beschäftigt, inwieweit die Entwicklung einer Methode zur Vorauserkundung der geologischen Verhältnisse im Bereich der Ortsbrust auf der Basis elektromagnetischer Wellen (Georadar) förderungswürdig sei. Mitglieder dieses Ausschusses waren die Herren Dipl.Ing. W. Krebs (Stuag), Dipl.Ing. A.L. Nold (Nagra) und Dipl.Ing. G. Peter (IBA).

Eine erste Phase diente der Erarbeitung von Entscheidungsgrundlagen zur Vergabe des Forschungsprojektes. Die von der FGU beauftragten Spezialisten erarbeiteten dazu die folgenden Berichte:

- "Projektbeschreibung: Vorauserkundung an der Ortsbrust im Tunnelbau"
von Prof. Dr. J. Hugel, Professor für elektrotechnische Entwicklungen an der ETH Zürich.
Weitere Mitwirkende waren Prof. H. Baggenstos (Institut der Feldtheorie und Höchsthfrequenztechnik, ETH Zürich), Dr. P. Neukomm (Professur für elektrotechnische Entwicklungen und Konstruktionen, ETH Zürich) und Prof. Zhang (Southeast University, China)
- "Fernerkundungssystem bei Tunnelbohrmaschinen, Diskussion hochfrequenztechnischer Aspekte zum Projektvorschlag"
von Dr. F. Caspers, CERN, PS Division, Genf
- "Erkennen von Störungen und Diskontinuitäten im Vor- und Umfeld eines Stollens mit geophysikalischen Methoden"
von Dr. P. Blümling, Nagra, Wettingen

Aufgrund der veranschlagten extrem hohen Projektkosten zur Entwicklung und zum Bau eines Funktionsmusters für den praktischen Einsatz im echten Tunnelbetrieb entschloss sich die FGU zu einem schrittweisen Vorgehen.

In diesem Sinne umfasste die zweite Projektphase, welche mit finanzieller Unterstützung des Bundesamtes für Strassenbau durchgeführt wurde, Testmessungen in zwei Tunneln. In einem dritten Schritt wurden am Institut für Hochfrequenztechnik an der Ruhr-Universität Bochum (Prof. Dr. V. Hansen) Untersuchungen an einem Modell für eine Tunnelbohrmaschine realisiert.

Als Sachbearbeiter und Autor dieses Berichtes zeichnet Dipl. Ing. Ch. Amstad, wissenschaftlicher Adjunkt an der Professur für Untertagebau des Institutes für Geotechnik an der ETH Zürich. Seine Mitarbeit bei diesem Projekt umfasste die Koordination und Überwachung der Testmessungen in Zusammenarbeit mit dem Ausschuss der FGU und Dr. Blümling (Nagra) in der zweiten Projektphase.

Es ist das Ziel dieses Berichtes, einen umfassenden Überblick über den Stand der Kenntnisse zu diesem Thema zu geben. Dabei wird angestrebt, auf die Problemstellung, die bereits vorhandenen technischen Möglichkeiten und Lösungsansätze, auf die Resultate der In Situ und im Labor durchgeführten Versuche sowie auf das Ziel, den Weg und die Realisierungschancen einer zukünftigen Entwicklung einzugehen.

2. Problemstellung

Der Erfolg eines Tunnelvortriebes ist zu einem wesentlichen Teil von einer umfassenden und möglichst zuverlässigen geologischen Prognose des Gebirges abhängig. Auf dieser Prognose basiert dann die Wahl der Bau- und Betriebsweise sowie der Bauhilfsmassnahmen. Erreicht jedoch ein Tunnelvortrieb unerwarteterweise eine Störzone oder stark wasserführendes Gebirge, so kann dies trotz Vorsorgemassnahmen fatale Folgen für den Weitervortrieb oder gar für die Fertigstellung des Tunnels mit sich bringen.

Erfahrungen aus der Tunnelbaupraxis zeigen, dass insbesondere beim Vortrieb mit Tunnelbohrmaschinen (TBM) mit offener Ortsbrust in kürzeren oder längeren Störzonen eine instabile Ortsbrust und Erscheinungen des echten Gebirgsdruckes, allenfalls gar in Kombination mit grossem Wasserandrang zu längeren Vortriebsstillständen, zur Änderung des Vortriebskonzeptes, zur Änderung der Linienführung oder im Extremfall gar zur Einstellung des Vortriebes Anlass gaben.

2.1 Die Unsicherheiten geologischer Prognosen

Zwei Beispiele sollen die Unsicherheiten einer geologischen und geotechnischen Vorauserkundung bzw. die Wichtigkeit einer zuverlässigen geologischen Prognose verdeutlichen.

Als erstes Beispiel sei der 26 km langen Agua Blanca Stollen des Kraftwerkes Pueblo Viejo in Guatemala erwähnt, der teils konventionell, teils mit Tunnelbohrmaschinen von Durchmesser 5.67 m aufgeföhren wurden [1]. Trotz Sondierbohrungen von insgesamt 3 km Länge, welche von der Geländeoberfläche abgeteuft wurden, sowie einer von der Geländeoberfläche ausgeführten intensiven geophysikalischen Erkundungen (elektrische Widerstandsmessungen, Audio-Magneto-Telluric-Methode, seismische Reflektions- und Refraktionsmessungen, Down-the-hole-Physical-Logging) ereignete sich beim Vortrieb "Agua Blanca Süd" beim Unterfahren einer unerwartet grossen Karsthöhle ein Verbruch im Bereich der Ortsbrust. Innert einer Stunde stieg der Wasseranfall im Bereich der Tunnelbohrmaschine von anfänglich 50 l/sec auf bis zu 2500 l/sec an [2]. Der Wassereinbruch, welcher Geröll und Schlamm mit sich führte, verschüttete die TBM einschliesslich dem rund 150 m langen Nachläufer vollständig. Die Tunnelbohrmaschine musste schliesslich aufgegeben und mit einer Änderung der horizontalen Linienführung umfahren werden. "Dies zeigte allen Beteiligten wieder einmal das hohe Risiko, das wir im Tunnelbau eingehen, auch wenn alle bisher bekannten Vorkehrungen getroffen werden, um solche Schadensfälle zu verhindern" [2].

Als zweites Beispiel sei ein konventioneller Tunnelvortrieb erwähnt, nämlich der des Nakajama-Tunnels in Japan [3]. Der rund 14.8 km lange Tunnel weist ein Hufeisenprofil teils mit und teils ohne Sohlgewölbe auf. Der horizontale Ausbruchdurchmesser beträgt 11.5 m. Die Tunneltrasse verläuft zwischen zwei Vulkanen und durchörtert in 200 bis 420 m Tiefe junge Eruptionsprodukte (Bims, Tuffe, Brekzien, Aschen und Laven) von äusserst geringer Festigkeit; nur auf einer kurzen Strecke stand standfester Dioritporphyr an. Der Bergwasserspiegel liegt etwa 200m über dem Tunnelniveau. Die Kombination von Wasser unter hohem Druck und in grossen Mengen mit dem schwachen Gebirge führte dazu, dass diese unkonsolidierten Formationen in Mengen von 40 - 100 m³/ Minute in den Tunnel fliessen konnten. Um die Vortriebsleistungen zu beschleunigen wurden zusätzlich zu den von den Portalen ausgehenden Vortrieben drei Schächte abgeteuft, um damit weitere 6 Angriffstellen für den Vortrieb zu erhalten.

Zwei katastrophale Wassereintritte in den mittleren Baulosen führten zur Überflutung der Baustellen innert kürzester Zeit. Das Wasser stieg in den Schächten auf ein Niveau von über 200 m über der Tunnelsohle. Beim Baulos Shihogi dauerten die Sanierungsarbeiten rund 10 Monate. Während dieser Zeit wurde eine ergänzende Aufschlusskampagne mit von der Geländeoberfläche abgeteufte Sondierbohrungen mit Bohrlängen von mehr als 300 m durchgeführt, welche den genauen Verlauf der Oberfläche des standfesten Dioritporphyrs vermittelt (Bild 1) [3]. Diese Bohrungen zeigten die Möglichkeit auf, durch eine Änderung der horizontalen Linienführung den quartären Schichten weitgehend auszuweichen (Bild 1). Die kurzen quartären Abschnitte der neuen Linienführung wurden mit Injektionsschirmen von der Geländeoberfläche ausgehend verfestigt. Dazu standen bis zu 40 Bohrgeräte gleichzeitig im Einsatz. Parallel dazu wurde von der Geländeoberfläche aus die Verbruchsstelle im Tunnel grossräumig verpresst, um anschliessend den unter Wasser stehenden Tunnelabschnitt wieder zu eröffnen.

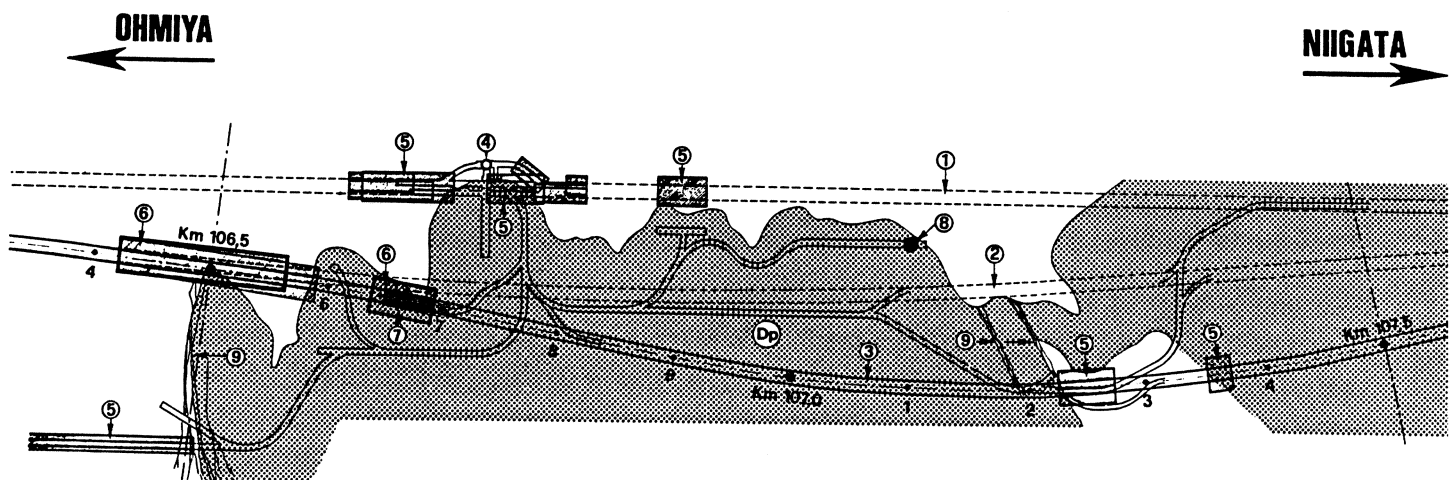


Bild 1 Nakajama-Tunnel, Lageplan Los Shihogi

- 1) ursprüngliche Tunneltrasse 2) Ausgeführte Tunneltrasse 4) Schacht
- 5) Injektionen vom Stollen 6) Injektionen von der Geländeoberfläche
- 8) Wassereintruch

2.2 Randbedingungen für die Treffsicherheit einer geologischen Prognose

Diese beiden extremen Beispiele zeigen die praktischen Auswirkungen auf, welche eine ungenügende Kenntnis der geologischen und geotechnischen Verhältnisse sowohl beim konventionellen als auch beim maschinellen Vortrieb eines Stollens, Tunnels oder Schachtes haben können. Dies trifft insbesondere dann zu, wenn bei geringer Festigkeit des Gebirges gleichzeitig hohe Wasserdrücke bzw. grosse Wassermengen auftreten. Die beiden erwähnten Beispiele zeigen auch, dass mit zunehmender Überlagerung die Sanierungsmöglichkeiten im Falle eines Verbruches stark eingeschränkt bzw. die Sanierungskosten extrem zunehmen können.

Die Treffsicherheit einer geologischen Prognose ist unter anderem von der Überlagerungshöhe des Stollens, Tunnels oder Schachtes und von der Intensität bzw. dem Kostenaufwand für die geologischen Erkundung abhängig.

2.2.1 Oberflächennaher Tunnelbau

Beim oberflächennahen Tunnelbau mit Überlagerungshöhen von bis zu rund 50 m, wie sie z.B. beim U-Bahnbau oder beim Vortrieb im Bereich der Tunnelportale vorliegen, ist oft ein grosser Erfahrungsschatz aus den zuvor unter ähnlichen geologischen und geotechnischen Bedingungen aufgefahrenen Tunnels vorhanden. Die geologische Erkundung wird in diesen Fällen in der Regel von der Geländeoberfläche mittels Sondierbohrungen und geophysikalischen Messmethoden vorgenommen. Durch die oberflächennahe Lage des Tunnels ist ein dichtes Bohrraster mit relativ kurzen Bohrlängen wirtschaftlich vertretbar, was zu einem relativ zuverlässigen geologischen Aufschluss führt.

Die geologisch bedingten Risiken beim Tunnelvortrieb beschränken sich im hier vorliegenden Falle auf lokale Anomalien zwischen den Bohrungen. Zu den grössten Risikofaktoren zählen, wie z.B. beim U-Bahnbau in München, die Unregelmässigkeiten im Relief des Tertiärs (bedingt durch dessen Welligkeit bzw. wassergefüllte Erosionsrinnen gemäss Bild 2) sowie nicht erkannte und somit auch nicht entwässerte Sandlinsen [4]. Dies kann zu unerwarteten Setzungen an der Geländeoberfläche führen oder gar einen Verbruch auslösen, der sich im Falle des oberflächennahen Tunnelbaus zu einem Tagbruch aufweiten kann. Damit wird nicht nur das Bauwerk selbst, sondern auch die Umgebung gefährdet (Bebauung, Strassen, Leitungen etc.).

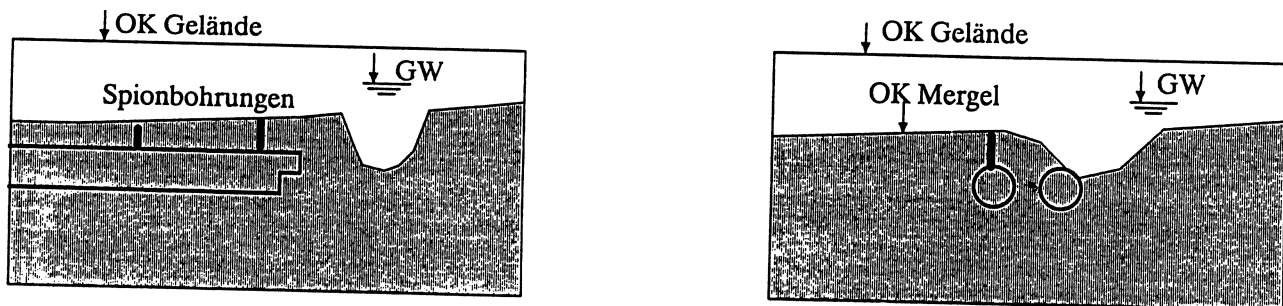


Bild 2 Risikofaktoren beim Tunnelvortrieb durch den unregelmässigen Verlauf des Tertiärs (U-Bahn München) [4]

2.2.2 Tunnel- und Stollenabschnitte mit mittlerer Gebirgsüberlagerung

Bei Überlagerungshöhen von 50 - 500 m muss der Raster der Erkundungsbohrungen aus wirtschaftlichen Gründen wesentlich gröber gewählt werden. Die zwischen den Bohrungen liegenden Bereiche kann der Geologe oft durch Inter- und Extrapolation sowie unter Zuhilfenahme von geophysikalischen Messungen ergänzen. Die Treffsicherheit der geologischen Prognose zur Auffindung jener Störzonen, welche für den Tunnelbau relevant sind, nimmt mit zunehmender Überlagerung deutlich ab. Umgekehrt proportional dazu ist die Zunahme der Risiken für den Tunnelvortrieb. Bei stark druckhaftem oder stark wasserführendem Gebirge kann ein Verbruch zu einer Überflutung des Tunnelvortriebes führen, was besonders bei einem fallenden Vortrieb oder bei einem Blindschacht gravierende Folgen haben kann. Im Falle eines Verbruches kann der Tunnelvortrieb nurmehr in einer sehr beschränkten Masse und unter hohen Kosten von der Geländeoberfläche aus unterstützt bzw. saniert werden. Sanierungsmassnahmen müssen dann in der Regel vom Vortrieb aus vorgenommen werden. Diesbezüglich war der eingangs erwähnte

Nakayamatunnel ein Sonderfall, da ein Grossteil der Bauhilfsmassnahmen von der Geländeoberfläche ausgehend ausgeführt werden konnten.

Bei sehr komplexen geologischen Verhältnissen zeigen sich die Grenzen der Aussagekraft von Sondierbohrungen. Ein Pilotstollen kann in solchen Fällen die Situation wesentlich entschärfen. Er dient einerseits der Baugrunderkundung und anderseits der Drainage. Risikoabschätzungen können zeigen, ob der Kostenaufwand für den Bau eines Pilotstollens (mit der damit oft verbundenen Bauzeitverlängerung) für das Gesamtprojekt gerechtfertigt ist.

Der in der Regel mit einer TBM aufzufahrende Pilotstollen durchfährt, analog zum nachfolgenden Teil- oder Vollausschub, die mit geologischen Unsicherheiten belasteten Abschnitte. Material- und Wassereinbrüche im Bereich der Ortsbrust und hinter dem Bohrkopf sind somit bereits im Pilotstollen möglich. Zudem kann ein hoher Sicherungsaufwand im Pilotstollen zu Bauzeitverzögerungen und zu höheren Kosten führen. Auch die Wahl eines Pilotstollens birgt somit einige Risiken.

2.2.3 Tiefliegenden Stollen, Tunnel und Schächte

Hier gelten beim Vortrieb im wesentlichen die zuvor angeführten Argumente in noch extremerer Form. Den hohen Risiken von hohen Gebirgs- und Wasserdrücken bzw. Wassermengen stehen die erhöhten Schwierigkeiten bei der geologischen Prognosen, aber auch die nur begrenzten Möglichkeiten einer Schadensbehebung, gegenüber. Die grosse Tiefenlage führt dazu, dass die geologische Prognose auf wenige Sondierbohrungen und die Oberflächenaufschlüsse aufgebaut werden muss. Weitere unbekannte Einflussfaktoren, wie z.B. der primäre Spannungszustand oder die Festigkeit bzw. Durchlässigkeit des Gebirges, erhöhen die tunnelbautechnischen Risiken weiter. Die geplanten alpenquerenden Basistunnel mit Überlagerungshöhen von bis zu 2500 m und Wasserdrücken von bis zu 150 bar sind Beispiele dafür.

2.3 Randbedingungen für die Vorauserkundung an der Ortsbrust im Tunnelbau

Aus den vorangehenden Ausführungen geht hervor, dass die Möglichkeit einer dem Vortrieb vorausseilenden geologischen Prognose insbesondere dann von grosser Bedeutung ist, wenn grössere Überlagerungen oder eine stark wechselhafte Geologie die Treffsicherheit der geologischen Prognose stark einschränken. Die grosse Bedeutung einer Vorfeldprognose zeigt sich auch bei der Betrachtung der bauzeitlichen und kostenmässigen Konsequenzen eines Verbruches in einem laufenden Vortrieb.

Eine vom Vortrieb ausgehende Vorfeldprognose ist jedoch nur dann sinnvoll, wenn sie einen Blick in das unmittelbare Vor- und Umfeld des vordersten Vortriebslementes (Pilot-, First-, Ulmenstollen etc) erlaubt. Die erforderliche Reichweite des Erkundungssystems ist primär abhängig von der Vortriebsleistung, aber auch vom Stollen-, Tunnel- bzw. Schachtdurchmesser sowie von den geologischen und hydrologischen Verhältnissen. Diese Faktoren bestimmen zusammen mit der Reichweite des Erkundungssystems die erforderliche Häufigkeit der Durchführung der Vorfeldprognose.

Ein wichtiger Faktor bei der Wahl eines Systems zur Vorfelderkundung ist zudem der zeitliche Aufwand zur Durchführung der Vorauserkundung und die damit verbundene Beeinträchtigung der Vortriebsarbeiten. Grundsätzlich stehen zwei Möglichkeiten zur Durchführung der Vorfeldprognose

zur Verfügung, einerseits die Nutzung von Arbeitsunterbrüchen beim Vortrieb (z.B. Nachtschicht, Wochenende) oder andererseits die Integration des Systems in das Bauverfahren (z.B. in eine TBM integrierte Apparaturen).

Der Einsatz eines Vorfelderkundungssystems ist auch von der Zugänglichkeit zur Ortsbrust selbst bzw. zur Ausbruchleibung direkt hinter der Ortsbrust abhängig. Die Zugänglichkeit zur Ortsbrust wird primär vom Bauverfahren bzw. der Bauweise bestimmt.

2.3.1 Die Vorfeldprognose bei offener Ortsbrust

Im Falle eines konventionellen Vortriebes, eines Abbaus mit Hydraulikhammer oder einer Teilschnittmaschine ist die Ortsbrust in der Regel offen oder allenfalls partiell gestützt. Die Ortsbrust steht senkrecht oder mit Stützkern. Das Gebirge ist frei anstehend und sichtbar, gegebenenfalls temporär mit einer dünnen Spritzbetonschale oberflächlich geschützt. Diese Faktoren treffen in der Regel auch für einen Vortrieb mit offenem Schild sowie für Tunnelvortriebe mit einem Jetgewölbe zu.

Die Grösse des Ausbruchquerschnittes ist vom Normalprofil bzw. von der Bauweise abhängig. Im Falle eines Kalottenvortriebes oder Vollausbruches steht für die Vorfeldprognose in der Regel ein grösserer Querschnitt zur Verfügung als im Falle eines Pilot- oder Ulmenstollens, wie dies z.B. bei der Deutschen Bauweise der Fall ist. Hier kann der Querschnitt der Ortsbrust nur noch 6 - 8 m² betragen.

Der Einbau der provisorischen Sicherung aus Ankern, Netzen, Spritzbeton, Stahl- und Gitterbögen, Tübbingen etc. erfolgt meist in der Nähe der Ortsbrust. Der endgültige Ausbau wird in der Regel nicht im Ortsbrustbereich ausgeführt (Ausnahme Grauholztunnel). Er hat daher keinen Einfluss auf die Wahl des Systems zur Vorfeldprognose.

Beim Vortrieb eines Stollens, Tunnels oder Schachtes mit einer offenen Ortsbrust ergibt sich der Vorteil, dass Erkenntnisse aus der Vorfeldprognose sofort umgesetzt werden können. Die unverbaute Ortsbrust erlaubt den sofortigen Einsatz von Bauhilfsmassnahmen wie vorausseilende Erkundungsbohrungen, Injektionen, Drainagebohrungen oder eine Umstellung der Bauweise (Bau eines Pilotstollens, Umstellung von Vollausbruch auf Kalottenvortrieb etc.).

2.3.2 Die Vorfeldprognose bei verdeckter Ortsbrust

Es stehen heutzutage mehrere Tunnelvortriebseinrichtungen zur Verfügung, bei welchen die Ortsbrust während des Vortriebes nicht dauernd zugänglich ist. Die wichtigste davon ist die Tunnelbohrmaschine, bei der der mit Meisseln bestückte Bohrkopf die Ortsbrust vollständig verdeckt. Bei Vortriebsunterbrüchen kann durch den Rückzug des Bohrkopfes die Ortsbrust besichtigt werden.

Je nach Bohrsystem und Gebirgsbeschaffenheit wird der Fels hinter dem Bohrkopf mit Bauhilfsmassnahmen wie Ankern, Spritzbeton oder Einbaubogen gestützt. Bei der Verwendung eines Schildes mit nachfolgendem Tübbingeinbau im Schildschwanz tritt das Gebirge während dem Vortrieb auch seitlich der Ortsbrust nicht mehr in Erscheinung.

Zu den maschinellen Vortrieben gehört auch der Hydroschild mit flüssigkeitsgestützter Ortsbrust, der Erddruckschild, der Druckluftschild sowie der Mixschild. Bei all diesen Maschinen wird die Ortsbrust während des Vortriebes dauernd gestützt. Sie ist in der Regel nur bei Arbeitsunterbrüchen unter erschwerten Bedingungen zugänglich. Diesen Maschinen folgt in der Regel ein Schild mit Tübbingeinbau oder Extrudierbeton.

Auf Erkenntnisse aus einer Vorfelderkundung kann bei Tunnelbohrmaschinen, je nach System, oft nur in einem begrenzten Masse und zudem meist unter erschwerten Bedingungen reagiert werden. Im Falle einer TBM ohne Schild (Bild 3a) kann die Maschine angehalten werden, um Bauhilfsmassnahmen wie Injektionen und Drainagemassnahmen vor der Ortsbrust einzubringen. Unter besonders extremen Umständen ist gar ein händischer Vortrieb vor dem Bohrkopf der TBM denkbar. Einen Eindruck vom baulichen und indirekt auch zeitlichen bzw. finanziellen Aufwand für derartige Massnahmen geben die Beispiele in Bild 3 für zwei ausgeführte Stollen.

Es zeigt sich somit, dass auch bei einer Früherkennung von kritischen Gebirgsbereichen im Vor- oder Umfeld eines Tunnelvortriebes ein erheblicher Aufwand zur Überwindung dieses kritischen Vortriebsabschnittes erforderlich sein kann. Allenfalls notwendige Bauhilfsmassnahmen können jedoch rechtzeitig geplant und kontrolliert durchgeführt werden. Eine kontinuierliche Vorfeldprognose kann das überraschende Anfahren eines kritischen Abschnittes mit Folgen wie einem Verbruch im Bereich der Ortsbrust oder das Einbrechen von Wasser- und Schlammmassen auf die Vortriebseinrichtungen verhindern. Die Durchführung einer kontinuierlichen Vorfeldprognose kann daher eine erhebliche wirtschaftliche Bedeutung für das Bauwerk haben, da derartige Schadensereignisse den ganzen Bauablauf behindern oder gar den Vortrieb über längere Zeit stilllegen können.

Im Falle von Vortriebssystemen mit integrierter Ortsbruststützung, wie dies bei Erddruck- oder Hydroschilden der Fall ist, ist eine Anpassung der Ortsbruststützung an die Erkenntnisse der Vorfeldprognose nur in einem beschränkten Masse möglich. Bei einem Mixschild könnte jedoch, dank einer Vorfeldprognose, auf einen erkannten Wechsel der geologischen und hydrogeologischen Verhältnisse rechtzeitig durch eine sofortige Umstellung von Trocken- auf Nass- bzw. Druckluftbetrieb reagiert werden. Da die zukünftige Maschinenentwicklung im Tunnelbau aller Voraussicht nach in der Richtung von flexiblen Mehrzweckmaschinen à la Mixschild geht, ist die Erforschung einer Messmethode zur kontinuierlichen Vorfeldprognose auch in diesem Falle von Interesse.

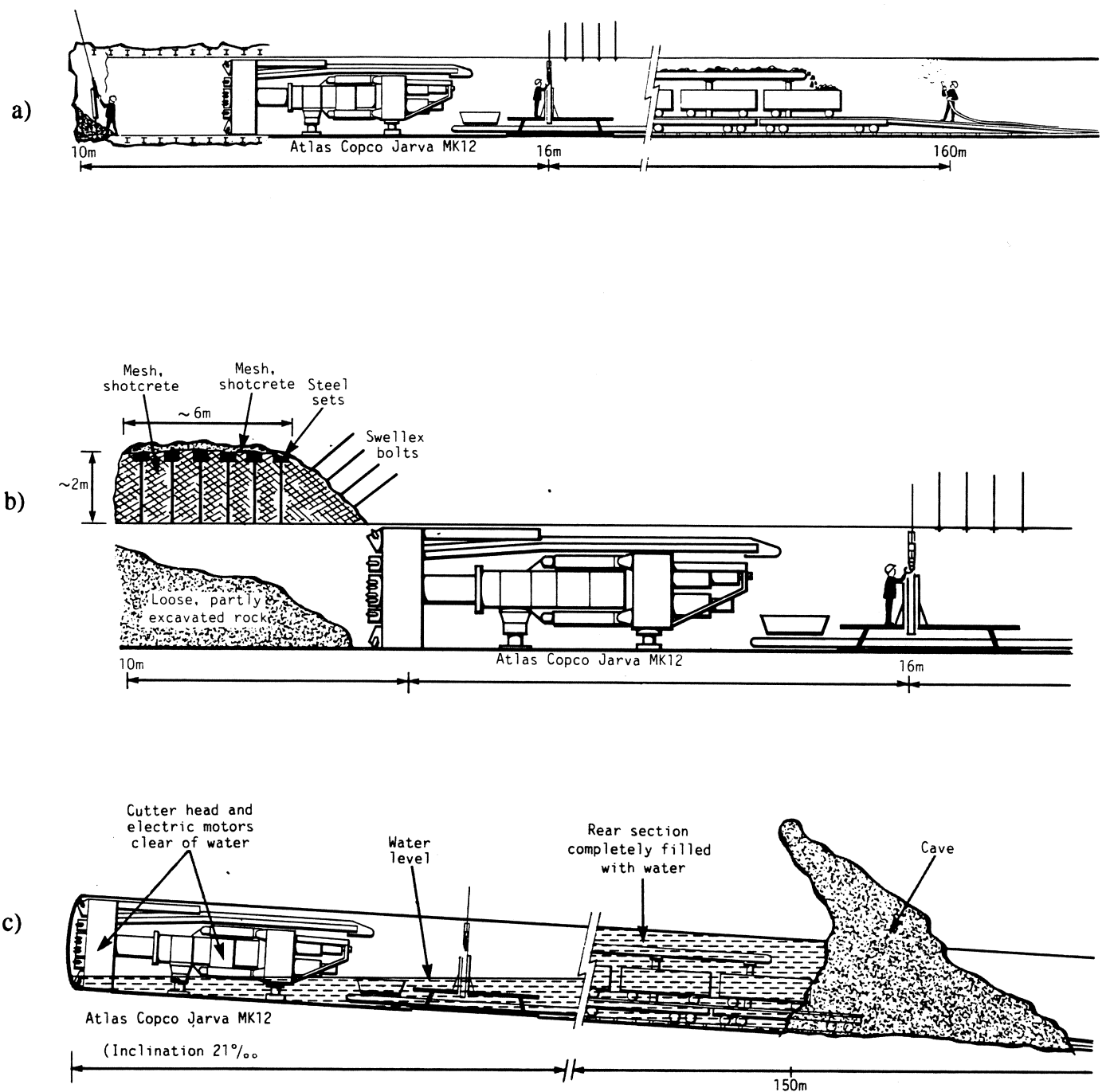


Bild 3 Baulicher Massnahmen zur Sanierung eines Verbruches bei Tunnelbohrmaschinen [Tunnels and Tunnelling, march 1988]

- a) Händischer Vortrieb vor dem Bohrkopf mit Stahleinbau (Gossensaas-Tunnel)
- b) Auffahren einer Störzone vor dem Bohrkopf (Camporosso-Tunnel)
- c) Verbruch im Nachläuferbereich (Gossensaas-Tunnel)

2.3.3 Einfluss der Vortriebsleistungen auf die Vorfeldprognose

Die Vortriebgeschwindigkeit ist, wie bereits erwähnt, ein wichtiger Faktor bei der Entwicklung eines Systems zur Durchführung von Vorfeldprognosen. Die Vortriebgeschwindigkeit beim Stollen-, Tunnel- oder Schachtbau ist von vielen Faktoren wie der Querschnittsfläche, der Querschnittsform, den Gebirgseigenschaften, der Baumethode, dem Sicherungsaufwand und der wöchentlichen Vortriebszeit abhängig. Als grobe Richtwerte können für einen zweischichtigen Betrieb die folgenden Vortriebsleistungen angegeben werden:

Vortriebsmethode	Maximale Vortriebsleistung [m/Stunde] während Bohreinsatz	Maximale tägliche Vortriebsleistung [m/Tag]	Bereich der maximalen mittleren täglichen Vortriebsleistung [m/Tag]
Konventioneller Vortrieb $Q = 70\text{m}^2$, Spritzbetonbauweise	0.6 m/Std	10 - 12 m/T	5 - 9 m/T
TBM, Durchmesser 3m bis 6 m, im harten Fels	4.5 m/Std	80 m/T	30 - 40 m/T
TBM, Durchmesser 3m bis 6 m, im weichen Fels	9 m/Std	130 m/T	60 - 70 m/T
TBM, Durchmesser 6m bis 12 m, im harten Fels	2 m/Std	48 m/T	15 - 20 m/T
TBM, Durchmesser 6m bis 12 m, im weichen Fels (z.B. Kanaltunnel)	5 m/Std	60 m/T	25 - 35 m/T
TBM mit Schild, Durchmesser 10m bis 12 m, mit Tübbingebau	1.2m/Std	25 m/T	10 - 15 m/T

Tabelle 1 Vortriebsleistungen: Richtwerte zur Auslegung der erforderlichen Reichweite des Messsystems zur Vorfeldprognose

Werden bei einem Vortriebsverfahren keine Tübbinge verwendet, so sind die Vortriebsleistungen stark vom Sicherungsaufwand abhängig.

Diese Leistungswerte zeigen, dass sich, insbesondere bei maschinellen Vortrieben, hohe Anforderungen an die Reichweite eines Vorfeld-Prognosesystemes ergeben. Aus der zusätzlichen Anforderung, die hohen Leistungen eines Tunnelvortriebes nicht zu behindern, ergibt sich eine strikte zeitliche Einschränkung für den Einsatz des Vorfeld-Prognosesystems. Wird das System auf eine Reichweite von 30 bis 50 m ausgelegt, so zeigen die angegebenen Vortriebsleistungen, dass die Resultate der Vorfeldprognose innert weniger Stunden der Vortriebsequippe zur Verfügung stehen müssen. Es sind somit kurze Auswertezeiten erforderlich. Es zeigt sich, dass im Falle eines TBM-Einsatzes nur ein in der TBM integriertes System verwendet werden kann, welches seine Aufgabe primär bei laufendem Bohrkopf und ausnahmsweise auch während den kurzen Stillstandszeiten erfüllen kann. Es ist klar, dass ein System zur Vorfeldprognose zudem dem rauen Betrieb des Tunnelbaus wie z.B. Erschütterungen, Staub, hohe Luftfeuchtigkeit, hohe Lufttemperaturen etc. zu genügen hat.

3. Systeme zur Vorauserkundung an der Ortsbrust im Tunnelbau

Zur Vorfeldprognose eines Stollens, Tunnels oder Schachtes stehen bereits heutzutage verschiedene Messsysteme bzw. Messmethoden zur Verfügung. Diese haben sich bereits bewährt oder befinden sich noch in der Erprobungsphase. Es handelt sich dabei um das Verfahren der Vorbohrungen sowie um geophysikalische Erkundungsmethoden. Diese Verfahren werden nachfolgend kurz beschrieben.

3.1 Das Vorbohrverfahren

Das Vorbohrverfahren ist eine seit Jahren im Tunnel- und Stollenbau angewendete Methode zur Vorfelderkundung. Sie dient in der Regel der Erkundung der Gebirgseigenschaften, oft aber auch der Früherkennung von Gasvorkommen.

Von der Ortsbrust aus werden dazu eine oder mehrere Bohrungen mit Längen von wenigen Metern bis über 100 m in Vortriebsrichtung erstellt. Die Methode ist erprobt und wird sowohl beim konventionellen als auch beim maschinellen Vortrieb angewendet. In einem extremen Masse, mit Tausenden von Bohrmeter, wurde sie beim zuvor erwähnten Nakayama-Tunnel zur Auffindung des standfesten Gebirges angewendet. Ihre Aussagekraft ist insbesondere im Falle von Kernbohrungen bedeutend. Allerdings ist mit der Anwendung des Vorbohrverfahrens, insbesondere bei Kernentnahme, in der Regel eine Behinderung des Vortriebes verbunden, was die Vortriebsleistungen reduziert und Zusatzkosten verursacht. Auf der anderen Seite liefert die Vorerkundung im Schlagbohrverfahren (ohne Kernentnahme) des öfteren nur geringe Informationen.

3.1.1 Die Anwendung des Vorbohrverfahrens beim konventionellen Vortrieb

Beim Sprengvortrieb können bereits die Sprengbohrlöcher der Vorauserkundung des Gebirgsbereiches unmittelbar vor der Ortsbrust dienen. Je nach Abschlagslänge beträgt die Länge der Vorauserkundung 2.5 bis 4.0 m. Der Vorteil liegt einerseits im flächenhaften Aufschluss über die gesamte Ortsbrust, andererseits in der Tatsache, dass keine Mehrkosten bzw. Behinderungen des Vortriebs entstehen. Nachteilig erweist sich jedoch die geringe Reichweite sowie der Umstand, dass keine Bohrkern zur Beurteilung der Gebirgsbeschaffenheit gewonnen werden. Die Beurteilung erfolgt einzig auf Grund des Bohrwiderstandes durch den Maschinenführer. Anzeichen von grösseren Wasservorkommen vor der Ortsbrust oder eines drohenden Wassereinbruches können jedoch bereits beim Erstellen der Sprengbohrlöcher erkannt werden. In solchen Fällen kann eine weiterreichende Bohrung in das Vorfeld der Ortsbrust angebracht werden, um die Gebirgsbeschaffenheit bzw. die Wasservorkommen genauer abzuklären.

3.1.2 Die Anwendung des Vorbohrverfahrens beim mechanischen Vortrieb

Zu Beginn der Entwicklung von Tunnelbohrmaschinen wurde anfangs der 60er Jahre die Vortriebsmaschine System Lawrence gebaut und erprobt, bei der im Bohrkopf eine systematische Pilotbohrung integriert war [5]. Diese diente jedoch weniger der Vorfelderkundung, sondern der Verspannung der Maschine mittels Verspannschuhen im Pilotloch (Bild 4).

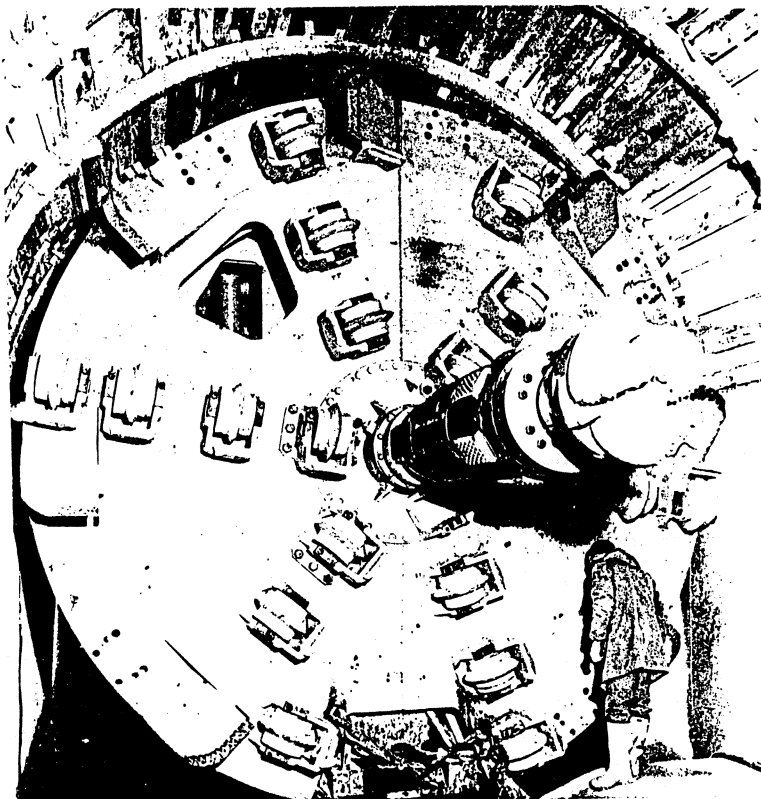


Bild 4 Vorbohrung zur Verspannung der Lawrence Vortriebsmaschine [5]

Moderne Tunnelbohrmaschinen werden heutzutage oft mit Einrichtungen versehen, welche neben dem Ankereinbau auch Vorausb Bohrungen ermöglichen oder im Bedarfsfall mit Bohrwerkzeugen nachgerüstet werden können. Bereits wurden auch Stollen mit systematischen Vorausb Bohrungen ausgeführt. Als Beispiel kann hier der Umfahrungstunnel von Sachseln angeführt werden. Zur Früherkennung von Gasvorkommen wurden beim Auffahren des Pilotstollens aus dem Bohrkopf der TBM systematische Vorausb Bohrungen von 50 bis 80 m Länge vorgenommen. Diese Bohrungen wurden jeweils durch die Nachtschicht erstellt. Im Western Oslo Fjord in Norwegen wurden beim Auffahren des Abwasserstollens 24 m lange Vorausb Bohrungen erstellt. Sie dienten der Untersuchung der Permeabilität und Vorausinjektionen des Gebirges.

Vorausb Bohrungen aus dem Bereich des Bohrkopfes behindern jedoch, insbesondere im Falle von Kernbohrungen, den Ablauf der Vortriebsarbeiten und führen zu einer Reduktion der Vortriebsleistung der TBM. Eine von der Ortsbrust vorgetriebene Horizontalbohrung stellt zudem nur eine linienhafte Information dar, welche keine Angaben über die Gebirgseigenschaften oder Wasservorkommen (z.B. Karsthöhlen) seitlich des Tunnels enthält. Dazu wären systematische, fächerhaft um den Ausbruch angeordnete Bohrungen erforderlich. An ein derartiges systematisches Vorgehen ist jedoch sowohl aus Zeit- wie auch aus Kostengründen nicht zu denken.

Werden die Vorbohrungen als reine Rotations/Schlagbohrung ohne Kernentnahme ausgeführt, so müssen die Gesteinswechsel auf Grund der unterschiedlichen Bohrleistung sowie aus der Analyse des Bohrgutes ermittelt werden. Die mit diesem Verfahren gewonnenen Resultate sind in der Regel nicht eindeutig.

3.2 Seismik

Seismik ist heutzutage ein bewährtes Messverfahren zur Erkundung des Gebirges. In der Regel werden die Messungen von der Geländeoberfläche ausgehend vorgenommen. Eine häufige Anwendung dieser Methode ist die Bestimmung des Felsverlaufes unter einer Lockergesteinsschicht, wie es z.B. zur Festlegung der vertikalen Linienführung des Lötschberg-Basistunnels im Bereich von Kandersteg erforderlich war [6]. Da bei allen indirekten Erkundungen nur festgestellt werden kann, dass eine Änderung der physikalischen Eigenschaften des Gebirges vorliegt, sind für die geologische Interpretation zusätzliche Sondierbohrungen notwendig.

Störzonen im homogenen Gestein stellen Geschwindigkeitsanomalien für seismische Wellen in einer Größenordnung bis zu 20 % dar. Sind die Störungen mächtig genug (ca. 1/10 der Wellenlänge), so werden sie von den seismischen Wellen "gesehen" und erzeugen eine Reflexion. Die Energie der reflektierten Welle und damit ihre Amplitude ist einerseits von der Stärke der Anomalie, andererseits von der Mächtigkeit der Störung (falls die Mächtigkeit der Störung kleiner als die verwendeten Wellenlängen sind) abhängig [13].

Auf Grund der in der Regel guten Erfahrungen mit seismischen Oberflächenmessungen wurde diese Methode auch zur Vorfeldprognose im Tunnelbau versuchsweise eingesetzt [7,8]. Dabei wurde eine modifizierte VSP-Methode (Vertical Seismic Profilig) angewendet, eine bekannte seismische Methode aus der Bohrloch-Geophysik (Bild 5). Das VSP-Verfahren wird mit Erfolg bei Explorationen zur Vorauserkundung während der Bohrphase angewendet. Vergleicht man einen Stollen oder einen Tunnel mit einer überdimensionalen Bohrung, so zeigt sich eine Analogie zu den Verhältnisse im Tunnel während der Vortriebsphase [7]. Da bei der VSP-Auswertung eine Mehrfachüberdeckung für Reflexionen aus dem seitlichen Umfeld des Tunnels nicht gegeben ist, kann hierzu auch eine Standardreflexionsseismik zur Anwendung kommen, wobei die seismischen Quellen zwischen der Geophonauslage liegen.

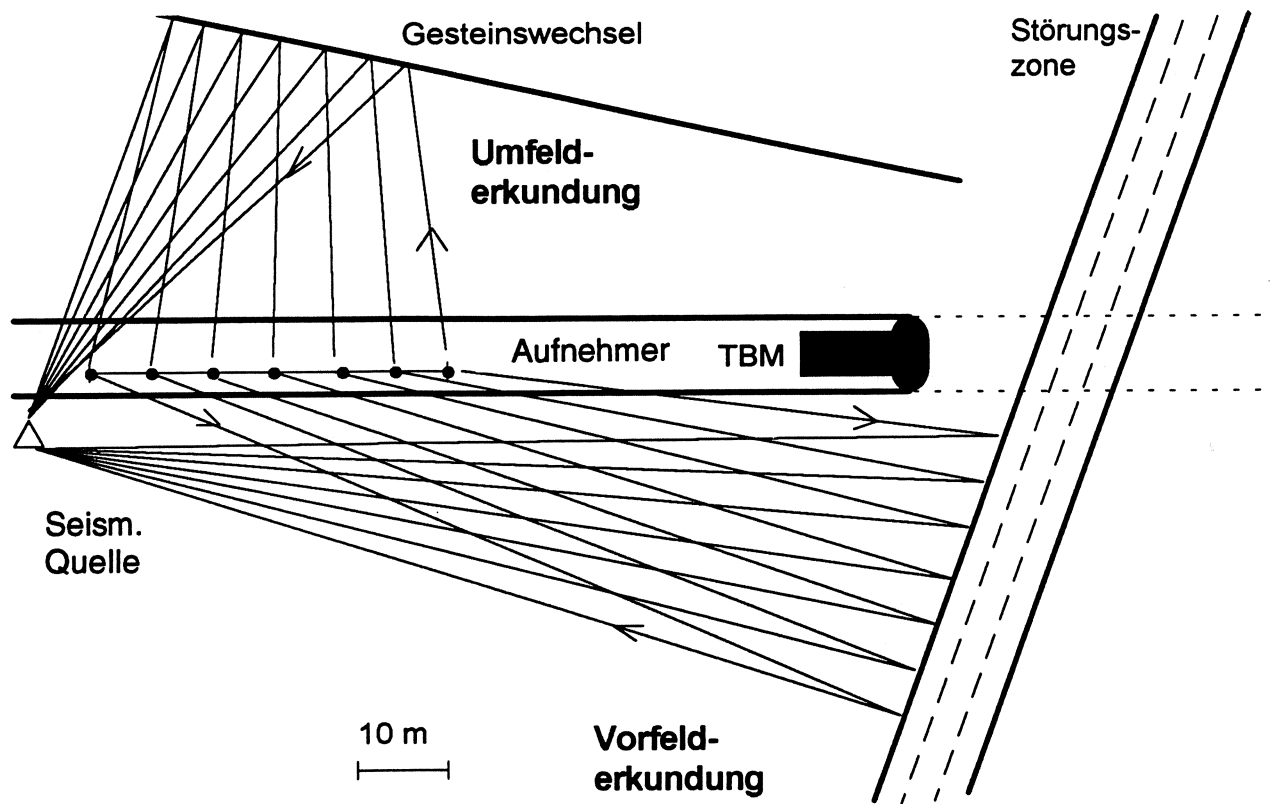


Bild 5 Vorauserkundung im Tunnelvortrieb mit Seismik [8]

Aus der Literatur [8] (Sattel, Frey und Amberg) können die folgenden Angaben entnommen werden:

"Beim VSP-Modus, skizziert mit der Sequenz seismischer Strahlen, werden die seismischen Wellen bzw. der Gebirgsschall beispielsweise durch kleine Sprengladungen (ca. 100 g) in einer etwa 100 m von der Tunnelbrust entfernten Seitenbohrung (ca. 4 m tief) erzeugt. Die in Richtung Brust laufenden Wellen und die später eintreffenden Reflexionssignale (Echo) aus dem Bereich vor der Tunnelbrust werden mit einer Reihe von hochempfindlichen Beschleunigungsaufnehmern aufgenommen, welche im Bereich zwischen Brust und Schussbohrung an der Tunnelwand befestigt sind (Bild 5). Die aufgenommenen seismischen Daten werden digitalisiert und mit einer entsprechenden Computereinheit registriert. Bei der darauffolgenden Datenbearbeitung werden hin- und rücklaufende Wellen rechnerisch getrennt, wobei letztere nur noch das Reflexionssignal aus dem Bereich vor der Tunnelbrust enthalten. Aus den Laufzeiten dieser Reflexionen und der aus den hinlaufenden Wellen ermittelten Gebirgsgeschwindigkeit lässt sich der Abstand zu allfälligen Störungzonen bzw. anderen Diskontinuitäten der Gebirgsfestigkeit im Vorfeld der Tunnelbrust berechnen".

"Beim Reflexionsmodus verwendet man die gleiche Aufnahmerausrüstung, nur werden hier die seismischen Signale bei den Aufnehmern an der Tunnelwand angeregt, beispielsweise mit Kleinstladungen (ca. 30 g) in kurzen Seitenbohrungen (ca. 1 m tief). Unter Anwendung konventioneller Datenbearbeitungsverfahren zur Verstärkung des reflektierten Signalanteils (CDP-Stapelung) wird ein Profil erzeugt, welches den seitlichen Abstand zu Gebirgsdiskontinuitäten wie z.B. Gesteinsschichten mit unterschiedlicher Festigkeit (Schallhärte) angibt" [8].

3.2.1 Praktische Erfahrungen mit Seismik im Felslabor Grimsel (GTS)

Ein im Jahre 1988 im Felslabor Grimsel begonnenes Forschungs- und Entwicklungsprogramm hatte zum Ziel, das Potential von geophysikalischen Erkundungsmethoden (Radar und Seismik) zur Voraussage von Diskontinuitäten vor der Ortsbrust eines Tunnels zu untersuchen [7]. Die Versuche wurden mit der VSP Methode und der Standardreflexionsmethode durchgeführt (Vertical Seismic Profiling).

Gemäss [7] zeigen theoretische Untersuchungen, dass die Quelle und die Aufnehmer in mehreren Metern Entfernung von der Tunnelwand plziert werden sollten. In der Praxis ist dies kaum möglich, da dies mehrere lange, radial zum Tunnel angeordnete Bohrungen erfordern würde. Der beste Kompromiss zwischen theoretischen und operationellen Aspekten lag darin, dass die Quelle in einem Bohrloch in eine Entfernung von mindestens 4 m von der Tunnelwand plziert wurde. Die Aufnehmer wurden direkt an der Tunnelwand befestigt. Auch andere Konfigurationen wurden getestet. Zusätzlich zur VSP-Methode wurden auch konventionelle seismische Profile entlang des Tunnels geschossen. Die besten Ergebnisse wurden mit einer Konfiguration erreicht, bei der die Sprengung in einem radial angeordneten Bohrloch von den entlang des Tunnels in einem Abstand von 0.7 m angebrachten Aufnehmern registriert wurden.

Die Messungen zeigten nur sehr kleine Reflexionen. Nach umfangreicher Datenverarbeitung ergaben sich aus dem Vergleich der Messresultate mit den durch Tunnel und Bohrungen in Situ aufgefundenen Diskontinuitäten eine hervorragende Übereinstimmung. Die Reichweite betrug rund 150 m [7].

3.2.2 Praktische Erfahrungen mit Seismik im Centovallibahn-Tunnel

Zusammengefasst werden in [8] die folgenden Erfahrungen bzw. Fakten mitgeteilt:

- Beide Verfahren (VSP-Modus, Reflexionsmodus) werden in einem gemeinsamen Messeinsatz angewendet, der z.Zt. inklusive Vorbereitungsarbeiten etwa 12 h in Anspruch nimmt
- Die Datenbearbeitung kann in Zukunft sicherlich in der gleichen Zeitspanne abgeschlossen werden, sodass die entsprechenden Informationen innerhalb von 24 h zur Verfügung gestellt werden können
- Die Datenverarbeitung erfolgte in einem Rechenzentrum eines spezialisierten Serviceunternehmens
- Die Felddatenaufnahme erfolgte am Wochenende während der Betriebsruhe
- Die Standfestigkeit der Schussbohrungen war teilweise nicht gewährleistet
- Die Vorauserkundung der geologisch extrem schlechten Partien, der überlagernden Felslinie am Übergang zur Moräne sowie der abtauchenden Felsoberfläche gelang sehr gut
- Die eigentlichen Vortriebsarbeiten wurden durch die seismischen Untersuchungen nur unwesentlich behindert

Bei diesem Projekt handelte es sich nach [8] um den erstmaligen praktischen Einsatz von tunnelseismischen Messungen.

3.2.3 Praktische Erfahrungen mit Seismik im Tunnel Leissigen

Basierend auf den Erfahrungen im Felslabor Grimsel wurden im August 1990 bei dem im Bau befindlichen Umfahrungstunnel von Leissigen im Bereich der Ortsbrust VSP Reflexionsmessungen durchgeführt. Die Messungen wurden analog den Messungen im Centovalli-Bahntunnel während der Betriebsruhe vorgenommen. Trotzdem waren die Umstände auf der Baustelle zur Durchführung der Messungen bedeutend schwieriger als im "klinisch reinen" Felslabor Grimsel [7].

Messdisposition und Apparatur

Als Geophone wurden Dreikomponenten-Beschleunigungsaufnehmer der Firma Vibrometric verwendet, welche in kurzen Horizontalbohrungen im Ulmbereich des Tunnels im Fels eingebaut waren. Der gegenseitige Abstand der 40 Aufnehmer betrug 1 m. In einem Abstand von 31 m davon befand sich die leicht geneigte Schussbohrung. Um eine gute akustische Kopplung mit dem Gebirge zu erreichen wurden die rund 10 gr schweren Sprengladungen unter Wasser in einer Entfernung von 4 bis 7 m von der Tunnelwand gezündet.

Zusammenfassung der Erfahrungen mit Seismik im Tunnel Leissigen

Die Resultate dieser Testmessungen sind in [7] in ausführlicher Form dargestellt. Die seismischen Messungen ergaben danach die folgenden Informationen:

- Störzonen, welche nahezu normal oder parallel zum Tunnel stehen, können lokalisiert werden
- Hohlräume sind im Untersuchungsbereich klar erkennbar
- Es wurde nicht versucht, die Lage der Reflektoren im Raum abzuschätzen, da nur ein Schusspunkt vorhanden war. Aber auch bei mehreren Schusspunkten ist eine Bestimmung der räumlichen Lage schwierig, solange die Schusspunkte in derselben Linie wie die Geophone liegen.

Es wurden Reflektoren in einer Distanz von bis zu 180 m von der Tunnelwand festgestellt. Ob diese Reflektoren die in Bild 10 dargestellte Eindohlung der quartären Sande und Kiese oder die rund 50 m über dem Tunnel liegende Geländeoberfläche darstellen, kann dem Bericht [7] nicht entnommen werden. Auch ein Vergleich der gewonnenen Reflektoren mit den beim Weitervortrieb erhaltenen geologischen Aufschlüssen ist nicht ersichtlich.

3.2.4 Zusammenfassung der Erfahrungen mit der seismischen Vorauserkundung

Die Erfahrungen bei der Vorauserkundung vor und seitlich der Ortsbrust im Tunnel- und Stollenbau mit der Hilfe von seismischen Messungen können auf Grund der drei erwähnten praktischen Einsätze wie folgt zusammengefasst werden:

- Störzonen, welche normal oder im steilen Winkel zur Tunnelachse verlaufen, sowie Bruchzonen, welche parallel zur Tunnelachse verlaufen, konnten erkannt und lokalisiert werden [7]
- Hohlräume, welche sich im Untersuchungsbereich mit einem Radius von 120 bis 200 m befinden, sind klar erkennbar [7]
- Die Vorfeldprognose stimmte gut mit dem geologischen Aufschluss überein, welcher durch den nachfolgenden Tunnelvortrieb erhalten wurde [7]
- Die Vorauserkundung der geologisch extrem schlechten Partien, der überlagernden Felslinie am Übergang zur Moräne sowie der abtauchenden Felsoberfläche gelang sehr gut [8]

Zur praktischen Einsetzbarkeit des Seismik-Messverfahrens im Bereich der Ortsbrust eines Tunnelvortriebes ergeben sich die folgenden Schlussfolgerungen:

- Seismische Messungen sind eher für grossräumige Untersuchungen einzusetzen [13]. Die Kombination von VSP- und Reflexionsseismik ergab Reichweiten von 80 m [8] bis 150m [7]. Im Granit sind unter optimalen Bedingungen Reichweiten von bis zu 200 m möglich. Bei stark geklüftetem Fels reduzieren sich die Reichweiten und müssen ggf. durch stärkere Quellen kompensiert werden.
- Für das Nahfeld der Ortsbrust eines Stollens, Tunnels oder Schachtes ist die Seismik nicht die geeignete Methode. Es betrifft dies einen Bereich von 1 bis 2 Tunneldurchmesser vor und seitlich der Ortsbrust. Ergebnisse aus dem Nahfeld einer seismischen Quelle sind schwer oder gar nicht interpretierbar [13]. Ausserhalb des Nahfeldes des Tunnels bis zur maximalen Reichweite des Messverfahrens kann die Auflösung als gut bezeichnet werden. Seismik ist also, wie bereits erwähnt, eher für grossräumige Untersuchungen im Bereich zwischen 20 und 150 m einzusetzen [7]. In [9] wird empfohlen, die Methode der seismischen Vorauserkundung auch für Distanzen von über 100 m zu verwenden.
- Wegen der begrenzten Reichweite und der Blindheit im Nahbereich ist eine Überlappung der Messbereiche anzustreben. Daraus folgt, dass bei einem Tunnelvortrieb die seismischen Messeinsätze nach jeweils 50 bis 100 Metern Vortrieb zu wiederholen sind. Bei guten Vortriebsleistungen in einem TBM Vortrieb kann dies bedeuten, dass täglich ein seismisches Profil geschossen werden muss
- Die zuvor beschriebenen Testmessungen [7,8] wurden an Wochenenden bei Betriebsruhe durchgeführt. Inwieweit die Messresultate durch laufende Vortriebsarbeiten beeinflusst werden ist noch nicht geklärt. Es betrifft dies insbesondere Vibrationen und Erschütterungen, welche durch hydraulischer Hämmer, Teilschnittmaschinen oder den Bohrkopfes einer TBM verursacht werden. Es scheint, dass seismische Messungen nur während der Stillstandszeiten durchgeführt werden können. Dabei ist es fraglich, ob diese kurzen Zeitintervalle bei einem TBM Vortrieb zur Durchführung einer seismischen Vorauserkundung ausreichen. In dieser Hinsicht wurden in [9] die Stillstandszeiten von verschiedenen TBM-Vortrieben analysiert. Es zeigt sich, dass die Messungen innerhalb einer Stunde ausgeführt werden müssten, damit der Vortrieb nicht behindert wird.

Die engen Platzverhältnisse im Ortsbrustbereich, insbesondere bei TBM Vortrieben mit kleinen Bohrdurchmessern, können den Einsatz der Seismik mit Installationszeiten von bis zu 12 Stunden stark erschweren oder gar verunmöglichen. Da die seismischen Schwingungen in der

Regel durch das Zünden von Sprengsätzen ausgelöst werden (Alternativen sind in Entwicklung) sind im TBM-Bereich zusätzliche Massnahmen bzw. Betriebsunterbrüche erforderlich.

- Die Durchführung des seismischen Messverfahrens erfordert hochqualifiziertes Personal vor Ort. Während für die Erstellung der Bohrungen sowie die Installation derselben Hilfskräfte ausreichen, ist für die höchst anspruchsvolle Auswertung und Interpretation der Messdaten bei grossen Vortriebsleistungen die dauernde Anwesenheit eines erfahrenen Geophysikers auf der Baustelle unerlässlich. Die Frage, ob die Messdaten einzelne Reflexionen oder Reflexionsbänder enthalten wird in der Seismik durch den Einsatz unterschiedlicher Datenverarbeitungstechniken zu beantworten versucht. Bei dem dabei vorhandenen Interpretationsspielraum ist sehr viel Erfahrung gefragt. Der hohe Zeitbedarf für die Aufbereitung der Messdaten und die Interpretation kann nach dem heutigen Stand der Technik dazu führen, dass die Vorfeldprognose mit Seismik den Vortriebsleistungen einer TBM nicht zu folgen vermag.
- Erfahrungen zeigen, dass sowohl die seismische Quelle als auch sämtliche Aufnehmer einen direkten Kontakt zum Baugrund aufweisen müssen. In der Regel werden daher die Messelemente in Bohrlöchern eingebaut. Um eine grössere Reichweite zu erhalten sollten die Bohrlöcher, wenn immer auch möglich, mit Wasser gefüllt werden.

Wie bereits erwähnt ist der Installationsaufwand für eine seismische Messung, von praktischem Standpunkt aus, gross und zeitintensiv, was zu Behinderungen des Baubetriebes führen kann. Dies ist insbesondere dann der Fall, wenn der Tunnel im Durchlaufbetrieb aufgefahren wird, wie dies beim Bau der Alpen-Basistunnel geplant ist. Sämtliche seismischen Geber und Aufnehmer müssen daher, je nach Mass der Überlappung der Messbereiche, nach 50 bis 100 Metern Vortrieb in neuerstellten Bohrlöchern neu installiert werden.

Der feste Einbau einer seismischen Messeinrichtung in eine Tunnelbohrmaschine wäre daher wünschenswert. Ansätze dazu sind vorhanden. Eine Möglichkeit zur seismischen Vorauserkundung würde darin bestehen, die Vibrationen des drehenden Bohrkopfes einer TBM als seismische Quelle zu verwenden, um damit ein kontinuierliches Signal zu erhalten [9]. Ob dieser komplexe Ansatz erfolgsversprechend ist, lässt sich zur Zeit nicht beantworten. Im Bereich von Tiefbohrungen wurden allerdings schon gute Ergebnisse erzielt.

3.3 Weitere Messverfahren

Auf weitere Messverfahren wie die Ultraschallmessung [12] oder die Thermographie [10] wird in diesem Bericht nicht eingegangen. Die Potentialmethode eignet sich nur für grossräumige Abklärungen von der Geländeoberfläche aus [11]. Es verbleibt daher noch die Georadar-Messmethode, auf welche im nachfolgenden Abschnitt 4 im Detail eingegangen wird.

4. Das Georadar-Messverfahren

Bei der Wahl einer geophysikalischen Erkundungsmethode stehen sich, wie bereits erwähnt, zwei gegenseitig sich einschränkende Kriterien gegenüber, nämlich die Reichweite des Verfahrens und das Auflösungsvermögen der Untersuchungsmethode. Auch beim Georadar-Messverfahren sind diese beiden Kriterien von massgebender Bedeutung.

Radar ist ein Kunstwort aus **RA**dio **DE**tectio**N** And **R**ang**I**ng. Der erste Nachweis der elektromagnetischen Welle gelang Heinrich Hertz in den späten 1880er Jahren. Er zeigte, dass kurzwellige elektromagnetische Strahlung von metallischen und dielektrischen Körpern reflektiert wird. Praktisch brauchbare Radargeräte gibt es erst seit Ende der 30er Jahre. Das militärische Interesse während des 2. Weltkrieges führte zu schnellen Fortschritten in der Radartechnik. Inzwischen wird diese auch für viele zivile Anwendungen benutzt, u.a. zur geophysikalischen Erkundung.

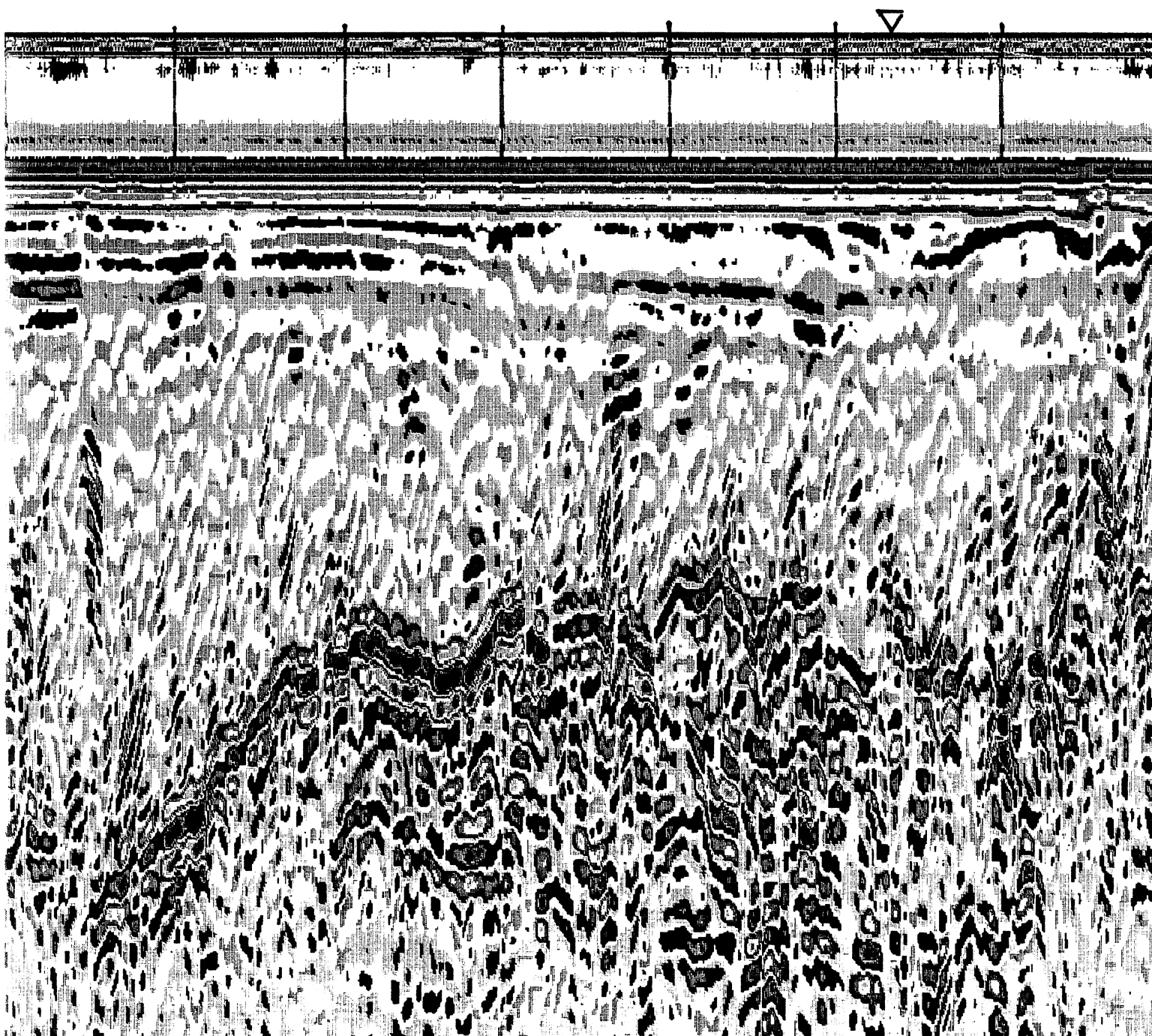
Beim Georadar-Verfahren handelt es sich um eine relativ junge geophysikalische Messmethode. Sie wurde Anfangs der 70er Jahre erstmals in einer amerikanischen Kohlenmine angewendet [14] und anschliessend zur Erkundung von Salzdomen eingesetzt [16]. Parallel dazu fand das Georadar-Messverfahren bei der zerstörungsfreien Erkundung von oberflächennahen Erdschichten Verbreitung, insbesondere zur Ortung von Leitungen.

4.1 Theoretische und methodische Grundlagen des Georadar-Verfahrens

Radarverfahren benutzen elektromagnetische Wellen, um reflektierende Gegenstände aufzufinden und zu orten. Die Radargeräte senden ein Signal aus und empfangen das zurückkommende Echo. Eine Georadar-Apparatur, d.h. ein Radargerät für eine geophysikalische Anwendung, besteht aus einer zentralen Sende- und Empfangseinheit (Control unit) und den Antennen. Während des Messvorganges werden von der Sendeantenne elektromagnetische Impulse in den Baugrund geleitet [19]. An den Grenzflächen von Objekten, wo sprungartige Änderungen der elektrischen Impedanz auftreten, werden die Wellen reflektiert oder gestreut und können zurück zur Empfangsantenne gelangen. Die Control Unit misst die Laufzeit und die Amplitude der verstärkten Signale, welche zwischen dem Abstrahlen zweier Impulse registriert werden.

In der Empfangsantenne werden die Signale vorverstärkt, frequenztransformiert und über ein Verbindungskabel zur Control Unit geleitet. Dort erfolgt eine Filtrierung und eine weitere Vorverstärkung. Das Messgerät zeichnet den gesamten Wellenzug über eine bestimmte Zeitperiode auf. Bei geotechnischen Anwendungen wird der Messvorgang in der Regel derart gewählt, dass die Antennen entlang von Profillinien geführt werden, wobei sich die Messhäufigkeit und das methodische Vorgehen nach den geometrischen Vorgaben und den verwendeten Frequenzen richtet. Die gespeicherten Daten können auf einem Bildschirm farbig dargestellt werden oder bereits während der Messung durch das Aneinanderreihen der Wellenzüge als sogenanntes Radargramm aufgearbeitet werden. Ein Beispiel für ein derartiges Radargramm ist in Bild 6 angegeben.

Position der Antenne [m]



Zeit [nsec]

Bild 6 Beispiel eines durch Aneinanderreihen der einzelnen Messungen gewonnenen Radargrammes. (Flowtex-Microtunnelling, Brugg Kabel AG)

Reflexionsmessungen mit Radarwellen sind für die Erkundung des unmittelbaren Umfeldes prinzipiell in nahezu allen Gesteinen möglich. Die in Frage kommenden Radarwellen mit Frequenzen von 10 bis 200 MHz besitzen Wellenlängen in der Größenordnung von 0.5 bis 10m [13].

Nachfolgend sind die theoretischen Grundlagen des Georadar-Messverfahrens stark vereinfacht zusammengefasst. Eine ausführliche Beschreibung der verschiedenen Einflussfaktoren ist dem Abschnitt 6.2.2 dieses Berichtes sowie der Literatur [24] zu entnehmen.

4.1.1 Die Geschwindigkeit der Radarwellen im Ausbreitungsmedium

Die Geschwindigkeit, die Reichweite und die Dämpfung der Radarwellen werden durch die physikalischen Eigenschaften des Ausbreitungsmediums (Luft, Gestein) beeinflusst. Die Geschwindigkeit V ist im wesentlichen von der Dielektrizitätskonstanten ϵ des Ausbreitungsmediums, aber auch von der Dämpfung der Wellen in diesem Medium abhängig [13]. Für die Wellengeschwindigkeit V ergibt sich:

$$v = c / \sqrt{\epsilon} \text{ [cm/ns]}$$

wobei c die Lichtgeschwindigkeit im Vakuum bedeutet. Der Zusammenhang von Wellengeschwindigkeit v und Dielektrizitätskonstante ϵ zeigt die folgende Tabelle für verschiedene Ausbreitungsmedien in vereinfachter Form:

Material	Rel. Dielektrizität ϵ	Wellengeschwind. v [cm / ns]
Luft	1	30
Wasser	81	3
Trockener Sand	4 bis 6	12 bis 15
Wassergesättigter Sand	30	6
Wassergesättigter Silt	10	10
Wassergesättigter Ton	8 bis 12	9 bis 10
Trockener Granit	5	14
Trockener Kalkstein	7	11

Tabelle 2: Relative Dielektrizität (bezogen auf Luft) und Ausbreitungsgeschwindigkeit elektromagnetischer Wellen in verschiedenen Materialien [17,19]

Diese Tabelle zeigt, dass die Wellengeschwindigkeit v im wesentlichen durch den volumetrischen Wassergehalt des Gesteins beeinflusst wird.

Um aus den Radargrammen die den Zeitsektionen entsprechenden Tiefenangaben ermitteln zu können bedarf es Informationen über die räumliche Verteilung der Geschwindigkeiten, mit der sich die elektromagnetischen Wellen im Untergrund ausbreiten. Die Geschwindigkeitswerte können im Falle von Messungen an der Geländeoberfläche durch den Vergleich mit der Tiefenlage von bekannten Objekten ermittelt werden [19]. Unter Tage können Felspeiler mit bekannten Abmessungen zur Kalibrierung des Messverfahrens herangezogen werden. Im Falle eines Tunnelvortriebes kommt einem der äusserst günstige Umstand entgegen, dass die mittels Georadar gewonnene Vorfeldprognose laufend mit den durch den Tunnelvortrieb erhaltenen Baugrundaufschlüssen verglichen werden kann. Allenfalls können dann die Annahmen der physikalischen Eigenschaften des Gebirges angepasst werden.

4.1.2 Die Reichweite von Radarwellen in das Ausbreitungsmedium

Bei der Anwendung der Radarmethode ist die "Eindringtiefe" der Radarwellen u.a. direkt an die physikalischen Eigenschaften des Gesteins geknüpft. Die "Eindringtiefe" hängt von der Signalfrequenz ω , der Dielektrizitätskonstanten ϵ , der magnetischen Permeabilität μ und der elektrischen Leitfähigkeit κ des Ausbreitungsmediums ab [19]. Der in der Elektrotechnik oft verwendete Begriff "Eindringtiefe" bezeichnet die Entfernung, nach der die Feldstärke um den Faktor $1/e$, d.h. um ungefähr $1/3$ gedämpft worden ist. Diese "Eindringtiefe" ist nicht identisch mit der erzielbaren Reichweite des Georadars. Letztere ist deutlich grösser und hängt nicht nur von dem zu durchdringenden Material, sondern auch von der Apparatur ab. Die folgende Formel zeigt den Zusammenhang der oben genannten Parameter mit der Dämpfung im Material α .

$$\alpha = \omega \sqrt{\mu \epsilon / 2 \sqrt{1 + (\kappa / \omega \epsilon)^2} - 1}$$

Die magnetische Permeabilität spielt bei nichtmagnetischen Medien keine Rolle. Ausserdem treten bei nichtmagnetischen Gesteinen Verluste auf, welche sich aus Verlusten durch Umpolarisierung sowie ohmsche Verluste zusammensetzen.

4.1.3 Das Auflösungsvermögen

Das Auflösungsvermögen hängt von der zeitlichen Länge des Sendesignals bzw. von dessen Wellenlänge λ ab und ist demnach eine Funktion der zuvor erwähnten Signalausbreitungsgeschwindigkeit v im Medium und der Frequenz des Signales f :

$$\lambda = v / f \text{ [cm]}$$

In der Praxis lassen sich Schichtgrenzen bis zu einem Abstand von $\lambda/2$ auflösen. Zur Erreichung von grösseren Reichweiten ist die Verwendung von niedrigen Frequenzen erstrebenswert. Diese Formel zeigt nun aber, dass sich bei niedrigen Frequenzen und bei hohen Signalausbreitungsgeschwindigkeiten im Medium grosse Wellenlängen ergeben, was zu einem weniger guten Auflösungsvermögen führt. Das horizontale Auflösungsvermögen hängt zudem vom Abstand Reflektor-Antenne sowie von der Abstrahlcharakteristik der Antennen ab [19].

4.1.4 Die Dämpfung aufgrund der Reflexionen an den Schichtgrenzen

Zusätzlich zur Dämpfung aufgrund der dielektrischen Verluste erfahren die reflektierten bzw. transmittierten Anteile der Welle an jeder Grenzschicht eine Amplitudenveränderung. Diese Verluste werden mit den Reflexions- bzw. Transmissionsfaktoren erfasst. Sie werden von der Dielektrizitätskonstante ϵ und die elektrische Leitfähigkeit κ des Gesteins, aber auch von der Dicke der Gesteinsschicht beeinflusst [24,13].

4.1.5 Radar-Messverfahren

Grundsätzlich sind zwei Verfahren zu erwähnen, welche heutzutage kommerziell verfügbar sind:

- a) die **konventionelle Radarmethode**, bei welcher ein kurzer und starker elektromagnetischer Impuls ausgesandt wird. Man erhält damit direkt Echosignale im Zeitbereich, welche von erfahrenen Radartechnikern gut interpretiert werden können
- b) die Verwendung von **synthetischen Impulsen** [23]. Dieses Verfahren ist eine Weiterentwicklung der Einzelpulsmethode. Es ist seit 1984 für Hochfrequenzsysteme in grösserem Umfang kommerziell erhältlich und inzwischen zum festen Bestandteil der Technik geworden [20,21,22]. Vereinzelt wurde das Verfahren bereits zur geologischen Erkundung verwendet, unter anderem im Felslabor Grimsel.

Beim Radar mit synthetischen Pulsen werden zunächst die Messungen im vorgesehenen Frequenzband - hier z.B. von 20 MHz bis 160 MHz - in 0.1 MHz-Schritten durchgeführt (Messung im Frequenzbereich).

4.2 Bisherige Erfahrungen mit dem Georadar-Messverfahren

Zu Beginn dieses Forschungsprojektes waren auf verschiedenen Spezialgebieten bereits Erfahrungen mit geotechnischen Radaranwendungen vorhanden. Die Systeme waren in der Regel für den Einsatz an der Erdoberfläche oder in Bohrungen konzipiert, so z.B. für den Leitungsbau oder zur Überprüfung von Tunnelverkleidungen.

4.2.1 Erfahrungen mit Georadar beim Leitungsbau und bei der oberflächennahen Erkundung

Seit einigen Jahren wird Georadar zur zerstörungsfreien Erkundung des oberflächennahen Baugrundes verwendet. Insbesondere erfordert die neue Technik der "grabenlosen Leitungsverlegung" eine detaillierte Kenntnis der geologischen Verhältnisse und die Lage allfälliger Fremdleitungen im Bereich einer geplanten Verlegetrasse. Aufgrund seiner physikalischen Eigenschaften kann das Georadar sowohl metallische als auch nichtmetallische Objekte wie Stahlrohre oder PE-Leitungen orten.

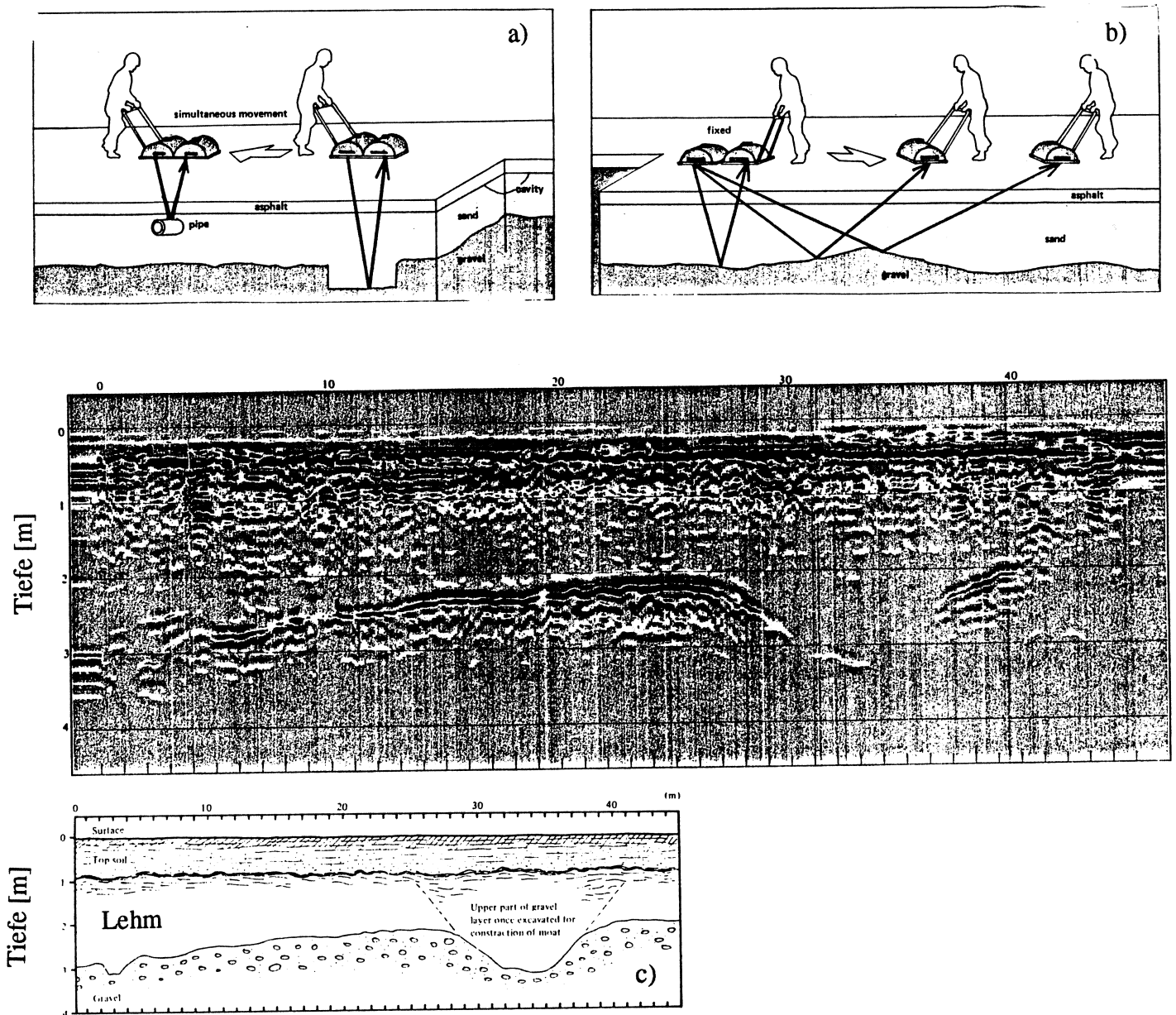


Bild 7 Anwendung des Georadarverfahrens an der Geländeoberfläche (OYO Corporation)

- a) Messung im "profiling mode"
- b) Messung im "Warr sounding mode"
- c) Beispiel für ein Radargramm mit der geologischen Deutung

Oft ist auch das Auffinden des Verlaufes der Felsoberfläche das Ziel einer Erkundung. Zu diesem Zweck werden die Sende- und Empfangsantenne im "Profiling mode" gemeinsam (Bild 7a) oder im "Warr sounding mode" (Bild 7b) mit variablem Abstand zwischen Sende- und Empfangsantenne entlang den gewünschten Profillinien bewegt. Die Durchführung beider Verfahren ist erforderlich, um die Wellengeschwindigkeit für die verschiedenen Gesteinsschichten zu erhalten. Damit kann dann die Tiefenlage der Schichten ermittelt werden. Als Beispiel ist in Bild 7c ein Radargramm mit der entsprechenden geologischen Interpretation dargestellt, welches einen unregelmässigen Verlauf der

von lehmigem Material überdeckten Kiesoberfläche in 2 bis 3 m Tiefe aufzeigt (OYO Corporation). Es handelt sich dabei um einen alten Stadtgraben aus den 12. Jahrhundert.

4.2.2 Erfahrungen mit Georadar bei der Kontrolle von Tunnelverkleidungen

Zur Zustandsbeurteilung von Stollen- oder Tunnelauskleidungen werden zunehmend zerstörungsfreie Untersuchungsmethoden wie Georadar verwendet [10, 25]. Dabei stehen Fragen wie der Verbund zwischen Tunnelauskleidung und Gebirge, Wasserverhältnisse, Zustand von Innenschale und Bewehrung im Vordergrund. In der Regel wird dazu ein monostatisches Radar verwendet, wobei die Antenne sowohl Impulse aussendet wie auch empfängt. Eine schematische Darstellung der Georadar-Apparatur zeigt Bild 8a.

Um eine Reichweite von 1 bis 3 m zu erhalten werden Antennen mit Frequenzen von 500 bis 1000 MHz verwendet. Die Antenne wird während den Messungen mit einer Geschwindigkeit von 1 bis 2 km pro Stunde entlang der zu untersuchenden Profillinie bewegt.

Die Ergebnisse können wie folgt zusammengefasst werden:

- Die Radarmethode hat beeindruckende Bilder in Form von Querschnitten durch die Stollenwand und damit Informationen über die Betonstärke und über das Vorkommen von eingebauten Stahlbögen, Stahlnetzen oder Betonarmierung geliefert, aber auch Reflektoren im Fels festgestellt (Bild 8b). Die Messergebnisse wurden stichprobenartig mit Kernbohrungen überprüft. Die Radarmethode lieferte sehr detaillierte und präzise Informationen über die Betonauskleidung. Es wurden auch sehr viele Reflektoren im Fels festgestellt, doch war deren Deutung meist recht schwierig und unsicher [10,26].

"Dies ist insbesondere darauf zurückzuführen, dass sehr viele Gründe zu einer Änderung der dielektrischen Eigenschaften der untersuchten Materie und damit zu Reflexionen der Radarwellen führen können, so etwa Änderungen des Wassergehaltes, des Wasserchemismus oder der mineralogischen Zusammensetzung der Gesteine. Bei sehr heterogen aufgebauten Schichtserien, die erst noch von zahlreichen Klüften und Störzonen durchsetzt sind, wird die Interpretation der Reflektoren wegen der Mehrdeutigkeit sehr schwierig. Werden hingegen homogene Gesteinskörper untersucht, die verhältnismässig einfache Strukturen aufweisen, so lassen sich oft sehr beeindruckende Resultate erreichen. Beim Vorhandensein von Stahlbögen, Metallgittern starken Armierungen oder elektrischen Leitungen wurde oft eine Totalreflektion verzeichnet. Dies bedeutet, dass diese Elemente als Abschirmung bzw. ebenfalls als Antenne wirkten und daher keinen Einblick in das Gebirge erlaubten" [10].

- Die Georadarmethode eignet sich jedoch grundsätzlich zur Suche von grossen Hohlräumen, Verbruchzonen und geologischen Strukturen wie ausgeprägte Schichtung, Störungen oder lithologische Wechsel [26].
- "Wenn es um die Sicherstellung des langfristigen Bestandes eines Tunnels geht, kann das Georadar-Verfahren eine ausserordentlich wertvolle Unterstützung zur Problemerkennung darstellen. Zweifellos muss auf diesem Gebiet die Forschung noch vorangetrieben werden. Dabei geht es um die sichere Interpretation der Messresultate, aber auch um die Automatisierung des Aufnahmeverfahrens. Insofern erscheint gerade auf diesem Gebiet eine interdisziplinäre Forschung von Physikern, Geophysikern und Bauingenieuren geboten" [25]

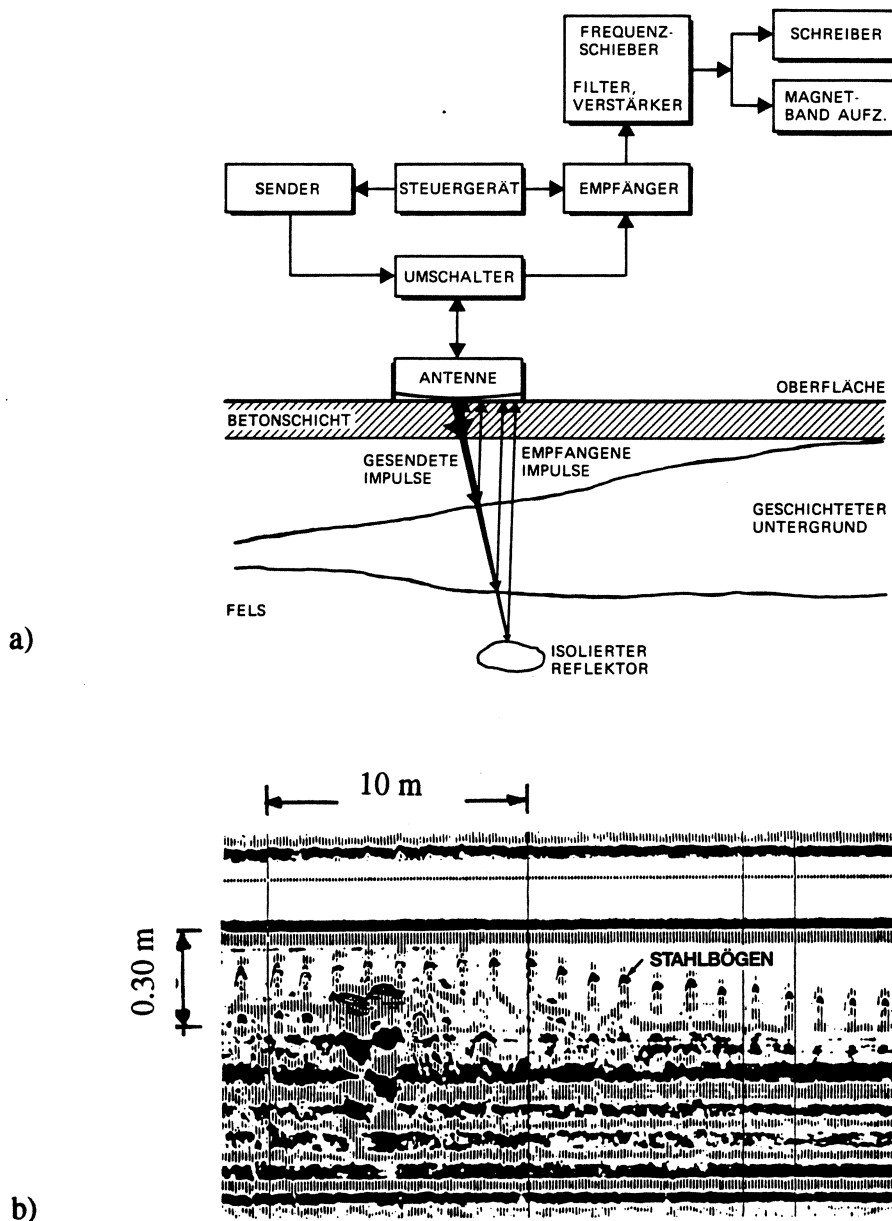


Bild 8 Georadar zur Zustandsbeurteilung von Stollen- und Tunnelverkleidungen

a) Schematische Darstellung der Apparatur [10]

b) Radargramm: Verkleidung verschiedener Betonstärke sowie Stahlbögen [10]

4.2.3 Anwendung von Georadar bei einem Schildvortrieb

In [12] wird von der Instrumentierung einer Schildmaschine mit einer festinstallierten Georadar-Messeinrichtung berichtet. Das Verfahren dient primär der Bestimmung des Überprofils, aber auch der Ortung von Hindernissen wie z.B. von Findlingen (Bild 9a). Die Radarantennen wurden starr in das Schneidrad montiert, um damit bei laufendem Vortrieb kontinuierlich die Bedingungen vor der Ortsbrust und entlang der Peripherie des Schneidrades (Überprofil) untersuchen zu können. In Bild 9b ist die Systemkonfiguration dargestellt. Zur effizienten Aufbereitung und Auswertung der Messdaten werden numerische Methoden angewendet. Dieses Verfahren wurde bereits bei verschiedenen Tunnelvortrieben praktisch erprobt. Die Reichweite dieser Georadaranwendung und die Interpretationsmethoden werden nach [12] laufend verbessert. Weitere Angaben waren trotz unserer Direktanfrage nicht erhältlich.

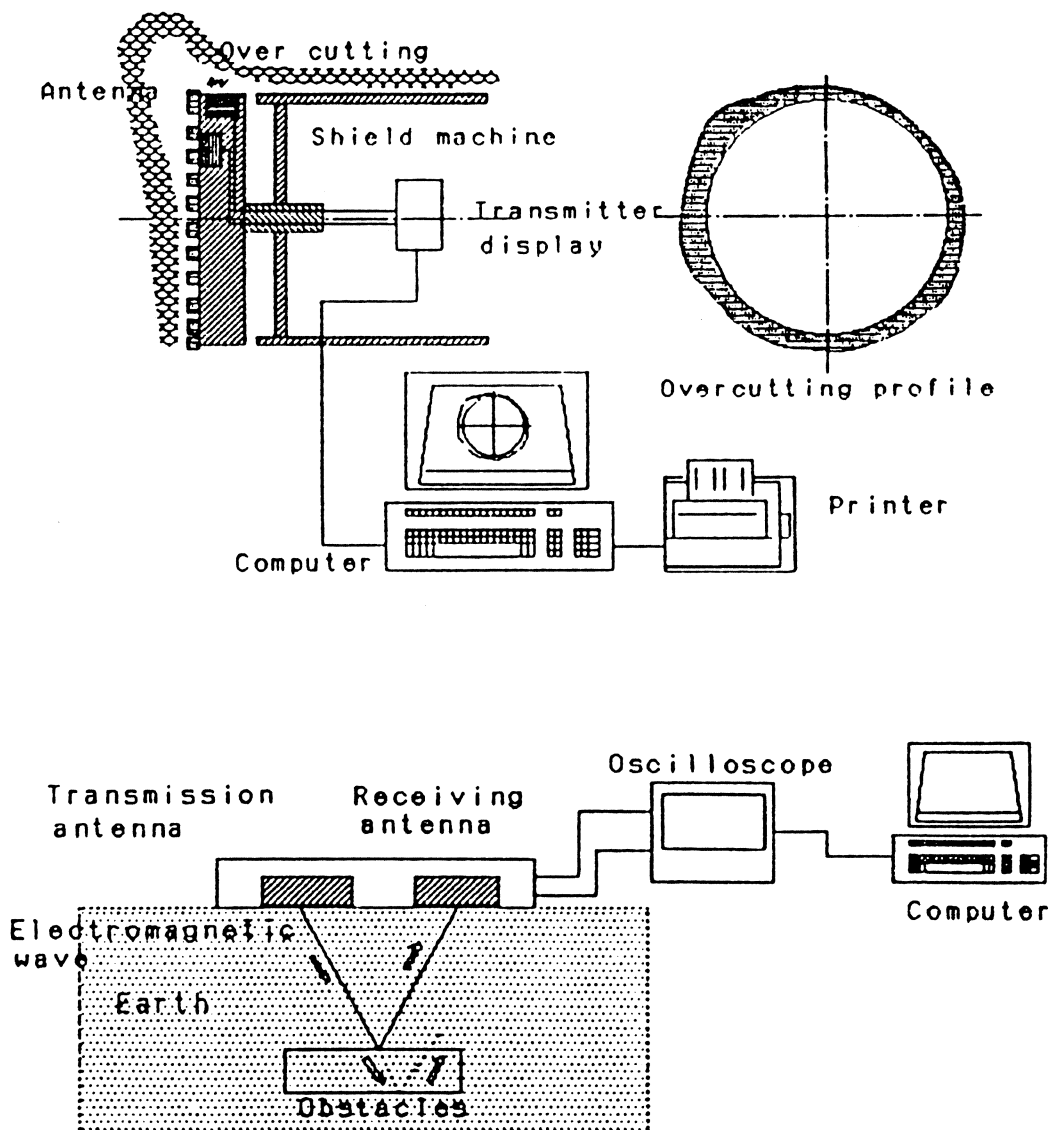


Bild 9 Georadar bei TBM-Vortrieben zur Ermittlung des Überprofils und zur Ortung von Hindernissen im Schneidradbereich [12]
a) Antennenanordnung im Schneidrad
b) Systemkonfiguration

5. Die von der FGU veranlassten Testmessungen mit Georadar

Die im Jahre 1989 im Rahmen erarbeiteten Expertenberichte [13,20] bzw. die Projektstudie [22], dienten als Entscheidungsgrundlage für dieses Forschungsprojekt. Zudem konnten die Erfahrungen der im Jahre 1987 im Felslabor Grimsel mit synthetischen Impulsen durchgeführten Feldversuche nutzbringend einfließen. Es zeigte sich, dass das Problem des Erkennens von Störzonen in der Umgebung der Ortsbrust mit geophysikalischen Mitteln als durchaus lösbar betrachtet wurde. Zentrale Fragen waren jedoch die erforderliche maximale Reichweite, die notwendige Auflösung des Verfahrens sowie die Verfügbarkeit entsprechender Geräte.

Zur Erkundung der näheren Umgebung der Ortsbrust bot sich als wahrscheinlich beste Methode die Radarreflexionsmethode an [13]. Technisch erschien dieser Weg als gangbar und vielversprechend. Das vorgeschlagene Gesamtkonzept sah die Verwendung von synthetischen Impulsen unter Verwendung eines vektoriellen Netzwerkanalysators vor [20]. Aufgrund der Vorversuche der NAGRA bzw. des CERN wurde die synthetische Pulsmethode als geeignete Methode für den Tunnelbau zur Vorauserkundung geologischer Störzonen der konventionellen Radarmethode vorgezogen [21]. Die ausführliche Projektstudie [22] zeigt neben dem Messprinzip die wesentlichen hochfrequenztechnischen Probleme, den Stand der Technik sowie dem geschätzten Aufwand bis zur Erstellung eines praktisch einsetzbaren Funktionsmusters.

Angesichts der veranschlagten hohen Projektkosten für das Entwicklungsprojekt von über 1.2 Mio. Fr. bis zur Erstellung eines Funktionsmusters entschloss sich der Vorstand der FGU im Jahre 1990 auf Antrag seines Forschungsausschusses, die Forschungsrisiken durch ein schrittweises Vorgehen zu minimieren. Es wurde beschlossen, Vorversuche im Ortsbrustbereich eines im Vortrieb stehenden Tunnels mit dem Ziel durchzuführen, die konventionelle Radarmethode der Methode mit synthetischen Pulsen sowie der Seismik in einem praktischen Versuch unter realen Tunnelbedingungen gegenüber zu stellen. Dabei ging es nicht so sehr um die Erreichung grosser Reichweite, sondern um den praktischen Einsatz der zur Zeit besten handelsüblichen Messinstrumente, ausgeführt von spezialisierten Firmen. Weitere Ziele waren der Einblick in die Datenverarbeitung und Auswertungsmethoden, aber auch Erfahrungen und Vergleiche der Aussagekraft der drei Messmethoden.

5.1 Vorversuche mit Georadar im Umfahrungstunnel Leissigen

Bei der Wahl eines Ortes zur Durchführung dieser Vorversuche mussten verschiedene Kriterien beachtet werden. Der Einsatz musste an einem Ort durchgeführt werden, an dem eine oder mehrere signifikante geologische Störzonen in ihrer Lage genau bekannt waren. Die Messungen sollten ferner ohne eine Beeinträchtigung des Baubetriebes der Tunnelbaustelle und ohne wesentliche Zusatzkosten durchgeführt werden. Die Wahl fiel im Frühjahr 1990 auf den Umfahrungstunnel von Leissigen am Thunersee, wo das Projekt sowohl vom Tiefbauamt des Kantons Bern als auch von der Arbeitsgemeinschaft in verdankenswerter Weise unterstützt wurde.

5.1.1 Geologie

Der Umfahrungstunnel von Leissigen durchstösst zu einem wesentlichen Teil den ultrahelvetischen Flysch. Diese Flyschgesteine sind charakterisiert durch eine typische Wechsellagerung aus hellen, z.T.

grob geklüfteten aber harten bis sehr harten Kalksandsteinen und weichen dunklen Mergelschiefern. Der Wechsel von einem Gesteinstyp zum andern erfolgt im Dezimeterbereich. Der Fels wird vorwiegend von Moräne bzw. Bach- und Gehängeschutt überlagert. Die geologische Prognose zeigte, dass zwischen Tunnelkilometer 10.6 und 10.4 eine grosse wasserführende Lockergesteinsmulde in geringem Abstand unterfahren wurde (Bild 10). Diese Situation bot ein geeignetes Umfeld zur Durchführung der geplanten Vorversuche. Zum Zeitpunkt der Messungen stand an der Ortsbrust die Wechsellagerung bestehend aus weichen, nahezu horizontal gelagerten Tonmergelschichten von 60 bis 180 cm Stärke an. Die dazwischen liegenden, kieselkalkähnlichen harten Feinsandkalke waren 30 bis 80 cm stark.

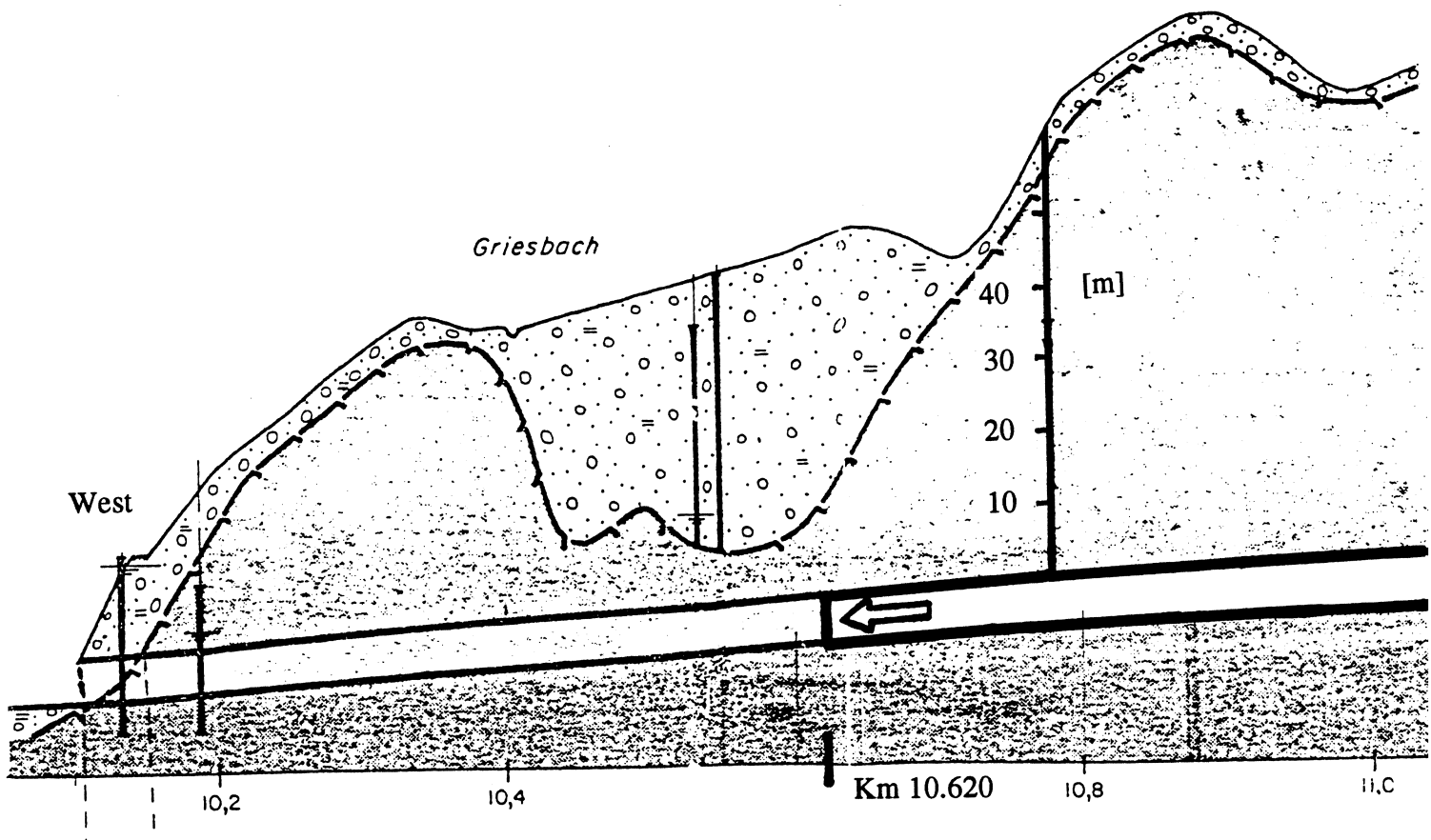


Bild 10 Umfahrungstunnel Leissigen: Geologische Prognose im Längenprofil mit dem Vortriebsstand vom 18. August 1990 bei Km 10.620

5.1.2 Messdisposition

Die Auftragserteilung zur Durchführung der Vorversuche mit Georadar erfolgte anfangs Juli 1990 an die folgenden Firmen:

- BRGM, Service géologique national, Orléans, Frankreich (Radar mit synthetischen Pulsen)
- ABEM AB, Mala, Schweden (konventionelle Radarmethode)
- Seismik (Auftrag durch Nagra)

10 Tage vor Messbeginn teilte uns die Firma ABEM mit, dass sie wegen eines nicht reparierbaren Systemzusammenbruches nicht in der Lage wäre, die Testmessungen in Leissigen durchzuführen. Eine Ersatzfirma konnte in der kurzen Zwischenzeit nicht mehr gefunden werden.

Ein erster Teil des Untersuchungsprogrammes bestand in der Durchführung von Test- und Kalibriermessungen mit Radar im Bereich der Lüftungszentrale (Bild 11). Dieser Bereich eignete sich bestens dafür, da die Felspfeiler beidseitig zugänglich und deren Abmessungen genau bekannt waren. In der Kalotte waren als provisorische Sicherung Armierungsnetze und Anker eingebaut, der Fels war im Paramentbereich nur mit Spritzbeton abgedeckt. So konnten dort ungehindert Transmissions- und Reflexionsmessungen zur Bestimmung der Wellengeschwindigkeit im anstehenden Gebirge sowie die Reichweite des Verfahrens bestimmt werden.

Der Schwerpunkt des Testprogrammes wurde auf die Messung von Profillinien im Bereich der

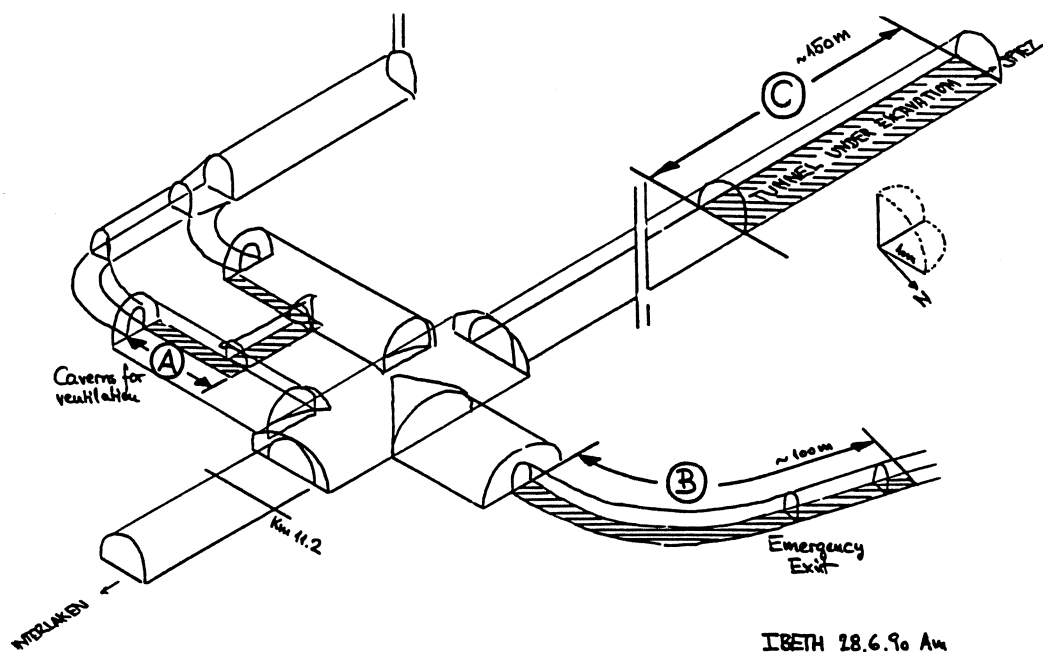


Bild 11 Umfahrungstunnel Leissigen mit den Bereichen A, B und C zur Durchführung der Testmessungen mit Georadar:

- A: Lüftungskaverne (Test- und Eichmessungen)
- B: Bereich Zugangsstollen
- C: Ortsbrustbereich

Ortsbrust gelegt, welche zum Zeitpunkt der Testmessungen bei km 10.620 stand (Bild 10). Im Bereich der Ortsbrust war das Gebirge unverkleidet. Rund 4 m hinter der Ortsbrust bestand die provisorische Sicherung gemäss Bild 12 aus Netzen, Swellex-Ankern und Spritzbeton. In diesem Bild sind auch die an der Ortsbrust, in den Paramenten und in der Tunnelsohle geplanten Messprofile eingetragen. Weitere Profilaufnahmen waren im Zugangsstollen zur Lüftungszentrale geplant, welcher in einem schleifenden Schnitt aus dem Quartär in die tertiäre Wechsellagerung eindringt. Aus Zeitgründen mussten jedoch diese Messungen reduziert werden.

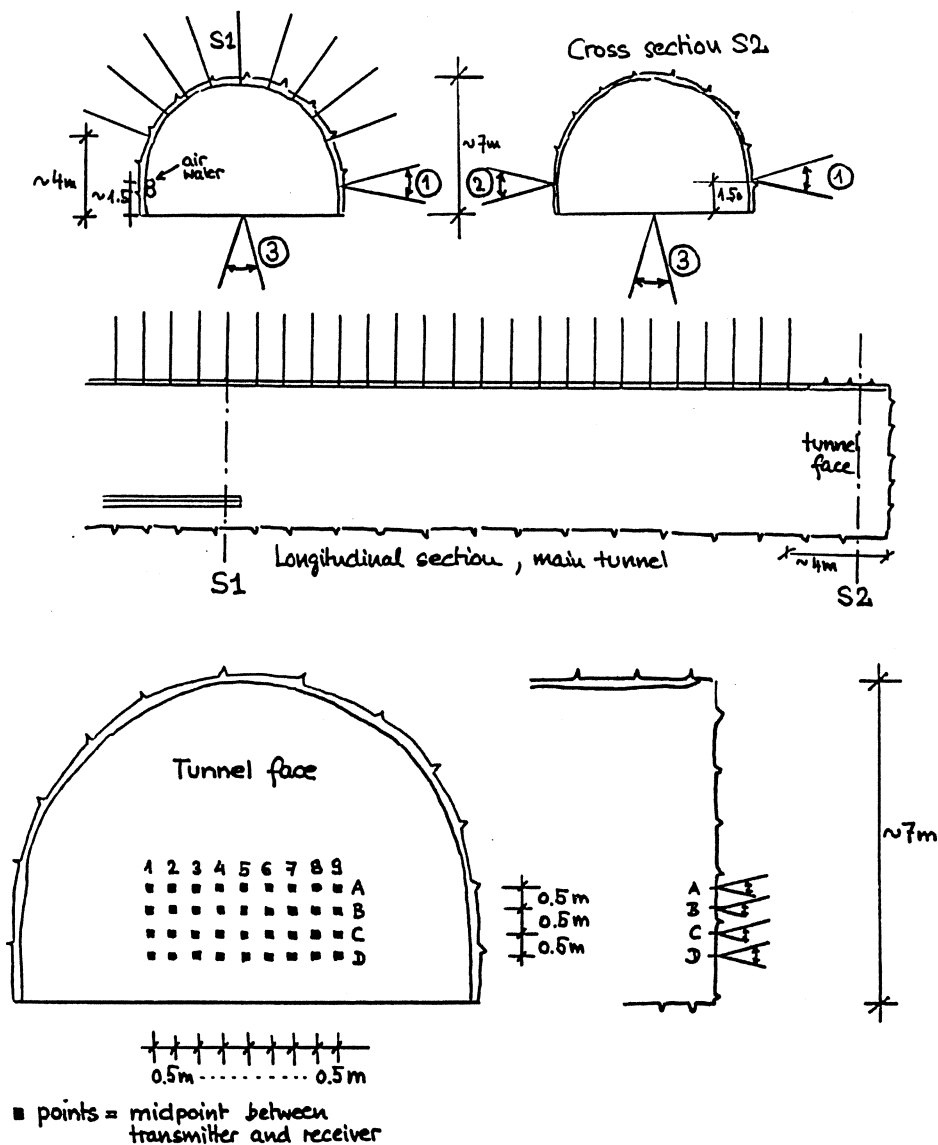


Bild 12 Georadar-Testmessungen im Umfahrungstunnel Leissigen
Messanordnung im Bereich der Ortsbrust

5.1.3 Die Messapparatur (Radar mit synthetischen Pulsen)

Die Firma BRGM arbeitet mit einem Experimentier-Radar mit synthetischen Pulsen [27]. Dieses Gerät basiert auf einem Netzwerk Analyzer vom Typ HP 8753B mit einer Bandbreite von 0.3 MHz bis 3 GHz (Bild 13). Der Analyzer wird von einem HP 9000/216 Mikrocomputer mit Diskettenlaufwerk und Drucker unterstützt. Zur Durchführung einer Messung wird als erstes das Frequenzband (z.B. 10 MHz bis 150 MHz) und dann die Anzahl Frequenzstufen in diesem Band gewählt. Für jede Frequenzstufe wird die Transfer-Funktion zwischen den beiden Antennen gemessen und mittels Fourier Transformation in den Zeitbereich umgewandelt. Die Hochfrequenzsignale von und zu den Antennen werden mit je 30 m langen Koaxialkabeln übermittelt.

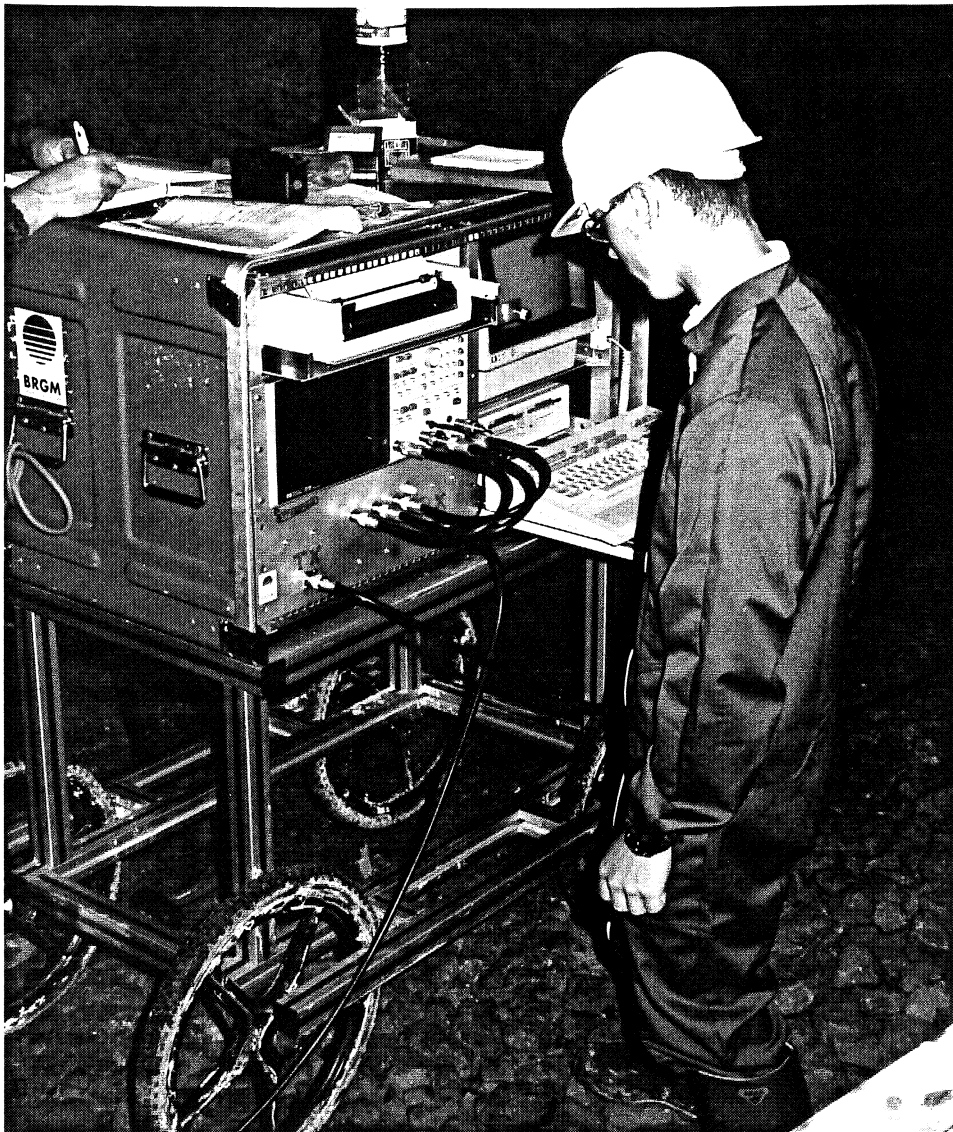


Bild 13 Georadar-Apparatur der Firma BRGM mit synthetischen Pulsen

Als Antennen wurden Breitband-Dipole mit Längen von 1.1 m (mit Verstärker) und 1.9 m (ohne Verstärker) verwendet, welche für eine Bandbreite von 10 MHz bis 150 MHz ausgelegt waren (Bild 14). Um eine grössere Reichweite zu erreichen wurden sie in Leissigen vorwiegend im Bereich

zwischen 5 MHz und 52 MHz verwendet. Leider fielen die mit Verstärkern versehenen Antennen bereits zu Beginn der Messungen wegen Überlastung aus, sodass die meisten Profilmessungen ohne Antennenverstärkung durchgeführt werden mussten. Die Antennen wurden in der Regel parallel zur Achse des Messprofils gehalten.

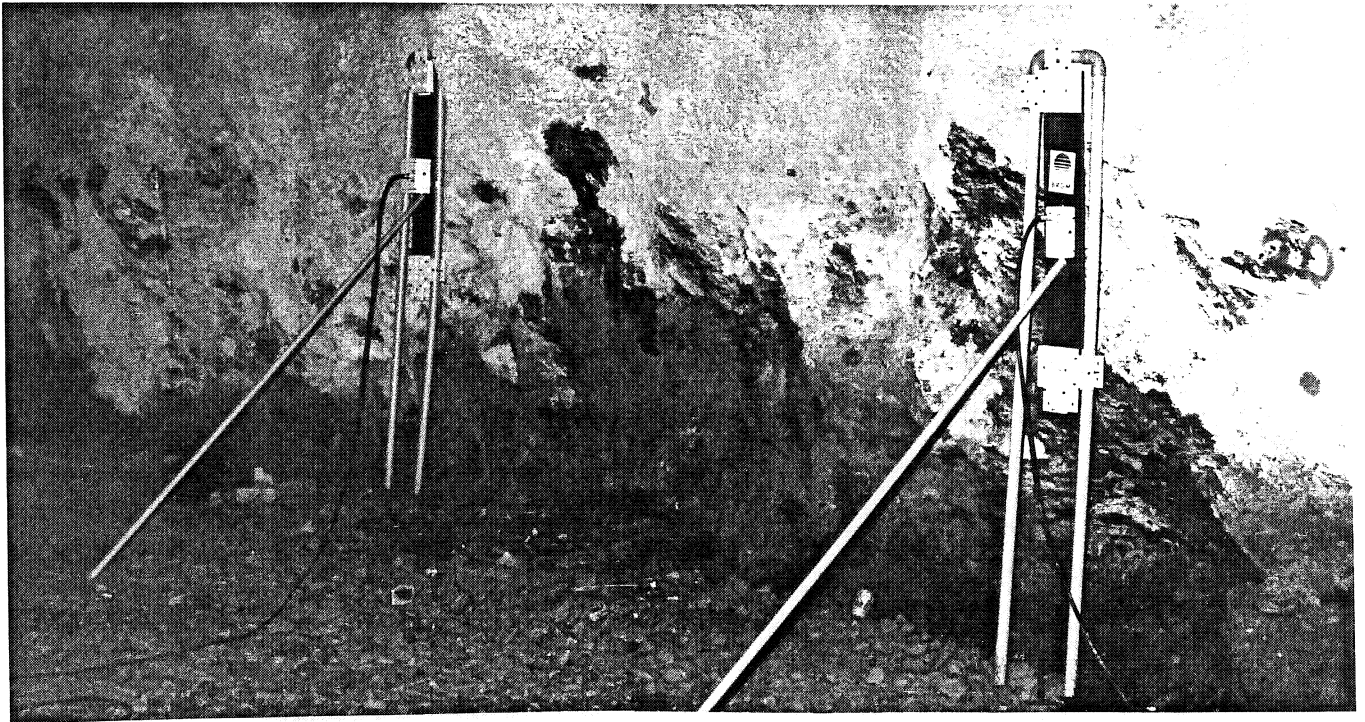


Bild 14 Umfahrungstunnel Leissigen: Testmessungen mit synthetischem Pulsradar

Oben: Dipolantennen der Länge 1.1 m mit Verstärker
Unten: Dipolantennen der Länge 1.9 m ohne Verstärker bei der Messung im Ortsbrustbereich oberhalb der Rigole

Das Zeitintervall variierte zwischen 250 ns und 1000 ns, im Normalfall betrug es 500 ns. Im Regelfall wurden 401, ausnahmsweise 201 Pulse pro Spur erfasst. Die Ausgangsleistung betrug 1 mW. Daraus folgte eine Messdauer von 6.5 bis 13 s pro Spur. Die Verwendung der Koaxialkabel ergab ein Kabelecho rund 330 ns nach jedem echten Echo, welches jedoch keinen Einfluss auf die Resultate hatte. Vielseitige Probleme bereitete die Verbindung der Erdung zwischen französischen und schweizerischen Steckern !

Auf dem Bildschirm der Apparatur wird mittels Software ein schwarz/weisses Radargramm generiert, welches der Datenkontrolle dient. Dieses Profilbild kann im Feld ausgedruckt werden. Die Software umfasst auch Eichprozeduren. Der erste Teil der Eichung erlaubt die Ermittlung der Dämpfung und der Verzögerung der verwendeten Koaxialkabel. Die zweite Eichstufe ermittelt die Pulsverzerrung, welche durch die frequenzabhängigen Antennencharakteristiken verursacht werden. Die letzte Stufe definiert die Zeit Null. Die definitive Auswertung der Messresultate erfolgte schlussendlich auf einer HP 9000/345 Workstation. In Leissigen wurde in den meisten Fällen mit einer mittleren Hauptfrequenz von 28 MHz gearbeitet.

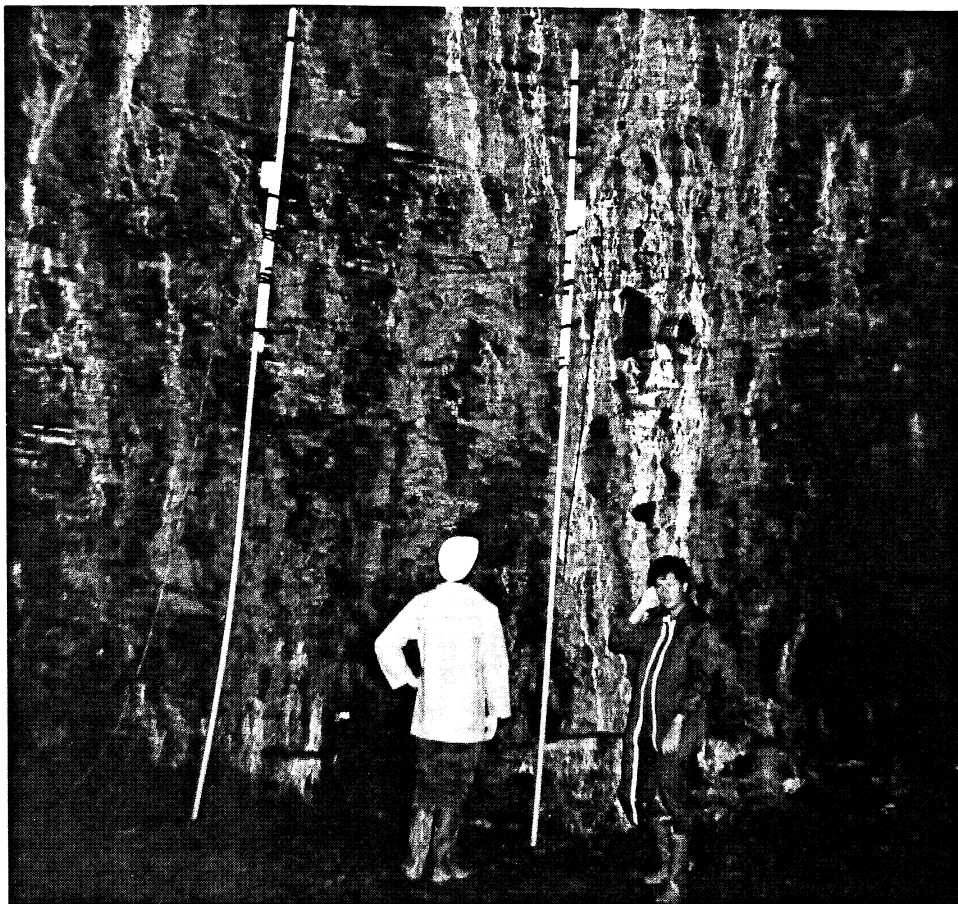


Bild 15 Umfahrungstunnel Leissigen: Georadarmessungen an der Ortsbrust mit synthetischen Pulsen und Dipolantennen der Länge 1.9 m ohne Verstärker

5.1.4 Messresultate Georadar Leissigen

Von der Firma BRGM wurde uns per Fax der Entwurf zu einem Schlussbericht [27] übermittelt. Er ist leider unvollständig, insbesondere fehlen diverse Figuren mit den ausgewerteten Messresultaten. Vertraglich war ein dreiwöchiger Termin für die Ablieferung des Schlussberichtes vereinbart

worden. Trotz unserem erheblichen Zeitaufwand für umfangreiche Korrespondenz war die Firma BRGM auch nach rund 5 Monaten nicht in der Lage, den Bericht fertigzustellen.

Aus dem Entwurf zum Schlussbericht [27] kann entnommen werden, dass insgesamt 26 Datenfiles verarbeitet wurden:

- Im Bereich der **Zone A** (Lüftungskaverne, Bild 11) wurden bei einem beiseitig zugänglichen Felsfeiler verschiedene Test- und Eichmessungen durchgeführt. Insgesamt sind 5 Transmissionsmessungen mit je 8 bis 14 Messpositionen sowie 2 Reflexionsmessungen mit je 11 Messpositionen erfasst worden. Es wurden Dipolantennen mit und ohne Verstärker verwendet. In der Regel betrug dabei der Frequenzbereich 5 bis 52 MHz.

Drei Transmissionsmessungen ergaben eine Wellenfortpflanzungsgeschwindigkeit von $V=8.8\text{cm/ns}$ mit einer Streuung von $\pm 15\%$. Dies bedeutet eine dielektrische Permittivität von $\epsilon_r=11.6$. Dieser relativ hohe Wert ist für den vermutlich hohen Wassergehalt des Gebirges nicht überraschend. Die effektive mittlere Frequenz beträgt 28 MHz für den 5 bis 52 MHz Bereich. Die Breite des synthetischen Pulses beträgt ca. $1\frac{1}{2}$ Wellenlängen (54ns), die Wellenlänge selbst 3.1 m. Die maximale Transmissionsweite betrug 16 m, was im Reflektionsmodus eine Reichweite von 8 m darstellt (bei der Annahme eines isotropen Ausstrahlungsdiagrammes und eines Reflexionskoeffizienten von nahe bei 1). Bei funktionierenden Antennenverstärkern wäre die Reichweite in Reflexion um 30 bis 50%, d.h. bis gegen 12 m angestiegen.

- Im Bereich der **Zone B** (Bild 11) wurde im Zugangsstollen zur Lüftungszentrale ein Radarprofil auf der Stollensohle mit 54 Positionen aufgenommen. Der Abstand der Antennen (ohne Verstärker) betrug 6 m, die Bandbreite der Frequenzen 33 bis 90 MHz.

Dieser etwas höhere Frequenzbereich reduzierte die Reichweite. Das Radargramm zeigte ein starkes "Ringing" im Bereich der ersten 300 ns, ähnlich demjenigen im Haupttunnel. Ein starkes Echo, welches via Luftweg in die Messung einging, konnte eindeutig als Reflexion eines in der Nähe stehenden Bulldozers gedeutet werden. Einige kleinere Echos dürften ebenfalls Reflexionen bedeuten, welche via Luft übertragen wurden.

Im Bereich des schleifenden Überganges vom Tertiär zum Quartär wurden in einer Distanz von 40 m bis 54 m vom Haupttunnel Reflexionen bis in eine Tiefe von maximal 9 m festgestellt. Leider fehlt diese Auswertung im Entwurf zum Schlussbericht der Firma BRGM.

- Im Bereich der **Zone C** (Bild 11), das heisst im Ortsbrustbereich, wurden insgesamt 11 Profile gemessen. Sämtliche Profile wurden mit 1.90 m langen Antennen ohne Antennenverstärker mit Frequenzen zwischen 5 und 52 MHz gemessen.

Profile an der Ortsbrust

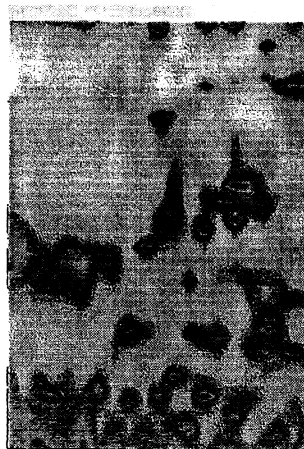
An der Ortsbrust wurden drei Radarprofile entlang von horizontalen Linien gemessen, welche in 1.15m, 2.20 m und 3.20 m Höhe über der Tunnelsohle lagen. Bild 15 zeigt die vertikale Antennenstellung beim Messen der obersten Linie an der Ortsbrust mit einem konstanten Antennenabstand von 2.0 m bzw. 3.0 m. Diese Versuche zeigten, dass ein Coupling-Effekt zwischen den Antennen festzustellen war, wenn diese weniger als eine Wellenlänge voneinander entfernt waren.

Im Bereich der Ortsbrust waren keine Störungen durch Metall, wie Anker oder Netze vorhanden. Reflektierende Strukturen konnten in einem Abstand von 2.5 bis 8 m vor der Ortsbrust erkannt werden. Die graphische Darstellung dieser Profile haben wir leider nicht erhalten.

Bei den Profilen R336 und R337 wurde eine Antenne festgehalten und mit der anderen Antenne der Antennenabstand bei jeder Messung verändert. Diese Messungen ergaben wenig neue Informationen, ausser einer Wellenfortpflanzungsgeschwindigkeit von 7.5 cm/ns.



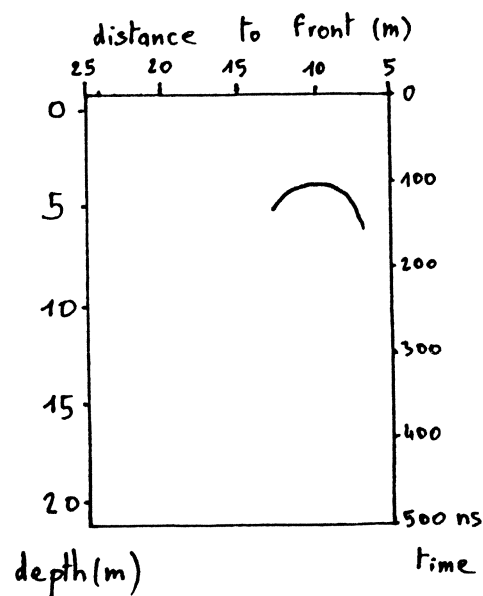
Equalized data



Envelope of
equalized data



Envelope of data
(log scale)



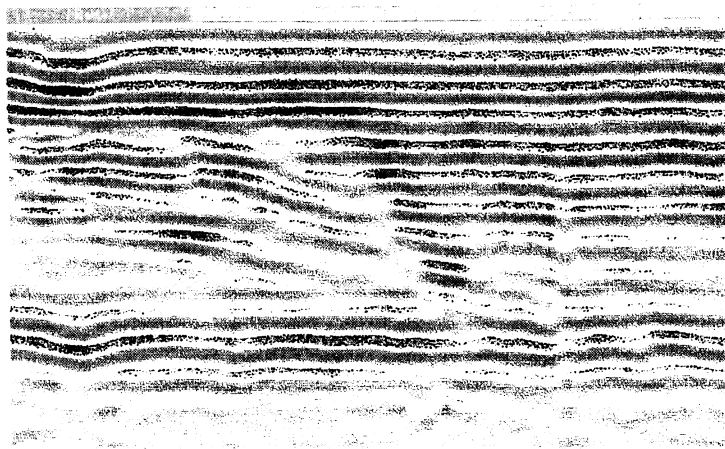
Interpretation

Bild 16 Umfahrungstunnel Leissigen: Testmessungen mit synthetischem Pulsradar
Resultate des Reflexionsprofils R331 entlang der Tunnelwand [27]

Profile in der Sohle und in den Ulmen im Ortsbrustbereich

Das Messprofil auf der Tunnelsohle R345, welches mit variablem Antennenabstand durchgeführt wurden, ergab recht verwirrende Ergebnisse, nämlich starke Echos durch die Tunnelfirste und "Ringing". Trotzdem konnte eine Wellenfortpflanzungsgeschwindigkeit von 8.8 cm/ns im Gebirge festgestellt werden.

Das Profil R331 mit 21 Messpositionen entlang der linken Ulme wurde mit einem konstanten Antennenabstand von 3.0 m durchgeführt (Bild 14 unten). Die Messlinie wurde in einem Abstand von rund 1 m unterhalb des in der Kalotte eingebauten Armierungsnetzes durchgeführt. Die Resultate sind in Bild 16 dargestellt. Bei dieser Messung war ein dubioser Zeitnullpunkt vorhanden. In der Nähe der Ortsbrust konnten Reflexionen in rund 4m Tiefe festgestellt werden. Weiter von der Ortsbrust entfernt ergab sich ein starkes "Ringing", welches eindeutig in Zusammenhang mit den nahen Armierungsnetzen stand.



Equalized data



Bild 17 Umfahrungstunnel Leissigen: Testmessungen mit synthetischem Pulsradar
Resultate des Reflexionsprofils R343 in der Tunnelsohle [27]

Auch das in Bild 17 dargestellte, auf der Tunnelsohle mit einem konstantem Antennenabstand von 3m durchgeführte Profil R343 mit 49 Messpositionen wird von starkem "Ringing" beeinflusst. Sichtbare Reflexionen schliessen das über den Luftweg laufende Echo der Ortsbrust mit ein. Hier zeigen sich aber auch einfallende geologische Strukturen bis in eine Tiefe von 17 m. Trotz der ungewöhnlich grossen Tiefe scheint es keinen Grund zu geben, an diesen Werten zu zweifeln [27].

Weitere 7 Messprofile waren aus verschiedenen Gründen wie schlechte Zeitnullpunkte und schlechte Datenqualität nicht auswertbar.

5.1.5 Zusammenfassung der im Tunnel Leissigen gewonnenen Erfahrungen mit Georadar

Die von der Firma BRGM während zwei Tagen unter normalen Baustellenbedingungen durchgeführten Georadarmessungen mit synthetischen Pulsen wurden mit einer Experimental-Apparatur durchgeführt [27]. Die Breitbandsignale hatten in den meisten Fällen eine mittlere Frequenz von 28 MHz. Bewährt hat sich ein konstanter Antennenabstand von 3 m. Im Transmissionsmodus wurde eine maximale Reichweite von 16 m erreicht, im Reflexionsmodus eine solche von 17 m. Die gemessene mittlere Wellenfortpflanzungsgeschwindigkeit beträgt 8.8 cm/ns. Bei mehreren Messprofilen konnten Reflexionen von geologischen Strukturen erkannt werden.

Ein grosses Problem war die Verwendung von nicht abgeschirmten Antennen. Einerseits ergab sich dadurch ein direktes Übersprechen vom Sender zum Empfänger infolge der durch die Luft laufenden Welle. Des weiteren stellten sich durch die Luft laufende Reflexionen ein, welche durch Kavernen-, Tunnel- und Stollenwände, durch die Ortsbrust sowie durch umherstehende Fahrzeuge verursacht werden. Diese ungewollten Reflexionen werden bei der Messung automatisch den effektiven Reflexionen des Gebirges überlagert. Die erforderliche Abschirmung der Antennen ist nach [27] jedoch ein schwieriges Problem, insbesondere bei den verwendeten Frequenzen, sofern die niedrigen Abmessungen der Antennen im Rahmen gehalten werden sollen. Gegen das durch externe Objekte verursachte "Ringing" kann wenig unternommen werden [27].

Aus unserer Sicht war die in Leissigen anwesende Messequippe der Firma BRGM mit der Komplexität der Messapparaturen und dem nicht einfachen Messproblem überfordert. Dank der Anwesenheit des Experten Dr. Caspers konnte jedoch der Schaden in Grenzen gehalten werden. Es zeigte sich auch, dass es sich bei der verwendeten Apparatur tatsächlich um Experimentalgeräte handelte. Die Überbeanspruchung der Antennenverstärker zu Beginn der Messkampagne führte dazu, dass sämtliche weiteren Profilmessungen ohne Antennenverstärker durchgeführt werden mussten, was bedeutend geringere Reichweiten ergab. Personelle Wechsel in der Firma BRGM führten schliesslich dazu, dass per Dato erst ein Entwurf zum Schlussbericht vorliegt.

5.2 Seismik-Messungen im Umfahrungstunnel Leissigen

Die Auftragserteilung zur Durchführung der seismischen Messungen erfolgte parallel zu den Georadarmessungen anfangs Juli 1990 an die finnische Firma Vibrometric. Es war das Ziel, die beiden Messverfahren vor Ort am gleichen Objekt durch Parallelmessungen zu vergleichen. Die seismischen Messungen wurden von der NAGRA in Auftrag gegeben und finanziert. Die Resultate dieser Messungen sind im Abschnitt 3.2.3 zusammengefasst.

5.3 Vorversuche mit konventionellem Georadar im Umfahrungstunnel Wattwil

Die unter 5.1.2 erwähnten Schwierigkeiten der schwedischen Firma ABEM mit ihren Messapparaturen und ihre kurzfristige Absage der Teilnahme an den Vorversuchen in Leissigen zwang uns dazu, nach einer weiteren Einsatzmöglichkeit Ausschau zu halten. Wir suchten einen im Vortrieb stehenden Tunnel, bei dem weder Stahlbogen noch Stahlnetze oder Stahlanker als provisorische Sicherung verwendet wurden. Diese Gesichtspunkte führten uns in den Pilotstollen des Umfahrungstunnels von Wattwil. Auch bei diesem Bauwerk wurde unsere Arbeit vom Bauherr und Projektverfasser in verdankenswerter Weise aktiv unterstützt.

Der Auftrag zur Durchführung der Testmessungen erfolgte Ende Juli 1991 an die Firma ABEM. Die Messungen im Pilotstollen wurden am 24. und 25. August 1991, d.h. an einem Wochenende ohne Baubetrieb, durchgeführt.

5.3.1 Geologie

Der im Pilotstollen ausgewählte Bereich zwischen Km 5.160 und Km 5.320 zur Durchführung der Messungen erstreckt sich, geologisch, gesehen über die Grenze der Oberen Meeresmolasse und der Unteren Süsswassermolasse (Bild 18). Beide Felsformationen bestehen im wesentlichen aus einer

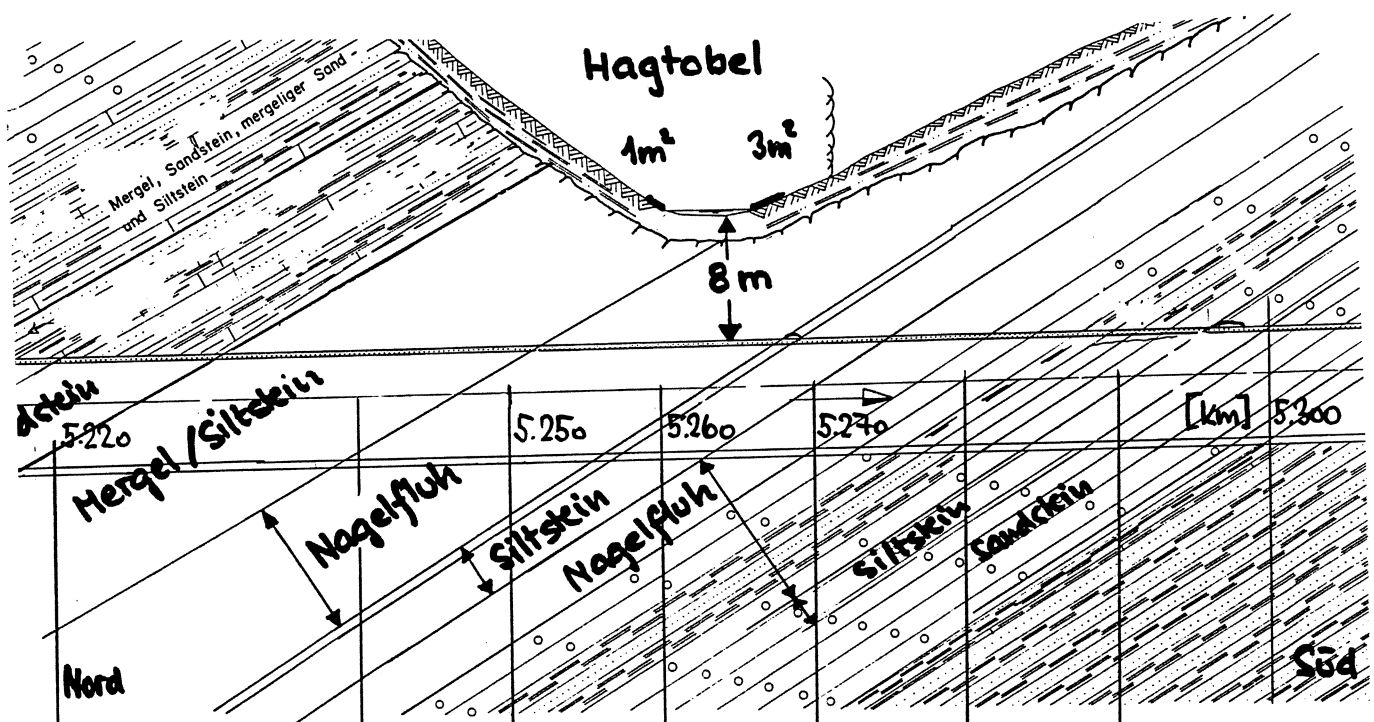


Bild 18 Umfahrungstunnel Wattwil: Geologischer Längsschnitt im Bereich der Messprofile

Wechsellagerung von Nagelfluh, Sandstein und Mergel. Die obere Meeresmolasse zeichnet sich durch Vorherrschaft der polygenen, kompakten Nagelfluh aus. Die Untere Süsswassermolasse besteht mehrheitlich aus Siltstein und Sandstein, dazwischen sind einige kleinere Lagen von Nagelfluh und Mergelschichten vorhanden.

5.3.2 Messdisposition

Der bereits durchgeschlagene Pilotstollen war zum Zeitpunkt der Durchführung der Vorversuche im Messabschnitt fast durchwegs mit einer dünnen Spritzbetonschale versehen. Zwischen Km 5.160 und Km 5.320 waren durchschnittlich 0.5 metallische Felsanker pro Tunnellaufmeter, jedoch keine Netze verwendet worden. Diese geringe Anzahl Anker war im Firstbereich des Stollens vorhanden.

Aus dem Blickwinkel der Geologie erwarteten wir deutliche Reflexionen als Folge der vorhandenen Wechsellagerung. Zudem wurde die Lage des Messabschnittes so gewählt, dass dieser den Bereich des Hagtobels abdeckte. Hier war nämlich zwischen der Tunnelfirste und der Geländeoberfläche nur eine Felsüberdeckung von 8 m vorhanden (Bild 18). Deshalb erwartete man von der Geländeoberfläche, d.h. der Grenze zwischen Gebirge und Luft, deutliche Reflexionen. Auf Vorschlag des Experten Dr. Caspers wurden zusätzlich zur Verdeutlichung der Reflexionen an der Geländeoberfläche zwei Metallgitter (Fliegennetze) mit einer Fläche von 1 m² bzw. 3 m² ausgelegt (Bild 18 und 19).

Das Messprogramm war ähnlich gestaltet wie dasjenige im Umfahrungstunnel Leissigen. Nach dem



Bild 19 Testmessungen mit Georadar im Umfahrungstunnel Wattwil nach der konventionellen Radarmethode. Künstliche Reflexionshorizonte aus Metallgittern im Hagtobel

Testen der Apparaturen wurden im Bereich des Überganges von der Kalotte zu dem im Firstbereich der Kalotte vorgetriebenen Pilotstollen die Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Radarwellen im Gebirge gemessen. In einer zweiten Phase waren Reflexionsmessungen über den ganzen Messabschnitt mit konstantem und variablem Antennenabstand vorgesehen. In einer dritten Phase plante man Reflexions-, aber auch Transmissionsmessungen mit Schwerpunkt im Hagtobel. Die Transmissionsmessungen konnten jedoch aus Zeitgründen nicht durchgeführt werden.

5.3.3 Die Messapparatur

Die verwendeten Messgeräte sind in [28] ausführlich beschrieben. Das Radarsystem RAMAC (Bild 20) arbeitet mit der sogenannten konventionellen Radarmethode. Mit diesem System wurden im Jahre 1987 im Felslabor Grimsel im Granit Klüfte auf eine Distanz von bis zu 160 m deutlich erkannt, im Salzgestein betrug die Reichweite gar mehr als 300 m. Bei der Erkundung von wasserführenden Kanälen in einem geklüfteten, karstigen Kalksteingebirge konnten mit dem RAMAC-System Gebirgsstrukturen in einem Bereich von über 100 m entdeckt werden (Ombla-Tunnel, Jugoslawien). Insbesondere die Crosshole-Methode ergab sehr deutliche Resultate.



Bild 20 Testmessungen mit Georadar im Umfahrungstunnel von Wattwil
Konventionelles Radarsystem RAMAC mit Steuergerät und Computer

Beim RAMAC-System wird mit einzelnen kurzen Pulsen gearbeitet. Es besteht aus:

- einem Microcomputer, der zur Kontrolle der Messungen, Signalanalyse, Datenpräsentation und Speicherung verwendet wird
- einer Kontrolleinheit
- einem Sender zur Generierung der kurzen Radarpulse
- einem Empfänger zur Erfassung und Digitalisierung der Radarpulse
- optischen Glasfaserkabeln zur Übermittlung der Steuer- und Datensignale. Diese erweisen sich als sehr vorteilhaft, da sie keine elektrische Leitfähigkeit besitzen. Sie können deshalb auch keine störenden Wellen übertragen. Zudem ist die Erzeugung und Aufnahme von elektrischem Rauschen ausgeschlossen. Durch die Digitalisierung der Signale in den Antennen ist auch keine Verschlechterung der Signale entlang dem Kabel zu erwarten. Die Qualität der Messresultate ist unabhängig von der Kabellänge.

Das System arbeitet wie folgt:

Die Sendeantenne generiert einen Radarpuls, der sich durch das Gebirge fortpflanzt. Um eine möglichst hohe Auflösung zu erzielen wird der Puls so kurz wie möglich generiert. Die Welle wird dann von der Empfangsantenne aufgenommen, verstärkt und in Funktion der Zeit registriert. Aus der vollständigen Wellenaufzeichnung des Signals wird schliesslich die Distanz zum Reflektor, die Stärke der Reflexion, die Dämpfung und Verzögerung der direkten Welle zwischen Sender und Empfänger hergeleitet. Die weiteren technischen Angaben über die verwendeten Instrumente können [28] entnommen werden.

Die in Wattwil verwendeten Dipolantennen wurden speziell für Anwendungen im Tunnelbau entwickelt. Gearbeitet wird mit einer Antennen-Mittenfrequenz von 60 MHz.

Bei der Datenverarbeitung werden verschiedene Filter eingesetzt, da Reflexionen von Störzonen oder anderen Inhomogenitäten im Gebirge nicht gleich erkannt werden können. Bei der Auswertung der VRP Messungen mit variablem Antennenabstand wurden digitale Filter angewendet, bei den Reflexionsmessungen wurde mit einem "Bandpass-filter" und einem "Moving average filter" gearbeitet.

5.3.4 Messresultate Georadar Wattwil

Insgesamt wurden drei Messprofile mit variablem Antennenabstand (VRP1 bis VRP3) und fünf Profile mit einem Antennenabstand von 2 m durchgeführt.



Bild 21 Testmessungen mit Georadar im Umfahrungstunnel Wattwil. Übergangsbereich von der Kalotte in den Pilotstollen. VRP-Messungen zur Ermittlung der Wellenfortpflanzungsgeschwindigkeit

Messungen mit variablem Antennenabstand

Die VRP-Messungen werden im Bericht der ABEM als Rohdaten nach dem Durchlaufen eines DC-Filters dargestellt. Als erstes begann man mit der Messung VRP1 im Übergangsbereich zwischen Kalotte und Pilotstollen. Dabei wurde eine Antenne an der Ortsbrust der Kalotte fest positioniert (Bild 21). Die andere Antenne wurde entlang der Tunnelwand schrittweise im Bereich Km 5.168 bis 5.192 in rund 30 cm Höhe über der Sohle des Pilotstollens bewegt. Das Resultat dieser Messung ist in Bild 22 dargestellt. Mit Hilfe dieser Messung konnte die Wellenfortpflanzungsgeschwindigkeit im Gebirge von $54 \text{ m}/\mu\text{s}$ ermittelt werden. Diese Geschwindigkeit entspricht einer relativen Dielektrizitätskonstanten von $\epsilon_r = 31.0$, verglichen mit einem Wert von $\epsilon_r = 5.0$ bis 6.0 für einen kristallinen Fels.

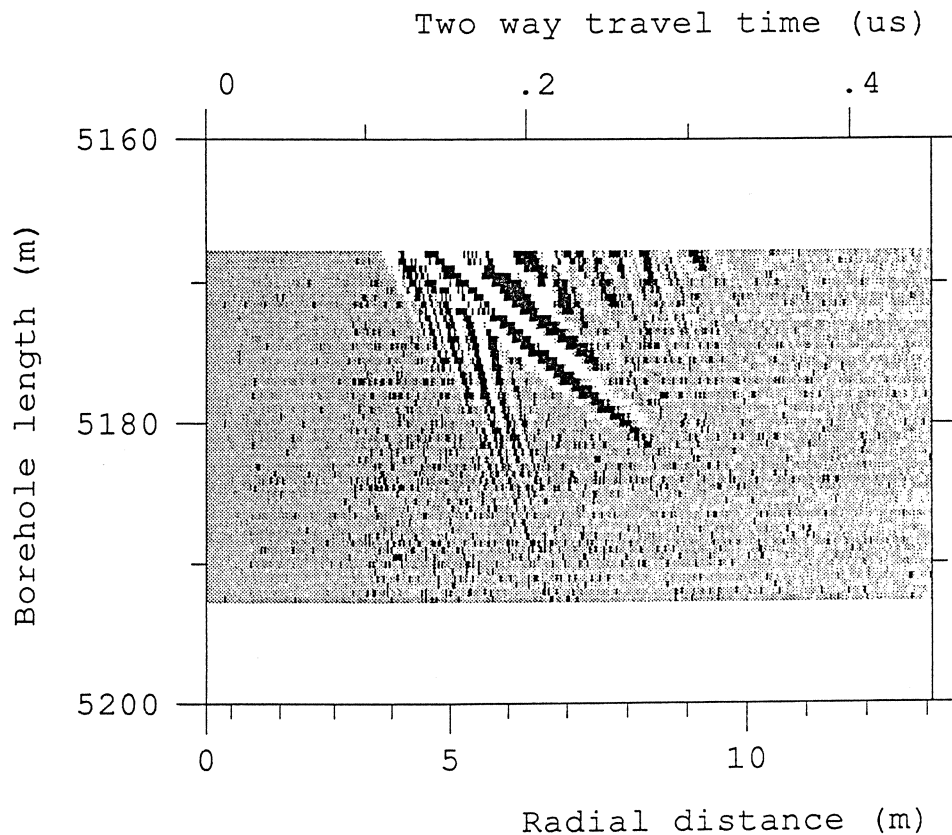


Bild 22 Testmessungen mit Georadar im Umfahrungstunnel Wattwil. Radargramm VRP1 aus dem Übergangsbereich Kalotte/Pilotstollen. Rohdaten nach DC-Filter

Im Falle der Profile VRP2 und VRP3 wurde die feste Antenne gegen die Stollenfirste gedrückt, wobei die Antennenachse normal zur Tunnelachse stand (analog Bild 23, aber in der Firste). Der Antennenabstand wurde bei jeder Messung schrittweise um 0.25 m erhöht. Beim VRP2 wurden total 90 Positionen, beim VRP3 insgesamt 30 Messpositionen aufgezeichnet. Die Resultate sind in Bild 24 zusammen gestellt.

Messungen bei gleichbleibendem Antennenabstand

Reflexionsmessungen mit einem konstanten Antennenabstand von 2 m wurden entlang von Profilen in der Stollenfirste und in der Stollensohle durchgeführt. Bei den Messungen in der Stollensohle mussten die Antennen wegen des dort vorhandenen Wassers und Schlammes rund 20 cm höher gehalten werden (Bild 25). Das Antennenpaar wurde bei allen Reflexionsmessungen bei konstantem Antennenabstand in 25 cm Schritten entlang der Profillinie geführt.



Bild 23 Testmessungen mit Georadar im Umfahrungstunnel Wattwil. Einsatz einer Dipolantenne in der Ulme des Pilotstollens nach der "Offset Profiling" Methode

Insgesamt wurden im Pilotstollen Wattwil die fünf Reflexionsprofile REF1 bis REF5 mit 81 bis 481 Messpositionen erfasst. Die Antennen wurde teilweise parallel (REF1) und teilweise normal zur Tunnelachse (REF2 bis REF5) gehalten.

Bild 26 zeigt den Vergleich von drei zwischen Km 5.250 und 5.270 durchgeführten Messungen. Dieser Vergleich zeigt die deutliche Verbesserung der Radargramm-Qualität infolge der Drehung der Antennenachse normal zur Tunnelachse (REF2 und REF4). Eine gute Reproduzierbarkeit der Resultate der unter den gleichen Bedingungen durchgeführten Messungen REF2 und REF4 ist hier ebenfalls feststellbar.

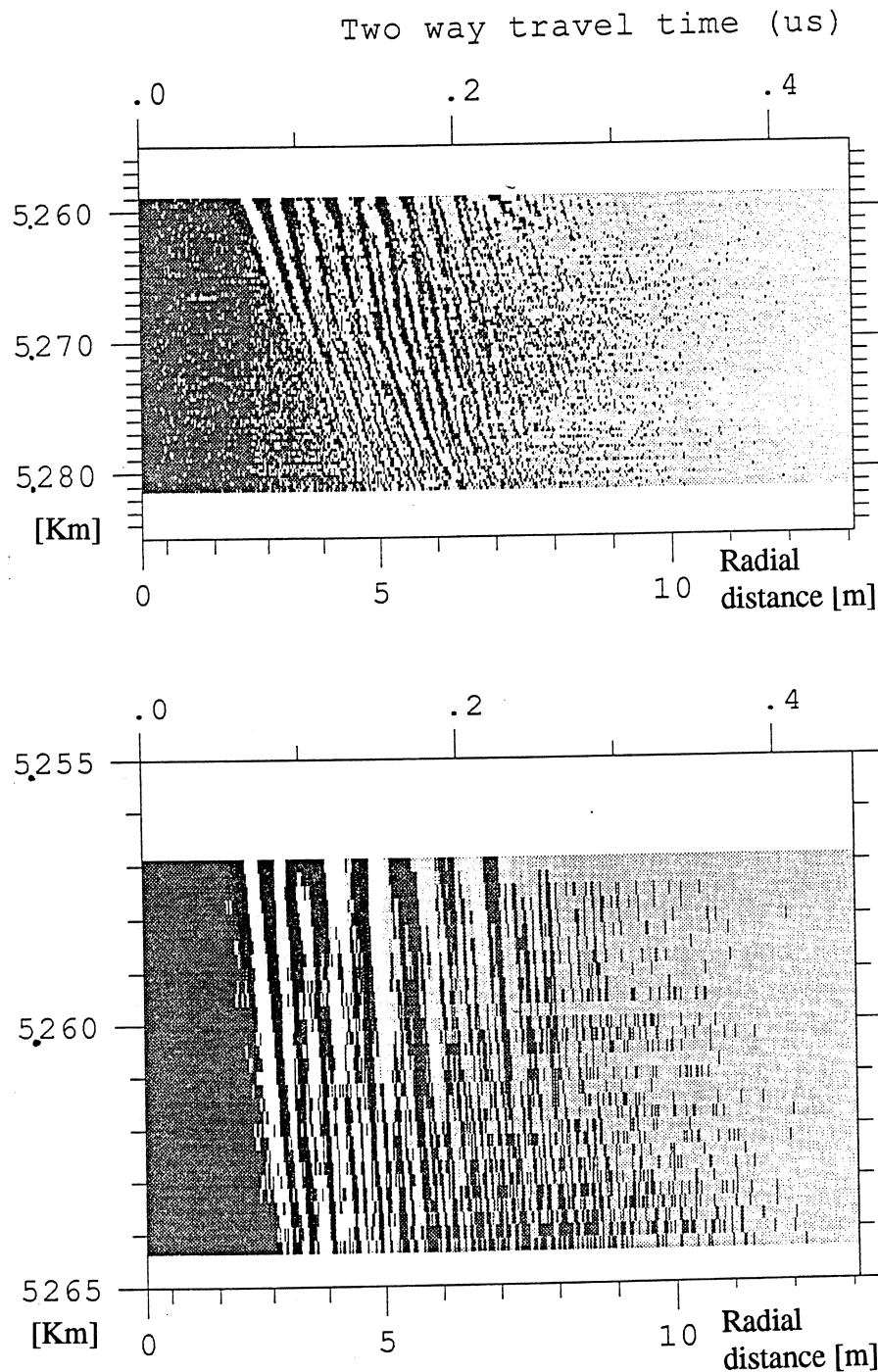


Bild 24 Testmessungen mit Georadar im Umfahrungstunnel Wattwil. Radargramme VRP2 und VRP3 in der Firste bzw. der Sohle des Pilotstollens. Rohdaten nach DC-Filter der Messungen mit variablem Antennenabstand

Die beiden längsten Radarprofile in der Firste (REF3) und in der Sohle (REF5) des Pilotstollens wurden zwischen Tunnelkilometer 5.200 und 5.320 ebenfalls im Reflexionsmodus aufgenommen. Bild 27 zeigt die Resultate in einem Vertikalschnitt durch die Stollenachse. Die Radargramme zeigen, dass die Reichweite in dem hier anstehenden Gebirge zwischen 3 m und 5 m liegt.



Bild 25 Testmessungen mit Georadar im Umfahrungstunnel Wattwil. Einsatz der Dipolantennen in der Sohle des Pilotstollens bei einem Antennenabstand von 2 m.

Einige schwache Reflexionen mit einer geringeren Neigung zur Tunnelachse können hier in grösseren Tiefen erkannt werden [28]. Die durch den tiefen Einschnitt des Hagtobelbaches gegebene Grenzschicht Boden/Luft, die rund 8 m über dem Tunnelscheitel liegt, ist nicht erkennbar. Sowohl oberhalb der Firste wie auch unterhalb der Sohle sind gleichlaufende Reflexionen erkennbar, die auf den Schichtverlauf der aus Nagelfluh, Sandstein, Siltstein und Mergel bestehenden Wechsellagerung hindeuten.

5.3.5 Zusammenfassung der im Tunnel Wattwil gewonnenen Erfahrungen

Die Testmessungen mit konventionellem Georadar im Pilotstollen des Umfahrungstunnels von Wattwil haben im Reflexionsmodus eine Reichweite von 3 m bis 5 m in der aus Nagelfluh, Sandstein, Siltstein und Mergel bestehenden Wechsellagerung ergeben. Einige schwache Reflexionen konnten auch in grösser Tiefe erkannt werden. Unerkannt blieb jedoch die rund 8 m über dem Stollenscheitel gelegene Talsohle des Hagtobels.

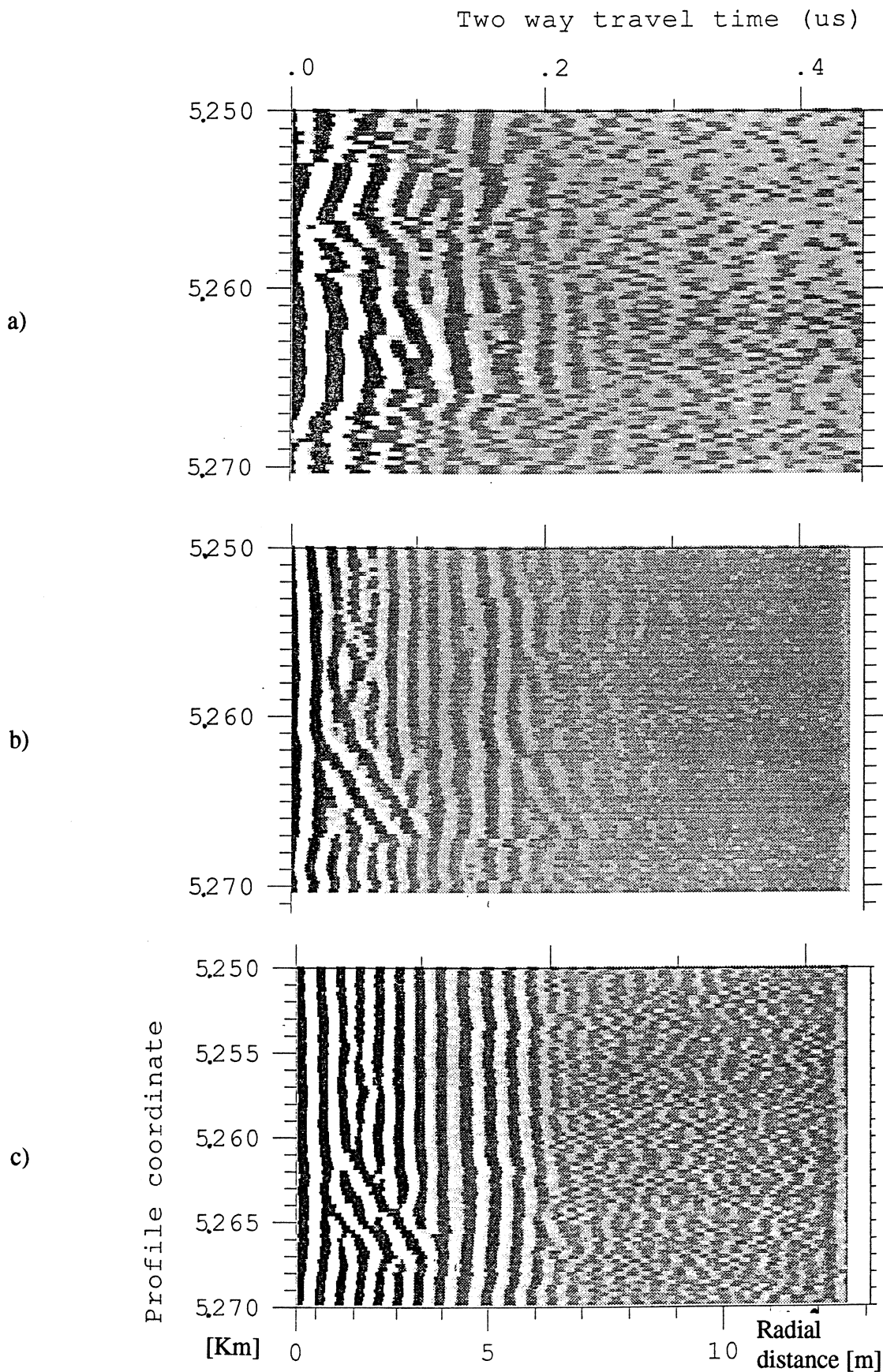


Bild 26 Testmessungen mit Georadar im Umfahrungstunnel Wattwil. Vergleich der Radargramme in der Stollenfirste

- a) Messung REF1, Antennenstellung parallel zur Tunnelachse
 b) und c) Messungen REF2 und REF4, Antennenstellung normal zur Tunnelachse

Die Hauptgründe für die geringe Reichweite sind:

- die siltig/tonigen Schichten der Wechsellagerung (Siltstein, Mergel) mit hoher Dämpfung
- die relativ hohe Frequenz von 60 MHz
- Zwischen der kreisförmigen Tunnelwand und der geradlinigen Antenne besteht ein Luftspalt (Bild 23 und Bild 25). Dies führt zu einer ungenügenden Kopplung der Antennen mit dem Fels und ergibt eine zusätzliche Dämpfung von rund 10 dB.
- Diese ungenügende Kopplung von Antenne und Gebirge, aber auch die fehlende Abschirmung der Antennen, führt zu Radarwellen, welche direkt durch die Luft verlaufen. Diese werden durch die gegenüberliegende Stollenwand reflektiert und somit den Messresultaten überlagert. Ganz allgemein sind die Radargramme mit Rauschen überdeckt.

Die Einfachheit des Auswerteverfahrens und die On-Line Verfügbarkeit der Daten war beeindruckend. Parallel zur Aufnahme der Messwerte wird On-Line das Radargramm ergänzt und auf dem Bildschirm dargestellt. Das aktuelle Radargramm ist ständig in aktualisierter Form sichtbar. Jede neu gemessene Zeile kann unmittelbar nach der Datenübertragung gemeinsam mit dem zuvor erfassten Bildmuster betrachtet werden. So ergibt sich bereits während der Messung ein Überblick über die im umgebenden Gebirge gemessenen Reflexionen.

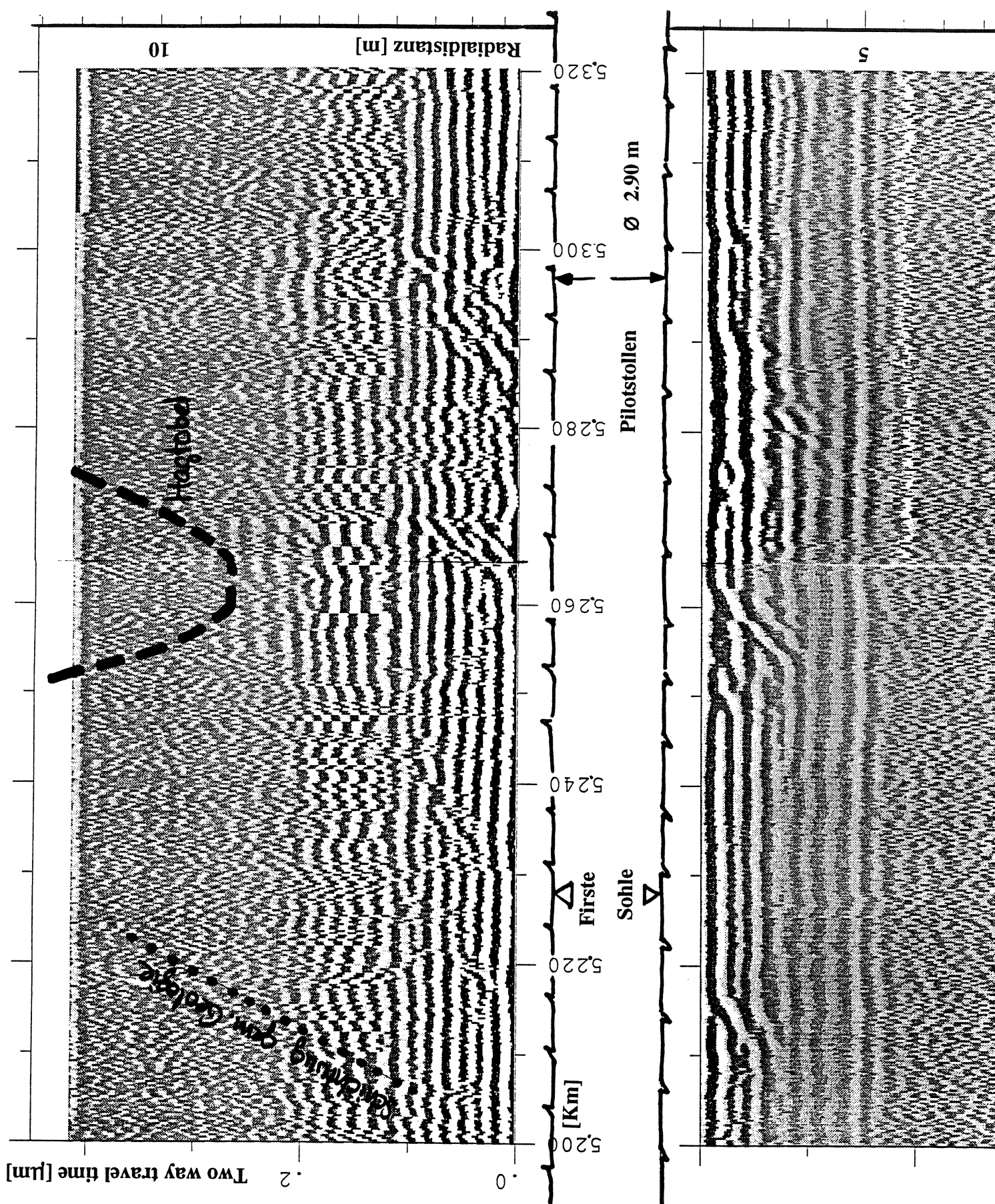


Bild 27 Testmessungen mit Georadar im Umfahrungstunnel Wattwil. Radargramme REF3 und REF5 mit Bandpassfilter. Vertilalschnitt durch den Pilotstollen mit der Lage der nicht erkannten Talsohle des Hagobels, ca. 8 m oberhalb der Stollenfirste

6. Modellversuche

Nach der Sichtung der Resultate der In-Situ Testmessungen im Umfahrungstunnel von Leissigen und Wattwil hatte der Forschungsausschuss der FGU das weitere Vorgehen zu beschliessen. Dabei stand der Leitgedanke im Vordergrund, die hohen Entwicklungskosten bis zur Fertigstellung eines Funktionsmusters und die damit verbundenen Forschungsrisiken durch ein schrittweises Vorgehen zu minimieren.

In diesem Sinne regte der Experte Dr. Caspers die Durchführung von elektromagnetischen Modellversuchen an. Derartige Modellversuche sind in der Elektrotechnik ein gängiges Hilfsmittel, da Feldmessungen an einem Modell bei der Einhaltung der Transformationsregeln exakt durchführbar sind. Alle am Modell gemessenen Grössen wie Eingangsimpedanz, Verkopplung, Strahlungsdiagramm usw. sind exakt gleich denen der originalen Anordnung. Es waren daher vor allem ökonomische Gründe, welche dazu führten, weitere Abklärungen nicht im Massstab 1:1, sondern an Modellen mit einem Verkleinerungsfaktor von 1:50 durchzuführen.

Der Auftrag zur Durchführung von Modellversuchen ging am 17. Mai 1991 an das Institut für Hochfrequenztechnik der Fakultät für Elektrotechnik der Ruhr-Universität Bochum. Die Forschungsschwerpunkte dieses Institutes liegen u.a. bei der Antennen- und Wellenausbreitung (Strahlungsverhalten von Antennen in geschichteten Strukturen), in der Medizintechnik (Computertomographie) und bei industriellen Prüfverfahren und Automation (Akustische und elektromagnetische Sensoren zur Detektion und Identifizierung von Objekten für die industrielle Automation). Zudem waren die Messapparaturen zur Durchführung derartiger Modellversuche (Radarverfahren mit synthetischen Pulsen) sowie die notwendige Infrastruktur (u.a. ein reflexionsarmer Antennenmessraum) vorhanden.

Als Projektleiter zur Durchführung dieser Modellversuche konnte Prof. Dr. V. Hansen gewonnen werden. Sein Angebot umfasste drei verschiedene Modellversionen, welche sich kostenmässig unterschieden. In Auftrag gegeben wurde die mittlere Version 2 mit dem Hinweis, die Modellversuche derart aufzubauen, dass eine Erweiterung jederzeit möglich war.

6.1 Ziel der Modellversuche und Untersuchungsprogramm

Ziel dieser Modellversuche war die Entwicklung eines Abbildungssystems für Tunnelvortriebe, mit dem man frühzeitig geologische Störzonen vor der Ortsbrust detektieren kann. In die Sprache des Feldtheoretikers übersetzt bedeutet dies, "zu zeigen, dass in der im Zeitbereich dargestellten Verkopplung die Information über den Ort einer Inhomogenität im freien wie im verlustbehafteten Raum enthalten ist".

Wie vorangehend gezeigt weist die Anwendung von Georadar zur Vorfeldprognose im Tunnelbau vor allem beim Einsatz in Tunnelbohrmaschinen gegenüber der seismischen Methode bedeutende Vorteile auf, insbesondere aus dem Blickwinkel der vollständigen Automatisierbarkeit des Georadar-Messverfahrens. Die Modellversuche wurden daher vor allem in Richtung Integration von Georadar in eine TBM mit einer entsprechenden Simulation der integrierten Antennen ausgelegt.

Die Modellversuche waren in die folgenden Bearbeitungsphasen aufgeteilt:

- Analyse zur Festlegung des Skalierungsfaktors
- Grobe quantitative Abschätzung der Reflexionsanteile
- Ermittlung der wesentlichen Eigenschaften der Antennen, Antennenentwicklung
- Verbesserung der Abstrahlung der elektrisch kurzen Antennen zur Verbesserung der Auflösung
- Einbettung des Modelles in Sand, Messung der Eingangsimpedanz und der Verkopplung
- Variation und messtechnische Lokalisierung der Inhomogenitäten

Eine Zusammenfassung der Ergebnisse dieser äusserst wertvollen Untersuchung [24] ist im Anhang dieses Berichtes zu finden.

7. Ausblick: Integration von Georadar in eine TBM

Im Abschnitt 2.3 dieses Berichtes wurden die Randbedingungen, die Einsatzmöglichkeiten sowie die verschiedenen Abhängigkeiten einer Vorfeldprognose ausführlich dargestellt. Es zeigte sich, dass eine vom Vortrieb ausgehende Vorauserkundung primär bei Tunnelbauwerken mit grösserer Überlagerung bzw. bei stark wechselhaften geologischen und hydrologischen Verhältnissen wünschenswert ist. Bei maschinellen Tunnelvortrieben sind hohe Vortriebsleistungen nur zu erreichen, wenn schlechte Gebirgsbereiche zum Voraus bekannt sind, d.h. wenn genaue Kenntnisse über die Gebirgsverhältnisse vor Ort vorhanden sind. Die Konsequenzen eines Verbruches in einem laufenden TBM-Vortrieb können gravierend sein. Eine mit dem Vortrieb laufende, dauernd aktualisierte und ständig verfügbare Vorfeldprognose ist insbesondere bei TBM-Vortrieben sehr wertvoll. Der folgende Ausblick beschränkt sich daher auf die Realisierungsmöglichkeit eines in einer TBM integrierten, vollautomatisierten Messsystems, welches nach dem heutigen Stand der Technik nur mittels Georadar erreicht werden kann.

7.1 Entwurf eines Abbildungsverfahrens

Der Entwurf eines geeigneten Abbildungsverfahrens kann gemäss Prof. Dr. Hansen [24] wie folgt angegangen werden:

"Die bisher angewendete Auswertung der Meßwerte nutzt in der Regel nur die Laufzeitunterschiede verschiedener Reflexionen aus. Es handelt sich folglich um Radarmessungen und noch nicht um ein Abbildungsverfahren. Nachfolgend soll kurz dargestellt werden, wie ein Abbildungsverfahren aufgebaut werden könnte.

Aufgrund des komplexen Aufbaus einer Tunnelbohrmaschine kann sicherlich nur eine kleine Anzahl von Antennen auf deren Umfang angebracht werden (Bild 28). Um ein Maximum an Informationen zu erhalten, könnte man zunächst Antenne 1 als Sendeantenne, Antenne 2 bis Antenne n als Empfangsantennen betreiben, im nächsten Schritt Antenne 2 als Sendeantenne und die Antenne 1 und Antennen 3 bis n als Empfangsantennen, u.s.w.. Diese Prozedur ist für die Positionen $z_0 \dots z_0 + m \cdot \Delta z$ durchzuführen. Bei dieser Vorgehensweise handelt es sich also um die Verknüpfung einer multistatischen Datenaufnahme einer Kreisgruppe mit einer synthetischen Apertur. Mit Hilfe eines zu entwerfenden Abbildungsalgorithmusses sind die Daten auszuwerten.

Ganz offensichtlich bieten dabei die auf dem Umfang der TBM montierten Antennen einen deutlichen Vorteil gegenüber z.B. einer Dipolantenne im sonst freien Tunnel. Die Abschirmung der einzelnen Strahler durch den großen Körper der TBM sorgt für eine - wenn auch geringe - Bündelung in Richtung der Flächennormalen. Bereits anschaulich ergibt sich dadurch die Möglichkeit einer Winkelauflösung auch in der Querschnittsfläche senkrecht zur Tunnelachse.

Ein weiterer Vorteil der hier untersuchten Anordnung ist, daß sich die Antennen unmittelbar vor der Tunnelwand befinden. Reflexionen an der nur wenige cm von den Antennen entfernten Tunnelwand sind örtlich und damit zeitlich kaum von den Reflexionen am Übergang 50- Ω Speisekabel - Antenne getrennt, sie können damit der Wirkung der Eingangsimpedanz der Antenne zugeordnet werden. Stellt man jedoch eine Dipolantenne in den sonst freien Tunnel, dann erfolgt neben der Reflexion an dem Eingang

der Antenne etwa 5 m oder 33 ns später eine sehr starke Reflexion an der Tunnelwand. Diese ist für die Detektion weiterer Reflexionen sehr störend".

7.2 Konzept zur Integration der Georadar-Messeinrichtung in einer Tunnelbohrmaschine sowie zur Durchführung der Messungen

Um eine kontinuierliche Messung während dem Vortrieb zu ermöglichen ist der feste Einbau der Antennen in die TBM erforderlich. Zudem ist eine permanente Verkabelung sowie die Unterbringung der Datenerfassung, der Datenauswertung und die Präsentation der Resultate auf einem Bildschirm im Steuerstand der TBM erwünscht. Das im Abschnitt 7.2 dargestellte Messkonzept ist als Entwurf aufzufassen. Viele Detailfragen konnten im Rahmen dieser Arbeit nicht behandelt werden und bedürfen noch einer detaillierten Analyse bzw. weiterer Untersuchungen.

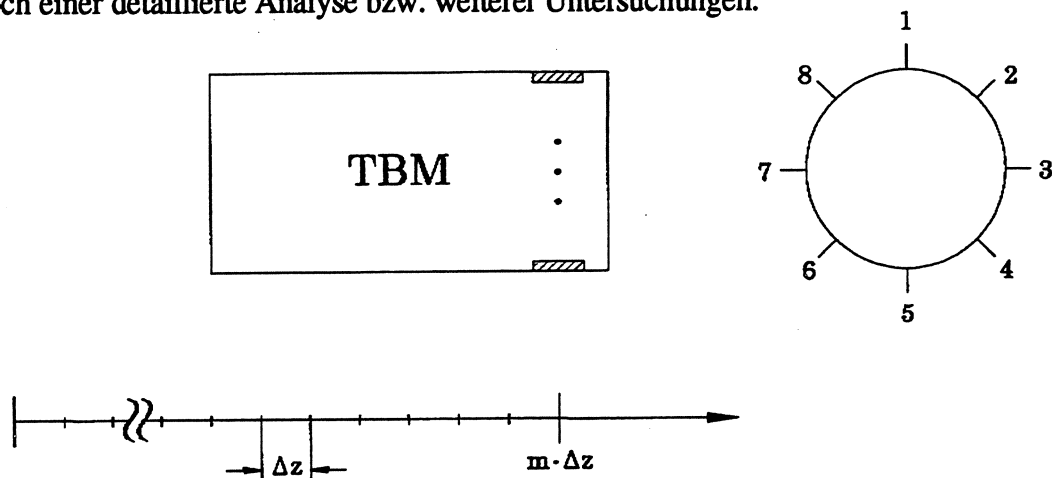


Bild 28 Darstellung des Konzeptes für ein Abbildungsverfahren mit 8 Antennen, welche auf dem Umfang der TBM verteilt sind

7.2.1 Die Anordnung der Antennen im Bohrkopf einer TBM

Der Einbau bzw. die Unterbringung der Antennen im drehenden Bohrkopf einer Tunnelbohrmaschine ist nicht einfach realisierbar. Die Integration einer Georadar-Messeinrichtung in eine TBM wurde allerdings in Japan bereits realisiert. Das Ziel dieser Entwicklung war primär die Messung der bei einem Schildvortrieb entstehenden Überprofile [12]. Die Antenne wurde dazu fest in den Bohrkopf eingebaut (Bild 29), um damit auch während der Rotation des Bohrkopfes kontinuierlich messen zu können. Die Messwerte werden über einen Kollektor ins Innere der Maschine zu einem Datenerfassungsgerät bzw. zum Computer übertragen. Laut [12] liegen von diesem System bereits praktische Erfahrungen von mehreren Tunnelbaustellen vor.

Die in der Regel sehr dichte Belegung des Bohrkopfes mit Abbauwerkzeugen (Bild 30) lässt kaum Platz für den Antenneneinbau. Der durch die Drehung des Bohrkopfes verursachte Verschleiss würde zudem einen äusserst robusten Schutz der Antennen erfordern, insbesondere dann, wenn die Antennen zwischen den Abbauwerkzeugen angeordnet werden und gegen die Ortsbrust gerichtet sind. Etwas einfacher ist der seitliche Einbau der Antennen im drehenden Bohrkopf gemäss Bild 29 oben, aber auch

in diesem Falle ist der Verschleiss der Antennenabdeckung ein ernsthaftes Problem, insbesondere bei Hartgesteinsmaschinen. In beiden Fällen müssen die Kabelverbindungen vom drehenden Bohrkopf über einen Kollektor in den Nachläuferbereich geführt werden.

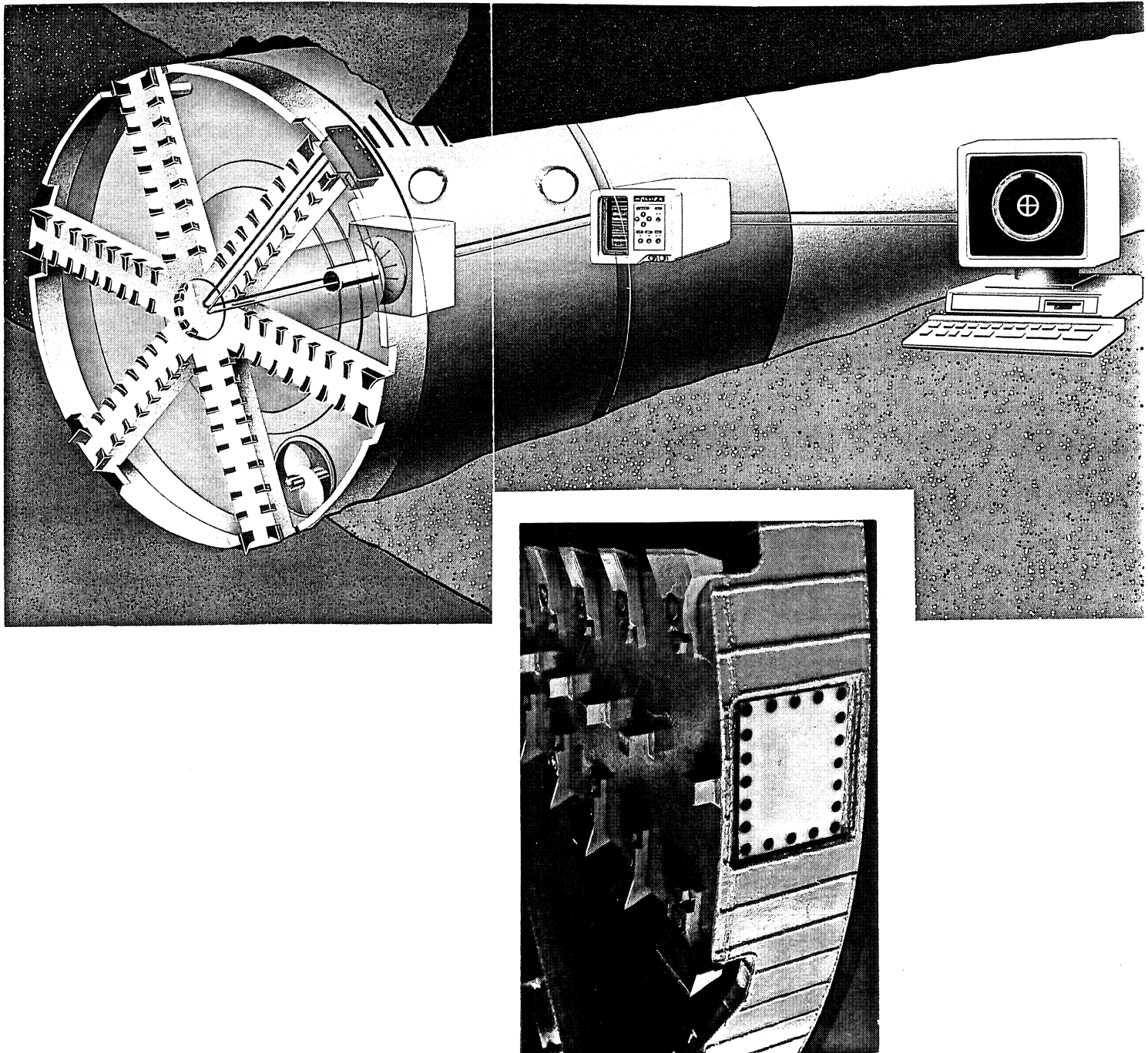


Bild 29 Beispiel einer bereits ausgeführten Integration einer Georadar-Messapparatur in den Bohrkopf einer Tunnelbohrmaschine. Antenne im drehenden Bohrkopf [Firmenprospekt von Mitsubishi].

7.2.2 Einbau der Antennen im Schildbereich

Die Modellversuche haben gezeigt, dass die Anordnung der Antennen auf dem Umfang einer TBM als Grundlage für ein Abbildungsverfahren sehr geeignet ist [24]. Dies bedeutet, dass es nicht erforderlich

ist, die Antennen gegen die Ortsbrust zu richten. Der Einbau in den nicht drehenden Teil einer TBM entlang des Umfanges reicht aus. Es ist jedoch ratsam, den Antenneneinbau möglichst nahe der Ortsbrust vorzunehmen. Die Antennenabmessungen sind im Verhältnis zur Wellenlänge klein zu wählen.

Der seitliche Einbau der Antennen am Umfang einer Tunnelbohrmaschine weist diverse Vorteile auf. Der Schutz der Antennen ist bedeutend einfacher realisierbar. Da der Schild nicht gedreht, sondern dem Bohrkopf nachgezogen wird, ist diese Antennenlage einem bedeutend geringeren Verschleiss ausgesetzt. Der robuste Einbau der Antennen in den Schild oder den Kopfschutz kombiniert mit einer widerstandsfähigen Abdeckung ist bei vielen Tunnelbohrmaschinen möglich. Die Bilder 30 und 31 zeigen zwei Konzepte zur Anordnung der Antennen.

Im ersten Fall (Bild 30) handelt es sich um ein Baukonzept von Robbins für eine Tunnelbohrmaschine grossen Durchmessers für Vortriebe mit grosser Überlagerung [30], also für Verhältnisse, wie wir sie bei den geplanten Alpentransversalen antreffen werden (Gotthard-, Lötschberg- und Brennertunnel). Die Antennen könnten hier möglicherweise, wie in Bild 30 dargestellt, in die Stützplatten eingebaut werden. Beim zweiten Beispiel handelt es sich um eine JARVA 27 Tunnelbohrmaschine, bei der aller Voraussicht nach der Kopfschutzschild und allenfalls der Bereich des Sohlräumers für den Antenneneinbau genutzt werden könnte (Bild 31). Mit Maschinenherstellern wurden im Rahmen dieses Projektes keine Lösungen für den Antenneneinbau erarbeitet.

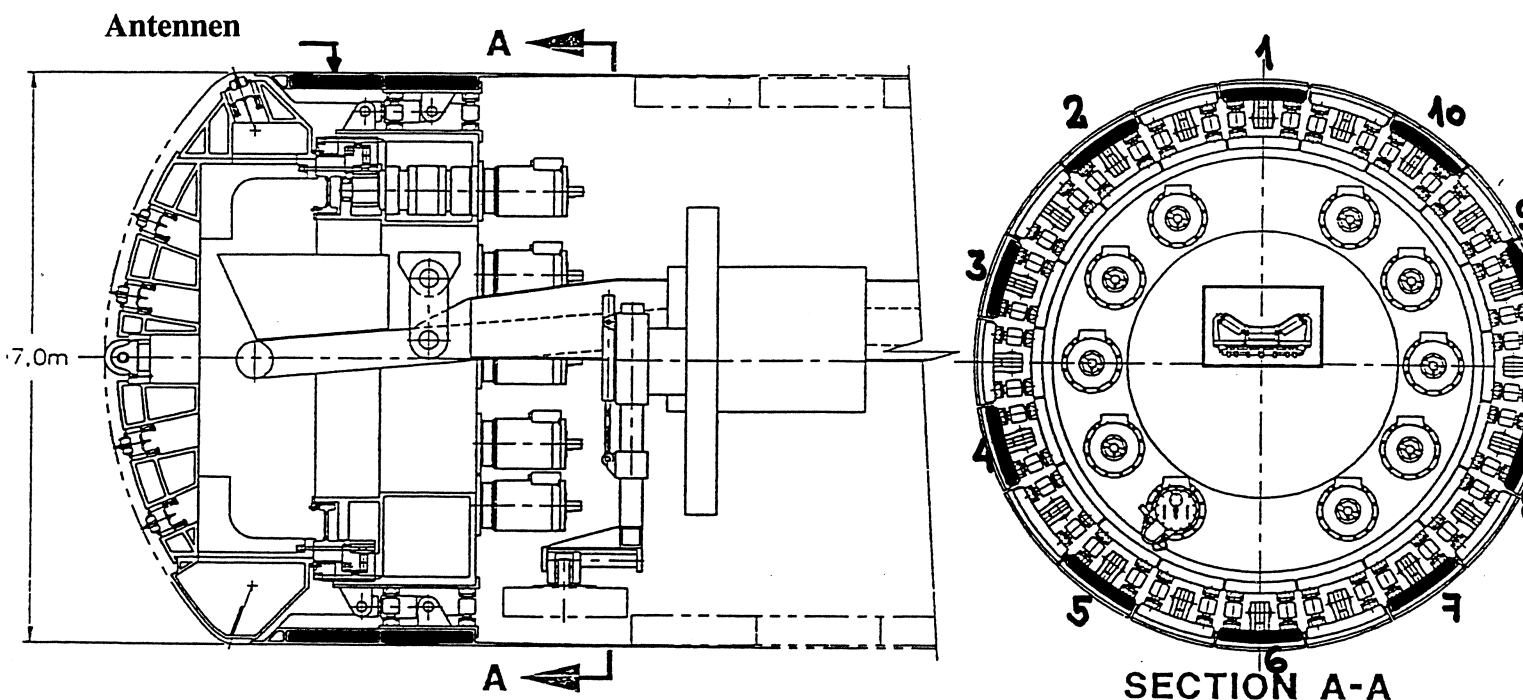


Bild 30 Konzept für eine Tunnelbohrmaschine für Vortriebe unter grosser Überlagerung [30] mit einer möglichen Anordnung der Georadarantennen (1 - 10)

Der Einbau von Antennen in Tunnelbohrmaschinen mit Schild (mit nachfolgendem Tübbingebau à la Bözbergtunnel) wäre im Schildmantel relativ einfach realisierbar.

7.2.3 Ankopplung der Antennen an das Gebirge

Die Ankopplung der Antennen an das Gebirge ist, trotz den beim Übergang der Radarwelle von der Antenne in das Gebirge auftretenden Reflexionen (dünne Luftschicht), relativ einfach zu beherrschen. Der Einbau der Antennen im Schildmantel würde zudem den Vorteil bieten, dass der Luftspalt zwischen Antenne und Gebirge nahezu konstant bleibt.

Die Abschirmung der Antennen durch den grossen Stahlkörper der TBM sowohl im Falle eines Schildes wie auch beim Kopfschutzschild oder bei Stützplatten würde eine deutlich verbesserte Bündelung der Radarwellen gegenüber den in Leissigen und Wattwil verwendeten Dipolantennen im freien Tunnel ergeben. Durch den klar definierten und abgeschirmten Abstrahlbereich der Antennen in Richtung Gebirge wird die bei der Messung in das Gebirge eingeleitete Energiemenge deutlich steigen, da ein direktes Übersprechen durch die Luft praktisch ausgeschlossen ist. Energieverluste infolge von Mehrfachreflexionen an den Tunnelwänden, wie sie anlässlich der Probemessungen in Leissigen und Wattwil beobachtet werden konnten, werden stark eingeschränkt.

7.2.4 Erfassung von Radarprofilen bei einem TBM-Vortrieb

Für einen bestimmten Vortriebsstand der TBM könnte jede am Umfang der TBM eingebaute Antenne einmal als Sendeantenne betrieben werden, die übrigen Antennen arbeiten gleichzeitig als Empfangsantennen (siehe Abschnitt 7.1). Beim Einsatz von beispielsweise 10 Antennen erhält man nach diesem Konzept ein ebenes Tomogramm der Radarreflexionen für eine bestimmte Position der TBM und damit der Sendeantenne bzw. der 9 Empfangsantennen, welche in einem unterschiedlichen Abstand zur Sendeantenne eingebaut sind. Es ergeben sich damit 10 redundante Radargramme zur Aufarbeitung eines einzigen, für den Tunnelquerschnitt geltenden Radargrammes.

Mit der regelmässigen Wiederholung derselben Messprozedur für Vortriebsschritte der TBM von z.B. 10 cm erhält man eine "räumliche" Abbildung. Dazu wäre jedoch eine automatisierte Messprozedur zur Steuerung des Messvorganges und zur Datenerfassung erforderlich. Die Datenerfassung, die Auswertung der Rohdaten und die graphische Darstellung der Messresultate könnte im Steuerstand der TBM vorgenommen werden können.

7.3 Vorschlag zur Weiterführung des Forschungsprojektes

Der nachfolgende Vorschlag zur Weiterführung des Forschungsprojektes datiert vom 31. Januar 1992. Er wurde von Prof. Hansen in Zusammenarbeit mit dem Experten Dr. Caspers und dem Koordinator dieses Forschungsprojektes, d.h. dem Verfasser dieses Berichtes, erarbeitet.

7.3.1 Mögliches Konzept eines zukünftigen Forschungsprojektes

Auf der TBM werden die Antennen unmittelbar hinter dem Bohrkopf in den Schild bzw. den Kopfschutz eingebaut. (4 bis 10 Antennen, die endgültige Festlegung erfolgt anhand von Überlegungen hinsichtlich des Abbildungsverfahrens, aber auch hinsichtlich mechanischer

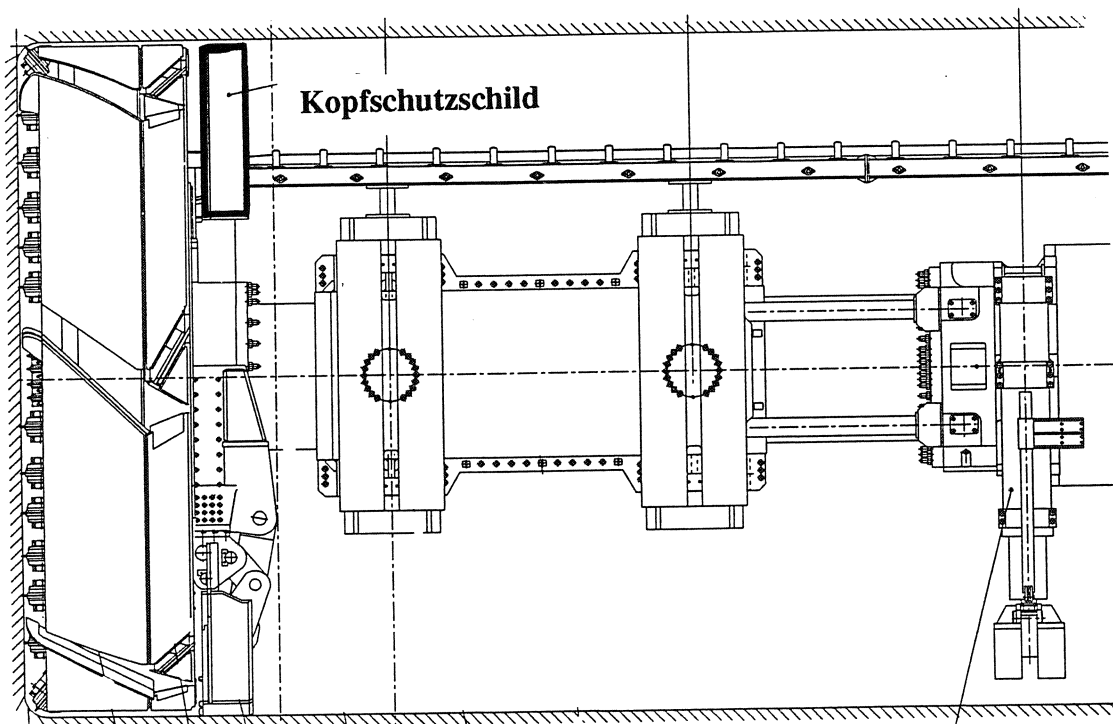
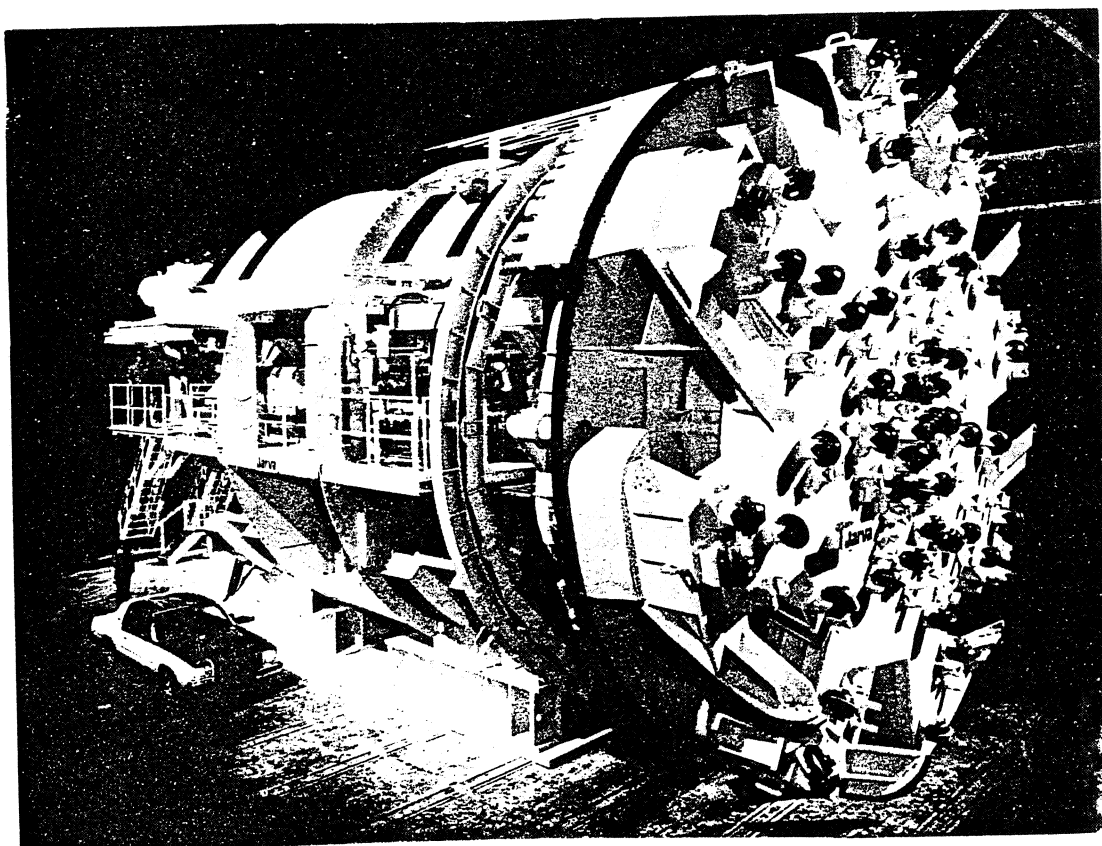


Bild 31 Konzept zur Anordnung der Georadarantennen im Schild- oder Schutzschildbereich
(oben Atlas Copco MK 30-3203 mit Durchmesser 9.83 und Schutzschild,
unten Jarva 27, Durchmesser 9.0 m, mit Kopfschutzschild)

und konstruktiver Gesichtspunkte) (Bild 28). Jede der Antennen wird einmal als Sendeantenne betrieben, die übrigen Antennen arbeiten dann als Empfangsantennen.

Die Empfangssignale werden im Frequenzbereich mit Hilfe eines Netzwerkanalysators gemessen und mit signaltheoretischen Methoden aufbereitet. Ziel dieser Auswertung ist eine sogenannte Bildrekonstruktion, d.h. die Darstellung der Materialverteilung vor der Tunnelbrust. Insbesondere geht es darum, die in den Bildern 32 und 33 beispielhaft dargestellten Gesteinskonfigurationen zu detektieren.

Da intensive und damit zeitaufwendige experimentelle Untersuchungen erforderlich sind, werden diese zunächst als Modellversuche gemäss dem folgenden Arbeitsplan durchgeführt.

7.3.2 Antennen

Die TBM stellt einen geometrisch kompliziert aufgebauten metallischen Körper in verlustbehafteter Umgebung dar. Das Strahlungsverhalten von Antennen auf solchen Körpern kann man mit Hilfe numerischer Verfahren analysieren. Damit soll vor allem der Einfluß der Position der Antenne auf das Richtdiagramm untersucht werden.

Es wurden bisher, sowohl elektrische als magnetische Dipole experimentell untersucht, wobei die Vielzahl der möglichen Parameter eine erschöpfende Aussage nicht ermöglicht. Es soll deshalb ergänzend mit einer kurzen theoretischen Untersuchung geklärt werden, ob einer der beiden Typen prinzipielle Vorteile besitzt.

Ergänzende Untersuchungen zu Schlitzantennen als eine weitere Realisierungsmöglichkeit für einen magnetischen Dipol auf einer leitenden Fläche (Integration der Antenne in den Schild) müssen durchgeführt werden.

Mit Hilfe der bisher ausgeführten Untersuchungen sind die Antennen zu dimensionieren; die Antennen sind aufzubauen und zu vermessen.

Beim Einsatz der Antenne auf einer TBM müssen die Antennen gegen Beschädigung geschützt werden. Der Einfluß einer dielektrischen Abdeckung ist zu untersuchen. Weiter sind die Einflüsse von Schmutz, Schlamm usw. experimentell zu ermitteln.

7.3.3 Modellbetrachtungen

Ausgangspunkt für die Modellbetrachtungen ist die Festlegung des Einsatzbereiches für die TBM in Absprache mit dem Auftraggeber. Anhand dieser Angaben werden mindestens drei Materialklassen festgelegt:

- A: im vorgegebenen Einsatzbereich typisch auftretendes Gestein
- B: Gestein deutlich geringerer Dämpfung
- C: Gestein deutlich höherer Dämpfung

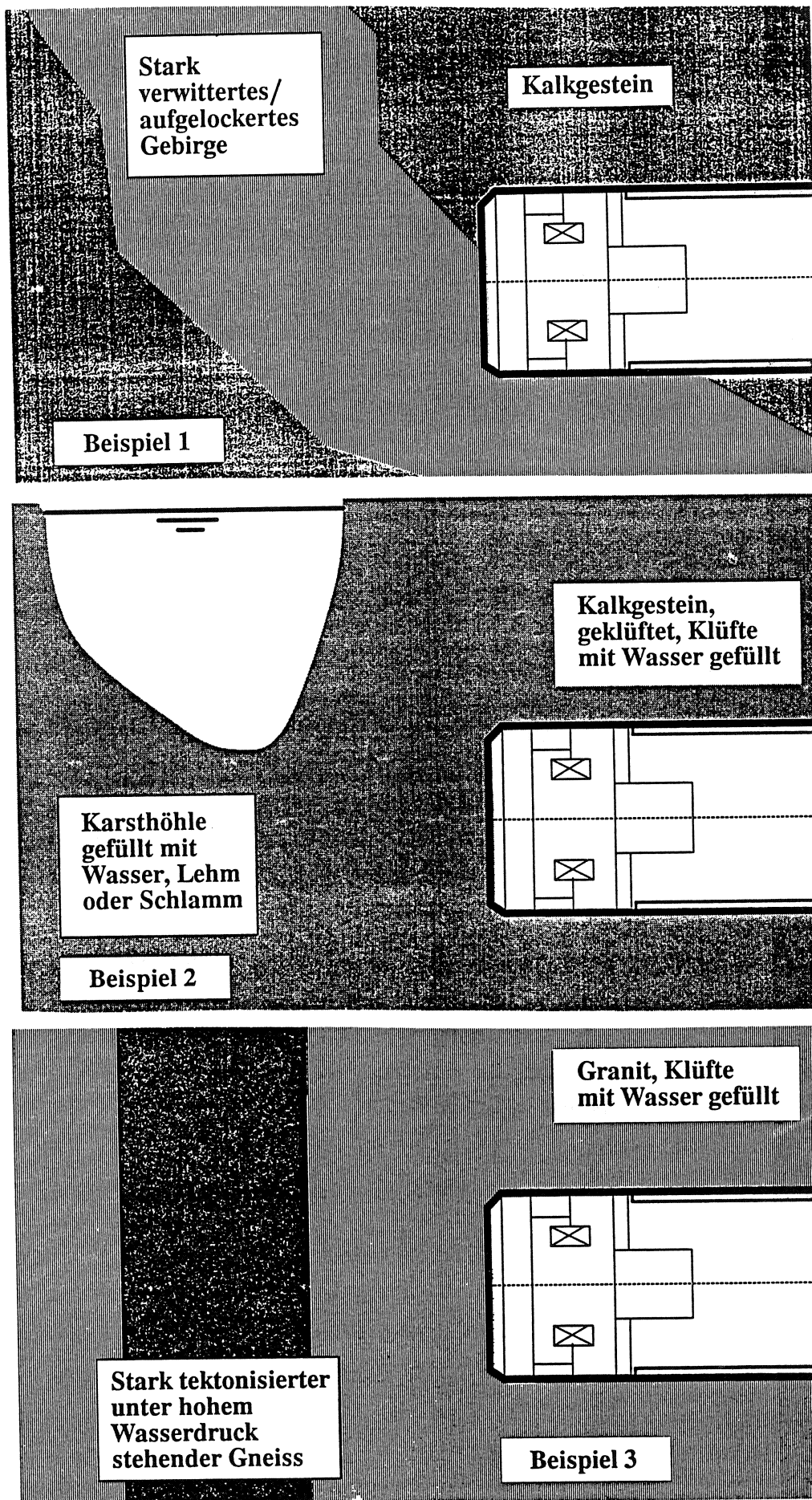


Bild 32 Praktische Beispiele von Gesteinskonfigurationen beim TBM-Vortrieb als Basis zur Weiterführung des Forschungsprojektes

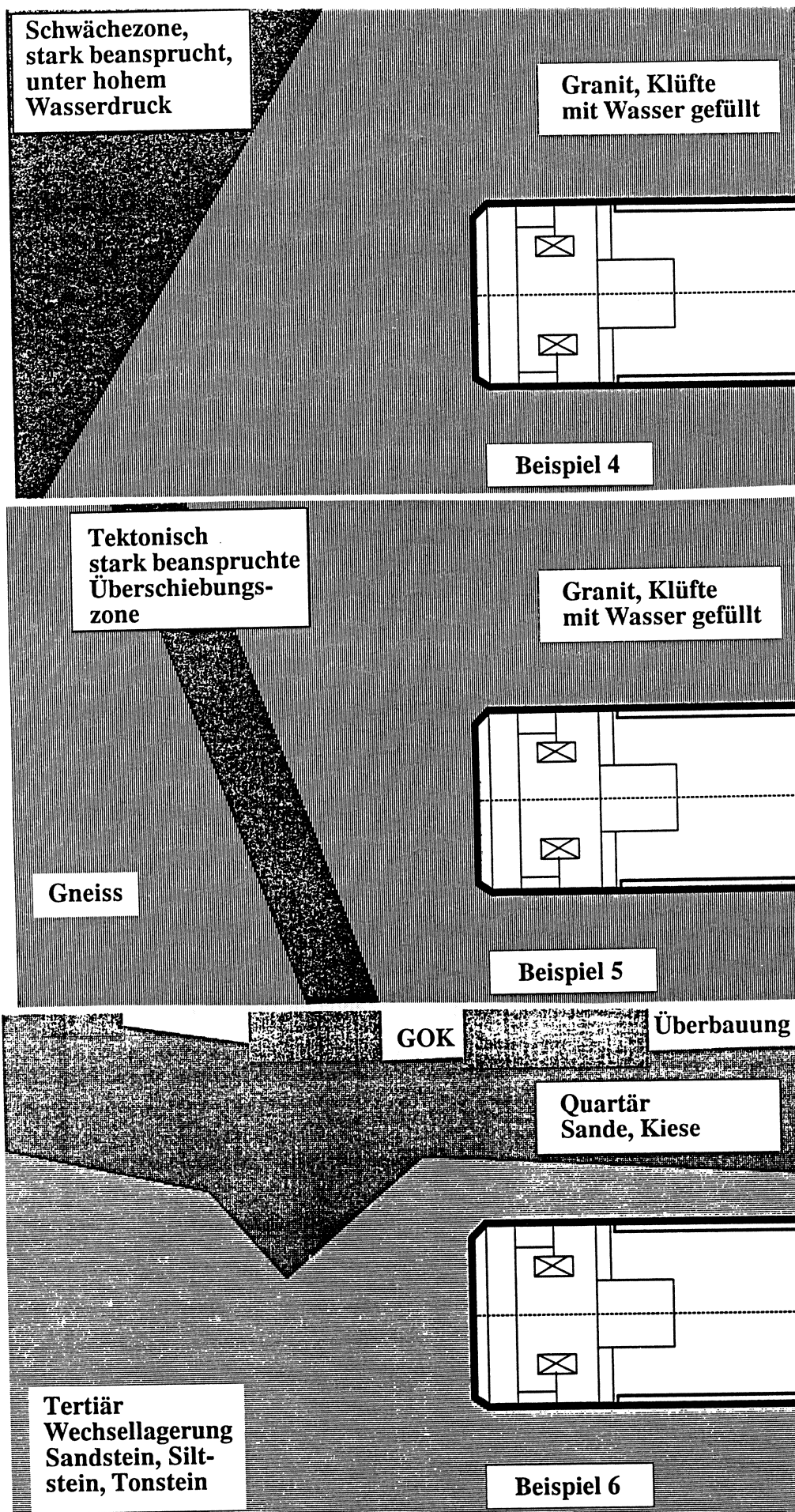


Bild 33 Weitere praktische Beispiele von Gesteinskonfigurationen beim TBM-Vortrieb als Basis zur Weiterführung des Forschungsprojektes

Für diese Standardmaterialien werden Modellmaterialien entwickelt. Da nach den Vorüberlegungen eine lineare Skalierung angebracht ist, bedeutet das, daß die Leitfähigkeit um den Modellfaktor verringert werden muß.

Im Modell sind typische Gesteinskonfigurationen aufzubauen (Bild 32 und 33). Eine sorgfältige Modellierung ist eine sehr wichtige Voraussetzung für die Aussagekraft der Messungen. Die Modellierungen sind in enger Absprache mit dem Auftraggeber durchzuführen.

7.3.4 Aufbau des Meßsystems

Grundlage des Meßsystems ist der Netzwerkanalysator HP 87-53 (0,3 MHz - 6 GHz). Das Messsystem ist aufzubauen und hinsichtlich der verschiedenen elektronischen Komponenten zu optimieren. Das Meßsystem soll dabei so konzipiert werden, daß keine wesentlichen Änderungen beim Einsatz auf einer TBM im Originalfrequenzbereich notwendig sind (z.B Steuerung des Meßvorgangs durch einen Rechner, Ablage, Aufbereitung und graphische Darstellung der Messdaten bzw. der Messergebnisse).

7.3.5 Signaltheorie

Es ist ein einfacher Algorithmus zur Bilderzeugung für ein zylindrisches Array zu entwerfen.

Mit Hilfe synthetisch erzeugter Meßdaten sind Untersuchungen zur Auflösung in Abhängigkeit von Anzahl und Lage der Antennen, zur Empfindlichkeit gegenüber möglichen Einflußgrößen (Vibration und Vorwärtsbewegung bei der Meßaufnahme, Meßfehler bei nicht ausreichender Dynamik, Vielfachreflexionen) durchzuführen.

Es ist ein Programm zur Bildrekonstruktion aus den Meßdaten zu erstellen.

Es sind ferner Untersuchungen durchzuführen, wie weit in der Signaltheorie vorgegebene Verfahren zur Erhöhung der Dynamik und der Aussagefähigkeit der Bilder herangezogen werden können.

7.3.6 Zielsetzung

Ziel der Arbeiten ist es, anhand eines sorgfältig aufgebauten Modells die Arbeitsweise des Tunnelradars möglichst wirklichkeitsgetreu untersuchen und optimieren zu können. Dabei sollen alle wichtigen Fragen beantwortet worden, wie

- Reichweite bei mit dem Auftraggeber abgesprochenen Gesteinsinformationen
- Genauigkeit mit der eine Störung detektiert werden kann hinsichtlich des Abstandes, der Winkelposition und der Ausdehnung der Störung
- Anfälligkeit des Verfahrens hinsichtlich betriebsbedingter Störungen wie Vibrationen, Ortsveränderungen während einer Messung, Verschmutzung der Antennen, Beschädigung der Abdeckung
- Einfluß von stark inhomogenen Gesteinsinformationen auf die Signalauswertung

- Geophysikalische Deutbarkeit der angezeigten Störungen, besonders Unterscheidung "harmloser" (z.B. dünner Wasserschichten) von für den Tunnelbau wichtigen Reflektoren

7.3.7 Bau eines Prototyps

Die Kosten für den Bau eines Prototyps müssen in Zusammenarbeit mit einem Hersteller für TBM's ermittelt werden. Die vorgeschlagenen Geräte sind alle so ausgewählt worden, daß sie auch für einen Prototyp im Originalfrequenzbereich verwendet werden können.

ANHANG TEIL 1

Modellmessungen zur Vorauserkundung an der Ortsbrust im Tunnelbau

Prof. Dr. Ing. V. Hansen, Institut für Hochfrequenztechnik, Ruhr Universität Bochum ¹⁾

1. Einleitung: Simulation des Gebirges mit Modellversuchen

Die folgenden Angaben stellen einen Auszug aus dem umfangreichen Schlussbericht dar. Hierbei werden die wesentlichsten Erkenntnisse betreffend der Anwendbarkeit von Georadar zur Vorfeldprognose erwähnt. Formeln und Herleitungen sind im Schlussbericht [24] zu finden.

Ziel des Projektes war es, anhand von Modellversuchen ein Abbildungssystem für Tunnelbohrmaschinen zu entwickeln, mit dem man frühzeitig geologische Störzonen, die in Entfernungen von bis zu 80 m vom Bohrkopf in der Vortriebsrichtung des Tunnels liegen, detektieren kann.

Da elektromagnetische Feldmessungen im Modell exakt durchführbar sind, können die vorhandenen Gegebenheiten unter Einhaltung bestimmter Transformationsregeln genau in Modellparameter umgerechnet werden, die den Ausgangspunkt für die Entwicklung der benötigten Modellantennen und alle weiteren Messungen bilden. Voraussetzung zur Festlegung dieser Modellparameter - als da sind geometrische Abmessungen, Frequenz und die elektromagnetischen Materialeigenschaften Permittivität ϵ , Permeabilität μ und Leitfähigkeit κ - ist jedoch die Kenntnis der entsprechenden realen Größen.

Daher werden in einem ersten Schritt für die zu erwartenden Gesteinsarten die Materialparameter ϵ , μ und κ der Literatur entnommen. Danach wird die Dämpfung der von Inhomogenitäten im Gestein herrührenden reflektierten Wellen für verschiedene Gesteinskombinationen berechnet, welche von Material, Frequenz und Entfernung der Störzone abhängig ist. Da die empfangene Welle einen mit den vorhandenen technischen Möglichkeiten noch meßbaren Pegel aufweisen muß, kann, bei festgelegter Entfernung, eine Obergrenze der Frequenz ermittelt werden, bei der eine maximal zulässige Dämpfung nicht überschritten wird. Über das Auflösungsvermögen, d.h. die minimale detektierbare Schichtdicke einer vorhandenen Inhomogenität bzw. die Genauigkeit, mit der die Lage einer Schichtgrenze geortet werden soll, wird die Untergrenze des Frequenzbandes, in dem gemessen werden kann, bestimmt.

Aus diesen dann bekannten realen Größen lassen sich, je nach Wahl der Skalierungsfaktoren, Modelle mit verschiedenen Modellparametern berechnen. Die endgültige Wahl eines Modells ist davon abhängig, ob die geometrischen Abmessungen und die Messungen in dem transformierten Frequenzbereich technisch machbar sind und es kommerziell verfügbare oder einfach herzustellende Stoffe gibt, deren Materialeigenschaften den transformierten Werten entsprechen.

1) Autorisierte Kurzfassung des Schlussberichtes [24]

2. Theoretische Grundlagen der Fortpflanzung von Radarwellen im Gebirge

2.1 Gesteinsparameter

Die Ausbreitung von elektromagnetischen Wellen in einem Medium ist abhängig von den Materialparametern ϵ_r und μ_r , also relativer Dielektrizitätszahl und relativer Permeabilität, welche das Verhalten der Materie im elektrischen bzw. magnetischen Feld beschreiben, und der elektrischen Leitfähigkeit κ .

Die in elektromagnetischen Wechselfeldern auftretende dauernde Umpolarisierung, bzw. Ummagnetisierung der Stoffe führt aufgrund der Trägheit des atomaren Systems zu einer Frequenzabhängigkeit von ϵ_r und μ_r . Außerdem treten Verluste auf, die man durch einen komplexen Ansatz von ϵ_r und μ_r berücksichtigt, wobei man ϵ_r'' und μ_r'' als Verlustziffer und $\tan \delta_e$ bzw. $\tan \delta_m$ als Verlustfaktor bezeichnet. Die magnetische Verlustziffer resultiert dabei aus Ummagnetisierungsverlusten, während sich ϵ_r'' aus Umpolarisierungs- und ohmschen Verlusten zusammensetzt.

Die Schwierigkeit, die Materialparameter, deren Kenntnis für dieses Projekt nötig ist, herauszufinden, liegt darin, daß

- Gesteine keine homogenen Stoffe aus einem Mineral oder gar Element sind - obwohl von den über 2000 bekannten Mineralien nur wenige (ca. 40) wirklich gesteinsbildend sind, schließen sich diese zu den verschiedensten Anordnungen und Gruppierungen zusammen und bilden somit immer neue Gesteinsarten mit unterschiedlichen Materialparametern
- selbst bei gleicher stofflicher Zusammensetzung diese Eigenschaften stark von der Struktur (z.B. Korngrößen) und Textur der Materie (räumliche Anordnung und Richtung der Gemengteile eines Gesteins), ihrer Wasserhaltigkeit sowie von Temperatur und Druck abhängig sind und
- die Zahl der untersuchten und veröffentlichten Materialwerte relativ gering ist und diese Werte in ihrer Exaktheit nicht so ohne weiteres auf an anderen Orten entnommene Gesteinsproben übertragen werden können, da die oben genannten Rahmenbedingungen regional verschieden sind.

Die wichtigsten Vertreter der in der Erdkruste auftretenden Gesteine sind zum einen die Sedimentgesteine, welche eine dünne Oberflächenbedeckung des aus Eruptivgestein entstandenen Sockels bilden. Zu diesen Sedimenten gehören Sandstein (hauptsächlich Quarzkörner mit verschiedenen Bindemitteln), Tongesteine (Aluminiumsilikat mit eingeschlossenen Quarz-, Feldspat- und Glimmerteilchen), wozu beispielsweise auch Lehm gehört, und Kalkgesteine, aus denen sich z.B. Dolomit und Marmor bilden können. Auch die verschiedenen Kohlearten gehören zu den Sedimenten.

Der Erdsockel selbst besteht aus Erstarrungsgestein, also Tiefengestein wie Granit (eine Mischung aus vorwiegend Feldspat, Quarz und Glimmer), Eruptivgestein, wie beispielsweise Basalt, und metamorphem Gestein, das durch Umwandlung aus den oben genannten Gesteinen entstanden ist und ein kristallines Gefüge und bisweilen schiefrige Textur angenommen hat, wie z.B. die Gneise, ein Gemenge wiederum aus Quarz, Feldspat und Glimmer. Infolge von Gebirgsaufaltungen, Verwitterung und Erosion des Oberflächengesteins sind auch diese Gesteinsarten bis an die Erdoberfläche gelangt.

Um eine Abschätzung über die Größe der zu verwendenden Frequenzen machen zu können, werden nun einige wichtige Vertreter der jeweiligen Gesteinsklassen auf ihre Materialparameter hin untersucht. Da es sich meist um nichtmagnetisches Material mit $\mu_r \approx 1$ handelt, brauchen nur ϵ_r' und ϵ_r'' betrachtet zu werden.

Die relative Permittivität ϵ_r' ist, wie eingangs erwähnt, nicht nur von den Stoffeigenschaften, also chemischer Zusammensetzung, Dichte, Härte, Struktur, Textur und Wassergehalt abhängig, sondern auch von äußeren Einflußgrößen wie Frequenz, Temperatur und Druck.

Die Frequenzabhängigkeit von ϵ_r' kommt aufgrund verschiedener Polarisierungseffekte zustande. Sie hat zur Folge, daß ϵ_r' über die Frequenz abnimmt, besonders stark für hohe Frequenzen. Wie sich zeigt, ist die Abnahme der Frequenz im untersuchten Frequenzband von 1 - 100 MHz jedoch so gering, daß in den meisten Fällen ein einheitlicher Wert angenommen werden kann.

In Temperaturbereichen bis durchschnittlich 200 - 300 °C ist ϵ_r' im allgemeinen konstant, steigt mit weiterer Temperaturerhöhung jedoch stark an (z.B. Quarz: ϵ_r' (200°) = 4,5; ϵ_r' (350°) = 50). Da man im Erdinnern mit einer durchschnittlichen Erhöhung der Temperatur von 1° C pro 33 m rechnet, werden solche Temperaturen, bei denen ϵ_r' sich wesentlich ändert, erst in größerer Tiefe erreicht, sodaß hier immer mit den konstanten Werten bei niedriger Temperatur gerechnet wird.

Bei steigendem Druck wächst ϵ_r' , was sich mit einer Verdichtung des Materials erklären läßt. Bei einem Druck von ungefähr 40 MPa erreicht ϵ_r' einen dann konstant bleibenden Wert, der bei porösem Material, wie z.B. Kalkstein, den doppelten, bei kompaktem, z.B. Granit, den 1,2-fachen Wert von ϵ_r' bei atmosphärischem Druck annimmt. Daß im Gebirge nicht nur der Gewichtsdruck des Gesteins sondern auch ein erhöhter Gebirgsdruck auftreten kann, kann dadurch berücksichtigt werden, daß man für ϵ_r' die jeweils höheren Werte annimmt.

Entscheidenden Anteil an der relativen Permittivität hat jedoch der Wassergehalt der Probe. Wasser selbst hat bis zu Frequenzen von einigen GHz einen konstanten Wert von $\epsilon_r' = 81$, der erst oberhalb von 3 GHz stark mit der Frequenz absinkt. Diese hohe Dielektrizitätskonstante von Wasser bewirkt, daß mit steigendem Wassergehalt der Materie auch deren Permittivität steigt. Besonders in porösem, stark wasserhaltigem Sedimentgestein können die Eigenschaften des Gesteins von den Wassereigenschaften dominiert werden (nasser Sand z.B. erreicht ein ϵ_r' von 30). Aufgrund dieser Tatsache werden für die meisten Gesteinsarten Materialwerte im trockenen und feuchten Zustand aufgelistet.

Insgesamt läßt sich sagen, daß für trockenes Gestein ϵ_r' hauptsächlich zwischen 3 und 12 liegt. Einige Mineralien, wie z.B. Rutil, können einen maximalen Wert von 170 annehmen, sie haben jedoch einen so geringen Anteil an der Zusammensetzung der Erdrinde, daß sie nicht extra berücksichtigt wurden. Mit steigendem Wassergehalt, bei höherem Druck und Temperatur kann ϵ_r' stark ansteigen, während es mit wachsender Frequenz leicht sinkt.

Wie schon erwähnt, setzt sich ϵ_r'' aus zwei Anteilen zusammen. Für Stoffe mit großer Leitfähigkeit überwiegt auf jeden Fall der ohmsche Verlustanteil. Bei kleiner Leitfähigkeit überwiegt bei mittleren Frequenzen der Anteil der dielektrischen über die ohmschen Verluste. Für kleine, bzw. größere Frequenzen, wie hier im MHz-Bereich, sind wiederum hauptsächlich die Leitfähigkeitsverluste ausschlaggebend, so daß im folgenden nur κ betrachtet wird.

κ kann sehr unterschiedliche Werte von 10^6 1/Ωcm bei Metallen über Halbleiter mit Werten von 10^4 bis 10^{-4} 1/Ωcm bis hin zu Isolatoren mit $\kappa \leq 10^{-9}$ 1/Ωcm annehmen. Die gesteinsbildenden Mineralien können jeder dieser Gruppen angehören, so daß es große Unterschiede bei den Verlustziffern gibt

(z.B. Gold 4,5; Graphit 0,01; Quarz 10^{-14}). Auch hier können wieder äußere Einflüsse wie Frequenz, Druck, Temperatur, sowie Wassergehalt und Textur eine große Rolle spielen.

Die wichtigsten gesteinsformenden Minerale, wie Quarz und Feldspat, besitzen fast den gleichen, sehr hohen spezifischen Widerstand, so daß die Sedimentgesteine, die aus ihnen aufgebaut sind, im allgemeinen die gleiche schlechte Leitfähigkeit besitzen wie die entsprechenden Erstarrungs- oder metamorphen Gesteine (Gneis, Quarzit, Basalt). Aber schon kleine Einschlüsse von leitenden Erzen (z.B. Magnetit) in Basalt können die Leitfähigkeit drastisch erhöhen, so daß Unterschiede von mehreren Zehnerpotenzen bei Proben aus verschiedenen Gegenden keine Seltenheit sind.

Auch der Wassergehalt spielt, besonders bei den Sedimentgesteinen, eine entscheidende Rolle. Da Wasser einen um etliche Größenordnungen kleineren spezifischen Widerstand hat als die meisten dielektrischen Mineralien, erhöht es die Leitfähigkeit wasserhaltigen Gesteins entscheidend. Dieser Effekt wird verstärkt dadurch, daß das vorkommende Wasser salzhaltig ist, wodurch sich der Widerstand aufgrund der Ionenleitfähigkeit im Gegensatz zu reinem Wasser stark erniedrigt. Auch das Temperatur- und Frequenzverhalten dieser Gesteine wird vom Verhalten des Wassers geprägt. So steigt die Leitfähigkeit des Wassers mit steigender Frequenz, was meist mit wachsenden Verlusten verbunden ist.

Bei den meisten Gesteinen weist der Verlustfaktor eine Frequenzabhängigkeit mit einem Maximum im Bereich von 10^5 - 10^6 Hz auf. Im betrachteten Frequenzband von 1 - 100 MHz sinkt der Verlustfaktor wieder. Was die Temperatur anbetrifft, so ist $\tan \delta_e$ ungefähr konstant bis zu einer Temperatur von 200 - 300 °C und steigt dann an. Steigender Druck bewirkt bei Gesteinen wie Sandstein, Basalt und Diabas ein Abnehmen des spezifischen Widerstandes und somit ein Ansteigen der Verluste. Dieser Anstieg ist jedoch so geringfügig, daß er hier nicht weiter berücksichtigt wird. Auch die Struktur (unterschiedliche Korngrößen) und die Beschaffenheit des Gesteins spielen eine Rolle. So können beispielsweise Risse im Gestein die Leitfähigkeit erheblich herabsetzen.

Da die auftretenden Inhomogenitäten, die detektiert werden sollen, auch Wassereinschlüsse mit möglicherweise salzhaltigem Wasser sein können, werden auch sie in den Tabellen aufgeführt. ϵ_r' nimmt gegenüber reinem Wasser ab, während die Leitfähigkeit mit steigendem Salzgehalt zunimmt.

Völlig außer acht gelassen wird allerdings die Tatsache, daß viele Mineralien und Gesteine ein anisotropes Verhalten aufweisen, die Eigenschaften dieser Stoffe von der Ausbreitungsrichtung der Welle im Gestein abhängt. Zu diesen Gesteinen zählen Granit, Gneis, Quarz, Marmor, die eigentlich durch einen ϵ_r -Tensor beschrieben werden müßten. Auch Stoffe mit magnetischen Eigenschaften wie Erze oder die ferromagnetischen Elemente Eisen, Nickel und Kobalt, die ein großes μ_r besitzen und zudem ein aufgrund ihrer Magnetisierungskennlinie nichtlineares Verhalten aufweisen, wurden nicht berücksichtigt.

Die in den Spalten 2 und 3 der Tabelle 3 aufgelisteten Werte sind der Literatur entnommen worden. Diese tabellierten Parameter können jedoch nur als grobe Abschätzungen für die tatsächlich vorhandenen Werte angesehen werden, da zum einen Proben aus unterschiedlichen Gegenden gravierende Unterschiede in ihrer Zusammensetzung und damit auch in ihren Materialparametern haben können. Zum anderen sind bei den gemessenen Werten nicht immer alle Einflußgrößen bekannt, bzw. explizite Messungen von ϵ_r' und ϵ_r'' in Abhängigkeit von beispielsweise Frequenz oder Druck nur für wenige Gesteine durchgeführt worden. Selbst die Probengröße der zur Messung verwendeten Proben und die unterschiedlichen Meßmethoden können einen nicht unerheblichen Einfluß auf das Ergebnis haben.

Theoretische Ansätze zu Berechnung der Dielektrizitätskonstanten von zusammengesetzten Stoffen aus deren Einzelkomponenten sind nur in Einzelfällen (z.B. schwache Salzlösungen) durchführbar und liefern im allgemeinen keine quantitativ zutreffenden Erkenntnisse.

2.2 Dämpfung aufgrund der dielektrischen Verluste

Elektromagnetische Wellen werden bei der Ausbreitung in einem Medium durch verschiedene Faktoren gedämpft. Zum einen erfährt die Welle eine Dämpfung aufgrund der dielektrischen und ohmschen Verluste. Tabelle 4 zeigt für Frequenzen von 10, 40, und 70 MHz die Dämpfung in dB, die eine hin- und herlaufende Welle in Gesteinsschichten verschiedener Mächtigkeit (5 m, 30m, 50 m und 80 m) erfährt. Die Umrechnungen für verschiedene Schichtdicken sind wegen des linearen Zusammenhangs trivial. Es hat sich jedoch für die Diskussion als sehr nützlich erwiesen, vorbereitete Listen zur Verfügung zu haben. Mit steigender Frequenz erhöht sich die Dämpfung, was man besonders an den zuverlässigen Werten für Kohle und Lehm erkennen kann. Daß bei den anderen Materialien die Dämpfung mit zunehmender Frequenz nicht in dem Maße stärker wird, liegt daran, daß in [29] in den meisten Fällen die frequenzabhängige Erhöhung der Leitfähigkeit und damit der Verluste, welcher die Dämpfung bewirkt, nicht berücksichtigt wird. In der Realität muß deshalb bei den höheren Frequenzen mit noch stärkerer Dämpfung gerechnet werden.

Grob betrachtet ergibt sich für trockenes Gestein bei Frequenzen von 10 - 40 MHz auf eine Entfernung bis 50 m eine Dämpfung bis zu 10 dB. Bei Gestein mit geringem Wassergehalt bewegt sie sich i.a. zwischen 10 dB und 100 dB, während stark wasserhaltiges Gestein schon auf die geringe Entfernung von 5 m eine Dämpfung von über 100 dB aufweist.

Frequenz: 10 MHz

Art	Epsilon	Verlustfaktor
Sandstein tr.	5.0-j 0.0180	0.00360
Sandstein n.	25.0-j 2.6000	0.10400
Kalkstein tr.	6.0-j 0.0002	0.00003
Kalkstein n.	20.0-j 4.5000	0.22500
Quarz 12%W	5.6-j 0.0200	0.00357
Dolomit tr.	7.5-j 0.1790	0.02387
Dolomit 4%W	36.0-j 5.9900	0.16639
Calcit	8.5-j 0.0004	0.00004
Basalt tr.	10.0-j 0.0001	0.00001
Basalt n.	15.0-j 1.1000	0.07333
Granit tr.	5.0-j 0.0400	0.00800
Granit n.	9.0-j 0.4080	0.04533
nasser Sand	30.0-j 15.0000	0.50000
Gneis	15.0-j 0.0260	0.00173
Fettkohle 0.8%W	2.1-j 0.0700	0.03333
Fettkohle 3.5%W	2.6-j 0.2200	0.08462
Fettkohle 10.2%W	4.0-j 0.8000	0.20000
Fettkohle 22.2%W	20.0-j 8.0000	0.40000
Lehm 0%W	3.0-j 1.8000	0.60000
Lehm 5%W	6.0-j 18.0000	3.00000
Lehm 20%W	25.0-j 180.0000	7.20000
Wasser 0.5g NaCl	80.0-j 150.0000	1.87500

Frequenz: 40 MHz

Art	Epsilon	Verlustfaktor
Sandstein tr.	5.0-j 0.0050	0.00100
Sandstein n.	25.0-j 0.6600	0.02640
Kalkstein tr.	6.0-j 0.0001	0.00001
Kalkstein n.	20.0-j 1.1000	0.05500
Quarz 12%W	5.6-j 0.0080	0.00143
Dolomit tr.	7.5-j 0.0440	0.00587
Dolomit 4%W	36.0-j 1.4900	0.04139
Calcit	8.5-j 0.0001	0.00001
Basalt tr.	10.0-j 0.0001	0.00001
Basalt n.	15.0-j 0.2800	0.01867
Granit tr.	5.0-j 0.0003	0.00005
Granit n.	9.0-j 0.0102	0.00113
nasser Sand	30.0-j 15.0000	0.50000
Gneis	15.0-j 0.0060	0.00040
Fettkohle 0.8%W	2.1-j 0.0530	0.02524
Fettkohle 3.5%W	2.4-j 0.2100	0.08750
Fettkohle 10.2%W	3.4-j 0.8000	0.23529
Fettkohle 22.2%W	12.0-j 5.0000	0.41667
Lehm 0%W	3.0-j 0.4500	0.15000
Lehm 5%W	5.5-j 4.5000	0.81818
Lehm 20%W	23.0-j 45.0000	1.95652
Wasser 0.5g NaCl	80.0-j 37.5000	0.46875

Frequenz: 70 MHz

Art	Epsilon	Verlustfaktor
Sandstein tr.	5.0-j 0.0026	0.00052
Sandstein n.	25.0-j 0.3700	0.01480
Kalkstein tr.	6.0-j 0.0001	0.00001
Kalkstein n.	20.0-j 0.6400	0.03200
Quarz 12%W	5.6-j 0.0030	0.00054
Dolomit tr.	7.5-j 0.0250	0.00333
Dolomit 4%W	36.0-j 1.1200	0.03111
Calcit	8.5-j 0.0001	0.00001
Basalt tr.	10.0-j 0.0001	0.00001
Basalt n.	15.0-j 0.1600	0.01067
Granit tr.	5.0-j 0.0001	0.00003
Granit n.	9.0-j 0.0580	0.00644
nasser Sand	30.0-j 15.0000	0.50000
Gneis	15.0-j 0.0030	0.00020
Fettkohle 0.8%W	2.1-j 0.0520	0.02476
Fettkohle 3.5%W	2.4-j 0.2100	0.08750
Fettkohle 10.2%W	3.2-j 0.7000	0.21875
Fettkohle 22.2%W	10.0-j 5.0000	0.50000
Lehm 0%W	3.0-j 0.2500	0.08333
Lehm 5%W	5.7-j 2.5000	0.43859
Lehm 20%W	23.0-j 25.0000	1.08696
Wasser 0.5g NaCl	80.0-j 21.0000	0.26250

Tabelle 3 Gesteinsparameter: Richtwerte für Epsilon und Verlustfaktor für verschiedene Frequenzen [29, 31, 32]

Frequenz: 10 MHz					Frequenz: 40 MHz				
Art	Dämpfung/dB				Art	Dämpfung/dB			
	5 m	30 m	50 m	80 m		5 m	30 m	50 m	80 m
Sandstein tr.	-0.07	-0.44	-0.73	-1.17	Sandstein tr.	-0.07	-0.44	-0.73	-1.17
Sandstein n.	-4.72	-28.34	-47.23	-75.58	Sandstein n.	-4.80	-28.81	-48.02	-76.83
Kalkstein tr.	-0.00	-0.00	-0.01	-0.01	Kalkstein tr.	-0.00	-0.00	-0.01	-0.01
Kalkstein n.	-9.10	-54.58	-90.96	-145.53	Kalkstein n.	-9.15	-54.88	-91.46	-146.34
Quarz 12%W	-0.08	-0.46	-0.77	-1.23	Quarz 12%W	-0.12	-0.69	-1.15	-1.84
Dolomit tr.	-0.59	-3.57	-5.94	-9.51	Dolomit tr.	-0.59	-3.53	-5.88	-9.41
Dolomit 4%W	-9.05	-54.30	-90.50	-144.79	Dolomit 4%W	-9.05	-54.28	-90.47	-144.75
Calcit	-0.00	-0.01	-0.01	-0.02	Calcit	-0.00	-0.01	-0.01	-0.02
Basalt tr.	-0.00	-0.00	-0.00	-0.00	Basalt tr.	-0.00	-0.00	-0.00	-0.00
Basalt n.	-2.58	-15.49	-25.82	-41.31	Basalt n.	-2.63	-15.81	-26.35	-42.16
Granit tr.	-0.16	-0.98	-1.63	-2.60	Granit tr.	-0.37	-2.20	-3.66	-5.86
Granit n.	-1.24	-7.42	-12.37	-19.79	Granit n.	-1.24	-7.42	-12.37	-19.79
nasser Sand	-24.21	-145.24	-242.06	-387.29	nasser Sand	-72.62	-435.71	-726.18	-1161.88
Gneis	-0.06	-0.37	-0.61	-0.98	Gneis	-0.06	-0.34	-0.56	-0.90
Fettkohle 0.8%W	-0.44	-2.64	-4.39	-7.03	Fettkohle 0.8%W	-1.04	-6.21	-10.36	-16.57
Fettkohle 3.5%W	-1.24	-7.44	-12.40	-19.84	Fettkohle 3.5%W	-3.79	-22.76	-37.93	-60.69
Fettkohle 10.2%W	-3.62	-21.72	-36.20	-57.93	Fettkohle 10.2%W	-11.44	-68.62	-114.36	-182.97
Fettkohle 22.2%W	-15.97	-95.80	-159.67	-255.46	Fettkohle 22.2%W	-41.48	-248.89	-414.82	-663.72
Lehm 0%W	-9.08	-54.50	-90.83	-145.33	Lehm 0%W	-9.41	-56.44	-94.06	-150.50
Lehm 5%W	-46.33	-278.00	-463.33	-741.33	Lehm 5%W	-61.94	-371.61	-619.36	-990.97
Lehm 20%W	-161.04	-966.23	-1610.39	-2576.62	Lehm 20%W	-245.96	-1475.74	-2459.57	-3935.31
Wasser 0.5g NaCl	-122.03	-732.20	-1220.33	-1952.54	Wasser 0.5g NaCl	-146.13	-876.80	-1461.34	-2338.14

Frequenz: 70 MHz				
Art	Dämpfung/dB			
	5 m	30 m	50 m	80 m
Sandstein tr.	-0.07	-0.44	-0.74	-1.18
Sandstein n.	-4.71	-28.27	-47.12	-75.38
Kalkstein tr.	-0.00	-0.00	-0.01	-0.01
Kalkstein n.	-9.11	-54.66	-91.11	-145.77
Quarz 12%W	-0.08	-0.48	-0.81	-1.29
Dolomit tr.	-0.58	-3.49	-5.81	-9.30
Dolomit 4%W	-11.88	-71.30	-118.84	-190.14
Calcit	-0.00	-0.00	-0.00	-0.01
Basalt tr.	-0.00	-0.00	-0.00	-0.00
Basalt n.	-2.63	-15.78	-26.30	-42.09
Granit tr.	-0.00	-0.02	-0.04	-0.06
Granit n.	-1.23	-7.39	-12.31	-19.70
nasser Sand	-169.44	-1016.65	-1694.41	-2711.06
Gneis	-0.05	-0.30	-0.49	-0.79
Fettkohle 0.8%W	-2.28	-13.71	-22.85	-36.55
Fettkohle 3.5%W	-8.62	-51.74	-86.23	-137.96
Fettkohle 10.2%W	-24.77	-148.61	-247.69	-396.31
Fettkohle 22.2%W	-97.83	-586.96	-978.27	-1565.23
Lehm 0%W	-9.18	-55.09	-91.82	-146.91
Lehm 5%W	-65.19	-391.14	-651.90	-1043.04
Lehm 20%W	-298.24	-1789.46	-2982.43	-4771.89
Wasser 0.5g NaCl	-148.24	-889.44	-1482.41	-2371.85

Tabelle 4 Dämpfung in [dB], welche eine hin- und herlaufende Welle in Gesteinsschichten verschiedener Mächtigkeit von 5 m, 30 m, 50 m und 80 m bei verschiedenen Frequenzen erfährt [29, 31, 32]

2.3 Dämpfung aufgrund der Reflexionen an den Schichtgrenzen

Zusätzlich zur Dämpfung aufgrund der dielektrischen Verluste erfahren die reflektierten, bzw. transmittierten Anteile der Welle an jeder Grenzschicht eine Amplitudenänderung. Da sich zwischen der Antenne und der ersten Gesteinsschicht zwangsläufig Luft befinden muß, sind in diesem System, einschließlich einer Störzone, mindestens drei verschiedene Medien beteiligt, durch die sich die Welle hindurchbewegt. Die Reflexions- und Transmissionsfaktoren, die das Maß für die Amplitudenänderung an jeder Grenzschicht sind, hängen nicht nur vom Material sondern auch vom Einfallswinkel der Welle zur Grenzschicht und der Anordnung der Grenzschichten zueinander ab. Da die geometrischen Einflußgrößen a priori unbekannt sind, nähert man, um überhaupt eine Abschätzung machen zu können, das System durch ein Modell ebener Schichten bei senkrechtem Einfall der Welle an (Bild 34).

Da das gesamte elektrische Feld zweckmäßigerweise in jeder Schicht durch die Überlagerung eines transversal elektrischen (TE-) und eines transversal magnetischen (TM-) Anteils dargestellt wird, muß für jeden dieser Anteile ein Reflexionsfaktor bestimmt werden, der bei den TM-Wellen von der Änderung der elektrischen, im Falle der TE-Wellen von der Änderung der magnetischen Eigenschaften an der Grenzschicht herrührt.

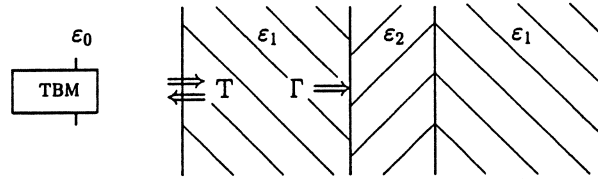
Die Reflexions- und Transmissionsfaktoren an einer Grenzschicht, unter Berücksichtigung der anderen Schichten, sind aus der Literatur bekannt. Betrachtet man die letzte Schicht als unendlich ausgedehntes Medium (die Welle wird nicht reflektiert), lassen sich die Reflexionsfaktoren und die aus ihnen abgeleiteten Transmissionsfaktoren in den anderen Schichten rekursiv ermitteln.

Um die Reichweite der Welle im Gestein feststellen zu können, muß man den Anteil an der reflektierten und empfangenen Welle berücksichtigen, der nicht direkt an der ersten Grenzschicht Luft/Gestein zurückgeworfen worden ist, sondern der diese Grenzschicht zweimal passiert hat und der erst an der Inhomogenität reflektiert worden ist. Dieser Anteil ist nicht nur durch die längere Laufzeit phasenverschoben, sondern auch stark gedämpft. Die Dämpfung bzw. Amplitudenänderung des Anteils setzt sich multiplikativ aus dem Dämpfungsterm, den beiden Transmissionsfaktoren an der ersten Grenzschicht (jeweils in eine andere Richtung) und dem Reflexionsfaktor an der Inhomogenität zusammen. Da die Dämpfung in dB, also einem logarithmischen Maß ausgedrückt wird, kann man die Multiplikatoren erst einzeln berechnen und dann in dB addieren.

Die Transmissions- und Reflexionsfaktoren sind stark davon abhängig, um welche Gesteinskombination es sich handelt und welches Ausmaß die Störzone hat, ob sie als unendlich ausgedehnt betrachtet werden kann oder nur eine dünne Schicht im ansonsten einheitlichen Material ist. Die Gesamtdämpfung ist deshalb nur für einige wenige signifikante Gesteinskombinationen und Abmessungen der Inhomogenitäten berechnet worden.

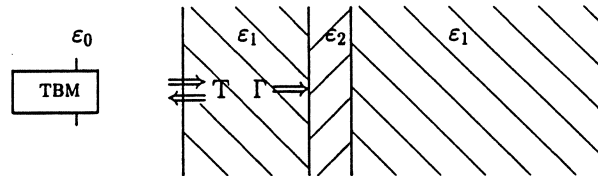
Bei den in den Bildern 34 und 35 dargestellten Beispielen ergeben sich Dämpfungswerte zwischen 3 dB und 60 dB. Hohe Werte werden erreicht bei dem Einschluß einer dünnen, verlustarmen Schicht (z.B. Luft) in stärker verlustbehaftetem Gestein, bzw. bei der Reflexion an einer ausgedehnten, verlustreichen Schicht, während umgekehrt die Reflexion an einem Einschluß einer dünnen, verlustreichen (z.B. wasserhaltigen) Schicht genau wie an einer ausgedehnten, verlustärmeren Schicht einen niedrigeren Dämpfungswert ergibt. Aus den Amplitudenänderungen beim zweimaligen Passieren der Grenzschicht Luft/Gestein resultiert in allen betrachteten Fällen nur eine Dämpfung von maximal 5 dB.

1. Breite verlustreiche Störzone:



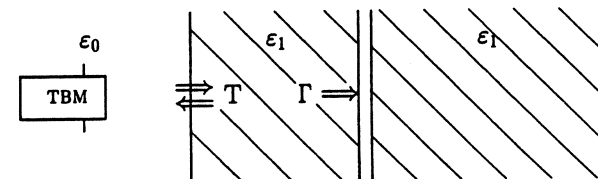
Schichtfolge:	Sandstein tr.	Sandstein n.	Sandstein tr.	
Schichtdicke:	40.00 m	20.00 m	unendl.	
Frequenz	Verluste aus ϵ'' /dB	Γ /dB	T/dB	Gesamtdämpfung/dB
10 MHz	-0.59	-7.89	-2.53	-11.01
40 MHz	-0.65	-7.93	-2.20	-10.78

2. Mittlere verlustreiche Störzone:



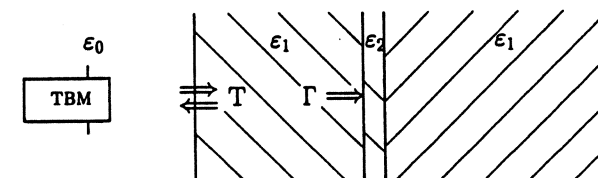
Schichtfolge:	Lehm 0% W.	Lehm 5%W.	Lehm 0%W.	
Schichtdicke:	30.00 m	10.00 m	unendl.	
Frequenz	Verluste aus ϵ'' /dB	Γ /dB	T/dB	Gesamtdämpfung/dB
10 MHz	-54.50	-7.20	-0.69	-62.39
40 MHz	-56.56	-12.07	-0.65	-69.28

3. Schmale verlustreiche Störzone:



Schichtfolge:	Sandstein tr.	Sandstein n.	Sandstein tr.	
Schichtdicke:	40.00 m	2.00 m	unendl.	
Frequenz	Verluste aus ϵ'' /dB	Γ /dB	T/dB	Gesamtdämpfung/dB
10 MHz	-0.59	-4.88	-2.96	-8.43
40 MHz	-0.65	-4.99	-2.76	-8.40

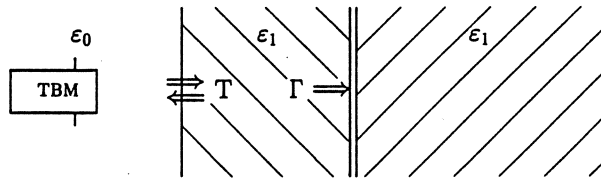
4. Schmale verlustarme Störzone:



Schichtfolge:	Sandstein tr.	Luft	Sandstein tr.	
Schichtdicke:	40.00 m	5.00 m	unendl.	
Frequenz	Verluste aus ϵ'' /dB	Γ /dB	T/dB	Gesamtdämpfung/dB
10 MHz	-0.59	-4.26	-0.20	-5.05
40 MHz	-0.65	-4.26	-1.13	-6.04

Bild 34 Beispiele für verschiedene Gesteinskonfigurationen bei der Vorfeldprognose

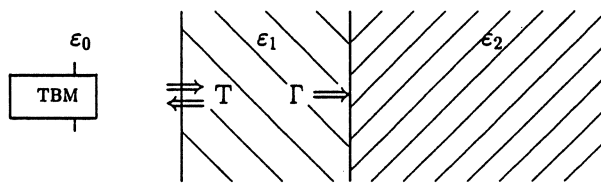
5. Schmale verlustarme Störzone:



Schichtfolge: Sandstein tr. Luft Sandstein tr.
Schichtdicke: 40.00 m 0.10 m unendl.

Frequenz	Verluste aus ϵ''_1 /dB	Γ /dB	T/dB	Gesamtdämpfung/dB
10 MHz	-0.59	-34.55	-1.38	-36.52
40 MHz	-0.65	-22.54	-1.54	-24.73

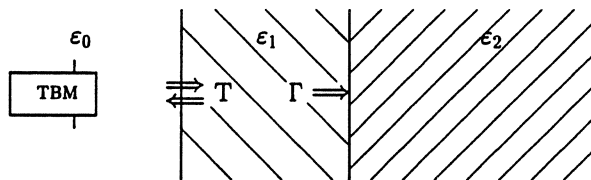
6. Wechsel der Gesteinsart (tr.):



Schichtfolge: Sandstein tr. Granit tr.
Schichtdicke: 40.00 m unendl.

Frequenz	Verluste aus ϵ''_1 /dB	Γ /dB	T/dB	Gesamtdämpfung/dB
30 MHz	-0.59	-58.42	-1.37	-60.30

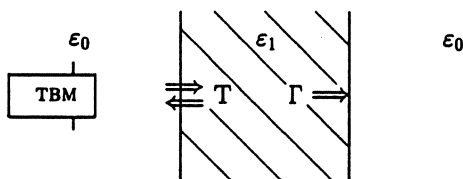
7. Wechsel der Gesteinsart (naß):



Schichtfolge: Sandstein n. Granit n.
Schichtdicke: 40.00 m unendl.

Frequenz	Verluste aus ϵ''_1 /dB	Γ /dB	T/dB	Gesamtdämpfung/dB
30 MHz	-38.41	-12.04	-5.09	-55.54

8. Wechsel der Gesteinsart (Luft):



Schichtfolge: Sandstein n. Luft
Schichtdicke: 20.00 m unendl.

Frequenz	Verluste aus ϵ''_1 /dB	Γ /dB	T/dB	Gesamtdämpfung/dB
30 MHz	-19.21	-3.52	-4.67	-17.40

Bild 35 Weitere Beispiele für verschiedene Gesteinskonfigurationen bei der Vorfeldprognose

2.4 Das Auflösungsvermögen

Um die Dicke einer auftretenden Störzone, bzw. den genauen Ort einer Schichtgrenze zu bestimmen, sendet man beim Pulsradar einen idealisiert rechteckförmigen Impuls der Pulsbreite τ_p aus und mißt den Laufzeitunterschied der an den beiden Grenzflächen reflektierten Pulse. Eine Inhomogenität der Dicke d kann noch detektiert werden, wenn die beiden Anteile sich nicht überlappen. Eine solche Überlappung findet nicht statt, wenn die Zeit, die ein solcher Impuls zum zweimaligen Durchlaufen einer Schicht benötigt, größer ist als die Pulsbreite.

Eine minimale Leistung kann genau dann noch empfangen werden, wenn die Empfangsapparatur eine Bandbreite besitzt, die sich reziprok zur Pulsbreite verhält. Da die maximale Frequenz, bei der eine Antenne betrieben werden kann, automatisch auch die Obergrenze für die mögliche Bandbreite des Systems bildet, die zwar technisch nie erreicht wird, kann man aus den Mindestanforderungen an die Bandbreite Lage und Umfang des Frequenzbereiches bestimmen, in dem gemessen werden soll.

In Tabelle 5 ist beispielhaft für einige typische Gesteinsarten das Auflösungsvermögen für verschiedene Bandbreiten berechnet worden. Es zeigt sich, daß erst bei einer Bandbreite von 40 MHz die minimale detektierbare Schichtdicke $d \approx 1.5$ m beträgt. Sie nimmt mit steigender Frequenz ab und erreicht bei 100 MHz für fast alle Materialien einen Wert $d \leq 1$ m, wobei diese minimal erkennbare Gesteinsdicke bei stark verlustbehaftetem Material wesentlich geringer ist als bei verlustarmem.

2.5 Festlegung des Frequenzbereiches

Allein auf der Grundlage der Dämpfungswerte wäre ein möglichst niedriger Frequenzbereich, z.B. 1 - 10 MHz, optimal. Aufgrund der geringen Bandbreite erhielte man aber nur eine minimale Auflösung von 2 - 3 m, was nicht zufriedenstellend ist. Mißt man in einem Frequenzband von 10 - 70 MHz, hat man zwar mit 60 MHz Bandbreite eine Auflösung von ca. 1 m, die maximal erreichbare Reichweite wird jedoch geringer. Die eigentlich erwünschte Reichweite von 80 m kann nur in weniger verlustbehaftetem Material erreicht werden.

Art	Auflösungsvermögen/m bei einer Bandbreite von:						
	1 MHz	10 MHz	20 MHz	30 MHz	40 MHz	70 MHz	100MHz
Sandstein tr.	67.08	6.71	3.35	2.24	1.68	0.96	0.67
Sandstein n.	27.08	3.00	1.50	1.00	0.75	0.43	0.30
Kalkstein tr.	61.24	6.12	3.06	2.04	1.53	0.87	0.61
Kalkstein n.	25.49	3.33	1.67	1.12	0.84	0.48	0.34
Quarz 12%W	63.39	6.34	3.17	2.11	1.58	0.91	0.63
Dolomit tr.	54.39	5.48	2.74	1.83	1.37	0.78	0.55
Dolomit 4%W	20.67	2.49	1.25	0.83	0.62	0.36	0.25
Calcit	51.45	5.14	2.57	1.71	1.29	0.73	0.51
Basalt tr.	47.43	4.74	2.37	1.58	1.19	0.68	0.47
Basalt n.	36.53	3.87	1.94	1.29	0.97	0.55	0.39
Granit tr.	67.08	6.71	3.35	2.24	1.68	0.96	0.67
Granit n.	48.82	5.00	2.50	1.67	1.25	0.71	0.50
nasser Sand	26.61	2.66	1.33	0.89	0.67	0.38	0.27
Gneis	38.73	3.87	1.94	1.29	0.97	0.55	0.39
Fettkohle 0.8%W	103.48	10.35	5.17	3.45	2.59	1.48	1.04
Fettkohle 3.5%W	86.55	9.29	4.65	3.16	2.42	1.38	0.97
Fettkohle 10.2%W	66.81	7.46	3.88	2.62	2.02	1.19	0.86
Fettkohle 22.2%W	23.05	3.29	1.74	1.27	1.06	0.66	0.52
Lehm 0%W	83.21	8.32	4.28	2.87	2.16	1.24	0.87
Lehm 5%W	42.45	4.24	2.61	1.89	1.49	0.88	0.65
Lehm 20%W	14.75	1.48	0.98	0.75	0.62	0.40	0.31
Wasser 0.5g NaCl	13.42	1.34	0.77	0.54	0.41	0.24	0.17

Tabelle 5 Beispiele für das Auflösungsvermögen des Georadarverfahrens für einige typische Gesteinsarten in Abhängigkeit von der Bandbreite

Beispiel

Zur Berechnung eines Beispiels wird folgende Konfiguration, bestehend aus einer verlustbehafteten Schicht, eingebettet in eine verlustarme Schicht, betrachtet (Bild 36).

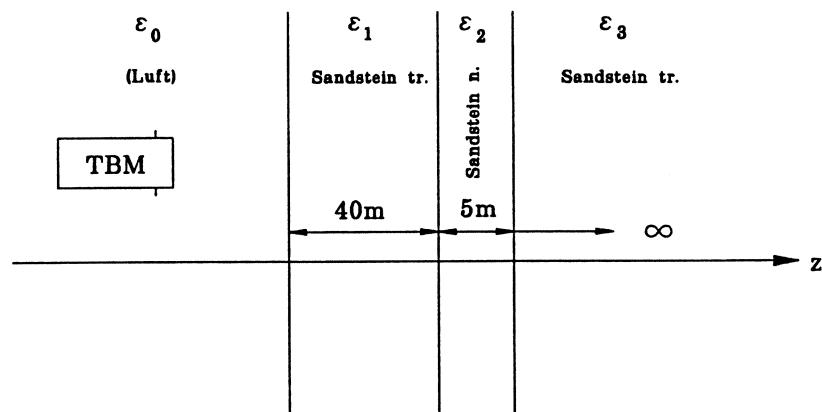


Bild 36 Festlegung des Frequenzbereiches. Beispiel mit einer eingebetteten, verlustbehafteten nassen Sandsteinschicht (ϵ_2)

Eine Welle in trockenem Sandstein erfährt im gesamten Frequenzband von 10 - 70 MHz beim zweimaligen Durchlaufen einer Strecke von 40 m eine Dämpfung von maximal 1 dB, die Reflexion an einer dünnen, verlustreichen Schicht liefert eine Dämpfung von ca. 8 dB. Berücksichtigt man den Übergang zur Luftschicht, addieren sich noch 2 dB zu einer Gesamtdämpfung von 11 dB über die Strecke hinzu. Aufgrund der vorhandenen Bandbreite läßt sich die genaue Entfernung der Grenzschicht auf ca. 1 m auflösen. Was die Auflösung der Schichtdicke anbetrifft, so erfährt der an der zweiten Grenzschicht reflektierte Puls infolge der hohen Verluste im nassen Gestein eine zusätzliche Dämpfung, die schon bei 40 MHz bis zu 100 dB betragen kann (Tabelle 3).

Das Feld, welches die Antennen aussenden, ist nicht, wie idealisiert angenommen wurde, eben und homogen, da man sich bei den zu betrachtenden Entfernungen noch im Nahfeld der Antennen befindet, wo die Amplitude der Feldstärke sich mit $1/r^3$ ändert. Zusammen mit den Verlusten innerhalb der Antennen wird diese Dämpfung als Transmissionsfaktor bezeichnet, der entscheidend zur Gesamtdämpfung des Systems beiträgt. Dieser Faktor kann nur experimentell durch Messung der übertragenen Leistung zwischen den betrachteten Antennen auf eine feste Entfernung bestimmt werden.

In der Realität wird die sicherlich nicht senkrecht einfallende Welle zum einen in andere Richtungen reflektiert als geradewegs zum Empfänger zurück, d.h., es kommt zu Mehrfachreflektionen, außerdem kann die Welle an gekrümmten Grenzflächen gebeugt werden. Auch die Stoffparameter, wie zum Beispiel der Wassergehalt des Gesteins, ändern sich nicht abrupt, sondern kontinuierlich.

Die Tatsache, daß aufgrund der Grenzschicht Luft/Gestein direkt ein großer Teil der fast ungedämpften Welle reflektiert wird, erschwert die Messungen. Da die Antennen aber weit außerhalb ihres Anpassungsbereiches arbeiten werden, dürften die Transformationseigenschaften des kurzen Luftstückes bei einer Freiraumwellenlänge von etlichen Metern im unteren MHz-Bereich gering sein.

3. Modellbetrachtungen

3.1 Theoretische Grundlagen

Das Modell eines elektromagnetischen Systems ist ein nützliches Mittel, um alle interessierenden Informationen über das Verhalten des Ausgangssystems zu erhalten. Zur Beschreibung eines solchen Systems reichen die 4 Grundgrößen Masse, Länge, Zeit und Ladung aus. Die Transformation dieser Basisgrößen in die entsprechenden Modellgrößen durch Skalierung mit einem linearen Faktor ist möglich aufgrund der Linearität der Maxwell'schen Gleichungen. Dabei gehorchen nicht nur die ursprünglichen, sondern auch die transformierten Felder wieder diesem Differentialgleichungssystem, solange nichtlineare Stoffe, wie z.B. Ferrite und Ferromagnetika, von der Transformation ausgeschlossen bleiben.

Für das hier betrachtete System bedeutet dies keine besondere Einschränkung, da für die Gesteinsparameter immer $\mu_r \approx 1$ angenommen wurde und auch die meisten Modellmaterialien nichtmagnetisch sind.

In der Praxis transformiert man nun im allgemeinen nicht die Basisgrößen sondern, wegen des direkteren Zugangs, statt dessen Ort, Zeit, magnetische und elektrische Feldstärke.

Bei vielen Messungen, auch in diesem speziellen Fall hier, ist Luft eines der beteiligten Medien im Ausgangssystem. Da Luft ein fast perfekter Isolator ist und es schwierig ist, für das Modell Stoffe mit ähnlichen Eigenschaften zu bekommen, beläßt man es auch im Modell oftmals bei Luft. Das bedeutet, daß die Dielektrizitätskonstante gleich bleibt. Nur die Leitfähigkeit muß erhöht werden, damit trotz höherer Frequenz auch der Imaginärteil von ϵ seinen Wert behält. Wenn man nun Luft in der Realität durch Luft im Modell ersetzt, ist diese Bedingung zwar nicht erfüllt, da Luft eine geringe Leitfähigkeit besitzt. Bei den meisten Frequenzen ist jedoch der Fehler, den man macht, gering.

Da sich auch die Dielektrizitätskonstanten im Modell im Vergleich zu den realen Dielektrizitätskonstanten nicht ändern, bleiben die Reflexions- und Transmissionsfaktoren trotz der transformierten Schichtdicken gleich. Betreffend der Dämpfung ist zu erwähnen, dass dieselbe Dämpfung, die eine Welle von beispielsweise 40 MHz auf eine Entfernung von 50 m erfährt auch die Welle im transformierten Modell, bei einem Skalierungsfaktor $\alpha = 50$, bei einer Frequenz von 2 GHz und einer Entfernung von 1 m.

Wie man sieht, erhält man im Modell, was Dämpfungsverluste und Laufzeitunterschiede anbetrifft, dieselben Werte wie in der Realität, so daß die am Modell gewonnenen Ergebnisse genau auf die realen Gegebenheiten angewendet werden können.

3.2 Festlegung der Modellparameter

Aufgrund der geforderten Bandbreite von 70 MHz für den erforderlichen Frequenzbereich und einer maximalen Reichweite von 80 m können nun die Skalierungsfaktoren für das Modell festgelegt werden.

Als günstig erweist sich ein geometrischer Skalierungsfaktor von $\alpha_r = 50$. Man erhält dabei im Modell einen Meßaufbau von ca. 2 m Gesamtlänge, der problemlos realisiert werden kann. Geht man von einem Tunneldurchmesser von 10 m, bzw. - transformiert - 20 cm aus und nähert die Tunnelbohrmaschine im Modell durch einen zylindrischen Metallkörper mit 10 cm Durchmesser an (wobei der Bohrkopf nicht weiter berücksichtigt wird), ergibt sich eine maximale Antennenhöhe von ca. 4 cm, sofern die Antennen seitlich auf den Umfang der TBM montiert werden. Spulen- und Monopolantennen dieser Größenordnung sind technisch einfach herzustellen und leicht zu handhaben.

Mit den zur Zeit vorhandenen Geräten (Verstärker mit begrenzter Bandbreite) kann in einem Frequenzband von 0,5 - 2,0 GHz gemessen werden, was einen Skalierungsfaktor α_f von 30 nötig machte. Bei der Wahl zweier verschiedener Skalierungsfaktoren, $\alpha_f = 30$ und $\alpha_r = 50$, müßte ϵ_r um einen Faktor 2,8 erhöht werden. Man müßte nicht nur Luft transformieren sondern auch alle anderen Materialien. Die meisten festen Modellmaterialien wie Kunststoffe und Keramiken besitzen aber keinen so großen Realteil der Permittivität. Man könnte höchstens auf verschiedenen konzentrierte Salzlösungen ausweichen, die dann aber wieder höhere Verluste als zulässig aufweisen und zudem schwerer zu handhaben sind (z.B. Korrosionsprobleme).

Daher empfiehlt es sich, auch für α_f einen Skalierungsfaktor von 50 zu wählen und ein geringeres Auflösungsvermögen hinzunehmen als ursprünglich gefordert (2,0 GHz im Modell entspricht 40 MHz in der Realität), was für das Prinzip der Messungen nicht weiter entscheidend ist.

Bleibt man also bei der gleichen Dielektrizitätskonstanten, bieten sich diverse Werkstoffe wie keramische Werkstoffe, Steatite etc. als Modellmaterialien an. Die Beschaffung dieser Materialien ist prinzipiell möglich, zum Teil jedoch aufwendig. Auch ist ihre Handhabung für Modellversuche nicht

immer geeignet. Da nur einige typische Fälle im Modell nachgebaut werden mussten, bot sich die Verwendung von Quarzsand, Wasser (evtl. mit Salzzusatz) und Graphit an. Diese bieten breite Möglichkeiten zur Modellierung von Materialien.

Wie gezeigt, bleibt auch im Modell die Dämpfung von ca. 11 dB, die die Welle durch Verluste und Reflexionen erfährt, gleich. Hinzu kommt die Übertragungsdämpfung der Antennen, welche im Modell je nach Güte der verwendeten Antennenpaare über eine Entfernung von 120 cm bei 20 - 50 dB liegt. Bei einer dynamischen Bandbreite des zur Messung verwendeten Netzwerkanalysators von 100 dB und einer Bandbreite von 1,5 GHz kann die Lage der in Bild 36 dargestellten Grenzschicht auf 2 cm Genauigkeit (entspricht einem Auflösungsvermögen von 1 m bei trockenem Sandstein im Realen) problemlos bestimmt werden. Wie schon erwähnt, bewirken die Reflexion an der zweiten Grenzschicht und die hohen Verluste in der Inhomogenität eine zusätzliche Dämpfung von ca. 100 dB, so daß eine Erkennung der Schichtdicke mit den vorhandenen technischen Möglichkeiten nicht ohne weiteres durchführbar ist.

4. Das Antennensystem

4.1 Anforderungen an das Antennensystem

Bei der Entwicklung des Antennensystems, bestehend aus Sende- und Empfangsantennen, sind aufgrund geometrischer und meßtechnischer Voraussetzungen folgende Bedingungen sowohl in Situ als auch im Modell zu erfüllen:

1) geometrisch kleine Abmessungen

Es existieren verschiedene Möglichkeiten zur Montage der Antennen auf der Tunnelbohrmaschine:

- (a) Integration in den Bohrkopf (technologisch sicher schwer realisierbar)
- (b) auf dem Bohrmaschinenrumpf

In beiden Fällen sind die Platzverhältnisse sehr eingeschränkt. Die Abmessungen der Antennen werden folglich sehr klein gegenüber der Wellenlänge, so daß die Antennen außerhalb ihres optimalen Arbeitsbereiches betrieben werden.

2) hohe Strahlungsleistung

Aufgrund der starken Dämpfung der Übertragungsstrecke muß die Speisung mit hoher Sendeleistung möglich sein. Daraus folgt die Forderung nach einer Minimierung der Verlustleistung zur Vermeidung der thermischen Zerstörung der Antenne. Starke Antennenverluste verringern auch die für die Meßauswertung benötigte Dynamik.

- 3) gleichmäßige Strahlungsleistung und Richtfunktion über der Frequenz. Um eine hohe Auflösung zu gewährleisten, müssen die Antennen in einem breiten Band ein möglichst frequenzunabhängiges Verhalten aufweisen.
- 4) maximale Abstrahlung in Richtung des Vortriebs. Das gesamte System soll vor allem in Vorwärtsrichtung erkennen können. Durch eine gute Bündelung wird die Auflösung in Vortriebsrichtung verbessert.

4.2 Untersuchte Antennentypen

Da, wie oben bereits erwähnt, die Antenne sowohl in Situ wie auch im Modell nur geringe Abmessungen aufweisen darf, werden folgende Modellbauformen zur Vermessung gewählt.

1. Monopole verschiedener Länge
2. Rahmenantennen verschiedener Windungszahl, geometrischer Fläche und Form
3. Ferritantennen

Die hier verwendeten Bauformen der Antennen gleichen denen mit Ferrit als Träger. Mögliche Variationen der Bauformen sind dabei bestimmt durch die vorgegebenen Kerne.

4. Aktive Antennen

Verwendet werden Schaltungen mit ein- oder mehrstufigen Verstärkern.

Eine weitere, noch nicht abgeschlossene Untersuchung umfaßt eine Kombination der oben genannten Antennenbauformen, z.B. Reihen- und Parallelschaltungen gleichartiger und unterschiedlicher Antennentypen.

Für weitere Detailangaben betreffend theoretischer Grundlagen der untersuchten Antennentypen sowie über die Ergebnisse der Vermessung der Antennen wird auf den Originalbericht [24] verwiesen.

4.3 Auswahl einer Antenne für die Modellversuche

Obwohl insgesamt sehr viele Messungen an den verschiedenen Antennentypen durchgeführt wurden und somit auf eine große Erfahrung zurückgegriffen werden konnte, war es nicht möglich, eindeutig den optimalen Antennentyp und dessen Parameter für den Original- wie für den Modellfrequenzbereich festzulegen. Ein wichtiger Grund hierfür ist zweifelsohne die Vielzahl der verfügbaren Parameter. Um eine Optimierung durchführen zu können, müßte die hier vorgegebene experimentelle Vorgehensweise durch theoretische (überwiegend numerische) Untersuchungen ergänzt werden.

Dennoch läßt sich eine erste vorläufige Auswahl treffen. Geht man davon aus, daß die maximale Ausdehnung der Antennen im Modell 25 mm nicht überschreiten darf, sind die Monopole wegen ihrer starken Fehlanpassung nicht verwendbar. Sie könnten eventuell als aktive Antennen betrieben werden, nur müßte dann der Schaltungsaufwand erheblich weiter getrieben werden als es hier aus Zeitgründen möglich war. Als Beleg für diese Aussage kann nochmals auf den bereits erwähnten aktiven Monopol für den Frequenzbereich von 0,3 MHz bis 30 MHz verwiesen werden.

Die auf einen Ferritkern gewickelte Rahmenantenne scheidet für den Modellfrequenzbereich solange aus, als keine Ferrite mit geringen Verlusten für Frequenzen bis 2 GHz verfügbar sind. Für den Originalfrequenzbereich sind solche Ferritmaterialien vorhanden. Da die Abmessungen von Rahmenantennen mit Ferritkern deutlich kleiner gewählt werden können als ohne, sind erstere für den Originalfrequenzbereich als attraktive Lösung anzusehen.

Die Rahmenantenne ohne Ferritkern ist sowohl für den Originalfrequenzbereich als auch für den Modellfrequenzbereich geeignet. Wägt man alle Meßergebnisse gegeneinander ab, dann erweist sich

die Rahmenantenne ohne Ferritkern mit einem Durchmesser von 23 mm und einer Windungszahl von 15 als die günstigste Lösung für die folgenden Modellversuche.

5. Untersuchungen an einem TBM-Modell

Als einfachstes Modell zur Simulation einer Tunnelbohrmaschine dient ein geschlossener Metallzylinder der Länge $l = 35$ cm und mit einem Durchmesser $d = 10$ cm. Die Messungen erfolgen in einer Holzkiste mit den Maßen $2 \times 1 \times 1$ m³. Die Kiste wird mit Sand, bzw. einer Sand/Graphitmischung, die die geforderten dielektrischen Eigenschaften besitzt, gefüllt.

Der Zylinder wird in eine 50 cm lange, vorn mit Styropor abgeschlossenen Acrylglasröhre mit einem Durchmesser von 20 cm (entspricht im Realen einem Tunneldurchmesser von 10 m) gesetzt, die mittig in eine der Schmalseiten der Holzkiste eingelassen ist (Bild 37).

Die auftretenden systematischen Fehler, die durch Reflexionen an den Holzwänden, dem Übergang Acrylglas-Sand usw. entstehen, können mit Hilfe eines geeigneten Meßverfahrens herausgefiltert werden.

Völlig außer acht gelassen wird bei diesem Modell jedoch der komplexe Aufbau einer realen TBM, obwohl dessen Einfluß auf die Antenneneigenschaften groß ist (Feldverzerrungen bei Anwesenheit metallischer Körper). Für eine erste Abschätzung und die Entwicklung prinzipieller Meßverfahren ist eine solch einfache Konfiguration jedoch sinnvoll.

5.1 Das Meßverfahren

Grundlage des Meßkonzeptes ist der automatische Netzwerkanalysator (NWA) HP 8510B, der ein sehr wirkungsvolles Instrument für eine schnelle, dabei auch anschauliche und umfassende Analyse eines frequenz- und zeitabhängigen Vorgangs darstellt. Die erreichbare Dynamik liegt bei 100 dB, mit Hilfe weiterer Maßnahmen ist sie deutlich erweiterbar (Einsatz rauscharmer Vorverstärker).

Aufgrund der eingebauten Zeitbasis können zur Messung aller interessierenden Größen synthetische Pulse verwendet werden, d.h., die physikalisch durchgeführte Messung erfolgt im vorgegebenen Frequenzband für eine definierte Anzahl von Frequenzpunkten (maximale Anzahl: 801). Anschließend wird mit Hilfe einer FFT oder Chirp-Z-Transformation die Pulsantwort für eine vorgebbare Pulsform berechnet. Während sich bei einer Messung im Frequenzbereich die Anteile aller an den verschiedenen Impedanzsprüngen des Meßobjektes auftretenden Reflexionen überlagern, kann man im Zeitbereich den Effekt jeder einzelnen Diskontinuität als Funktion der Zeit, bzw. des Ortes erkennen, solange sie zeitlich, bzw. örtlich weit genug auseinanderliegen. Der Vorteil eines Wechsels vom Frequenz- in den Zeitbereich besteht nun darin, daß man unerwünschte Einflüsse auf den Meßvorgang eliminieren kann.

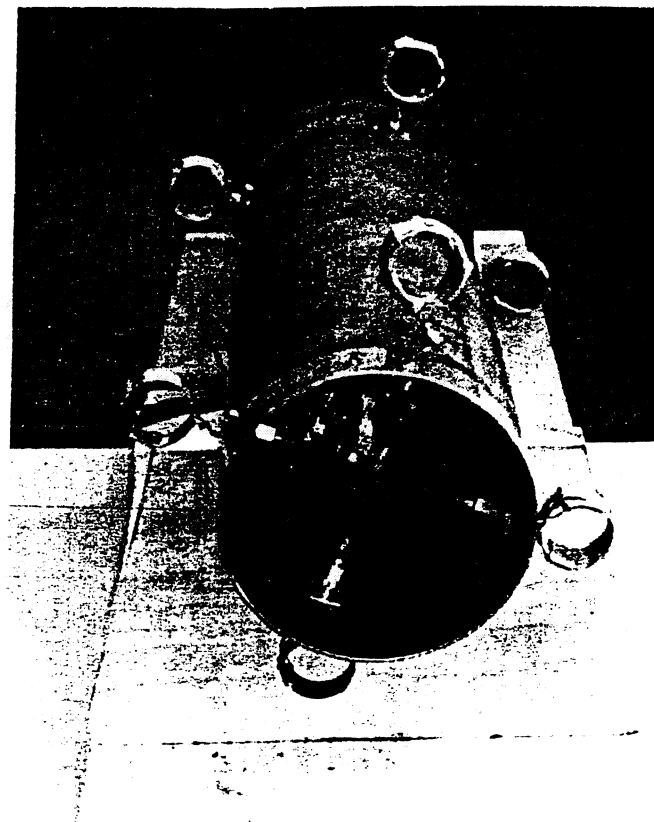
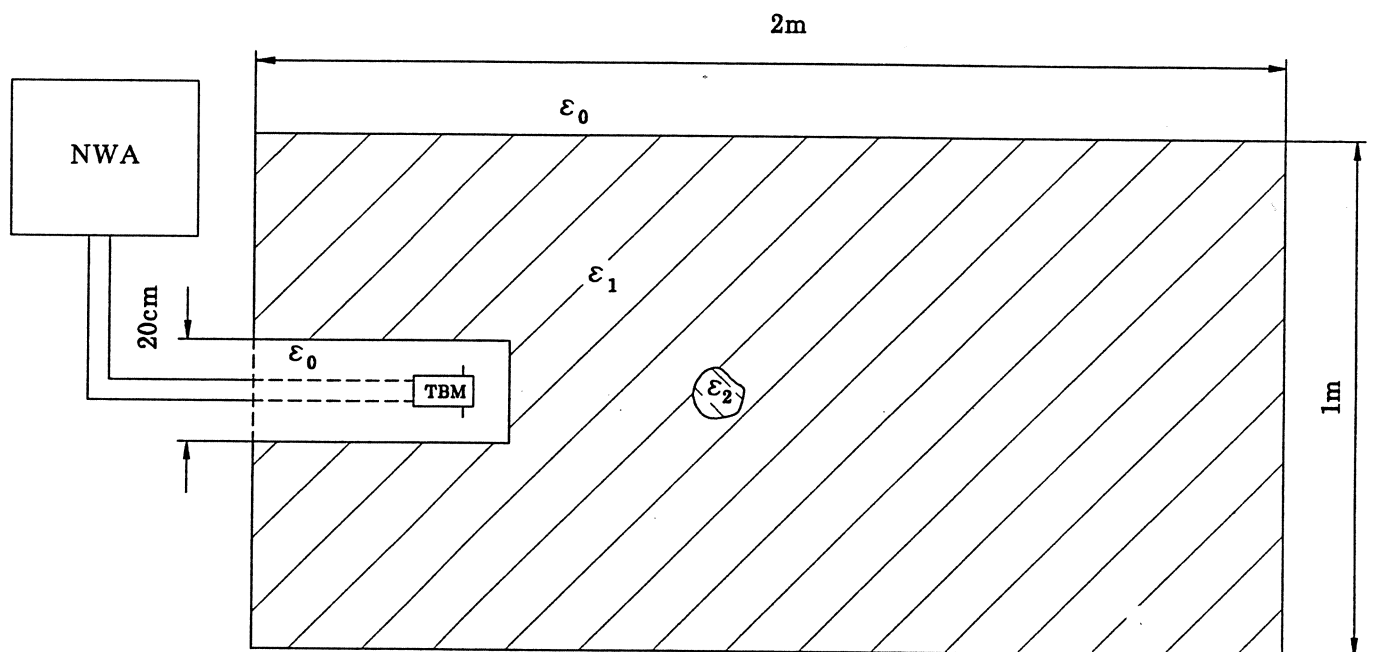


Bild 37 Modellsimulation einer TBM mittels eines Metallzylinders in einer mit Sand bzw. Sand/Graphit gefüllten Holzkiste

5.2 Messergebnisse

Es sei hier nochmals darauf hingewiesen, dass die ausführlichen Messresultate im Bericht [24] zusammengestellt sind.

5.2.1 Messungen im freien Raum

Bei einer Messung im freien Raum soll untersucht werden, welches die günstigste Anordnung der Antennen auf dem Modell der Tunnelbohrmaschine ist. Das Modell wird - wie bereits gesagt - in erster Näherung durch einen Metallzylinder aus Messing mit einem Durchmesser von 10 cm und einer Länge von 35 cm gebildet. Zum Vermessen der Antennenanordnung wird dieses Modell so auf einen Holztisch mit Höhe 1.2 m gestellt, daß die Wände des umgebenden Raumes mindestens 2 m entfernt sind. Aus diesem Grund sind Reflexionen von Wänden und Fußboden erst später zu erwarten als die Signale, welche durch die direkte Verkopplung zwischen den Antennen oder durch Reflexionen an den zu vermessenden Störstellen entstehen.

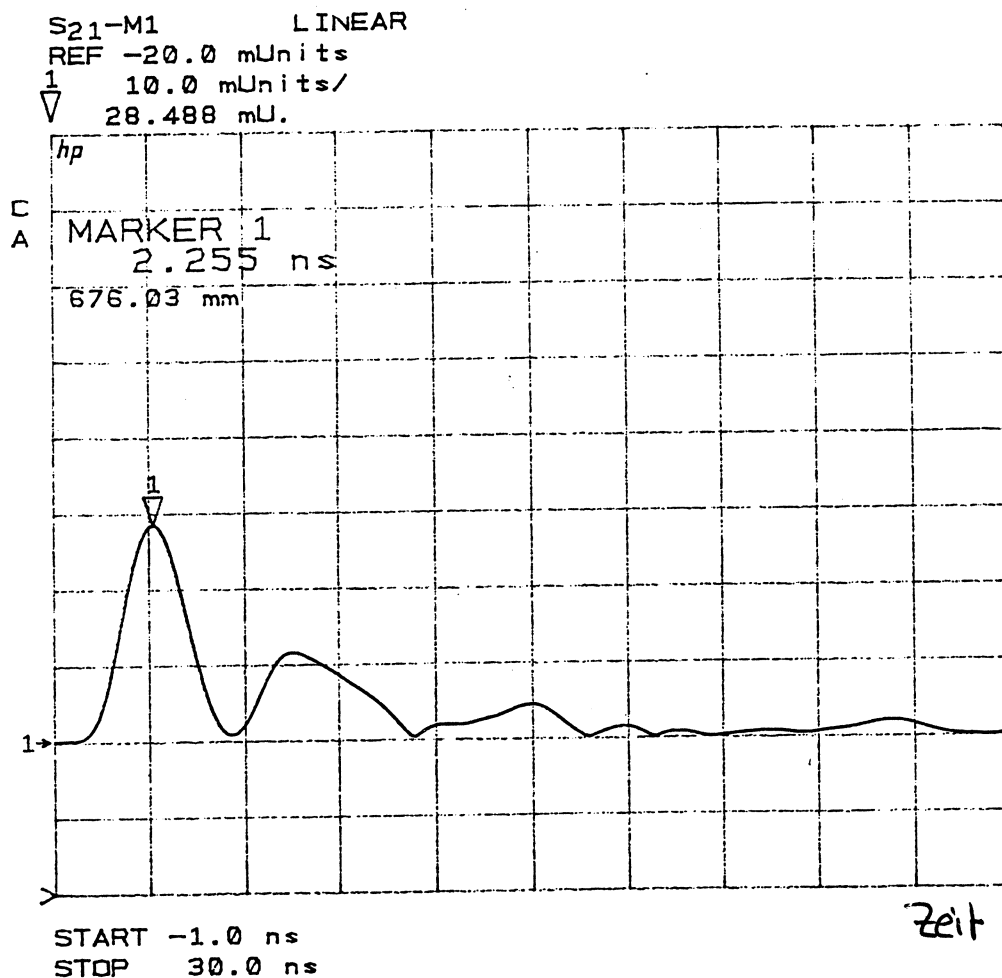
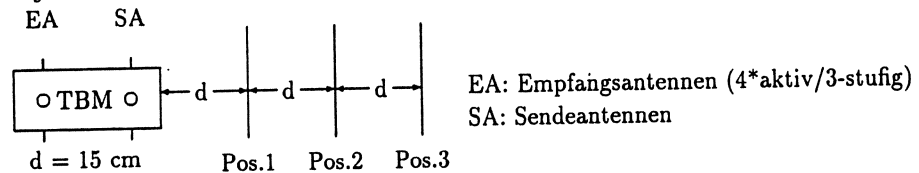


Bild 38 Beispiel einer Radarmessung im Modellversuch. Das Maximum gibt die Pulsantwort wieder

Messung 3a

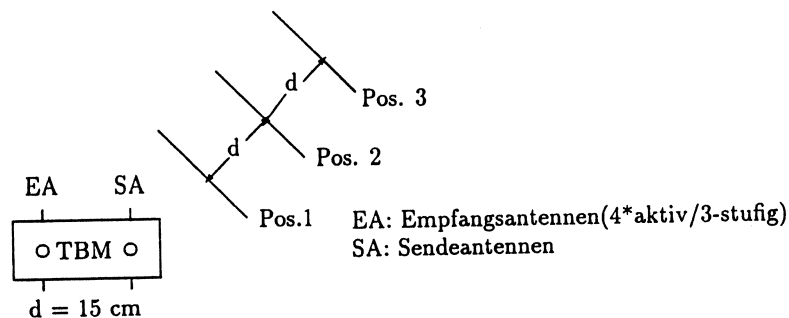


Durch die Anordnung von 4 gleichphasig gespeisten Sendeantennen vorn und 4 ebenfalls gleichphasig zusammengeführten Empfangsantennen hinten soll eine stärkere Bündelung in Richtung der Modellachse erreicht werden. Die Empfangsantennen sind als dreistufige aktive Antennen ausgelegt, um ein möglichst großes Signal zu erhalten, da der eingebaute Leistungsteiler und der "Leistungszusammenführer" resistiv aufgebaut sind. Die Durchgangsdämpfung der Teiler und Zusammenführer beträgt ca. 10 dB.

Position	Entfernung	Laufzeit	berechnete Entfernung zur Ref.ebene
1	15 cm	15.2 ns	Referenzebene
2	30 cm	16.2 ns	15 cm
3	45 cm	16.9 ns	25.5 cm

Der leere Bereich am Anfang der Diagramme ist auf die längeren Leitungen bei dieser Antennenanordnung zurückzuführen. Die Zuordnung der gemessenen Maxima ist nicht eindeutig, da ein zusätzliches Maximum vor dem eigentlich interessanten Maximum auftritt und dieses bei größerer Entfernung (45 cm) sogar stärker als das auszuwertende Maximum ist. Das zusätzliche Maximum liegt zeitlich vor der Referenzebene und kann deshalb nicht durch die Störung verursacht sein.

Messung 3b



Die gleiche Anordnung wird nun daraufhin untersucht, ob sich das Erkennungsvermögen des Modells bei einer schrägen Anordnung ändert.

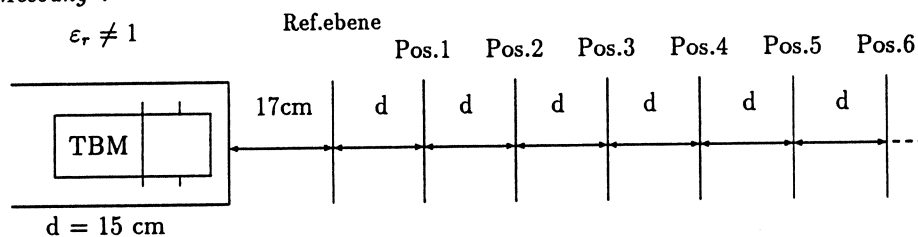
Position	Entfernung	Laufzeit	berechnete Entfernung zur Ref.ebene
1	15 cm	15.04 ns	Referenzebene
2	30 cm	15.9 ns	12.9 cm
3	45 cm	16.86 ns	27.3 cm

Die Anordnung von 4 gleichphasig gespeisten bzw. zusammengeführten Antennen auf dem Zylinder erfüllt nicht die in sie gestellten Erwartungen und wird deswegen nicht weiter untersucht. Die Maxima können nicht deutlich zugeordnet werden, da mehrere zusätzliche Nebenmaxima auftreten. Diese zusätzlichen Maxima lassen sich wahrscheinlich durch Mehrfachreflexionen zwischen Objekt und Antennen erklären. Die starke Verkopplung der Antennen untereinander ist nicht günstig bei der Erkennung von Objekten in größerer Entfernung.

Bild 39 Beispiele von Messresultaten der Modellversuche im freien Raum (Messungen 3a und 3b)

Messung 7

$$\epsilon_r \neq 1$$



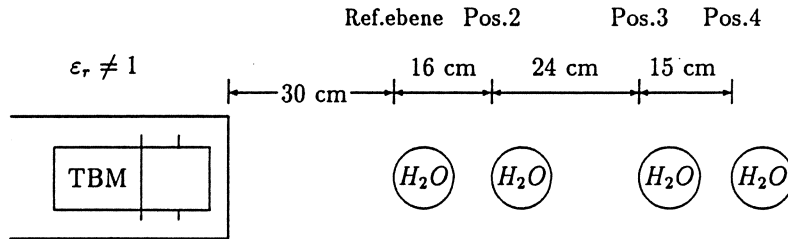
Nachdem nun die Ausbreitungsgeschwindigkeit im Sand bzw. das ϵ'_r des Sandes bekannt sind, können weitere Untersuchungen zur Detektierbarkeit von verschiedenen Objekten durchgeführt werden. In dieser Messung werden nun noch einmal die Reflexionen einer Blechplatte vermessen.

Position	Entfernung	Laufzeit	berechnete Entfernung zur Ref.ebene
1	17 cm	2.18 ns	Referenzebene
2	32 cm	3.92 ns	15.2 cm
3	47 cm	5.74 ns	31.1 cm
4	62 cm	7.44 ns	46.2 cm
5	77 cm	9.19 ns	61.3 cm
6	92 cm	10.82 ns	75.5 cm
7	107 cm	12.33 ns	88.7 cm
8	122 cm	14.30 ns	106.0 cm
9	137 cm	15.51 ns	116.6 cm

Wie aus den Meßwerten sehr deutlich zu sehen ist, kann mit der hier genutzten Antennenanordnung ein Blech auch in größerer Entfernung detektiert werden. Abweichungen > 2cm treten erst bei Entfernungen über 1m auf, das entspricht, bei einen Modellmaßstab von 1 : 50, einer Entfernung von 50m.

Bild 40 Beispiel von Messresultaten der Modellversuche im Sand (Messung 7)

Messung 8

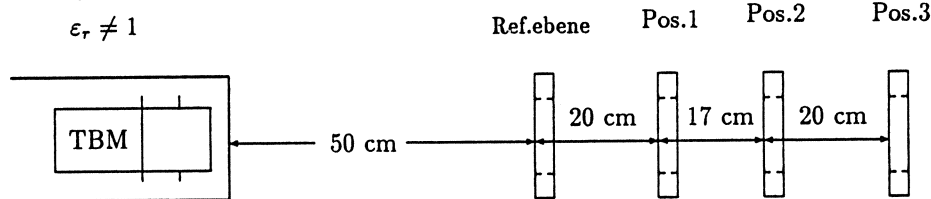


Bei dieser Messung wird Erkennbarkeit von Wassereinschlüssen im Sand untersucht. Dazu wird ein Plastikbeutel mit ca. 1/2 Liter Wasser im Sand vergraben. Es ergaben sich folgende Meßwerte:

Position	Entfernung	Laufzeit	berechnete Entfernung zur Ref.ebene
1	30 cm	3.69 ns	Referenzebene
2	46 cm	5.70 ns	17.6 cm
3	70 cm	7.91 ns	36.9 cm
4	85 cm	10.08 ns	55.9 cm

Die Reflexionen des Wassereinschlusses sind zwar schwächer als die einer Blechplatte, aber trotzdem deutlich erkennenbar. Auftretende Ungenauigkeiten in der Messung können darauf zurückzuführen sein, daß sich die Lage des Wasserbeutels nicht exakt bestimmen läßt, da er sich beim Vergraben verformt.

Messung 9



Nachdem die Wassereinschlüsse erkennbar sind, soll nun die Detektierbarkeit von Lufteinschlüssen untersucht werden. Da Styropor ein $\epsilon_r \approx 1$ hat, werden die Lufteinschlüsse durch einen Styroporring simuliert. Dieser Ring hat einen Außendurchmesser von 20 cm, einen Innendurchmesser von 10 cm sowie eine Dicke von 3 cm.

Position	Entfernung	Laufzeit	berechnete Entfernung zur Ref.ebene
1	50 cm	5.94 ns	Referenzebene
2	70 cm	8.03 ns	18.3 cm
3	87 cm	10.20 ns	37.2 cm
4	107 cm	11.86 ns	51.8 cm

Hier stellen sich bei der Ortsbestimmung des Ringes die gleichen Probleme wie bei den Wassereinschlüssen, die Abweichungen lassen sich also genauso erklären. Die Reflexionen sind etwa in derselben Intensität vorhanden wie bei Wassereinschlüssen, auch die Abnahme der gemessenen Maxima mit der Entfernung ist ähnlich.

Bild 41 Beispiele von Messresultaten der Modellversuche im Sand (Messungen 8 und 9)

Ein in 1m Entfernung stehender Reflektor wird dann nach $6.6 \cdot 10^{-9}$ s durch eine Maximum gekennzeichnet; dieses entspricht einer Laufstrecke von 2 m. Bei allen hier diskutierten Diagrammen handelt es sich um die Differenz zwischen einer Pulsantwort des Systems ohne Störstelle und der Antwort des Systems mit Störstelle. Durch diese Art der Messung kann man am deutlichsten die Maxima erkennen (Bild 38), welche durch die zu vermessende Störstelle verursacht werden. Die Auswertung der Laufzeit zu diesem Maximum ermöglicht nun eine Berechnung der Entfernung bis zu der Störung. Ein Beispiel für eine mögliche Anordnung (bei insgesamt 5 durchgeführten Messungen) und die Zusammenstellung der Resultate ist im Bild 39 dargestellt.

5.2.2 Messungen in Sand

Im Gegensatz zu den vorhergehenden Messungen wird jetzt in der großen mit Sand gefüllten Kiste gemessen, um das Verhalten der Antennen in einer inhomogenen Umgebung zu untersuchen. Es wird normaler Bausand verwendet, der durch längere Lagerung im Meßraum getrocknet wurde und dessen Verluste damit nicht mehr sehr hoch sind. Um die Ausbreitungsgeschwindigkeit zu berechnen, muß das ϵ_r des benutzten Sandes bestimmt werden. Dieses ist durch Ausnutzung der Laufzeitunterschiede in Sand und Luft zu berechnen. Als Beispiele sind die Messresultate dreier im Sand durchgeführter Versuche in den Bildern 40 und 41 dargestellt. Für die weiteren Resultate wird auf [24] verwiesen.

6. Zusammenfassende Beurteilung der Modellversuche

Die Entwicklung eines Abbildungssystems für Vorauserkundungen an einer Tunnelbrüst im Tunnelbau erfordert neben gründlichen theoretischen Vorarbeiten umfangreiche experimentelle Untersuchungen. Diese ausschließlich "vor Ort" durchzuführen, ist aus praktischen und ökonomischen Gründen völlig ausgeschlossen. Es bietet sich deshalb an zu überlegen, unter welchen Voraussetzungen Modellversuche durchgeführt werden können.

Im Schlussbericht [24] werden die geologischen Gegebenheiten untersucht. Es werden die Dielektrizitätskonstanten ϵ_r nach Real- und Imaginärteil bzw. der Verlustfaktor der häufig vorkommenden Gesteinsarten angegeben. Im Frequenzbereich oberhalb 1 MHz liegt der Realteil von ϵ_r zwischen 2 und 30, der Verlustfaktor zwischen sehr kleinen Werten ca. 10^{-4} und 0.01. Bei hohem Wassergehalt steigt der Verlustfaktor bis auf etwa 2 an.

Die Verluste dämpfen eine das Material durchdringende elektromagnetische Welle. Ihre Berechnung ist im Nahfeld einer geometrisch komplex aufgebauten Konfiguration nur mit großem theoretischen Aufwand möglich. Um mit geringen Mitteln einen Anhaltspunkt zu erhalten, wird die Dämpfung für den Fall einer ebenen homogenen Welle angegeben. Sie liegt für trockenes Gestein bei Frequenzen von 10 MHz bis 40 MHz auf eine Entfernung bis zu 50 Meter bei etwa 10 dB. Bei Gesteinen mit geringem Wassergehalt bewegt sich die Dämpfung zwischen 10 dB und 100 dB. Stark wasserhaltiges Gestein weist schon auf der geringen Entfernung von 5 m eine Dämpfung von über 100 dB auf.

Eine Inhomogenität im Gestein ist mit elektromagnetischen Wellen dann detektierbar, wenn sich die Ausbreitungseigenschaften für Wellen in der Inhomogenität von der für Wellen in der Umgebung unterscheiden und dadurch Reflexionen an der Grenzschicht auftreten. Auch hier muß wieder mit dem stark vereinfachenden Modell einer ebenen homogenen Welle, die senkrecht auf die Grenzschichten auftrifft, gearbeitet werden, um mit nicht zu großem Aufwand zu quantitativen

Aussagen zu kommen. Einige konkrete Beispiele werden durchgerechnet und diskutiert. Die Reflexionen sind besonders deutlich z.B. bei Wassereinschlüssen in trockenem Gestein, aber auch bei einer dünnen verlustarmen Schicht zwischen zwei stark verlustbehafteten Schichten.

Aus einfachen Überlegungen über die Ausbreitung eines Pulses im Gestein ergibt sich, daß das Auflösungsvermögen des Verfahrens, also die Genauigkeit, mit der eine Schicht vermessen werden kann, mit der Bandbreite des Systems zunimmt.

Für die Festlegung des Frequenzbereiches, in dem die Messungen durchgeführt werden können, ergeben sich deshalb zwei gegensätzliche Forderungen: Bei niedrigen Frequenzen ist die Eindringtiefe groß. Bei einer großen Bandbreite und damit hohen Frequenzen erhält man ein gutes Auflösungsvermögen. Es wird vorgeschlagen, in einem Frequenzband von etwa 10 MHz bis 70 MHz zu messen.

In der Elektrodynamik sind Modellmessungen exakt durchführbar, wenn man die Modellgesetze beachtet. Aufgrund verschiedener Überlegungen wird als günstigster Modellfaktor 50 festgelegt. Für die Modellmessungen geeignete Materialien werden in der Literatur angegeben. Es wird jedoch vorgeschlagen, sich die Materialien mit einfachen Mitteln selbst herzustellen.

Ein sehr wichtiger Teil des geplanten Systems sind die Antennen. Aufgrund des bei der Tunnelbohrmaschine (TBM) vorhandenen geringen Platzes können die Antennen nur klein im Vergleich zur Wellenlänge ausgeführt werden. In der Aufgabenstellung waren Rahmenantennen mit Ferritkern vorgeschlagen worden. Erste Messungen an einer Übertragungsstrecke mit Ferritantennen im Modellfrequenzbereich ergaben jedoch zum Teil so niedrige Übertragungsfaktoren, so daß der Signalausgang für eine Auswertung zu gering war. Um nicht zu riskieren, daß dieser Sachverhalt - falls er nicht rechtzeitig behoben werden könnte - den Fortgang der Untersuchungen ernsthaft gefährdet, wurden die Untersuchungen zu den Antennen umgehend auf alle prinzipiell in Frage kommenden Typen - Monopole, Rahmenantennen mit oder ohne Ferritkern - die sowohl als passive als auch als aktive Antennen betrieben werden, erweitert. Dabei erwiesen sich die Rahmenantennen (magnetische Dipole) als sehr geeignet sowohl für den Original- als auch für den Modellfrequenzbereich. Die Verwendung eines zusätzlichen Ferritkerns scheidet im letzten Fall zur Zeit noch aus, da die vorhandenen Ferritmaterialien oberhalb von etwa 300 MHz zu stark verlustbehaftet sind. Eine bisher nur als Kurzinformation vorliegende Mitteilung der Firma Lead (Maison Alfort, Frankreich) besagt jedoch, daß ein von ihr angebotener Ferrit bis 3 GHz einsetzbar sei. Für den Originalfrequenzbereich sind geeignete Ferritmaterialien preiswert vorhanden. Da die Abmessungen von Rahmenantennen mit Ferritkern deutlich kleiner gewählt werden können als ohne, sind erstere für den Originalfrequenzbereich als attraktive Lösung anzusehen.

Für die Modellmessungen wurde eine Rahmenantenne ohne Ferritkern mit einem Durchmesser von 23 mm und einer Windungszahl von 15 als die günstigste Lösung ausgewählt.

Als Modell für die Tunnelbohrmaschine wurde ein Metallzylinder mit dem Durchmesser 10 cm und der Länge 35 cm angefertigt. Je vier Rahmenantennen wurden an beiden Zylinderenden montiert. Das Meßkonzept beruht auf dem Einsatz des automatischen Netzwerkanalysators HP 8510 B, der mit Hilfe von Kalibrierprozeduren sehr präzise Messungen von Hochfrequenzsignalen bei hoher Dynamik gestattet. Angewendet wird das Prinzip des synthetischen Pulses, d.h. die Messung erfolgt zunächst für vorgegebene Frequenzpunkte. Durch eine geeignete Signalaufbereitung wird daraus eine Pulsantwort, also eine Darstellung im Zeitbereich, berechnet. Pulsform und Breite sind weitgehend beliebig wählbar, das Verfahren ist deshalb sehr flexibel einsetzbar. Da der Puls synthetisch erzeugt wird, sind - im Vergleich zu einem physikalisch erzeugten Puls - nur kleine Leistungen notwendig, um

ausreichende Reichweiten zu erhalten. Diese Tatsache ist wichtig beim Einsatz von Ferritmaterial, das bei hohen Antennenleistungen in der Sättigung betrieben werden würde.

Ziel der Messung im freien Raum war, eine optimale Anordnung der Antennen zu finden. Es ergab sich, daß nicht die zunächst vorgenommene Montage von je vier Sende- und Empfangsantennen an beiden Zylinderenden und deren gleichphasige Speisung am günstigsten ist, sondern daß nur zwei, sich am vorderen Zylinderende gegenüberliegenden Antennen, eindeutige Resultate liefern.

Für die Modellmessungen in verlustbehafteter Umgebung wurde eine $1 \times 1 \times 2 \text{ m}^3$ große Holzkiste mit Sand gefüllt und ein Rohr aus Plexiglas als Modell für die Tunnelröhre im Sand eingebettet. Als Inhomogenitäten wurden eine Blechplatte, eine Plastiktüte mit 0,5 l Wasser, ein Styroporring und ein PVC-Rohr (als Modell für eine Höhle) vermessen. Das Ziel der Untersuchung, nämlich zu zeigen, daß "in der im Zeitbereich dargestellten Verkopplung die Information über den Ort einer Inhomogenität im freien wie im verlustbehafteten Raum enthalten ist" wurde eindeutig erreicht.

In Schlussbericht [24] werden ferner einige Bemerkungen zum Entwurf eines Abbildungssystems gemacht. Diese ersten Überlegungen zeigen, daß die hier untersuchte Anordnung von Antennen auf dem Umfang der TBM als Grundlage für ein Abbildungsverfahren sehr geeignet ist.

ANHANG TEIL 2

Schlussbemerkungen und Ausblick des Experten

Dr. F. Caspers, CERN, Genf

Eine wesentliche Voraussetzung für den erfolgreichen Einsatz eines Georadars ist, dass die von der Antenne ausgesendeten elektromagnetischen Wellen im interessierenden Frequenzbereich hinreichend tief in das zu untersuchende Gestein eindringen können. In Einsatzbereichen nahe der Erdoberfläche werden häufig tonhaltige und/oder stark wasserhaltige Schichten angetroffen, in welchen elektromagnetische Wellen sehr stark gedämpft werden. So beträgt z.B. die Dämpfung in Lehm mit 20% Wassergehalt bei 30 MHz etwa 1500 dB bei einer Entfernung von 30 m. Folglich können in diesem Material Inhomogenitäten nur bis zu einem Abstand von wenigen Metern zur TBM detektiert werden. Dieser Sachverhalt zeigte sich deutlich bei Feldversuchen (insbesondere bei Messungen im Tunnel Wattwil). Die Situation ist jedoch wesentlich anders in elektromagnetisch schwach verlustbehafteten Gestein: Bei (feuchtem) Granit kann z.B. die Dämpfung -ebenfalls bei 30 Mhz und einer Entfernung von 30 m - nur etwa 8 dB betragen. Es sollte daher die Möglichkeit bestehen, grössere Wassereinschlüsse auch bei Entfernungen bis ca. 100 m deutlich zu detektieren. Bei den geplanten Alpen-Transversalen ist damit zu rechnen dass zu einem wesentlichen Anteil Gestein mit geringen elektromagnetischen Verlusten angetroffen wird.

Als erfolgversprechende Vorgehensweise zur Entwicklung des Georadars für eine Tunnelbohrmaschine in einem derartigen Einsatzbereich bieten sich Modellversuche an. Bei sorgfältiger Modellbildung lassen sich alle wichtigen Einflussgrössen im Labor und damit kostengünstig untersuchen. Wichtig ist vor allem die Konstruktion der Antennen. Nach dem jetzigen Erkenntnisstand eignet sich für die Integration in den Schild der TBM besonders die Form von Schlitzantennen. Derartige Schlitzantennen mit einer Länge von ca. 1 m erscheinen unter Berücksichtigung mechanischer Aspekte noch realistisch. Für eine gute Abstrahlung und Empfang elektromagnetischer Wellen wäre eigentlich eine Länge des Schlitzes von einer halben Wellenlänge im Gestein wünschenswert, aber auch mit kürzeren Antennen können recht gute Resultate erzielt werden. Die Anwesenheit des grossen Metallkörpers der TBM und des Schildes, der den Tunnelquerschnitt in der Nähe der Tunnelbrust fast vollständig ausfüllt, vermindert die bei Einzelantennen im leeren Tunnel beobachteten Vielfachreflexionen an den Tunnelwänden und sollte damit die Interpretation der Messdaten erleichtern.

Neben den Antennen mit entsprechenden Sendern und Empfängern ist ein elektronisches Datenverarbeitungssystem ein wesentlicher Baustein des Gesamtsystems. Gerade auf diesem Gebiet sind in letzter Zeit besondere Fortschritte zu verzeichnen. Zum einen werden leistungsfähige Rechenanlagen immer billiger und schneller und zum andern können neue Erkenntnisse und Erfahrungen auf dem Gebiet der Rekonstruktion abzubildender Strukturen (z.B. Computertomographie) genutzt werden.

Für ein mögliches weiteres Vorgehen, speziell im Hinblick auf die NEAT , kann man die folgenden Punkte in Betracht ziehen:

1. Sorgfältige Vorbereitung von Modellversuchen und feldtheoretische Begleitung dieser Messungen. Eine derartige Vorgehensweise ist beispielsweise bei der Entwicklung von Abbildungssystemen (Radar) auf Schiffen üblich und wird mit gutem Erfolg praktiziert. Es ist anzumerken ,dass die Skalierungsfaktoren für Schiffe und für eine TBM in einer vergleichbaren Grössenordnung liegen.
2. Durchführen von Versuchen an differenziert aufgebauten Modellen für die TBM. Im Modell wird hierbei mit Vorteil die Messtechnik der synthetischen Impulse angewendet, da die zu verarbeitenden Frequenzen wegen der Skalierung der Modelle im GHz-Bereich liegen. Es soll jedoch ausdrücklich darauf hingewiesen werden, dass aus mathematischer Sicht synthetische und reale Impulse als gleichwertig zu betrachten sind. Unterschiede in der Bewertung ergeben sich hauptsächlich aus messtechnischen Aspekten. Insbesondere ist die Frage, ob die Messtechnik an der realen TBM in der einen (synthetische Impulse) oder anderen Art (reale Impulse) auszuführen ist, nicht von vorneherein eindeutig zu beantworten. Im realen Fall liegt das Spektrum der verwendeten Signale etwa zwischen 1 und 50 MHz. Dies erlaubt die Verwendung schneller frei programmierbarer Funktionsgeneratoren für beliebige Signalformen des Sendesignals sowie digitaler realtime Speicheroszilloscope mit entsprechender Bandbreite im Empfängerzweig. Im Gegensatz zu Sendern und Empfängern in Bohrlöchern liegen hier praktisch keine Volumen- und Leistungsbegrenzungen vor.

Da es sicherlich das Ziel sein wird , während des Bohrbetriebes Radarmessungen auszuführen ohne die Motoren der TBM anzuhalten kann die sehr kurze Messzeit einer Realtimemessung auch bei schlechteren Signal/Rauschverhältnis Vorteile haben gegenüber einer Messung mit synthetischen Impulsen. Da eine im Betrieb befindliche TBM ständig die Position der Bohrmeissel ändert, sind auch die Strahlungseigenschaften der Antennen nicht zeitinvariant. Eine schlüssige Antwort auf diese Frage kann aber wohl nur im praktischen Betrieb gewonnen werden. Für die Auslegung der Antennen ist es im vorliegenden Fall gleichgültig, welches der genannten Messverfahren zur Anwendung gelangt, da auch bei hohen Impulsspitzenleistungen und Verwendung von Ferriten in den Antennen wegen der grossen Volumina keine Sättigungseffekte zu erwarten sind.

3. Ein wesentlicher Punkt bei der Konstruktion eines derartigen Radarsystems ist das Thema "elektromagnetische Verträglichkeit". Es steht zu erwarten, dass in der Nähe des Bohrkopfes nicht zu vernachlässigende Pegel von elektromagnetischen Störungen aller Art zu finden sind. Diese Störungen können zu Problemen in der Radarmessung führen, wenn sie im gleichen Frequenzbereich liegen, in dem der Empfänger arbeitet. Es ist daher empfehlenswert, Messungen der genannten Emissionen im praktischen Betrieb an vorhanden TBM durchzuführen und gegebenenfalls Überlegungen anzustellen, durch welche Massnahmen (Filter, Abschirmung etc) diese Störpegel reduziert werden können und in welchen Masse eine Reduktion mit akzeptablen Kosten ausführbar ist. Andererseits ist das Radarsystem seinerseits ein recht kräftiger Störsender, der absichtlich breitbandige Signale abstrahlt. Diese Signale können im Prinzip unerwünschte Schaltvorgängen in der Elektronik der TBM auslösen. Hier wäre zu untersuchen, welche Signalformen bei welchen Pegeln zu Problemen führen. Vermutlich wird der Störeinfluss von synthetischen Impulsen leichter zu kontrollieren sein als bei realen Impulsen, auch wenn die mittlere Sendeleistung in beiden Fällen gleich ist. In beiden Fällen dürfte die mittlere Sendeleistung jedoch in der Grössenordnung von 1 Watt liegen und damit auch kein Problem darstellen bezüglich der hochfrequenzmässigen Strahlenbelastung des Personals. Es könnten jedoch bei realen Impulsen in der Nähe der Antennen unter sehr pessimistischen Annahmen unzulässig hohe Berührspannungen entstehen (Annahme: Impulsspitzenleistung = 1KW).

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass als eine notwendige Bedingung für den sinnvollen Einsatz eines integrierten Radarsystems auf einer TBM geringe elektromagnetische Dämpfungswerte des umgebenden Gesteins gefordert werden. Dieser Sachverhalt lässt sich theoretisch ableiten und wurde auch durch Feldversuche untermauert. Es hat sich ebenfalls bei diesen Feldversuchen gezeigt, dass der Thematik "Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV)", die besonders in den letzten Jahren stark an Bedeutung gewonnen hat, besondere Aufmerksamkeit zuteil werden sollte. Insgesamt entsteht der Eindruck, dass bei sorgfältiger Koordination der erforderlichen Beiträge aus verschiedenen Fachgebieten (Mechanik der TBM, Hochfrequenzmesstechnik, Feldtheorie, Datenverarbeitung und EMV) und unter Berücksichtigung der bisher gewonnen guten und schlechten Erfahrungen eine erfolgreiche Entwicklung eines integrierten TBM Radars möglich erscheint.

ANHANG TEIL 3

Literaturverzeichnis

- [1] Morales Dr., Mechanical drive of a 26 km tunnel for a hydroscheme in Guatemala, Congress on Tunnelling, Düsseldorf, 1981
- [2] Babendererde S., Maschineller Vortrieb eines 26 km langen Tunnels unter schwierigen Bedingungen, Rock Mechanics, Suppl.12, 1982
- [3] Egger P., Ohnuki T., Kanoh Y., Bau des Nakayama-Tunnels, Rock Mechanics, Suppl. 12, 1982
- [4] Kovari K., Weber J., Risikoverminderung bei der Spritzbetonbauweise im U-Bahnbau München, Sicherheit und Risiken bei Untertagebauwerken, Proc. Int. Symp., Zürich, 1991
- [5] Frey-Baer O., Ein neuer Schritt in der Mechanisierung des Stollen- und Tunnelbaus, Schweiz. Bauzeitung, Heft 39, 1965
- [6] Kellerhals P., Geologie des Lötschberg-Basistunnels, SIA Dokumentation D 085, 1992
- [7] Blümling P., Cosma C., Gelbke G., Cassell B., Korn M., Geophysical methods for the detection of discontinuities ahead of a tunnel face, Technical Report 90-07, Nagra, 1992
- [8] Sattel G., Frey P., Amberg R., Geophysikalische Vorauserkundung von Schwächezonen, Schweizer Ingenieur und Architekt, Nr. 40, 1991
- [9] Nord G., Olsson P., By T.L., Probing ahead of TBMs by geophysical means, Tunnelling and Underground Space Technology, Vol.7, 1992
- [10] Jenni J.P., Überprüfung eines Druckstollens mittels Georadar und Thermographie, Felsbau 6, Nr.1, 1988
- [11] Kraus A., Die Entwicklung des GDH-Verfahrens, Tagungsband der 6. Nationalen Tagung für Ingenieurgeologie, Aachen, 1987
- [12] Nishitake, S., Advanced technology realize high-performance earth pressure balanced shield, Symp. on Underground Crossings for Europe, Lille, Balkema, Rotterdam, 1990
- [13] Blümling P., Erkennung von Störungen und Diskontinuitäten im Vor- und Umfeld eines Stollens mit geophysikalischen Methoden, 1990 [Bericht beim IGT, ETHZ]
- [14] Cook, J.C., A study of radar exploration of coalbeds, NTIS Rep. PB 207 362, 1971
- [15] Schwarz S.D., Geophysical measurements related to tunnelling, Proc. Rapid Exc. Tunnelling Conference, Vol.1, Chapter 15, 1972
- [16] Holser W.T. et al., Radar logging of a salt dome, Geophysics, V 37, 1972
- [17] Morey R.M., Continuous subsurface profiling by impulse radar, Proc. Engineering Foundation Conference, New Hampshire, 1974
- [18] Cook J.C., Radar transparencies of mine and tunnel rocks, Geophysics, Vol. 40, 1975
- [19] Kathage A., Anwendung geophysikalischer Methoden zur Erkundung ehemaliger Betriebsgelände, Gas/Erdgas, 132, Heft 1, 1991

- [20] Caspers F., Fernerkundungssystem bei Tunnelbohrmaschinen, Expertenbericht, 1989 [Bericht beim IGT, ETHZ]
- [21] Caspers F., Remote sensing system for tunnel boring machines, CERN/PS 90-54(OP), 1990
- [22] Hugel J., Neukomm P., Vorauserkundung an der Ortsbrust im Tunnelbau, Projektbeschreibung, ETH Zürich, 1989 [Bericht beim IGT, ETHZ]
- [23] Kermerait R.C., Griffin J.N., Synthetic pulse radar, tunnel detection proceedings, 3rd Int. Symp. Golden, Colorado, 1988
- [24] Hansen V., Modellmessungen zur Vorauserkundung an der Tunnelbrust im Tunnelbau, Forschungsauftrag der FGU/SIA, Schlussbericht, 1991 [Bericht beim IGT, ETHZ]
- [25] Dressler J., Einsatz von zerstörungsfreien Untersuchungsmethoden bei der Zustandsbeurteilung von Tunnelauskleidungen, Forschung + Praxis Nr. 33, 1989
- [26] Jenni J.P., Stand der Technik bei der flächenhaften Erfassung des baulichen Zustandes von Tunnelbauwerken, EVED, Bundesamt für Strassenbau, Forschungsauftrag 59/88, 1990
- [27] Pottecher G., GPR tests in the Leissigen tunnel, Entwurf des Schlussberichtes, 1990 [Bericht beim IGT, ETHZ]
- [28] Niva B., Borehole radar tests in the Wattwil tunnel with the ABEM Ramac System, Report No. MT 91/R BN/415, 1991 [Bericht beim IGT, ETHZ]
- [29] Parkhomenko, E.I., Electrical properties of rocks, Plenum Press, New York, 1967
- [30] Robbins, J.R., Large diameter hard rock boring machines: state of the art and developments in view of alpine base tunnels, 40th Geomechanics Colloquy at Salzburg, 1991
- [31] Klein A., Untersuchung der dielektrischen Eigenschaften feuchter Steinkohle im Hinblick auf die Anwendbarkeit des Mikrowellenverfahrens zur Wassergehaltsbestimmung. Dissertation, RWTH Aachen, 1978
- [32] Hipp, J.E., Soil electromagnetic parameters as a function of frequency, soil density and moisture, Proc. IEEE 62, 1974