

DIE MESSUNG DER DEHNUNGSVERTEILUNG IM BAUGRUND DER MÜNCHNER U-BAHN

Christian Amstad

Kalman Kovári

Institut für Bauplanung und Baubetrieb
Gruppe für Fels- und Untertagebau

Eidgenössische Technische Hochschule Zürich

Zusammenfassung

Um den Mechanismus der Oberflächensetzungen zu verstehen und ihre durch Tunnelvortriebe verursachte Entwicklung zu kontrollieren, wurden beim Münchner U-Bahn-Bau seit 1980 systematische Dehnungsbeobachtungen im Baugrund unter Verwendung einer portablen Bohrlochsonde durchgeführt.

Solche Messungen gestatten die Ermittlung des Einflusses der Grundwasserabsenkung und der verschiedenen Phasen des Vortriebes auf die Setzungen. Die angewendete Messtechnik liefert die

vollständige Verteilung der axialen Dehnungen längs von Bohrlöchern und zeigt schichtweise den Einfluss des Tunnelvortriebes auf den anstehenden Baugrund. Rückrechnungen des umfangreichen Beobachtungsmaterials liefern verbesserte Grundlagen für zukünftige Planungs- und Bauverfahren.

Als Messinstrument wurde das «Gleitmikrometer» verwendet, welches nachfolgend beschrieben wird. Typische Messresultate aus verschiedenen Baulosen der U-Bahn-München werden anschliessend diskutiert.

1. Einleitung

Das strengste Kriterium beim Entwurf und Bau von oberflächennahen Tunnels in Stadtgebieten ist die Beschränkung der differentiellen Verformungen im Baugrund sowie der absoluten Oberflächensetzungen. Die Grösse und Form der Setzungsmulde ist als Folge des wechselnden Porenwasserdruckes (Konsolidation) sowie der Spannungsumlagerung im Baugrund zeitabhängig. Solche Änderungen müssen dreidimensional sowohl bezüglich der Einflüsse in Richtung der Tunnelachse als auch quer dazu betrachtet werden.

So können z.B. die Oberflächensetzungen, die durch die Zusammendrückung des noch nicht ausgebrochenen Baugrundes vor der Ortsbrust des Tunnels entstehen, bis zu 30% der totalen Setzungen an der Geländeoberfläche betragen. Zieht man in Betracht, dass der Boden aus Schichten unterschiedlicher Dicke mit variierender Verformbarkeit bestehen kann, wird klar, dass nur eine fortgeschrittene Messtechnik in der Lage ist, zu einem adäquaten Verstehen des Deformationsmechanismus beizutragen. Basierend auf der gründlichen Kenntnis des Verhaltens des Baugrundes in Zusammenhang mit den diversen baulichen Aktivitäten können gezielte Massnahmen zur Vermeidung übermässiger differentieller oder absoluter Set-

zungen zum Schutz von angrenzenden Baulichkeiten bzw. Versorgungsleitungen getroffen werden.

Im folgenden wird das Grundkonzept dieser vergleichsweise neuen Messtechnik, d.h. der Anwendung des portablen «Gleitmikrometers» zur Messung der Dehnungsverteilung entlang von Bohrungen, dargestellt. In der Praxis wurde dieses Instrument erstmals beim Bau der U-Bahn-Station Republica in São Paulo in Brasilien¹ und in der Folge bei diversen anderen Tunnelbauwerken in Österreich, der BRD, in Japan und der Schweiz eingesetzt. Die umfanglichste Anwendung hat das Gleitmikrometer beim Bau der U-Bahn-München erfahren, welche nach erfolgter Fertigstellung eine totale Netzlänge von 80 km aufweisen wird. Nachfolgend sollen einige typische Ergebnisse aus der Zeitperiode 1980–84 diskutiert werden. Die Betonung wird dabei auf die praktischen Folgerungen gelegt, die aus der Beobachtung der Dehnungen im Hinblick auf höhere Sicherheit und Wirtschaftlichkeit des Tunnelbauwerks gezogen werden. Zudem soll darauf hingewiesen werden, dass eine sorgfältige Interpretation der Messdaten gleichzeitig unser allgemeines Verständnis für Verhaltensmodelle bei Tunnelkonstruktionen erhöht.

2. Das Konzept der Linienbeobachtung

Das Gleitmikrometer gehört zu einer Instrumentenfamilie, die zur Durchführung von Deformationsmessungen nach dem Prinzip der Linienbeobachtung entwickelt wurde^{2 3}. Dies bedeutet das Messen der Verteilung einer Deformationsgrösse entlang einer Linie. Die Linie kann durch die Achse einer Bohrung oder durch die Innenlaibung eines Tunnelgewölbes definiert sein. Das gemeinsame Merkmal aller an unserem Institut entwickelten Messinstrumente besteht darin, dass die Linie, entlang welcher die Verformungen gemessen werden, in eine Kette von klar definierten Referenzpunkten aufgeteilt wird. Der gegenseitige Abstand dieser Punkte ist konstant und ergibt sich sowohl aus der Natur des zu lösenden Messproblems als auch im Hinblick auf das verfügbare Instrument.

Auf diese Weise wird die kontinuierliche Messung der Deformation entlang einer Linie auf die Beobachtung der Punkte der Messlinie, in der Regel auf die relative Verschiebung benachbarter Punkte, zurückgeführt. Im Falle der Messung der Dehnungsverteilung mit dem Gleitmikrometer wird zuerst ein mit ringförmigen Messmarken bestücktes HPVC-Rohr ($\varnothing=60$ mm) mittels Injektion in das Bohrloch eingemörtelt. Die in einem regelmässigen Abstand von 1 m angeordneten Messmarken dienen einerseits als Verbindungselement zwischen zwei benachbarten HPVC-Rohren, andererseits als Gehäuse

zur Aufnahme der Messsonde (Fig. 1). Die Messmarken haben den Zweck, die beiden Messköpfe der portablen Messsonde für die kurze Dauer einer Ablesung aufzunehmen. Die Messsonde ist derart robust ausgebildet, dass Messungen auch in tiefen Bohrungen beliebiger Richtung durchgeführt werden können. Die Verbindung zwischen HPVC-Rohr und Messmarke ist andererseits weich genug, um einen «Pfähleffekt» längs der Messlinie zu vermeiden. Erfährt eine Messmarke, verursacht durch Deformationen im anstehenden Gebirge, eine relative Verschiebung bezüglich einer benachbarten Messmarke, so kann die Distanzänderung, d.h. die Dehnung bei einer Messbasis von 1 m, als Differenz zweier Ablesungen berechnet werden.

Der Messablauf gestaltet sich wie folgt:

Die Messung beginnt beim Bohrlochmund, wo die Sonde zwischen zwei benachbarten Messmarken verspannt und eine Ablesung vorgenommen wird. Anschliessend wird die Sonde schrittweise in die Bohrung abgesenkt, wobei in jeder Messposition eine Ablesung vorgenommen wird. Nach dem Erreichen des Rohrendes werden die Ablesungen beim Zurückziehen der Sonde wiederholt. Hin- und Rückmessung erleichtern die wichtige Überprüfung der Messgenauigkeit.

(Sonderdruck ist die deutsche Fassung des Originalbeitrages «Strain Monitoring in the Subsoil of the Munich Subway», «2nd Conference on Mass Transportation in Asia» Juni 1984, Singapur Institut für Bauplanung und Baubetrieb, Gruppe für Fels- und Untertagebau, ETH Zürich)

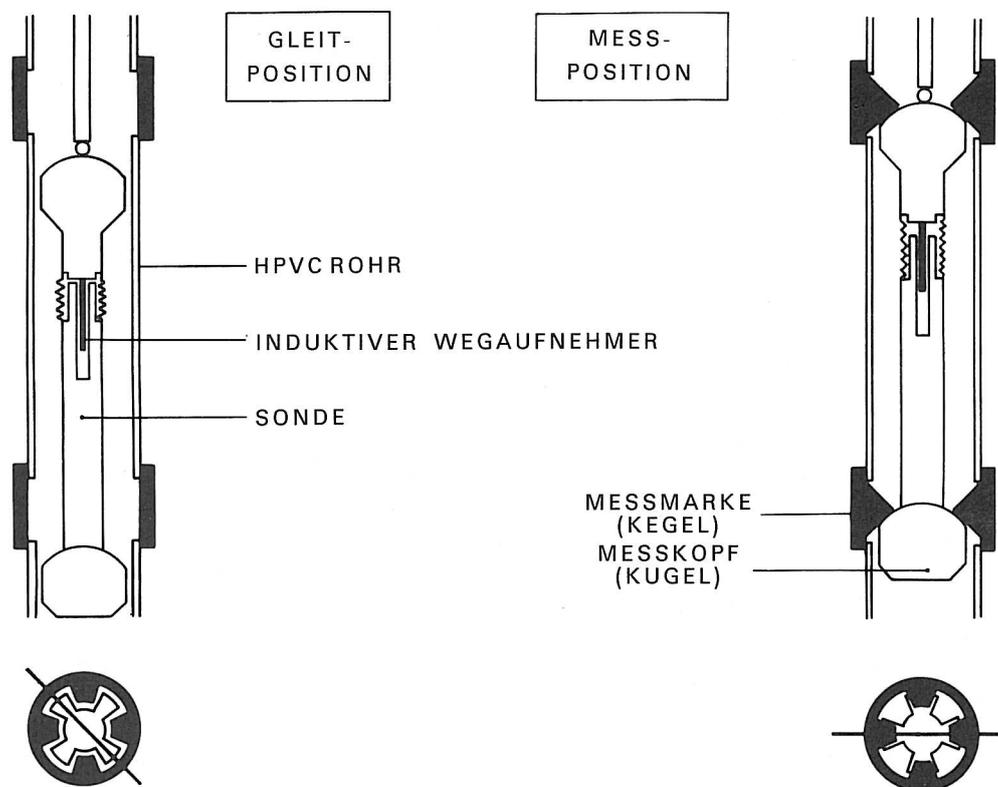


Fig. 1 Schematische Darstellung des Gleitmikrometers in Gleit- und Messposition.

Das Hauptproblem bei der Entwicklung des Gleitmikrometers war das Auffinden einer einfachen mechanischen Lösung zur Positionierung der Instrumentenmessköpfe in den Messmarken. Dieser Anforderung konnte man mit einer besonderen Konstruktion gerecht werden¹. Weisen die Messköpfe die Form einer Kugel und die Messmarken diejenige eines Kreiskegels auf, so ist die Position des Kugelmittelpunktes in bezug auf den Kegel korrekt definiert. Mit diesem Prinzip kann die Messsonde mit einer Genauigkeit von einigen Mikrons ($\pm 2 \times 10^{-6}$) in zwei benachbarten Messmarken verspannt werden. Die Messmarken und die Instrumentenköpfe sind selbstverständlich nur Segmente eines Kegels bzw. einer Kugel, so dass die Sonde nach einer Drehung um 45° an den Messmarken vorbei zu jedem beliebigen Punkt der Bohrung geführt werden kann. Es muss noch erwähnt werden, dass die alternierenden Operationen wie Verspannen und Gleiten der Sonde durch die Anwendung eines Führungsschwertes an der Sonde (Fig. 2) wesentlich erleichtert wird. Der Zeitbedarf für die Hin- und Rückmessung einer 40 m langen Bohrung beträgt damit nur rund eine halbe Stunde.

Die Konstruktion der Sonde ist schematisch in Figur 1 dargestellt. Die beiden Messköpfe sind durch ein federgespanntes, verdrehungssteifes Hüllrohr verbunden. Die Relativverschiebung zwischen den Messköpfen wird durch einen induktiven Messwertaufnehmer übertragen. Das Bedienungsgestänge kann mit dem oberen Messkopf verbunden werden. Auch das Kabel zur Übermittlung der

Messdaten wird dort gekoppelt. Da der Abstand der beiden Messköpfe kleiner ist als derjenige der Messmarken, muss zur Verspannung der Sonde in Messposition vorerst der untere Kopf mit der Kegelfläche Fühlung nehmen. Erst nach der Streckung der Feder im Hüllrohr berührt der zweite Messkopf die obere Messmarke. Die Zugkraft wird entweder über das Bedienungsgestänge oder via Messkabel aufgebracht.

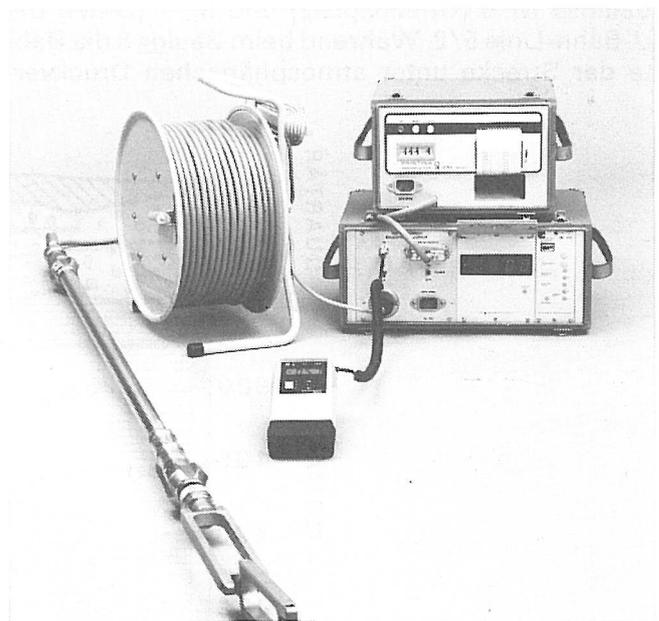


Fig. 2 Gleitmikrometer-Messausrüstung mit Sonde, Orientierungsschwert, Kabelrolle, Ableseinstrument und Drucker.

Besondere Merkmale des Gleitmikrometers:
Die Messsonde ist bis zu 15 bar wasserdicht. Temperaturbeeinflussungen werden überwiegend durch ein selbstkompensierendes System ausgeschaltet. Um jedoch temperaturbedingte Spannungen im Beton, Boden oder Fels von spannungsbedingten Dehnungen unterscheiden zu können,

ist die Sonde mit einem Temperatursensor ausgestattet. Zur Durchführung der Funktionskontrolle und zur Überprüfung der Nullpunktstabilität des Messsystems wird eine tragbare Eichlehre aus Invarstahl verwendet. In dieser Lehre befinden sich zwei Messmarken, in welchen die Sonde vor und nach einer Messserie verspannt wird.

3. Geotechnische Bedingungen und Konstruktionsmethoden bei der Münchner U-Bahn

Der Bau des Münchner U-Bahn-Netzes begann im Jahre 1965 und soll planmässig im Jahre 1995 vollendet werden^{4 5}. Im Jahre 1984 waren bereits 46 km des total 80 km langen Netzes in Betrieb und weitere Abschnitte von insgesamt 11 km näherten sich der Fertigstellung. Sowohl Tagbau als auch bergmännische Bauweisen wurden angewendet, wobei die letzteren mehr und mehr an Bedeutung gewinnen. Im Zeitraum von 1960 bis 1975 wurden 25% der Strecken in geschlossener Bauweise hergestellt, während zwischen 1975 und 1980 der Anteil auf 75% anwuchs. Die Ursache für diese Entwicklung ist einmal in der wachsenden Empfindsamkeit gegenüber grossflächigen Bauvorhaben in dicht bebauten Stadtgebieten, aber auch in der sich ständig verbessernden Tunnelbautechnologie mit der daraus resultierenden Kostenreduktion zu sehen⁶. Die Verwendung von Spritzbeton als temporären Ausbau hat sich als sicher und preisgünstig erwiesen. Die technischen Vorteile dieser Bauweise haben sich durch die simultane Anwendung von Druckluft noch zusätzlich verstärkt⁷.

Die nachfolgenden Erörterungen über Deformationsmessungen beziehen sich vorwiegend auf die Baulose Nr. 6 (Odeonsplatz) und Nr. 7 (Lehel) der U-Bahn-Linie 5/9. Während beim Baulos 6 die Hälfte der Strecke unter atmosphärischen Druckver-

hältnissen vorgetrieben werden konnte, wurde das Baulos 7 vollständig unter Druckluft aufgeföhren. Vorgetrieben wurden sowohl eingleisige und zweigleisige Tunnel als auch Abschnitte mit wechselnder Spannweite und dünnen Pfeilerwänden zwischen den Röhren.

Figur 3 zeigt ein typisches geologisches Schnittbild mit den beiden Hauptformationen, und zwar den quartären Sedimenten bestehend aus sandigen Schottern und dem darunterliegenden tertiären Mergel, der häufig als Flnzmergel bezeichnet wird. Letzterer tritt in unterschiedlichen Erscheinungsformen auf, sei es als steifer oder sogar harter Ton, toniger Schluff, Mergel, Mergelstein oder als fein bis mittelkörniger Sand. Das Grundwasser im Quartär hat in der Regel keine Verbindung mit dem Wasser in den tertiären Bereichen. In diesen kann der Porenwasserdruck in benachbarten Sandlinsen auch sehr unterschiedlich sein und manchmal arthesischen Charakter aufweisen. Die Tone und Mergel sind nahezu wasserundurchlässig und bieten einen zuverlässigen Schutz gegen das Grundwasser in der quartären Formation. Voraussetzung dazu ist allerdings, dass die Mergelschichten über dem Tunnelscheitel mindestens 2 bis 3 m stark sind. In den nachstehend erörterten Fällen war diese Bedingung immer erfüllt.

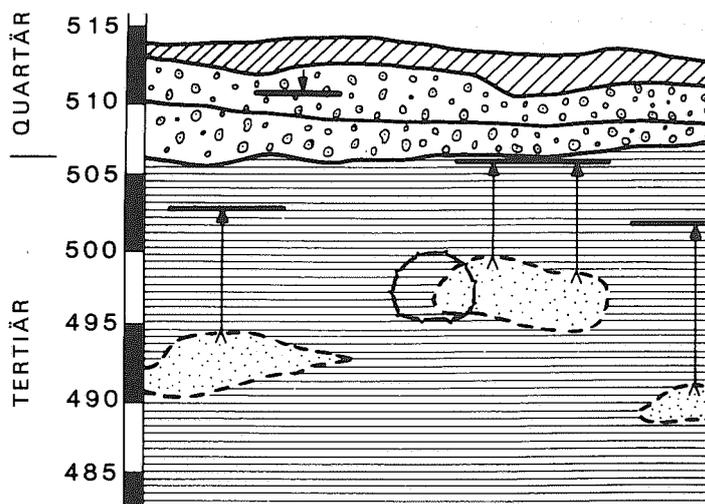


Fig. 3 Bodenschichtung mit den hydrologischen Verhältnissen und der Tunnelage.

(Sonderdruck ist die deutsche Fassung des Originalbeitrages «Strain Monitoring in the Subsoil of the Munich Subway», «2nd Conference on Mass Transportation in Asia» Juni 1984, Singapur Institut für Bauplanung und Baubetrieb, Gruppe für Fels- und Untertagebau, ETH Zürich)

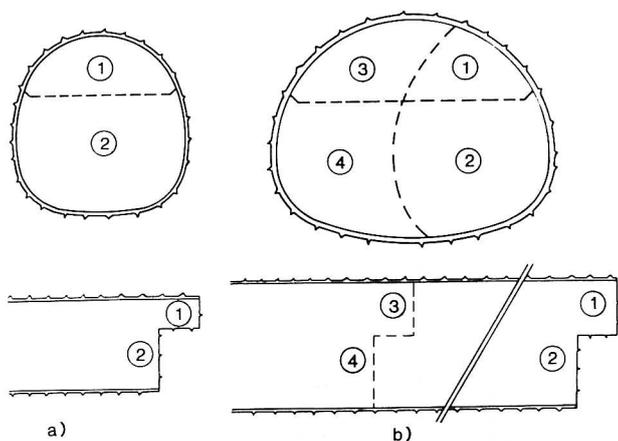
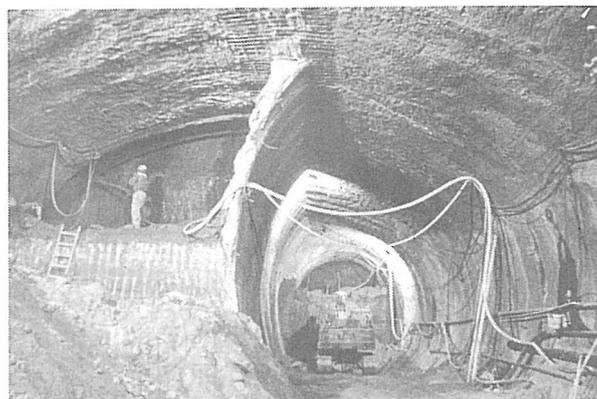


Fig. 4 Bauweise mit Spritzbetonstützung
 a) Eingleisiger Tunnel, Querschnittsfläche 38 m²
 b) Zweigleisiger Tunnel, Querschnittsfläche 80 m²

Der Vortrieb eines eingleisigen Tunnels erfolgt normalerweise im Kalottenvortrieb mit nachfolgendem Strossenabbau (Fig. 4a). Der Ringschluss mittels Spritzbeton wird dabei möglichst nahe (2 bis 4 m) bei der Ortsbrust der Kalotte vollzogen, und dies in einer kurzen Zeit von maximal 1–2 Tagen nach dem Ausbruch. So wird eine statisch günstige Wirkung gegen Baugrundverformungen und Oberflächensetzungen erzielt. Das selbe Prinzip wird auch beim zweigleisigen Querschnitt angewendet (Fig. 4b), wo vorerst eine Tunnelhälfte analog der eingleisigen Bauweise vorgetrieben wird. Auf das volle Profil wird der Tunnel dann in einer Entfernung von ungefähr 15 m ausgeweitet, und zwar wiederum aufgeteilt in Kalotte und Strosse. Sobald wasserführende Sandlagen angefahren werden, müssen besondere Massnahmen ergriffen werden.



Diese können aus einer Reduktion des Grundwasserspiegels mittels Brunnen oder aus der Anwendung von Druckluft als zusätzlicher Stützmassnahme bestehen. Die tertiären Sande sind im allgemeinen eher dicht gelagert und bilden eine standfeste Ortsbrust, solange kein aussergewöhnlicher Wasserdruck herrscht.

Wird mit Druckluft gearbeitet, so dient die eingebrachte Spritzbetonschale als provisorische Stützung. Nach Fertigstellung des Bauabschnittes werden wieder atmosphärische Verhältnisse hergestellt. Die Spritzbetonschale übernimmt dann solange den äusseren Wasserdruck, bis die endgültige, bewehrte Innenschale eingebaut ist. Diese Verfahrensweise erwies sich als sehr erfolgreich, ist sicher und verringert die Baugrundverformungen.

4. Erörterung der Verformungen im Baugrund

Beim Münchner U-Bahn-Bau wird ein streng methodischer Weg bei der Beobachtung des Verhaltens der verschiedenen Konstruktionselemente verfolgt. Messungen werden im allgemeinen im Tunnel selbst, im Baugrund, an der Geländeoberfläche sowie an setzungsgefährdeten Bauten ausgeführt⁸. Das Messprogramm und die daraus resultierende Instrumentierung wird so ausgelegt, dass spezifische Fragen beantwortet werden können. Die Ergebnisse der verschiedenen Beobachtungen sollten eine wechselseitige Prüfung ermöglichen und eine stichhaltige Entscheidungsgrundlage bilden.

Bei den nachfolgend ausgewählten Beispielen von Linienbeobachtungen sollen folgende Fragen behandelt werden:

- Wie ist der kausale Zusammenhang zwischen Änderungen des Porenwasserdruckes und Baugrundverformungen?

(Sonderdruck ist die deutsche Fassung des Originalbeitrages «Strain Monitoring in the Subsoil of the Munich Subway», «2nd Conference on Mass Transportation in Asia» Juni 1984, Singapur
 Institut für Bauplanung und Baubetrieb, Gruppe für Fels- und Untertagebau, ETH Zürich)

- Welche Deformationen im anstehenden Baugrund ergeben sich während des Vortriebs eines zweigleisigen Tunnels für die verschiedenen Ausbruchphasen?
- Sind die bei ähnlichen geotechnischen Verhältnissen in einem Querschnitt beobachteten Deformationen mit denjenigen in einem anderen Querschnitt vergleichbar?
- Wie beeinflusst der Vortrieb unter Druckluft die Dehnungsverteilung im Baugrund im Vergleich zum Vortrieb unter atmosphärischem Druck?

Dies wären einige Fragen, die durch Gleitmikromessungen beantwortet werden sollten.

4.1 Verformungen infolge von Änderungen des Porenwasserdruckes im Baugrund

Eine Abnahme des Porenwasserdruckes in Böden führt zu einer Erhöhung der effektiven Normal-

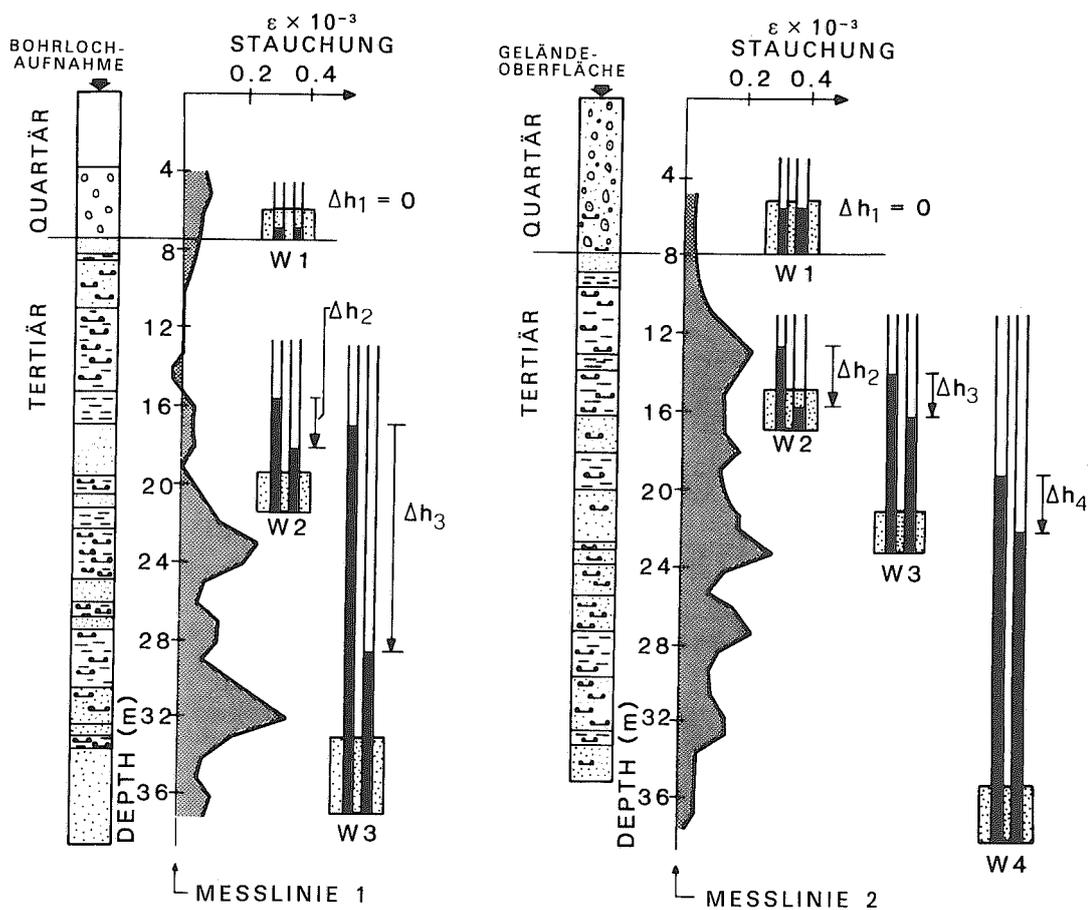


Fig. 5 Gemessene Dehnungsverteilung entlang von zwei vertikalen Messlinien infolge Teilentwässerung der Tertiärs (w = Freispiegelpegel).

spannung (Terzaghi), was seinerseits zu einer Kompression des Materials führt. Dies konnte deutlich in mehreren Baulosen der Linie 5/9 beobachtet werden. Fig. 5 zeigt die Resultate der Messungen mit dem Gleitmikrometer in zwei Bohrungen mit einer Tiefe von 38 m. In den entsprechenden Bohrloch-Schichtenprofilen sind die tertiären Formationen in beiden Fällen, allerdings bei unterschiedlichem Bodenaufbau, in 8 m Tiefe ab Geländeoberfläche anzutreffen. Im Quartär wurde der Grundwasserspiegel in seiner ursprünglichen Höhe belassen. Im Tertiärbereich wurden Schwerkraftfilterbunnen und Vakuumbrunnen betrieben und ihre Wirkung an Freispiegelpegeln überwacht.

In Fig. 5 sind die Änderungen der Pegelstände (Δh_i) für die in verschiedenen Höhen angeordneten Messpunkte der Brunnen (w_i) dargestellt. Bei der Interpretation der gemessenen Dehnungsverteilung ist zu beachten, dass neben den geologisch bedingten Einflüssen auch die Wirkung des Pumpbetriebes ausschlaggebend ist. Die Gesamtverschiebung entlang der Messlinie 1 ergab eine Oberflächensetzung von etwa 3 mm, jene der Messlinie 2 betrug 4 mm.

Da sich dieser Setzungsanteil bereits vor Beginn des Tunnelvortriebes einstellt, muss sowohl die Instrumentierung als auch die Nullablesung der Messquerschnitte vor der Inbetriebnahme der Wasserhaltung durchgeführt werden.

(Sonderdruck ist die deutsche Fassung des Originalbeitrages «Strain Monitoring in the Subsoil of the Munich Subway», «2nd Conference on Mass Transportation in Asia» Juni 1984, Singapur Institut für Bauplanung und Baubetrieb, Gruppe für Fels- und Untertagebau, ETH Zürich)

4.2 Deformationen im Baugrund infolge des Vortriebes unter atmosphärischen Bedingungen

Im Messquerschnitt MQ21 des Bauloses 5/9-6 wurden gemäss Fig. 6 drei je 40 m lange Bohr- löcher für Gleitmikrometermessungen niederge-

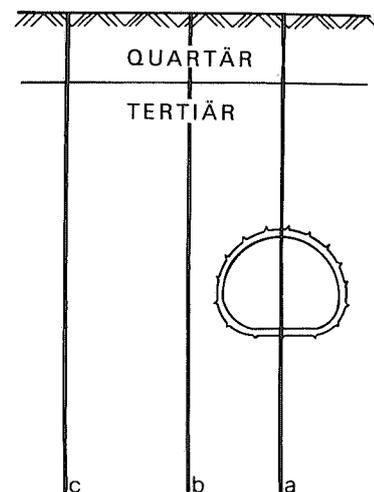


Fig. 6 Anordnung der Messlinien im Messquerschnitt MQ21.

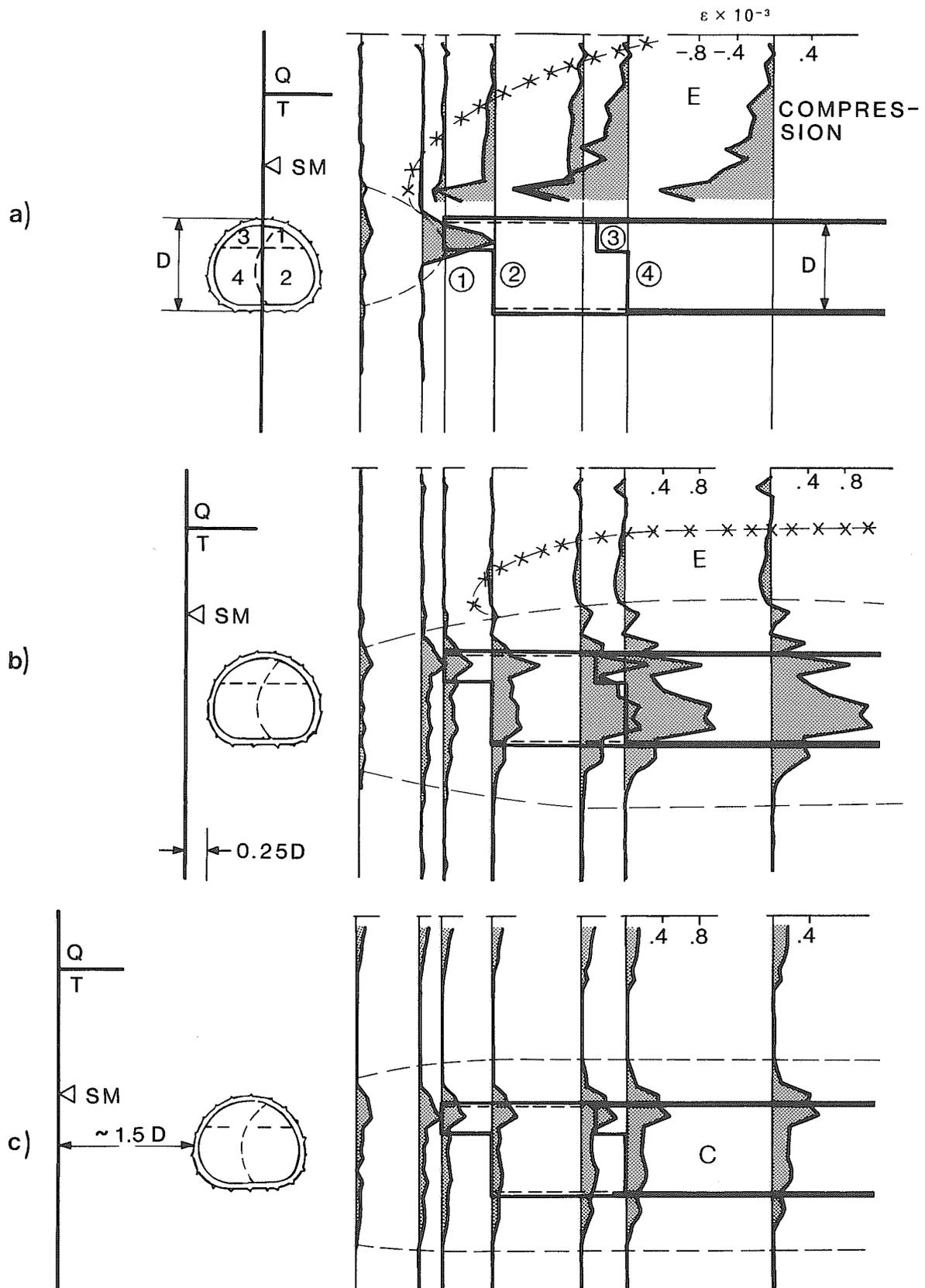


Fig. 7 Gemessene Dehnungsverteilung ϵ entlang von vertikalen Messlinien für ausgewählte Vortriebsstände (E = Zone mit vertikalen Dehnungen, C = Zone mit vertikalen Stauchungen). (Sonderdruck ist die deutsche Fassung des Originalbeitrages «Strain Monitoring in the Subsoil of the Munich Subway», «2nd Conference on Mass Transportation in Asia» Juni 1984, Singapur Institut für Bauplanung und Baubetrieb, Gruppe für Fels- und Untertagebau, ETH Zürich)

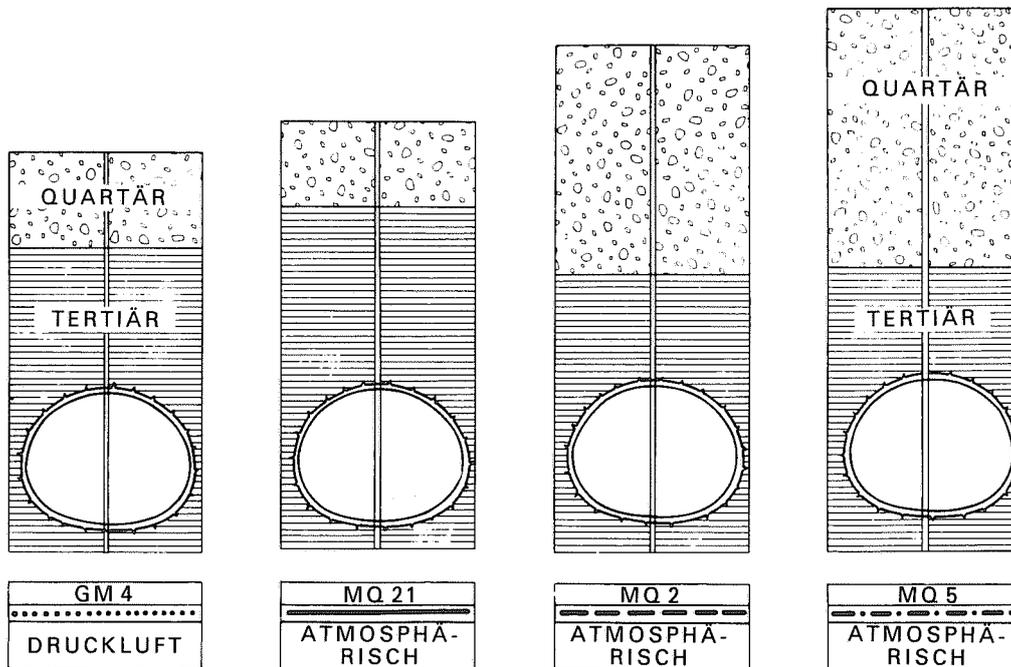


Fig. 8 Geologischer Querschnitt mit Tunnellage.

bracht und instrumentiert. Die Beobachtung der Verteilung der differentiellen Setzungen entlang solcher Linien in der Nähe des Vortriebes eines zweigleisigen Tunnels erlaubt es, ein komplettes Bild der Bodenverformungen zu erhalten. In Fig. 7 kann man die allmähliche Entwicklung der Verformungen im Baugrund, wie sie von den verschiedenen Vortriebsphasen hervorgerufen werden, klar erkennen. Die durch den Querschnitt hindurch verlaufende Messlinie (Fig. 7a) zeigt eine Zusammendrückung des Bodens infolge der Annäherung des Kalottenvortriebes¹ des Seitenstollens. Beim Durchfahren des Messquerschnittes im Zuge des weiteren Vortriebes werden die im Querschnitt angetroffenen Messrohre entfernt. Die Ablesungen mit dem Gleitmikrometer werden dann wie bisher von der Geländeoberfläche und, falls erforderlich, für den Sohlbereich vom Tunnel aus vorgenommen. Die durch die Entspannung des Bodens über der Tunnelfirste hervorgerufenen Dehnungen wachsen plötzlich an, sobald der Tunnel auf seinen vollen Querschnitt erweitert wird³⁺⁴.

Betrachtet man die Verteilung der Verschiebungen entlang der Bohrungen links vom Tunnel (Fig. 7b, c), so erkennt man deutlich, dass die Deformationen mit wachsender Entfernung vom Hohlraum rasch abnehmen. Es handelt sich durchwegs um Stauchungen (Fig. 7c). Eine gemeinsame Besonderheit der drei Diagramme (Fig. 7a, b, c) kann man in der Tatsache sehen, dass nach der Ausweitung des Profils³⁺⁴, d. h. nach erfolgtem Ringschluss der Spritzbetonschale, keine grösseren Deformationen mehr auftreten. In Fig. 7 wurde versucht, die Bereiche mit vertikaler Dehnung (E) und solche, die Stauchungen (c) aufweisen, abzugrenzen. Es ist augenfällig, dass im vorliegenden Fall ein beträchtlicher Teil der oberflächensetzungen durch Kom-

pression des anstehenden Baugrundes seitlich der Tunnelröhre verursacht wird.

4.3 Reproduzierbarkeit der Messresultate

Die Dehnungsverteilung entlang vertikaler Messlinien, welche die Achse eines zweigleisigen Tunnels durchschneiden, wurde für vier verschiedene Querschnitte bei variablen Überlagerungen untersucht. Dabei ist die unterschiedliche Schichtstärke der Quartärs bzw. des Tertiärs über dem Tunnelstiel zu beachten (Fig. 8).

Vier verschiedene Vortriebsphasen, d. h. vier verschiedene Positionen des Messlinien (S-S) relativ zum Stand der Ortsbrust, wurden in Betracht gezogen (Fig. 9).

In Fig. 10a ist die Zusammendrückung des Baugrundes unmittelbar vor der Ortsbrust des Seitenstollens zu sehen, während in Fig. 10b die Situa-

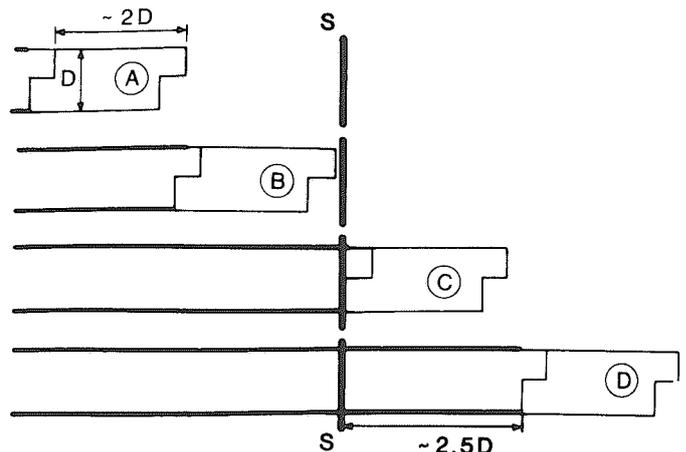


Fig. 9 Vier verschiedene Vortriebsstände für den Vergleich der gemessenen Dehnungsverteilungen.

(Sonderdruck ist die deutsche Fassung des Originalbeitrages «Strain Monitoring in the Subsoil of the Munich Subway», «2nd Conference on Mass Transportation in Asia» Juni 1984, Singapur Institut für Bauplanung und Baubetrieb, Gruppe für Fels- und Untertagebau, ETH Zürich)

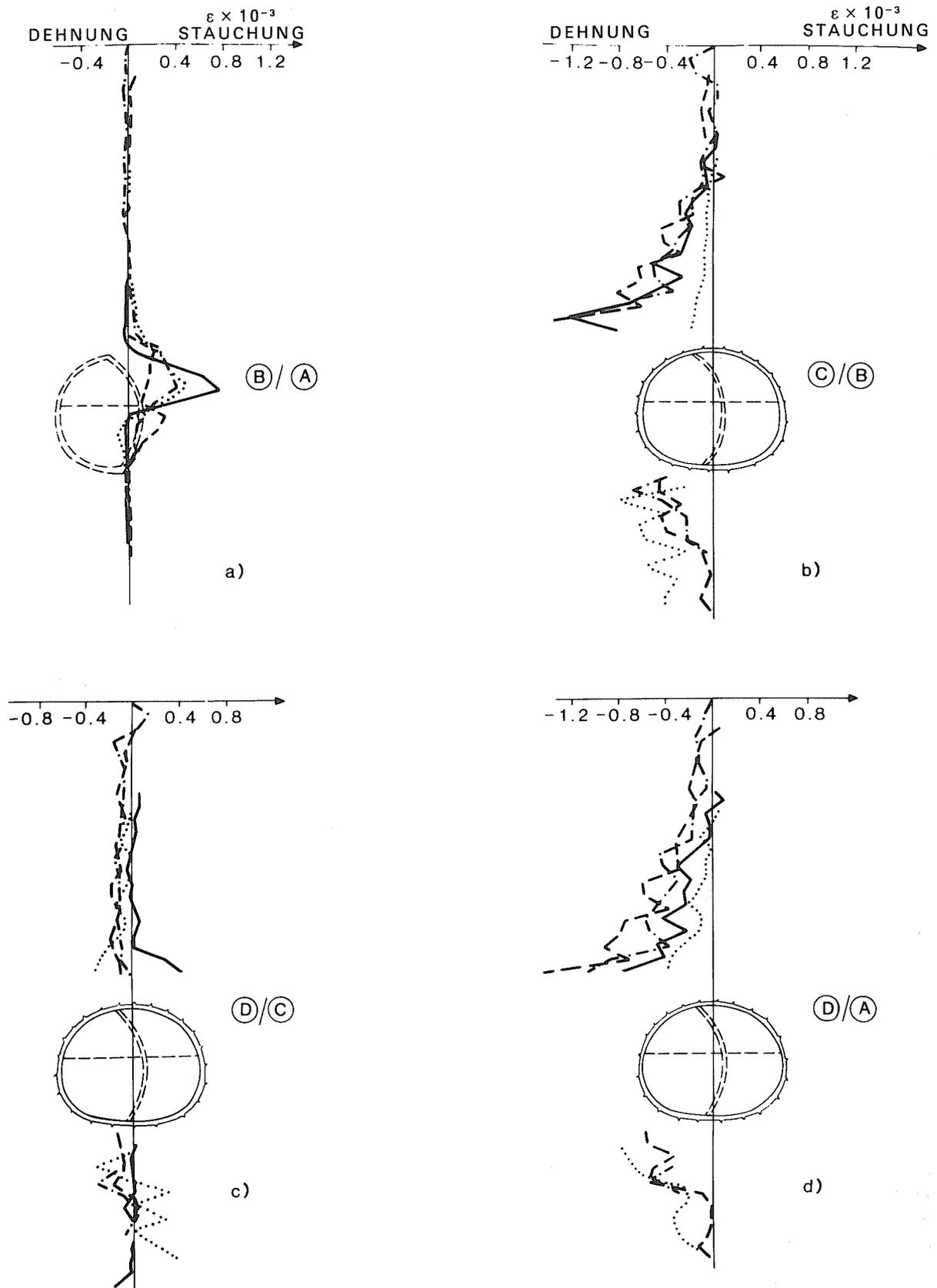


Fig. 10 Gemessene Dehnungsverteilung entlang von vertikalen Messlinien für Vortriebsstände gemäss Figur 9 (... Vortrieb unter Druckluft).

(Sonderdruck ist die deutsche Fassung des Originalbeitrages «Strain Monitoring in the Subsoil of the Munich Subway», «2nd Conference on Mass Transportation in Asia» Juni 1984, Singapur Institut für Bauplanung und Baubetrieb, Gruppe für Fels- und Untertagebau, ETH Zürich)

tion unmittelbar nach dem Ringschluss bei der Querschnittserweiterung dargestellt ist. Figur 10c erhärtet frühere Erkenntnisse über das Auftreten von nur unbedeutenden Verformungen nach dem Schliessen des Spritzbetonringes.

Es ist festzuhalten, dass im Querschnitt GM 4 (links in Figur 8) während des Vortriebes Druckluft angewendet wurde, so dass die punktierte Linie in Figur 10b viel geringere Dehungen über die Firste aufweist als die anderen Kurven, die aus dem atmosphärischen Tunnelvortrieb resultieren.

4.4 Wechselwirkung zwischen benachbarten Tunneln und die Wirkung einer Druckluftstützung

Die Wechselwirkung beim Vortrieb von naheliegenden Tunneln und deren Auswirkung auf die Oberflächensetzungen wird durch verschiedene Faktoren wie die Form, die Spannweite und die Tiefenlage der Tunnel, aber auch durch ihren gegenseitigen Abstand, die Vortriebsmethode, die Vortriebsgeschwindigkeit, die Bodenbeschaffenheit und die Grundwasserverhältnisse beeinflusst. Es ist daher verständlich, dass die Vorhersagen von Oberflächensetzungen durch rechnerische Methoden bei derart komplexen Situationen grössere Unzulänglichkeiten aufweisen. Wenn bei einer U-Bahn-Linie nur für einen begrenzten Abschnitt strenge Begrenzungen der zulässigen Oberflächensetzungen erforderlich sind, können verschiedene konstruktive Massnahmen erprobt werden, bevor der kritische Bereich durch den Tunnel erreicht wird.

Dies war in München der Fall, als alter Hausbestand mit nur geringer Überdeckung in der Nähe des Odeonsplatzes unterfahren werden musste. Der Tunnelabschnitt zwischen dem Startschacht und dem kritischen Bereich war etwa 350 m lang und bot eine einmalige Gelegenheit, Versuchsabschnitte einzurichten und ein begleitendes Messprogramm durchzuführen. Entlang dieser Versuchsstrecke war keine Begrenzung der zulässigen Setzungen erforderlich, da das Gebiet weder überbaut noch von Hauptstrassen oder Versorgungsleitungen durchschnitten wurde.

Zwei grundsätzlich verschiedene Bauweisen wurden hinsichtlich ihrer Brauchbarkeit zur Minderung der Setzungen überprüft. Die erste Methode bestand in der Anwendung von Druckluft, mit der der Porenwasserdruck im Baugrund beeinflusst wird. Der zweite Vorschlag beinhaltet den Vortrieb des zweigleisigen Tunnels in fünf gestaffelten Ausbruchphasen (Figur 11c) anstatt der üblicherweise angewendeten vier Phasen (Figur 11a, b).

Um die vorteilhafteste Konstruktionsmethode herauszufinden und um die Grösse und Verteilung der Oberflächensetzungen zu ermitteln, bevor der Vor-

trieb den kritischen Bereich erreicht hat, wurden drei Messquerschnitte installiert. In diesem Bericht sollen aus dem umfassenden, in der Versuchsstrecke durchgeführten Messprogramm nur die Ergebnisse der Gleitmikrometermessungen beleuchtet werden.

Die in Figur 11 dargestellten Diagramme zeigen interessante Details bezüglich Baugrundverformungen, wie sie durch den gestaffelten Vortrieb zweier paralleler Tunnel (I und II) hervorgerufen werden. Dabei wurden die beiden Tunnel abschnittsweise bei atmosphärischen Druckverhältnissen und mit Druckluftstützung vorgetrieben. Der Abstand der drei Messquerschnitte untereinander war einerseits derart gross, dass eine gegenseitige Beeinflussung auszuschliessen ist, andererseits aber auch klein genug, um der Annahme einer ähnlichen Baugrundbeschaffenheit gerecht zu werden. Der erste Abschnitt des Tunnels wurde vom Startschacht her in vier Ausbruchsphasen unter atmosphärischen Bedingungen vorgetrieben (Figur 11a). Anschliessend wurden Massnahmen für den Einsatz von Druckluft unter Anwendung des Vortriebsverfahrens in vier Phasen (Figur 11b) getroffen. Im dritten Abschnitt wurde die Anwendung von Druckluft beibehalten, aber der Vortrieb im Querschnitt in fünf Ausbruchsphasen aufgeföhren (Figur 11c). Man wollte so die erhofften Vorteile der letztgenannten, eher arbeitsintensiveren Vortriebsmethode und die Anwendung von Druckluft im Vergleich mit der konventionellen Ausbruchsmethode in vier Phasen unter atmosphärischem Druck überprüfen.

Aus Figur 11 kann geschlossen werden, dass die Anwendung von Druckluft, verglichen mit dem Vortrieb unter atmosphärischen Bedingungen, zu merklich geringeren Bodenverformungen führt. Andererseits kann mit der Staffelung in fünf Bauphasen keine Minderung der Baugrundverformungen beobachtet werden, wie dies aus Figur 11c hervorgeht. Gestützt auf die zweifelsfreien Ergebnisse der Versuchsstrecke konnte eine fundierte Entscheidung bezüglich der im kritischen Bereich anzuwendenden Vortriebsmethode getroffen werden. Tatsächlich war die Anwendung von Druckluft (Figur 11b) mit vier Ausbruchsphasen die erfolgreichste Methode im ganzen Bauabschnitt.

Zwei weitere Phänomene, die in den Versuchsstrecken beobachtet wurden, verdienen erwähnt zu werden. Es ist dies einerseits der «Pfeilereffekt», d.h. die Zusammendrückung des Baugrundes im Mittelpfeiler zwischen den Tunneln I und II. Dieser Effekt ist in allen drei Fällen (Figur 11a, b, c) zu erkennen. Andererseits muss die Veränderung des Porenwasserdruckes betrachtet werden, die sich in den Druckluftabschnitten als Folge der Reduktion des Luftdruckes von 0,8 bar auf 0 bar ergibt. Dieses Phänomen mit der daraus resultierenden Kompression des Baugrundes ist in den Diagrammen b und c dargestellt.

(Sonderdruck ist die deutsche Fassung des Originalbeitrages «Strain Monitoring in the Subsoil of the Munich Subway», «2nd Conference on Mass Transportation in Asia» Juni 1984, Singapur Institut für Bauplanung und Baubetrieb, Gruppe für Fels- und Untertagebau, ETH Zürich)

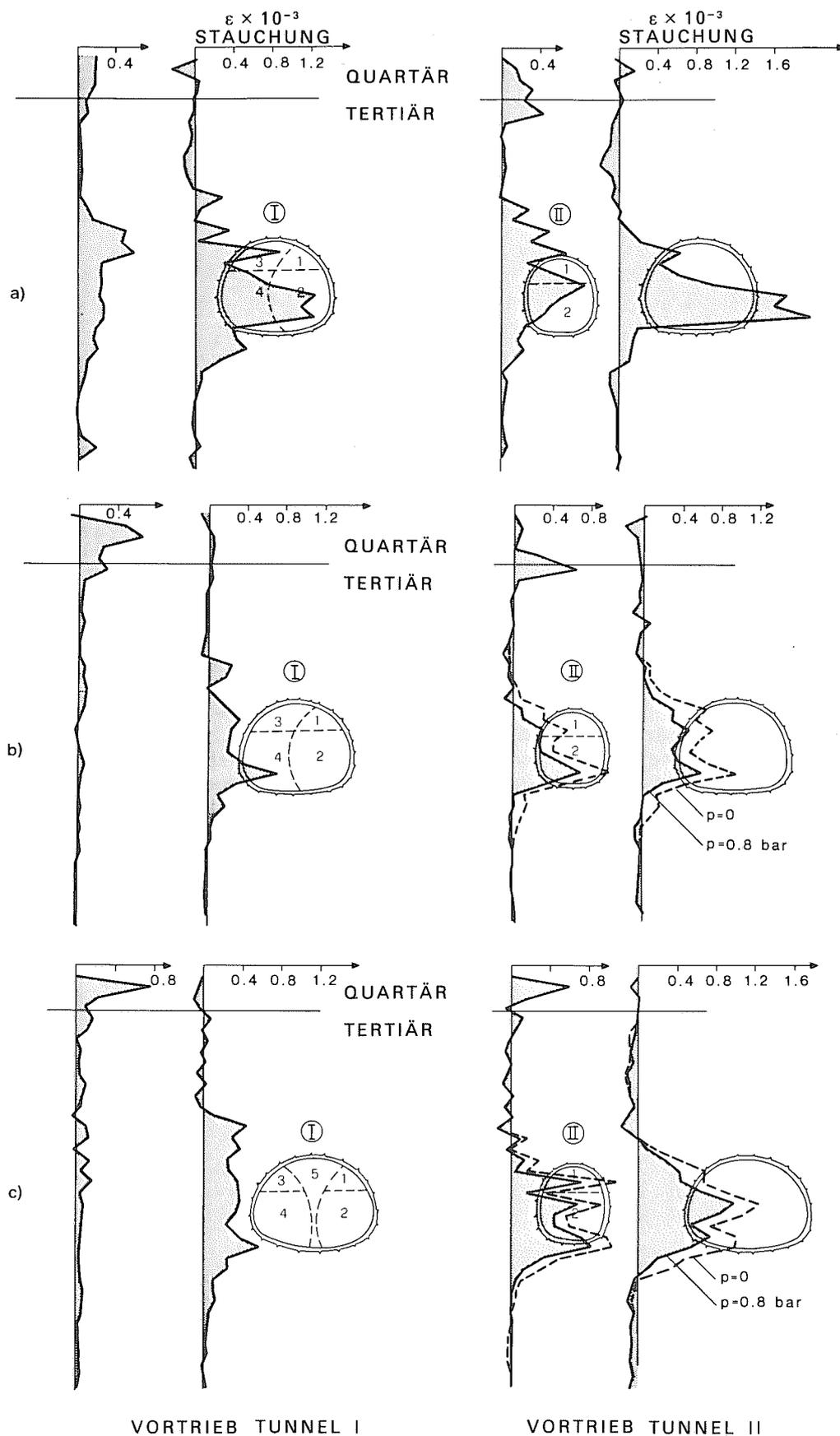


Fig. 11 Gemessene Dehnungsverteilung infolge des Vortriebes von Tunnel I und II
 a) Messquerschnitt MQ 21, atmosphärischer Luftdruck
 b) Messquerschnitt MQ 20, Druckluftvortrieb
 c) Messquerschnitt MQ 19, Druckluftvortrieb

(Sonderdruck ist die deutsche Fassung des Originalbeitrages «Strain Monitoring in the Subsoil of the Munich Subway», «2nd Conference on Mass Transportation in Asia» Juni 1984, Singapur Institut für Bauplanung und Baubetrieb, Gruppe für Fels- und Untertagebau, ETH Zürich)

5. Schlussbemerkungen

Dehnungsmessungen entlang von Bohrlöchern, welche auf dem Prinzip der Linienbeobachtung unter Verwendung des Gleitmikrometers basieren, lassen deutlich erkennen, was beim U-Bahn-Bau im Baugrund während der verschiedenen Vor-

triebsphasen vor sich geht. Sorgfältig vorbereitete und durchgeführte Messprogramme sowie die richtige Interpretation der Ablesungen können eine wertvolle Hilfe für die in der Praxis zu treffenden Entscheidungen darstellen.

Literaturverzeichnis

- ¹ KOVÁRI, K., AMSTAD, CH., KÖPPEL, J.: New Developments in the Instrumentation of Underground Openings, Proc. of the 4th Rapid Excavation and Tunneling Conference, Atlanta, U.S.A. 1979
- ² KOVÁRI, K., AMSTAD, CH.: Das Konzept der «Linienbeobachtung» bei Deformationsmessungen, Mitteilungen der Schweiz. Gesellschaft für Boden- und Felsmechanik. Nr. 102, 1981
- ³ KOVÁRI, K., AMSTAD, CH.: Fundamentals of Deformation Measurements, Proc. of the Int. Symposium on Field Measurements in Geomechanics, A.A. Balkema Publishers, Rotterdam, 1983
- ⁴ HOCHMUTH, W.: Die Bedeutung des bergmännischen Verkehrstunnelbaues für die Münchner U-Bahn, Moderner Tunnelbau bei der Münchner U-Bahn, Springer Verlag Wien, 1978
- ⁵ KRISCHKE, A., WEBER, J.: Planung, Ausschreibung, Bewertungskriterien für die Vergabe, Steuerung der Ausführungsplanung und des Bauablaufs von U-Bahn-Baumassnahmen, Moderner Tunnelbau bei der Münchner U-Bahn, Springer Verlag Wien, 1978
- ⁶ LESSMANN, H.: Bauwirtschaftliche Überlegungen bei den Ausführungen von Hohlraumbauten im Lockergestein, Moderner Tunnelbau bei der Münchner U-Bahn, Springer Verlag Wien 1978
- ⁷ WEBER, J.: Erfahrungen mit Druckluftvortrieben in Spritzbetonbauweise beim Münchner U-Bahn-Bau, STUVA Konferenz Nürnberg 1983
- ⁸ KOVÁRI, K., AMSTAD, CH., ARN, TH.: Forschungsbericht «Sicherheit und Wirtschaftlichkeit im U-Bahn-Bau München», 1982 (nicht publiziert)