

Eidgenössisches Verkehrs- und Energiewirtschaftsdepartement
Bundesamt für Strassenbau

Forschungsauftrag 59/88 auf Antrag der
SIA-Fachgruppe für Untertagbau FGU

Stand der Technik bei der flächenhaften
Erfassung des baulichen Zustandes von
Tunnelbauwerken

Etat des connaissances sur la technique
du levé de surface pour apprécier l'état
d'un tunnel

Dr.phil.nat. Jean-Pierre Jenni, Geologe SIA
Holinger AG, Aarau

Juni 1990

INHALTSVERZEICHNIS

	ZUSAMMENFASSUNG	1
	RESUME	3
1.	EINLEITUNG	5
2.	PROBLEMSTELLUNG	7
2.1	Problemstellung aus bautechnischer Sicht	7
2.2	Problemstellung aus untersuchungstechnischer Sicht	9
3.	BESCHREIBUNG MOEGLICHER UNTERSUCHUNGSMETHODEN	12
3.1	Ueberprüfung der Qualität der Tunnelausklei- dung	12
3.1.1	Allgemeines	12
3.1.2	Die visuelle Ueberprüfung	13
3.1.3	Fotografische und andere Aufnahmen im Wellen- längenbereich des sichtbaren Lichtes	13
3.1.4	Ultraschall- und seismische Messungen	14
3.1.4.1	Methode	14
3.1.4.2	Durchschallungsmessungen	15
3.1.4.3	Messungen an der Oberfläche der Stollenaus- kleidung	17
3.1.5	Geoelektrische Messungen	18
3.1.5.1	Methode	18
3.1.5.2	Mögliche Anwendungen im Tunnel	19
3.1.6	Georadar	20
3.1.6.1	Methode	20
3.1.6.2	Anwendung im Tunnel	21
3.1.7	Thermographie	23
3.1.7.1	Methode	23
3.1.7.2	Anwendung im Tunnel	24

3.1.8	Uebrige Methoden	27
3.1.8.1	Gasmessungen	27
3.1.8.2	Radiometrische Methoden	27
3.2	Suche von Hohlräumen, mechanischen Schwachstellen und Wasserwegsamkeiten im Grenzbe- reich von Auskleidung und Ausbruch	28
3.2.1	Allgemeines	28
3.2.2	Ultraschall- und seismische Messungen	29
3.2.3	Geoelektrische Messungen	30
3.2.4	Georadarmessungen	31
3.2.5	Thermographie	31
3.3	Ermittlung von Deformationen	32
3.3.1	Allgemeines	32
3.3.2	Konventionelle optische Methoden	32
3.3.3	Fortlaufende Vermessung	33
4.	ENTWICKLUNGSWUENSCHEN UND ENTWICKLUNGSMOEG- LICHKEITEN	35
4.1	Allgemeines	35
4.2	Methoden für eine erste, übersichtsmässige Bestandesaufnahme	35
4.3	Spezifische, problemorientierte Untersuchungs- methoden	36
4.3.1	Erfassen der Betonqualität mittels geoelektri- scher Methoden	36
4.3.2	Erfassen der Betonqualität mittels seismischer Methoden (einschliesslich Ultraschall)	37
4.3.3	Erfassen der Betonqualität mittels elektromag- netischer Methoden	38

4.3.4	Erfassen von Deformationen	39
	DANK	40
	LITERATURVERZEICHNIS	41
	ANHANG	A- 1
	(Liste von Institutionen, die sich mit den im Bericht erwähnten Untersuchungsmethoden beschäftigen)	

FIGURENVERZEICHNIS

- Figur 1: Einige typische Tunnel- und Stollenquerschnitte
- Figur 2: Einige schematische Auskleidungstypen
- Figur 3: Scanningaufnahme im Wellenlängenbereich des sichtbaren Lichtes
- Figur 4: Mögliche Anordnung von Sender und Empfänger bei seismischen und Ultraschallmessungen
- Figur 5: Mikroseismische Prüfung der Betonqualität
- Figur 6: Georadarausrüstung
- Figur 7: Georadarmessung in einem Wasserstollen
- Figur 8: Ausschnitt einer Georadaraufnahme
- Figur 9: Ausrüstung für Scanningaufnahmen
- Figur 10: Scanningaufnahme im Infrarotbereich
- Figur 11: Auswertung einer Scanneraufnahme im Infrarotbereich (Thermographie)
- Figur 12: Fortlaufende Deformationsmessung
- Figur 13: Zusammenfassung der verschiedenen Untersuchungsmethoden und der Anwendungsziele bei verkleideten Tunneln und Stollen

ZUSAMMENFASSUNG

Angesichts der steigenden Zahl und der zunehmenden volkswirtschaftlichen Bedeutung der Tunnel- und Stollenbauwerke in einer industrialisierten Gesellschaft, wird die Gewährleistung der Sicherheit und Verfügbarkeit dieser Anlagen zu einer wichtigen Aufgabe ihrer Betreiber. Periodische Zustandskontrollen sind dazu unerlässlich. Um den damit verbundenen Unterbruch der Nutzung und die sich daraus ergebenden Kosten und Umtriebe möglichst gering zu halten, sind rasche, weitgehend automatisierte Untersuchungstechniken gefragt, die den baulichen Zustand eines Tunnels zuverlässig und möglichst grossflächig erfassen. Entsprechende, in der Praxis bewährte Untersuchungsmethoden bestehen erst zum Teil, doch gibt es viele interessante Ansätze, die bei weiterer und gezielter Entwicklung die erwähnten Anforderungen erfüllen könnten.

Der vorliegende Bericht hat zum Ziel, über die bereits vorhandenen technischen Möglichkeiten und Erfahrungen Aufschluss zu geben sowie auf erfolgversprechende Entwicklungen und Forschungsmöglichkeiten hinzuweisen.

Der Bericht ist wie folgt in vier Abschnitte und einen Anhang gegliedert:

Der erste Abschnitt befasst sich mit Auftrag, Ziel und Zweck dieser Arbeit.

Im zweiten Abschnitt wird die Problemstellung erläutert und dargestellt, dass je nach Verwendungszweck bzw. Ausführungsweise des Bauwerks die Untersuchungsziele und damit die anzuwendenden Untersuchungsmethoden unterschiedlich sein können. So sind einerseits Techniken gesucht, die erlauben, instabile Stellen, Wasserzirkulationen, Materialfestigkeiten etc. möglichst qualitativ und quantitativ zu erfassen, andererseits aber auch bei sehr unterschiedlichen Dimensionen der Bauwerke und verschiedenartiger Beschaffenheit der Tunnelwände und des dahinterliegenden Gebirges zu funktionieren haben.

Die Vielfältigkeit des Untersuchungsobjektes "Tunnel" und die unterschiedlichen Untersuchungsziele führen dazu, dass bei einer umfassenden Zustandsüberprüfung mehrere Methoden angewandt werden müssen. Die meisten der in Frage kommenden Techniken sind identisch mit solchen, die in der Geophysik eingesetzt werden, wo in ähnlicher Weise Informationen über Aufbau, Struktur und Materialeigenschaften des geologischen Untergrundes gewonnen werden. Ansätze und Anregungen für

neuartige Tunneluntersuchungsmethoden finden sich ferner in der Medizinalphysik (Computertomographie) und Vermessungstechnik.

Im dritten Abschnitt des Berichtes werden die heute bekannten Untersuchungsmethoden beschrieben d.h. Messverfahren, Arbeitsweise sowie Vor- und Nachteile der Methode erläutert. Behandelt werden u.a.:

- Visuelle Ueberprüfung und fotografische Aufnahmen
- Ultraschall- und seismische Messungen
- Geoelektrische Messungen (Widerstands- und Spannungsmessungen)
- Georadar
- Thermographie
- Gasmessungen
- Radiometrische Messungen

Mit Georadar sowie Scanneraufnahmen im Wellenbereich des sichtbaren Lichtes (Fotografie) und des Infrarots (Thermographie), stehen heute bereits Techniken zur Verfügung, die den gestellten Zielen hinsichtlich der flächenhaften Erfassung des baulichen Zustandes eines Tunnelbauwerks recht nahe kommen. Insbesondere die Kombination der drei Methoden stellt heute das wohl beste und zweckmässigste Vorgehen dar, da es einerseits eine vollständige, flächige Rundumaufnahme der Tunnelwand gibt, andererseits auch ergänzende, detaillierte Aufnahmen in Form von Schnitten durch die Tunnelwand und den dahinterliegenden Bereich liefert.

Im vierten Abschnitt des Berichtes wird auf die Entwicklungswünsche und -möglichkeiten eingegangen. Georadar und die Scannertechnik weisen heute schon einen hohen technischen Stand auf und können als weitgehend ausgereift bezeichnet werden. Die andern Methoden weisen indessen ein Entwicklungspotential auf, das zumindest sorgfältig überprüft werden sollte. Möglichkeiten scheinen bei der Verbesserung und Erweiterung bestehender Messtechniken, aber auch bei der Schaffung neuer Apparaturen gegeben zu sein. Im Vordergrund stehen vor allem Verfahren, die geoelektrische oder seismische bzw. akkustische, flächenhafte Messungen erlauben. Schliesslich bieten sich noch reichlich Entwicklungsmöglichkeiten im Bereiche der Datenauswertung und Datenverarbeitung an.

Im Anhang zu diesem Bericht finden sich einige Adressen von Firmen und Institutionen, die sich mit den besprochenen Methoden in der Praxis und Forschung beschäftigen.

RESUME

Etant donné le nombre croissant des ouvrages du type galerie et tunnel et leur importance politico-économique grandissante dans une société industrielle, la garantie relative à la sécurité et à la disponibilité de ces installations devient une tâche primordiale pour leurs exploitants. A cet effet, des contrôles périodiques de l'état de l'ouvrage sont indispensables. Afin de réduire au minimum l'interruption du fonctionnement ainsi que les frais et les pertes de temps qui en découlent, on exige des techniques rapides et en grande partie automatisées qui relèvent de manière fiable et à grande échelle l'état du tunnel du point de vue construction. Des méthodes d'auscultations correspondantes et qui ont fait leurs preuves dans la pratique n'existent qu'en partie, mais on constate des possibilités intéressantes qui pourraient, suite à un développement subséquent et intensif, remplir les conditions mentionnées.

Le rapport présent a pour but de rendre compte des possibilités et des expériences techniques déjà existantes et veut également signaler les développements prometteurs en cours. Le rapport est partagé en quatre sections et un appendice, soit:

Une première section traitant du mandat, de l'objectif et du but de ce travail.

Dans la seconde section, il est question de présenter et d'illustrer les données du problème, c'est-à-dire de formuler que selon l'utilisation, respectivement la construction de l'ouvrage, les objectifs de l'investigation et donc les méthodes d'examen à mettre en oeuvre pourront diverger. On cherche donc d'une part des techniques qui permettent de reconnaître, par rapport à la qualité et à la quantité, les emplacements peu stables, la circulation de l'eau, la solidité du matériau etc. D'autre part, ces techniques sont sensées fonctionner aussi en présence d'ouvrages de dimensions très différentes et de parois de tunnels ou de galeries de matériau très variable ainsi que par rapport à la grande multiplicité de la roche se trouvant à l'arrière-plan. La large palette de l'objet "tunnel" à l'examen et les différents objectifs d'investigation nécessitent plusieurs méthodes lors d'un examen total de sa construction. La plupart des techniques envisageables sont identiques avec celles qui sont utilisées en géophysique, où on obtient de manière semblable des informations quant à la structure, aux schistes et les caractéristiques des matériaux du sous-sol géologique. Dans le domaine de la physique médicale (tomographie par ordinateur) et les techniques utilisées en

géodésie, on trouve en outre des amorces de nouvelles méthodes pour l'auscultation des tunnels.

Dans la troisième section du rapport, il est question de la description des méthodes d'investigation connues à ce jour tels que les procédés de mesurage, la technique de travail utilisée ainsi que les avantages et les désavantages de la méthode. Sont abordés entre autres:

- L'examen visuel et les prises de vue (photos)
- La prospection sismique et à ultra-son
- Les mesures géoélectriques (résistance et tension)
- Le géoradar
- La thermographie
- Les analyses des gaz naturels
- Les mesures radiométriques

Avec le géoradar ainsi qu'avec les prises de vue au scanner dans la bande de fréquence de la lumière visible (photographie) et l'infrarouge (thermographie), on dispose aujourd'hui déjà de techniques qui se rapprochent passablement des objectifs fixés par rapport à l'auscultation en surface de l'état de la construction d'un tunnel. La combinaison des trois méthodes représente aujourd'hui certes le procédé le meilleur et le plus judicieux, étant donné qu'il permet d'une part une prise de vue circulaire complète de la surface de la paroi du tunnel, d'autre part, également, des prises de vue détaillées sous forme de coupes à travers la paroi du tunnel et la roche se trouvant à l'arrière-plan.

Dans la quatrième section du rapport, il est question des vœux et possibilités concernant le développement des techniques. Le géoradar et la technique du scanner ont déjà atteint un stade de développement élevé et peuvent être taxés de mûrs. Les autres techniques présentent par contre un potentiel de développement qui devrait au moins être consciencieusement réexaminé. On entrevoit des possibilités surtout dans le domaine de l'amélioration et de la multiplication des techniques de mesurage déjà existantes, mais aussi en ce qui concerne le développement de nouveaux appareils. Au premier plan, on pense surtout aux procédés qui permettent des mesures géoélectriques ou sismiques / acoustiques. En fin de compte, on dispose encore d'un large potentiel de développement dans le secteur traitement et dépouillement des données.

En annexe à ce rapport, on trouvera quelques adresses de maisons et d'institutions qui s'occupent des méthodes mentionnées tant dans la pratique que dans la recherche.

1. EINLEITUNG

Verbesserte Bautechniken einerseits sowie gesteigerte Kapazitäts- und Umweltschutzbedürfnisse andererseits führen zu einer ständig wachsenden Zahl von Tunnelbauwerken und dadurch auch zu einer zunehmenden Bedeutung dieser Transportwege verschiedenster Güter für die Volkswirtschaft. Der Sicherheit und Verfügbarkeit der Tunnelbauten ist folglich ein hoher Stellenwert zuzuordnen. Damit ersteres auch gewährleistet werden kann, sind periodische Kontrollen unerlässlich; viele ältere Bauwerke bedürfen überdies einer gründlichen Ueberprüfung ihres physischen Zustandes, die mitunter als Entscheidungsgrundlage für eine Sanierung oder gar einen Neubau dient. Auch bei der Abnahme eines neu erstellten Bauwerkes ist die über eine visuelle Inspektion hinausgehende, dokumentarisch festgehaltene Erfassung des Ist-Zustandes im Sinne einer Qualitätskontrolle, aber auch als Vergleichsbasis für spätere periodische Kontrollen sehr wünschenswert.

Die Dimensionen und die Bedeutung vieler Tunnelbauwerke verlangen nach raschen und weitgehend automatisierten Untersuchungstechniken, die den baulichen Zustand eines Tunnels zuverlässig und möglichst grossflächig erfassen. Entsprechende Techniken sind bis anhin noch wenig, häufig auch im Rahmen anderer Fragestellungen eingesetzt worden. Ausgereifte, in der Praxis bewährte Untersuchungsmethoden bestehen erst teilweise, doch gibt es viele interessante Ansätze, die bei gezielter Entwicklung die erwähnten Anforderungen erfüllen könnten.

Ein Fachartikel über die Ueberprüfung eines Druckstollens mittels neuer Methoden /1/ führte dank der Anregung und den Bemühungen des Präsidenten der SIA-Fachgruppe für Untertagebau, Herr Professor K.Kovari, zur Beauftragung der HOLINGER AG durch das Bundesamt für Strassenbau, einen Bericht über den Stand der Technik hinsichtlich flächenhafte Untersuchung von Tunnelbauwerken zu verfassen, der 1989 erarbeitet wurde und hiermit vorgelegt wird. Als Sachbearbeiter und Autor zeichnet Dr. J.P. Jenni.

Das Ziel des Berichtes ist, über die bereits vorhandenen technischen Möglichkeiten und Erfahrungen Aufschluss zu geben sowie auf erfolgsversprechende Entwicklungen und Forschungsmöglichkeiten hinzuweisen. Ferner soll eine Liste von Personen und Institutionen,

die sich mit dem Problem befassen, Hinweise darüber geben, an wen man sich bei weitergehenden Fragen wenden kann.

Die gestellte Aufgabe bestand im wesentlichen in einer Literaturanalyse, die durch zahlreiche Befragungen und Erkundigungen ergänzt wurde.

Nebst der Zusammenfassung weist der Bericht einen in 4 Abschnitte gegliederten Hauptteil sowie einen Anhang auf.

Der erste Abschnitt entspricht dieser Einleitung.

Im zweiten Abschnitt wird die Problemstellung erläutert und insbesondere darauf hingewiesen, dass je nach Verwendungszweck bzw. Ausführungsweise des Tunnels oder Stollens, die Untersuchungsziele und damit auch die anzuwendenden Untersuchungsmethoden unterschiedlich sein können.

Im dritten Abschnitt werden die heute bekannten Untersuchungsmethoden kurz beschrieben d.h. Messverfahren, Arbeitsweise sowie Vor- und Nachteile der Methode erläutert.

Im vierten Abschnitt wird dargelegt, welche Techniken zukunftssträftig oder entwicklungswürdig erscheinen und wo noch Wünsche seitens des Anwenders offen stehen.

Der Anhang schliesslich enthält einige Adressen von Firmen und anderen Institutionen, die mit dem Thema in Beziehung stehen. Aus naheliegenden Gründen kann dieser Anhang nicht vollständig sein und nur einige Hinweise liefern.

2. PROBLEMSTELLUNG

Grundsätzlich geht es beim vorliegenden Problem um die Erfassung des baulichen Zustandes eines Tunnelbauwerkes. Das Ziel und die Methode der Untersuchung können jedoch in den einzelnen Fällen unterschiedlich sein und hängen von Zweck, Alter und Art (Ausführungsweise, Durchmesser) des Tunnels ab, wie nachstehend zu ersehen ist.

2.1 Problemstellung aus bautechnischer Sicht

Bei älteren Verkehrsbauten, insbesondere Bahntunneln, steht die Untersuchung der Stabilität des Bauwerkes im Vordergrund /2/. Im Falle eines unverkleideten Tunnels ist z.B. zu überprüfen, ob der Fels aufgelockerte oder geschwächte Stellen aufweist, die abstürzen könnten. Bei Tunnelröhren mit Bruchstein- oder Backsteinauskleidung richtet sich das Augenmerk auf Schwachstellen wie Hohlräume und fortdauernde Auswaschungen hinter der Auskleidung oder auf ungenügenden Verbund zwischen Fels und Auskleidung. Die generelle Festigkeit der Auskleidung (z.B. Schwächung infolge von Rissen) kann ebenfalls Gegenstand einer Untersuchung sein. Wasserprobleme, d.h. Wassereintritte in den Tunnel, sind insofern von Bedeutung, als man heute auch in Bahntunneln trockene Verhältnisse anstrebt. Solche Stellen sind jedoch im allgemeinen leicht erkennbar und erfordern in der Folge auch keine aufwendigen Untersuchungen, es sei denn, es lägen besondere Verhältnisse vor.

Jüngere Tunnelbauten die dem Verkehr dienen, weisen meist eine Beton- oder Spritzbetonauskleidung auf. Bezüglich der Untersuchung der Stabilität solcher Bauwerke verhält sich die Sachlage gleich wie bei den alten Bauten, hingegen ist die Notwendigkeit solcher Abklärungen heute noch eher selten und auf Sonderfälle beschränkt, wie etwa im Falle eines Lüftungsschachtes mit starker Rissbildung /3/. An Bedeutung zunehmend sind indessen Wasserprobleme und zwar paradoxerweise in abgedichteten Tunnelröhren. Vor allem bei Bauwerken aus der Frühzeit der Einführung der Zweischalenbauweise mit einer Abdichtung (Anstrich, Epoxiharzlage, Kunststoffolie) zwischen den Betonringen, machen sich vermehrt mit der Zeit unerwünschte Wasseraustritte infolge mangelhafter Ausführung oder Alterserscheinungen bemerkbar. Da die undichten Stellen in der Abdichtung

nur in den seltensten Fällen örtlich mit den im Tunnel ersichtlichen Wasseraustrittsstellen identisch sind, wird die Sanierung solcher Stellen zu einer sehr schwierigen und aufwendigen Sache. Die genaue Kenntnis der Lage der Leckstellen könnte dazu beitragen, diesen Aufwand massgebend einzuschränken.

Bei hydraulischen Bauten wie Druckstollen, Ueberleitstollen, Sammelstollen etc., die verkleidet oder unverkleidet sein können, ist neben der Stabilität des Bauwerkes auch seine Dichtigkeit von Interesse. Dabei steht nicht primär die Lokalisierung von Wassereintrittsstellen, die im allgemeinen leicht erkennbar sind, sondern jene der Austrittsstellen d.h. Orte wo Wasserverluste infolge undichter Stollenauskleidung und hoher Gebirgsdurchlässigkeit auftreten, im Vordergrund. Bei Bauwerken, die 50 und mehr Jahre alt sind, können genauere Auskünfte hinsichtlich Festigkeit und Durchlässigkeit der gemauerten oder betonierten Auskleidung auch als Entscheidungsgrundlage für eine tiefgreifende Sanierung oder einen Neubau erforderlich sein.

Ein Problem, das sowohl bei hydraulischen Stollen wie bei Verkehrstunneln unangenehme Folgen haben kann, ist das Auftreten von Deformationen des Tunnelquerschnittes. Diese können ihre Ursache in quellendem Gebirge (z.B. Hauensteintunnel der SBB in Mergel-/ Gipsschichten, /4/), instabilen Untergrundverhältnissen (Setzungen, Rutschungen) oder tektonischen Bewegungen (in sehr bescheidenem Ausmass z.B. im Gotthardgebiet /5/) haben.

Zusammenfassend sind aus bautechnischer Sicht Untersuchungsmethoden gesucht, die erlauben, folgende Zustände und Probleme möglichst qualitativ und quantitativ zu erfassen:

- o Lockere, geschwächte Felspartien in unverkleideten Stollen und Tunneln
- o Hohlräume und Auswaschungen hinter der Tunnelauskleidung
- o Ungenügender Verbund zwischen Fels und Tunnelauskleidung
- o Risse und mechanische Schwächungen in der Auskleidung bzw. Bestimmung der Festigkeit (Qualität) derselben

- o Wasserzirkulation (Wasserwegsamkeiten) hinter der Auskleidung
- o Leckstellen in der Abdichtungsschicht bei Zweischalenauskleidungen
- o Deformationen des Tunnelquerschnittes

2.2 Problemstellung aus untersuchungstechnischer Sicht

Tunnel und Stollen können sehr unterschiedliche Dimensionen und Querschnitte aufweisen. Ihr Durchmesser reicht von knapp begehbar (< 2 m) bis 15 m oder mehr, und ihr Querschnitt kann kreisförmig, hufeisenförmig, schmal und hoch oder nahezu rechteckig sein (Fig. 1). Die Ausbildung der Tunnelwände kann rau und unregelmässig (unverkleideter Sprengausbruch), rau und gleichmässig rund (gefräster, unverkleideter Ausbruch) oder glatt und gleichmässig (gefräster oder gesprengter Ausbruch mit Betonauskleidung) sein, wie in Fig. 2 schematisch dargestellt ist. Die Stärke der Tunnelauskleidung schwankt von Null bis über 1 m (z.B. bei verstärkten Sohlen) und die Auskleidung selbst kann ein- oder mehrschichtig sein sowie aus einem oder mehreren Materialien bestehen, die dann meist noch unterschiedliche physikalische Eigenschaften aufweisen. Schliesslich können in den Betonwänden auch Stahlbauteile der provisorischen Ausbruchssicherung, Armierungen, Spannkabel und andere Objekte eingebettet sein.

Bei Strassentunneln sind die Wände ausserdem gelegentlich mit Blenden oder Keramikplatten versehen und bei grösseren Tunnelbauten finden sich im Kalotten- wie Sohlbereich oft umfangreiche Installationen, die durch konstruktive Massnahmen vom eigentlichen Verkehrsraum getrennt sind.

Bei Bahntunneln und hydraulischen Stollen besteht eine weitere Beeinträchtigung der Untersuchungen durch schlechte Lichtverhältnisse (keine feste Beleuchtung), Wassereintritte (vereinzelt oder in Massen) sowie durch hohe Luftfeuchtigkeit. Hinderlich wirkt sich in Bahntunneln auch der Geleisekörper und die Oberleitung aus.

Zieht man diese Vielfältigkeit des Untersuchungsobjektes "Tunnel" in betracht, so erscheint es naheliegend und verständlich, dass es für die gestellte Aufgabe nicht eine allgemein anwendbare Untersuchungsmethode

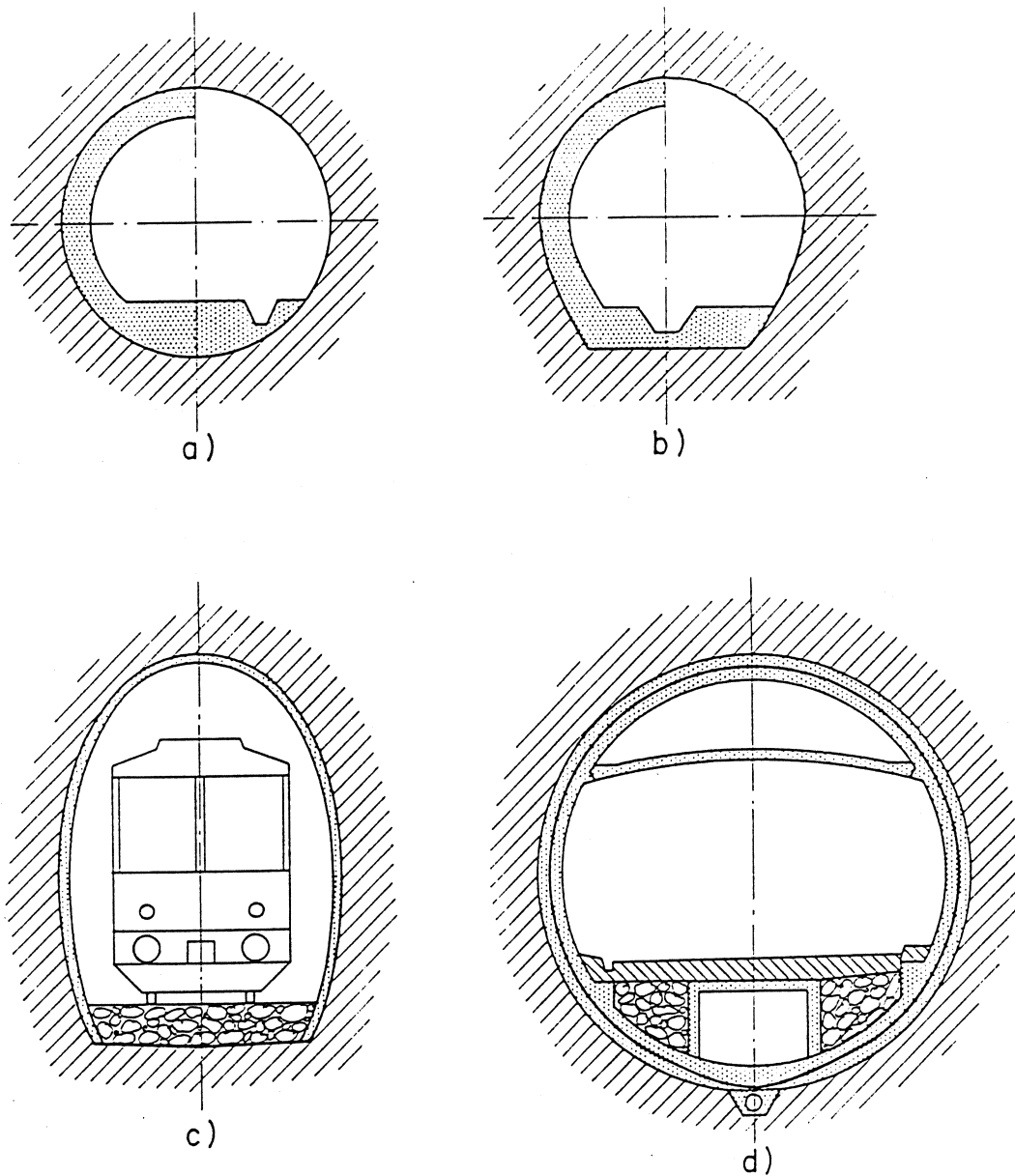


Fig. 1 Einige typische Tunnel- und Stollenquerschnitte

- a) Kreisrund, gefräst, verkleidet/unverkleidet, (Druck- und/oder Ueberleitstollen)
- b) Hufeisenform, gesprengt, verkleidet/unverkleidet (Druck- und Ueberleitstollen, Strassentunnel)
- c) Hohe, schlanke Form, gesprengt oder mit Teilschnittmaschine gefräst (Bahntunnel)
- d) Kreisrund, gefräst oder gesprengt (Autobahntunnel mit nahezu rechteckigem Fahrbahnraum und verschiedenen Abtrennungen)

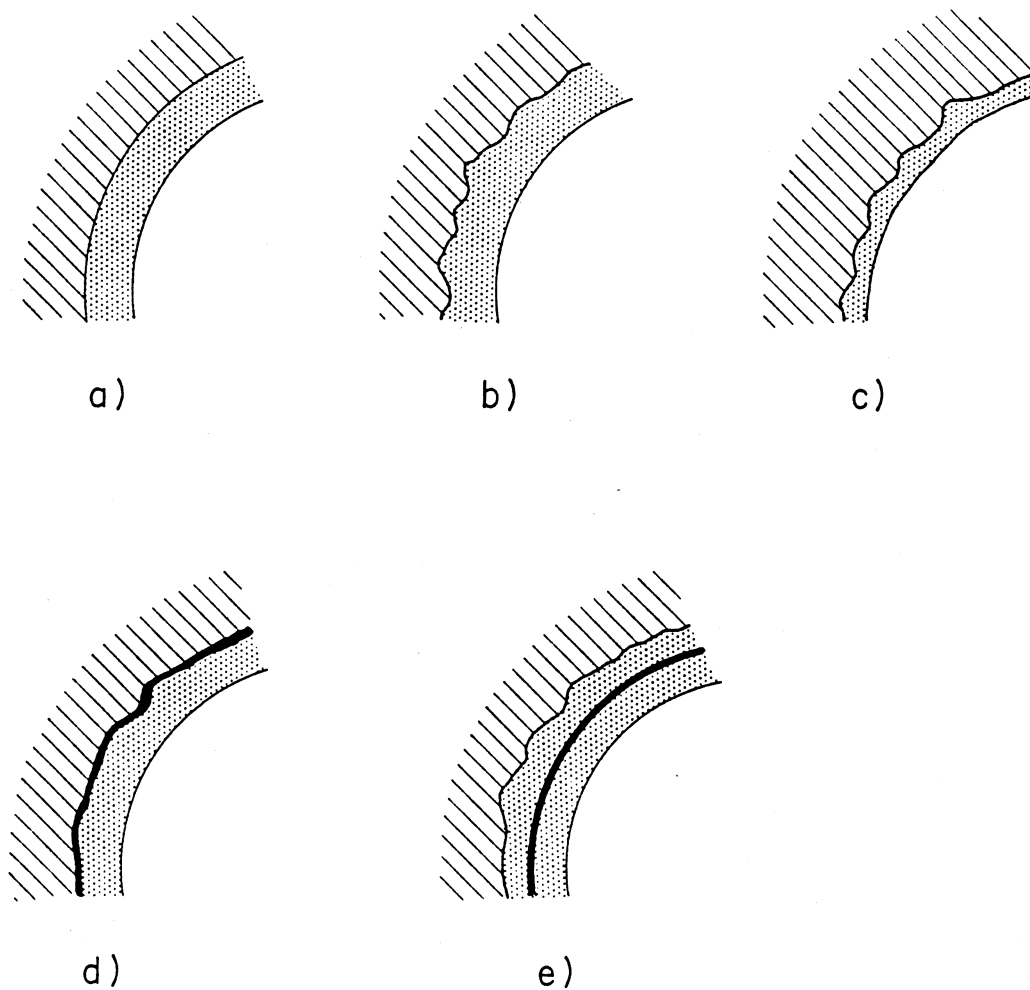


Fig. 2 Einige schematische Auskleidungstypen

- a) Gleichmässiger, gefräster Ausbruch mit Betonauskleidung (armiert oder unarmiert)
- b) Ungleichmässiger, gesprengter Ausbruch mit Betonverkleidung (armiert oder unarmiert)
- c) Gefräster oder gesprengter Ausbruch mit Spritzbetonschale
- d) Betonauskleidung mit bergseits verlegter Abdichtungsfolie (Kunststoff)
- e) Zweischalenauskleidung mit zwischenliegender Abdichtung (Kunststoff, auch Stahl)

geben kann, sondern nur solche Methoden, die für ein bestimmtes Problem bei bestimmten Verhältnissen eingesetzt werden können. Dieser Umstand führt zwangsläufig dazu, dass bei einer umfassenden Zustandsüberprüfung mehrere Methoden angewandt werden müssen. Andererseits ergeben sich Einschränkungen durch die im Titel festgehaltene Bedingung, dass die Zustandserfassung flächenhaft (und nicht punktuell) zu erfolgen hat. Der Grund hierfür liegt beim enormen zeitlichen und finanziellen Aufwand, der im Falle einer systematischen, punktuellen Zustandserfassung über die ganze Länge eines grösseren Tunnelbauwerkes, zu tätigen wäre. Wichtige Eisenbahn- und Strassenverkehrstunnel oder Kraftwerkstollen können nicht ohne bedeutende volkswirtschaftliche Einbussen für längere Zeiten wegen Untersuchungen gesperrt werden. Dementsprechend sind rasche und flächendeckende Untersuchungstechniken gefragt, die nur ein Minimum an Vorbereitungsarbeiten im Tunnel und an Messzeit verlangen. Diese Anforderungen führen zwangsweise zu Techniken, wie sie teilweise in der Geophysik bei geologischen Untersuchungen eingesetzt werden, wo in ähnlicher Weise Informationen über Aufbau, Struktur und Materialeigenschaften des Untergrundes gefragt sind. Solche Messungen können direkt am Objekt oder aus einiger Entfernung (remote sensing) erfolgen und sind grundsätzlich auch untertage einsetzbar. Ansätze und Anregungen für neuartige Tunneluntersuchungsmethoden finden sich ferner in der Medizinalphysik (Computertomographie) und Vermessungstechnik. Bei entsprechender Anpassung und Entwicklung der notwendigen Technologien dürften sich aus diesen, z.T. bereits erfolgreich eingesetzten Techniken, Untersuchungsmethoden entwickeln lassen, die den spezifischen Zielen einer Tunneluntersuchung, wie sie hier verstanden werden, genügen.

Aus untersuchungstechnischer Sicht lassen sich diese Ziele wie folgt zusammenfassen:

- o Hohes Leistungsvermögen und flächendeckende Untersuchung
- o Leichte Handhabung der Geräte und Anpassungsfähigkeit an unterschiedliche Tunnel- und Stollenquerschnitte
- o Möglichkeit der getrennten oder gleichzeitigen Untersuchung der Tunnelauskleidung und des dahinterliegenden Gebirges (variable Untersuchungstiefe)

- o Geringe Beeinflussung der Messungen durch Störfaktoren
- o Messmöglichkeit bei unterschiedlichsten geologischen und baulichen Verhältnissen
- o Sofortergebnisse während der Messung
- o Möglichst automatisierbare Datenverarbeitung und Datenauswertung

Im nachfolgenden Kapitel werden die Techniken, die erlauben oder erlauben könnten, die genannten Untersuchungsziele zu erreichen, kurz beschrieben und ihre Vor- und Nachteile diskutiert.

3. BESCHREIBUNG MOEGLICHER UNTERSUCHUNGSMETHODEN

3.1 Ueberprüfung der Qualität der Tunnelauskleidung

3.1.1 Allgemeines

Bei der durchgeführten Literaturanalyse wurden nur ganz wenige Arbeiten gefunden, die sich im Sinne des hier behandelten Problems mit der Ueberprüfung der Qualität des Baumaterials von Tunnelauskleidungen auseinandersetzen. Hingegen findet sich eine recht umfangreiche Literatur zu diesem Thema im Gebiete des Massiv- und Brückenbaus. Grundsätzlich sind die meisten der dort aufgeführten Methoden auch bei Tunnelbauwerken anwendbar, doch handelt es sich dabei vorwiegend um punktuelle Untersuchungen der Betonqualität (Betonfestigkeit), die in situ oder an gewonnenen Prüfkörpern im Labor ermittelt werden /6/, /7/. Mit Ausnahme einiger weniger zerstörungsfreier Prüfmethoden, auf die weiter unten noch eingegangen wird, sind diese Tests (Zylinderdruckfestigkeit, Punktlastfestigkeit, Zugfestigkeit, Ausreissversuche usw.) für eine systematische flächenhafte Tunneluntersuchung nicht geeignet, da sie umfangreiche Vorbereitungsarbeiten wie z.B. Kernbohrungen zur Gewinnung von Prüfkörpern, benötigen.

Eine gute Zusammenstellung des Vorgehens bei der Untersuchung des Ist-Zustandes eines Bauwerkes sowie praktische Hinweise geben /8/, /9/.

3.1.2 Die visuelle Ueberprüfung

Die einfachste und durchaus nicht schlechteste Methode, den Zustand eines Tunnelbauwerkes zu überprüfen, ist die augenscheinliche Untersuchung. Dabei wird nach Rissen, Abplatzungen, Verfärbungen, Ausblühungen und dergleichen Ausschau gehalten und solches in Skizzen, eigentlichen Tunnelwandkartierungen oder mittels Fotografien dokumentarisch festgehalten, welche dann zusammen mit der Erfahrung des Untersuchenden dazu dienen, die Situation zu beurteilen. Der Methode sind jedoch Grenzen gesetzt, die sich rasch bemerkbar machen: sie ist langsam, oft mühselig und bei grösseren Tunnelbauten (Durchmesser > 5 m) wegen der Beobachtungsdistanz und den meist diffusen Lichtverhältnissen kaum durchführbar. Die häufig etwas subjektiven Beurteilungen lassen sich durch einfache prüftechnische Unter-

suchungen, wie Abklopfen mittels Hammer oder zerstörungsfreier Prüfung mit dem Betonhammer (Schmidt-Hammer) ergänzen bzw. untermauern.

Bei der ersten Methode lassen sich Hohlräume oder Schwachstellen in oder hinter der Auskleidung erfassen, die sich dem geübten Ohr akkustisch bemerkbar machen. Bei der zweiten Methode erhält man Hinweise auf die Festigkeit des untersuchten Materials, die ohne Eichung an gewonnenen Probekörpern jedoch keine absoluten, sondern nur gute relative Werte darstellen /7/. Beide Techniken sind zeitaufwendig und mühsam, wenn man sie nicht nur örtlich anwenden will. Sie sind deshalb für grossflächige Untersuchungen in einem längeren Tunnel wenig geeignet. Eine zumindest rasche visuelle Ueberprüfung wird jedoch wohl immer am Anfang einer Zustandserfassung sein und bei einem entsprechenden Befund weitere, detaillierte Untersuchungen auslösen.

3.1.3 Fotografische und andere Aufnahmen im Wellenlängenbereich des sichtbaren Lichtes

Die heute auf dem Markt erhältlichen Kameras und Spezialfilme erlauben auch in Tunneln fotografische Aufnahmen von hervorragender Qualität, die dank guter Kontraste und feinen Farbtonabstufungen auch Details sehr gut erkennen lassen. So sind auch auf Schwarz-Weissaufnahmen Verfärbungen, unterschiedliche Materialien, Schadstellen, reparierte Zonen und vieles mehr, in der Regel deutlich erkennbar und lassen bei einer entsprechenden Auswertung bereits erste Schlussfolgerungen hinsichtlich des Zustandes der Tunnelröhre zu. Sie stellen diesbezüglich ausserdem ein Belegsdokument dar.

Standbildaufnahmen längerer Tunnelstrecken sind indessen sehr zeit- und materialaufwendig (Beleuchtungsproblem, Bildausschnitt) und deshalb für systematische Aufnahmen wenig geeignet. Man könnte auch aus einem sich fortbewegenden Fahrzeug fortlaufend Fotografien machen, müsste dann aber die Bilder in mühsamer Arbeit zu Mosaiken zusammenstellen, wobei infolge wechselnder Aufnahmebedingungen die Bildqualität doch häufig beeinträchtigt würde.

Von solchen Problemen befreit ist die Scanneraufnahme, die den Bildausschnitt zeilenweise abtastet und aufnimmt. Die Beleuchtung ist mit dem Aufnahmegerät verbunden und macht dessen Drehbewegung mit, so dass die

zu "fotografierende" Fläche stets ideal ausgeleuchtet ist. Die Apparatur entspricht vom Prinzip her der weiter unten beschriebenen Thermographieausrüstung. Bei genügend grossem Aufnahmewinkel lässt sich die ganze Tunnelwand auf einen einzigen Bildstreifen bringen (siehe Figur 3).

Der Vollständigkeit halber sei schliesslich noch die Möglichkeit der Videoaufnahmen erwähnt, die ebenfalls fortlaufend aus einem Gefährt durchgeführt werden können. Von Vorteil ist die Möglichkeit der Wahl des Bildausschnitts (Zoomen) und von Bildmontagen, die Bildschärfe und der geringe Platzbedarf der Aufnahmen (Kassetten). Nachteilig ist, dass jeweils nur eine Tunnelwand (meist sogar nur ein Teil davon) aufgenommen werden kann, sowie die Verzerrung des Bildes durch die ungünstige axiale Aufnahmerichtung und den ungünstigen Aufnahmewinkel.

3.1.4 Ultraschall- und seismische Messungen

3.1.4.1 Methode

Beide Methoden beruhen auf der Ermittlung der Laufgeschwindigkeit von elastischen Wellen in einem festen Medium, wobei sich die beiden Techniken durch die gewählte Energiequelle zur Erzeugung der elastischen Wellen unterscheiden. Im ersten Fall werden dazu Ultraschallwellen, im zweiten Fall mechanische Impulse wie Hammerschläge und Druckwellen (ausgelöst z.B. durch schwache Detonationen) benützt, die sog. seismische Wellen im Frequenzbereich von einigen Zehner kHz auslösen.

Ist die Laufzeit der elastischen Welle sowie die Länge des zurückgelegten Weges bekannt, so lässt sich die Laufgeschwindigkeit einfach berechnen und aus der Grösse der Geschwindigkeit auf die Dichte (Festigkeit) des Materials schliessen: Je höher die Geschwindigkeit umso grösser ist die Dichte. Die Geschwindigkeiten liegen in der Grössenordnung von einigen hundert (wenig dichtes Material) bis einigen tausend m/s (sehr dichtes Material).

In der Praxis wird die Sache dadurch erschwert, dass das untersuchte Material durch die elastischen Wellen unterschiedlich beansprucht wird bzw. verschiedene Typen von Wellen erzeugt werden (u.a. Kompressionswellen, Scherwellen, Oberflächenwellen) die sich mit



Fig. 3 Scanningaufnahme im Wellenlängenbereich des sichtbaren Lichtes (Fotografie)

Bahntunnel mit gemauerter Auskleidung (erkennbar an den Bildrändern) und später aufgebrachtem Spritzbeton im Firstbereich. Rundumaufnahme von ca. 170° (Abwicklung der Tunnelinnenoberfläche) in einem Messdurchgang.

Aufnahme: Boscomer S.A., Neuchâtel

verschiedenen Geschwindigkeiten ausbreiten. Ausserdem können Refraktionen und Reflexionen an Grenzschichten zwischen Medien mit unterschiedlicher Dichte auftreten, was andererseits erlaubt, solche Schichtgrenzen zu bestimmen. Kennt man die Laufgeschwindigkeit von Kompressions- und Scherwellen, so lässt sich der dynamische Elastizitätsmodul (Young'scher Modul) des untersuchten Materials berechnen.

Die Messausrüstung besteht einerseits aus einer Einrichtung, die elastische Wellen erzeugt (Ultraschalltonkopf, Funkenkondensator, Hammerschläge, Detonation), die kontinuierlich oder in Abständen ausgesendet werden sowie einem Empfänger, der die entsprechenden Signale (Erschütterungen) aufnimmt. Sehr wichtig ist das Zeitmesssystem, das die verstrichene Zeit zwischen Auslösen und Empfang des Signals, die im Bereiche von Zehntausendstelsekunden liegt, erfassen muss.

Nach der Art der Messanordnung lassen sich verschiedene Techniken unterscheiden. Die für den Fall der Untersuchung des physischen Zustandes der Tunnelauskleidung einsetzbaren Methoden werden nachstehend beschrieben.

3.1.4.2 Durchschallungsmessungen

Bei diesen wird der zwischen dem Sender und Empfänger liegende Bereich durch direkte Messung untersucht. Diese erfolgt an Prüfkörpern oder in situ, sofern der zu untersuchende Bauwerkteil von zwei Seiten zugänglich ist. Das Verfahren wird schon seit längerer Zeit zur Bestimmung der Betonfestigkeit benutzt und ist auch durch Normen (z.B. /10/) festgelegt worden. Die Messungen werden durch verschiedene Faktoren beeinflusst /7/, auf die hier nicht weiter eingegangen werden soll.

Ähnliche Messungen lassen sich auch im Tunnel ausführen, wobei vorgängig kurze Bohrlöcher zu erstellen sind, in denen dann der Sender bzw. Empfänger installiert werden. Auf diese Weise werden Durchschallungsmessungen in der Tunnelauskleidung in Richtung der Längsachse des Tunnels möglich.

Die Reichweite der Ultraschall- bzw. seismischen Wellen und die maximal mögliche Messdistanz zwischen den beiden Bohrlöchern richtet sich nach dem eingesetzten

Gerät und den örtlichen Verhältnissen. Sie reicht von weniger als 1 m bis 20 m und mehr. Bei kurzen Distanzen wird die Zeitmessung zum technisch bestimmenden Faktor, da diese fähig sein muss, die Signale innerhalb von Zehntausendstelsekunden zu erfassen. Bei grösseren Distanzen wird andererseits die notwendige Energie zur Erzeugung genügend starker Signale zum Problem. Letzteres lässt sich zum Teil durch elektronische Stapelung der Signale überwinden, wobei sich Fremdgeräusche verstärkt bemerkbar machen und deshalb durch Filter wieder eliminiert werden müssen.

Bezüglich des Senders und des oder der Empfänger sind verschiedene Konfigurationen möglich: Beide können sich in den Bohrlöchern auf gleicher Höhe befinden (normale stationäre Durchschallungstechnik), oder beide sich von unten nach oben mit gleicher Geschwindigkeit bewegen (kontinuierliche Aufnahme) oder es kann eine Sonde fest und die andere(n) sich in Bewegung befinden (Fig. 4). Die dynamischen Messverfahren verlangen zwingend eine Aufzeichnung der Messdaten auf Magnetband mit anschliessender elektronischer Datenauswertung, während bei der einfachen Durchschallungstechnik die Laufzeit, und bei entsprechend programmierbaren Geräten, auch die Laufgeschwindigkeit direkt ablesbar sind.

Die aufwendigeren Mess- und Auswertungsverfahren erlauben bei Einsatz komplexer Computerhard- und Software die Erzeugung von eigentlichen Schnittbildern (Tomographien), in denen Heterogenitäten und Diskontinuitäten zu erkennen sind. Solche Verfahren wurden schon zur Erkundung von Staumauern /11/ wie auch der geologischen Verhältnisse im Bereiche geplanter Untertagebauwerke /12/ erfolgreich eingesetzt.

Die Messungen von Bohrloch zu Bohrloch verlangen das vorgängige Bohren von Löchern von 25-45 mm Durchmesser, die im Falle von Ultraschallmessungen zwecks besserer Energieübertragung wassergefüllt sein müssen. Die Bohrlöcher sollten auch möglichst parallel sein, damit die Messbedingungen (Messdistanzen) nicht übermässig ändern. Bevorzugterweise sind die Löcher vertikal nach unten angeordnet.

Die Methode verlangt folglich einen hohen Vorbereitungsaufwand und ist nicht ohne weiteres überall einsetzbar (vertikale Bohrungen im Scheitelbereich lassen sich z.B. nur schwer mit Wasser füllen). Zur Ermittlung der Festigkeit einer Tunnelauskleidung al-

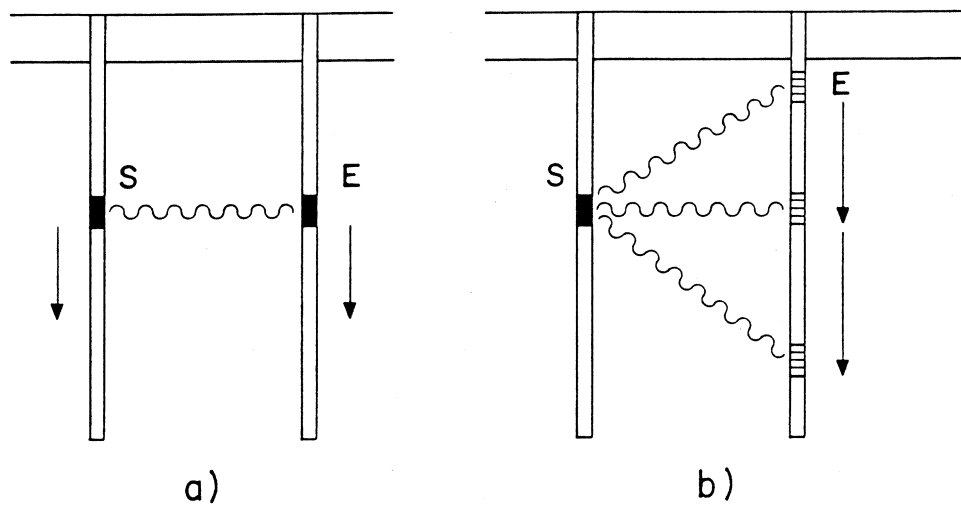


Fig. 4 Mögliche Anordnung von Sender (S) und Empfänger (E) bei seismischen und Ultraschallmessungen

- a) Sender und Empfänger werden schrittweise oder kontinuierlich in gleicher Richtung bewegt
- b) Sender ist fest und Empfänger wird schrittweise oder kontinuierlich bewegt

lein d.h. ohne Miteinbezug des dahinterliegenden Felses kommt angesichts der relativ geringen Mächtigkeit der Auskleidung praktisch nur die einfache Durchschallung in Frage. Die Methode erfüllt jedoch die Anforderungen an eine rasche, flächendeckende Untersuchungsmethode nicht, sondern liefert punktuelle, bei zahlreichen Messpunkten auch zweidimensionale Ergebnisse (Profile).

3.1.4.3 Messungen an der Oberfläche der Stollenauskleidung

Die im vorangegangenen Abschnitt erwähnten Untersuchungstechniken lassen sich auch an der Oberfläche der Tunnelauskleidung ausführen, indem die Energiequelle für die Erzeugung der elastischen Wellen (Sender) und der bzw. die Empfänger nicht in Bohrlöchern installiert, sondern direkt an der Tunnelwand angelegt werden.

Eine solche Methode stellt die Mikroreflexionsseismik dar, die erlaubt, systematisch und zerstörungsfrei Beton oder andere Materialien am Bauwerk zu untersuchen. Dabei werden wiederum die Ankunftssignale der durch Hammerschläge ausgelösten und an Diskontinuitäten reflektierten Wellen registriert und aus der gemessenen Laufzeit die seismische Geschwindigkeit berechnet.

Im Falle der Untersuchung einer Tunnelwand erfolgt die Reflexion der Wellen in der Regel an der Rückseite der Tunnelauskleidung bzw. an signifikanten Diskontinuitäten im Innern der Auskleidung, die sich infolge des kürzeren Weges des betreffenden Wellenanteils durch frühere Ankunftssignale bemerkbar machen (siehe Figur 5).

Die für die Messungen benötigte Ausrüstung ist relativ handlich und hat auf einem kleinen Handkarren Platz. Benötigt werden:

- a) Kathodenstrahl-Oszillograph zur Sichtbarmachung der Signale
- b) Zeitmessgerät (Mikrosekunden)
- c) Verstärker und elektronische Filter zur Behandlung der Signale
- d) Elektro-mechanische Signalempfänger (Geophone)

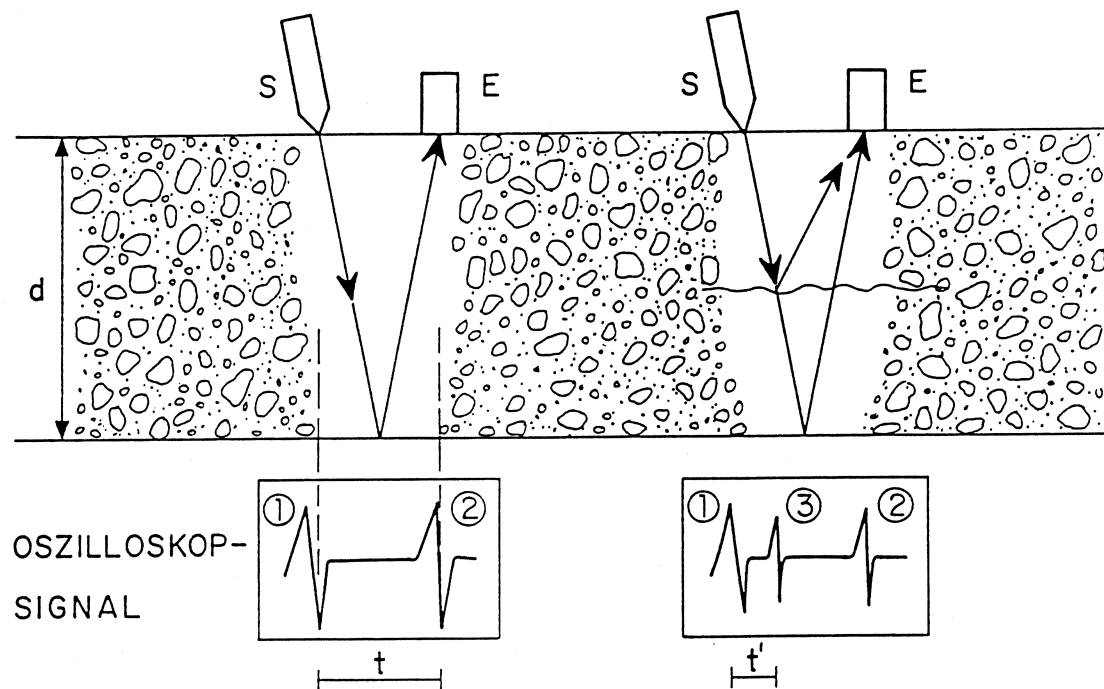


Fig. 5 Mikroseismische Prüfung der Betonqualität (Impuls/Echomethode)

Durch Sender (S), z.B. Schlagbolzen, ausgelöste seismische Wellen werden an der Rückseite der Betonschicht oder im Innern derselben an Diskontinuitäten (Risse, Kiesnester) reflektiert und vom Empfänger (E) aufgefangen. Auf dem Oszilloskop ist das Schlagsignal (1) d.h. der Oberflächenwelle und dasjenige der Reflexion an der Rückseite (2) bzw. an der Diskontinuität (3) erkennbar. Die Zeit t und t' ist abhängig von der Weglänge der Wellen und der Betonqualität

- e) Hammer (z.B. schwerer Schmidt-Hammer) zur mechanischen Erzeugung der elastischen Wellen
- f) Polaroidkamera, um das aufgefangene Signal auf dem Oszillographen fotografisch festzuhalten.

Bei rauhen Oberflächen müssen die Geophone zwecks besserer Haftung und Energieübertragung mit hochviskosen Pasten mit dem Untersuchungsobjekt verbunden werden.

Gegenüber den weiter oben beschriebenen seismischen Methoden hat die Mikroreflexionsseismik den Vorteil, dass sie keine aufwendigen Vorbereitungen, insbesondere keine Bohrlöcher benötigt. Sie erfasst aber pro Messung nur ein bescheidenes Volumen der zu untersuchenden Materie und stellt ein punktuelles Ergebnis dar. Zu beachten ist auch, dass wegen der hohen Empfindlichkeit der Geräte, fremde Erschütterungen, z.B. ausgelöst durch nahen Strassen- oder Bahnverkehr, die Messungen massgebend stören können. Bei günstigen Verhältnissen erlaubt die Methode mit hoher Zuverlässigkeit Inhomogenitäten (Einschlüsse, Risse, Kiesnester, Löcher etc.) in der Tunnelwand zu orten und deren Art, nicht jedoch deren genaue Ausmasse (Länge, Dicke) zu bestimmen. Die Verschiebung von Messpunkt zu Messpunkt erfolgt relativ schnell, doch die Messung einschliesslich Vorbereitung verlangt zu zweit mindestens 5-10 min. pro Messpunkt. Für grossflächige Untersuchungen oder bei Zugangsschwierigkeiten ist die Methode folglich wenig geeignet. Von Vorteil ist hingegen, dass Messdaten (seismische Geschwindigkeiten) erhalten werden, die direkt mit der Festigkeit des untersuchten Materials korreliert werden können.

3.1.5 Geoelektrische Messungen

3.1.5.1 Methode

Es gibt eine Vielzahl von geoelektrischen Methoden, die entweder darauf beruhen, dass die natürlichen Ströme im Untergrund, oder die Veränderungen im elektrischen Feld durch Anlegen von Gleich- oder Wechselstromspannungen gemessen werden. Die Potentialverteilung an der Oberfläche ist abhängig vom spezifischen elektrischen Widerstand des untersuchten Materials (Gesteine), bei Wechselfeldern auch von der Dielektrizitätskonstanten. Durch Ermittlung des elektrischen Widerstandes lässt sich umgekehrt auf die Art des Materials bzw. auf die Struktur des Untergrundes

schliessen. Dies geschieht z.B. dadurch, in dem man zwei Elektroden in den Boden steckt und eine Gleichstromspannung anlegt. Durch den Untergrund wird der Stromkreis geschlossen, wobei der Widerstand umso grösser ist, je schlechter die Gesteine, die vom Strom durchflossen werden, diesen Strom leiten. Trockene Formationen weisen in der Regel deutlich höhere Widerstände als wassergesättigte auf, was man sich z.B. bei der Suche von Grundwasservorkommen zunutze macht. Geoelektrische Messungen lassen sich sowohl an der Erdoberfläche wie Untertage sowie in Bohrungen ausführen. Der durch die Messung erfasste Raum ist in den meisten Fällen vom Abstand der Elektroden abhängig. Je weiter diese auseinander liegen umso tiefer ist die Reichweite. Durch Variation der Elektrodenabstände können so verschiedene Tiefenbereiche erfasst werden (geoelektrische Sondierungen). Dies kann zu einem typischen Anwendungsproblemen führen: bei heterogenen Verhältnissen kommen die Elektroden bei weiten Abständen unter Umständen in Materialien mit unterschiedlicher Leitfähigkeit zu liegen, was zu Deformationen und Ueberschneidungen der Potentialfelder führt und die Interpretation der Messergebnisse dementsprechend erschwert. Hält man die Elektrodenabstände konstant, verschiebt aber rasterförmig die Messkonfiguration, so können geoelektrische Kartierungen ausgeführt werden, die sich auf einen gewissen Tiefenbereich beziehen. Auf diese Weise lassen sich z.B. Bereiche mit unterschiedlichen geoelektrischen Widerständen (Anomalien) feststellen. Da unterschiedliche Materialien ähnliche Widerstände aufweisen können, ist die Interpretation solcher Messungen nicht einfach und bedarf fast immer der Ueberprüfung durch Bohrungen oder Grabungen.

3.1.5.2 Mögliche Anwendungen im Tunnel

Hinsichtlich Ueberprüfung des Zustandes der Tunnelauskleidung ist die Anwendbarkeit geoelektrischer Methoden beschränkt. Vermehrt ausgeführt werden heute Spannungsmessungen, die Hinweise auf Korrosionen der Armierungen oder Präsenz stark mineralisierter Porenwässer (gute Leiter!) infolge Eindringen von natürlichen mineralisierten Wässern (z.B. in Zonen von gipsführenden Gesteinen) oder Salzschäden geben können. Derartige Untersuchungen wurden z.B. im San Bernardino-Strassentunnel ausgeführt und die Betonfahrbahnplatte örtlich systematisch flächenhaft vermessen. Die Messergebnisse wurden mittels Computer ausgewertet und in Form von Zonierungskarten dargestellt /13/.

Noch im Versuchsstadium sind Widerstandsmessungen. Der elektrische Widerstand des Betons kann nach der 4-Punkte-Methode nach Wenner auf der Betonoberfläche bestimmt werden. Labormessungen und Feldmessungen an Fahrbahnplatten haben die grundsätzliche Verwendbarkeit der Methode nachgewiesen /14/. Die im allgemeinen nur sehr geringe Mächtigkeit der Tunnelauskleidung bedingt allerdings einen engen Abstand der Elektroden, um Einflüsse der eventuell vorhandenen Armierung oder des dahinter liegenden Gebirges auszuschliessen, sowie einen sehr engständigen Raster, um ein flächenhaftes Ergebnis zu erhalten. Die heute auf dem Markt erhältlichen Ausrüstungen sind für eine solche Untersuchung jedoch noch wenig geeignet. Noch offen ist ferner die Frage, ob Widerstandsmessungen auch Aussagen zum qualitativen Zustand der Tunnelauskleidung erlauben, wenn keine stark mineralisierten Porenwässer vorhanden sind.

Mittels geoelektrischen Messungen lassen sich auch isolierte metallene Einlagerungen (Armierungen, Leitungsstücke, Stahlbauteile) in der Tunnelauskleidung orten, wobei die Lokalisierungsgenauigkeit und die Auflösung relativ schlecht sind. Metallgegenstände in grösserer Menge, insbesondere Leitungen im Bereiche der Messungen können diese jedoch erheblich stören oder sogar verunmöglichen.

3.1.6 Georadar

3.1.6.1 Methode

Untersuchungen mittels Georadar beruhen auf analogen physikalischen Gesetzen und Prinzipien wie die seismischen Untersuchungen, nur dass an Stelle elastischer Wellen elektromagnetische Wellen treten. Solche können nämlich durchaus auch in feste Körper eindringen, diese durchwandern und an Diskontinuitäten reflektiert werden. Damit ist wie bei der Seismik die Möglichkeit gegeben, über Laufzeitmessungen von ausgesandten Signalen Rückschlüsse auf die Beschaffenheit und Struktur des Untergrundes zu ziehen.

Die Eindringtiefe der elektromagnetischen Wellen nimmt grundsätzlich mit abnehmender Frequenz zu, wird aber durch die elektrischen Widerstände und Dielektrizitätskonstanten der untersuchten Materie beeinflusst bzw. gedämpft. Insbesondere Wasser hat eine sehr stark dämpfende Wirkung. In der Regel wird mit Wellenlängen

im Bereiche von 10 bis 1000 MHz (Radiowellen, Radarwellen) gearbeitet.

Eine Georadar-Apparatur besteht im wesentlichen aus einem Erzeuger hochfrequenter Radiowellen, die üblicherweise über Spezialantennen sowohl ausgesendet wie empfangen werden können, sowie einem Steuer- und einem Signalverarbeitungsgerät mit angeschlossener Datenausgabe (siehe Fig. 6). In der Regel werden die Messdaten direkt zu einem Bild verarbeitet und ausgedruckt, so dass man während der Messung über Sofortergebnisse verfügt. Zur Betreibung dieser Geräte wird meist ein kleiner Generator eingesetzt.

Die elektromagnetischen Wellen werden in Impulsen von sehr kurzer Dauer (Nanosekunden) ausgesandt und breiten sich mit einer gegenüber seismischen Wellen um ein Vielfaches höheren Geschwindigkeit aus (Granit z.B. rund 12000 m/s). Im Untergrund werden sie an Grenzflächen von Materialien mit unterschiedlichen elektrischen Widerständen (Dielektrikum) reflektiert und in der Folge von der Antenne aufgefangen. Jedem ausgesandten Impuls folgt der Empfang von reflektierten Signalen, deren Zeitabstände der Laufzeit der Welle zu den Reflektoren und zurück entsprechen. Die aufgefangenen Signale werden einerseits auf Magnetbändern gespeichert, andererseits durch einen Schreiber in Strichbilder umgesetzt. Da die Antenne sich kontinuierlich linear fortbewegt, verschiebt sich dementsprechend laufend der Ort und der Zeitpunkt der Reflexion, was im Strichbild der reflektierten Signale zu charakteristischen Mustern bzw. Abbildern der Reflektoren führt (Fig. 8).

3.1.6.2 Anwendung im Tunnel

Die Georadarmethode lässt sich sowohl von einer Oberfläche (Gelände, Tunnelwand, Stollensohle), wie von Bohrlöchern aus durchführen. Dabei werden entweder Reflexionsmessungen oder Durchleuchtungen ausgeführt. Im ersteren Fall sind Sender und Empfänger in der gleichen Antenne untergebracht, im letzteren dagegen räumlich getrennt, was z.B. Messungen von Bohrloch zu Bohrloch ermöglicht. Ähnlich wie bei den seismischen Messungen ist diese Messanordnung im vorliegenden Fall jedoch ungeeignet, da sie die Ausführung von unzähligen Bohrlöchern voraussetzt. Reflexionsmessungen von der Sohle oder Tunnelwand aus erlauben hingegen eine kontinuierliche, rasche Untersuchung ohne aufwendige



Fig. 6 Georadarausrüstung

Steuergerät (oberes Bild, rechts) und Aufzeichnungsgerät (oberes Bild, links und unteres Bild) sind in einem kleinen Anhänger untergebracht.
Ausrüstung und Bilder: Boscomer S.A., Neuchâtel

Vorbereitungen /1/. Die dazu notwendigen Geräte haben auf einem kleinen Anhänger Platz (Fig. 6). Die Antenne wird in der Regel in sehr geringem Abstand zur Betonwand längs derselben im Fussgängertempo fortbewegt (Fig. 7).

Georadarmessungen liefern oft erstaunlich detaillierte Bilder des untersuchten Bereiches, die genau definierten Profilen entsprechen. Im Falle einer Tunneluntersuchung kann sowohl die Tunnelwand wie der dahinterliegende Fels oder Boden erfasst werden. Die Methode liefert dabei keine Abbilder der Tunnelwand, sondern senkrecht zu derselben ausgeführte Querschnitte. Diese lassen sehr gut Änderungen der Wandstärke, Profileisen, Auswaschungen (Hohlräume) und andere Inhomogenitäten erkennen (Fig. 8). Das Auflösungsvermögen liegt bei etwa 10-15 cm. Grössere zusammenhängende Metalleinlagerungen im Beton wie Armierungen (insbesondere Netze) stören die Messungen in der Regel sehr stark, da sie zu Totalreflexionen führen können und dadurch die Erkennung von Einzelheiten verunmöglichen.

Die Georadarmethode liefert wohl dort die besten Ergebnisse, wo eine Art Röntgenbild der Tunnelwand erwünscht ist, sei es weil die Wandstärke überprüft werden soll, oder weil bestimmte Inhomogenitäten (Einschlüsse, Hohlräume) gesucht werden. In jedem Fall sind Kernbohrungen zur Kontrolle und Eichung der Messungen unumgänglich, da die Interpretation der ermittelten Reflektoren mitunter mit Schwierigkeiten verbunden sein kann. Eine vielversprechende, aber noch ungenügend gesicherte Möglichkeit /15/ ist die direkte Ermittlung der Festigkeit der Tunnelauskleidung aufgrund der elektromagnetischen Laufgeschwindigkeiten, die sich sowohl in situ aus den Messdiagrammen, wie im Labor an Eichproben bestimmen lassen. Die massgebenden Beeinflussungen und Abhängigkeiten der möglichen Korrelationen zwischen Dämpfung (bzw. Reflexionen) und Betonqualität, oder Laufgeschwindigkeit der elektromagnetischen Wellen und Betonqualität, sind noch wenig bekannt und bedürfen noch wissenschaftlicher Untermauerung.

Da die Methode keine Abbilder sondern Querschnitte der Tunnelauskleidung liefert, ist für eine Rundumaufnahme des Tunnelprofils eine Vielzahl paralleler Messungen (Schnitte) notwendig, was sich in einem entsprechend hohen Mess- und Auswertungsaufwand niederschlägt. Letzterer ist angesichts des im Falle eines grösseren Tunnels in enormer Menge anfallenden Bildmaterials,

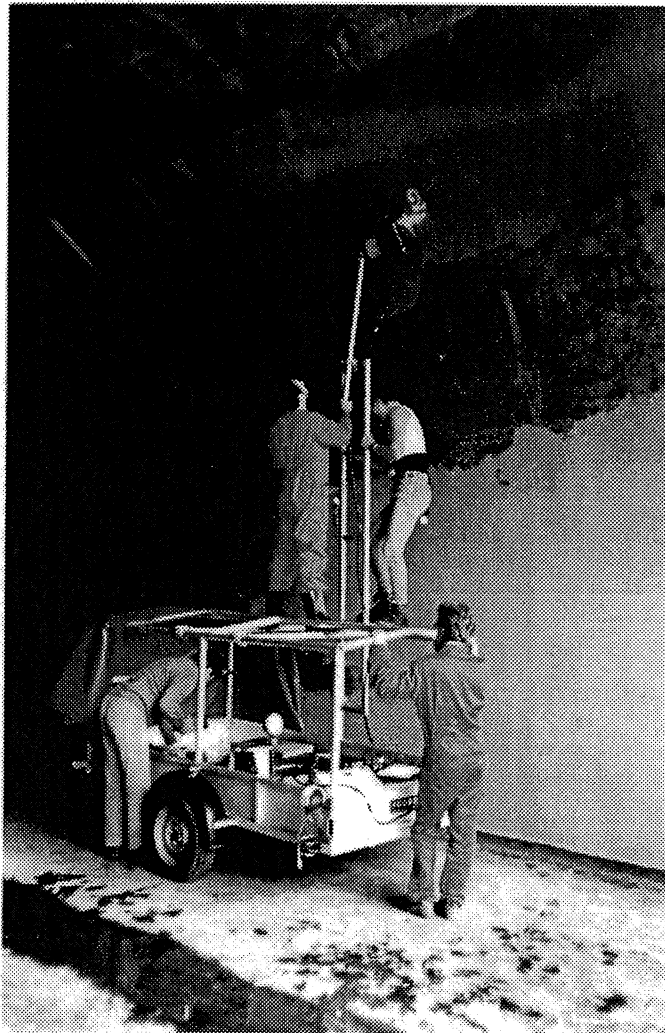


Fig. 7 Georadarmessung in einem Wasserstollen

Die Messausrüstung ist in einem kleinen Anhänger untergebracht, der mit 3-5 km/Std fortbewegt wird. Die Antenne (900 MHz) befindet sich am Ende des Metallarmes und wird auf Rädern knapp über der Tunneloberfläche geführt. Das Ergebnis ist ein Längsprofil auf der Höhe der Position 02.00 Uhr. Ausrüstung und Bild: Boscomer S.A., Neuchâtel

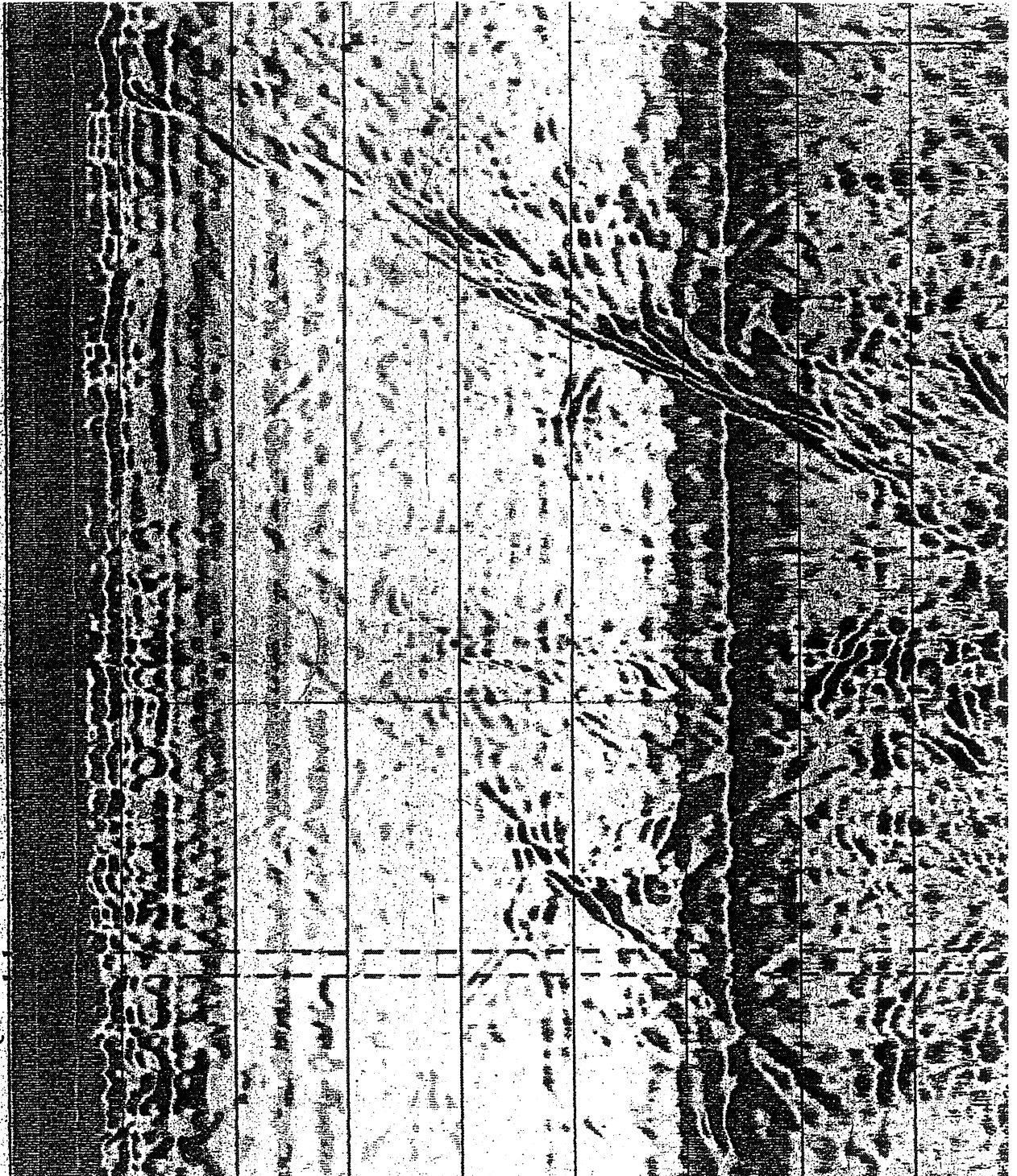


Fig. 8 Ausschnitt einer Georadaraufnahme (500 MHz)
in einem Wasserüberleitstollen

Die Tiefenreichweite beträgt ca. 3 m. Erkennbar
sind Rückseite der Stollenauskleidung sowie Reflek-
toren im Gebirge, die auf Hohlräume hinweisen
(Karsthohlräume in Gips). Der Bildausschnitt ent-
spricht einem Bereich von ca. 10 m x 3 m (Tunnel-
achse parallel zu Bildlängsrand).
Aufnahme und Bild: Boscomer S.A., Neuchâtel

das angeschaut, distanzmässig kontrolliert und eventuell korrigiert und schliesslich interpretiert werden muss, sehr erheblich. Automatisierte, elektronische Auswertungsverfahren scheinen noch weitgehend zu fehlen, könnten indessen die Interpretation nur erleichtern, nicht aber vollständig übernehmen. Solche Verfahren könnten aber die Möglichkeit eröffnen, bei genügend Querschnitten ein dreidimensionales Bild des untersuchten Objektes zu erstellen.

3.1.7 Thermographie

3.1.7.1 Methode

Die Untersuchungsmethode beruht auf dem Prinzip, dass jeder Körper, dessen Temperatur über dem absoluten Nullpunkt liegt, Wärmestrahlen aussendet. Bei diesen handelt es sich um elektromagnetische Wellen, die aufgefangen und gemessen werden können. Die Intensität der Wärmestrahlung (Strahlungsleistung) eines Körpers ist dabei seiner strahlenden Oberfläche und der 4. Potenz seiner absoluten Temperatur proportional. Auf der Grundlage des Kirchhoff'schen Strahlungsgesetzes (schwarzer Körper), des Stefan-Boltzmann'schen Gesetzes (Strahlungsleistung) und des Wien'schen Verschiebungsgesetzes (Strahlungskurve) lässt sich bei Kenntnis der maximal abgestrahlten Wellenlänge die absolute Temperatur des Strahlers berechnen.

Im vorliegenden Fall ist man jedoch weniger an der Bestimmung der absoluten Temperatur, sondern vielmehr an der Erfassung von Bereichen mit unterschiedlicher Temperatur bzw. von Temperaturdifferenzen interessiert, da solche auf Inhomogenitäten der untersuchten Materie hinweisen.

In der Praxis wird die Wärmeabstrahlung mittels einer Infrarotkamera im Wellenbereich von 2 bis 6 Mikrometer gemessen, wobei die Aufnahmen sowohl von festen wie beweglichen Standorten aus gemacht werden. Das Messergebnis wird in der Regel in der Form von Schwarz-Weiss oder Falschfarbenbildern wiedergegeben (thermographische Aufnahmen, Infrarotfotos).

Durch den Einsatz von Scannern können grössere Flächen zusammenhängend und ohne starke Bildverzerrung thermographisch von einer in Bewegung befindlichen Apparatur vermessen werden (Flug- und Satellitenaufnahmen, terrestrische Aufnahme von fahrendem Fahrzeug).

aus).

Die Ausrüstung für terrestrische Thermographieaufnahmen besteht im wesentlichen aus einer Scanning-Infrarotkamera, die oft gleichzeitig im Bereiche des sichtbaren Lichtes aufnehmen kann (Fig. 9), einer elektronischen Empfänger/Verstärkereinheit sowie einem Aufzeichnungs- bzw. Bildherstellungsgerät. Dazu gehört auch eine Temperaturmess- und Eicheinrichtung sowie ein Generator für die Stromerzeugung. Je nach Messausrüstung bzw. Art der Datenabspeicherung beansprucht der notwendige Instrumentenpark mehr oder weniger Raum. Einfachere Geräte geben die Messdaten sofort auf langen Bildstreifen (Infrarotfotografie) aus, die dann später zusammengesetzt und in aufwendiger "Handarbeit" ausgewertet und interpretiert werden müssen. Modernere und technisch höher stehende Ausrüstungen speichern die Messdaten auf Magnetband ab, wobei auf Bildschirmen die Aufnahmen im Echtzeitmodus verfolgt und ausserdem auf Papierstreifen ausgedruckt werden können. Solche Ausrüstungen benötigen einiges an Elektronik, insbesondere Steuergeräte und Rechner (Computer), und dementsprechend mehr Raum. Währenddem die einfache Ausrüstung insgesamt etwa 70-90 kg wiegt und leicht auf einem kleinen Anhänger verstaut werden kann, benötigen die grösseren Ausrüstungen einen Lieferwagen oder gar einen kleineren Lastwagen, in dem die Steuer- und Messgeräte fest installiert sind (Fig. 9).

Thermographische bzw. Infrarotaufnahmen werden seit längerer Zeit im militärischen Bereich eingesetzt, haben aber in den letzten Jahren auch im zivilen Sektor zusehends an Bedeutung gewonnen. Erwähnt seien in diesem Zusammenhang etwa hydrogeologische Fernerkundungen (Grundwassersuche aus der Luft), Dichtigkeitsüberprüfung von Talsperren /16/ oder die Ermittlung von Wärmeverlustquellen in städtischen Gebieten, wie dies in Zürich geschehen ist /17/.

3.1.7.2 Anwendung im Tunnel

Die Thermographie darf als diejenige Methode bezeichnet werden, die für die flächenhafte Untersuchung von Tunnelbauwerken technisch am weitesten entwickelt ist und bereits auf einige praktische Erfahrung zurückblicken kann, über die in der Fachliteratur vereinzelt berichtet wurde (/1/, /18/). Vorteile der Untersuch-

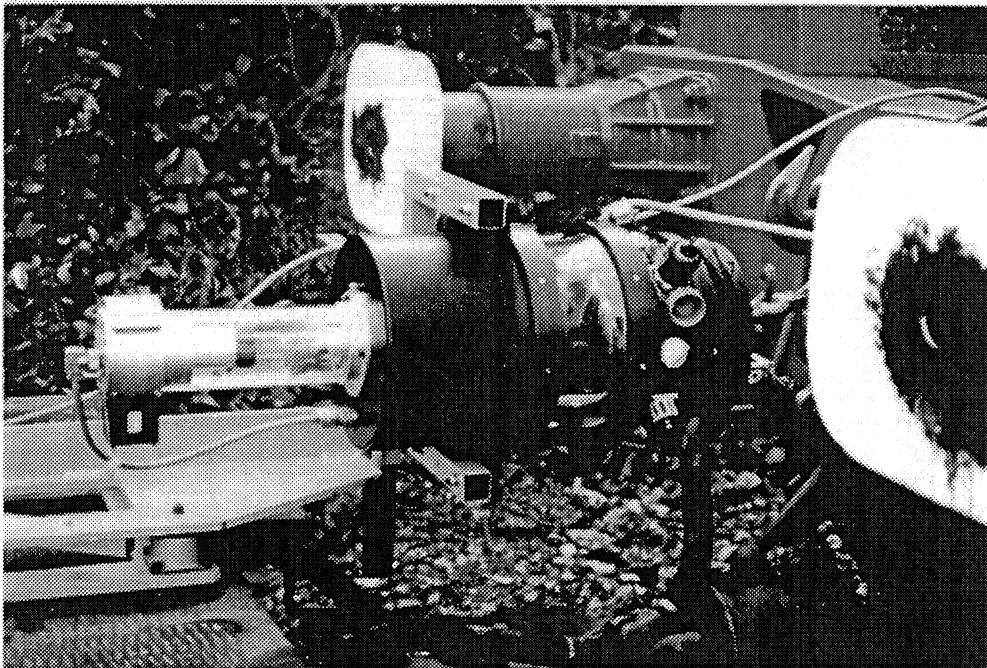
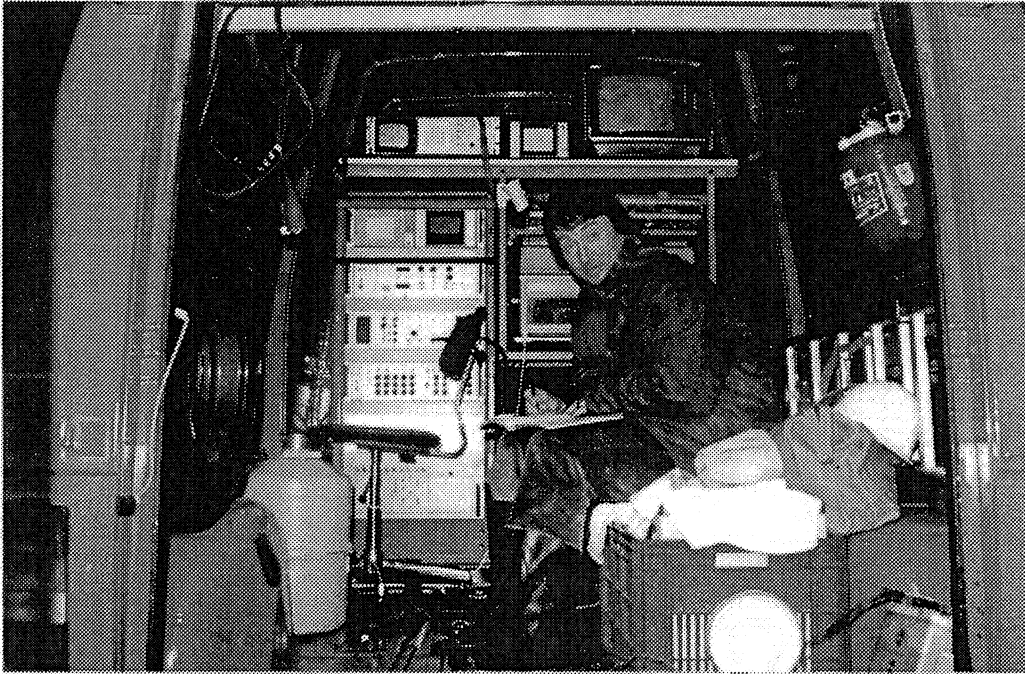


Fig. 9 Ausrüstung für Scanningaufnahmen

Messwagen mit elektronischen Steuer- und Aufnahmegegeräten mit Bildschirmen und graphischer Echtzeitaufzeichnung für augenblickliche Kontrolle und Auswertung (oben).

Aufnahmegegerät (Kopf) an Bahnwagen montiert. Der Kopf enthält eine Optik für sichtbares Licht und für den Infrarotbereich, ausserdem eine Lichtquelle von 200 W Leistung, was die gleichzeitige Aufnahme beider Bildarten erlaubt. Die Drehgeschwindigkeit des Scanners beträgt 32 Umdrehungen pro Sekunde.
Ausrüstung und Fotos: Boscomer S.A., Neuchâtel

ungstechnik sind die hohe Vermessungsleistung von bis zu 5 km Profilaufnahmen pro Stunde (die durch die Scannergeschwindigkeit bestimmt wird) sowie die Möglichkeit, die ganze Tunnelleibung auf einmal aufzunehmen. Je nach Gerät und eingesetzter Optik sind Aufnahmewinkel von 10-220 ° möglich, so dass in der Regel nur 1-3 Fahrten für eine Totalaufnahme des Tunnelbereichs oberhalb der Sohle notwendig sind. Vorteilhaft ist auch der Umstand, dass Metallgegenstände oder elektrische Leitungen die Messungen nicht beeinträchtigen, wie dies etwa bei den elektromagnetischen Untersuchungsmethoden der Fall ist. Andererseits muss angesichts der hohen Empfindlichkeit (0,1-0,2 °C) darauf geachtet werden, dass störende Wärmequellen wie Lampen, Verbrennungsmotoren, Abgasschwaden etc. möglichst vermieden werden, da diese störend wirken können. Ungünstig sind auch starker Regen (Infiltrationen) und schwankende Lufttemperaturen.

In einem verkleideten Tunnel gibt die Thermographie die Temperaturverhältnisse an der Oberfläche der Stollenwand wieder, die ihrerseits ein Abbild der dahinterliegenden Wärmeverhältnisse darstellt, das durch entsprechende Wärmeflüsse von innen nach aussen oder umgekehrt zu stande kommt. Die Geschwindigkeit, mit der dies geschieht, ist von der Wärmeleitfähigkeit des Materials (Fels, Beton) abhängig, aber auch von der Aussen- bzw. Umgebungstemperatur. Die Einstellung der Temperaturgleichgewichte kann einige Zeit in Anspruch nehmen, weshalb Wasserstollen meist nicht unmittelbar nach ihrer Entleerung untersucht werden können. Die Thermographienaufnahmen fallen dann am besten aus, wenn die Temperaturkontraste (Temperaturdifferenzen) ausgeprägt sind. Die Methode eignet sich deshalb besonders gut zur Ortung von wasserführenden Bereichen bzw. von Wasserzirkulationen hinter der Betonwand oder hinter der Abdichtungshaut bei einer Zweischalenauskleidung, da sich die Wassertemperatur im allgemeinen deutlich von jener der Tunnelwand unterscheidet. In der Regel ist das Wasser kühler als seine Umgebung, was sich auf einer thermographischen Aufnahme durch eine Grauton- bzw. Farbänderung bemerkbar macht und die Identifizierung einer relativ kalten Stelle oder Zone erlaubt (Fig. 10). Im allgemeinen wird die Erfassung solcher relativer Temperaturunterschiede genügen. Vereinzelt sind jedoch auch die absoluten Temperaturen zu messen, um die Aufnahmen zu eichen. Dabei interessieren sowohl die Temperatur der Luft, wie auch die der Auskleidung und des Gebirges in verschiedener Tiefe. Für letzteres sind Bohrlöcher bis ca. 1m Tiefe und empfindliche

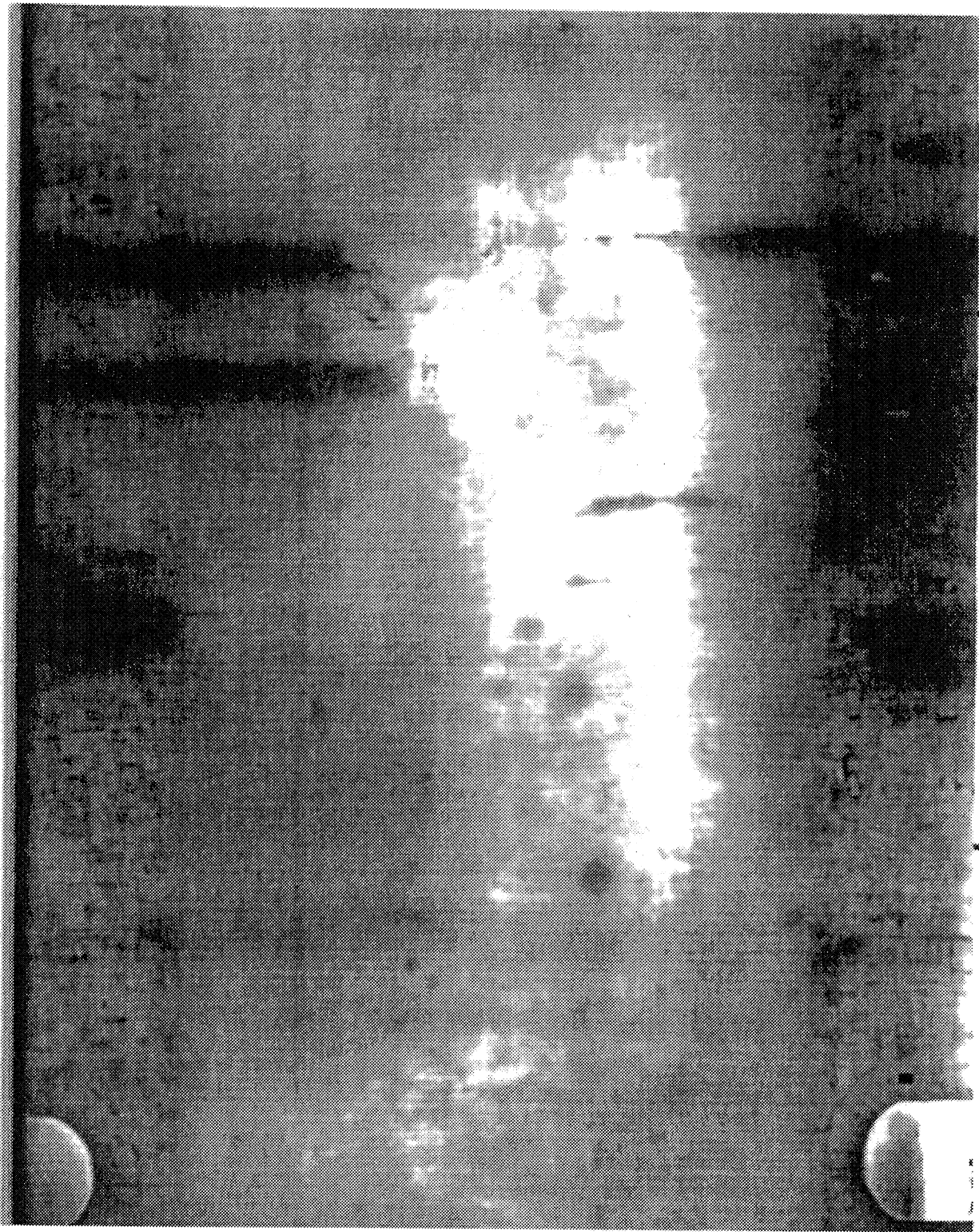


Fig. 10 Scanningaufnahme im Infrarotbereich (Thermographie)

Gleicher Bildausschnitt wie Fig. 3. Heller Fleck stellt relativ kühle Zone (Wasser, Hohlraum) dar. Empfindlichkeit der Messung: 0,5° C. Aufnahme: Boscomer S.A., Neuchâtel

Temperaturfühler (0,1 °C) notwendig. Kontinuierliche Temperaturmessungen längs einer Profilachse mittels eines Infrarot-Strahlungsthermometers dienen in einem Fall zur Identifizierung und Abgrenzung wasserführender Kluftzonen in einem Versuchsstollen /19/. Solche Temperaturprofile dürften bei Tunneluntersuchungen wie sie hier besprochen werden, nur bei besonderen Problemen zum Zuge kommen, da sie nur einen sehr eng begrenzten (linearen) Bereich erfassen.

Bei der einfacheren Thermographie, bei der die Ergebnisse in langen Bildstreifen anfallen, ist der Aufwand, der notwendig ist, um eine vollständige thermographische Aufnahme eines grösseren Tunnels auszuwerten, sehr gross. Die in grosser Zahl anfallenden Schwarz-Weissaufnahmen bzw. die direkt oder nachträglich hergestellten Falschfarbenbilder müssen bezüglich Distanzen kontrolliert und allenfalls korrigiert, insbesondere aber interpretiert werden. Elektronische Datenverarbeitung ist dabei nur für bestimmte Teilarbeiten (optisch-elektronische Bildauswertung, Darstellung von Isothermen) gebräuchlich, vermutlich aber noch ausbaubar.

Die ausgereifere Technologie mit Datenabspeicherung auf Magnetband erlaubt auch eine elegantere, schnellere und effizientere Auswertung der Messungen. Durch Messungen an nachgebauten Tunnelgewölbemodellen (Versuchsstollen Hagerbach) bzw. Einführen von Modellrechnungen für verschiedene Fälle (z.B. trockene oder feuchte Verhältnisse, mit oder ohne Hohlraum, verschiedene Materialien) lassen sich unterschiedliche Situationen simulieren und die entsprechende theoretische Wärmeverteilung berechnen bzw. mit der Aufnahme vergleichen /20/. Dies erlaubt dann eine automatische Klassifizierung der Temperaturfelder bezüglich eines bestimmten physischen Zustandes (z.B. schlechter Kontakt zwischen Verkleidung und Fels, Hohlräume, feuchte Stellen, ausgebesserte Verkleidung), wie in Figur 11 ersichtlich ist. Natürlich sind auch in diesem Falle Verifizierungen d.h. Kontrollbohrungen an ausgewählten Stellen notwendig, um die Interpretation zu überprüfen. Die Anzahl und die Art solcher Ueberprüfungen richtet sich auch nach der gestellten Aufgabe. Bei der Suche von Wasserfliesswegen sind die Verhältnisse wegen dem üblicherweise relativ hohen Temperaturkontrast meist einfacher als bei der Suche von mechanischen Schwachzonen, die sich ebenfalls durch Temperaturdifferenzen (luft- oder wassergefüllte Risse, Spalten) bemerkbar machen, die aber oft nur sehr

Klassifikation



Bemerkungen

Bemerkung: nicht klassifizierte Bereiche sind weiss dargestellt, schwarz steht fuer extreme Stellen, wie z.B. Metallteile oder fliessendes Wasser auf der Tunnelwand.

Die Klassifikation besteht aus acht verschiedenen Modellen fuer Zustaende der Verkleidung.

Die Modelle sind auf dem Beiblatt fuer das Protokollfile "bc2.pro" grafisch dargestellt.

Die Modelle sind fuer die Pfeiler (am linken und rechten Bildrand) nicht gueltig, da dort der Waermefluss nicht senkrecht zur Bildebene verlaeuft, wie das im mathematischen Modell gefordert wird.

Legende

-  Mischklasse 3,4
-  Modell 7 nasse Oberflaeche
-  Modelle 5 und 6 alles feucht
-  Modell 4 Beton mit 20 % Luft und 5 cm Lockergest. zum Fels
-  Modell 3 Beton mit 3 % Luft und 5 cm Lockergest. zum Fels
-  Modell 2 Beton 20% Luft guter Kontakt zum Fels
-  Modell 1 Beton 3% Luft guter Kontakt zum Fels

Aufnahmedaten

Datum : 25.05.89
Uhrzeit : 11:11
Km (oben): 20.802126
Km(unten): 20.813683
Bild Nr. : 2

BAUTECHNISCHE KLASSIFIKATION
BUEL-TUNNEL

AMBERG INGENIEURBÜRO AG
AUSSTELLUNGSTR.88
CH-8031 ZÜRICH
TELEFON: 01/2721051



Fig. 11 Auswertung einer Scanneraufnahme im Infrarotbereich (Thermographie)

Bahntunnel mit Betonverkleidung. Die Ergebnisse sind in Falschfarbendarstellung gegeben, wobei jeder Farbe ein bestimmter baulicher Zustand zugeordnet ist, der auf geeichten Modellrechnungen beruht.

Aufnahme und Bild: Amberg Ingenieurbüro, Zürich

schwach sind.

Die Thermographie dient in erster Linie zur Ortung der erwähnten Stellen. Die Genauigkeit der Lokalisierung hängt einerseits vom Temperaturkontrast und andererseits von der Gleichmässigkeit der Fortbewegungsgeschwindigkeit des Aufnahmegerätes ab. Distanzmarken im Tunnel zur Kontrolle und Eichung der Aufnahmen sind deshalb unerlässlich. Die Lokalisierungsgenauigkeit sollte in der Regel mindestens 0.5 Meter betragen.

3.1.8 Uebrige Methoden

3.1.8.1 Gasmessungen

Aus dem Untergrund treten stetig Gase verschiedener Art aus und entweichen in die Atmosphäre. Klüfte und Risse dienen dabei als bevorzugte Austrittwege, was in deren Umgebung zu einer signifikanten Erhöhung des Gehaltes an bestimmten Gasen führen kann. Durch Messung der Edelgaskonzentrationen über dem Boden lassen sich so z.B. geologische Störungen lokalisieren. In ähnlicher Weise sollte es möglich sein, relativ durchlässige Abschnitte von Stollen- und Tunnelauskleidungen zu orten, da die aus dem Fels ausströmenden Gase längs Rissen in der Auskleidung in die Tunnelatmosphäre übertreten werden. Die derartig ermittelte Häufigkeit und Ausdehnung permeabler Zonen stellt letztlich ein relatives Mass für den baulichen Zustand der Tunnelauskleidung dar.

Die Art und Menge der austretenden bzw. zu messenden Gaskonzentrationen wird von der umliegenden Geologie beeinflusst, wobei bei solchen Messungen nicht der absolute Gehalt (der im allgemeinen sehr gering ist), sondern die relativen Gehalte von Interesse sind. Die für solche Messungen erforderliche Analysentechnik ist vorhanden, es fehlen jedoch praktische Erfahrungen hinsichtlich der erwähnten möglichen Anwendung. Im Vordergrund stehen Messungen von Edelgas-, Wasserstoff- und Methanemissionen.

3.1.8.2 Radiometrische Methoden

Sehr kurzwellige, energiereiche elektromagnetische Wellen können auch lichtundurchlässige Materie durchdringen, wobei die Strahlen auf ihrem Weg je nach Material unterschiedlich stark abgeschwächt werden. Die

auf der Rückseite des durchstrahlten Körpers noch austretenden Strahlen können photographisch sichtbar gemacht oder gemessen werden. Entsprechende Verfahren sind in der Medizin und Werkstoffprüfung in der Form von Röntgenuntersuchungen schon seit längerer Zeit in Gebrauch. Man hat solche Techniken versuchsweise auch für die Ueberprüfung von Betonbauteilen vor Ort eingesetzt, letztlich jedoch ohne grossen Erfolg. Die Gründe hierfür liegen in der unhandlichen Apparatur, dem beschränkten Untersuchungsfeld, den Sicherheitsvorschriften (Strahlenschutz, /9/), den häufig kontrastarmen und deshalb schwierig zu interpretierenden Aufnahmen und der Bedingung, dass das Untersuchungsobjekt von zwei Seiten her zugänglich sein muss (Durchleuchtung). In letzter Zeit sind jedoch Verfahren entwickelt worden, die insbesondere für die Untersuchung der Betonqualität zukunftsversprechend sind, so etwa die Computer-Tomographie mit Hilfe von Röntgenstrahlen /21/. Die Methode erlaubt eine rasche und (bedingt) zerstörungsfreie Ermittlung der Gesamtporosität, Sichtbarmachen der grösseren Zuschlagkörner sowie der grossen Luftporen und eine qualitative Beurteilung des Gefüges. Die Methode stellt heute noch eine Labormethode dar, könnte vielleicht aber eines Tages auch draussen eingesetzt werden. Für eine Tunneluntersuchung grösseren Stils wird sie jedoch kaum je einsetzbar sein, da schon die erforderliche Zugänglichkeit von zwei Seiten in der Regel nicht gegeben ist.

3.2 Suche von Hohlräumen, mechanischen Schwachstellen und Wasserwegsamkeiten im Grenzbereich von Auskleidung und Ausbruch

3.2.1 Allgemeines

Von den im vorangegangenen Kapitel beschriebenen Untersuchungsmethoden sind nur die visuelle Inspektion (sofern der Ausbruch verkleidet ist) und die eigentlichen Betonprüfmethoden (mechanische Versuche, Durchschallung und Durchleuchtung) sowie Korrosionsuntersuchungen (Spannungsmessungen) auf die Tunnelauskleidung allein beschränkt. Alle andern Methoden erlauben auch Abklärungen bis in grössere Tiefen, d.h. über die Tunnel- bzw. Stollenauskleidung hinaus in das dahinterliegende Gebirge. Verschiedene der erwähnten Techniken sind ja ursprünglich zum Zwecke der Erkundung des geologischen Untergrundes entwickelt und erst im Laufe der Zeit für bautechnische Abklärungen einge-

setzt worden. Im geologisch- geophysikalischen Sinne stellt die Tunnelauskleidung nur eine weitere, allerdings sehr dünne, "Bodenschicht" dar, die in unterschiedlichem Masse störend wirken bzw. in die Untersuchung miteinbezogen werden kann.

Nachstehend sei dieser Aspekt für die wichtigsten Methoden hinsichtlich der Suche von Hohlräumen, mechanischen Schwachstellen und Wasserwegsamkeiten einschliesslich geologischer Strukturen, im Grenzbereich Tunnelauskleidung / Tunnelausbruch kurz gestreift. Wieviel vom Gebirge jeweils mit in die Untersuchung miteinbezogen werden soll, hängt von der Problemstellung ab. In der Regel dürften tief ins Gebirge reichende Abklärungen bei den hier diskutierten Tunneluntersuchungen, (die mit den gleichen Methoden möglich sind), nur bei Sonderfällen von Interesse sein. Sie dienen dann mehr der Erkundung der geologischen Verhältnisse und weniger der Beurteilung des baulichen Zustandes des Untertagebauwerkes.

3.2.2 Ultraschall- und seismische Messungen

In Abschnitt 3.1.4 ist die Methode beschrieben und die verschiedenen Messtechniken erwähnt worden. Für die genannten Untersuchungsziele kann sowohl das Durchschallungs- wie auch das Refraktions- und Reflexionsverfahren zur Anwendung kommen. Allerdings können bei den beiden letztgenannten Techniken bei Anlegen der Empfänger (Geophone) auf der Tunnelauskleidung dann Messschwierigkeiten auftreten, wenn die Laufgeschwindigkeiten in der Auskleidung höher als im dahinterliegenden Bereich sind. In diesen Fällen kommt es nur zu Reflexionen an der bergseitigen Grenzfläche der Auskleidung, aber keinen Refraktationen im Gebirge selbst. Je nach gestellter Aufgabe kann dies sehr unerwünscht sein, da man in diesen Fällen gerade aus der zu untersuchenden Zone kaum Messwerte erhält. Das Aufsuchen von mechanischen Schwächezonen oder Hohlräumen hinter der Auskleidung ist unter solchen Bedingungen z.B. nicht mehr möglich.

Bei einer genügend grossen Anzahl von Messmöglichkeiten (Bohrlöcher, Parallel- oder Seitenstollen) lassen sich bei Durchführung kontinuierlicher Messungen im Durchschallungsverfahren und bei Einsatz entsprechender Hard- und Software tomographische Aufnahmen erzeugen, die detaillierte Informationen hinsichtlich Strukturen und Heterogenitäten des untersuchten Be-

reiches liefern können /22/.

Die seismischen und akkustischen Methoden sind im vorliegenden Fall insbesondere dazu geeignet, grössere Hohlräume (> 1m Durchmesser) und mechanische Schwachstellen (geologische Störzonen, Auflockerungen) von mehr als 0.5 m Mächtigkeit zu orten. Genau den Grenzflächenbereich zwischen Auskleidung und Ausbruch allein untersuchen zu wollen, ist technisch sehr schwierig und kaum machbar. Immer wird ein bestimmtes Gesteinsvolumen miteinzubeziehen sein, wobei dann in der Regel auch Erkenntnisse hinsichtlich der genannten Grenzfläche gewonnen werden können.

3.2.3 Geoelektrische Messungen

Solche können nützlich sein, um insbesondere die Georadarmessungen zu ergänzen und zu überprüfen. Dabei kommen vor allem geoelektrische Sondierungen (Widerstandsmessungen) in Frage, die ab der Beton- oder Steinauskleidung des Tunnels ausgeführt werden können, sofern diese keine grösseren Metalleinlagerungen (Armierung!) aufweist. Hinsichtlich Methoden und Störungen wird auf Abschnitt 3.1.5 verwiesen.

Erfahrungen über geoelektrische Sondierungen im Grenzbereich Beton/Fels liegen unseres Wissens nicht vor bzw. sind nicht publiziert worden. Die bisherigen praktischen Erfahrungen beziehen sich vor allem auf geologische Untersuchungen, die ein grösseres Volumen an Gestein bzw. eine grössere Untersuchungstiefe zum Ziele hatten. Man könnte sich jedoch ähnliche Messungen vorstellen, die nur gerade die Auskleidung und einen geringen Bereich des dahinterliegenden Gebirges umfassen, wobei Sondierungen mit variablem oder fixem Elektrodenabstand ausgeführt würden.

Messungen mit variablem Elektrodenabstand (verschiedene Tiefenbereiche) sind gemäss dem heutigen Stand der Technik relativ aufwendig und von punktueller Art und sind deshalb für eine schnelle, flächenhafte Abklärung der Verhältnisse hinter der Tunnelauskleidung nicht geeignet. Eine gewisse technische Entwicklungsmöglichkeit scheint jedoch vorhanden zu sein.

Etwas besser sieht die Sache bei konstantem Elektrodenabstand aus, da diese pro Messstelle nicht mehrere male, sondern nur einmal ausgelegt werden müssen. Wählt man einen Abstand, der in etwa der Tiefenlage

der Grenzfläche Auskleidung/Ausbruch entspricht, so lassen sich von dieser, je nach Anzahl und Anordnung der Messpunkte, Widerstandsprofile und -karten herstellen, die Hinweise auf Anomalien und Heterogenitäten (Hohlräume, Störzonen, wasserführende Zonen) geben können.

Geoelektrische Messungen bedürfen aber in jedem Falle wegen den zumeist nicht eindeutig interpretierbaren Ergebnissen, Kernbohrungen, um die Messdaten zu eichen und zu überprüfen.

3.2.4 Georadarmessungen

Der hinter der Auskleidung befindliche Bereich kann ohne weiteres erkundet werden, sofern an der Grenzfläche keine Totalreflexion stattfindet. Eine solche kann jedoch unter Umständen auf eine mechanische Diskontinuität (Fuge) hinweisen, eine Information, die gerade bei der Untersuchung dieses Bereiches von Interesse sein kann. Störend wirken sich auf jeden Fall elektrische Leitungen, Metallanhäufungen und Eisenarmierungen im Beton aus /1/. Wie in Abschnitt 3.1.6 erwähnt wurde, sind die Ergebnisse oft mehrdeutig und nicht einfach zu interpretieren, und erfordern Kernbohrungen zwecks Eichung und Ueberprüfung der Ergebnisse. Die Methode eignet sich grundsätzlich zur Suche von grösseren Hohlräumen, Verbruchzonen und geologischen Strukturen (ausgeprägte Schichtung, Störungen, lithologische Wechsel). Der Untersuchungsbereich bzw. die Eindringtiefe der Radarwellen ist frequenzabhängig. Bei geeigneter Apparatur lässt sich diese auf die Grenze Auskleidung/Fels abstimmen und der gewünschte Bereich untersuchen.

3.2.5 Thermographie

Wie in Abschnitt 3.1.7.2 erwähnt, wiedergibt die thermographische Aufnahme der Tunnelwand die Verhältnisse hinter der Bildfläche, d.h. es wird sowohl die Tunnelwand wie der dahinterliegende Bereich erfasst. Die Tiefenwirkung der Aufnahme hängt dabei von den Temperaturkontrasten ab. Ein verhältnismässig sehr kaltes Wasser kann sich noch aus grösserer Entfernung deutlich bemerkbar machen, während ein anderes, das zwar viel näher liegt, aber praktisch gleich warm wie die Tunnelauskleidung ist, nur schwach erkennbar sein

wird. Die Tiefenwirkung der Thermographie kann ausser über die Empfindlichkeit der Messinstrumente, die begrenzt ist, nicht gesteuert werden. Bei günstigen Voraussetzungen lassen sich aber durchaus Ergebnisse hinsichtlich der oben erwähnten Ziele gewinnen. Mit Erfolg ist die Methode zur Aufspürung von Wasserzirkulationen in und hinter der Tunnelauskleidung oder von fehlendem Verbund der Auskleidung mit dem dahinterliegenden Fels angewandt worden (/1/). Der Erfolg ist jedoch nicht von vornherein gesichert und nur Versuchsmessungen können diesbezüglich Klarheit schaffen. Anstelle von Versuchsmessungen werden vorgängig etwa auch Modellrechnungen durchgeführt, um abzuklären, ob thermographische Messungen überhaupt sinnvoll und die Mobilisierung der teuren Geräte und Spezialisten auch vertretbar ist /20/.

Vorteilhaft bei der Thermographie ist deren Unempfindlichkeit gegenüber metallenen Einlagerungen. Elektrische oder andere Leitungen können aber dann störend wirken, wenn sie infolge Betrieb erwärmt sind.

3.3 Ermittlung von Deformationen

3.3.1 Allgemeines

Eine frühzeitige Erfassung von Deformationen des Tunnelquerschnittes ist einerseits aus Sicherheitsgründen und anderseits aus Gründen der Schadensminimierung erstrebenswert. Erfasste Deformationen zeigen einen in der Regel nicht eingeplanten, unerwünschten Belastungszustand des Untertagebauwerks, den es zu beheben gilt, falls die Gefahr besteht, dass die Festigkeitsgrenzen überschritten werden könnten. Systematische Deformationsmessungen können in diesem Sinne als Kontroll- und Alarmmassnahme dienen, die unter Umständen auf Probleme aufmerksam macht, bevor massive, augenfällige Schäden auftreten.

3.3.2 Konventionelle optische Methoden

Als solche werden hier Methoden verstanden, bei denen die in der terrestrischen Vermessung üblicherweise eingesetzten Instrumente (Theodolit, Distomat etc.) verwendet werden. Dabei sind weniger die Geräte, die eine rasante technische Entwicklung durchmachen, von

Bedeutung, als vielmehr der Umstand, dass es sich um statische Vermessungsmethoden handelt d.h. im Falle einer Tunnelvermessung wird abschnittsweise von einem bestimmten Punkt aus der Tunnelquerschnitt in einer gewissen Entfernung vermessen (/23/, /24/). Die gewünschte Genauigkeit von 1-2 mm ist heute durchaus erreichbar. Dank eingebauten Rechnern und computergetstützten Auswertungsverfahren ist der Zeitaufwand für die Messung und die Darstellung der Ergebnisse relativ gering, für eine vollständige Kontrolle eines längeren Tunnelbauwerkes aber immer noch zu gross.

3.3.3 Fortlaufende Vermessung

Einen ersten Schritt in Richtung eines stärker automatisierten Messverfahrens mit sofortiger Datenausgabe tat /25/, wobei vor allem die Möglichkeit des direkten Vergleichs der Messergebnisse mit dem Sollprofil am Bildschirm interessant ist. Die Genauigkeit betrug bei Messdistanzen von bis zu 15 m allerdings nur plus/minus 2 Promille (3 cm), was für den vorliegenden Fall nicht genügt. In der Zwischenzeit ist dieses Verfahren weiter entwickelt worden und erlaubt heute, nebst einer Genauigkeit von wenigen Millimetern, dank einer umfangreichen Steuer- und Datenverarbeitungseinrichtung, die gleichzeitige Aufnahme von bis zu 12 Messlinien. Ein Beispiel einer solchen Vermessung ist in Figur 12 gegeben. Die Methode entspricht nicht der hier geforderten flächenhaften Vermessung, liefert aber sehr interessante und brauchbare Ergebnisse. Nachteilig ist die notwendige genaue axiale (bzw. definierte) Positionierung und Verschiebung des Messgerätes, die nur in Bahntunneln ohne grösserer Aufwand möglich ist.

Eine interessante Lösung, die vom Prinzip her auch für die Vermessung von Tunnelwänden anwendbar erscheint, ist die fortlaufende Untersuchung von Fahrbahnen, wie sie an der Ecole polytechnique fédérale in Lausanne entwickelt wurde. Die Methode beruht auf dem Moiré-Verfahren, bei dem ein Referenz- und ein der untersuchten Oberfläche angepasster Linienraster optisch übereinandergelegt werden, so dass die Verformung der geprüften Oberfläche lückenlos erfasst werden kann /26/. Die Verformungsbilder werden über eine Videokamera erfasst und können direkt am Bildschirm studiert werden. Die Aufnahmebreite betrug bis zu 4 m, die Aufnahmen erfolgen kontinuierlich von einer auf einem fahrenden Lastwagen montierten Einrichtung. Bei einer

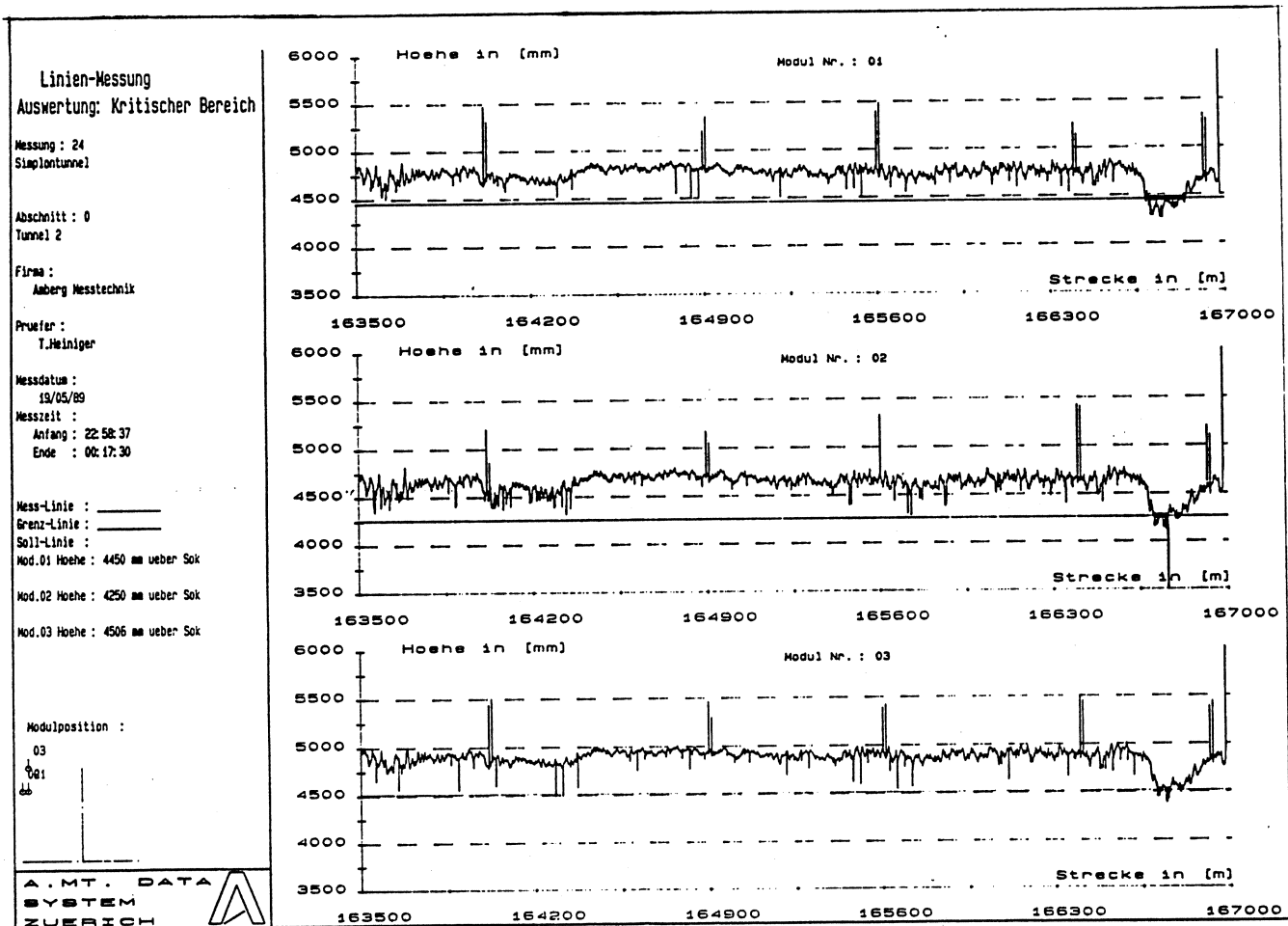


Fig. 12 Fortlaufende Deformationsmessung

Ausschnitt einer Aufzeichnung einer Messung in einem Bahntunnel. Gleichzeitige Linienmessung mit 3 Messmodulen.
Aufnahme und Bild: Amberg Messtechnik AG, Zürich

Fahrgeschwindigkeit von 20 km/h betrug der Messfehler weniger als 0,5 %, ist somit für die geforderte Genauigkeit im vorliegenden Fall noch zu hoch. Immerhin weist die Methode interessante Ansätze auf, die sich vielleicht weiter entwickeln lassen.

4. ENTWICKLUNGSWUENSCHEN UND ENTWICKLUNGSMOEGLICHKEITEN

4.1 Allgemeines

In den vorangegangenen Abschnitten ist gezeigt worden, dass bereits heute verschiedene Techniken bestehen, die für Tunneluntersuchungen eingesetzt werden können. Es ist auch dargelegt worden, dass die anzuwendenden Methoden vom Untersuchungsziel und von der Bauweise des Untersuchungsobjektes abhängen. Daraus ergibt sich, dass es die Untersuchungsmethode zur flächenhaften Erfassung des Zustandes des Tunnelbauwerkes nicht gibt und kaum je geben wird. Es bestehen aber verschiedene Techniken, die erlauben, als Einzelmethode gewisse Aspekte, oder in Kombination mit anderen Methoden eine solche Untersuchung vollumfänglich durchzuführen. Der für einen solchen Zweck erforderliche technische Entwicklungsstand ist für die verschiedenen Methoden sehr unterschiedlich. Er reicht von der konzeptuellen Idee bis zum nahezu ausgereiften System. Am weitesten fortgeschritten und erprobt ist die Georadar/Thermographie-Methode. Trotz des gegenwärtig führenden technischen Standes der beiden genannten Methoden, sollten die übrigen Techniken nicht beiseite gelassen werden, sondern zumindest deren Entwicklungspotential sorgfältig überprüft werden. Nachfolgend werden diesbezügliche Entwicklungsbedürfnisse und -möglichkeiten, die zukunftssträchtig erscheinen, kurz dargelegt und diskutiert, wobei diese jeweils nach den gesteckten Untersuchungszielen in Gruppen zusammengefasst werden.

4.2 Methoden für eine erste, übersichtsmässige Bestandesaufnahme

Die hierfür benötigte Untersuchungsmethode hat schnell und flächendeckend zu sein und soll den Zustand des Tunnelbauwerkes in Bildform dokumentieren. Bestimmte Probleme (mechanische Schwachstellen, Wasserzirkulationen) sollten erkennbar und die Ergebnisse raschestens verfügbar sein.

Die diesbezüglich am weitesten fortgeschrittene Methode ist die **Scanningaufnahme** im Wellenlängenbereich des sichtbaren Lichtes (**Fotografie**) und des Infrarotes (**Thermographie**). Die Aufnahme- bzw. Messtechnik hat bereits einen sehr hohen, erprobten Stand erreicht und ist wohl nur noch qualitativ zu steigern. Auch die

Auswertungstechnik hat bei gewissen Systemen bereits einen sehr hohen Entwicklungsstand erreicht und ist höchstens noch partiell zu verbessern.

Ein Thema für die Hochschulforschung könnte hingegen sein, die Möglichkeiten von "photographischen" Tunnelaufnahmen im Bereiche von anderen Wellenlängen als jene des sichtbaren Lichtes oder des Infrarotbandes zu überprüfen, die vielleicht kontrast- oder detailreichere Bilder liefern als gewöhnliche Fotografien. Ansätze finden sich möglicherweise in der Fernerkundungstechnik (Satelitenaufnahmen) wo u.a. mit Wellenlängen von 0.3 Mikrometer (Ultraviolett) bis Meter (Radar) gearbeitet wird /27/. Unterschiedliches Reflexionsverhalten, Lumineszenz, Dämpfungseffekte etc. lassen sich vermutlich auch im Tunnel messen und möglicherweise mit Parametern korrelieren, die Schlüsse auf den baulichen Zustand des Bauwerkes zulassen.

4.3 Spezifische, problemorientierte Untersuchungsmethoden

4.3.1 Erfassen der Betonqualität mittels geoelektrischer Methoden

Zielvorstellung ist die flächenhafte Kartierung des elektrischen Widerstandes der Tunnelauskleidung sowie die Möglichkeit, aufgrund der Messergebnisse Rückschlüsse auf den baulichen Zustand des Tunnels zu ziehen.

Die heute auf dem Markt erhältlichen Ausrüstungen sind für eine solche Aufgabe nicht geeignet. Grundsätzlich müsste es jedoch möglich sein, eine Messapparatur zu entwickeln, die den hier geforderten speziellen Anforderungen genügt d.h. es muss ein Gerät entwickelt werden, das einerseits kontinuierliche Messungen erlaubt und andererseits die (meist gekrümmten) Tunnelwände flächenhaft vermisst. Die gewählte Elektrodenkonfiguration kann fest sein, müsste aber die Anpassung auf unterschiedliche Betonstärken ermöglichen. Das am Institut für Baustoffe, Werkstoffchemie und Korrosion entwickelte Gerät für Spannungsmessungen scheint einen diesbezüglich gangbaren Weg aufzuzeigen /13/. Die Erfassung, Verarbeitung und Ausgabe der Daten hat soweit als nur möglich automatisch zu erfolgen.

Nebst der Lösung des rein apparativen, konstruktiven Problems wäre in einem ersten Schritt abzuklären, ob überhaupt eine Beziehung zwischen elektrischem Wider-

stand und baulichem Zustand (Festigkeit) der Tunnelauskleidung besteht bzw. ob diese messbar ist. Bei völlig trockenen Verhältnissen scheint dies wenig wahrscheinlich zu sein, doch ist dies in Tunneln wohl eher selten der Fall. Zumindest eine gewisse Bergfeuchtigkeit ist meist gegeben und damit auch die Möglichkeit des Auftretens feuchter Zonen im Beton. Solche sind primär dort zu erwarten, wo die Porosität gross ist (Auswaschungen, Mineralumwandlungen, Zersetzungen, Mikrorisse). Feuchte Stellen sollten sich durch geoelektrische Anomalien d.h. verhältnismässig hohe oder niedere Widerstände gegenüber ihrer Umgebung bemerkbar machen.

4.3.2 Erfassen der Betonqualität mittels seismischer Methoden (einschliesslich Ultraschall)

Zielvorstellung ist die flächenhafte Ermittlung der seismischen Laufgeschwindigkeiten der Tunnelauskleidung, die ein gutes relatives Mass für den physischen Zustand des Bauwerkes sind.

Auch in diesem Fall genügen die auf dem Markt erhältlichen Apparaturen den Anforderungen nicht, da sie für eine andere Einsatzweise konzipiert sind. Die technischen Grundlagen bestehen jedoch bereits und müssten nur noch an die speziellen Erfordernisse angepasst werden.

In erster Linie ginge es darum, ein System zu entwickeln, das erlaubt, eine grössere Anzahl von Geophonen, die im ganzen Tunnelquerschnitt und auf einer grösseren Fläche zu verteilen sind, rasch in Position zu bringen bzw. systematisch um einen gewissen Betrag zu verschieben. Dies könnte z.B. mittels eines fahrbaren Gestells erfolgen, von dem aus die Geophone durch verstellbare mechanische Arme an die Wand gepresst würden. Die vom Impulserzeuger (Ultraschallquelle, Vibrator, Hammer) ausgesandten Signale wären simultan von allen Geophonen zu erfassen. Solche Konfigurationen sind in der Seismik nichts Neues und die dazu erforderlichen Apparaturen technisch ausgereift.

Die zu erwartenden Probleme beziehen sich auf die Auswertung der Messdaten, die wohl nur noch vollelektronisch zu bewältigen ist. Dabei dürften vor allem auch theoretische und rechnerische Schwierigkeiten auftreten, denn einerseits ist die zu untersuchende Schicht (die Tunnelauskleidung) gekrümmt, was die Verhältnisse

wesentlich komplizierter macht, und andererseits sind Interferenzen der verschiedenen Wellen (Oberflächenwellen, Kompressions- und Scherwellen) sehr wahrscheinlich.

In einem ersten Schritt wäre demnach abzuklären, ob solche Messungen überhaupt machbar sind und wie die ideale Konfiguration von Sender und Empfängern auszusehen hat. Aus letzterem ergibt sich dann auch die Vorgehensweise bei der Auswertung der Ergebnisse.

Eine rasche, flächendeckende seismische Untersuchung hätte den Vorteil, dass sie hinsichtlich Festigkeit der Auskleidung konkrete Zahlenwerte liefern würde (seismische Geschwindigkeiten), die mit bautechnisch relevanten Parametern wie Druckfestigkeit, Dichte etc. zumindest grob korrelierbar sind.

4.3.3 Erfassen der Betonqualität mittels elektromagnetischer Methoden

Wie in Abschnitt 3.1.6.2 erwähnt, lassen sich bei Georadaraufnahmen auch die Laufgeschwindigkeiten der elektromagnetischen Wellen ermitteln, die durch verschiedene Parameter beeinflusst werden (elektrische Leitfähigkeit, Dielektrizitätskonstante, Porosität, Wassergehalt etc.).

Es bestehen gute Möglichkeiten, dass diese Geschwindigkeiten auch qualitative Aussagen oder gar Korrelationen mit ähnlichen Parametern wie bei den seismischen Methoden erlauben /15/. Für eine fundierte statistische Auswertung fehlt aber heute noch die Datengrundlage. Hier bietet sich folglich ein grösseres, noch ziemlich offenes Forschungsgebiet an. Konkret ginge es darum, Korrelationen zwischen bautechnisch relevanten Parametern (Festigkeit, Porosität etc) und den elektromagnetischen Wellengeschwindigkeiten herzuleiten, wobei nicht zuletzt auch die Art d.h. Zusammensetzung des Untersuchungsmaterials (wie z.B. Mischung und Art der Komponenten des Betons) eine Rolle spielen dürfte.

Eine weitere Entwicklungsmöglichkeit wäre die Schaffung einer Apparatur, die simultan mehrere Profile gleichzeitig aufnimmt, was zu einer weiteren Leistungssteigerung führen würde (bei allerdings hohen Kosten). Die Kombination einer solchen Messausrüstung mit dem erwähnten Auswertungsverfahren (Ermittlung der

elektromagnetischen Laufgeschwindigkeiten und Korrelation mit bautechnischen Parametern) wäre äusserst zweckmässig, da dadurch nebst bildlichen Darstellungen des Aufbaus und der Struktur des Untersuchungsobjektes auch konkrete Zahlenwerte Aussagen über den physischen Zustand der Tunnelauskleidung erlauben würden.

Am Ende der Entwicklung könnte schliesslich die weitgehend automatisierte Datenverarbeitung und Datenauswertung stehen, die ein dreidimensionales Bild (Tomogramm) des Zustandes der Tunnelröhre liefert.

4.3.4 Erfassen von Deformationen

Besonders in den Fällen, wo mit stärkeren Gebirgsdeformationen, die sich auf die Tunnelröhre übertragen können, gerechnet werden muss, wäre ein präzises, rasches Kontrollwerkzeug zur frühzeitigen Erkennung von Deformationen, die zu Objektschäden führen könnten, sehr wünschenswert. Stationäre Messverfahren (Konvergenzmessungen, geodätische Vermessung) sind bereits entwickelt und im Gebrauch, erfüllen aber die hier gesetzten Anforderungen hinsichtlich Raschheit und flächendeckende Vermessung nicht.

Die im Abschnitt 3.3.3 erwähnten Verfahren weisen auf Weiterentwicklungsmöglichkeiten hin, wobei bei der flächenhaften Vermessung, z.B. beim Moiré-Verfahren, die Genauigkeit noch wesentlich zu verbessern wäre. Ob dies überhaupt möglich ist, könnte Gegenstand einer ersten Abklärung sein. Schnell und präzise sind die Linienmessungen mit Laser- und Infrarotstrahlgeräten. Erhöht man die Anzahl der radialen Messpunkte bei gleichzeitig kürzeren Abständen zwischen den Messprofilen ergibt sich eine nahezu flächendeckende Vermessung. Dies ist ein vermutlich lösbares Steuerungs- und Messproblem, das allerdings den Einsatz einer umfangreichen Elektronik- und Computerausrüstung verlangt, die vielleicht aus Kosten- und Platzgründen nicht mehr in jedem Falle eingesetzt werden kann.

Fig. 13 ZUSAMMENFASSUNG DER VERSCHIEDENEN UNTERSUCHUNGSMETHODEN
UND DER ANWENDUNGSZIELE BEI VERKLEIDETEN TUNNELN UND
STOLLEN

METHODE	BETON- QUALITAET	EINLAGERUNGEN UND HOHLRAEUME IN DER AUSKLEID.	WASSERZIR- KULATIONEN HINTER AUSKLEID.	HOHLRAEUME UND MECHAN. SCHWACHSTELLEN	GEOLOGISCHE STRUKTUREN	DEFORMA- TIONEN
Visuelle Ueberprüfung	+	-	-	-	-	(+)
Fotografie, Video (einschl. Scanning)	(+)	-	(+)	-	-	-
Ultraschall	+	(+)	-	(+)	+	-
Refraktionsseismik	+	(+)	-	+	+	-
Geoelektrische Wider- standsmessungen	(-)	- (ausser Metall)	(+)	-	+	-
Elektr. Spannungsmessungen	+	-	-	-	-	-
Georadar	(-)	+	(+)	+	+	-
Thermographie	(-)	+	+	(+)	(+)	-
Gasmessungen	(+)	-	(+)	-	(+)	-
Radiometrische Methoden	(+)	-	-	-	-	-
Deformationsmessungen	-	-	-	-	-	+

+ erfassbar (+) beschränkt erfassbar
- nicht erfassbar (-) eventuell möglich, noch zu überprüfen

DANK

Herrn Prof. Dr. K. Kovari, Präsident der SIA-Fachgruppe, der diesen Bericht angeregt und veranlasst hat, sowie dem Bundesamt für Strassenbau, das diese Arbeit in Auftrag gegeben hat (Forschungskredit Nr. 59/88) sei an dieser Stelle herzlich gedankt.

Grosser Dank für interessante Anregungen, fruchtbare Kommentare, fachliche Beiträge und Ueberlassung von Bildmaterial sei all jenen ausgesprochen, die den Autor in freundlichster Weise unterstützt haben, insbesondere den Herren G. Andrea (Ingenieurbüro Amberg, Zürich), E. Beusch (Baudepartement des Kantons Aargau), C. de Bosset (Boscomer SA, Neuchâtel), L. Cardinaux (Centre de documentation internationale de recherche routière, Lausanne) und R. Sutter (Gepard Sensor Technologies, Thalwil). Gedankt sei auch Herrn A. Zanetti (Vorstand SIA-Fachgruppe Untertagebau) für die kritische Durchsicht dieser Arbeit sowie für seine wertvollen Anregungen.

Jean-Pierre Jenni

LITERATURVERZEICHNIS

Für die Literaturrecherche wurden u.a. die Datenbanken des Bureau de recherches géologiques et minières, département de documentation, Orléans, und des Centre de documentation internationale de recherche routière, Lausanne benützt.

- /1/ J.P. Jenni: Ueberprüfung eines Druckstollens mittels Georadar und Thermographie.
Felsbau 6, 1/1988
- /2/ Neue Zürcher Zeitung: Hohe Aufwendungen der SBB für Tunnelsanierungen.
NZZ, Nr. 276, 27.11.1986
- /3/ G. Stehno, R. Poisel, H. Oehreneder, G. Heregger:
Long-term measurements in a ventilation shaft.
Intl. Symp. Long-Term Observation of Concrete Structures, RILEM/ACI, Budapest, 1984
- /4/ A. Etterlin: Die Sanierung des Hauenstein-Basis-tunnels.
Schweizer Eisenbahn-Revue, 5/1985
- /5/ P. Eckardt, H. Funk, T. Labhart: Postglaziale Krustenbewegungen an der Rhein-Rhone-Linie.
Vermessung, Photogrammetrie, Kulturtechnik, 81. Jg., 2/1983
- /6/ P. Nischer: Nachträgliche Bestimmung der Festigkeit des Bauwerkbetons.
Zement und Beton, Wien, 1975, Nr. 78/79
- /7/ A.P. Keiller: A preliminary investigation of test methods for the assessment of strength of in situ concrete.
Cement and Concrete Association, Technical Report 551, 1982
- /8/ H.-U. Aeschlimann: Schadendiagnose, Grundlage für die Sanierung von bewehrten Betontragwerken.
Schweizer Ingenieur und Architekt, 37/1985
- /9/ M. Ladner: Zustandsuntersuchung von Bauwerken.
EMPA Bericht Nr. 116/3, 1988
- /10/ British Standards Institution: Recommendations for nondestructive testing of concrete.

- BS 4408: Part 5: Measurement of velocity of ultrasonic pulses, London, 1974
- /11/ E. Carabelli, A. Sampaolo, S. Superbo: Mesure sonique dans les roches, les sols et le béton.
Bull. Intl. Assoc. Engineering Geology, No. 26/27, 1983
 - /12/ M. Güntensperger: Geophysikalische Messungen im Felslabor Grimsel.
Nagra informiert, 4/1985
 - /13/ H. Böhni: Korrosion und Korrosionsschutz im Bauwesen.
Schweizer Baublatt, Nr.27, 1989
 - /14/ B. Elsener: Elektrochemische Methoden zur Bauwerksüberwachung.
SIA-Dokumentation D 020, 1988
 - /15/ Boscomer Services S.A.: Moderne kombinierte Methoden zur Untersuchung von Bauwerken.
Firmenprospekt, ergänzende mündliche Mitteilung von C. de Bosset
 - /16/ H. Armbruster und G.P. Merkler: Measurement of Subsoil Flow Phenomena by Thermic and Geoelectrical Methods.
Bull. Intl. Assoc. Engineering Geology, No. 26/27, 1983
 - /17/ Neue Zürcher Zeitung: Thermographische Messungen in Zürich. 18.01.1989
 - /18/ J.-M. Metivier: Applications de la télédétection thermique rapprochée a la mécanique des roches et au génie civil.
Thèse No. 1738, Université de Bordeaux, 1981
 - /19/ Th. Brasser und H. Kull: Untertägiger Einsatz eines Infrarot-Strahlungsthermometers zur Identifizierung und Abgrenzung wasserführender Kluftzonen.
Felsbau 6/2, 1988
 - /20/ Amberg Ingenieurbüro: Tunnelzustandsbeurteilung.
Firmenprospekt
 - /21/ P. Schwander und A. Rösli: Anwendung der Computertomographie auf Beton.
Schweizer Ingenieur und Architekt, 5/1984

- /22/ P. Blümling und G. Sattel: Tomographische Untersuchungen.
Nagra informiert 1+2, 1988
- /23/ H.J. Matthias: A Simple, Fast and Accurate Method for Underground Deformation Measurements with Theodolite Only.
Proc. Intl. Symp. Field Measurements in Geomechanics, Zürich, 1983
- /24/ T. Celio and H. Matthias: PMS2 A Fast Automatic Profile Recorder for Underground Surveys.
Proc. Intl. Symp. Field Measurements in Geomechanics, Zürich, 1983
- /25/ R. Amberg and A. Hertelendy: New Methods of Measuring Technique in Underground Openings.
Proc. Intl. Symp. Field Measurements in Geomechanics, Zürich, 1983
- /26/ L. Pflug und S. Oesch: Fortlaufende Untersuchung der Fahrbahn.
Schweizer Ingenieur und Architekt, 22/1984
- /27/ J. V. Taranik and Ch. M. Trautwein: Integration of Geological Remote-Sensing Techniques in Subsurface Analysis.
US Department of the Interior, Geological Survey, Open-File Report 76-402, 1976

Weitere, nicht im Bericht zitierte Hinweise neueren Datums:

- (at) Radar und Computer "durchschauen" den Erdboden.
Schweizer Ingenieur und Architekt, 14/1990, S. 398

(Ueberprüfung eines Eisenbahntunnels in Australien)
- STUVA (Studiengesellschaft für unterirdische Verkehrsanlagen E.V.):
Berichte über zerstörungsfreie Prüfverfahren zur Beurteilung von Tunnelauskleidungen (in Vorbereitung)

**LISTE VON INSTITUTIONEN, DIE SICH MIT DEN IM BERICHT
ERWAEHNTEN UNTERSUCHUNGSMETHODEN BESCHAEFTIGEN**

Amberg Ingenieurbüro AG
Ausstellungsstrasse 88
8031 Zürich

Tunnelzustandsbeurteilungen; Auswertung und Interpretation von Scanneraufnahmen (Thermographie)

Durchführung von Modellversuchen an nachgebauten Tunnelgewölben (Versuchstollen Hagerbach) zwecks Eichung und Weiterentwicklung der Untersuchungstechniken

BOSCOMER Services S.A.
Ingénieurs-Conseils
12, rue du Pommier
2000 Neuchâtel

Geophysikalische Messungen aller Art. Georadar und Thermographieaufnahmen von Ueber- und Untertagebauwerken

Bundesanstalt für Wasserbau
Kussmaulstrasse 17
D-7500 Karlsruhe

Anwendung der Thermographie für geotechnische Zwecke

Geologisches Landesamt
Rheinland-Pfalz
Abteilung Ingenieurgeologie
Postfach 2045
D-6500 Mainz 1

Georadarmessungen für geotechnische Zwecke

GEPARD Sensor Technologies AG
Ludretikonerstrasse 44
8800 Thalwil

Thermographische Vermessungen aus der Luft, insbesondere von städtischen Gebieten

Gesellschaft für Strahlen- und Umweltforschung mbH
Institut für Tieflagerung
München (GSF)
Ingolstädter Landstrasse 1
D-8042 Neuherberg

Grundlagenforschung verschiedenster Art, u.a.
Thermographie

IMAC
Ecole polytechnique fédérale
de Lausanne
Dép. de Génie civil
1015 Lausanne

Fahrbahnvermessung

Institut für Baustoffe, Werkstoffchemie und Korrosion der ETHZ
ETH Hönggerberg
8093 Zürich

Korrosionsschutz im Bauwesen; Spannungsmessungen (elektr. Potential), Betonprüfung mittels Röntgentomographie

SPACETEC Datengewinnung GmbH
Salzstrasse 47
D-7800 Freiburg

Scanneraufnahmen (Thermographie) von Ueber- und Untertagebauwerken

Studiengesellschaft für unterirdische Verkehrsanlagen E.V.
Mathias-Brügger-Strasse 41
D-5000 Köln 30

Forschungsvorhaben mit dem Titel "Zerstörungsfreie Prüfverfahren zur Beurteilung von Tunnelauskleidungen". Versuche an Fehlstellenwänden.

Swedish Geological Co.
Uppsala
Neu: ABEM AB
Research and Development
Box 1424
S-75144 Uppsala

Georadarmessungen, Tomographie

Université de Bordeaux I
Laboratoire de radiogéologie et de mécanique des roches
Avenue des Facultés
F-33405 Talence Cedex

Thermographische Messungen aus der Luft und zu Lande, einschliesslich in Tunneln
Gas- und Isotopenmessungen