

Bauhaus-Universität Weimar

Fakultät Bauingenieurwesen

Professur Grundbau

Diplomarbeit

Anwendung des Düsenstrahlverfahrens im Tunnelbau



eingereicht von **Heike Jackstädt**

geb. am 26.01.1977 in Meiningen

Seminargruppe B/95/S

Dipl.-Reg.-Nr. B/2000/170

Erstprüfer Prof. Dr.-Ing. K. J. Witt

Zweitprüfer Dr.-Ing. R. Wendt

Ausgabedatum 01.11.2000

Abgabedatum 01.02.2001

„Ich erkläre, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und nur unter Verwendung der angegebenen Quellen und Hilfsmittel angefertigt habe.“

Weimar, 13.02.2001

Heike Jackstädt

I N H A L T S V E R Z E I C H N I S

0	Einleitung.....	6
1	Düsenstrahlverfahren – kein Injektionsverfahren	8
1.1	Allgemeines	8
1.2	Verfahrensbeschreibung.....	8
1.3	Verfahrensarten	11
1.4	Anwendungsbereich	13
1.5	Düsenstrahlkörper	14
1.5.1	Geometrie der Düsenstrahlkörper.....	14
1.5.2	Eigenschaften der verfestigten Bodenkörper	15
1.6	Baustelleneinrichtung	17
1.7	Anwendungsmöglichkeiten	18
1.8	Ausführungskontrolle	20
2	Düsenstrahlverfahren im Tunnelbau	21
2.1	Düsenstrahlanwendungen im Tunnelbau	21
2.2	Düsenstrahlschirme	24
2.2.1	Allgemeines	24
2.2.2	Gebirgsmechanische Wirkung von Düsenstrahlschirmen	28
2.2.3	Tunnelbautechnische Konsequenzen.....	29
2.2.4	Vorteile der Düsenstrahlschirme im Tunnelbau	30
2.3	Horizontale Dichtungsblöcke im Grundwasser	31
2.4	Anfahrbereich für den Schildvortrieb	33
3	Ausgeführte Tunnelbaumaßnahmen	35
3.1	Überblick Tunnelbauprojekte	35
3.2	Oswaldiberg-Tunnel, Österreich [5].....	36
3.3	Zammer Tunnel, Österreich [33], [43].....	39
3.4	U-Bahnhof „Am Moosfeld“, München [14]	42
3.5	U-Bahnhof „Josephsburg“, München [31].....	47
3.6	Tunnel Frankfurter Kreuz [9], [25].....	50
4	Qualitätskontrolle und Fehleranfälligkeit.....	57
4.1	Notwendigkeit von Qualitätskontrollen.....	57
4.2	Probesäulen.....	57
4.2.1	Allgemeines	57
4.2.2	Herstellung von Probesäulen.....	58
4.2.3	Ausgraben der Probesäulen	59
4.2.4	Reichweitenmessung mittels Hydrophonverfahren.....	59
4.3	Häufige Fehler	62
4.3.1	Zu kleiner Säulendurchmesser	63
4.3.2	Zu großer Säulendurchmesser	63
4.3.3	Zu kurze Säulen.....	64
4.3.4	Die Säulenachsen weichen von der Sollneigung ab.....	65
4.3.5	Zu geringe Festigkeit der Düsenstrahlkörper	66
4.3.6	Zu hohe Festigkeit der Düsenstrahlkörper	67
4.3.7	Gebäudeschäden durch die Düsenstrahlkörperherstellung	67
4.4	Qualitätskontrolle	68
4.4.1	Allgemeine Kontrollen	68
4.4.2	Kontrollmessungen während der Produktion	69
4.4.3	Auswertung der Messdaten	71
5	Anwendungsgrenzen des Düsenstrahlverfahrens	72
6	Zusammenfassung und Ausblick.....	76

A B B I L D U N G S V E R Z E I C H N I S

Abb. 1-1	Herstellung eines Düsenstrahlkörpers [41]	9
Abb. 1-2	Verfahrensarten, schematisch [26]	11
Abb. 1-3	Anwendungsgrenzen des Düsenstrahlverfahrens [43]	13
Abb. 1-4	Düsenstrahlkörperformen [43]	14
Abb. 1-5	Anordnungsmöglichkeiten von Einzelementen im Grundriss [24]	15
Abb. 1-6	Entwicklung der Festigkeit von Düsenstrahlkörpern (qualitativ) [43]	16
Abb. 2-1	Düsenstrahlverfahren als Sicherungstechnik im Tunnelbau [22]	21
Abb. 2-2	Mögliche Anordnungen von Düsenstrahlkubaturen im Tunnelbau [22]	23
Abb. 2-3	Horizontale Schirminjektion im Tunnelbau [26]	24
Abb. 2-4	Prinzip des horizontalen Düsenstrahlverfahrens [8]	25
Abb. 2-5	Herstellungsreihenfolge von Düsenstrahlschirmen [19]	26
Abb. 2-6	Vortriebsicherung ausgehend von einem Schacht oberhalb des Grundwasserspiegels [31]	32
Abb. 2-7	Dichtungsblock für einen Schildvortrieb (Grundriss, Ansicht) [13]	34
Abb. 3-1	„Kärntener Deckelbauweise [5]	37
Abb. 3-2	Regelabschnitt Ost (Längs- und Querschnitt) [5]	37
Abb. 3-3	Abfräsen mittels Teilschnittmaschine [5]	38
Abb. 3-4	Düsenstrahlschirme und Lage der Bebauung (schematisch) [43]	40
Abb. 3-5	Längsschnitt Regelabschnitt West (schematisch) [43]	40
Abb. 3-6	Querschnitt Regelabschnitt West (schematisch) [43]	41
Abb. 3-7	Dichttrog Salzmesserstraße, München (schematisch) [14]	43
Abb. 3-8	Querschnitt Dichttrog [14]	44
Abb. 3-9	Lamellendichtwand mit Durchströmbereich [14]	45
Abb. 3-10	Aufbohren des Dichttroges mit Kiespfählen [14]	46
Abb. 3-11	Tunnelvortrieb am Bahnhof [31]	47
Abb. 3-12	Herstellung eines Dichtkörpers (schematisch) [31]	48
Abb. 3-13	Querschnitt und Grundriss Dichtkörper [31]	49
Abb. 3-14	Lageplan der Tunnel unter dem Frankfurter Kreuz [9]	51
Abb. 3-15	Querschnitt des Kalottenvortriebes (Düsenstrahlschirm) [9]	52
Abb. 3-16	Kalottenvortrieb und nachfolgender Strossen-Sohlausbruch [9]	53
Abb. 3-17	Düsenstrahlwanne im Strossenbereich [9]	54
Abb. 4-1	Reichweitentest mittels Hydrophonverfahren [13]	60
Abb. 4-2	Vergleich Ausgrabung – Hydrophonmessung [13]	62
Abb. 4-3	Körperformen bei unterschiedlicher Parameterabstimmung [24]	62

T A B E L L E N V E R Z E I C H N I S

Tab. 1-1	Ausgewählte mechanische Eigenschaften des erhärteten Boden-Zement- Gemisches [27]	17
Tab. 3-1	Überblick über ausgeführte Tunnelbauprojekte mit Vortrieben unter Anwendung des Düsenstrahlverfahrens	35
Tab. 5-1	Druck- und Einwirkradius des Düsenstrahlverfahrens [15]	73

0 Einleitung

Das Düsenstrahlverfahren ist eine im Spezialtiefbau relativ junge Technologie, stellt aber dennoch eines der am universellsten einsetzbaren Verfahren dar. Es hat in den letzten zwei Jahrzehnten eine enorme Anwendungsvielfalt und wirtschaftliche Bedeutung erfahren. Durch die Entwicklung kleinerer Geräteeinheiten, die Möglichkeit Düsenstrahlkörper mit nahezu beliebiger Gestalt und Größe herzustellen, sowie die große Anzahl variabler Eigenschaften bezüglich Verfahrensart, geometrischer Form oder Materialgüte bietet das Düsenstrahlverfahren Lösungsmöglichkeiten für die verschiedensten technischen Probleme im Tiefbau. Mit dem Düsenstrahlverfahren hergestellte Kubaturen werden u. a. als Baugrundverbesserung, als Verbau- und Gründungselemente und als Abdichtung gegen Grundwasser hergestellt.

Das „*Düsenstrahlverfahren*“ nach prEN 12 716 (April 1997, Deutschland) ist unter den verschiedensten Bezeichnungen bekannt. Die international übliche, englische Bezeichnung lautet „*Jet-Grouting*“ und bedeutet übersetzt etwa „*Mörtelvermittlung durch Düsenstrahl*“. In Österreich wird daher die treffende Bezeichnung „*Hochdruckbodenvermörtelung (HBDV)*“ verwendet. In der Schweiz der Begriff „*Jetten*“ oder „*Jetting*“ und in Deutschland allgemein die irreführende Bezeichnung „*Hochdruckinjektion*“. Hinzu kommt, dass die auf dem Gebiet des Düsenstrahlverfahrens führenden Firmen eigene, z. T. geschützte Bezeichnungen eingeführt haben. So verwenden die Fa. BAUER und die Fa. BILFINGER + BERGER den Begriff „*HDI-Verfahren*“, die Fa. KELLER bezeichnet es als „*SOILC-RETE-Verfahren (S, D, T)*“, die Fa. RODIO führt es unter der Bezeichnung „*RO-DINJET (-1, -2, -3)*“ und die Firma INSOND vermerkt es unter „*SOILJET*“.

Das Prinzip des Düsenstrahlverfahrens kommt aus der Tiefbohrtechnik. Sein bautechnischer Ursprung liegt in Japan und Großbritannien. Das britische Düsenstrahlverfahren zur Bodenvermörtelung wurde erstmals 1963 in einem Bericht der Londoner Firma CEMENTATION CO. LTD. vorgestellt. Durch diese Publikation wurde man in Japan auf das Verfahren aufmerksam, wo es ab 1965 speziell im maschinellen Bereich weiterentwickelt wurde. Am 30.11.1970 wurde dann schließlich in Japan ein „*Verfahren zum Herstellen von unterirdischen Säulen*“ unter dem Namen *CCP (chemical churning pile)* zum Patent angemel-

det, dessen „*Endverfestigungsmittel mit einem scharfen Strahl bis zu 350 atm in das Erdreich eingeschossen*“ wird [13].

Seit Ende der 70er Jahre wird das Düsenstrahlverfahren weltweit angewendet. In Europa wurde es zuerst in Italien Anfang der 80er Jahre mehrfach, auch im Tunnelbau, angewandt und weiterentwickelt. In Deutschland befasste sich 1979 zuerst die Fa. KELLER mit dem Düsenstrahlverfahren und erwirkte die erste „Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung“ des Instituts für Bautechnik Berlin für das Düsenstrahlverfahren. Andere Spezialtiefbaufirmen begannen erst einige Jahre später mit dem Einsatz dieses Verfahrens.

Bis Ende der 70er Jahre des 20. Jahrhunderts stand das vertikale Düsenstrahlverfahren im Vordergrund. Erste Versuche mit dem horizontalen Düsenstrahlverfahren und seinem Einsatz im Tunnelbau wurden ab 1982/83 in Italien beim Bau des Bahntunnels Campiolo-Traviso von der Fa. RODIO unternommen. Im deutschsprachigen Raum kam das horizontale Düsenstrahlverfahren als vorausseilende Vortriebssicherung erstmals beim Bau des Oswaldiberg-Tunnels bei Villach/Österreich zum Einsatz.

In den sich anschließenden Kapiteln der Diplomarbeit soll nun auf das Prinzip des Düsenstrahlverfahrens an sich und seine Anwendungen im Tunnelbau, sowie die Fehleranfälligkeit und das Qualitätsmanagement näher eingegangen werden. Dabei stehen die Erarbeitung einer Systematik der mit dem Verfahren einhergehenden konstruktiven Randbedingungen und Parameter als eigentliche Schwerpunkte im Vordergrund. Ziel der vorliegenden Arbeit ist es nicht eine rechnerische Nachweisführung bzw. Parameterstudie durchzuführen. Jedoch werden, soweit Angaben vorliegen, Hinweise und Anhaltspunkte für einen rechnerischen Ansatz gegeben.

1 Düsenstrahlverfahren – kein Injektionsverfahren

1.1 Allgemeines

Das Düsenstrahlverfahren erlaubt Abdichtungs- und Verfestigungsmaßnahmen auch in feinstkörnigen Böden und erfüllt gleichzeitig, durch die Verwendung natürlicher Ausgangsstoffe und den Verzicht auf chemische Zusätze, die Anforderungen der Umweltverträglichkeit. Es weist zudem noch einige weitere verfahrenstechnische Vorteile auf. Zu diesen zählen u. a. eine erschütterungs- und verformungsarme Herstellung, sowie eine hohe Flexibilität.

Während bei den konventionellen Injektionen nach DIN 4093 bzw. prEN 12 715 nur die vorhandenen Poren und Hohlräume des Baugrundes mit Injektionsmaterial verfüllt werden, wird beim Düsenstrahlverfahren der anstehende Boden durch einen energiereichen Schneidstrahl aus Wasser oder Zementsuspension aufgeschnitten und ausgefräst. Die Kornstruktur des Bodens wird zerstört. Es entsteht eine in-situ-Vermischung des Bodens mit der eingepressten Zementsuspension. Dabei kann es u. U. auch zu einem kompletten Bodenaustausch kommen. Auf diese Weise entsteht ein nahezu homogener Boden-Zement-Körper, dessen Zusammensetzung wesentlich durch den anstehenden Boden bestimmt wird. Die überschüssige Suspension tritt vermischt mit Bodenpartikeln meist über den Bohrlochringraum zutage und wird dort gefasst.

1.2 Verfahrensbeschreibung

Beim Düsenstrahlverfahren wird Zementsuspension oder Wasser mit 300 bis 600 bar durch ein Einfach- oder Mehrfachgestänge über horizontal oder geneigt am unteren Ende des Bohrstranges angeordnete Spezialdüsen in den Baugrund gepresst. Durch die hohe Energie des Düsenstrahls wird das anstehende Lockergestein bei gleichzeitigem Drehen des Bohrgestänges gelöst und durch Zementsuspension ersetzt bzw. mit ihr vermischt. Es entsteht ein erhärtendes Medium, das infolge der Zementhydratation zu einer festen Masse wird.

Nach [13] ist eine wesentliche Voraussetzung für das Funktionieren des Düsenstrahlverfahrens der gezielte und kontrollierte Abfluss der Rücklaufsuspension durch den Ringraum zwischen dem Bohrgestänge (ca. 80 bis 100 mm Durch-

messer) und der Bohrlochwand (ca. 150 bis 200 mm Durchmesser). Die rücklaufende Suspension bewirkt den erforderlichen Bodenaustrag und den Druckabbau im Boden. Wird die Rücklaufsuspension gestoppt, können die 300 bis 600 bar Flüssigkeitsdruck in Düsennähe nicht im Boden abgebaut werden. Es entsteht ein unkontrollierter Soilfracturing-Effekt, der durch die hohen Drücke und die damit verbundenen hohen Kräfte schnell zu Gelände- oder Bauwerkshebungen führt. Bei sehr schlechten Böden, sehr tiefen oder horizontalen Bohrungen, werden daher bei Bedarf vor der Säulenherstellung Standrohre aus Stahl oder Kunststoff gesetzt, um den definierten, kontrollierten Rückfluss zu gewährleisten. Die Rückflussmenge beträgt je nach Bodenart und Anteil der Leerbohrungen bei einfachen Unterfangungen das 1,1- bis 1,2-fache des herzustellenden Düsenstrahlkörpers. Dieser Faktor kann bei tiefliegenden Dichtungssohlen oder bindigen und organischen Böden bis auf 2,5 ansteigen. Die anfallende Rücklaufsuspension kann z. T. aufbereitet und wiederverwendet werden. Nicht mehr aufzubereitende Suspensionsreste müssen jedoch entsorgt werden. Dieser Umstand kann einige Probleme und Kosten mit sich, wenn sich z. B. keine geeignete Deponie in der Nähe befindet. Das Problem Rücklaufsuspension sollte daher stets konkret in die Planung einbezogen werden.

Die Herstellung der Düsenstrahlelemente ist in Abb. 1-1 dargestellt und kann allgemein in die nachfolgend erläuterten vier Phasen unterteilt werden.

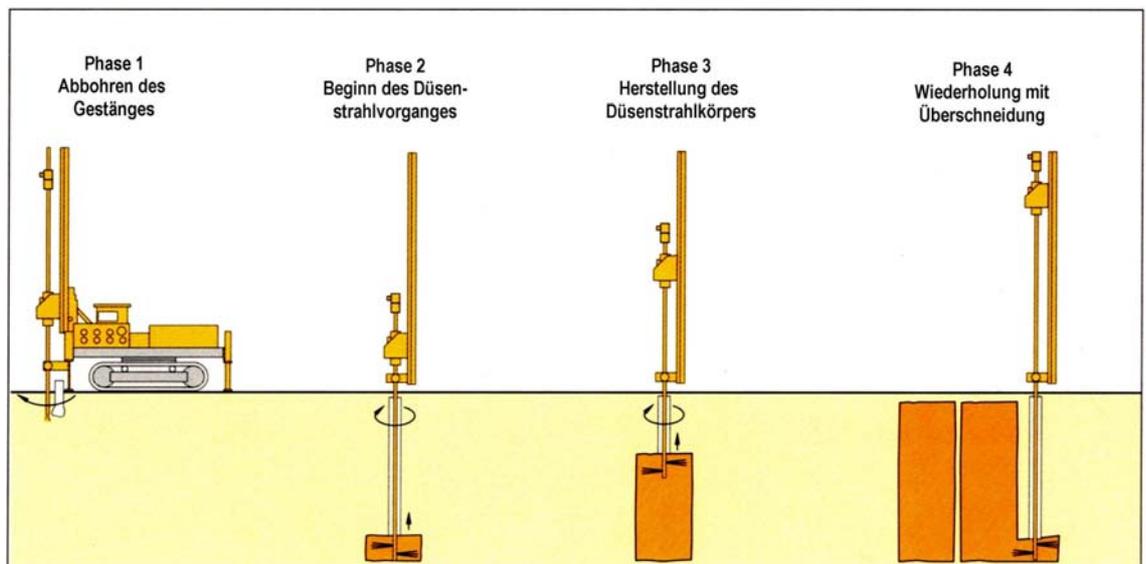


Abb. 1-1 Herstellung eines Düsenstrahlkörpers [41]

Phase 1: Abbohren des Gestänges

Mit einer konventionellen Spülbohrung wird das Düsengestänge bis auf die Endteufe vorgetrieben. Diese Bohrung ist mit einer hinreichenden Genauigkeit bezüglich der Sollachse und der Endtiefe durchzuführen, da der Erfolg des Düsenstrahlverfahrens und die Qualität der Gesamtmaßnahme mit zunehmender Tiefe entscheidend von diesen Parametern abhängen.

Phase 2: Beginn des Düsenstrahlvorganges

Befindet sich der Bohrkopf auf der Endteufe, wird vom Bohrspülen auf Düsen umgeschaltet. Es beginnt der eigentliche Düsenstrahlvorgang. Durch die Düsen im unteren Teil des Gestänges tritt mit hoher Geschwindigkeit (bis zu 200 m/s) ein horizontaler Schneidstrahl aus. Dieser schneidet den Boden im Bereich vor der Düse auf. Gleichzeitig vermischt sich die eingebrachte Zementsuspension mit dem gelösten Boden, wobei ein kompletter Bodenaustausch stattfinden kann. Das Ergebnis dieses Vorganges ist eine im Wirkungsbereich des Strahls entstandene Bodenvermörtelung.

Der Druck außerhalb der Düsen ist auf den hydrostatischen Druck zu begrenzen, um Gelände- und ggf. Gebäudehebungen zu vermeiden. Durch Entlastungsöffnungen, gewöhnlich der Bohrlochringraum, ist zu gewährleisten, dass die aufgebrachte Druckenergie möglichst weitgehend in Geschwindigkeitsenergie umgesetzt werden kann. Die überschüssige Zementsuspension tritt vermischt mit dem gelösten Boden aus dem Bohrloch aus und sorgt so für die notwendige Druckentlastung. Setzt sich der Bohrlochringraum durch aufsteigende Rücklaufszuspension zu, ist keine kontrollierte Düsenstrahlkörperherstellung mehr möglich.

Phase 3: Herstellung des Düsenstrahlkörpers

Während des Düsens wird das Gestänge kontrolliert mit konstanter Geschwindigkeit und Drehzahl gezogen und der Boden dabei mit Zementsuspension vermörtelt. Wird das Gestänge beim Düsen um 360° gedreht, bildet sich im Endzustand eine homogene, verfestigte Säule oder Scheibe. Erfolgt das Ziehen des Gestänges ohne Drehung, entstehen Lamellen. Das ausgefräste Bodenmaterial wird ganz oder teilweise mit der Suspension meist über den Bohrlochring-

raum nach oben gespült und tritt als Konglomerat (Boden-Zement) am Bohrlochmund aus. Form und Größe des Düsenstrahlkörpers lassen sich schließlich in Abhängigkeit vom anstehenden Boden durch die entsprechende Wahl des Pumpendruckes, der Düsendurchmesser, der Gestängeumdrehungen (5 bis 15 U/min) und der Ziehgeschwindigkeit (5 bis 30 cm/min) einstellen.

Phase 4: Wiederholung mit Überschneidung

Die Düsenstrahlelemente werden so oft beliebig miteinander kombiniert, bis der gewünschte Körper fertiggestellt ist. Die Herstellung nahezu beliebiger Körper kann sowohl „frisch in frisch“ als auch „frisch gegen fest“ erfolgen. Die Herstellungsfolge sollte dabei auf die jeweiligen Bodenbedingungen und die zu lösende Bauaufgabe abgestimmt werden.

1.3 Verfahrensarten

Beim Düsenstrahlverfahren wird im wesentlichen zwischen drei verschiedenen Verfahrensarten unterschieden, die in Abhängigkeit vom vorhandenen Boden, sowie der Form und Qualität der Elemente angewendet werden. Diese sind das Einphasen-, Zweiphasen- bzw. Dreiphasenverfahren nach prEN 12 715. Die Bezeichnung der nachfolgend erläuterten Verfahren entspricht der Anzahl der eingepressten Medien (Suspension, Wasser, Luft). Jedes dieser Verfahren ist für bestimmte Aufgaben besonders gut geeignet, für andere dagegen weniger.

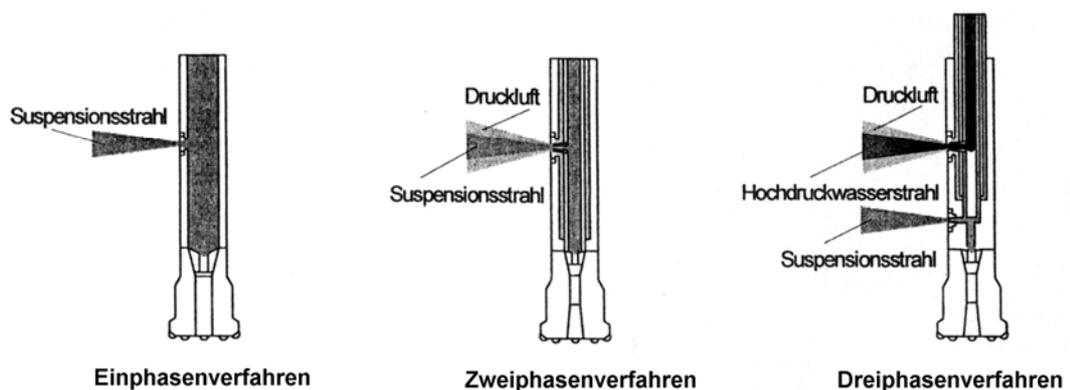


Abb. 1-2 Verfahrensarten, schematisch [26]

Aus Abb. 1-2 ist ersichtlich, dass der Schneidstrahl aus einer seitlichen Düse austritt. Ebenso ist die Anordnung zweier gegenüberliegender, geringfügig höhenversetzter Düsenöffnungen wie beim Dreiphasenverfahren möglich. Die

Durchmesser der Düsen betragen i. d. R. 1,5 bis 6,0 mm und sind abhängig vom gewählten Verfahren, dem anstehenden Boden und den geforderten Elementeigenschaften.

Einphasenverfahren

Das Einphasenverfahren eignet sich vor allem für geringe Tiefen und kleinere bis mittlere Durchmesser, sowie für horizontale Düsenstrahlanwendungen.

Bei diesem Verfahren erfüllt die Zementsuspension eine doppelte Funktion. Der Zementsuspensionsstrahl fräst den Boden auf, gleichzeitig bindet die Suspension die aufgelockerten Bodenpartikel zu einer festen Masse zusammen und erzeugt so das gewünschte Element. Die Zementsuspension wird unter Hochdruck durch ein Einfachgestänge der Düse zugeführt. Der hierzu erforderliche Pumpendruck beträgt 200 bis 600 bar.

Zweiphasenverfahren

Das Zweiphasenverfahren wird vorwiegend in sandigen und kiesigen Böden zur Herstellung von Lamellenwänden, Gebäudeunterfangungen und Dichtsohlen eingesetzt. Dabei lassen sich im Vergleich zum Einphasenverfahren unabhängig von der Tiefe wesentlich größere Durchmesser von bis zu 3,00 m herstellen.

Bei dieser Methode wird der Schneidstrahl aus Zement (200 bis 600 bar) durch einen ringförmigen Druckluftstrahl ummantelt. Dazu ist ein Zweikanalbohrgestänge mit zwei getrennten, radial angeordneten Zulaufkanälen für Luft und Suspension notwendig. Der Druckluftstrahl bündelt den Suspensionsstrahl, sorgt so für eine Vergrößerung des Wirkungsradius oder ermöglicht damit das Lösen festeren Baugrundes. Er wird über eine Ringdüse mit einem Druck von 2 bis 12 bar erzeugt und ummantelt den Suspensionsstrahl coaxial.

Dreiphasenverfahren

Das Dreiphasenverfahren stellt gegenüber den beiden zuvor genannten Verfahren eine grundsätzlich andere Verfahrensweise dar. Es wird bevorzugt für Gebäudeunterfangungen, Dichtwände und Dichtsohlen eingesetzt. Die hier verwendeten Medien Schneidwasser, Luft und Suspension werden über ein Dreikanalbohrgestänge den Düsen getrennt zugeführt (siehe Abb. 1-2). Das

Schneiden und das Vermörteln erfolgen auch hier in einem Arbeitsgang, jedoch räumlich getrennt voneinander.

Das Auffräsen der Bodens erfolgt unter Drücken von 200 bis 600 bar durch einen Hochdruckwasserstrahl. Dieser Schneidstrahl wird über eine Ringdüse koaxial druckluftummantelt, um den Wirkungsgrad zu erhöhen. Die gleichzeitig durchgeführte Vermörtelung erfolgt über eine oder zwei, unterhalb der Schneiddüse angeordnete Suspensionsöffnungen. Für die Zementsuspension sind nun nur noch Drücke von 10 bis 30 bar erforderlich. Da der hier eingesetzte Wasserschnidstrahl eine geringere Dichte als der Zementschnidstrahl besitzt, sind gegenüber dem Zweiphasenverfahren jedoch nur etwas kleinere Durchmesser von bis zu 2,00 m möglich.

1.4 Anwendungsbereich

Das Düsenstrahlverfahren ist in nahezu allen Bodenarten anwendbar. Es wird im Gegensatz zu herkömmlichen Bodenverfestigungsmaßnahmen in allen Lockergesteinen bis hin zum Ton erfolgreich ausgeführt. Dies gilt auch für Mischböden und Wechsellagerungen, organische Einlagerungen eingeschlossen. Allerdings steigen der Energie- und Materialaufwand mit der Zunahme bindiger Bodenanteile erheblich an.

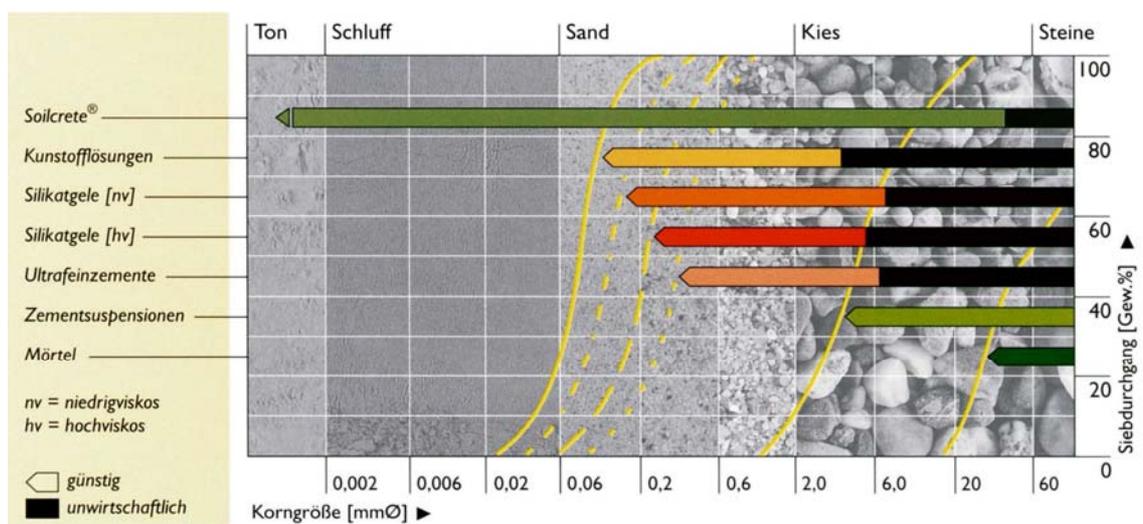


Abb. 1-3 Anwendungsgrenzen des Düsenstrahlverfahrens [43]

Mit dem Düsenstrahlverfahren wurden die Anwendungsgrenzen der gesamten Injektionstechnik besonders im Bereich der feinkörnigen Böden deutlich erweitert (Abb. 1-3). Eine Anwendung des Düsenstrahlverfahrens also ist praktisch

über das gesamte Kornverteilungsband möglich; so kann es nicht nur in Kiesen und Sanden sondern auch im gesamten Schluffbereich angewandt werden. Anstelle der bei der Injektion verwendeten Kunstharze oder Chemikalien werden umweltfreundlichere Suspensionen verwendet. Bei gleichen Herstellungsparametern entstehen jedoch in Tonen und schwach tonigen Schluffen kleinere Säulendurchmesser als in Sanden. Im Grobkies entspricht das Ergebnis des Verfahrens dem der Zementinjektion. Auf diesen Fakt soll jedoch in Kapitel 5 noch einmal genauer eingegangen werden.

1.5 Düsenstrahlkörper

1.5.1 Geometrie der Düsenstrahlkörper

Die geometrischen Grundformen der Düsenstrahlkörper werden durch die Düsenanordnung und die Bewegungen des Bohrgestänges erzeugt (Abb. 1-4). Der Düsenstrahl an sich erodiert einen langgestreckten zylinderähnlichen Körper mit einer Breite von einigen Zentimetern. Wie aus Abb. 1-4 ersichtlich, entstehen durch das Ziehen des Gestänges ohne Rotation Lamellen, bei Anordnung mehrerer Düsen auch Mehrfachlamellen. Erfolgt das Ziehen eines Gestänges mit Sektoren-Schwenkeinrichtungen, entstehen Teilsäulen. Das Ziehen mit Rotation hingegen des Gestänges erzeugt Vollsäulen.

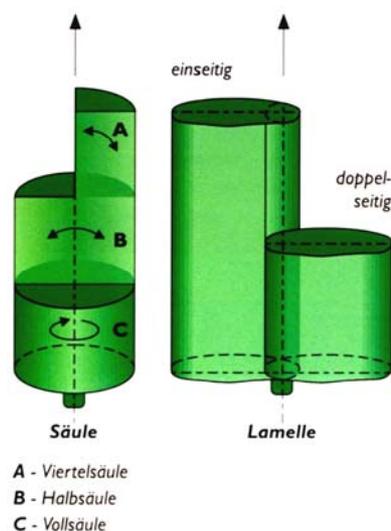


Abb. 1-4 Düsenstrahlkörperformen [43]

Die Ausführungstiefe wird in der Regel nur durch die erforderliche Bohrgenauigkeit begrenzt. Da das Injektionsgestänge beliebig verlängerbar ist, lassen sich Injektionskörper bis in große Tiefen herstellen.

Durch die tangierende oder überschneidende Aneinanderreihung mehrerer Einzelelemente können u. a. Düsenstrahlwände, Unterfangungskörper und Düsenstrahl dichtsohlen hergestellt werden. Ein Überblick über die verschiedenen Anordnungsmöglichkeiten von Einzelelementen ist in Abb. 1-5 zu sehen. Die hohe geometrische Flexibilität des Düsenstrahlverfahrens ermöglicht eine optimale Anpassung an die jeweiligen Gegebenheiten und Erfordernisse.

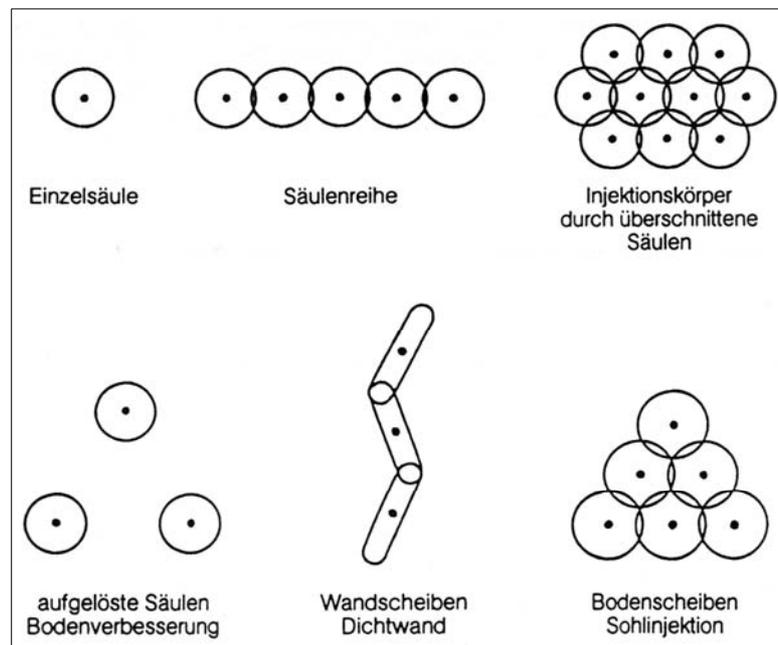


Abb. 1-5 Anordnungsmöglichkeiten von Einzelelementen im Grundriss [24]

1.5.2 Eigenschaften der verfestigten Bodenkörper

Säulendurchmesser

Die Reichweite des Düsenstrahls und somit der erreichbare Säulendurchmesser sind in erster Linie von der anstehenden Bodenart, insbesondere von der Lagerungsdichte bzw. der Konsistenz, abhängig. Daher ist die geeignete Wahl des Herstellungsverfahrens und der Herstellungsparameter (Pumpendruck, Düsendurchmesser, Düsenanzahl, Dreh- und Ziehgeschwindigkeit des Gestänges) für die Erreichung des geplanten Säulendurchmessers wichtig.

Werden die genannten Parameter gut auf den anstehenden Boden abgestimmt, sind abhängig von der Bodenart Säulendurchmesser zwischen 60 und 200 cm ohne Probleme möglich. So wurden unter normalen Bedingungen in Schluffen Säulendurchmesser bis 100 cm, in Sanden bis 200 cm und in Kiesen sogar Säulendurchmesser bis 300 cm erreicht.

Druckfestigkeit

Die Festigkeit eines Düsenstrahlkörpers ist vorwiegend von der Art und Menge des Bindemittelanteils, der Bodenart, den verbleibenden Bodenanteilen im fertigen Element und vom Wassergehalt abhängig. Die Bandbreite der erzielbaren einaxialen Druckfestigkeiten reicht etwa von 2 bis 30 N/mm². Statisch werden meist jedoch nur 5 bis 10 N/mm² in Ansatz gebracht. Dieser Wert entspricht quasi einem B5 bis B10, wenn man die Bodenzementkörper mit üblichem Beton vergleicht. Abhängig von den gewählten Parametern können in Schluffen bis zu 5 N/mm², in Sanden bis 10 N/mm² und in Kiesen bis 25 N/mm² als einaxiale Druckfestigkeiten angenommen werden.

Da es sich bei den mit dem Düsenstrahlverfahren hergestellten Elementen um Bodenzementkörper handelt, entwickelt ihre Druckfestigkeit erst mit der Zeit ihren Endwert. Allerdings wird in einem nichtbindigen Boden die endgültige Druckfestigkeit schneller erreicht als in einem bindigen Boden. Der in Abb. 1-6 dargestellte Zusammenhang zeigt deutlich, dass die Festigkeitsentwicklung eines Düsenstrahlkörpers, der eines Betonkörpers durchaus ähnlich ist. Der Sachverhalt der Druckfestigkeitsentwicklung wird in [4] und [15] ausführlich diskutiert und soll hier nicht näher betrachtet werden.

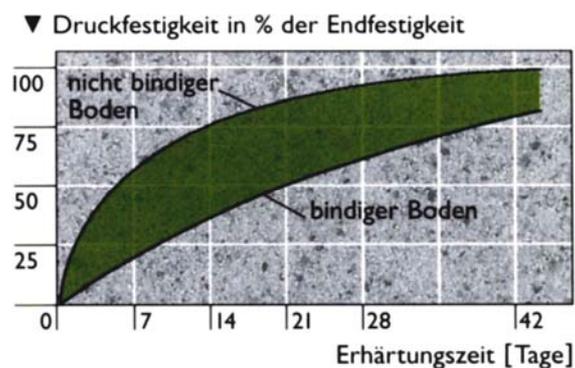


Abb. 1-6 Entwicklung der Festigkeit von Düsenstrahlkörpern (qualitativ) [43]

Einige Richtwerte für die Druckfestigkeit und die E-Moduli des erhärteten Boden-Zement-Gemisches nach [27] sind in Tab. 1-1 als 28-Tage-Werte angegeben. Sie wurden an Bohrkernen ermittelt und streuen z. T. sehr stark.

Bodentyp	Druckfestigkeit [N/mm ²]	E-Modul [N/mm ²]
lehmiger Schluff	0,3 - 0,5	60 - 450
sandiger Schluff	1,5 - 5,0	500 - 2 000
schluffiger Sand	5,0 - 10,0	2 000 - 5 000
kiesiger Sand	5,0 - 15,0	3 000 - 10 000
sandiger Kies	5,0 - 20,0	4 000 - 20 000

Tab. 1-1 Ausgewählte mechanische Eigenschaften des erhärteten Boden-Zement-Gemisches [27]

Wichte

Für erdstatische Berechnungen wird je nach Bodenart eine mittlere Wichte des Düsenstrahlelementes von 16 bis 20 kN/m³ angesetzt. Sie muss jedoch im Einzelfall anhand der Daten der Baugrunduntersuchung festgelegt werden.

Wasserdurchlässigkeit

Hinsichtlich der Wasserdurchlässigkeit verhält sich ein Düsenstrahlkörper etwa wie normaler Beton vergleichbarer Festigkeit. Seine Abdichtungswirkung wird jedoch von der Art und Menge der eingebauten Bindemittel, sowie den verbleibenden Anteilen der anstehenden Bodenart beeinflusst. Allgemein kann von einer Durchlässigkeit zwischen 10^{-7} und 10^{-9} m/s ausgegangen werden, die sich aus Proben des Rücklaufmaterials oder Bohrkernen ermitteln lässt. Durch Feinstbestandteile im Boden oder Zugabe von Bentonit zur Suspension kann die Wasserdurchlässigkeit weiter verringert werden.

1.6 Baustelleneinrichtung

Die Baustelleneinrichtung einer Düsenstrahlmaßnahme besteht je Einheit im wesentlichen aus einem Bohrgerät und einer Hochdruckpumpe ggf. mit Verfüllpumpe. Hinzu kommen eine Mischanlage, Silos und eine Entsorgungs- bzw. Recyclinganlage für die Überschusssuspension. Wird druckluftunterstützt geschnitten (Zwei- und Dreiphasenverfahren) ist zusätzlich ein Kompressor je Einheit erforderlich. Die derzeit verwendeten Baustelleneinrichtungen sind technisch ausgereift, an das jeweilige Verfahren angepasst und platzsparend.

Ihre Einzelbestandteile sind meist auf Gestellen montiert oder als Container konzipiert, um sie leicht transportieren und umsetzen zu können. Moderne Düsenstrahlstationen sind häufig als Kompaktanlagen ausgeführt und können nach Bedarf auch höhere hydraulische Leistungen erzeugen.

Die Bohr- und Rückzugsvorgänge des Düsgestänges können mit Hilfe von herkömmlichen Bohrgeräten erfolgen, wobei das Bohrwerkzeug und die Gestänge an die hohen Drücke angepasst werden müssen. Die Entwicklungen der letzten Jahre weisen allerdings in Richtung des Einsatzes speziell konzipierter Maschinen, die eine schnelle und genaue Positionierung und Führung des Düsgestänges gewährleisten. Diese Geräte sind zudem mit einer automatischen Steuerung der Dreh-, Vorschub- und Rückzug-Geschwindigkeit ausgerüstet, die zu einer höheren Qualität der fertigen Elemente führt.

Die Hochdruckpumpen erzeugen die für den Schneidstrahl erforderlichen hohen Drücke von bis zu 600 bar. Bei der Anwendung des Dreiphasenverfahrens sind zusätzlich Niederdruckverfüllpumpen für den Transport der Zementsuspension zum Bohrgerät erforderlich. Diese Pumpen erzeugen lediglich Drücke von bis zu 30 bar, die aber, wie in Abschnitt 1.3 bereits erwähnt, für den Verfüll- und Zementiervorgang ausreichend sind.

Die für das Düsenstrahlverfahren verwendeten Mischanlagen arbeiten mit elektronischer Steuerung. Sie stellen die Suspension automatisch nach den vorgegebenen Parametern her.

Für das Düsenstrahlverfahren sollten trotz ausgefeilter Baustelleneinrichtung immer speziell eingewiesene Fachkräfte eingesetzt werden, da der Verfahrenserfolg wesentlich vom Zusammenspiel zwischen der Technik und der Erfahrung des eingesetzten Personals abhängig ist.

1.7 Anwendungsmöglichkeiten

Das Düsenstrahlverfahren ist, wie im Vorfeld angedeutet, sehr vielseitig anwendbar. So kann es z. B. für den Bauwerksschutz, zur Verfestigung oder auch zur Abdichtung herangezogen werden.

In den ersten Jahren seiner Anwendung beschränkte sich das Düsenstrahlverfahren auf Bodenverbesserungen, Unterfangungen und ähnliche Maßnahmen. Im Laufe der Jahre entwickelte sich eine umfangreiche Palette von technischen Varianten und Anwendungen. So konnte das Düsenstrahlverfahren auch beim Tunnelbau im Lockergestein neue Wege eröffnen.

Einen Überblick über die heutige Bandbreite des Verfahrens vermittelt die folgende Auflistung. Als Bodenverbesserungsmaßnahmen sind dabei zu nennen:

- Unterfangungen und Sicherungen,
- Gründungssanierungen und –änderungen,
- Tiefgründungen,
- Tunnelaußenschalen,
- Lastabschirmungen zur Setzungsminderung bei Tunnelvortrieben,
- Stabilisierungshohlkörper für Tunnelbohrmaschinen in weichen und breiigen Böden und
- Hilfgewölbe aus horizontalen Düsenstrahlsäulen zur Durchführung der NÖT in rolligen Böden.

Als Abdichtungsanwendungen sind u. a. zu nennen:

- Dichtwände aus Lamellen oder überschnittenen Säulen,
- Dammbabdichtungen,
- hoch- und tiefliegende Dichtsohlen,
- Gewölbesohlen,
- Dichtungsdeckel,
- Fugenabdichtungen und
- Grundwasserdurchlässe.

Baugrubenumschließungen aus verformungsarmen, wasserhemmenden Düsenstrahlwänden und z. T. erforderlichen Unterfangungen der angrenzenden Gebäude, kombiniert mit wasserhemmenden Düsenstrahlsohlen ermöglichen die Herstellung auch tiefer Baugruben ohne großflächige und tiefe Grundwasserabsenkungen.

1.8 Ausführungskontrolle

Bei der Herstellung von Düsenstrahlkörpern können verschiedene Fehler mit unterschiedlichen Auswirkungen auftreten. Eine Aufstellung einiger möglicher Fehler, ihrer Konsequenzen und der jeweiligen Schadensbehebung ist bei [13] zu finden und wird im Ansatz im Kapitel 4 dieser Diplomarbeit näher betrachtet.

Da die möglichen Fehler sehr vielfältig sind, ist beim Düsenstrahlverfahren stets eine genaue Kontrolle aller Herstellungsparameter erforderlich. Für jede Düsenstrahlsäule wird daher ein Protokoll angefertigt und ausgewertet. Bei Bedarf können alle relevanten Herstellungsparameter kontinuierlich aufgezeichnet werden.

Der Qualitätssicherung dienen verschiedene allgemeine Kontrollen während der Düsenstrahlkörperherstellung. So werden bei wasserdichten Umschließungen oder kritischen Böden während der gesamten Herstellung stichprobenartige Hydrophonmessungen durchgeführt (vgl. Abschnitt 4.4).

Die Ausführungs- und Qualitätskontrolle erfolgt beim Düsenstrahlverfahren also durch die ständige Überwachung der Herstellungsparameter und die Beobachtung der Rücklaufsuspension. Auf dieses Thema wird ebenfalls in Kapitel 4 dieser Diplomarbeit genauer eingegangen.

2 Düsenstrahlverfahren im Tunnelbau

2.1 Düsenstrahlverfahren im Tunnelbau

Das Düsenstrahlverfahren findet im Tunnelbau verschiedene Anwendungsmöglichkeiten. Grundsätzlich sind jedoch lediglich zwei Hauptgebiete, die Verfestigung und die Abdichtung, zu nennen. Die hohe geometrische Flexibilität und die vergleichsweise hohe erreichbare Kubaturfestigkeit und Wasserdichtigkeit in Verbindung mit den minimalen Emissionen stellen dabei die wichtigsten Merkmale der Anwendung des Düsenstrahlverfahrens im Tunnelbau dar.

Die daraus resultierenden Anwendungen weisen eine große Bandbreite auf (vgl. Abb. 2-1) und erfahren eine ständige Weiterentwicklung. Das Grundprinzip des Düsenstrahlverfahrens bleibt dabei fast das Gleiche. Es wird lediglich zu unterschiedlichen Zwecken eingesetzt.

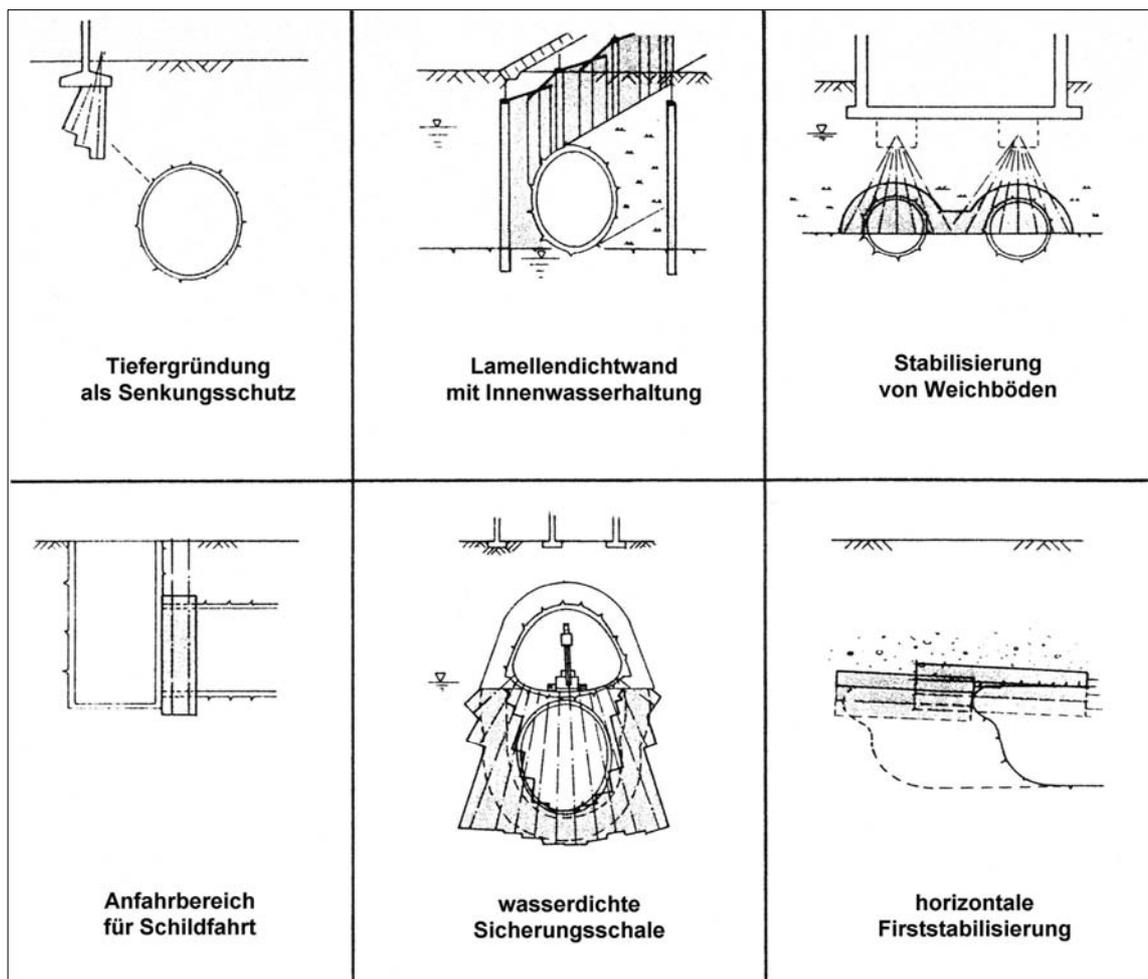


Abb. 2-1 Düsenstrahlverfahren als Sicherungstechnik im Tunnelbau [22]

Im nachfolgenden Kapitel soll auf einen Teil der in Abb. 2-1 dargestellten Sicherungstechniken näher eingegangen werden. Zudem verdeutlichen die anschließend in Kapitel 3 erläuterten, ausgeführten Beispiele einige Prinzipien und ihre konkrete Anwendung im Tunnelbau. Auf eine Erläuterung der Tiefergründung als Senkungsschutz beim Tunnelvortrieb wird dabei verzichtet. Der Aspekt der Unterfangungen ist nicht Gegenstand dieser Diplomarbeit und wird u. a. im Grundbautaschenbuch, Ausgabe 2001, Abschnitt 3 (Unterfangungen) von Prof. Dr.-Ing. U. Smolczyk und Prof. Dr.-Ing. K.-J. Witt behandelt. Es wird daher auf die vorgenannte und andere Veröffentlichungen zu diesem Thema verwiesen.

Mit Hilfe der Abb. 2-1 lassen sich folgende Hauptanwendungen des Düsenstrahlverfahrens im Tunnelbau ableiten.

- Die passive Sicherung von Gebäuden durch örtliche Unterfangung oder Tiefergründung am Einflussbereich des Tunnels vorbei.
- Die Sicherung von Bebauung durch Herstellung gedüster Bereiche um den Tunnelausbruch, im Firstbereich und darüber.
- Die Sicherung des Vortriebes, oberhalb oder im Grundwasser, durch geschlossene Düsenstrahlschalen oder Teilsicherungen.
- Die Sicherung des Vortriebes durch seitliche Dichtwände und horizontale Dichtsohlen mit integrierter Innenentwässerung bzw. Grundwasserabsenkung in den abgeschotteten Bereichen.
- Die Sicherung des Tunnelvortriebes durch Düsenstrahlbehandlung des Ausbruchbereiches mit Überschnitt bei besonderen Baugrundbedingungen.
- Die Sicherung des Vortriebes durch Düsenstrahlsäulen aus dem Vortrieb über definierte Abschlagslängen.

Diese Sicherungsmaßnahmen können je nach Randbedingungen von der Geländeoberkante, aus Schächten, Hilfsstollen oder dem Vortrieb, d. h. von der Ortsbrust ausgeführt werden.

In allen Fällen werden die erforderlichen geometrischen Formen über statische Nachweise oder Verformungsbetrachtungen vorher festgelegt, mittels Probe-

säulen überprüft und aus Düsenstrahlsäulen oder Säulenabschnitten zusammengesetzt.

Die in Abb. 2-2 dargestellten Kubaturen gelangen in Abhängigkeit ihres Anwendungsbereiches und Verwendungszweckes zum Einsatz. So dienen überschnittene und tangierende Säulen zur Herstellung von Sicherungsschirmen für den Tunnelvortrieb ohne Grundwasser. Gefächerte Säulen und überschnittene Lamellen hingegen werden zur Sicherung gegen Grundwassereintritt verwendet. Die Lamellen werden dabei häufig im Rahmen einer Grundwasserabsenkung zur Herstellung von Dichttrögen erstellt. Die gefächerten Säulen hingegen finden vorrangig bei der Realisierung wasserdichter Sicherungsschalen und Tunnelaußenwände Verwendung.

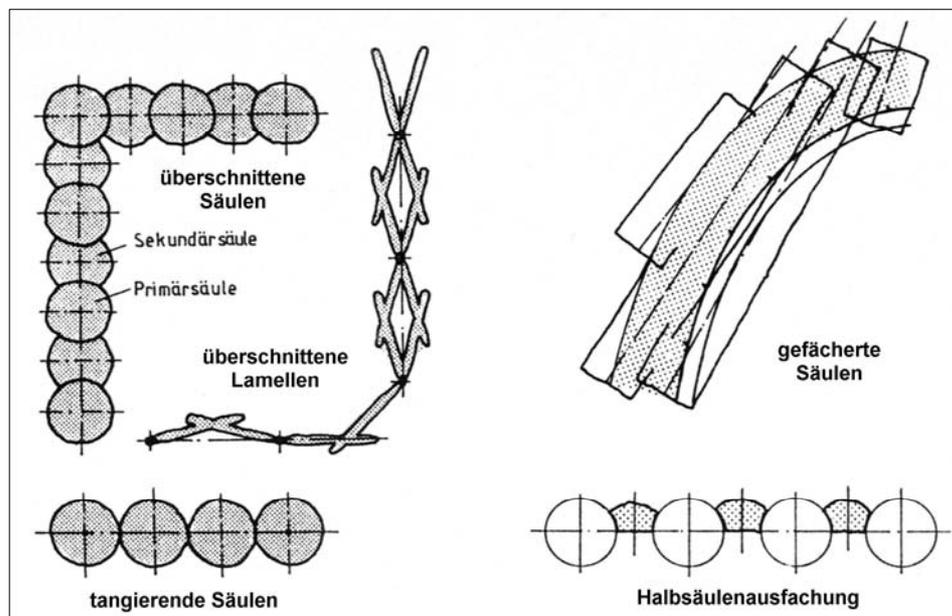


Abb. 2-2 Mögliche Anordnungen von Düsenstrahlkubaturen im Tunnelbau [22]

Je nach den projektbezogenen Anforderungen, werden dazu bei der Planung im Einzelnen folgende Parameter festgelegt:

- der statisch wirksame Querschnitt mit Sicherheitszuschlag für eventuelle baugrundabhängige Bohr- oder Durchmesserabweichungen;
- die Mindestfestigkeit der Düsenstrahlkubatur nach Statik;

- eventuell die Maximalfestigkeit, wenn die Kubatur im Ausbruchbereich angeordnet wird und Behinderungen minimiert werden müssen;
- die Dichtigkeit der Düsenstrahlkubatur, als Dichtigkeit gegen Wasser-Boden-Zutritt (Vermeidung größerer Fehlstellen) oder als Abdichtung gegen Wasser (Erreichen einer geforderten Systemdichtigkeit);
- die Abfolge der Arbeiten zur Minimierung von verfahrensbedingten Verformungen (Säulenherstellung „frisch gegen fest“ statt „frisch in frisch“);
- die Kontrollen neben der Eigenüberwachung gemäß der „Allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassung“ und der prEN 12 716.

2.2 Düsenstrahlschirme

2.2.1 Allgemeines

Die Düsenstrahlschirme stellen die Hauptanwendung des Düsenstrahlverfahrens im Tunnelbau dar. Mit ihrer Herstellung werden gleich 2 Forderungen aus dem Tunnelbau erfüllt. Zum einen erfolgt die Herstellung einer vorausgehenden Ortsbrust und zum anderen die Entlastung der bestehenden Ortsbrust. Um beiden Forderungen gerecht zu werden, wird ausgehend von der Ortsbrust ein Schirm aus schwachgeneigten, tangierenden bzw. überschneitenden Düsenstrahlsäulen hergestellt (Abb. 2-3).

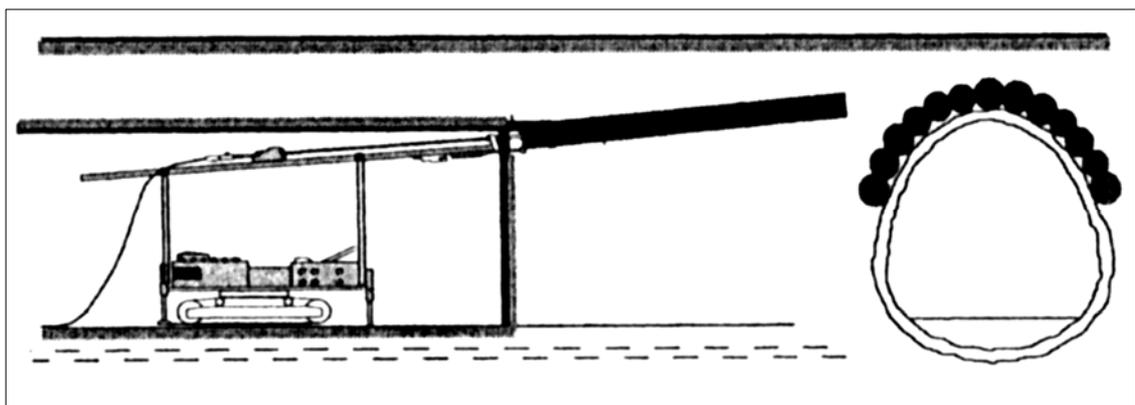


Abb. 2-3 Horizontale Schirminjektion im Tunnelbau [26]

Diese horizontalen oder leicht schräg geneigten Düsenstrahlschirme sind die Grundlage für die Anwendung der NÖT in Problemböden (z. B. rollige Böden)

und in über den Tunnelverlauf veränderlich festen Gesteinen. Weiterhin dienen sie als Lastabschirmung zur Setzungsminimierung bei Tunnelvortrieben mit geringer Überdeckung, z. B. im Stadtbereich. Es ist aber auch eine Verwendung als Stabilisierungshohlkörper für Tunnelbohrmaschinen in weichen bis breiigen Böden möglich. Dies alles kann jedoch nur erfolgen, wenn im Bereich des geplanten und zu sichernden Tunnelausbruches kein Grundwasser ansteht.

Das horizontale Düsenstrahlverfahren an sich wird ähnlich dem vertikalen Düsenstrahlverfahren ausgeführt. In der prEN 12 716 ist es definiert als „*Behandlung, die in einen horizontalen oder fast horizontalen (Abweichungen von der horizontalen Ebene innerhalb 20°) Bohrloch ausgeführt wird*“. Die Phasen der Herstellung eines Düsenstrahlelementes (vgl. Abschnitt 1.2) werden demnach lediglich in die Horizontale verlegt und dort meist unter Anwendung des Einphasenverfahrens durchgeführt. Zur Erzeugung der Schirme erfolgt das Düsen der einzelnen Säulen entlang des geplanten theoretischen Tunnelprofils (Abb. 2-4).

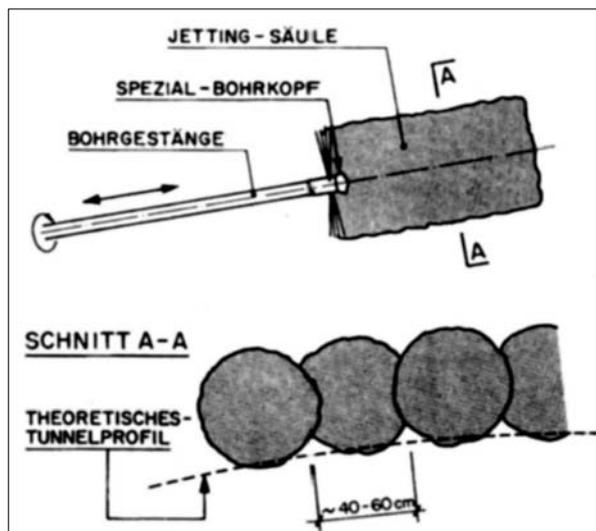


Abb. 2-4 Prinzip des horizontalen Düsenstrahlverfahrens [8]

Zur Herstellung der horizontalen Sicherungsschirme dienen Düsenstrahlsäulen mit einem Durchmesser von 0,6 bis 0,8 m und einer Länge von 12 bis 15 m. Deren Bohransatzpunkt liegt i. d. R. auf dem gleichen Niveau oder wenig unterhalb des höchsten Säulenpunktes. Nach dem Düsen ist so in der Säule nur ein geringer hydrostatischer Suspensionsdruck vorhanden.

Die Pumprate wird bei der Herstellung von Düsenstrahlschirmen so gewählt, dass mit der verpumpten Suspensionsmenge der vorhandene Porenraum und eventuell vorhandene Hohlräume gefüllt werden. Am Bohrloch tritt auch hier Rücklaufsuspension aus. Die Menge der Rücklaufsuspension ist jedoch im Gegensatz zu den sonstigen Düsenstrahlarbeiten deutlich geringer als die verpumpte Suspensionsmenge.

Das Düsen endet nicht direkt an der Ortsbrust, sondern kurz davor. Der Abstand zwischen der Düsenstrahlsäule und der Ortsbrust, die sog. Leerstrecke, beträgt i. a. zwischen 0,5 und 2,0 m. Um eine durchgehende Tunnelsicherung zu erzeugen, ist ein Überlappen der einzelnen Schirme notwendig. Die Überlappungsstrecke ist i. d. R. 1,0 bis 2,5 m lang und u. a. vom anstehenden Baugrund, sowie der Vortriebsmethode abhängig. Nach der Fertigstellung der Säulen wird der Vortrieb, mit definierten Abschlagslängen (meist 1 m), fortgesetzt.

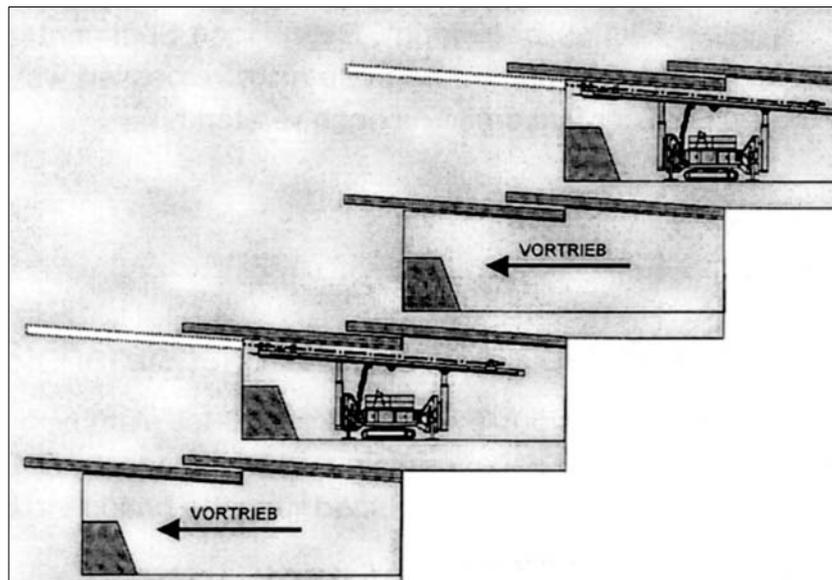


Abb. 2-5 Herstellungsreihenfolge von Düsenstrahlschirmen [19]

Ein Problem bei der Düsenstrahlschirmsicherung stellt das zunächst flüssige Boden-Zement-Gemisch dar. Damit es nicht aus der hergestellten Säule ausläuft wird das Bohrloch sofort nach der Beendigung des Düsenvorganges mit einem Holzpfropfen o. ä. verschlossen. Zudem trägt die Sicherung nicht sofort. Erst wenn der Erhärtungsvorgang abgeschlossen ist, erreichen die Säulen und damit der Schirm die volle Tragfähigkeit. Allerdings nimmt die Tragfähigkeit

langsam zu, so dass die Schirme bereits kurz nach der Herstellung einen gewissen Grad ihrer Tragfähigkeit besitzen. Die fertigen Säulen haben eine stützende Funktion, erzeugen jedoch keine Dichtwirkung. Kleinere Einschnürungen der Säulen sind daher ohne Einfluss auf die Funktionalität der Schirmes. Sie wirken sich nur auf die Dichtwirkung, nicht auf die Tragwirkung einer Düsenstrahlkubatur aus.

Weiterhin ist zu beachten, dass nach der Herstellung eines Düsenstrahlelementes sich bis zum Erhärten der Suspension kurzzeitig eine Zone mit verminderten Festigkeitseigenschaften bildet. Dieser Umstand kann bei entsprechenden Spannungsverhältnissen im Boden zu Bodenbewegungen führen. Daher ist es oft vorteilhafter, die benachbarten Säulen nicht unmittelbar hintereinander zu erstellen. Durch die Herstellung im Pilgerschrittverfahren wird die aufgeweichte Bodenzone so klein wie möglich gehalten. Zugleich wird dadurch verhindert, dass der Düsenstrahl zusätzliches Bodenmaterial in einen noch weichen benachbarten Säulenbereich einträgt und damit die Endfestigkeit der bereits behandelten Zone herabsetzt.

Die horizontalen Düsenstrahlschirme finden vorzugsweise dort Anwendung, wo eine Bodenverbesserungsmaßnahme ausgehend von der Geländeoberfläche nicht möglich ist und wo Untergrundverhältnisse anstehen, die andere Sicherungsverfahren nicht ausreichend oder nur bedingt zweckmäßig erscheinen lassen. Die Gründe hierfür können u.a. sein:

- geringe Firstüberdeckung im Vergleich zum Durchmesser des Vortriebes;
- sensible Überbauungen oder Geländeoberflächen;
- Anpassungsfähigkeit der Schirmflächen an die Standfestigkeit des Untergrundes und das Tunnelbaukonzept (z. B. Variation der Säulenanzahl und Säulenlänge);
- rolliger, kohäsionsloser Baugrund (z. B. offene Strukturen im Kies);
- strukturgefährdete Böden (z. B. Löß);
- Anschüttungen unterschiedlich fester Komponenten (z. B. Deponien);

- Schaffung von Verfestigungen und / oder Abdichtungen mit geometrisch definierbar begrenzten Abmessungen und Eigenschaften (z. B. im Nachbarbereich von Fremdrechten);
- Beanspruchbarkeit der Düsenstrahlkörper bereits wenige Stunden nach ihrer Fertigstellung (z. B. nach 5 Stunden);

Düsenstrahlschirme stellen also eine vorausseilende Sicherungsmaßnahme mit bestimmten bekannten Mindesteigenschaften dar, die den eigentlichen Tunnelvortrieb im Sinne der NÖT nicht aufhalten.

2.2.2 Gebirgsmechanische Wirkung von Düsenstrahlschirmen

Ein horizontaler Düsenstrahlschirm bildet durch die kegelartige Anordnung der einzelnen Säulen und ihrem tangential durchgehenden Kontakt über den Tunnelquerschnitt ein verwindungssteifes Stützgewölbe. Dieses wird beim anschließenden abschnittswisen Öffnen der Ortsbrust dreidimensional belastet (vgl. Abb. 2-5).

Die Düsenstrahlschirme binden direkt an der Ortsbrust in den Baugrund ein. Der gegenüber dem Ausgangszustand (z. B. Erdruhedruck) veränderte Beanspruchungszustand des Lockergesteins wird vom Düsenstrahlschirm infolge seiner hohen Steifigkeit der eigentlichen Ortsbrustöffnung vorausseilend verformungsarm mitgetragen. Ähnlich, aber wesentlich besser als bei Vorpfändblechen, werden die nachdrängenden Lasten aus dem angrenzenden Boden vor der Ortsbrust abgetragen. Die jedem Vortrieb vorausseilenden Verformungen bleiben gegenüber dem herkömmlichen Vortrieb bedeutend geringer. Außerdem drängt die Ortsbrust wesentlich geringer in den Querschnitt. Die inneren Bewegungen der Ortsbrust bleiben damit kleiner. Durch die steife Bettung des Düsenstrahlschirmes steigt die Standsicherheit. Diese Bettungswirkung ist ein wesentlicher Bestandteil der Vortriebssicherung in gebirgsmechanischer Hinsicht. Bei dieser Wirkung spielt eine fallweise, produktionsbedingte Abweichung der Düsenstrahlsäulen von der Stützlinie des Schirmes eine untergeordnete Rolle und ist somit in dieser Hinsicht zu verkraften.

Die betragsmäßig größte Verformung im Tunnelquerschnitt setzt zu Beginn der Baumaßnahme unmittelbar hinter der Ortsbrust ein. An dieser Stelle wird das

innere Auflager des Schirmes geschwächt. Der Schirm entspannt sich in den offenen Querschnitt. Die Verformungen werden meist dadurch erhöht, dass dem Schirm das Auflager an der Strossenwandung im Zuge des Vortriebes genommen wird. Den an der Schirmleibung in der Ulme wirkenden vertikalen Schubkräften wird nicht Rechnung getragen, es sei denn, der Schirm wird tiefergezogen. Die geöffnete Ortsbrust und der Abschlag werden mit Gitterbögen, Bewehrung und vor allem mit Spritzbeton verschlossen. Erst mit dem Erreichen des Ringschlusses in der Sohle wird im Querschnitt eine wesentliche Verformungsstabilisierung erreicht. Mit dem Ringschluss findet der Düsenstrahlschirm sein endgültiges Auflager. Weitere Kräfteumlagerungen finden bei der Herstellung der Folgeschirme und deren Tunnelausbruch statt. Nach einer Länge von etwa 3 Schirmen (nach ca. dem dreifachen Tunneldurchmesser) finden keine weiteren räumlichen Kraftumlagerungen statt. Ein endgültiges Ende der Kraftumlagerungen ist erreicht, wenn kein nennenswerter Verformungszuwachs mehr messbar ist.

2.2.3 Tunnelbautechnische Konsequenzen

Die Düsenstrahlschirme hinterlassen sägezahnförmige Tunnelräume, die für die Herstellungsqualität der Tunnelinnenschalen ein Problem darstellen. Plötzliche Wandstärkenänderungen der Innenschalen führen trotz sorgfältig abgestimmtem Bewehrungsanteil zu Zwängungsspannungen und Schwindrissen in der Betonauskleidung. Die Sägezähne sind daher nach [19] soweit mit Spritzbeton zu füllen, dass die Wandstärkenänderungen nur im Verhältnis von 1:10 oder kleiner erfolgen. Die dazu notwendigen, z. T. nicht unerheblichen, zusätzlichen Spritzbetonmengen sind bereits bei der Planung einzukalkulieren, werden jedoch in der Praxis häufig vergessen.

Der wechselseitige Herstellungsvorgang von Düsenstrahlschirm und Tunnelvortrieb verlangt einen auf Stunden genau durchdachten Taktvorgang mit eingebauten Pufferzeiten. Bei knapper Bauzeit, hohen Personalkosten und teuren Gerätemieten werden Ersatzteile auch bei den Gerätelieferanten heute nur noch bedingt vorgehalten, so dass nicht kalkulierte Stillstände auftreten können, wenn wesentliche Gerätereparaturen überraschend notwendig werden.

Sollen beim U-Bahn-Bau die Düsenstrahlschirme für große Stationsröhren vom Streckentunnel aus hergestellt werden, sind trompetenartige Aufweitungen notwendig. Diese Aufweitungen sind erforderlich, damit mit den langen Düsge­stängen (ca. 15 bis 20 m) gearbeitet werden kann. Bei Streckenführungen im Bogen kann das erhebliche Probleme mit sich bringen, die nur durch das In­kaufnehmen von Überprofilen gelöst werden können. Die Verfüllung der später nicht mehr benötigten Hohlräume kann gegebenenfalls durch den Einbau von Blindröhren in den Trompeten erfolgen, die von der zurücklaufenden Über­schusssuspension gefüllt werden.

2.2.4 Vorteile der Düsenstrahlschirme im Tunnelbau

Bei der Anwendung des Düsenstrahlverfahrens zum Auffahren von Tunneln im Lockergestein lassen sich verschiedenartigste Vorteile erkennen. Auch wenn die nachfolgend aufgeführten Vorteile nach Meinung vieler Experten über­wiegen, sollten die Nachteile nicht außer Acht gelassen werden. So darf z. B. das Problem der anfallenden Rücklaufsuspension und ihrer Behandlung bzw. Entsorgung nicht vernachlässigt werden.

Mit dem Düsenstrahlverfahren sind, wenn auch mit unterschiedlichen Auswir­kungen, nahezu alle Lockergesteine durchfahrbar. In bindigen oder feinen Bö­den erfolgt dabei ein Materialaustausch. In grobporigem Böden mit Hohlräumen hingegen wirkt die Düsenstrahlsuspension als Füller. Selbst Findlinge und Fels­blöcke stellen bei entsprechender Bohrtechnik keine nennenswerten Hindernis­se dar. Sie werden in die zu erstellende Kubatur eingebunden und das Düsen in diesem Bereich ausgesetzt.

Im Vergleich zu anderen Sicherungsmethoden bietet das Düsenstrahlverfahren u. a. den Vorteil, dass es sehr flexibel ist und von Etappe zu Etappe an die vor­liegenden Bedingungen angepasst werden kann. Die Düsenstrahlkubatur ist zudem nicht an ein Kreisprofil gebunden und als Gewölbe vorgängig. Ein fort­laufender Aufschluss der kommenden Tunnelmeter ist möglich. Die Installatio­nen an der Ortsbrust sind immer frei beweglich, was einer rasche Anpassung an wechselnde Bodenverhältnisse dienlich ist.

Der Wirkungskreis des Düsenstrahlverfahrens ist kontrollierbar. Hebungen und Setzungen halten sich bei entsprechender Parameterwahl in Grenzen. Die erhärteten Säulen bilden eine dauerhafte Verfestigung in unmittelbarer Nähe des Tunnelgewölbes. Gleichzeitig sind die Säulen ein guter Haftgrund für später aufzubringende Spritzbetongewölbe. Die Säulen wirken zudem abdichtend gegen Gebirgswasser und Schichtenwasser.

Bei örtlichen Störungen sind zusätzliche Unterfangungen oder Widerlager für das Gewölbe bzw. die Ortsbrust möglich. Der Baufortschritt und die Kosten sind mit anderen Bauhilfsmaßnahmen vergleichbar.

2.3 Horizontale Dichtungsblöcke im Grundwasser

Liegt der aufzufahrende Tunnel im Grundwasser ist die Herstellung eines Dichtungsblockes aus horizontalen Düsenstrahlsäulen ausgehend von der Ortsbrust nicht möglich. Die Sicherung des Tunnels muss hier mittels von der Geländeoberkante oder aus Schächten hergestellten Säulen erfolgen. Der Bohransatzpunkt sollte dabei im Regelfall oberhalb des Grundwasserspiegels liegen (Abb. 2-6). Ist das nicht der Fall und der Bohransatzpunkt befindet sich unterhalb des Grundwasserspiegels, darf die Rücklauf suspension nicht am Bohrloch austreten. Es kommt sonst zu einem unkontrollierten Austritt eines Gemisches aus Rücklauf suspension, Grundwasser und anstehendem Boden am Bohrloch. Dies führt zu einem Verbruch an der Bohrstelle, welcher u. a. Sackungen und Schäden an bestehenden Bebauungen verursachen kann.

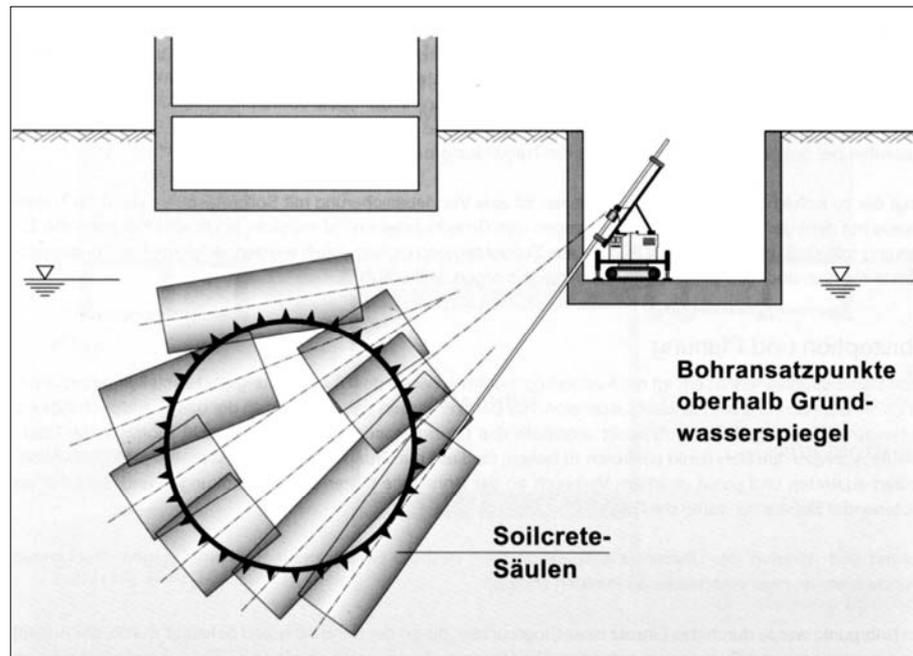


Abb. 2-6 Vortriebsicherung ausgehend von einem Schacht oberhalb des Grundwasserspiegels [31]

Das Bohren und Düsen muss beim Düsenstrahlverfahren im Grundwasser in einem Zug erfolgen. Ein Brechen des Gestänges würde infolge des anstehenden Wasserdrucks ein Auslaufen von Suspension und Grundwasser und somit Fehlstellen in den Säulen verursachen. Die dazu erforderlichen Gestänge weisen jedoch einen erhöhten Platzbedarf auf, was bei der Planung der Baustelle zu beachten ist.

Eine Möglichkeit doch unterhalb des Grundwasserspiegels zu bohren ergibt sich durch folgende Variante. Das Bohren und das Ableiten der Überschuss-suspension erfolgt bei der Anwendung des horizontalen Düsenstrahlverfahrens gegen drückendes Grundwasser an zwei verschiedenen Punkten. Am Bohrpunkt wird der Austritt von Grundwasser und Suspension durch den Einsatz einer Stopfbuchse verhindert. Die Rücklauf-suspension wird über eine separate Bohrung auf die Geländeoberfläche geführt. Diese Bohrung sollte vor Düsbeginn auf die Höhe der auszuführenden Säule abgeteuft werden. Sie sorgt zudem für eine Druckentlastung und gewährleistet in der Säule einen gleichmäßigen Säulendruck während der Herstellung und des Abbindens der Säule. Dieses Verfahren kam weltweit erstmals beim Bau der Münchener U-Bahn-Linie

U2-Ost am Bahnhof „Josephsburg“ zum Einsatz und wird an diesem Beispiel im Abschnitt 3.4 näher erläutert.

2.4 Anfahrbereich für den Schildvortrieb

Eine weitere Hauptanwendung des Düsenstrahlverfahrens im Tunnelbau stellen vertikale Dichtblöcke für Ein- und Ausfahrten beim Schildvortrieb dar. Sie stützen die Ortsbrust und die ersten Tunnelmeter (5,0 bis 10,0 m je nach Tiefe) und werden, wie die Bezeichnung schon sagt, mit dem Schild durchfahren. Soll der Vortrieb in einer bestimmten Tiefe unter GOK beginnen, wird zunächst ein Startschacht hergestellt. Dieser wird durch übliche Baugrubensicherungsmaßnahmen begrenzt, die ein Durchfahren mit dem Schild ermöglichen. Dazu zählen z. B. unbewehrte Bohrpfehlwände oder Schlitzwände. Notwendig werden solche Anfahrbereiche z. B. beim Auftreten von weichem Boden und einer instabilen Ortsbrust oder bei Grundwasseranfall. Sie sollen einen Verbruch an der Ortsbrust oder das Eindringen von Grundwasser verhindern und somit den Schildvortrieb im An- und Ausfahrbereich sichern. Ist der kritische Bereich durchfahren, erfolgt die Sicherung des Tunnelquerschnittes durch die Schildmaschine selbst.

Im Prinzip sind die in Abb. 2-7 beispielhaft dargestellten Anfahrbereiche für den Schildvortrieb übliche Düsenstrahldichtwände. Sie werden allseitig überschritten hergestellt und erzeugen somit die gewünschte Dichtwirkung. Damit sie jedoch mit dem Schild durchfahren werden können, darf ihre Festigkeit nicht zu hoch sein und sollte etwa einem B5 entsprechen. Die Herstellung der Düsenstrahlsäulen erfolgt hier von der Geländeoberfläche aus nach dem bereits in Abschnitt 1.2 genannten Verfahrensablauf. Zu beachten ist üblicherweise, dass das Bohrraster genau eingehalten wird, um den geplanten Überschchnitt zu gewährleisten und die Funktionalität des Dichtblockes zu garantieren.

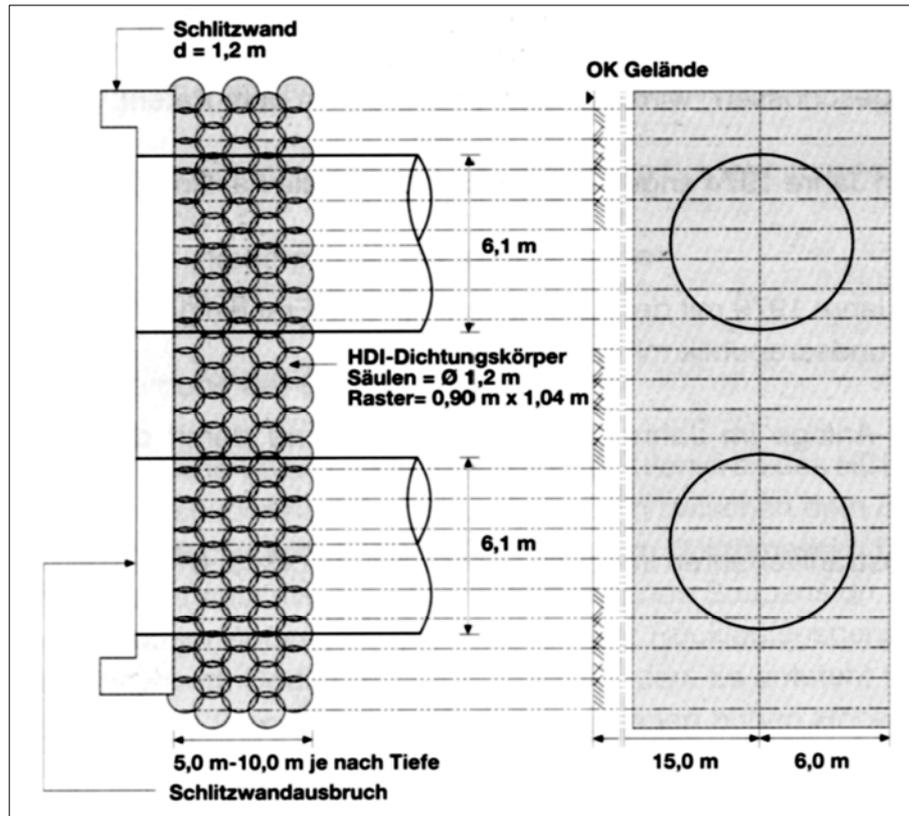


Abb. 2-7 Dichtungsblock für einen Schildvortrieb (Grundriss, Ansicht) [13]

3 Ausgeführte Tunnelbaumaßnahmen

3.1 Überblick Tunnelbauprojekte

In den letzten 20 Jahren wurden zahlreiche Tunnelbauprojekte unter Zuhilfenahme des Düsenstrahlverfahrens ausgeführt. Da nicht alle Projekte im Rahmen dieser Diplomarbeit näher betrachtet werden können, soll in diesem Kapitel zumindest auf einige, ausführungstechnisch oder anderweitig interessante Projekte beispielhaft eingegangen werden.

Zuvor folgt ein repräsentativer Auszug in Form einer Übersicht über ausgeführte Projekte unter Anwendung des Düsenstrahlverfahrens, die jedoch keinen Anspruch auf Vollständigkeit erhebt. (Die kursiv hervorgehobenen Projekte werden im Anschluss näher betrachtet.)

	Tunnelbaumaßnahme	Ausgeführte Düsenstrahlanwendung
Italien	Bahntunnel Campiolo-Traviso	Sicherungsschirm
Österreich	<i>Oswaldiberg-Tunnel</i>	<i>Sicherungsschirm im Hangschutt</i>
	U-Bahnlinie 3 Wien, Baulos U3/20 „Zippererstraße“	Sicherungsschirm zur Herstellung großer Profile mit geringer Überdeckung (Bebauung) in Zusammenhang mit der größten beim Wiener U-Bahn-Bau durchgeführten Grundwasserabsenkung
	U-Bahnlinie 3 Wien, Baulos U3/21 „Enkeplatz“	Seitliche Dichtwände zur Auflagerung eines Rohrinjektionsschirmstützgewölbes
	<i>Zammer Tunnel</i>	<i>Sicherungsschirm und Fußpfähle im überbauten Lockergestein mit geringer Überdeckung zur Setzungsminimierung</i>
Deutschland	Stadtbahn Rhein-Sieg, Los T 42 Bad Godesberg	Sicherungsschirm im überbauten Bereich mit geringer Überdeckung bei gleichzeitiger Unterfahrung der bestehenden Stadtbahnstrecke; zusätzlich Grundwasserabsenkung
	<i>U-Bahn U2 München U-Bahnhof „Am Moosfeld“</i>	<i>Dichttröge aus Düsenstrahllamellen und Dichtpfählen zur Grundwasserabsenkung innerhalb der fertigen Tröge</i>
	<i>U-Bahn U2 München U-Bahnhof „Josephsburg“</i>	<i>Horizontaler Dichtschirm gegen enormen Wasserdruck unter bestehenden Gebäuden für einen anschließenden Schildvortrieb</i>
	<i>Tunnel „Frankfurter Kreuz“</i>	<i>Sicherungsschirm in der Kalotte, Dichtwanne in Strosse und Sohle</i>
Schweiz	Zugwaldtunnel	Sicherungsschirm als vorausseilende Sicherung für die Anwendung der NÖT im Lockergestein; Heterogenität des Lockermaterials, Wasserzutritte von bis zu 15 l/s, hohe Überlagerung von max. 120 m
	S-Bahn Zürich „Zürichbergtunnel“	Sicherungsschirm

Tab. 3-1 Überblick über ausgeführte Tunnelbauprojekte mit Vortrieben unter Anwendung des Düsenstrahlverfahrens

3.2 Oswaldiberg-Tunnel, Österreich [5]

Der Oswaldiberg-Tunnel wurde im Zuge des Ausbaues der Tauernautobahn für die Nordumfahrung Villach gebaut und Ende 1988 in Betrieb genommen. Die Hauptleistung bei diesem Tunnelvortrieb bestand in der Herstellung von zwei parallelen Tunnelröhren mit einem Ausbruchquerschnitt von je ca. 80 m² und einer Gesamtlänge von je ca. 4 300 m. Die Düsenstrahlarbeiten wurden in den Jahren 1985 und 1986 von der Fa. RODIO (RODINJET-Verfahren) durchgeführt.

Die geologische Situation im Bereich des geplanten Tunnels wies nicht die besten Voraussetzungen für einen bergmännisch aufzufahrenden Tunnel auf. Ein Vortrieb nach den üblichen Regeln der NÖT kam daher nicht in Frage. Die sich auf beiden Seiten in den Tunneleingangsbereichen befindenden Lockergesteinsstrecken unterschieden sich in ihrer Zusammensetzung wesentlich voneinander. Die Zwischenstrecke bestand aus Schiefergneis und Kalkmarmor und konnte mit einem konventionellen Sprengvortrieb aufgefahren werden. Am Ostportal standen auf ca. 100 m sehr gleichförmige Sandablagerungen mit Schluffanteilen („Mehlsande“) und geringen Kiesgehalten an. Dieser aus Seeablagerungen resultierende Baugrund war geologisch nicht verdichtet, was eine flächenhaft durchgehende Voraussicherung und einen raschem Sohlschluss notwendig machte.

Am Westportal hingegen standen auf ca. 350 m Länge fluviatile Sand-, Kies- und Schotterablagerungen des Drautales an. Der Boden bildete große Terrassenflächen. Der Steinanteil des Sandkiesgemisches stieg in Richtung der Felsoberfläche leicht an. Da dem Kiesgemisch die Ton- und Schlufffraktion fast vollkommen fehlte, war das anstehende Lockermaterial nur sehr schwach bindig. Das Material galt als geologisch nicht vorbelastet und konnte daher als Betonzuschlagsstoff für Spritz- und Ortbeton verwendet werden.

Die direkten Portalbereiche (Ostseite 15 m, Westseite 40 m) wurden mit einer halboffenen Bauweise, der sog. „Kärntener Deckelbauweise“ (Abb. 3-1), auf die hier nicht weiter eingegangen werden soll, hergestellt. Der sich anschließende bergmännische Vortrieb begann zunächst mit Injektionslanzen als vorauseilende Sicherung und einem Vortrieb in Teilausbrüchen. Da mit dieser Methode jedoch nur geringe Vortriebsleistungen erzielt wurden, entschied sich die ARGE

Oswaldiberg-Tunnel in Zusammenarbeit mit der Fa. INSOND, dem Auftraggeber das RODINJET-Verfahren als vorauseilende Sicherung vorzuschlagen.

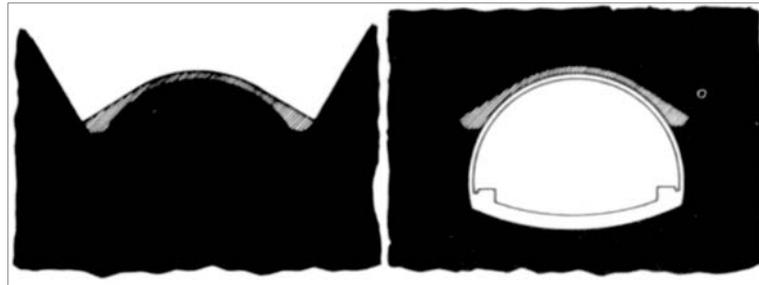


Abb. 3-1 „Kärntener Deckelbauweise [5]

In Vortriebsrichtung wurden nun Schirme aus aneinandergereihten 10 bis 13 m langen Düsenstrahlsäulen mit einer Überlappung von 1 bis 4 m hergestellt, deren Neigung 7 % zur Tunnelachse betrug. Aus den örtlichen Bedingungen ergab sich für den Regelabschnitt Ost ein Schirm aus 36 Pfählen (Abb. 3-2). Das am Westportal anstehende Schottermaterial ermöglichte es, die Säulenanzahl auf rd. 20 pro Schirm zu verringern.

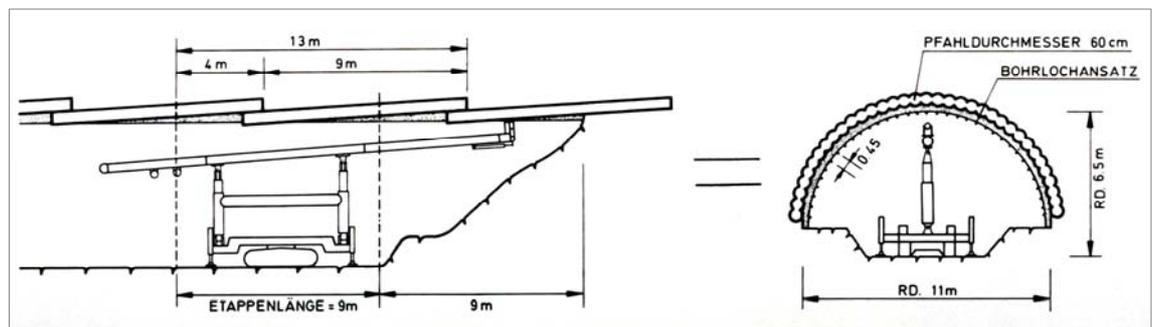


Abb. 3-2 Regelabschnitt Ost (Längs- und Querschnitt) [5]

Je nach Bodenverhältnissen wurden Rotationsbohrungen oder Rotations-schlagbohrungen mit Wasser- bzw. Bentonitpülung durchgeführt. Die dabei aufgetretenen Bohrabweichungen lagen unter 1 %. Vereinzelt aufgetretene Blöcke wurden mit Hartmetallkronen durchbohrt und der Düsvorgang in diesen Bereichen ausgesetzt. Die 19 m lange Lafette mit Monobloc-Gestänge auf dem Bohr- und Jetgerät RODIO SR-500 ermöglichte die Bohrung und den Düsvorgang in einem Zug.

In den Zonen mit hohem Feinsandanteil kam das 2-Phasen-Verfahren zum Einsatz. Mit einem Wasserstrahl (500 bar) wurde der Boden aufgeschnitten und ausgespült, anschließend der Pfahlbereich mit Zementsuspension (150 bar) verfüllt. Auf diese Weise wurden ausreichende Durchmesser und Druckfestigkeiten erzielt. Die Bohrlöcher wurden sofort nach dem Düsvorgang mit einem Holzstöpsel abgedichtet um ein Auslaufen der Suspension aus dem Firstbereich zu vermeiden.

In den Sandablagerungen konnten klar abgegrenzte kreisförmige Pfahlquerschnitte mit einem Durchmesser von 60 bis 70 cm hergestellt werden. Im Schottermaterial traten die Suspensionen jedoch z. T. über die vom Düsenstrahl direkt durchmischte Zone hinaus und bildeten fladenförmige Säulenquerschnitte.

Der sich im Schutze des Düsenstrahlgewölbes anschließende Vortrieb nach NÖT erfolgte mit den üblichen Stützmaßnahmen (Spritzbeton, Baustahlgitter, Ausbaubögen) und einem Lockermaterialabbau mit Baggern. Die im Überlappungsbereich der Schirme teilweise ins Profil hineinragenden Pfähle wurden mit einer Teilschnittmaschine abgefräst und an das Profil angepasst (Abb. 3-3).



Abb. 3-3 Abfräsen mittels Teilschnittmaschine [5]

Vorteilhaft für den Arbeitsablauf und die Vortriebsleistung wirkte sich hier aus, dass in beiden Tunnelröhren gleichzeitig gearbeitet wurde. Während in der einen Röhre das Düsen erfolgte, wurde in der anderen Röhre vorgetrieben. Ein kontinuierlicher Betrieb wurde durch die Abstimmung der Leistungen der Injektions- und der Vortriebsmannschaft erreicht. Die Zykluszeiten betragen 2 bis 4 Tage.

Die beim Bau des Oswaldiberg-Tunnels gesammelten Erfahrungen waren rundum positiv und verhalfen bei späteren Anwendungen zu schnellen Erfolgen. Das Düsenstrahlverfahren hat sich bei diesem Vortrieb sowohl im Feinsand als auch im Schotter ohne größere Probleme bestens bewährt.

3.3 Zammer Tunnel, Österreich [33], [43]

Im Rahmen des zweigleisigen Ausbaues des 3,6 km langen Streckenabschnittes Ötztal – Landeck der Österreichischen Bundesbahnen (ÖBB) war die Hauptaufgabe in der Erstellung des 2 335 m langen zweigleisigen Zammer Tunnels zu sehen. Der Spatenstich erfolgte im Mai 1994. Mit dem bergmännischen Vortrieb konnte im September 1994 begonnen werden. Die Düsenstrahlmaßnahmen wurden in den Monaten Oktober 1994 bis Februar 1995 von der Fa. KELLER GRUNDBAU, Innsbruck in ARGE mit der Fa. DYWIDAG SPEZIAL-TIEFBAU ausgeführt.

Vom Ostportal ausgehend wurde der Tunnel in NÖT aufgefahren. Der hier anstehende Quarzphyllit ermöglichte einen konventionellen Sprengvortrieb ohne nennenswerte Probleme.

Der Gegenvortrieb West (Gesamtlänge ca. 280 m) hingegen musste bis zum Erreichen der Felslinie im Hangschutt erfolgen. Ein Sprengvortrieb wie am Ostportal kam daher nicht in Frage. Der Hangschutt bestand aus locker bis mitteldicht gelagertem, braunem bis graubraunem Quarzphyllitschutt, der sich überwiegend aus murschuttähnlichen, glimmerreichen, z. T. stark schluffigen Mittel- bis Feinkiesen zusammensetzte. Obwohl er wenig durchnässt war, waren Oberflächensetzungen und Schiefstellungen an den Gebäuden durch den Tunnelvortrieb zu erwarten. An der Geländeoberfläche wurden daher vor Beginn der Vortriebsarbeiten Messpunkte zur begleitenden Setzungskontrolle gesetzt.

In einem Teilstück des Vortriebes musste auf einer Strecke von ca. 100 m bebautes Gebiet mit einer Mindestüberdeckung von ca. 12 m unterfahren werden (vgl. Abb. 3-4). Die Gebäudefundamente hatten dabei einen minimalen Abstand von 17 m zum Ausbruchsrund. Diese Randbedingungen erforderten die Anwendung einer Düsenstrahlschirmsicherung als vorausseilende und gebirgsverbessernde Maßnahme in diesem Bereich. Die Hauptaufgabe dieser Schirme lag

darin, die Setzungen an den Wohnhäusern und die Setzungsmulden an der Geländeoberfläche möglichst klein zu halten. Zusätzlich wurden zur Ergänzung und Verstärkung des Kalottenfußes Düsenstrahlfußpfähle eingesetzt.

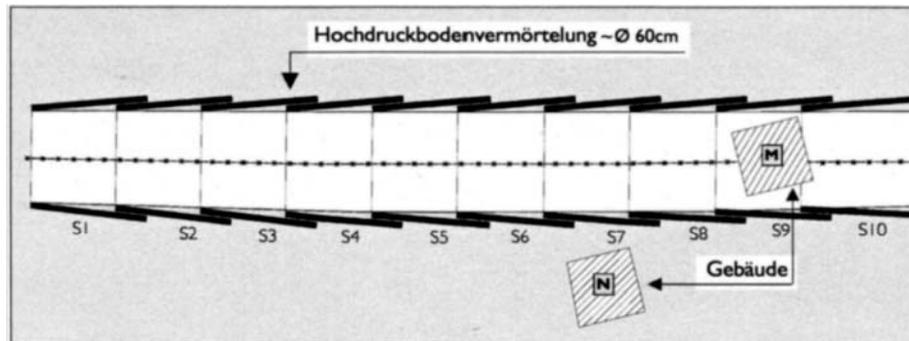


Abb. 3-4 Düsenstrahlschirme und Lage der Bebauung (schematisch) [43]

Der Vortrieb West wurde im unbebauten Bereich zunächst mit konventionellen Ausbaumethoden begonnen. Bereits auf den ersten Vortriebsmetern traten große Verformungen auf. Daher musste früher als ursprünglich geplant mit der Herstellung der Düsenstrahlschirme begonnen werden (Station 56,4). Nachdem die ersten Schirme fertiggestellt waren, nahmen diese Setzungen erheblich ab.

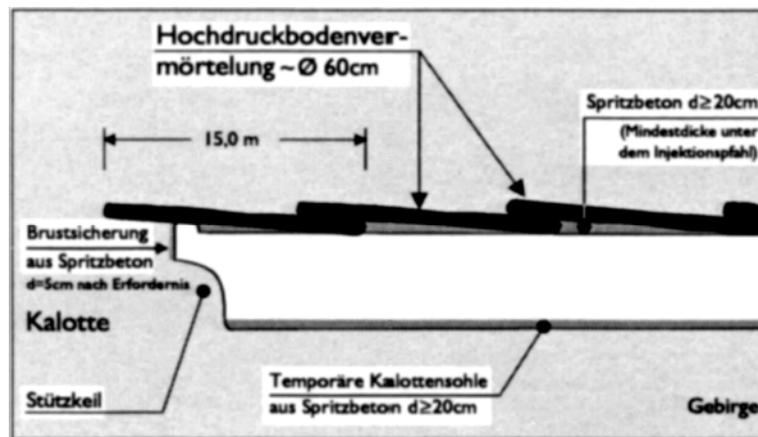


Abb. 3-5 Längsschnitt Regelabschnitt West (schematisch) [43]

Insgesamt wurden 178 m des Tunnels durch Düsenstrahlmaßnahmen gesichert. Das Düsenstrahlgewölbe an sich bestand aus 7 900 m ineinander übergehenden, unbewehrten Säulen aus Zementstein. Die 1 600 m Fußpfähle haben genau wie die Gewölbesäulen einen Durchmesser von 60 cm. Insgesamt kamen 16 Düsenstrahlschirme mit jeweils 35 überschrittenen Säulen zur Ausführung. Die jeweilige Schirmlänge betrug, gemessen von der Ortsbrust, 15 m

bei einer Überlappung von 2 m und einer Leerstrecke von 2 m (Abb. 3-5). Nach jedem Vortriebsabschnitt reichte der Schirm demnach 4 m über die mit Spritzbeton gesicherte Ortsbrust hinaus.

Zur Festlegung der Düsenstrahlparameter legten die ausführenden Firmen im Strossenbereich ein Probefeld an. Dort wurden 4 Probesäulen mit je 5 m Bohrlänge, 3 m Düsstrecke und unterschiedlichen Herstellungsparametern wie Druck, Ziehgeschwindigkeit und w/z-Wert erstellt. Nach ihrer Erhärtung wurden die Säulen ausgegraben, eine Erfolgsfeststellung durchgeführt, die endgültigen Ausführungsparameter festgelegt und dann mit den eigentlichen Düsenstrahlarbeiten begonnen.

Die Bohrungen für die Schirmsicherung erfolgten unverrohrt mit Zementspülung und einem Bohrabstand von 48 cm. Die Richtungsgenauigkeit der Bohrungen garantierten Tunnellaser und Referenzpunkte. Das Rückflusmaterial wurde vor Ort gefasst und über eine Schlauchleitung in Absetzbecken am Tunnelportal gepumpt.

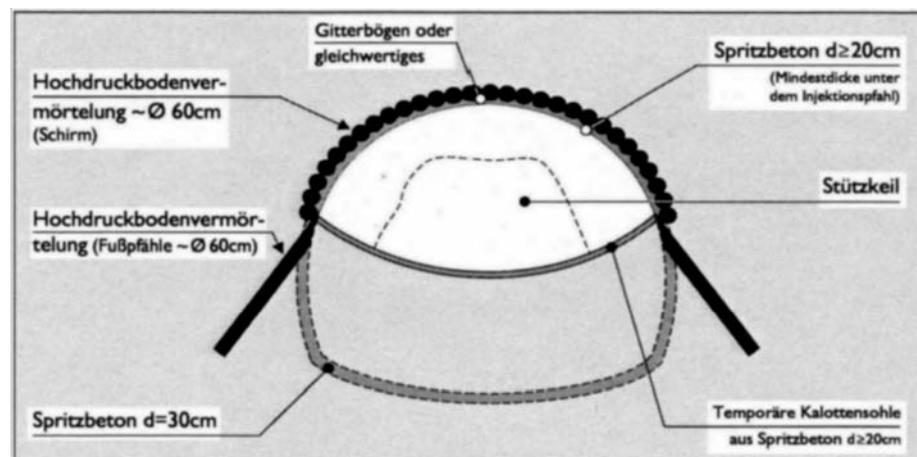


Abb. 3-6 Querschnitt Regelabschnitt West (schematisch) [43]

Die Fußpfahlherstellung erfolgte vor der Schirmherstellung. Im Bereich des berg- und talseitigen Kalottenfußes wurden in einem Abstand von 1,50 m die Düsenstrahlfußpfähle bis in eine Tiefe von 10 m abgeteuft. Diese reichten somit bis unter die zu errichtende Tunnelsohle (vgl. Abb. 3-6). Die Aufgabe der Fußpfähle bestand in der Bodenverbesserung im Kalottenfußbereich und der Ableitung des Gebirgsgewichtes aus dem Schirm in die Tiefe. Sie sorgten somit für

eine Entlastung der temporären Kalottensohle und beugten Spannungsumlagerungen beim Strossenvortrieb vor.

Die Düsenstrahlarbeiten konnten, nachdem bei den bergseitigen Bohrungen bereits Fels angetroffen wurde, im Februar 1995 nach der Fertigstellung von Schirm 16 beendet werden. Die resultierenden Setzungen konnten im Bereich weniger Zentimeter gehalten werden, so dass keine Schäden an der Bebauung auftraten.

3.4 U-Bahnhof „Am Moosfeld“, München [14]

Der U-Bahnhof „Am Moosfeld“ ist Bestandteil der sich seit 1994 in Bau befindlichen U-Bahn-Linie U2-Ost München. Dieser Bahnhof sollte in Deckelbauweise erstellt werden und liegt etwas höher als der eigentlich Streckenverlauf. Um den Anschluss an die Strecke zu schaffen, musste der nördliche Vortrieb mit der Firste aus dem tertiären Mergel in den quartären Kies auftauchen. Auf der Südseite des Bahnhofes bestand keine ausreichende Firstüberdeckung mit Mergel. Der Übergang zwischen Quartär und Tertiär lag in diesem Bereich ca. 15 m unter GOK. Das Grundwasser stand ca. 2 m unter GOK an. Die Grundwasserfließrichtung verlief von Südost nach Nordwest, so dass sich zwischen der U-Bahn-Trasse und der Grundwasserfließrichtung ein Winkel von ca. 45° bildete. Durch das anstehende Grundwasser ergab sich während des Vortriebes zudem eine Druckhöhe von bis zu 13 m. Diese Bedingungen machten Sicherungsmaßnahmen zur Wasserdruckreduzierung auf einer Vortriebslänge von 240 m (Nordseite) bzw. 120 m (Südseite) erforderlich.

Laut Verwaltungsentwurf war für die Lose 2 und 3 zur Beherrschung des quartären Wasserdrucks ein Druckluftvortrieb vorgesehen. Die ausführenden Firmen schlugen jedoch eine Auffahrung unter atmosphärischem Luftdruck vor. Um dies zu realisieren, war die Herstellung von in das Tertiär einbindenden Dichttrögen notwendig, innerhalb derer das Grundwasser dann temporär bis auf einen beherrschbaren Restwasserspiegel abgesenkt werden sollte. Die Wände der Dichttröge wurden aus Düsenstrahllamellen und Dichtpfählen hergestellt.

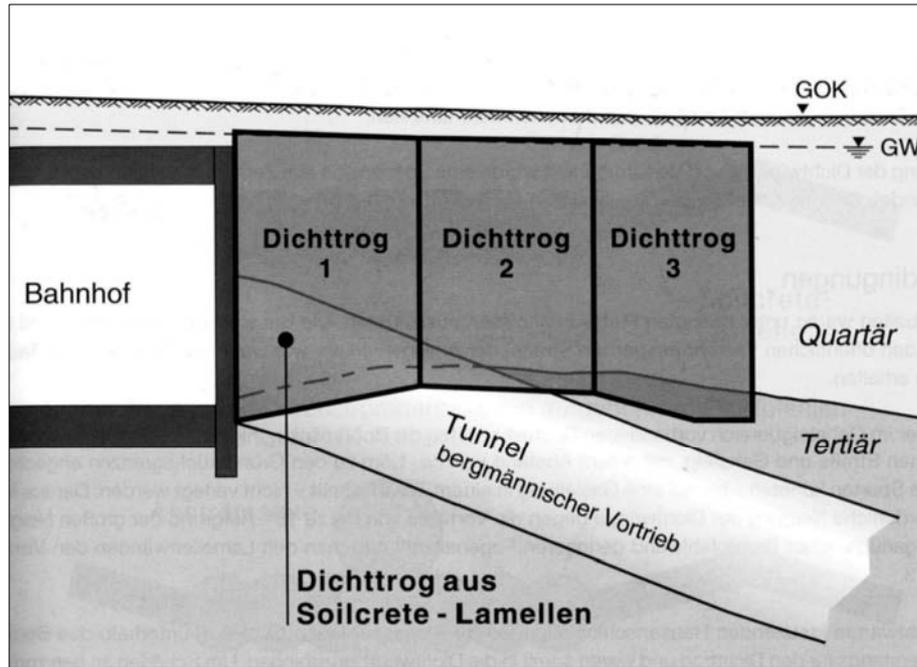


Abb. 3-7 Dichttrog Salzmeserstraße, München (schematisch) [14]

Für die Nordseite wurden daher zunächst 2 je 80 m lange Dichttröge geplant. Da die ausführenden Firmen aufgrund eines Unglücks auf einem anderen Streckenabschnitt sichergehen wollten, wurde ein zusätzlicher, ebenfalls 80 m langer Trog als Sicherheitsmaßnahme hergestellt. Auf der Südseite entstanden insgesamt 3 Tröge, davon einer mit 20 m Länge und zwei mit je 50 m Länge (Abb. 3-7). Alle diese Dichttröge besaßen eine Mindesteinbindung von 1,0 m in das Tertiär. Wobei ein Mindestabstand von 2,0 m zwischen Dichtwand und Ulmenausbruchsrund bestand.

Die einzelnen Dichttröge wurden durch Querschottwände aus Lamellen voneinander getrennt. Dies ermöglichte eine voneinander unabhängige Grundwasserhaltung hinsichtlich Beginn und Dauer, sowie Dichtigkeitsprüfung und Absenkkontrolle und führte gleichzeitig zu einer Verringerung der Gesamtbauzeit.

Die Bohr- und Düsarbeiten erfolgten vom Juni 1995 bis zum Februar 1996. Die Dichttrogarbeiten mussten allerdings in der Zeit von Dezember 1995 bis Januar 1996 für die Herstellung einer Mergeldachverstärkung im Bereich des Tunnelvortriebs unterbrochen werden.

Mittels FEM-Berechnungen konnte eine Abschätzung der zu erwartenden Dichtwandverformungen aus Grundwasserabsenkung und Vortrieb getroffen werden. Daraus ergab sich, dass weder unverträgliche Verformungen noch Spannungsüberschreitungen zu erwarten waren. Bei der Herstellung der Lamellen wurde zur Erhöhung der Dichtwirkung und der Verformbarkeit eine Suspension aus Zement, Kalksteinmehl und Bentonit (hohe Viskosität) verwendet.

Die gesamte Baumaßnahme war unter beengten Platzverhältnissen durchzuführen. Die Baustelleneinrichtung für die Bohrarbeiten wurde auf einer für den öffentlichen Verkehr gesperrten Straße untergebracht. Trotzdem musste der Anliegerverkehr über die gesamte Bauphase gewährleistet werden. Die Bohransatzpunkte lagen im Abstand von ca. 1,5 m zu den Grundstücksgrenzen im Grünstreifenbereich zwischen Straße und Gehweg. Dadurch entstand die Dichtwandneigung von bis zu 18° gegen die Vertikale (Abb. 3-8). Die ca. 1,0 m unter dem Bemessungswasserstand für den Dichttrog liegenden Hausanschlussleitungen wurden nach ihrer Schutzbetonummantelung in die Dichtwände eingebunden.

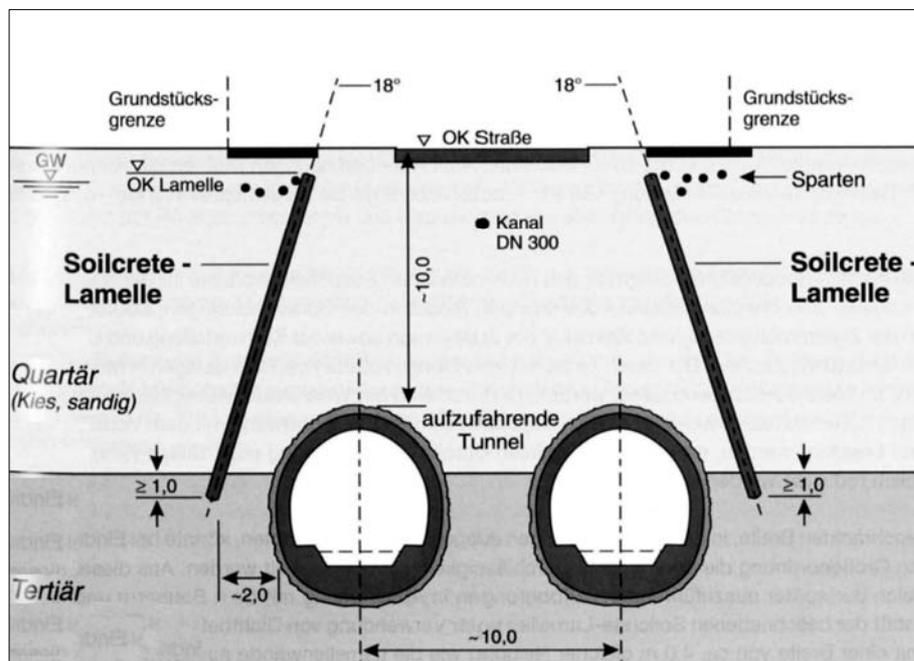


Abb. 3-8 Querschnitt Dichttrog [14]

Die Dichttröge und der Bahnhof bilden eine Gesamtlänge von ca. 700 m. Durch diese großräumige Veränderung der Bodensituation erwarteten die ausführenden

den Firmen eine Veränderung des Grundwasserstromes. Man nahm an, dass sich die Grundwasserstände auf der Anströmseite nach Beendigung der Maßnahmen erhöhen würden. Während des Vortriebs und des Bahnhofsausbaues wurde das Grundwasser zur Vermeidung dieses schädlichen Aufstaus mittels Brunnen übergepumpt. Nach dem Ende der Baumaßnahmen wurden die Dichtwände nun so aufgebohrt, dass ein ungehinderter Grundwasserdurchfluss sichergestellt werden konnte (Abb. 3-9). Die Aufbohrungen erfolgten in der Dichtwandachse mit einer Neigung von 21° (vgl. Abb. 3-10). Im Bereich der späteren Aufbohrungen wurden vorsorglich statt der Düsenstrahllamellen Pfahlgruppen aus Dichtbeton geringer Festigkeit angeordnet.

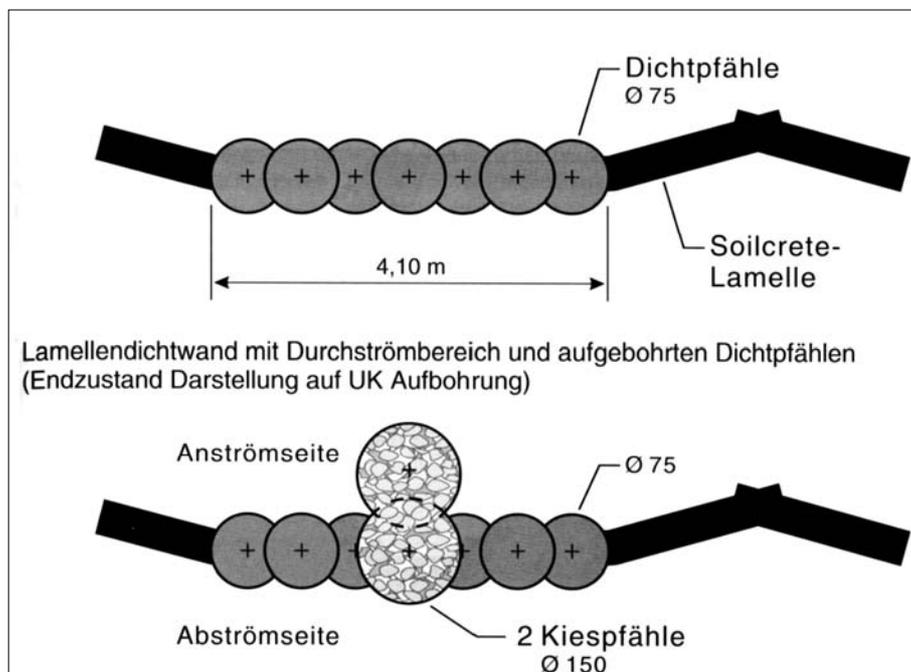


Abb. 3-9 Lamellendichtwand mit Durchströmbereich [14]

Die Bohrlafette der KELLER KB-2 wurde mittels Theodolit ausgerichtet, alle Düsenstrahl- und Pfahlbohrungen zur Lagesicherung mit Inclinometermessungen überprüft. Im Ergebnis der Arbeiten konnte festgestellt werden, dass lediglich für 4 der ca. 380 Lamellen und 5 der 190 Pfähle Zusatzbohrungen mit einer anschließenden Neuvermessung des Bohrloches durchgeführt werden mussten. Zur Qualitätssicherung wurden zudem alle Herstellungsparameter elektronisch aufgezeichnet und direkt im Anschluss ausgewertet.

Die Rücklaufsuspension wurde vor Ort in einer Recyclinganlage wiederaufbereitet und erneut zum Düsen verwendet. Dies führte zur Reduzierung der letztendlich abzufahrenden Überschussmenge und somit der Kosten.

Die erwartete stationäre Grundwasserzuflussmenge lag bei ca. 20 bis 25 l/s je Trog. Dies sollte mit 3 Brunnen mit einer mittleren Förderung von je 8 l/s je Trog bewältigt werden. Im mittleren Trog auf der Nordseite waren jedoch zusätzliche Brunnen notwendig, da sich die Brunnen zur Grundwasserabsenkung auf dem Tertiärhochpunkt befanden. Das tertiäre Grundwasser konnte durch diese Maßnahmen bis auf eine Restwasserstand von ca. 1,0 m über der Tertiäroberfläche abgesenkt werden. Eine genaue Berechnung der anfallenden Restwassermengen ist in [14] zu finden. Die erreichten Systemdichtigkeiten der fertigen Dichttrogwände lagen zwischen $7 \cdot 10^{-7}$ und $1 \cdot 10^{-7}$ m/s.

Insgesamt wurden 7 000 m² Dichtwände auf der Nordseite und 4 000 m² auf der Südseite hergestellt. Nach Abschluss der Vortriebsarbeiten und dem Einbau der Innenschale wurde die Wasserhaltung in den Trögen abgeschaltet. Die Dichtpfähle wurden aufgebohrt und somit außer Funktion genommen. Der heutige Zustand ist in Abb. 3-10 dargestellt.

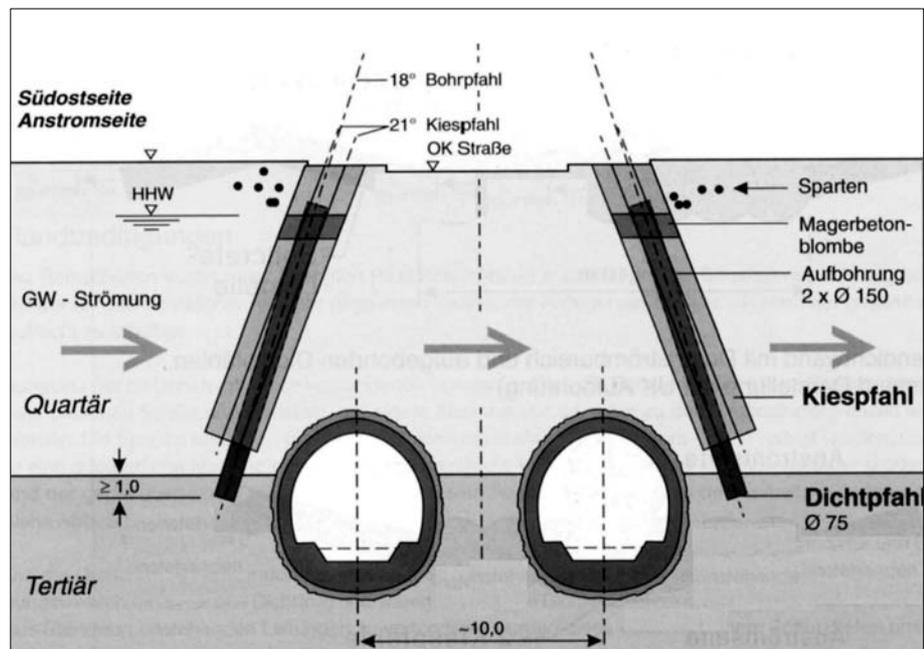


Abb. 3-10 Aufbohren des Dichttroges mit Kiespfählen [14]

3.5 U-Bahnhof „Josephsburg“, München [31]

Der U-Bahnhof „Josephsburg“ ist ebenfalls Bestandteil der U-Bahn-Linie U2-Ost München. Dieser Tunnelvortrieb erfolgte jedoch mittels Druckluftvortrieb überwiegend im Tertiär. An beiden Seiten des Bahnhofs (Ost und West) tauchen die Tunnelröhren allerdings mit der Firste ca. 1,0 m aus dem tertiären Mergel in den quartären Kies auf (Abb. 3-11). Im gesamten Bahnhofsbereich standen bis in Tiefen von 7,5 bis 8,5 m unter GOK quartäre Kiese an. Darunter befand sich Mergel, dann tertiärer Sand und Mergel im Wechsel. Der Mergel fungiert als Stauer für das quartäre Grundwasser. Während der Düsenstrahlarbeiten stand das quartäre Grundwasser bei ca. 2,5 m unter GOK an. Dies erzeugte an der Mergeloberkante eine Wasserdruckhöhe von 5,0 bis 6,0 m. Um mit dem Schild ohne Grundwasserzutritt in den Bahnhof ein- und ausfahren zu können, war daher eine Abdichtung gegenüber dem quartären Grundwasser auf einer Länge von ca. 15 m notwendig.

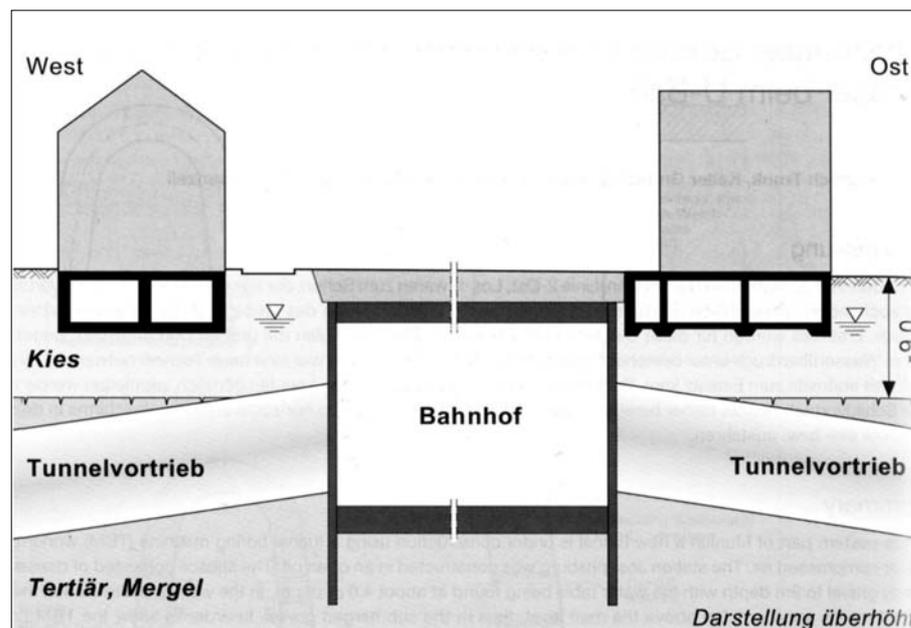
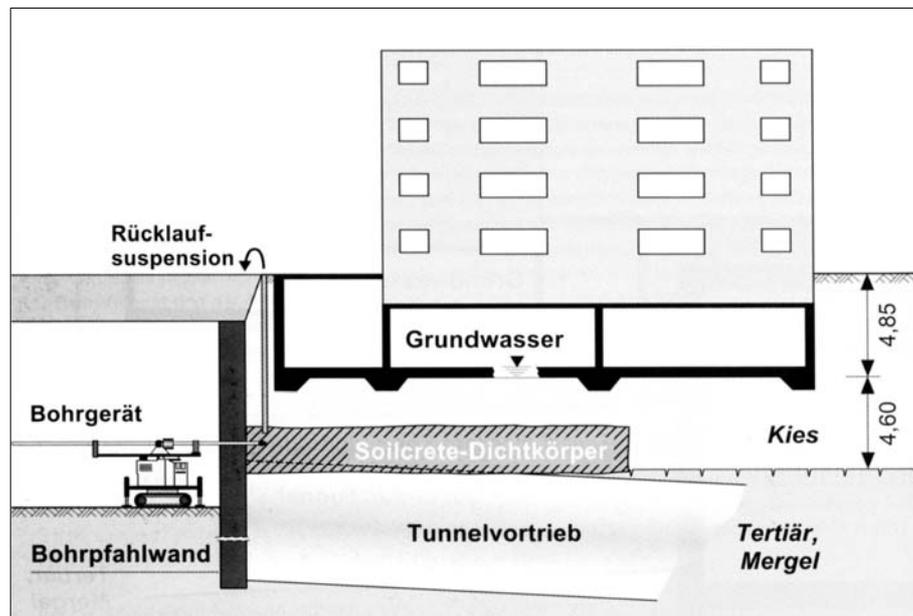


Abb. 3-11 Tunnelvortrieb am Bahnhof [31]

Die bestehende Bebauung musste zur Realisierung der Baumaßnahme durch Dichtschirme gesichert werden. Bei deren Herstellung durften jedoch keine schädlichen Verformungen an der Bebauung auftreten. Zur Verhinderung des seitlichen Grundwassereindringens mussten die Dichtschirme auf ihrer gesam-

ten Länge in den Mergel einbinden. Außerdem war aus den selben Gründen ein dichter Anschluss an die Bohrpfahlwand der Bahnhofsbaugrube erforderlich. An der Ost- und Westseite wurden jeweils 2 Dichtschirme von den Bahnhofsstirnwänden aus gegen den quartären Wasserdruck hergestellt (Abb. 3-12). Diese Dichtschirme aus horizontalen Düsenstrahlsäulen gegen drückendes



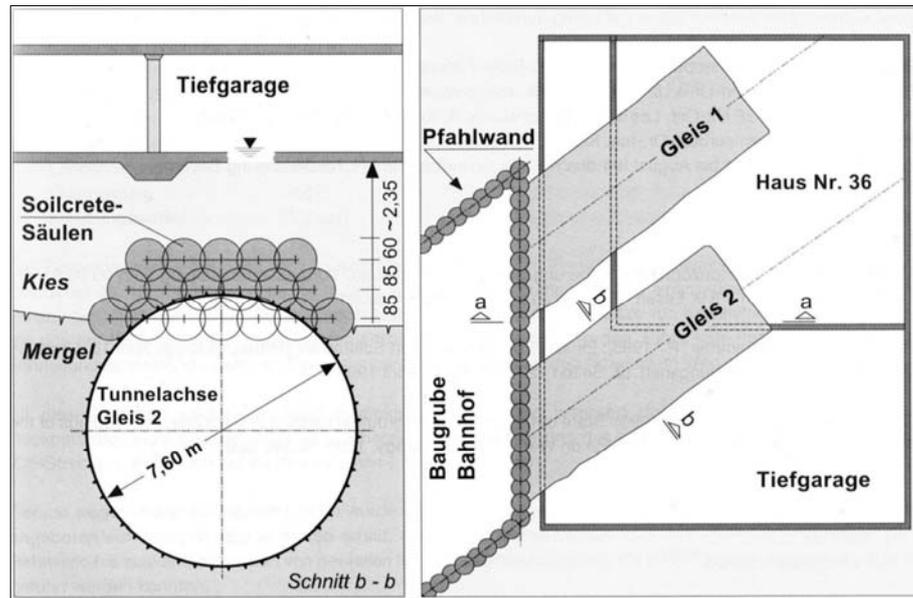
Grundwasser war zu jenem Zeitpunkt technisches Neuland.

Abb. 3-12 Herstellung eines Dichtkörpers (schematisch) [31]

Am Bohrpunkt kam eine Stopfbuchse zum Einsatz, damit weder Grundwasser noch Suspension am Bohrloch austreten konnte. Die Überschusssuspension wurde hier über eine separate Bohrung an die Geländeoberfläche geführt. Diese Bohrung wurde vorab bis auf die Oberkante der auszuführenden Düsenstrahlsäulen abgeteuft. Dadurch entstand eine Druckentlastung und somit konnte ein gleichmäßiger Druck in der Säule während der Herstellung und des Abbindens sichergestellt werden.

Zur Sicherstellung der geforderten Wasserdichtigkeit wurde die Säulenordnung so gewählt, dass im Querschnitt an jeder Stelle mindestens 2 Säulenreihen vorhanden sind. Für die Ausfahrtsituation war an der Stirnseite eine zusätzliche Dichtung notwendig. Um die Fugenzahl so gering wie möglich zu halten und somit einen zusätzlichen Schutz gegen Wassereindringen zu schaffen,

wurden relativ große Säulendurchmesser gewählt. Die planmäßigen Durch-



messer lagen daher bei 1,20 m, in Teilbereichen sogar bei 1,60 m (Abb. 3-13).

Abb. 3-13 Querschnitt und Grundriss Dichtkörper [31]

Aus dem 50°-Winkel zwischen der Tunnelachse und der Bahnstirnwand, sowie der erforderlichen Dichtschirmlänge ergaben sich Säulenlängen von 15 m bis 22 m. Da das Bohren und Düsen wegen dem anstehenden Grundwasser ohne Gestängebrechen in einem Zug erfolgen musste, ergab sich eine erforderliche Mastlänge von 23 m und damit hinter dem Bohransatzpunkt ein Platzbedarf von 24 m.

Die Säulenreihen wurden von unten nach oben hergestellt um eventuell vorhandene Hohlräume aufzufüllen. Die dazu verwendete stabile Suspension aus Hochofenzement, Steinmehl und Bentonit ermöglichte eine zusätzliche Setzungsminimierung.

Insgesamt wurden auf diese Weise 4 Dichtschirme aus 61 Säulen mit einer maximalen Länge von 22 m, d. h. 1 150 m horizontale Düsenstrahlsäulen, mit dem Einphasenverfahren hergestellt. Aus Gründen der Setzungsminimierung wurde jedoch nur eine Säule pro Gleis und Arbeitstag hergestellt.

Für die Dichtigkeit eines Säulenkörpers und seiner Fugen ist ein ausreichender Überschneidung zwischen den Säulen erforderlich. Dieser ist auch bei den teilweise

unvermeidlichen Bohrabweichungen sicherzustellen. Daher wurden alle Bohrungen nach dem Erreichen der maximalen Bohrtiefe mittels Horizontalinklinometer auf Lagegenauigkeit und Überschnitt kontrolliert. Bei diesen Messungen wurde in der Sollrichtung eine maximale Bohrlochabweichung von 35 cm festgestellt. Die mittleren Bohrlochabweichungen lagen bei 20 cm. Das entspricht bei einer Säulenlänge von 20 m ca. 1 % der Bohrlänge.

Zur Qualitätskontrolle wurden üblicherweise alle Herstellungsparameter (Ziehgeschwindigkeit, Suspensionsdruck und -menge, Umdrehungszahl, Bohrandruck und Drehmoment) kontinuierlich automatisch aufgezeichnet. Die Bauwerksbewegungen wurden zudem mit einem automatischen Laser und einem zusätzlichen Nivellement ständig kontrolliert. Allgemein konnten keine Schäden an der bestehenden Bebauung festgestellt werden. Schädliche Hebungen und Setzungen konnten sogar gänzlich vermieden werden. Der Vortrieb des Tunnels wurde also mit Erfolg durchgeführt. Die Technik des Dichtungsblock als horizontale Sicherungsmaßnahme bei der Schildanfahrt hat sich somit bewährt.

3.6 Tunnel Frankfurter Kreuz [9], [25]

Die Trasse der Neubaustrecke Köln-Rhein/Main der Deutschen Bahn AG sollte die Autobahnen A3 und A5 im Bereich des Frankfurter Kreuzes in zwei Tunnelbauwerken unterqueren (Abb. 3-14). Der dazu bergmännisch aufzufahrende Tunnel sollte eine geplante Länge von 280 m und einen mittleren Ausbruchsquerschnitt von 140 m² erhalten. Die Überdeckung betrug 8 bis 15 m. Zudem stand im Bereich des geplanten Tunnels Grundwasser an.

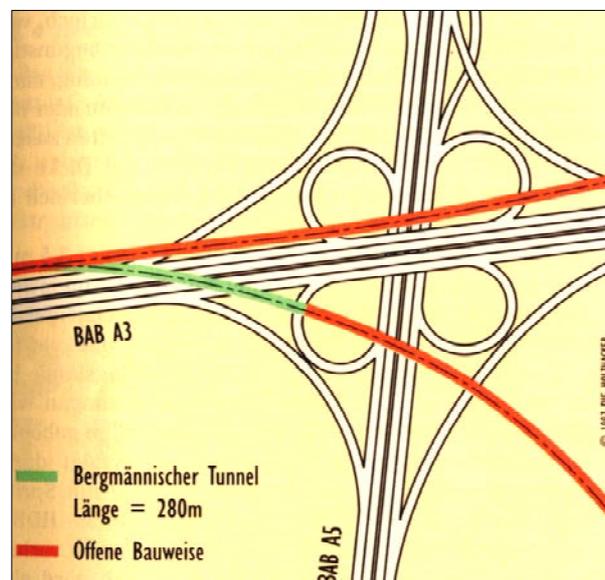


Abb. 3-14 Lageplan der Tunnel unter dem Frankfurter Kreuz [9]

Die Geologie im Bereich des aufzufahrenden Tunnels bestand aus altpleistozänen Ablagerungen mit einem für fluviatile Sedimente charakteristischen raschen Wechsel in der Korngrößenzusammensetzung sowohl in vertikaler als auch in horizontaler Richtung. Dabei handelte es sich überwiegend um Wechsellagerungen von mittel- bis grobkörnigen Sanden mit wechselndem Kiesanteil und vereinzelt Sandsteingeröllen und Blöcken, die z. T. Durchmesser von 60 cm und darüber erreichten. Weiterhin traten auch mehr oder weniger über den gesamten Bereich verteilt schwach kiesige Schluff- und Tonlagen auf, die meist 10 bis 70 cm stark waren. Der Grundwasserstand lag in der Mitte des zu erstellenden Querschnitts. Der Vortrieb musste also teilweise im Grundwasser erfolgen.

Da das Frankfurter Kreuz eine der meistbefahrenen Straßen Europas darstellt, lag die Forderung nach einer steten Aufrechterhaltung des Verkehrsflusses nahe. Es musste also ein Vortriebsverfahren gewählt werden, das die zulässigen Setzungen an der Oberfläche auf ein absolutes Minimum begrenzt.

Der Auftraggeber entschied sich für die NÖT, wobei die Kalotte im Schutz eines vorauslaufenden Düsenstrahlschirms ausgeführt werden sollte. Dieses Verfahren ist bei richtiger Durchführung äußerst setzungsarm. Da das Grundwasser nicht großräumig abgesenkt werden durfte, entschied sich der Auftraggeber zudem, die Strosse und die Sohle innerhalb einer Düsenstrahlwanne herzustellen, um einen Grundwassereintritt zu verhindern.

Zur Terminhaltung wurde der Tunnel von beiden Portalen aus vorgetrieben. Die dazu erforderlichen Startschächte bestanden aus überschnittenen Bohrpfahlwänden. Die Düsenstrahlschirmherstellung und der Kalottenvortrieb erfolgten im Wechsel, so dass jeweils auf der einen Seite die Düsenstrahlherstellung und auf der anderen Seite der Vortrieb stattfand und nach Abschluss der jeweiligen Arbeiten die Seiten getauscht wurden. Geplant war dabei, dass die Düsenstrahlherstellung und der Kalottenvortrieb etwa gleich lang dauern sollten. Dieser Rhythmus konnte jedoch durch zusätzlich geforderte Düsenstrahlsäulen in der Kalottenbrust nicht eingehalten werden. Als Arbeitsausgleich diente das teilweise vorgezogene Zuspritzen des Zwickelbetons in den Aufweitungen für die Bohransatzpunkte des Düsenstrahlschirmes.

durch die stark wechselnde Geologie beeinträchtigt und der zuvor genannte Effekt verstärkte sich. Für solche Fälle gab es einen Maßnahmenkatalog, nachdem je nach Erfordernis das Schlagen von Spießen oder Blechen, diverse Injektionsmaßnahmen oder das Jetten zusätzlicher Säulen vorgesehen war. Dabei wird die Dicke des Schirms mittels Bohrungen sowohl im Zwickelbereich als auch bei den Einzelsäulen überprüft.

Die Überlappung der einzelnen Schirme betrug 3,5 m in der Längsrichtung, woraus sich eine Nutzlänge von jeweils 11 m für den Vortrieb der Kalotte ergab. Die Abschlagslänge betrug dabei max. 1 m. Zur Sicherung der abgeschlagenen Kalotte diente 40 cm starker Spritzbeton in Zusammenhang mit zwei Lagen Baustahlgitter und TH-Bögen. Zur Reduzierung der Setzungen wurde das Kalottenfußauflager zudem durch schräg nach außen gebohrte IBO-Spieße verstärkt. Die Brustsicherung erfolgte durch Spritzbetonversiegelung, einen Stützkeil mit Spritzbetonsicherung und zusätzliche horizontale Düsenstrahlsäulen, um einen Grundbruch aus der Ortsbrust zu verhindern. Unmittelbar nach dem Kalottenausbruch wurde eine Kalottensohle gespritzt (Abb. 3-16).

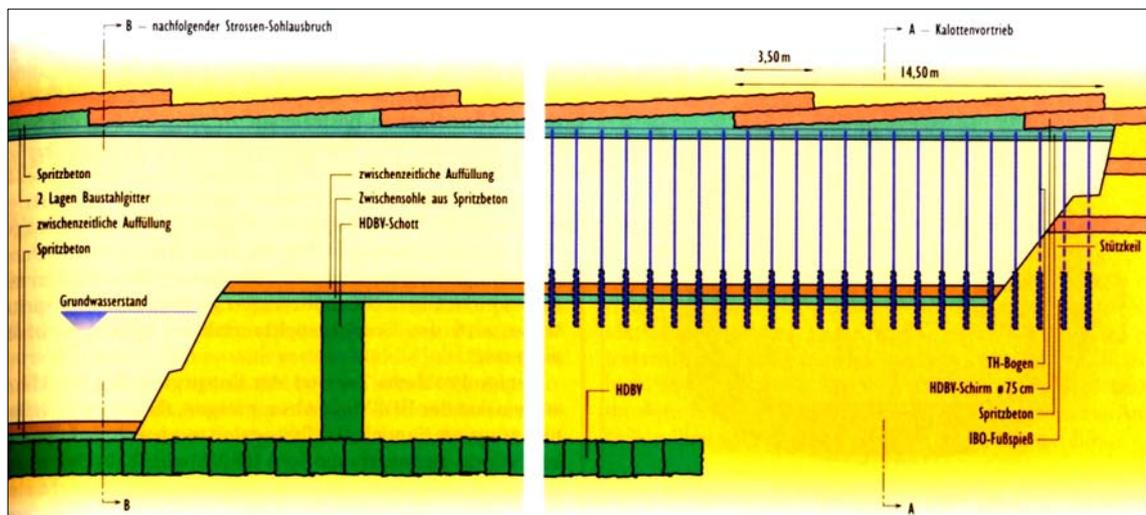


Abb. 3-16 Kalottenvortrieb und nachfolgender Strossen-Sohlausbruch [9]

Im Abstand von etwa 60 m von der Kalottenbrust erfolgte von der rund 0,5 m über dem Grundwasserhorizont liegenden Kalottensohle aus die Herstellung der Düsenstrahlwanne. Diese Wanne zur Abdichtung gegen das Grundwasser war ca. 280 m lang und 1,5 m dick. Daraus ergab sich eine Gesamtkubatur mit einem Volumen von ca. 11 500 m³, die komplett untertage auszuführen war.

Auch diese Maßnahme erforderte die Herstellung mehrerer Probesäulen in einem Probefeld zur Festlegung der Düsenstrahlparameter. Dabei wurden das Bohrraster von 1,1 m x 1,2 m, der Säulendurchmesser von 1,5 m und die Wandendicke von 1,5 m festgelegt. Als Mindestdruckfestigkeit nach 28 Tagen wurden für die Düsenstrahlkubatur der Wanne 5 N/mm² gefordert. Die technische Dichtigkeit und Erosionsbeständigkeit musste gewährleistet sein, um die Ausbruchsarbeiten auch 5 m unter dem anstehenden Grundwasserspiegel gefahrlos ausführen zu können.

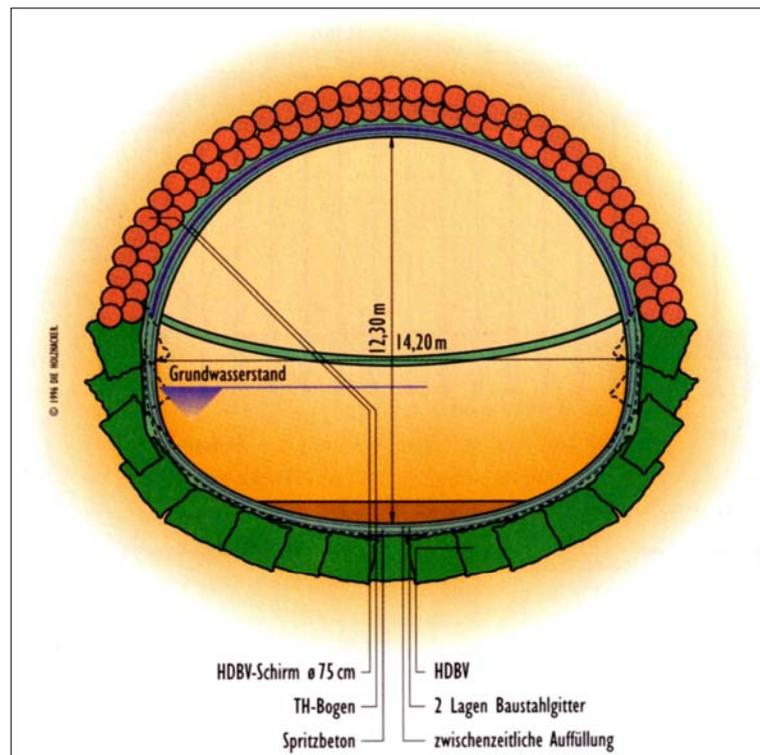


Abb. 3-17 Düsenstrahlwanne im Strossenbereich [9]

Die Auflagersäulen für den Kalottenfuß wurden im Pilgerschrittverfahren hergestellt. Um das Grundwasser aus der Wanne abschnittsweise abpumpen zu können wurden im Abstand von 35 bis 60 m Düsenstrahlquerschotte eingebaut. Bei eventuellen Undichtigkeiten in der Sohle konnte so der Bereich der Fehlstelle rasch eingegrenzt und abgedichtet werden. Gleichzeitig konnte vor Abschluss der gesamten Wannenerstellung der Strossen- und Sohlenabbau mit einer maximalen Abschlagslänge von 2 m begonnen werden. Die Sicherung

der Sohle erfolgte ähnlich wie bei der Kalotte mit 40 cm starkem Spritzbeton und zwei Lagen Baustahlgitter (Abb. 3-17).

Die Düsenstrahlwanne musste unter beschränkter Raumhöhe hergestellt werden. Für das Abteufen der bis zu 8 m langen Spülbohrungen wurden Raupenbohrgeräte mit vollautomatischen Gestängemagazinen zum Einsatz gebracht. Da höchste Anforderungen an die Zielgenauigkeit der Bohrungen zu stellen waren, erfolgte das Einmessen der Bohrungen laserunterstützt. Aufgrund der hohen Säulenanzahl (rund 6000) war es aus Gründen der Qualitätssicherung erforderlich, neben der üblichen manuellen Überwachung, sämtliche für die Qualität der Düsenstrahlwanne relevanten Parameter vollelektronisch zu dokumentieren.

Nach Abschluss aller Vortriebsarbeiten wurde die Ortbetoninnenschale in Blocklängen von 8,78 m mit vorausgehendem Sohl- und nachfolgendem Gewölbebeton hergestellt. Die Innenschale besteht nun aus bewehrtem WU-Beton mit einem Dehnfugenband an den Blockfugen und einem Blechband an den Arbeitsfugen. Zwischen Außen- und Innenschale ist zudem eine Luftpolsterfolie als Gleitschicht eingebaut worden.

Einige Probleme bereitete die Entsorgung der Rücklaufsuspension mit Absaugwagen, da diese durch die Beimengung von Sanden dickflüssig und besonderes bei der Düsenstrahlwannenherstellung nur beschränkt pumpbar war. Nachdem der Einsatz von Entsandern nicht half, wurden im Portalbereich Absetzbecken gegraben, die Rücklaufsuspension hineingeleitet und die eingedickte, stichfeste Masse dann abgefahren und entsorgt.

Aufgrund der Bedeutung dieses Autobahnabschnitts musste ein umfangreiches Messprogramm installiert werden. Neben den Fahrbahnen der Autobahn kontrollierten automatische Nivelliersysteme rund um die Uhr die an der Oberfläche installierten Höhenkontrollpunkte und übertrugen die ermittelten Werte online an einen Computer, der sie aufzeichnete und darstellte. Im Tunnel wurden täglich Firstnivelements, Setzungs- und Konvergenzmessungen durchgeführt, die manuell zur Auswertung in den Computer eingegeben wurden. Bei Überschreitung der vorgegebenen Grenzwerte wurde ein dreistufiger Alarmplan in Gang gesetzt. Die Alarmstufen 1 bis 3 sahen dabei als Folge Maßnahmen vor, die von

erhöhten Kontrollen mit vorsichtigem Vortrieb bis zur Sperre der Autobahn reichten. Die dargestellten Messergebnisse wurden zudem täglich, ggf. auch öfter, von einem Tunnelfachmann interpretiert. Falls notwendig, konnte der Vortrieb so durch zusätzliche Sicherungsmaßnahmen, z. B. durch kürzere Abschlüge, Verdichten der seitlichen IBO-Anker oder eine Verstärkung der Ortsbrust, an die Erfordernisse angepasst werden.

Die rechnerisch prognostizierten Setzungen an der Oberfläche von maximal 30 mm (Alarmstufe 1) wurden nicht erreicht. Die Werte bewegten sich i. a. selbst beim Auftreten von Fehlstellen in der Wanne zwischen 15 und 20 mm.

Am 14. Juli 1997 wurde die Kalotte offiziell erfolgreich durchgeschlagen. Anschließend wurden die Düsenstrahlarbeiten an der Sohle und die Aushubarbeiten in der Strosse und Sohle beendet, der Innenausbau fertiggestellt und der Tunnel nach Fertigstellung des Anschlusstunnels in Betrieb genommen. Der durch die Arbeitsgemeinschaft in Abstimmung mit dem Auftraggeber entwickelte Tunnelvortrieb konnte so letztendlich in einer Bauzeit von nur 16 Monaten durchgeführt werden.

4 Qualitätskontrolle und Fehleranfälligkeit

4.1 Notwendigkeit von Qualitätskontrollen

In den vorhergehenden Kapiteln wurde bereits ersichtlich, dass die Beschaffenheit und somit die Qualität eines Düsenstrahlkörpers von einer Vielzahl sich teilweise gegenseitig beeinflussender Parameter abhängig ist. Bei einem Teil dieser Parameter, z. B. dem Baugrundaufbau oder den Baugrundeigenschaften, handelt es sich um vorgegebene, allerdings nur stichprobenhaft ermittelte und daher nicht vollständig sichere Größen, die in der Planungsphase einer Düsenstrahlmaßnahme ermittelt werden.

Bei den Düsenstrahlparametern handelt es sich also um variable Größen, die auf der Grundlage der vorgegebenen Randbedingungen in der Planung festgelegt und in der Ausführung kontrolliert und ggf. angepasst werden. Der Umfang, sowie die Art und Weise dieser Kontrollen ist maßgebend für die Qualität und Zuverlässigkeit des Düsenstrahlkörpers. Im nachfolgenden Abschnitt soll daher auf die Qualitätskontrolle bei der Düsenstrahlkörperherstellung, die dabei auftretenden Fehler und die Ermittlung der Düsenstrahlparameter genauer eingegangen werden.

4.2 Probesäulen

4.2.1 Allgemeines

Um eine Düsenstrahlsäule ordnungsgemäß herstellen zu können, sind genaue Kenntnisse über den anstehenden Boden notwendig. So sollten vor Düsbeginn der Schichtenverlauf, die Kornverteilung, die Lagerungsdichte, die Steifigkeit, die Grundwasserverhältnisse und eine eventuell vorhandene Kontamination des Bodens genau erkundet werden. Da der Düsenstrahl kein starres mechanisches Werkzeug mit eindeutigen geometrischen Abmessungen und der Boden kein homogener Werkstoff ist, ist die Vorausbestimmung des zu erreichenden Säulendurchmessers nicht eindeutig möglich. Daher werden vor der endgültigen Festlegung der Herstellungsparameter bei fast allen Anwendungen vor der eigentlichen Düsenstrahlmaßnahme Probesäulen hergestellt. Es wird eigentlich

nur bei äußerst genauem Kenntnisstand und unter gleichen Bedingungen gemachten positiven Erfahrungen auf Probesäulen verzichtet.

Die älteste, einfachste, aber auch teuerste Methode zur Bestimmung der Herstellungsparameter für einen geplanten Säulendurchmesser in einem bestimmten Boden stellt das Ausgraben und Vermessen der Probesäulen dar. Eine zweite Möglichkeit ist das Abtasten des Probesäulendurchmessers einer frischen Flüssigkeitssäule mit regenschirmähnlichen Tastwerkzeugen. Diese Methode hat jedoch als nicht sensibel genug erwiesen und wurde nicht zum Stand der Technik. Auf eine Erläuterung dieses Verfahrens soll daher hier verzichtet werden. Die dritte und neueste Methode ist die Reichweitenmessung mit dem sogenannten Hydrophonverfahren.

Bei größeren Baumaßnahmen werden häufig Probefelder angelegt, um die Düsenstrahlparameter zu ermitteln. Durch die Anlage von Probefeldern ist es jedoch auch möglich, Versuche bezüglich des Bohrrasters und der Überschneidung durchzuführen. Die Herstellung und Kontrolle der eigentlichen Düsenstrahlelemente erfolgt wie beschrieben. Es werden lediglich zusätzlich die Kontrollen der Überschneidung und des Bohrrasters durchgeführt.

4.2.2 Herstellung von Probesäulen

Für die Herstellung von Probesäulen werden zuerst die Parameter für die Probesäulen unter Zuhilfenahme von Erfahrungswerten festgelegt. Danach werden die Probesäulen im Boden mit den ungünstigsten Voraussetzungen der jeweiligen Baustelle hergestellt. Sind auf einer Baustelle mehrere Bodenarten anzutreffen, sind ggf. auch mehrere Probesäulen oder Probefelder notwendig. Dabei werden die erreichten Säulendurchmesser während der Herstellung mit dem Hydrophonverfahren kontrolliert oder die fertigen Säulen nach dem Erhärten ausgegraben, vermessen und dokumentiert. Nach dem Ausgraben werden die Säulen augenscheinlich auf Schwachstellen, z. B. Einschnürungen oder Lehmeinschlüsse, überprüft. Die festgestellten Säulendurchmesser werden in die Säulenpläne übernommen und durch ein eventuell notwendiges Variieren der Parameter zur sicheren Seite hin die endgültigen Herstellungsparameter festgelegt. Während der Durchführung der Düsenstrahlmaßnahme werden weitere

Kontrollsäulen ausgegraben und vermessen. Aus diesen werden zudem Bohrkerns gezoen, abgedrückt und ihre Lage dokumentiert.

4.2.3 Ausgraben der Probesäulen

In der näheren Umgebung des zu erstellenden Bauwerks werden, wie im vorangegangenen Abschnitt beschrieben, unter Berücksichtigung von Erfahrungswerten und daraus abgeleiteten Formeln, eine oder mehrere Probesäulen erstellt und anschließend freigeschachtet. Der durch das Düsen mit den angenommenen Parametern erreichte Durchmesser ist nun körperlich messbar. Die Herstellungsparameter können dem gewollten Ergebnis angeglichen werden. Weicht das gewollte Ergebnis zu stark von dem erreichten Ergebnis ab, müssen ggf. neue Probesäulen mit veränderten Parametern hergestellt, ausgegraben und vermessen werden.

Wie sich erkennen lässt, stellt das Ausgraben von Probesäulen einen mit hohen Kosten verbunden enormen Arbeitsaufwand dar. Auf Dauer ist diese Methode unter den heutigen baubetrieblichen Bedingungen deshalb nicht mehr tragbar, auch wenn sie von technischem Aufwand her am einfachsten durchzuführen ist. Hinzu kommt, dass das Ausgraben von Probesäulen unter dem Grundwasserspiegel i. d. R. nicht ohne Probleme möglich ist.

4.2.4 Reichweitenmessung mittels Hydrophonverfahren

Von der Fa. BILFINGER + BERGER wurde durch mehrjährige Studien und Versuchsreihen eine HDI-Reichweitenmessung, das Hydrophonverfahren, entwickelt und zum Patent angemeldet. In der prEN 12 716, Anhang B (informativ) wird dieses Verfahren als „*Indirekte Prüfung*“ bezeichnet.

Bei diesem Verfahren werden beidseitig ein oder mehrere Horchpegel im Säulenbereich abgeteuft. In diese Bohrungen werden dann unten verschlossene Stahlrohre eingestellt und mit reinem Wasser gefüllt. Um die Abweichung der so erstellten Horchpegel von der Sollachse festzustellen, wird deren Lage mit einer Inklinometersonde bestimmt. Die Bohrung für das Düsenstrahlverfahren wird nach dem Erreichen der Endteufe ebenfalls mit einer Inklinometersonde vermessen. Damit sind die Voraussetzungen für die Anwendung des Verfahrens

geschaffen, die Abstände der einzelnen Bohrungen sind in jeder Tiefenlage genau bekannt.

Ein Hydrophon ist eine Schalldrucksonde, die den Schalldruck als physikalische Größe misst. In die wassergefüllten Stahlrohre werden diese sog. Hydrophone eingeführt und beim Düsen höhengleich mitgezogen. Der Düsenstrahl erzeugt in unterschiedlichen Entfernungen vom Pegel unterschiedliche Schalldrücke. Der jeweilige Schalldruck wird als elektrischer Impuls über Kabel zu einem Verstärker transportiert, dort auf einem Oszilloskop sichtbar gemacht und auf einem Schreiber mitgeschrieben. Die Auswertung der Messwerte erfolgt anschließend hauptsächlich nach der Form der erhaltenen Signale. Aus der Signalform kann die Strahlgeometrie bezogen auf den Messpunkt erkannt werden. Daraus lassen sich Rückschlüsse auf den erreichten Durchmesser ziehen. Beim Hydrophonverfahren handelt es sich also, genau wie in der prEN 12 716 bezeichnet, um ein indirektes Verfahren zur Ermittlung der Säulengeometrie.

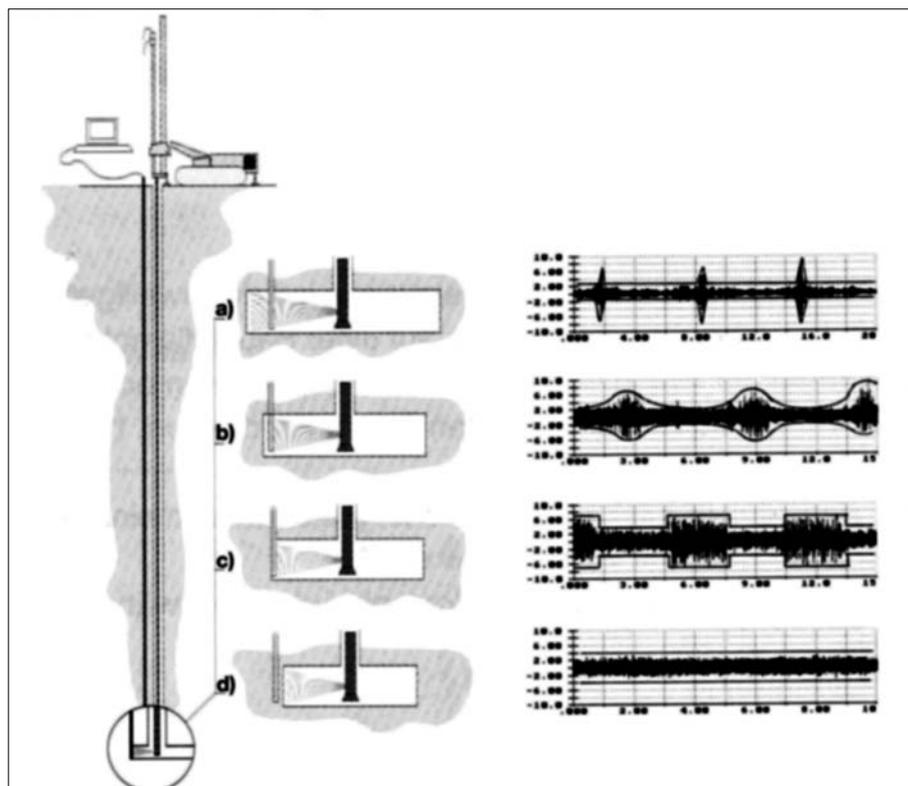


Abb. 4-1 Reichweitentest mittels Hydrophonverfahren [13]

Der Säulendurchmesser kann demnach bei der Anwendung des Hydrophonverfahrens nicht auf einem Messgerät abgelesen werden, sondern muss durch die Auswertung der Signale bestimmt werden. Die in Abb. 4-1 beispielhaft dargestellten Signale lassen folgende 4 Rückschlüsse zu:

- a) der Horchpegel ist deutlich überschritten,
- b) der Horchpegel ist sicher erreicht,
- c) der Horchpegel ist gerade eben erreicht,
- d) der Horchpegel ist nicht erreicht.

Da durch die Inklinometermessungen die Abstände aller Bohrungen genau bekannt sind, kann nun anhand der Signale ein zuverlässiger Rückschluss auf die erreichten Säulendurchmesser erfolgen.

Die Entwicklung des Hydrophonverfahrens ist noch nicht abgeschlossen. Dass mit dem Hydrophonverfahren die Geometrie einer Probesäule dennoch bereits relativ gut erfasst werden kann, zeigt der Vergleich einer ausgegrabenen Probesäule mit den Ergebnissen der Hydrophonmessung (Abb. 4-2). Noch sind die Ergebnisse nicht für alle Anwendungen des Düsenstrahlverfahrens genau genug, auch wenn das Verfahren bezüglich des geforderten Mindestdurchmessers auf der sicheren Seite liegt.

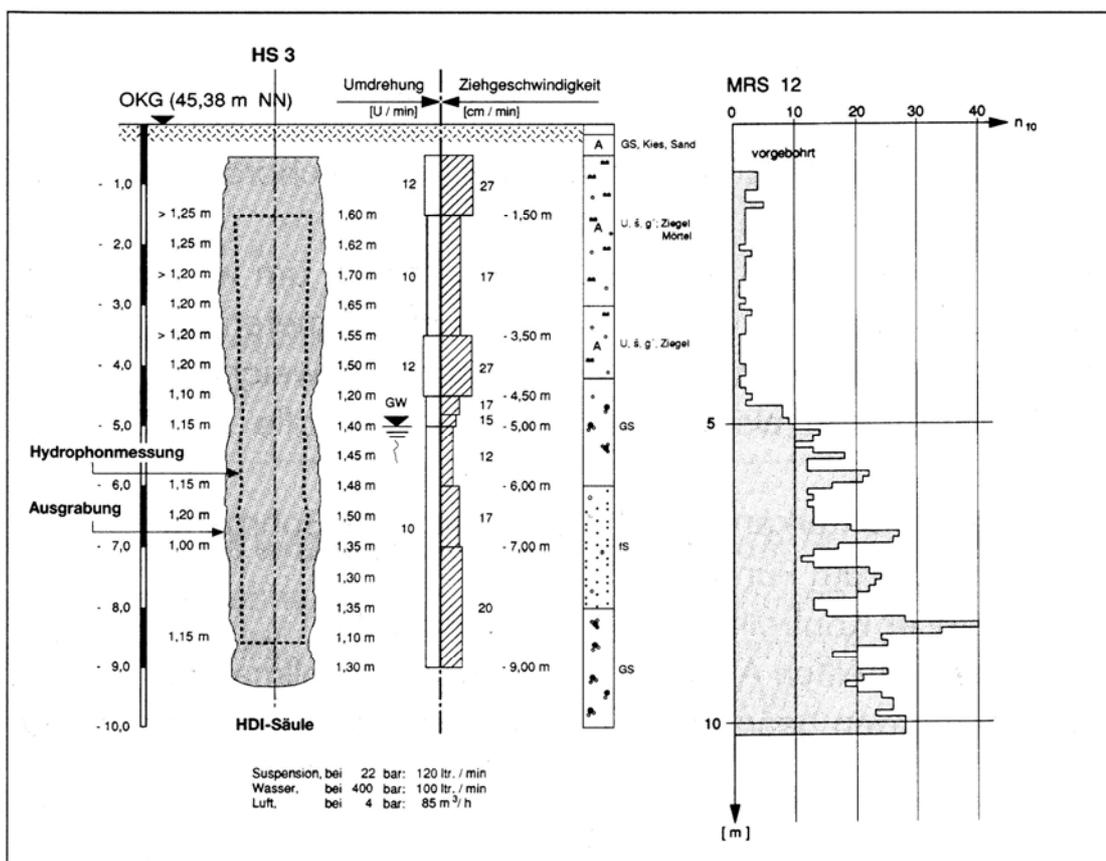


Abb. 4-2 Vergleich Ausgrabung – Hydrophonmessung [13]

4.3 Häufige Fehler

Bei der Herstellung von Düsenstrahlelementen können verschiedene Fehler mit z. T. unterschiedlichen Auswirkungen auftreten. Werden z. B. die Drehung und die Bewegung des Düsengestänges unzureichend aufeinander abgestimmt, entstehen unterschiedliche mit Fehlern behaftete Gebilde (Abb. 4-3). Ein Düsenstrahlsäule sollte i. a. einen homogenen Aufbau zeigen. Die einzelnen „Düsenstahlschichten“ sollten ohne deutlich erkennbare Abgrenzungen ineinander übergehen und somit einen in sich geschlossenen Körper bilden. Wird das Düsenstrahlgestänge jedoch zu schnell gezogen, entstehen sog. Düsenstrahlwendel, die eine fehlende Überlappung der einzelnen Schichten aufweisen. Ist dies der Fall, kann der angestrebte Effekt mit der Düsenstrahlmaßnahme nicht erreicht werden. Ähnliches gilt für die sog. Scheibenstapel. Sie weisen eine magerere Überlappung auf und entstehen durch ein zu schnelles Drehen des Düsengestänges. Die einzelnen Schichten überlappen nur in den Außenbereichen der herzustellenden Säule. Die Innenbereiche konnten durch das schnelle Drehen nicht vermörtelt werden. Die Säule ist damit ebenfalls nicht brauchbar.

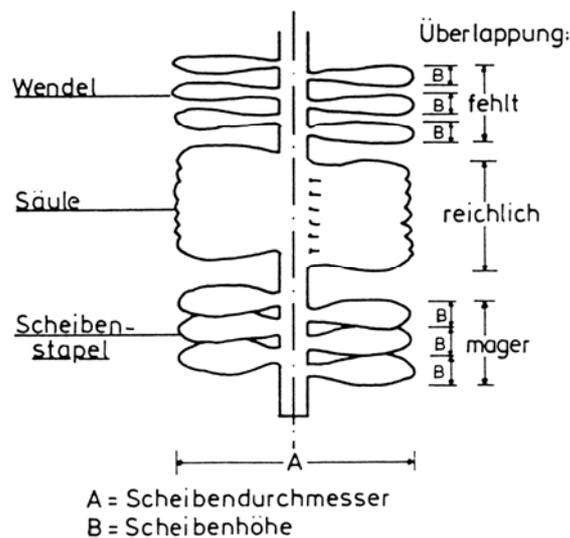


Abb. 4-3 Körperformen bei unterschiedlicher Parameterabstimmung [24]

Um die nachfolgend kurz erläuterten Fehler zu vermeiden, ist eine ständige Qualitätskontrolle vor Ort notwendig. Diese ist jedoch nur erfolgreich, wenn bekannt ist, welche Fehler überhaupt auftreten können.

4.3.1 Zu kleiner Säulendurchmesser

Die Formulierung, der Säulendurchmesser sei zu klein, ist nicht sehr aussagekräftig. Dieser Fakt ist daher etwas differenzierter zu betrachten. Der Säulendurchmesser kann über die gesamte Säulenlänge zu klein sein; er kann aber auch partiell zu klein sein, d. h. Einschnürungen besitzen. Durch Steine oder vorher verfestigte Zonen können Fehlstellen als Folge von DÜSSchatten entstehen.

Kleinere Fehlstellen sind bei Lastabschirmungen ungefährlich. Treten jedoch größere Fehlstellen auf, sind diese zu sanieren, da durch sie die Tragwirkung gefährdet werden kann. Bei druckwasserhaltenden Düsenstrahlkörpern können bereits kleine oder auch einzelne Fehlstellen desolate Folgen haben. Rollige oder fließgefährdete Böden treten schlagartig in die Fehlstellen ein und verursachen u. U. ein Versagen der kompletten Maßnahme.

Wird der zu geringe Durchmesser während des DÜSVorganges bemerkt, kann er ggf. relativ unkompliziert durch eine Änderung der Herstellungsparameter auf die geforderte Größe gebracht werden. Weiterhin unterstützen auch eine Änderung des gewählten Verfahrens oder ein Vorschneiden mit Wasser bei bindigen Böden den gewünschten Erfolg. Reichen diese Maßnahmen nicht aus, können die entstandenen Lücken während der Düsenstrahlkörperherstellung auch durch zusätzliche, in die entstandenen Zwischenräume gesetzte Säulen saniert werden. Gleichzeitig sollte die noch herzustellende Kubatur ein engeres Raster erhalten. Treten die Fehlstellen bei Dichtungsblöcken, z. B. für die Schildanfahrt, auf, helfen nur ein komplettes Überbohren mit einem engmaschigeren Raster oder das Eindüsen von Dichtungsmembranen mit engem Raster.

4.3.2 Zu großer Säulendurchmesser

Für zu große Säulendurchmesser gilt eine ähnliche Aussage wie für zu kleine Säulendurchmesser. Sie können über die gesamte Säulenlänge oder nur in Teilbereichen zu groß sein. Ein unterschiedlicher Säulendurchmesser in Teilbereichen wird meist durch geschichteten Baugrund mit einem Wechsel von dicht und lockergelagerten Bodenschichten hervorgerufen. Sind z. B. die Herstellungsparameter auf den dicht gelagerten Baugrund abgestimmt und werden

diese beim Wechsel in die lockergelagerte Bodenschicht nicht verändert, wird dort ungewollt ein größerer Säulendurchmesser erreicht.

Bei der Herstellung einzelner Düsenstrahlsäulen stellt ein zu großer Säulendurchmesser meist kein Problem dar. Ragt die Säule in einen zu erstellenden Hohlraum hinein, kann der überschüssige Teil abgefräst werden. Dieser Vorgang ist technisch nicht kompliziert, jedoch arbeitsaufwendig, z. T. kostenintensiv und daher möglichst zu vermeiden.

Problematisch wird ein zu großer Säulendurchmesser bei der Herstellung von Düsenstrahlwänden oder –schirmen. Werden bei der Herstellung die Primärsäulen so groß, dass sie den Ansatzpunkt der Sekundärsäulen überdecken, entstehen DÜsschatten und somit Undichtigkeiten in der Kubatur.

Derartigen Fehlern kann während der Herstellung u. a. durch eine Änderung der Herstellungsparameter oder des Verfahrens entgegenwirkt werden. Zuweilen kann auch eine Vergrößerung des Säulenabstandes Abhilfe verschaffen.

4.3.3 Zu kurze Säulen

Wird bei einem vertikalen Düsenvorgang durch einen Messfehler zu hoch begonnen, sind die Säulen unten zu kurz. Wird der Düsenvorgang zu früh gestoppt, sind die Säulen oben zu kurz. Treten diese Fehler bei der Herstellung von Düsenstrahlschirmen auf, verkürzen sich die Überlappungslängen. Bei entsprechenden Größenordnungen kann dies zu einem Versagen der Konstruktion führen und somit den Vortrieb verhindern. Den Messfehlern muss daher durch sorgfältiges Arbeiten unter dem Einsatz von qualifiziertem Personal vorgebeugt werden. Eine ausgefeilte Qualitätskontrolle hilft bei der Erkennung der Messfehler.

In rolligen Böden kann der Suspensionsspiegel durch ein Versickern der Suspension in den Porenraum soweit absinken, dass ebenfalls am oberen Ende ein Stück der Säule fehlt. Das Absinken der Suspension muss daher durch Kontrolle und ständiges Nachfüllen mit Zementsuspension verhindert werden.

Treten zu kurze Säulen als Produktionsfehler auf, können und müssen sie saniert werden. Sind die Säulen am Ende zu kurz, so kann in Rücksprache mit dem Statiker zuweilen auf eine Nachbesserung verzichtet werden. Andernfalls

muss die fehlende Länge nachgedüst werden. Werden die auftretenden Kräfte wegen der fehlenden Einbindung nicht aufgenommen, ist bei vertikalen Säulen (Horizontalkräfte) auch eine Sanierung mit Zusatzankern ohne Säulenverlängerung möglich. Sind die Säulen am Anfang zu kurz sollte das fehlende Säulenstück generell nachgedüst werden.

4.3.4 Die Säulenachsen weichen von der Sollneigung ab

Abweichungen von der Sollneigung können durch Messfehler oder Abweichungen des Bohrgestänges von der Sollachse entstehen. Die Bohrgestängeabweichung entsteht durch ein zu dünnes Bohrgestänge oder Bohrhindernisse (Findlinge, etc.). Diese Fehlerquelle kann relativ problemlos während der Herstellung durch die Verwendung eines stabileren Bohrgestänges behoben werden. Zudem können eventuell auftretende Bohrhindernisse mittels Tastbohrungen geortet und durch Zusatzsäulen eingekapselt werden.

Weicht die fertige Säule trotz genauer Bodenerkundung und Kontrolle während der Herstellung von der geplanten Sollneigung ab, kann eine Sanierung wie in den vorangestellten Abschnitten erfolgen.

Besonders problematisch sind Abweichungen von der Sollneigung bei der Herstellung von Düsenstrahlschirmen und Dichtwänden. Weichen einige Säulen eines Schirmes von der Sollneigung ab, kann die Schirmwirkung verloren gehen und der Schirm dadurch unwirksam sein. Ragen die Säulen zudem in den zu erstellenden Tunnelquerschnitt hinein, müssen sie mit einer Teilschnittmaschine abgefräst werden. Dies ist zwar relativ unproblematisch, aber dennoch arbeitsaufwendig. Bei der Herstellung von Düsenstrahldichtwänden kann durch Abweichungen von der Sollneigung und eventuell damit verbundene Undichtigkeiten ein großer Schaden entstehen. Zudem müssen die Dichtwände zur Erstellung von Dichtrögen weit genug in die wasserdichte Schicht einbinden um die Funktion zu gewährleisten. Diese Forderung kann besonders bei der Herstellung von geneigten Wänden durch eine Sollageabweichung gefährdet werden. Mit der Änderung der Lage verändert sich der Neigungswinkel, was letztendlich zu einer fehlenden Einbindung führt. Hier ist daher besonders sorgfältig zu arbeiten.

4.3.5 Zu geringe Festigkeit der Düsenstrahlkörper

Eine zu geringe Festigkeit der fertigen Elemente kann verschiedene Ursachen haben. Die Hauptursache ist in einem zu hohen w/z-Wert der Suspension zu sehen. Dieser kann bereits beim Anmischen der Suspension zu groß sein oder aus einem falschen Verhältnis von Schneidwasser zu Suspensionsmenge (Zwei- und Dreiphasenverfahren) resultieren. In bindigen Böden können aber auch zu schnelle Ziehzeiten zu geringeren Festigkeiten führen. Außerdem können chemische Einflüsse aus organischen oder kontaminierten Böden und Grundwässer die Düsenstrahlkörperfestigkeit negativ beeinflussen.

Bei Tragkonstruktionen hat eine zu geringe Festigkeit die Folge, dass die Lasten nicht aufgenommen werden können und die Konstruktion somit ihren Zweck nicht erfüllt. Bei reinen Dichtungskörpern spielen die Festigkeiten jedoch i. d. R. eine untergeordnete Rolle.

Wird der Fehler während der Düsenstrahlarbeiten rechtzeitig bemerkt, kann die geplante Düsenstrahlkörperfestigkeit sofort durch kleine Veränderungen der Herstellungsparameter erreicht werden. Dies können u. a. eine Reduzierung des w/z-Wertes, die Verwendung höherer Zementgüten, die Erhöhung der Durchflussmenge oder langsames Ziehen in bindigen Böden sein. Zuweilen kann auch ein wiederholtes Düsen der gleichen Säule den gewünschten Effekt erzielen.

Sind die genannten Maßnahmen nicht ausreichend um in den anstehenden Böden die gewünschte Festigkeit zu erreichen, müssen konstruktive Maßnahmen ergriffen werden. So kann durch eine planmäßige Vergrößerung des Düsenstrahlkörper die auftretende Pressung soweit reduziert werden, dass die in den jeweiligen Boden maximal erreichbare Güte ausreichend ist. In diesem Fall sind die Säulenpläne für die weiteren Arbeiten umzustellen und die bereits hergestellte Kubatur durch Zusatzsäulen zu vergrößern.

Bei Tunnelvortrieben ist u. U. ein Durchfahren der zu weichen Teilbereiche mit Druckluft möglich. Sollte dies nicht der Fall sein, sind auch hier die erläuterten Maßnahmen durchzuführen.

4.3.6 Zu hohe Festigkeit der Düsenstrahlkörper

Die Festigkeit ist nach oben nur schwer zu begrenzen, zumal sie bodenabhängig ist. Gezielte, zuverlässig wirkende Maßnahmen, die nicht ins Gegenteil umschlagen, sind sehr schwierig zu steuern und konnten in der Praxis nicht immer erfolgreich durchgeführt werden.

Eine zu hohe Festigkeit der Düsenstrahlkörper kann u. a. durch einen zu niedrigen w/z-Wert oder eine für den anstehenden Boden zu geringe Ziehgeschwindigkeit bedingt sein. Diese kann während der Düsenstrahlkörperherstellung aber durch eine gezielte Erhöhung des w/z-Wertes, die Erhöhung der Ziehzeit oder die Zugabe von Bentonit, Flugaschen oder Gesteinsmehl herabgesetzt werden.

Hat ein Düsenstrahlkörper lediglich statische Funktion, ist eine zu hohe Festigkeit ohne Einfluss. Im Gegenteil, sie ermöglicht ein besseres Tragverhalten und gibt daher zusätzliche Sicherheit. Soll der Düsenstrahlkörper aber z. B. bei der Schildanfahrt durchörtert oder überschüssige Kubaturen und Verwüchse bei Düsenstrahlschirmen entfernt werden, kann sich ein sehr harter Düsenstrahlkörper sehr kosten- und arbeitsintensiv auswirken und ist daher zu vermeiden. Wird die zu hohe Festigkeit erst bei der Durchführung dieser Maßnahmen bemerkt, kann nur noch eine Veränderung der Parameter der Durchörterung oder des Abtrages zum Ziel führen. So sind u. U. eine Modifikation, ständige Kontrolle und Erneuerung der Abbauwerkzeuge von Schildmaschinen bzw. Teilschnittmaschinen hilfreich. Reicht dies nicht aus, kann der Abbau händisch ggf. unter Druckluft oder falls genügend Platz vorhanden ist maschinell mit Hydraulikgeräten durchgeführt werden.

4.3.7 Gebäudeschäden durch die Düsenstrahlkörperherstellung

Im Einflussbereich der Düsenstrahlmaßnahme können auch durch Hebungen bzw. Senkungen verursachte Schäden an Gebäuden entstehen.

Gebäudesenkungen resultieren u. a. aus der Herstellung zu vieler frischer Säulen dicht nebeneinander. Das frische Boden-Zement-Gemisch überträgt zunächst keine Lasten. Die Gebäudelasten werden durch die Gewölbewirkung im Fundament auf die Bodenabschnitte neben der frischen Säule übertragen und

es kommt im Bereich der Säulen zu Setzungen. Daher ist eine Herstellung im Pilgerschrittverfahren für die Vermeidung von Senkungen oft von Vorteil.

Bei einem nicht ordnungsgemäßen Rücklauf der Überschusssuspension entstehen Hebungen des Untergrundes und damit der sich darauf befindenden Gebäude. Diese Hebungen können im Dezimeterbereich liegen und sind somit nicht unerheblich. Bei der Herstellung von Düsenstrahlkörpern ist demnach immer auf einen geregelten Rückfluss der Überschusssuspension zu achten. Bei tiefen Bohrungen in nicht standfesten Böden kann es daher erforderlich werden, den Bereich oberhalb des eigentlichen Düsenstrahlkörpers mit Standrohren zu versehen. In anderen Fällen können Entlastungsbohrungen einen Druckabbau in der Säule erzeugen und somit unkontrollierten Hebungen vorbeugen.

4.4 Qualitätskontrolle

4.4.1 Allgemeine Kontrollen

Um den geordneten Ablauf des Düsenstrahlverfahrens und die Qualität der fertigen Elemente zu gewährleisten, sind verschiedenartige Kontrollen vor, während und nach der Herstellung durchzuführen. Diese Kontrollen sind in Abhängigkeit von der geplanten Baumaßnahme und den vorliegenden Baugrundbedingungen anzuwenden.

Damit bereits während der Herstellung der Düsenstrahlkubaturen reagiert werden kann, sind in den bereits fertigen Düsenstrahlelementen rechtzeitig Kernbohrungen in angemessener Menge zu entnehmen. Da auch Kernbohrungen von der Sollachse abweichen können, werden diese bei sehr großen Längen mit Inklinometern kontrolliert, um ihre exakte Lage zu ermitteln. Die gezogenen Bohrkerne werden anschließend im Baustofflabor abdrückt.

Zur Überprüfung der Säulendurchmesser und der Elementdicke werden Kontrollbohrungen mit dem Bohrgerät als Vollbohrung abgeteuft. Werden dabei Abweichungen von den Sollmaßen festgestellt, kommt es zu einer Änderung der Herstellungsparameter. Anschließend kann ggf. die Herstellung von Kontrollsäulen mit den geänderten Parametern, die ausgegraben und vermessen werden, notwendig werden.

Für die Qualität der Düsenstrahlelemente ist zudem eine laufende Kontrolle der rheologischen Eigenschaften (Wichte, Menge, Farbe) der Frischsuspension, der Rücklaufsuspension und ggf. des Luftaustritts am Bohrloch wichtig.

Um sicherzugehen, dass alle Säulen erstellt wurden, ist eine exakte Kennzeichnung dieser in den Plänen auf der Baustelle erforderlich. Nach der Fertigstellung sind die Düsenstrahlkörper beim sich eventuell anschließenden Aushub auf Fehlstellen und Dichtigkeit zu prüfen. Um anschließend eventuell notwendige Sanierungen von Fehlstellen sofort ohne Verzögerungen vornehmen zu können, sind für diesen Fall bereits ausgearbeitete Sanierungskonzepte, sowie erforderliche Geräte und Materialien vorzuhalten.

Bei wasserdichten Umschließungen oder kritischen Böden sind während der gesamten Produktion stichprobenartige Hydrophonmessungen durchzuführen. Zudem sind hier die anfallenden Restwassermengen und erreichten Systemdichtigkeiten ebenfalls kritisch zu überprüfen.

Neigungsmessungen mit Inklinometer an den Probesäulen sind an langen Bauwerkssäulen stichprobenartig und an sehr langen Bauwerkssäulen an jeder Säule notwendig.

Das Überprüfen der Baustelleneinrichtung und der Geräte kann ebenfalls einen entscheidenden Beitrag zur Gewährleistung der Qualität darstellen. So sollten die Düsendurchmesser mit Messlehren überprüft und die Wiegemischautomaten auf Volumen und Gewicht geeicht werden.

4.4.2 Kontrollmessungen während der Produktion

Für jedes Düsenstrahlelement wird ein Protokoll angefertigt, in dem alle für die Herstellung und Qualität des Elementes relevanten Parameter aufgezeichnet werden. Die vorgeschriebenen Herstellungsprotokolle sind für jede Säule genau wie die Tagesberichte gewissenhaft zu führen. Bei der Elementherstellung sind daher folgende Daten zu messen und zu protokollieren:

- Bohrtiefe, Bohrneigung und Düsstrecke (Länge des Elements);
- Bohrzeit und Suspensionsmenge beim Bohren;

- Ziehzeit und Suspensionsmenge beim Düsen;
- Schneidwassermenge, wenn eingesetzt;
- Zeit und Suspensionsmenge für das Auffüllen;
- Drehzahl beim Ziehen;
- Druck an der Hochdruckpumpe und am Bohrgerät;
- Düsenanzahl- und Durchmesser;
- Zementsorte und Zementverbrauch;
- w/z-Wert;
- Wasserverbrauch;
- Luftmenge, wenn eingesetzt;
- Angaben zum Baugrund (Bodendaten, Bohrhindernisse).

Zusätzlich sind täglich mehrmals folgende Daten zu kontrollieren und zu protokollieren:

- Wichte der Überschusssuspension um Rückschlüsse auf den Erosionserfolg (= Säulendurchmesser) zu ziehen;
- Zeitpunkt und Ort der Wichtemessungen von Frischsuspension und Rücklaufsuspension;
- Menge der anfallenden Rückflusssuspension (überschläglich);
- Stillstandszeiten (von - bis mit Ursache);
- Setzungs- bzw. Hebungsmessungen.

Bei Bedarf kann auch eine Kontrolle von angrenzenden Kellerräumen durch einen hierfür abgestellten Mitarbeiter erfolgen. In besonderen Fällen kann ein automatisches Schlauchwagen-Überwachungssystem installiert werden.

4.4.3 Auswertung der Messdaten

Mit den hier aufgeführten protokollierten Kontrollen und den Daten aus der manuellen oder elektronischen Prozessaufzeichnung verfügt der verantwortliche Bauleiter über wirksame Mittel zur Überwachung und Steuerung der Düsenstrahlarbeiten. Er kann so sofort eingreifen, wenn die aufgezeichneten Daten von den Solldaten abweichen.

Die tägliche Auswertung der Produktionsdaten im Zusammenhang mit den Angaben der Ausführungsunterlagen erhöht die Ausführungssicherheit und damit die Qualität der Düsenstrahlmaßnahme.

Ausführungsfehler, Abweichungen von den Planunterlagen, Störungen in der Gerätetechnik können also frühzeitig erkannt und behoben werden. Kostspieligen Sanierungen kann damit überwachend und steuernd vorgebeugt werden. Schäden an Gebäuden oder Bauwerken lassen sich vermeiden.

Die Protokolle der ausführenden Firmen und ihre Auswertungen sind, wie in den Allgemeinen Bauaufsichtlichen Zulassungen gefordert, mindestens fünf Jahre zu archivieren. Weiterhin sind sie dem Deutschen Institut für Bautechnik und der zuständigen obersten Bauaufsichtsbehörde auf Verlangen vorzulegen.

5 Anwendungsgrenzen des Düsenstrahlverfahrens

Das Düsenstrahlverfahren hat die Anwendungsgrenzen der üblichen Injektionen durch die Umstellung von der Porenfüllung zur Bodenvermörtelung und zum teilweisen Bodenersatz erheblich erweitert. So können mit dem Düsenstrahlverfahren auch noch Schluffböden und Wechsellagerungen von Sand, Silt und Ton erfolgreich behandelt werden. In Abschnitt 1.4 wurde der Sachverhalt des Anwendungsbereiches des Düsenstrahlverfahrens bereits kurz dargestellt. Die dort aufgeführte Abb. 1-3 unterstreicht die breite Anwendungspalette des Düsenstrahlverfahrens über das gesamte Kornverteilungsband.

Der Anwendungsbereich ist dadurch eingrenzt, dass der zu behandelnde Baugrund gelöst werden muss und teilweise oder ganz durch die Suspension zu ersetzen ist. Dem Lösevorgang steht dabei die Festigkeit des Baugrundes gegenüber, so dass diese als eigentliche Grenze zu nennen ist. Die Festigkeit eines Baugrundes wird je nach dessen Art durch unterschiedliche Baugrundeigenschaften bestimmt.

Im kohäsiven Lockergestein ist die Festigkeit durch die Kohäsion bestimmt. Diese wächst mit der Konsistenzzahl und der Plastizitätszahl, die Schneideleistung des Düsenstrahls hingegen nimmt ab. Durch die Anwendung reiner Zementsuspension sind in feinkörnigen Böden trotzdem zufriedenstellende Ergebnisse möglich. In der Praxis wurden bereits Tone mit halbfester Konsistenz erfolgreich behandelt. Hier hat jedoch die Wirtschaftlichkeit einen wesentlichen Einfluss auf den Anwendungsbereich. Bei der in Tonen notwendigen geringen Ziehgeschwindigkeit und der daraus resultierenden Bearbeitungszeit entsteht ein hoher Arbeitsaufwand verbunden mit entsprechenden Kosten. Zudem ist der Einwirkungsradius und damit der Säulendurchmesser in Tonen nicht allzu groß und beträgt unter Anwendung des Dreiphasenverfahrens ca. 1,4 m.

In nicht kohäsiven Lockergesteinen ist die Festigkeit durch die Lagerungsdichte bestimmt. In der Praxis konnten bereits auch Sande und Kiese bis zu dichter Lagerung erfolgreich behandelt werden. In Firmenprospekten wird allgemein Kies mit einem mittleren Korndurchmesser von 60 mm als obere Anwendungsgrenze des Düsenstrahlverfahrens in grobkörnigen Böden angegeben. Dies

scheint darin begründet, dass in gröberen Böden nach [15] nicht mehr nur die Festigkeit dem Düsenstrahl entgegenwirkt. Mit zunehmender Korngröße wird es mehr und mehr unmöglich, den einzelnen Stein in den engen, freigeprägten Raum zu bewegen und im Ringraum nach oben zu befördern, um für die Suspension Platz zu schaffen. Das Problem ist also verfahrenstechnisch noch nicht zu bewältigen. Eine herkömmliche Injektion scheint daher hier momentan einfacher und kostengünstiger zu sein.

In rein organischen Böden mit stark aggressivem Grundwasser können Probleme hinsichtlich Qualität der Boden-Zement-Körper auftreten.

In Böden, bei denen sich kohäsive und nicht kohäsive Schichten abwechseln, kann das Lösen der kohäsiven Schichten schwierig sein, wenn die Kohäsion des undrainierten Bodens den Wert von ca. 40 kN/m² übersteigt und die Fließgrenze größer als ca. 40 % ist. Bei derartig festen Böden besteht die Gefahr, dass der Schneidstrahl zu der benachbarten, kohäsionslosen Schicht durchbricht und der Einwirkungsradius in der kohäsiven Schicht auf sehr kleine Werte absinkt.

Tab. 5-1 zeigt noch einmal deutlich, dass das Ergebnis des Düsenstrahlverfahrens entscheidend von der Bodenart und dem gewählten Verfahren mit seinen jeweiligen Drücken abhängig ist. Es lässt sich zudem entnehmen, dass die Kohäsion der bindigen Böden den Einwirkradius klein hält. Er nimmt mit kleiner werdender bzw. wegfallender Kohäsion und größer werdendem Grobkornanteil zu. Die Säulendurchmesser werden daher bei der Anwendung des selben Verfahrens ausgehend vom Schluff, über den Sand bis hin zum Kies größer. Die Obergrenze des Durchmessers ist im groben Kies mit einem mittleren Korndurchmesser von 60 mm, wie bereits erläutert bei ca. 3,0 bis 3,3 m zu sehen.

Verfahren	Druck [MN/m ²]			Säulendurchmesser [m]				
	Zement-suspension	Druck-luft	Druck-wasser	Ton halbfest	Sand mitteldicht	Schluff tonig	Sand schluffig	Kies sandig
Einphasen-verfahren	25 bis 40 40 bis 60				0,85	0,4 bis 0,5	0,8 bis 0,9	0,9 bis 1,0
Zweiphasen-verfahren	25 bis 40 40 bis 60	0,5 bis 0,6 0,5 bis 0,6			1,7	0,6 bis 0,8	1,1 bis 1,3	1,3 bis 1,5
Dreiphasen-verfahren	1,5 bis 4,0 1,5 bis 4,0	0,5 bis 0,6 0,5 bis 0,6	30 bis 40 40 bis 60	1,4		0,8 bis 1,0 1,5 bis 1,7	1,4 bis 1,6 2,0 bis 2,3	2,0 bis 2,4 2,5 bis 2,8

Tab. 5-1 Druck- und Einwirkradius des Düsenstrahlverfahrens [15]

Ein Problem bleibt trotzdem die teilweise unpräzise Vorhersage des Säulendurchmessers vor Beginn der Düsenstrahlmaßnahme. Bisher konnten noch keine genauen Aussagen über die Ausbreitung und Wirkungsweise des Düsenstrahls in Abhängigkeit des anstehenden Bodens, sowie der Erosionsenergie des Schneidstrahls gemacht werden. In [23] werden einige Anschauungsversuche zur Ausbreitung und Schneidwirkung des Düsenstrahls dargestellt. Die erzielten Ergebnisse sind aber noch nicht zur Ableitung allgemeiner Aussagen geeignet. Zumal sich auch hier wieder das Problem der Überprüfung der erreichten Ergebnisse stellt und die prognostizierten Durchmesser mit Ungenauigkeiten behaftet sind.

In rolligen Böden können die Suspensionen aufgrund des hydrostatischen Suspensionsdrucks im Bohrloch bzw. im Düsenstrahlkörper über die planmäßigen Abmessungen hinaus in den Boden eindringen. Die Eindringtiefe eines Düsenstrahles ist abhängig von der Zusammensetzung und der Viskosität der Suspension, sowie der Kornverteilung und Lagerungsdichte der einzelnen Bodenschicht. In Rollkieslagen sind bei der Verwendung von reinen Zementsuspensionen Eindringtiefen im Meterbereich beobachtet worden. Dieser Effekt hat die Wasserdurchlässigkeit besonders in den stark durchlässigen Schichten enorm vermindert.

In bindigen Böden nimmt, wie bereits erläutert, die Erosionsleistung des Düsenstrahls ab, was sich ebenso auf die Festigkeitsentwicklung der Düsenstrahlsäulen auswirkt. Bei derartigen Baugrundverhältnissen kann jedoch durch gezieltes Vorschneiden mit Wasser eine Verbesserung des Austrages erreicht werden.

Während für die Anwendung des Düsenstrahlverfahrens in sandigen Kiesböden eine Menge an Erfahrungen vorliegt, ist das für Löß bzw. Lößlehm nicht der Fall. Die Anwendung des Düsenstrahlverfahrens beim Tunnelbau in Lößböden kann globale Sackungen mit sich bringen, wenn lokale Sackungserscheinungen am Umfang der Düsenstrahlsäulen der Sicherungsschirme auftreten. Dies war z. B. beim Bau der Wiener U-Bahn an der Station Zippererstraße der Fall [19]. Im dort angetroffenen sackungsfähigen Lößboden wiesen die Düsenstrahlsäulen nach ihrer Fertigstellung an ihrem Umfang eine weiche, wenige Zentimeter dicke Übergangszone auf, die trotz verschiedener Verfahrensanpassungen

nicht vermieden werden konnte. Löß sackt unter bestimmten Belastungs- und Wassersättigungsbedingungen ab. Mit dem Düsenstrahlverfahren lösen sich die im Löß vorhandenen meist karbonatischen Sandkornbrücken leicht auf. Es entstehen gleichmäßige, nahezu kreisrunde, bei entsprechender Anpassung der Düsenstrahlparameter ausreichend große und feste Säulen. Dies gilt im Prinzip auch für horizontale oder leicht schräge Düsenstrahlschirme.

Bei der Herstellung von Sicherungsschirmen sind in Wien jedoch erhebliche Setzungen aufgetreten. Diese sind auf die bereits erwähnte 1 bis 3 cm dicke Übergangszone zurückzuführen, die eine auffallend weiche bis breiige Konsistenz besaß. Der Düsenvorgang hat hier scheinbar am Säulenumfang eine Art wasserangereicherten Pelz, ähnlich einem Schlitzwandfilterkuchen, hinterlassen, welcher wesentlich an den aufgetretenen Oberflächensetzungen beteiligt war. Diese weiche Kontaktzone konnte auch durch verschiedene Gegenmaßnahmen nur unmerklich verringert werden. Bei einem Tunnelvortrieb im Löß unter Anwendung von Düsenstrahlschirmen sind daher besondere Vorsichtsmaßnahmen zu treffen. Sollen die anzuwendenden Schirme gerade zur Setzungsminimierung eingesetzt werden, sollten zusätzliche Maßnahmen ergriffen oder eventuell auf eine andere Sicherungsmethode ausgewichen werden.

Auch im Festgestein konnten bereits Anwendungserfahrungen gesammelt werden. Hier stellt sich die Druckfestigkeit des Festgesteins dem Angriff des Schneidstrahls entgegen. In der BRD wurde das Düsenstrahlverfahren in der Gegend von Nürnberg durch die Fa. BAUER zur Abdichtung von Keuper-sandstein eingesetzt. Die Fa. BAUER gibt in ihrem Firmenprospekt dazu an, dass dabei Sandstein mit einer Druckfestigkeit von bis zu 10 MN/m² mit einem gerichteten, nichtrotierenden, luftummantelten Wasserstrahl aufgefästä wurde. Damit scheint aus heutiger Sicht die Obergrenze der wirtschaftlichen Anwendung des Düsenstrahlverfahren im Festgestein erreicht zu sein. Es ist jedoch zu erwarten, dass weiterhin Versuche in Gesteinen höherer Festigkeit durchgeführt werden und diese mit der Zeit ebenfalls zu einem wirtschaftlich tragbaren Erfolg führen werden.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Die vorliegende Diplomarbeit hatte die Anwendung des Düsenstrahlverfahrens im Tunnelbau zum Thema. Dabei war eine Systematik der möglichen Anwendungen und ihrer bestimmten Parameter zu erstellen. Zugleich sollten die Erfolge dieser noch relativ jungen Technologie im Tunnelbau dargelegt und diskutiert werden. Es hat sich im Verlauf der Arbeit gezeigt, dass das Düsenstrahlverfahren in der Geotechnik eine universelle und gleichzeitig effiziente Sicherungsmethode darstellt.

In den ersten Kapiteln wurde die Methodik des Düsenstrahlverfahrens allgemein dargestellt. Ein besonderer Augenmerk galt dabei den einzelnen Verfahrensorten, ihren Anwendungsbereichen und Anwendungsgrenzen. Es wurden zugleich die geometrischen Formen mit ihren Eigenschaften dargelegt.

Nach den allgemeinen Ausführungen zum Verfahren ging die Arbeit in den folgenden Kapiteln genauer auf die Anwendung im Tunnelbau ein. Dabei stellte sich eindrucksvoll heraus, dass auch der horizontale Einsatz des Düsenstrahlverfahrens ohne größere Probleme im Vergleich zur vertikalen Variante möglich ist. Lediglich in stark bindigen Böden mit hohem Wasseranteil treten Differenzen im Ergebnis auf. Um die Düsenstrahlelemente herum bilden sich hier Zonen weicher bis breiiger Konsistenz mit Anteilen des Boden-Zement-Gemisches. Das Auftreten dieses Phänomens konnte bisher noch nicht eindeutig geklärt und begründet werden.

Die konstruktive Ausbildung der Düsenstrahlschirme als Hauptanwendung im Tunnelbau wurde ausführlich diskutiert. Ebenso wurde die Herstellung der Säulen in den unterschiedlichen Böden dargelegt. Da sich die Anwendung des Düsenstrahlverfahrens im Tunnelbau nicht nur auf horizontale Schirme zur voraus-eilenden Sicherung beschränkt, wurden auch Aussagen zur konstruktiven Ausbildung von Dichtblöcken und Anfahrbereichen für Tunnelbohrmaschinen in Problemböden getroffen.

Im weiteren Verlauf der Arbeit wurden einige ausgewählte eindrucksvolle Baumaßnahmen, bei denen das Düsenstrahlverfahren in den letzten Jahren zur Anwendung kam analysiert. Im Ergebnis konnte festgestellt werden, dass bei

fast allen Projekten die Bauzeit z. T. erheblich reduziert werden konnte. Das Verfahren stellte zudem oftmals eine kostengünstigere Variante zur Beherrschung der Grundwasserproblematik dar, da die Grundwasserabsenkungen entweder auf wenige Teilbereiche der Gesamtmaßnahmen beschränkt oder gänzlich vermieden werden konnte. Die Einsatzbreite des Düsenstrahlverfahren konnte mit diesen Beispielen eindrucksvoll dargelegt und unterstrichen werden.

Da der Erfolg einer Düsenstrahlmaßnahme von etlichen Parametern, die sich oftmals gegenseitig beeinflussen, abhängt, widmete sich ein weiteres Kapitel der Qualitätssicherung und häufig auftretenden Fehlern. Auf den Umfang eines projektorientierten Qualitätsmanagements wurde umfassend eingegangen, die am häufigsten mit dem Düsenstrahlverfahren einhergehenden Fehler aufgezeigt sowie Maßnahmen zur Vermeidung bzw. Sanierung benannt.

Den Abschluß der Diplomarbeit bildete ein Kapitel, in dem ein prägnanter Überblick über die derzeit noch bestehenden Anwendungsgrenzen vermittelt wurde.

Die Entwicklung des Düsenstrahlverfahrens ist wahrscheinlich noch lange nicht abgeschlossen. Sie wird in den nächsten Jahren sicherlich noch einige interessante Anwendungsmöglichkeiten mit sich bringen.

Die Erfahrungen mit dem Düsenstrahlverfahren erstrecken sich noch längst nicht gleichmäßig auf alle Lockergesteine.

In den Grenzbereichen des bergmännischen Vortriebes im Lockergestein stellt das Düsenstrahlverfahren eine technische und wirtschaftliche Alternative dar. Probleme können sich unter Umständen allerdings insbesondere bei horizontal liegenden Säulen aus der Phase der Flüssigkeitsstützung des Hohlraumes bis zum Erreichen der erforderlichen Mindestdruckfestigkeit und generell durch den in großen Mengen anfallende und zu entsorgende Rücklauf suspension ergeben.

L I T E R A T U R V E R Z E I C H N I S

- [1] **Amberg, F.; Schmid, W.; Weidlinger, A. (1994):** *Lockermaterialvortrieb im Zugwald-Tunnel*, Schweizer Ingenieur und Architekt, 1994, Nr. 44, S. 899-903
- [2] **Baumann, V.; Samol, H. (1980):** *Soilcrete-Verfahren – Hochdruckinjektionen zur Lastübertragung und Abdichtung in fein- und grobkörnigen Bodenschichten*, Vorträge der Baugrundtagung 1980 in Mainz, DGEG e.V., 1980, S. 437-463
- [3] **Baumann, V. (1982):** *Dichten durch Injektionen*, Dichtungswände und –sohlen, Mitteilungen des Lehrstuhls Grundbau und Bodenmechanik, TU Braunschweig, Heft 8, 1982, S. 39-65
- [4] **Baumann, V. (1984):** *Das Soilcrete-Verfahren in der Baupraxis*, Vorträge der Baugrundtagung 1984 in Düsseldorf, DGEG e.V., 1984, S. 43-83
- [5] **Blindow, A.; Pistauer, W. (1986):** *Das Hochdruckinjektionsverfahren und seine Anwendung am Oswaldiberg-Tunnel/A*, Tiefbau Ingenieurbau Straßenbau, 1986, Nr. 12, S. 634-638
- [6] **BruX, G. (2001):** *Möglichkeiten und Grenzen der Anwendung des Düsenstrahlverfahrens*, Tiefbau Ingenieurbau Straßenbau, 2001, Nr. 1, S. 25-28
- [7] **Elsen, R.; Lehmann, B.; Räkera, E. (1999):** *Die räumliche Ausbreitung der Einpressmedien – Geophysikalische Untersuchungen*, Tagungsbericht Inject `99, Verlag Glückauf Essen, 1999, S. 129-138
- [8] **Fechtig, R. (1988):** *Erkenntnisse aus ersten Anwendungen des Jetting-Verfahrens im Tunnelbau*, Tiefbau Ingenieurbau Straßenbau, 1988, Nr. 7, S. 364-371
- [9] **Fitl, D. (1997):** *Der Tunnel Frankfurter Kreuz*, Felsbau 15, 1997, Nr. 5, S. 347-350
- [10] **Gudehus, G.; Schwarz, W. (1998):** *Düsenstrahlverfahren in holzhaltigem, nichtbindigem Baugrund*, Vorträge der Baugrundtagung 1998 in Stuttgart, DGGT e.V., 1998, S. 643-655
- [11] **Hanke, E.; Hilmer, K.; Knappe, M.; Weißmantel, R. (1987):** *Erfahrungen mit der Hochdruckinjektion*, Einzelbeiträge zu Spezialfragen des Grundbaues und der Bodenmechanik, Eigenverlag des LGA Nürnberg, 1987, S. 41-50
- [12] **Katzenbach, R.; Boley, C.; Quick, H. (1998):** *Vertragsrelevante Naturphänomene bei der Ausführung von Abdichtungsinjektionen*, Vorträge der Baugrundtagung 1998 in Stuttgart, DGGT e.V., 1998, S. 249-261

- [13] **Kluckert, K. D. (1996):** *20 Jahre HDI in Deutschland – Von Fehlerquellen über die Schäden zur Qualitätssicherung*, Vorträge der Baugrundtagung 1996 in Berlin, DGGT e.V., 1996, S. 235-258
- [14] **Kühner, W.; Trunk, U. (1998):** *Vortriebssicherung beim U-Bahn-Bau mit Dichtwänden aus Soilcrete-Lamellen*, Vorträge der Baugrundtagung 1998 in Stuttgart, DGGT e.V., 1998, S. 123-131
- [15] **Kutzner, Ch. (1991):** *Injektionen im Baugrund*, Enke Verlag Stuttgart
- [16] **Liebsch, H.; Haberland, Ch. (1998):** *Soft Ground Tunneling in Urban Areas by NATM (Städtischer Tunnelbau im Lockergestein nach der NÖT)*, Felsbau 16, 1998, Nr. 2, S. 78-90
- [17] **Martak, L. (1986):** *Hochdruckbodenvermörtelung aus grundbautechnischer Sicht*, Zement und Beton, 1986, Heft 2, S. 82-86
- [18] **Martak, L. (1999):** *FBM-Injektionen und Düsenstrahlverfahren, Wunderverfahren mit kleinen Schönheitsfehlern*, Tagungsbericht Inject `99, Verlag Glückauf Essen, 1999, S. 119-128
- [19] **Martak, L.; Budil, A.; Winkler, W. (1998):** *Jet-Grouting Schirme im überbauten Bereich, Vor- und Nachteile*, Vorträge der Baugrundtagung 1998 in Stuttgart, DGGT e.V., 1998, S. 93-120
- [20] **Maschwitz, G.; Cunze, G. (1988):** *Prüfung von neu entwickelten Verfahren des Spezialtiefbaus am Beispiel des „Soilcrete“-Verfahrens*, Festschrift aus Anlass des 75. Geburtstages von Prof. E. Lackner, Mitteilungen des IGBE Universität Hannover 1988, Heft 22, S. 17-31
- [21] **Meyer, B. (1987):** *Horizontales Jet-Grouting im Tunnelbau*, Cementbulletin, 1987, Nr. 22
- [22] **Raabe, E.-W.; Wehmeier, H.-J.; Sondermann, W. (1990):** *Moderne Injektionstechniken für Vortriebssicherung, bebauungs- und Grundwasserschutz*, Vorträge der Baugrundtagung 1990 in Karlsruhe, DGEG e.V., Sonderdruck der Fa. Keller Grundbau GmbH, 1990
- [23] **Riedmüller, G.; Schubert, W.; Semprich, S. (Hrsg., 2000):** *Düsenstrahlverfahren*, Beiträge zum 15. Christian Veder Kolloquium, TU Graz, 2000, Heft 7
- [24] **Rizkallah, V.; Hilmer, K. (1989):** *Bauwerksunterfangung und Baugrundinjektion mit hohen Drücken (Düsenstrahlinjektion)*, Mitteilungen des IGBE Universität Hannover, 1989, Heft 26, S. 45-57

- [25] **Schaiter, B. (1998):** *Soft ground tunnelling with low cover under one of Europe's busiest Highways (Lockergesteinsvortrieb mit geringer Überlagerung unter hochfrequentiertem Verkehrsknoten)*, Felsbau 16, 1998, Nr. 2, S. 109-116
- [26] **Schmidt, H. G.; Seitz, J. (1998):** *Grundbau*, Sonderdruck aus dem Beton-Kalender 1998 der Fa. Bilfinger+Berger GmbH
- [27] **Stein, D.; Gerdes, K. (1988):** *Injektionsverfahren als Vorausmaßnahme für den Tunnelvortrieb bei partiell schwierigem Gebirgsverhalten*, Tunnel, 1988, Nr. 1, S. 13-23
- [28] **Stelzl, H. (1986):** *Anwendung der Hochdruckbodenvermörtelung zur Herstellung neuer Gründungselemente und als Hohlraumsicherung im Tunnelbau*, Zement und Beton, 1986, Heft 2, S. 93-97
- [29] **Stocker, M. (1999):** *Zum Stand der Technik der Hochdruckinjektion unter besonderer Berücksichtigung der Berliner Erfahrungen*, VDI Berichte Nr. 1436, 1999, S. 187-203
- [30] **Stötzer, E.; Schwank, S. (1996):** *Suspensionsbehandlung – Suspensionsentsorgung*, Vorträge der Baugrundtagung 1996 in Berlin, DGGT e.V., 1996, S. 561-569
- [31] **Trunk, U. (1996):** *Horizontaler Soilcrete-Dichtschirm gegen drückendes Grundwasser beim U-Bahn-Bau*, Vorträge der Baugrundtagung 1996 in Berlin, DGGT e.V., 1996, S. 457-462
- [32] **Trunk, U.; Otterbein, R. (1999):** *Einfluss der Qualitätssicherung auf Ausführungssicherheit und Wirtschaftlichkeit bei schwierigen Düsenstrahl-Maßnahmen*, Tagungsbericht Inject '99, Verlag Glückauf Essen, 1999, S. 177-189
- [33] **Winkler, F. (1997):** *Soilcrete-Pfähle zur Tunnelsicherung am Beispiel „Zammer Tunnel (Ö)“*, Pfahl-Symposium 1997, TU Braunschweig 1997, S. 253-258
- [34] **Zysk, K.-H.; Otto, F.; Benig, A.; Hahn, W. (1999):** *Einsatz von Steinkohlenflugasche in Suspensionen für das Düsenstrahlverfahren*, Tagungsbericht Inject '99, Verlag Glückauf Essen, 1999, S. 283-301

Normen, Richtlinien, etc.

- [35] **DIN 4093** (September 1987) – Einpressen in den Untergrund
- [36] **prEN 12 715** (April 1997) – Injektionen
- [37] **prEN 12 716** (April 1997) – Düsenstrahlverfahren
- [38] **Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung Z-34.4-3** – Düsenstrahlverfahren „Bilfinger + Berger (HDI)“, Deutsches Institut für Bautechnik, 1997

- [39] **Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung Z-34.4-5** – Düsenstrahlverfahren „Stump-Jetting“, Deutsches Institut für Bautechnik, 1999

Firmenprospekte

- [40] **Bauer** Spezialtiefbau GmbH, Schrobenhausen
- [41] **Bilfinger + Berger** Bauaktiengesellschaft, Mannheim
- [42] **insond** Spezialtiefbau GmbH, Wien
- [43] **Keller** Grundbau GmbH, Offenbach
- [44] **Rodio** GmbH Spezialtiefbau, Berlin
- [45] **Stump** Spezialtiefbau GmbH, Langenfeld

THESEN ZUR DIPLOMARBEIT

Thema: **Anwendung des Düsenstrahlverfahrens im Tunnelbau**

- Das Düsenstrahlverfahren ist eines der am universellsten im Tiefbau einsetzbaren Verfahren. Es konnte im Tunnelbau im Lockergestein neue Wege eröffnen, da mit ihm eine effiziente vorausseilende Sicherung oder eine relativ einfach auszuführende Abdichtung möglich ist.
- Das Verfahren zeichnet sich u. a. durch eine hohe geometrische Flexibilität aus. Es sind sowohl einfache Säulen, als auch Lammellen, Halb- und Viertelsäulen sowie Kombinationen der einzelnen Elemente untereinander möglich.
- Die Erfahrungen mit dem Düsenstrahlverfahren erstrecken sich bisher jedoch noch nicht auf alle Lockergesteine. Die Entwicklung des Verfahrens ist längst noch nicht abgeschlossen.
- Die Anwendungsgrenzen der üblichen Injektionen wurden mit dem Düsenstrahlverfahren bis in den feinkörnigen Bereich erweitert. Selbst in Tonen ist eine erfolgreiche Anwendung möglich. Der Anwendungsbereich des Düsenstrahlverfahren erstreckt sich damit praktisch über das gesamte Kornverteilungsband.
- Das übliche vertikale Düsenstrahlverfahren konnte ohne großartige Verfahrensänderungen in die Horizontale übertragen werden. Damit ergaben sich eine Vielzahl neuer Anwendungsmöglichkeiten, z. B. die Herstellung von horizontalen Düsenstrahlschirmen oder Dichtblöcken.
- Im Tunnelbau stellen Düsenstrahlschirme dabei jedoch die Hauptanwendung des Verfahrens dar. Sie ermöglichen eine vorausseilende Ortsbrust und die gleichzeitige Sicherung der bestehenden Ortsbrust. Düsenstrahlschirme

bilden die Grundlage für die Anwendung der NÖT in Problemböden. So ist es möglich, auch rollige Böden und Böden mit veränderlich festen Anteilen zu durchfahren.

- Mit dem Düsenstrahlverfahren hergestellte Dichtschirme stellen eine wirksame Maßnahme gegen Grundwassereinbruch in den Tunnelvortrieb dar. Gleichzeitig ermöglichen Dichtwände die Ausführung von Baugruben und Vortrieben im Grundwasser.
- Die unsachgemäße Anwendung des Düsenstrahlverfahrens kann mit einer großen Anzahl möglicher Fehler behaftet sein. Eine genaue Kenntnis des Verfahrens, der Anwendungsgrenzen, sowie der Bodenkennwerte ist zur Vermeidung dieser unbedingt notwendig.
- Für die ordnungsgemäße Herstellung der Düsenstrahlelemente ist ein ausgefeiltes Qualitätsmanagement erforderlich. Die Düsenstrahlparameter und die Ergebnisse des Düsens müssen stetig überprüft, protokolliert und ausgewertet werden.
- Zur Festlegung der endgültigen Säulenparameter sind stets Probesäulen erforderlich. Diese werden auch in den „Allgemeinen Bauaufsichtlichen Zulassungen“ und der prEN 12 716 gefordert.
- Die Qualitätskontrolle beinhaltet gerade bei Tunnelvortrieben mit geringer Überdeckung oder setzungsempfindlicher Bebauung entsprechende Messungen zur Setzungskontrolle. Dabei haben sich Referenzpunkte an der Oberfläche und ihre kontinuierliche Vermessung bestens bewährt.
- Die an den Einsatz des Düsenstrahlverfahrens gebundenen Erwartungen sind oftmals höher sind als die derzeit vorhandenen technischen Möglichkeiten. Auch ein noch so ausgefeiltes Überwachungsnetz als Grundlage eines

projektorientierten Qualitätsmanagements kann die derzeit noch bestehenden Verfahrensunzulänglichkeiten nicht vollständig aufwiegen.