

Spritzbetonbauweisen mit Druckluft beim Münchner U-Bahn-Bau

Pneumatically Placed Shotcrete Used For The Construction Of The Munich Underground

Dipl.-Ing. Alfred Krischke, U-Bahn-Referat, München

Die hydrogeologischen Gegebenheiten beim Münchner U-Bahn-Bau sind gekennzeichnet durch das Vorhandensein mehrerer grundwasserführender Bodenschichten, die durch nahezu undurchlässige Ton-, Schluff- und Mergelschichten voneinander getrennt sind. So ist es fast immer erforderlich, eine Wasserhaltung zu betreiben. Ihr Funktionieren hat entscheidenden Einfluß auf den Erfolg der Vortriebsarbeiten. Die erfolgreiche Anwendung der Druckluft als Wasserhaltungsmaßnahme beim Schildvortrieb legte es nahe, auch bei den Spritzbetonbauweisen diese Methode anzuwenden. Interne Voruntersuchungen und ein von der Studiengesellschaft für unterirdische Verkehrsanlagen e. V. (STUVA), Köln, unter Mitwirkung des U-Bahn-Referates München und der Bauindustrie durchgeführtes Forschungsvorhaben ließen keine nennenswerten technologischen Hindernisse für die praktische Anwendung erkennen.

1979 wurde daraufhin in München zum ersten Mal ein Bauilos mit "Spritzbetonbauweise unter Druckluft" vergeben. Seither sind 5 weitere Bauilose vergeben und die Vortriebsarbeiten fertiggestellt worden.

Aufgrund der inzwischen vorliegenden Erfahrungen wird berichtet, unter welchen Voraussetzungen diese Bauart vorteilhaft eingesetzt werden kann. Die Tunnel werden zweischalig hergestellt. Die Außenschale wird in Spritzbeton unter Druckluft (Trockenspritzverfahren), die Innenschale nach Beendigung des Vortriebs unter atmosphärischen Bedingungen erstellt. Eingegangen wird auch auf die Qualitätskontrolle des Spritzbetons, auf die Vortriebsleistungen, auf Kostenvergleiche mit atmosphärischen Vortrieben, auf Oberflächensetzungen und Gefahrenpunkte.

The hydrogeological conditions encountered during the construction of the Munich Underground are characterized by the presence of several groundwater-bearing strata, which are separated by almost impermeable strata of clay, silt and marl. This situation nearly constantly necessitates dewatering, the efficiency of which has decisive influence on the progress of tunnel driving. Since compressed air was successfully used for dewatering when applying the shield driving method, the same method suggested itself for shotcreting. Internal preliminary investigations and a research project carried out by the "Studiengesellschaft für unterirdische Verkehrsanlagen e. V. (STUVA)" (Study Group for Underground Traffic Facilities), Cologne, in cooperation with the Munich Underground Service and the construction industry, did not indicate any major technological difficulties for practical application. So in 1979 in Munich a contract for a construction lot according to the compressed air method was awarded for the first time. In the meantime five other contracts have been awarded and tunnel driving for these lots has been completed.

Based on the experience gained, it will be reported under which conditions advantageous use can be made of this construction method. The tunnels have two linings: the outer lining is made of pneumatically placed shotcrete (dry shotcreting method), while the inner lining is applied under atmospheric conditions after the completion of tunnel driving.

The paper deals with the quality control of the shotcrete, the advance rates, cost comparisons with tunnelling under atmospheric pressure, as well as with surface settlements and dangerous aspects.

1. Bedeutung der Bauweisen

Von dem geplanten, insgesamt über 100 km langen Münchner U-Bahn-Netz, an dem seit 21 Jahren gebaut wird, sind heute 48 km mit 51 Bahnhöfen in Betrieb. Weitere 16 km mit 17 Bahnhöfen sind im Bau und zum Teil bereits im Rohbau fertiggestellt.

Seit 1973 werden die Spritzbetonbauweisen für eingleisige (ca. 38 m² Ausbruchfläche) und für zweigleisige Tunnel (bis 150 m² Ausbruchfläche) angewandt. Sie haben einen Anteil von 30 % am derzeitigen Netz und sogar 50 % an den seit 1973 errichteten Netzabschnitten.

Die Tunnel liegen vorwiegend in grundwasserführenden Böden. Für die Vortriebsarbeiten ist daher die Wasserhaltung von ausschlaggebender Bedeutung. Bei Schildvortrieben ist die Wasserhaltung mit Druckluft ein bekanntes und bewährtes Verfahren. Natürlich stellte sich die Frage der Kombination dieses Verfahrens mit den Spritzbetonbauweisen umso mehr, je stärker diese Bauweisen wegen ihrer Flexibilität bezüglich Querschnittsgestaltung und wechselnder Bodenbeschaffenheit zunahmen.

Voruntersuchungen und ein unter Mitwirkung des U-Bahn-Referates München durchgeführtes Forschungsvorhaben ließen keine nennenswerten Hindernisse hinsichtlich der Technologie und des Arbeitsschutzes erkennen. 1979 wurde in München zum ersten Mal ein Baulos in der Bauweise "Spritzbeton unter Druckluft" als Sonder-vorschlag in Auftrag gegeben. Seitdem wurden 4 weitere Baulose auf diese Weise ausgeführt, insgesamt 5,3 km eingleisige Tunnel und 1,3 km Bahnhofstunnel. 3 Baulose lagen ganz im tertiären, 2 teilweise auch im quartären Boden. Alle Tunnel unterfahren bebaute Innenstadtbereiche. Die Überdeckung lag zwischen 7 und 25 m. Der Überdruck betrug 0,3 bis 1,2 bar.

2. Geologischer Überblick

Der Baugrund in München besteht zuoberst aus einer quartären Kiesschicht, deren Mächtigkeit örtlich zwischen 4 und 22 m schwankt. Darunter liegen tertiäre Mergel, die der Schluff- und Tonfraktion zuzuordnen sind. Tertiäre Sande sind als Linsen in den Mergel eingelagert. Sie bilden örtlich auch eine Zwischenlage zwischen den quartären Kiesen und den tertiären Mergeln. Diese Kiese sind mit Durchlässigkeitswerten (nach Darcy) von $k > 10^{-3}$ m/s sehr durchlässig. Die Sande haben eine geringere Durchlässigkeit

von $k \approx 10^{-5}$ m/s, wogegen die Mergel mit $k < 10^{-8}$ m/s praktisch wasserundurchlässig sind.

Im Kies ist ein erstes freies Grundwasserstockwerk ausgebildet. Die im Mergel eingeschlossenen Sandlagen führen gespanntes Wasser und stellen weitere Grundwasserstockwerke dar.

3. Bauweise

Die Tunnel werden zweischalig ausgeführt. Die Außenschale als vorübergehende Sicherung wird beim Vortrieb unter Druckluft in Spritzbeton erstellt. Die Innenschale wird dann nach Beendigung des Vortriebes unter atmosphärischen Bedingungen eingebaut. Die Druckluft dient beim Vortrieb als Wasserhaltungsmaßnahme. Die Druckhöhe wird aus Gründen des Baubetriebes und Arbeitsschutzes möglichst unter 1 bar gehalten. Dies erreicht man durch teilweises Absenken oder Entspannen des Grundwassers.

Dabei ist folgenden Anforderungen Rechnung zu tragen:

- Abstimmung der Druckhöhe und des Luftbedarfs auf die hydrogeologischen Verhältnisse
- Vermeidung von Ausbläsern, Minimierung der Luftverluste
- Bemessung der Außenschale für den beim Ablassen der Druckluft auftretenden Wasserdruck
- ausreichende Wasserdurchlässigkeit der Außenschale für den ordnungsgemäßen Einbau der Innenschale aus wasserundurchlässigem Beton.

Die Maßnahmen sind dabei immer auf die hydrogeologischen Verhältnisse im Einzelfall abzustimmen. In den folgenden Beispielen (Abb. 1) sollen die wichtigsten Fälle der Entwässerung ohne und mit Druckluft aufgezeigt werden.

3.1 Tunnellage im 1. Grundwasserstockwerk

Liegt der Tunnel im Kies des 1. Grundwasserstockwerkes, so ist wegen der erheblichen Fördermengen und der großen Reichweite der Absenktrichter eine Grundwasserabsenkung nur bei geringen Grundwassermächtigkeiten möglich. Bei großer Mächtigkeit des Grundwassers werden daher durch Dichtungswände aus Spundbohlen oder Rüttelschmalwänden, die in die undurchlässigen Bodenschichten einbinden, wasserdichte Tröge erstellt und diese abschnittsweise leergepumpt. Liegt der Tunnel im gering durchlässigen Sand des 1. Grundwasserstockwerkes, so

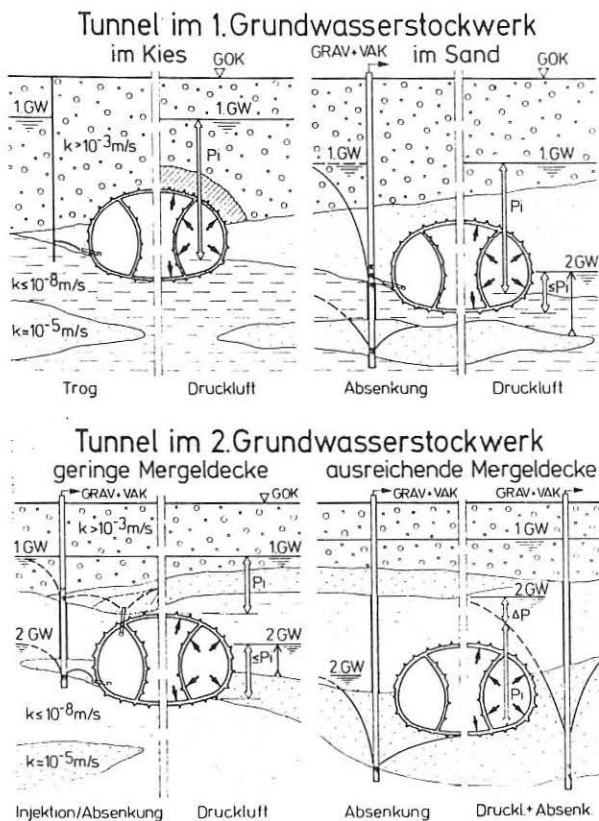


Abb. 1 Wasserhaltungsmaßnahmen bei Lage des Tunnels in verschiedenen Bodenschichten

Ist meist eine Grundwasserabsenkung durchführbar. In beiden Fällen wird eine Restwasserbeseitigung vom Vortrieb aus erforderlich.

Ein Vortrieb mit Druckluft ist in den quartären Schottern nur mit zusätzlichen Zement-Bentonit-Abdichtungen zur Begrenzung der Luftverluste möglich. Liegt der Tunnel aber im tertiären Sand, so kann der Vortrieb mit Druckluft ohne zusätzliche Abdichtungsmaßnahmen durchgeführt werden. Die Bemessung des Luftüberdruckes hat jeweils für den Wasserspiegel des 1. Grundwasserstockwerkes zu erfolgen.

3.2 Tunnellage im 2. Grundwasserstockwerk

Beim Vortrieb ohne Druckluft wird bei ausreichend dicker Mergelüberdeckung das obere Grundwasserstockwerk ohne Absenkung unterfahren. Die Wasserhaltung kann auf die unteren Grundwasserstockwerke beschränkt bleiben.

Ist die Überdeckung aber zu dünn, um die Grundwasserlast des oberen Grundwasserstockwerkes zu tragen, muß sie durch eine chemische Abdeckinjektion oder Vereisung auf die erforderliche Dicke ergänzt werden. Wird bei geringen Grundwassermächtigkeiten anstatt dessen

das Grundwasser des 1. Stockwerkes abgesenkt, so muß wegen des unregelmäßigen Tertiärreliefs das in Mulden verbleibende Restwasser vom Tunnel aus entfernt werden. Gerade diese Vortriebe im Grenzbereich Quartär/Tertiär haben sich in der Vergangenheit als aufwendig und risikoreich erwiesen.

Ist dagegen eine ausreichende Überdeckung vorhanden, muß der Überdruck nur auf das 2. Stockwerk bemessen werden.

Zur Begrenzung der Druckhöhe bei zunehmendem Wasserdruck kann dabei der Betrieb einer Entspannungswasserhaltung mit Außenbrunnen erforderlich werden.

3.3 Vortriebsweise

Der Vortrieb erfolgt üblicherweise mit kurz voreilender Kalotte und nachfolgender Strosse. Im Kalottenbereich werden bei jedem Abschlag von üblicherweise 1 m Länge Tunnelbögen als Sofortsicherung eingebaut. Der Ausbau erfolgt mit Spritzbeton, der mit Matten bewehrt wird. Nach dem Schließen der Tunnelschale im Sohlbereich wird aus dem Abraum eine Fahrsohle zur Aufstellung der Abbau- und Schuttergeräte geschüttet.

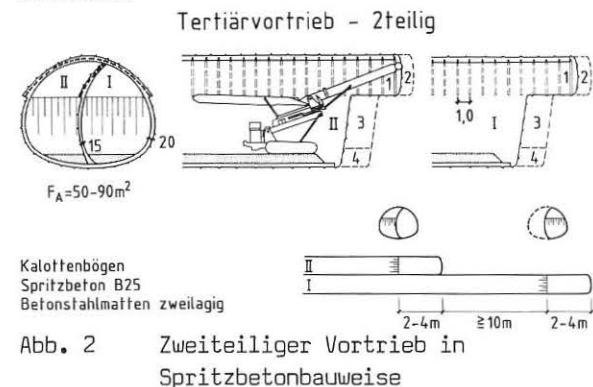


Abb. 2 Zweiteiliger Vortrieb in Spritzbetonbauweise

Während eingleisige Streckentunnel (Ausbruchfläche ca. 38 m^2) in einem Abschnitt aufgefahren werden, müssen größere Querschnitte für Bahnhöfe und Weichenstraßen in 2 (Abb. 2), bei Querschnitten über 90 m^2 Ausbruchfläche in 3 Teilvortriebe aufgelöst werden, um die Standicherheit der Ortsbrust zu erhöhen und die Setzungen zu vermindern. Die Sicherung des vorlaufenden Tunnels wird dabei beim nachfolgenden Ausbruchvorgang teilweise wieder abgebrochen.

Aus Gründen des Arbeitsschutzes müssen alle unter Druckluft eingesetzten Arbeitsgeräte mit Elektro- oder Preßluftantrieb ausgestattet

sein. Dieselgeräte sind nicht zulässig. Der Abbau erfolgt mit Fräsen oder Baggern; die Förderung des Abraumes mit Schutterzügen mit batteriebetriebenen Elektroloks.

3.4 Schleusenordnung

Die Bedienung zweier Streckenvortriebe mit nur einer Schleusenanlage wird durch einen Querschlag ermöglicht (Abb. 3). Vorteilhaft ist der Einbau eines Drucktores im 2. Tunnel. Bei zwischenzeitlichem Ablassen der Druckluft können so z.B. Großgeräte ausgetauscht oder eingebracht werden. Der Tunnelanstich und der Vortrieb erfolgt dabei zunächst auf eine gewisse Mindestlänge unter atmosphärischen Bedingungen. Diese Länge von in der Regel über 50 m bemißt sich nach der Länge der Schleuse und dem Platzbedarf für die Aufstellung der Geräte.

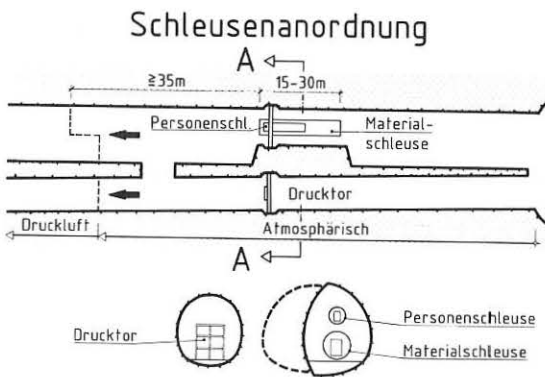


Abb. 3 Schleusenanlage mit Drucktor

3.5 Außenschale

Die Außenschale muß entsprechend tragfähig und wasserundurchlässig sein, da sie nach vorübergehendem oder endgültigem Ablassen der Druckluft auch durch den Wasserdruck belastet wird. Der Qualität der Ausführung der Spritzbetonschale und den damit zusammenhängenden Fragen des Spritzverfahrens, der Rezeptur und der Qualitätskontrolle kommt deshalb beim Druckluftvortrieb eine erhöhte Bedeutung zu. Gefordert wird im allgemeinen ein B 25 mit einer Frühfestigkeit von 5 N/mm² nach 6 Stunden. Die Entwicklung der Frühfestigkeit spielt für den Vortrieb eine große Rolle, weil davon die Vortriebstakte und die erzielbaren Vortriebsgeschwindigkeiten wesentlich beeinflusst werden.

Zugleich muß der Spritzbeton aber auch die notwendige 28-Tage-Festigkeit erreichen, weil die Spritzbetonschale bis zum Einbau der Innenschale oft über einen Zeitraum von einem Jahr

und mehr hinweg die eigentliche Sicherung des Tunnels darstellt.

In München wurde bisher ausschließlich das Trockenspritzverfahren angewendet. Bei der Prüfung verschiedener Betonrezepturen für die Herstellung des Spritzbetons hat sich gezeigt, daß die Forderung nach hoher Frühfestigkeit und hoher 28-Tage-Festigkeit in der Regel nur schwer miteinander vereinbar sind. Diejenigen Betonrezepturen, die eine rasche Frühfestigkeitsentwicklung zeigen, bringen oft nur eine geringe Nacherhärtung (Abb. 4). Demgegenüber ist bei den Mischungen mit langsamem Festigkeitsanstieg in den ersten Stunden meist eine sehr gute Nacherhärtung gegeben. Die einachsige Druckfestigkeit nach 28 Tagen beträgt bei der Mischung A mit 350 kg/m³ PZ 45 F, 6 % Beschleuniger Fluoresit (rasche Erhärtung), rund 25 % weniger als bei der Mischung C mit 379 kg/m³ HOZ 35 L, 4 % Beschleuniger MC-Spritzhilfe (langsame Erhärtung). Bemerkenswert ist dabei, daß nicht nur Zementart und Festigkeitsklasse, Art des Abbindebeschleunigers und Zugabemenge die Festigkeitsentwicklung beeinflussen. Bei gleicher Art und Menge des Abbindebeschleunigers liefern z. B. Zemente gleicher Art, die jedoch aus verschiedenen Herstellerwerken stammen, oft sehr unterschiedliche Festigkeitsergebnisse.

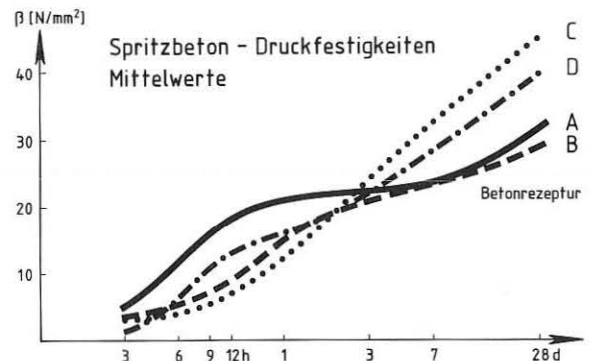


Abb. 4 Spritzbetondruckfestigkeiten Mittelwerte

Für die Spritzbetonrezepturen A (mit der schon genannten Mischung) und B, mit 380 kg/m³ PZ 35 F, 3 % Beschleuniger Guttacrete, die auf 5 U-Bahn-Baulosen in München verwendet wurden, liegen umfangreiche Prüfungsergebnisse vor, sodaß eine statistische Auswertung der Festigkeiten möglich wird.

Der (Abb. 5) dargestellten Statistik liegen für jede Zeitstufe im Mittel rund 450 Einzelwerte zugrunde. Die Festigkeitsentwicklung in den ersten Stunden wurde dabei mit dem Kaindl-

Meyco-Prüfgerät ermittelt. Bei den Werten über 3 Tage handelt es sich um die Prüfung an Bohrkernen.

Dargestellt ist dasjenige Vertrauensband, in dem im statistischen Mittel 90 % aller Prüfwerte liegen. Hier zeigt sich, daß die Wahl einer Mischung mit rascherer Festigkeitsentwicklung durch eine gewisse Vergrößerung der Streuung vor allem in der Frühfestigkeit erkauft werden muß.

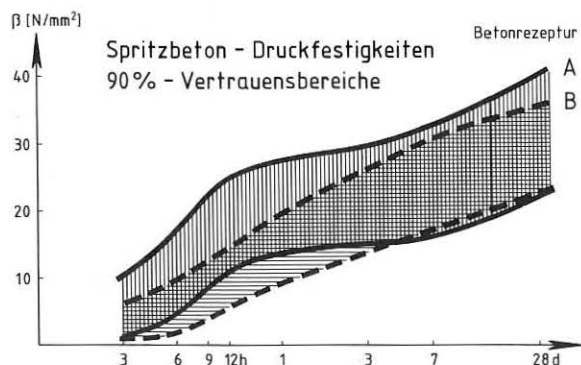


Abb. 5 Spritzbetondruckfestigkeiten 90 %-Vertrauensbereich

4. Erfahrungen

4.1 Luftbedarf

Der gesamte Luftbedarf setzt sich zusammen aus dem Verbrauch für den Schleusenbetrieb und die Luftumwälzung und den Verlust durch Ortsbrust und Außenschale. Letzterer kann in Abhängigkeit von den hydrogeologischen Gegebenheiten erheblich schwanken. Abb. 6 zeigt die Erfahrungen beim parallelen Vortrieb zweier eingleisiger Streckentunnel mit je 38 m² Ausbruchsfläche.

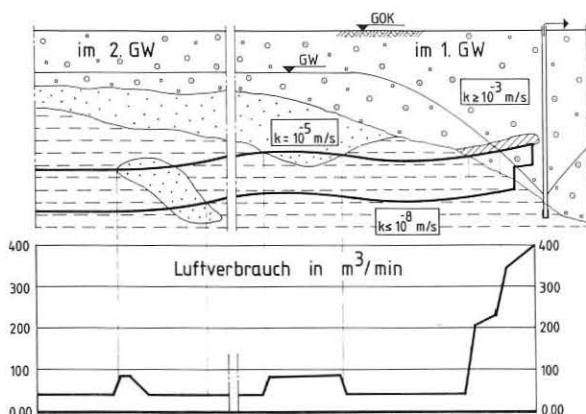


Abb. 6 Luftverluste in verschiedenen Bodenschichten

Beim Vortrieb in den praktisch dichten tonigen und schluffigen Mergeln des 2. Grundwasserstockwerkes lag der Luftbedarf zwischen 30 und 70 m³/min. Diese Luftmenge entspricht in etwa den Verlusten für die notwendige Luftumwälzung im Tunnel und die Schleusungsvorgänge.

Wurden Sandlinsen des 2. Stockwerkes durchfahren, so war ein deutlicher Anstieg auf etwa die doppelte Luftmenge zu beobachten, bis die Sandlinse mit Luft gefüllt war. Danach ging der Verbrauch wieder auf die Grundmenge zurück.

Wurden Sandschichten im 1. Grundwasserstockwerk angeschnitten, so zeigte sich ein vergleichbarer Anstieg der Luftverluste, der aber erst beim Wiedereintauchen in den Mergel zurückging.

Beim Anfahren der Schotter des 1. Grundwasserstockwerkes unter einem Abdichtungsschirm trat eine Vergrößerung des Luftbedarfes auf über 200 m³/min. ein. Ein weiterer sprunghafter Mehrbedarf ergab sich, als der Vortrieb im Bereich einer Grundwasserabsenkung über dem Wasserspiegel verlief.

4.2 Vortriebsleistungen

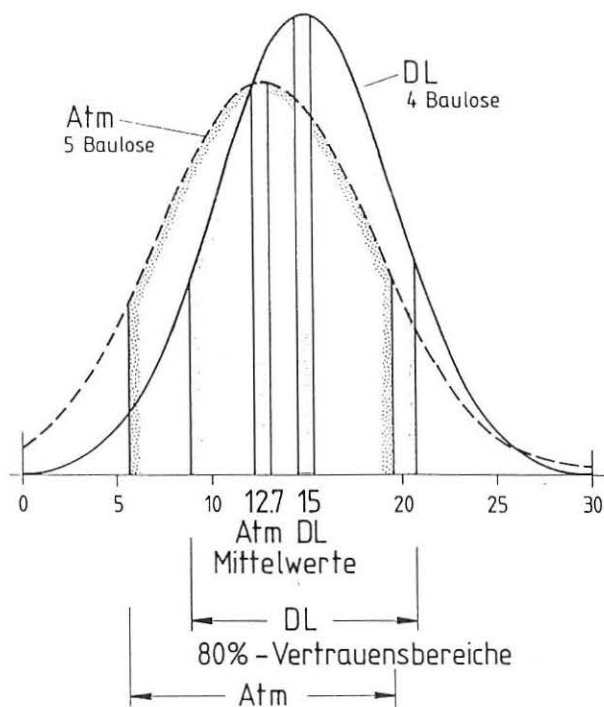


Abb. 7 Vortriebswochenleistung in m für eingleisigen Tunnel (F_A 38 m²)

Eine statistische Auswertung von jeweils über 100 Einzeldaten (Abb. 7) zeigt, daß nicht nur die mittleren Vortriebsleistungen beim Druckluftvortrieb höher sind als unter atmosphärischen Bedingungen, sondern auch die Streuungen bei ersterem deutlich niedriger liegen. Ursächlich dafür sind wohl in erster Linie

- der Wegfall der behindernden Wasserhaltungsmaßnahmen an der Ortsbrust beim Druckluftvortrieb und
- der Zwang zu einem straffer organisierten Baubetrieb wegen des Engpasses "Materialschleuse".

Anzumerken ist noch, daß die Grenzen des 80 %-Vertrauensbereiches nach den vorliegenden Erfahrungen recht gut mit den tatsächlich erzielten Größt- und Kleinstwerten der Vortriebsleistungen übereinstimmen.

4.3 Kosten

Eine Auswertung von Mittelpreisen für 3 Baulose zeigt Tabelle 1. Dargestellt sind jeweils

Tabelle 1

Kostenvergleich für 1 m U-Bahn-Strecke (bestehend aus 2 eingleisigen Tunneln)

		Baulos A		Baulos B		Baulos C	
		atmosphärisch		Druckluft		atmosphärisch	
Kostenanteile für	Baustellen-einrichtung	13 %	19 %	16 %	25 %	16 %	22 %
	Vortrieb und Sicherung	37 %	53 %	34 %	48 %	40 %	45 %
	Wasserhaltung	32 %	7 %	33 %	9 %	27 %	16 %
	Innenschale	18 %	21 %	17 %	18 %	17%	17 %
Gesamtkosten (1982/83) DM/m		41.000	37.000	46.000	42.000	45.000	46.000

die Kosten für 1 m U-Bahn-Strecke (bestehend aus 2 eingleisigen Tunneln). Deutlich sichtbar wird, daß den Einsparungen bei der Wasserhaltung Mehraufwendungen bei der Baustellen-einrichtung (für Schleusen, Kompressoren) und beim Druckluftvortrieb gegenüberstehen.

Während in den hydrogeologischen Problembereichen mit hohen Aufwendungen für die Wasserhaltung der Druckluftvortrieb wirtschaftlicher ist, zeigt sich bei von Haus aus niedrigen Wasserhaltungskosten der atmosphärische Vortrieb als kostengünstiger.

4.4 Setzungen

Der U-Bahn-Bau im Stadtgebiet bedingt oft Tunnelvortriebe unter Gebäuden, teilweise mit historischer oder schlechter Bausubstanz.

Der Minimierung der Oberflächensetzungen kommt daher erhöhte Bedeutung zu.

Abb. 8 zeigt einen Vergleich der Oberflächensetzungen und der mittels Gleitmikrometer ISETH gemessenen vertikalen Dehnungen für die Fälle mit und ohne Druckluft.

Mit dem Druckluftvortrieb werden die Oberflächensetzungen wesentlich reduziert. Die Gleitmikrometermessungen zeigen, daß dies vor allem durch eine Reduktion der Stauchungen im

Bereich um den Tunnel bedingt ist. Dies resultiert aus der stützenden Wirkung der Druckluft auf die Ortsbrust.

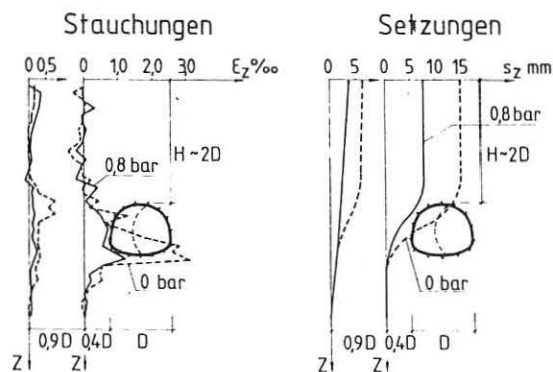
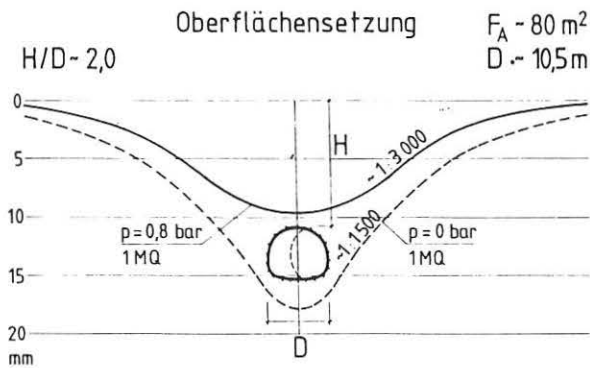


Abb. 8 Bodenverformung beim Vortrieb mit und ohne Druckluft

4.5 Problembereiche

Die schwierigen hydrogeologischen Problemzonen des Münchner Untergrundes - dünne Mergelüberdeckungen, Erosionsrinnen im Mergel, Restwasserzonen - können mit der Bauweise "Spritzbeton unter Druckluft" sehr gut beherrscht werden. Alle 5 Baulose konnten ohne Materialeinbrüche aufgeföhren werden. Die Münchner Erfahrungen haben jedoch auch Schwierigkeiten aufgezeigt, die beim Druckluftvortrieb besonders beachtet werden müssen.

Zuerst sind hier größere Luftverluste zu nennen, die unter Umständen zu einem Druckabfall im Tunnel, dem befürchteten "Ausbläser", führen können. Das eingangs erwähnte Forschungsprojekt hat gezeigt, daß in diesem Fall die frisch aufgetragene Spritzbetonsicherung im Firstbereich, aber auch an den Ulmen, herunterfällt. Insbesondere bei der Annäherung an unter atmosphärischem Druck stehende Tunnelstücke oder Zielschächte muß deshalb einer plötzlichen Erhöhung des Luftverbrauches erhöhte Beachtung geschenkt werden. Wichtig ist auch eine sorgfältige visuelle Beobachtung sowohl der Ortsbrust im Druckluftvortrieb als auch der atmosphärischen Nachbarbereiche. In den sehr erosionsempfindlichen Sanden bilden

sich leicht "Fuchsgänge" zu Fehlstellen auf der unter atmosphärischem Druck stehenden Seite, wie z. B. undichten Schlitzwandfugen oder Schwächungen der Schacht- oder Tunnelsohlen durch Pumpensümpfe. Solche Luftaustrittsstellen lassen sich meist erst nach Absenkung des Überdruckes und unter großem Aufwand verplomben. Oft weist das plötzliche Verschwinden von Wasserpfützen auf der Überdruckseite auf den Ort des konzentrierten Luftaustrittes hin. Durch rasches Aufspritzen von Beton auf diese Stellen kann der Schaden meist minimiert werden.

Ein weiteres Problem stellt der Vortrieb in völlig abgeschlossenen ausgedehnten Sandlinsen dar. Voraussetzung ist hier eine ausreichende Grundwasserentspannung in diesen Sandlinsen, die während der Vortriebsarbeiten eine Strömung des vom Luftüberdruck im Tunnel verdrängten Wassers von der Ortsbrust zu den Entspannungsbrunnen ermöglicht. Andernfalls kann auch durch Steigerung des Überdruckes im Tunnel das Wasser nicht vom Vortrieb ferngehalten werden, und die Druckluftwasserhaltung mißlingt.

Wegen der fehlenden oder reduzierten Wasserhaltungseinrichtungen wird beim Ablassen der Druckluft der Wasserdruck ganz oder teilweise auf die Außenschale umgelagert. Wo immer terminlich möglich, empfiehlt es sich daher, die Fahrsohle im Tunnel unter Druckluftbedingungen auszuräumen. Die im Sohlbereich häufigeren Fehlstellen in der Spritzbetonaußenschale können so rechtzeitig erkannt und noch unter Druckluftbedingungen ausgebessert werden.

4.6 Einsatzmöglichkeiten und Einsatzgrenzen

Die Bauweise "Spritzbeton unter Druckluft" erweist sich vor allem als vorteilhaft

- in Bereichen, in denen mit hohen Restwasserständen beim Tunnelvortrieb zu rechnen ist
- bei der Unterföhren des obersten unabgesenkten Grundwasserstockwerkes, wenn Schwachstellen im Mergeldach durch Erosionsrinnen oder frühere Baumaßnahmen zu befürchten sind
- wenn bei der Unterföhren empfindlicher Baubsubstanz ein besonders setzungsarmer Vortrieb durchzuführen ist

- wenn Absenkbrunnen von obertage aus wegen der Bebauung entlang der Tunneltrasse örtlich nicht im erforderlichen Umfang hergestellt werden können
- wenn eine auch nur vorübergehende Grundwasserabsenkung unterbleiben muß und chemische Injektionen nicht zulässig sind.

Dagegen wird ein Spritzbetonvortrieb unter Druckluft weniger wirtschaftlich sein

- wenn nur ein kurzer Tunnelabschnitt aufgeföhren werden muß, weil dann die anteiligen Kosten für Schleusen und Kompressoren zu hoch werden
- wenn in den sehr durchlässigen Kiesen zusätzliche Injektionen zur Begrenzung der Luftverluste erforderlich werden
- wenn bei günstigen hydrogeologischen Verhältnissen eine Wasserhaltung mit Absenkbrunnen auf einfache Weise möglich ist.

5. Zusammenfassung

Der beim Münchner U-Bahn-Bau erstmals großtechnisch angewandte "Spritzbetonvortrieb unter Druckluft" hat sich nicht nur in hydrogeologischen Problembereichen bestens bewährt.

Die Beherrschung des Grundwassers durch die Druckluft steigert die Sicherheit bei den Vortriebsarbeiten.

Durch die Stützwirkung der Druckluft auf die Ortsbrust, aber auch die Verminderung der Wasserhaltungsmaßnahmen, werden die Setzungen deutlich verringert. Die geringeren Eingriffe in das Grundwasserregime und der Entfall von chemischen Injektionen erbringen eine verminderte Umweltbelastung. Daneben werden durch die beim Druckluftvortrieb entfallenden Zusatzaufwendungen in hydrogeologischen Problembereichen auch wirtschaftliche Vorteile erzielt.