Bauhaus-Universität Weimar

Fakultät Bauingenieurwesen

Professur Grundbau

Diplomarbeit

Einflussparameter der Druckfestigkeit bei der Düsenstrahlvermörtelung

eingereicht von cand. Ing. **Albrecht Kister**

geb. am 04.06.1975 in Bad Salzungen

Seminargruppe B/95/E

Matrikel-Nr. 950625

Erstprüfer:	Prof. Dr.-Ing. K. J. Witt
Zweitprüfer:	Dr.-Ing. R. Wendt
Praxisbetreuer:	Dipl.-Ing. L. Liersch
	Firma Bauer Spezialtiefbau GmbH Schrobenhausen
Ausgabedatum:	12.02.2001
Abgabedatum:	14.05.2001

Vorsitzender des Prüfungsausschusses: Prof. Dr.-Ing. Rautenstrauch

Dipl.-Reg.-Nr. B/2001/49

2 Einleitung und Historie

Das Düsenstrahlverfahren ist als ein Teil des Spezialtiefbaus heutzutage nicht mehr wegzudenken. Der vielfältige Einsatzbereich und das dadurch scheinbar einfache Lösen kompliziertester Bauaufgaben lassen es bei der Findung ökonomischer und ökologischer Lösungen immer wieder als Vorzugsvariante hervorgehen. Das Düsenstrahlverfahren stellt durch die Kombination von Maschinentechnik, Verfahrenstechnik und Baustoffeinsatz ein höchst anspruchsvolles System dar, bei dem ständig an der Optimierung der einzelnen Bestandteile geforscht wird.

Da das Endprodukt meist auf Dauer unzugänglich bleibt, wird der Erfolg der Maßnahme lediglich am Funktionieren bzw. Versagen – Dichtigkeit, Tragfähigkeit – festgemacht. Während der Herstellung bleiben viele Vorgänge im Untergrund unerkannt. Theoretische Überlegungen sind nur schwer zu bestätigen und Vorraussagen über erreichbare Eigenschaften nur in begrenztem Maße möglich. „Trotz der Ausführungsrisiken, die insbesondere bei einer Kombination von Trag- und Dichtfunktion bei diesem Verfahren bestehen, hat es sich bei Unterfangungs- und Sicherungsmaßnahmen als Standard durchgesetzt. Der Erfolg ist auf die Flexibilität und auf die kurze Ausführungsdauer zurückzuführen, was gerade beim Bauen im Bestand zu wirtschaftlichen Vorteilen führt. Die weitere Entwicklung der Technik und der Überwachung zielt auf eine bessere Qualitätssicherung. Die Berichte über hervorragende Ausführungen einerseits und über gravierende Schäden andererseits zeigen, dass hier in besonderem Maße auf Seiten des Planers wie auch auf Seiten der Ausführung Sachverstand und Erfahrungen sowie ein angemessenes Qualitätsmanagement gefordert sind.“ [20]

Unter dem Begriff Düsenstrahlverfahren wird nach „Allgemeiner bauaufsichtlicher Zulassung“ [22] eine „Bodenvermörtelung“ verstanden, bei der lt. EN 12716 [24] Lockergestein (oder Fels mit mäßiger Kornbindung) in seine Bestandteile zerlegt und mit einem Zementierungsmittel vermischt oder teilweise durch dieses Mittel ersetzt wird. Das Auflösen des Bodengefüges wird durch einen energiereichen Flüssigkeitsstrahl bewirkt, wobei die Flüssigkeit die zementhaltige Mischung sein kann.

Das Verfahren wurde ursprünglich im Steinkohlebergbau zum staubfreien Abbau der Kohle sowie in der Erdölindustrie bei Tiefenbohrungen eingesetzt. Anfang der 70‘er Jahre übertrug man zum ersten Mal in Japan das Verfahren ins Bauwesen. Diese neue Methode der Bodenverbesserung wurde als „Jet Grouting“ bzw. „Hochdruckinjektion“ bezeichnet [7][9]. Im deutschen Sprachraum wird der Begriff „Düsenstrahlverfahren“ oder „Düsenstrahlinjektion“ gebraucht. Durch die zunehmende Anglisizierung tritt „Jet Grouting“ jedoch immer häufiger auf. Daneben existieren die z. T. durch die ausführenden Firmen geschützten Bezeichnungen „Soilcrete“ (Firma Keller), Rodinjet (Firma Rodio), „Soiljet“ (Firma Insond), aber auch „Hochdruckbodenvermörtelung“ und „Jetting“ werden benutzt (EN 12716). Die Bauer Spezialtiefbau AG wendet dieses Verfahren seit 1983 unter der Bezeichnung „Hochdruckinjektion“ (im folgenden häufig „HDI“ abgekürzt) an.

Da erst seit diesem Jahr die EN 12716 (03.1999) [24] „Ausführungen von besonderen geotechnischen Arbeiten (Spezialtiefbau) – Düsenstrahlverfahren (Hochdruckinjektion, Hochdruckbodenvermörtelung, Jetting)“ gilt, arbeiteten die meisten Anwender bisher nach firmenindividuellen Zulassungen. Hierin sind die Randbedingungen zur Anwendung des Verfahrens beschrieben [9].

3 Das Verfahren

Das Düsenstrahlverfahren hat für zeitlich begrenzte und für ständige Bauwerke in Bereichen des Grundbaus, des Tunnelbaus und der Baugrubensicherung in den letzten Jahren immer mehr an Bedeutung gewonnen. Zu den wesentlichen Anwendungsgebieten zählen die Erstellung wasserdichter Baugrubenumschließungen, Lückenschließungen (z.B. bei Rohrdurchführungen durch Schlitzwände), Dichtwände und Dichtsohlen, Unterfangungen, Tiefgründungen, Pfahlfußaufweiterungen und Pfahlaufstandskörper sowie bei der NÖT (Neue Österreichische Tunnelbauweise) die Errichtung von Schirmdecken – Hilfsgewölben aus horizontalen Säulen. Darüber hinaus wird es im Bergbau zur Kluftverfüllung und zur allgemeinen Bodenverbesserung eingesetzt [9][21].

Die Vorteile des Düsenstrahlverfahrens: [1-7, 18]

- Herstellung Körper und Elemente beliebiger geometrischer Form,
- in fast allen Lockergesteinen durchführbar,
- geringer Bohraufwand,
- Länge der Säulenelemente exakt steuerbar,
- gute Anpassung an Fundamentunterkanten bestehender Bauwerke,
- anwendbar für die Verfestigung von wassergesättigtem Lockergestein,
- umweltverträglich,
- Einsatz auch in beengten Raumverhältnissen wie Kellern,
- erschütterungsarmes Verfahren,
- kurze Herstellungszeiten.

3.1 Ausgangssuspension

Die Suspension, die in den Boden eingebracht wird, besteht aus einem Bindemittel-Wasser-Gemisch, welches neben Füllern und Flugaschen zur Stabilisierung Bentonit – Tone mit hohem Quellvermögen – enthalten kann. Die Bindemittel sind hauptsächlich mineralischen Ursprungs und binden hydraulisch ab. Dazu gehören Portland- und Hochofenzemente nach DIN 1164 sowie gegebenenfalls Zusatzmittel, Füller und Zusatzstoffe wie Steinkohlenflugasche (DIN EN 450) mit entsprechender bauaufsichtlicher Zulassung [22]. Einige Baustoffhersteller bieten speziell für das Düsenstrahlverfahren bereits mit Zusätzen versehene Fertigcompounds an.

Bei der Auswahl des Bindemittels muss besonderes Augenmerk auf die Fließ- und Pumpfähigkeit und auf eine geringe Kriech- und Schwindneigung gelegt werden.

Die Vorgaben der EN 12716 [24] sind so, dass bereits Stoffe zugelassen werden könnten, die einen Zement teilweise oder komplett substituieren, z.B. latent hydraulische Stoffe, Puzzolane und Steinkohlenflugasche oder andere hydraulische Bindemittel, wie z. B. hydraulisch erhärtende Kalke.

Am häufigsten werden schnell erhärtende Portlandzemente wie CEM I 32,5 R oder CEM I 42,5 R angewandt. Der Wasser-Bindemittel-Wert sollte zwischen 0,5 bis 1,5 liegen. Beim WB- und WBL-Verfahren (siehe *3.2.2 Herstellungsarten*) bei dem ein Wasserstrahl den Boden aufschneidet, sowie beim Düsen im Grundwasser, muss das Verhältnis entsprechend niedriger gewählt werden.

Da selten eine schnelle Festigkeitsentwicklung verlangt wird, scheint bei höheren W/Z-Werten der Einsatz von wirtschaftlicheren Hochofenzementen als vorteilhaft. Dieser bewirkt jedoch auf Grund seiner härteren Körnung einen höheren Verschleiß, hauptsächlich der Düsen.

Auf Grund des neutralen Verhaltens des Zementes gegenüber der Umwelt kann das Verfahren auch ohne Bedenken im Grundwasser ausgeführt werden [3]. Eine pH-Wert Erhöhung des Grundwassers in unmittelbarer Umgebung der Injektionsmaßnahme ist nur von kurzer Dauer und unbedenklich. Nach dem deutschen Wasserhaushaltsgesetz (WHG) bedarf das Einleiten von Stoffen in das Grundwasser einer behördlichen Genehmigung. „Eine Erlaubnis für das Einleiten von Stoffen in das Grundwasser darf nur erteilt werden, wenn eine schädliche Verunreinigung des Grundwassers oder eine sonstige nachteilige Veränderung seiner Eigenschaften nicht zu besorgen ist“ (WHG § 34, Abs.1)[8, (S.271)].

Aus diesen Gründen wurde die chemische Bodeninjektion weitgehend verdrängt.

3.2.1 Herstellung

Die Herstellung der Düsenstrahlkörper erfolgt in Zwei Phasen. (*Abb. 1*)

1. Phase - Das Bohren:

Das HDI-Gestänge (bis ∅133 mm) wird im Drehbohrverfahren mittels Außenspülung (zum Teil mit der Zementsuspension aus dem aufbereiteten Rückfluss) bis zur Sohle des späteren Düsenstrahlkörpers abgeteuft. Der Bohrquerschnitt wird dabei aufgeweitet, um einen entsprechend großen Ringraum um das Gestänge für den Abfluss der Bohrspülung, bzw. Rückflusssuspension zu erhalten. Dazu werden Bohrköpfe, deren Außenabmessungen größer als die Gestängedurchmesser sind, verwendet. Das Abbohren geschieht mit Bindemittelsuspension um den Bohrkanal zu stabilisieren, und um das Bohrgut mit der aufsteigenden Suspension nach oben zu befördern.

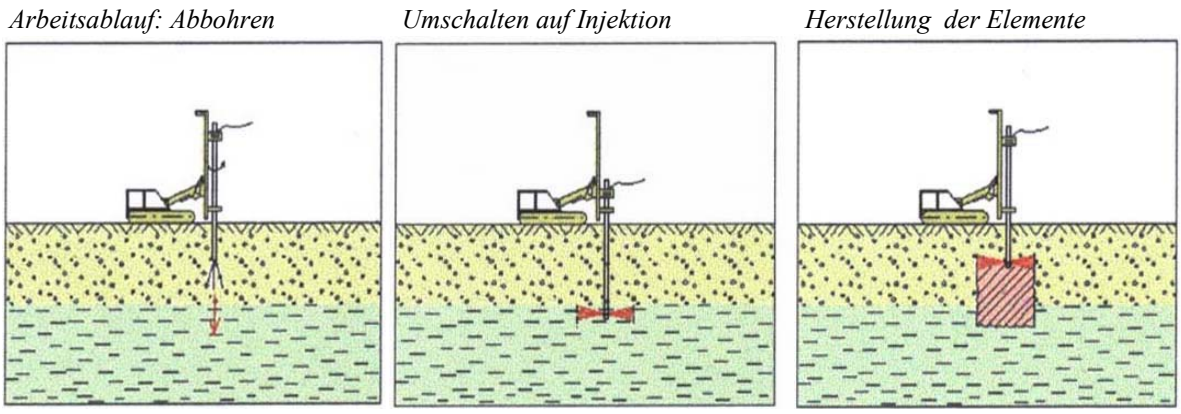
2.Phase – Hochdruckinjektion:

Oberhalb der Bohrkrone im Injektionsgestänge befindet sich der Düsenhalter mit ein oder zwei Düsen. Aus ihnen tritt mit Geschwindigkeiten um 300 m/s bei Pumpendrücken zwischen 100 und 600 bar (Druck vor Austritt aus der Düse) ein waagerechter Düsenstrahl aus. Dieser Flüssigkeitsstrahl aus Wasser oder einem Wasser-Bindemittel-Gemisch, der zur Erhöhung der Erosionskraft mit Pressluft ummantelt werden kann, bewirkt ein Auflösen der vorhandenen Bodenstruktur. Nun wird langsam (mit 1-12 min/m-Säulenhöhe) bei sich drehendem HDI-Gestänge, der Boden von unten nach oben radial aufgeschnitten bzw. ausgefräst. Dieser Boden vermischt sich mit der Bindemittelsuspension zu einem Mörtel, der zu einem zylindrischen Körper erstarrt. Über den Ringraum zwischen Gestänge und Bohrlochwandung tritt ein Teil des Boden-Bindemittel-Wasser-Gemisches als Rückfluss zu Tage. Dies ist auch erforderlich, da sonst ein Druckausgleich nicht zustande käme, und unerwünschte Hebungen bei Unterfangungen möglich wären. In manchen Fällen sind Entlastungsbohrungen zur Rückflusssicherung nötig. Das Arbeiten mit Luftdruck verbessert die Austragung der Bodensuspension [10]. Bei größeren Projekten wird der Rückfluss in Entsandungsanlagen wiederaufbereitet, um als Bohrspülung bzw. als Düssuspension wieder eingesetzt zu werden. Ansonsten wird er in Absetzbecken gepumpt und nach dem Erhärten auf Deponien zur Entsorgung gebracht. In Abhängigkeit von den Fertigungsparametern wie z. B. Druck, Ziehzeit und Gestängedrehzahl sowie der Bodenart werden Durchmesser zwischen wenigen Dezimetern und mehreren Metern erreicht. „Eine Obergrenze des Säulendurchmessers von rund 3,0 bis 3,3 m (3,5m) ist im groben Kies mit einem mittleren Korndurchmesser von etwa 60 mm gegeben....“.[8] Die Parameter wirken sich auf das im Boden entstehende Gemisch und

somit auf die erreichbaren Festigkeiten des Erdbetons aus. „Durch das Auflösen der Bodenstruktur (während des Düsens) entsteht im Baugrund eine räumlich begrenzte, temporäre Minderung der Festigkeit. Erddruckumlagerungen am Rotationskörper und die stützende Eigenschaft der Suspension gewährleisten die temporäre Standsicherheit der einzelnen Körper.“ [10]

Bei besonderen Beanspruchungen, wie die Aufnahme hoher Zugkräfte, können auch durch Stahlprofile bewehrte Düsenstrahlkörper hergestellt werden. Diese haben zusätzlich den Vorteil, dass Düsschatten, die auf Grund von im Baugrund befindlichen Hindernissen entstanden sind, keinen Einfluss auf die Tragfähigkeit bekommen. Hierzu zählen die sogenannten PH-Pfähle der Philipp-Holzmann AG [12].

Abbildungen 1: Herstellung eines Düsenstrahlkörpers [4]:

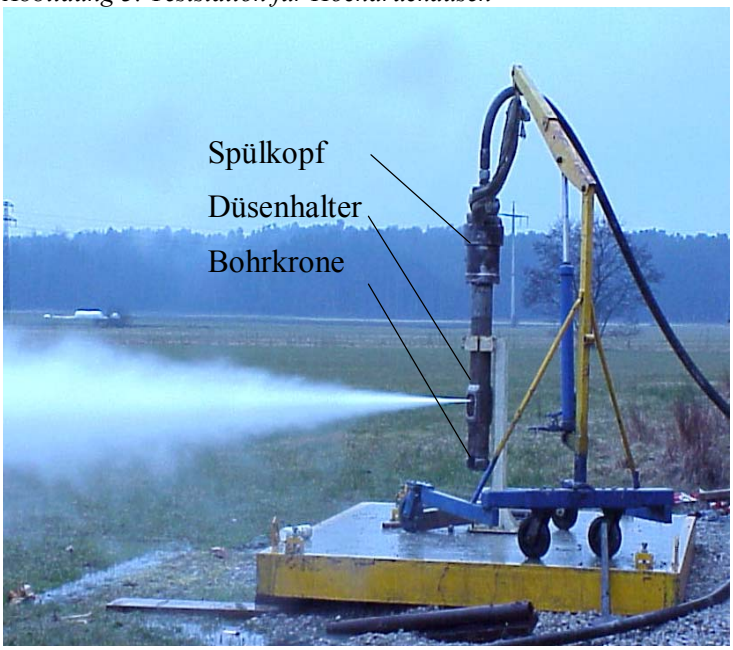


Die folgenden zwei Abbildungen zeigen wie sich der Düsstrahl in der Luft verhält. Auf der *Abbildung 2* ist ein HDI-Bohrgerät (BAUER UBW) beim Ausspülen der Düseinheiten dargestellt. Die *Abbildung 3* (nächste Seite) zeigt einen Versuchsstand auf dem Gelände der Firma Bauer in Schrobenhausen, auf dem Neuentwicklungen bei unterschiedlichen Parametern ausgetestet werden können.

Abbildung 2: Form eines Hochdruckwasserstrahls in der Luft



Abbildung 3: Teststation für Hochdruckdüsen



Spülkopf – leitet die Medien Suspension, Wasser, Luft (soweit vorhanden) in die jeweiligen Gestängekanäle ein.

Düsenhalter – enthält die Düseinheiten.

Bohrkrone – mit innenliegendem Spülkanal für Suspensions- oder Wasserspülung.

3.2.2 Herstellungsarten

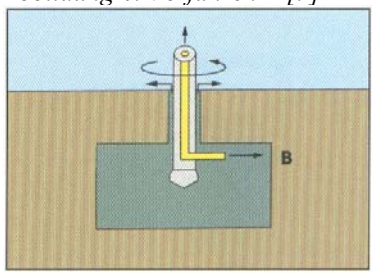
Vom Bauer HDI-Düsenstrahlverfahren unterschiedet man 4 Varianten [4][9]:

1-Phasensystem (**B**):

Hochdruckschneiden mit **B**indemittelsuspension:

Der Schneidstrahl besteht aus einer Bindemittelsuspension; er schneidet die Bodenstruktur auf und vermörtelt sie.

Abbildung 4: Verfahren B [9]

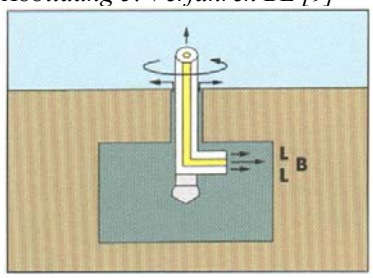


2-Phasensystem (**BL**):

Hochdruckschneiden mit **B**indemittelsuspension und **L**uftunterstützung des Schneidstrahls:

Hier besteht der Schneidstrahl aus Bindemittelsuspension und zusätzlich einem koaxialen Druckluftstrahl. Diese Variante bedingt ein Zweikanalbohrgestänge, welches für Luft und Suspension zwei getrennte Zulaufkanäle besitzt.

Abbildung 5: Verfahren BL [9]

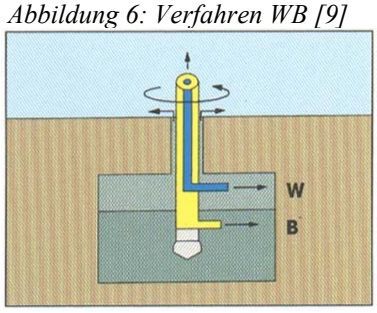


2-Phasensystem (**WB**):

Hochdruckschneiden mit **W**asser, Niederdruck-Verfüllung mit **B**indemittelsuspension:

Der Boden wird mit einem Hochdruck-Wasserstrahl gelöst. Die Bindemittelsuspension wird über separate Düsen mit geringem Druck verpumpt. Dieses Verfahren bedingt ein Zweikanalbohrgestänge mit zwei getrennten Zulaufkanälen für Wasser und Suspension.

Abbildung 6: Verfahren WB [9]

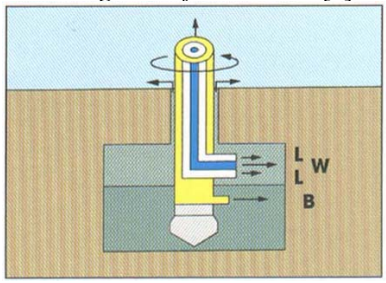


3-Phasensystem (**WBL**):

Hochdruckschneiden mit **W**asser und **L**uftunterstützung des Schneidstrahls, Niederdruck-Verfüllen mit **B**indemittelsuspension:

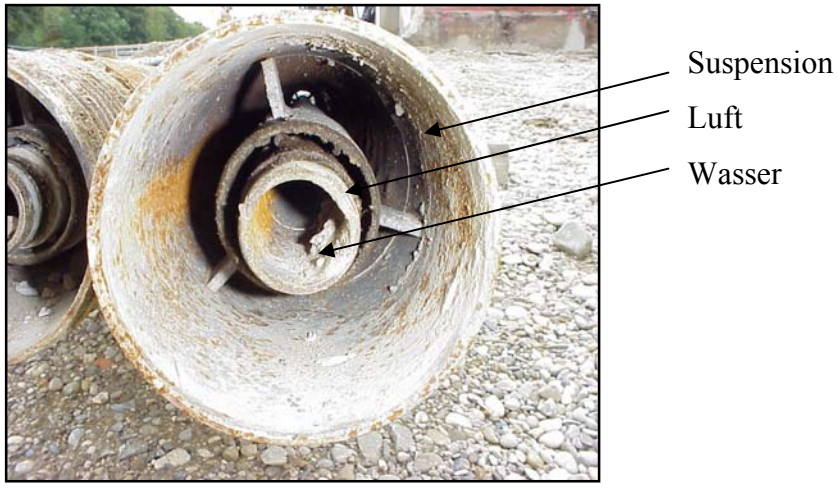
Wasser wird als Schneidstrahl mit einem koaxialen Druckluftstrahl verwendet. Die für die Vermörtelung erforderliche Bindemittelsuspension wird über separate Düsen mit geringem Druck verpumpt. Diese Variante bedingt ein Dreikanalbohrgestänge *(Abb. 8)*, welches für

Abbildung 7: Verfahren WBL [9]



Luft, Wasser und Suspension drei getrennte Zulaufkanäle besitzt.

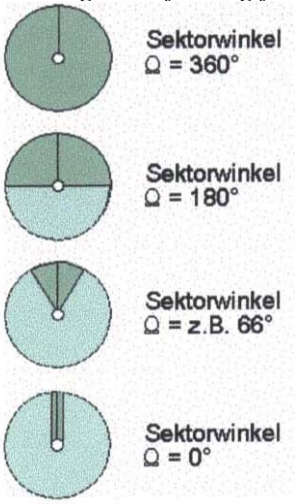
Abbildung 8: Dreikanalbohrgestänge



3.3 Ausführungsformen und Anwendungen

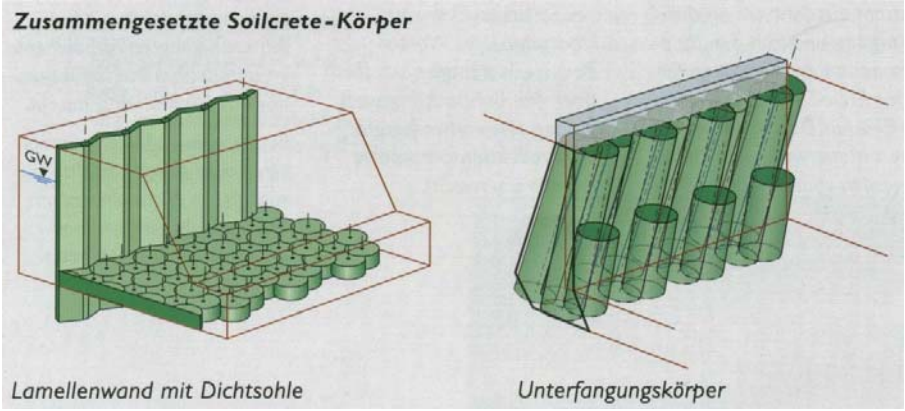
Die Vielzahl der Anwendungsmöglichkeiten kommt unter anderem auf Grund unterschiedlich herstellbarer geometrischer Körper zustande. Neben den Voll- oder Rundsäulen können durch teilweises oder gar nicht Schwenken des Gestänges Säulenabschnitte, Halbsäulen oder Wände entstehen.

Abbildung 9: Ausführungsformen [4]



- Rundsäule
- Halbsäule
- Segmentsäule
- Scheibe

Abbildung 10: Anwendung Düsenstrahlverfahren [11]



Stellvertretend für die o.g. Anwendungen zeigt die *Abbildung 10* zwei Anwendungsbeispiele. Dabei handelt es sich um Bauwerke, die in unterschiedlichen Ausführungsvarianten hergestellt werden. Nachfolgend sind freigelegte Probesäulen von zwei verschiedenen Versuchsfeldern abgebildet. Es sind Einzelsäulen, zusammenhängende Säulen, z. B. für Sohlen (*Abb. 11*) und Wandelemente (*Abb. 12*), bei denen die Herstellparameter variiert wurden.

Abbildung 11: Primärsäulen einer Dichtsohle

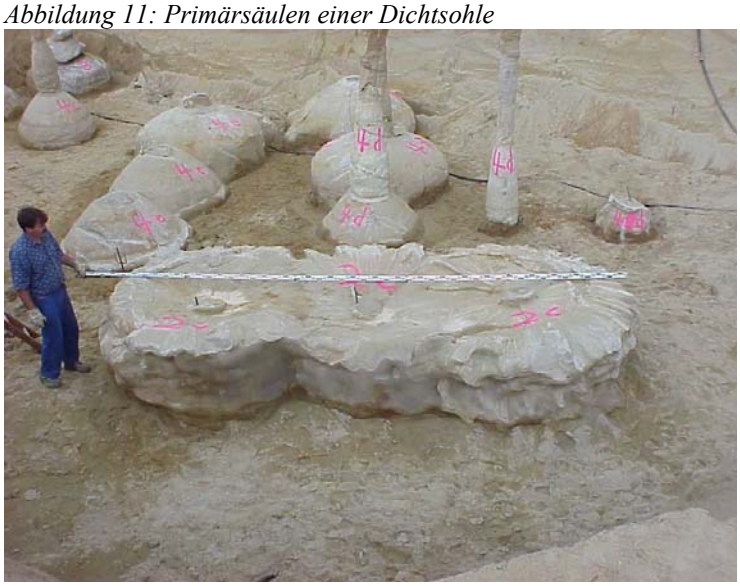
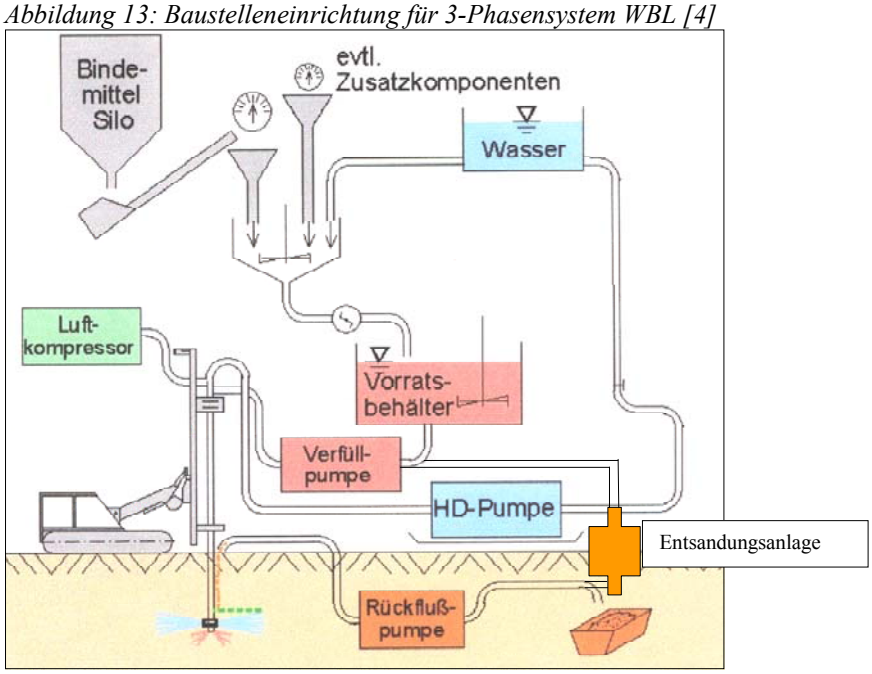


Abbildung 12: Ausführungsformen



3.5 Baustelleneinrichtung

Abbildung 13: Baustelleneinrichtung für 3-Phasensystem WBL [4]



Die *Abbildung 13* zeigt die Anordnung und Verknüpfung der Komponenten beim 3-Phasensystem (siehe oben). Wie bereits erwähnt wird der Rückfluss zunehmend in Entsandungsanlagen regeneriert und dem Abbohrprozess wieder zugeführt.

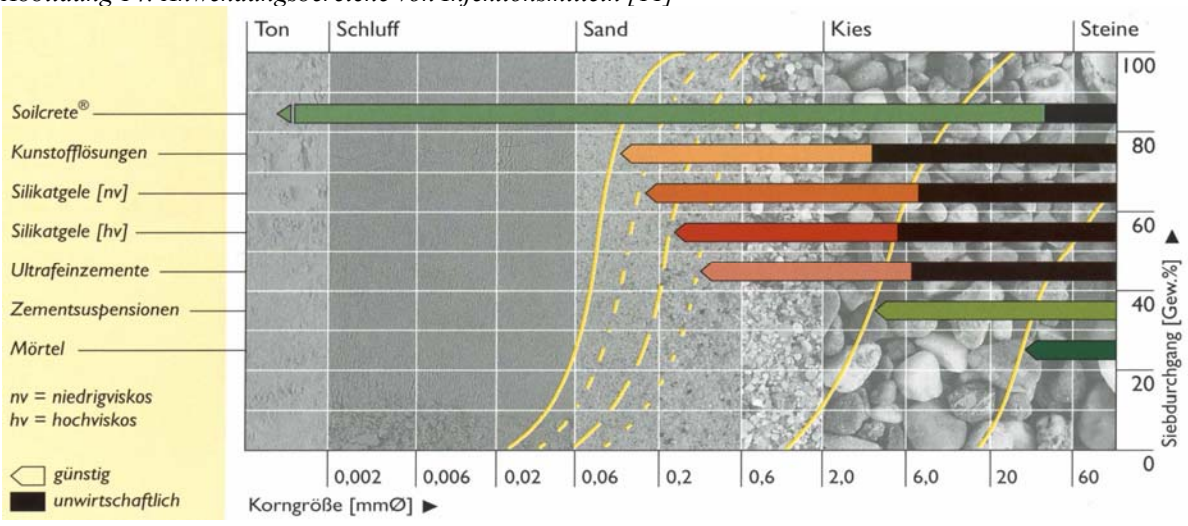
Das Bohrgerät besteht aus einem herkömmlichen Raupenfahrwerk oder Geräteträger an das die Vorrichtungen für das Düsenstrahlverfahren angebaut sind. Die Bohrgeräte variieren je nach Anforderungen und Anwendungsgebiete [12].

Im Anhang sind Maschinenbeispiele für eine Baustelleneinrichtung enthalten (*Anlage I*).

3.6 Einsatzgrenzen

Wie man in *Abbildung 14* sehen kann ist das Düsenstrahlverfahren in fast allen Baugrundsituationen einsetzbar. Es besitzt eine hohe Toleranz auf Inhomogenitäten wie Groblagen, Auffüllungen, Schichtungen sowie Reste früherer Gründungen [20]. Das zeichnet es gegenüber anderen Injektionsverfahren aus, bei denen ein wesentlich intensiverer Baugrundaufschluss vonnöten ist. Die Anwendungsgrenzen sind fast ausschließlich durch die Festigkeit des Baugrundes gesetzt [8]. Diese wird bei bindigen Böden durch die Kohäsion und in nicht bindigen Lockergesteinen durch die Lagerungsdichte bestimmt. In grobkörnigen Böden liegt die Obergrenze bei einem Korndurchmesser von ca. 60 mm. Es können auch Felsgesteine erfolgreich behandelt werden. Hierbei setzt die Wirtschaftlichkeit Grenzen. In organischen Böden lässt sich das Verfahren zwar anwenden, es muss aber mit wesentlich geringeren Festigkeiten gerechnet werden. Um die erforderliche Dichtigkeit einer Sperrsohle zu erreichen, sind dementsprechend hohe Säulen (bis ca. 2,50 m) herzustellen. Nachteilig wirken sich Findlinge, Fundamentreste oder andere bei der Baugrunduntersuchung nicht örtlich eindeutig bestimmbare Gegenstände im Boden aus. Es kann zu sogenannten Düsschatten kommen. Diese führen unter Umständen zu Leckagen in Dichtsohlen, welche sich nur schwer lokalisieren lassen. Ein erneutes Düsen des gesamten Verdachtsbereiches ist nötig. Der gleiche Effekt kann entstehen, wenn die auf dem Düsplan angenommenen Säulendurchmesser nicht stimmen und dadurch Bodenbereiche nicht vom Schneidstrahl erreicht werden können.

Abbildung 14: Anwendungsbereiche von Injektionsmitteln [11]



3.7 Auswahlkriterien

Kriterien für die Wahl des geeigneten Verfahrens und der Materialien sind neben der Baugrund- und Grundwassersituation der Umfang der Baumaßnahme, die Zugänglichkeit, die verfügbare Arbeitsfläche, Bauzeit und der Bauzustand bei Unterfangungen [20]. Vom Baugrund werden die folgenden bodenmechanischen Parameter benötigt: Rohdichte, Wassergehalt/ Grundwasserstand, Kornverteilung, Lagerungsdichte, Kohäsion, Scherparameter, Druckfestigkeit, Chemismus [10].

Ein entscheidender Punkt bei der Wahl des Injektionsverfahrens ist dessen Empfindlichkeit auf Unregelmäßigkeiten im Baugrund. Einige Methoden benötigen daher eine intensivere Baugrunderschließung als andere. Diese hängt neben wirtschaftlichen Gesichtspunkten auch von der Zugänglichkeit ab.

Die Wahl wird soweit vorhanden über Erfahrungen aus vorangegangenen Baumaßnahmen getroffen. Liegen nur ungenügende Informationen vor, müssen die optimalen Parameter durch Probesäulen ermittelt werden. Diese sollten auch bei Dichtsohlen in der späteren Tiefenlage hergestellt werden, wobei dann wiederum das Problem der Kontrollierbarkeit besteht. “Da weder die Zulassung noch die EN 12716 solche Vorversuche zwingend fordern, sollte der Umfang im Einzelfall anhand des Risikos unter den Beteiligten festgelegt werden. Bei Unterfangungen geringer Tiefe, die nicht gleichzeitig mit Wasserdruck belastet werden, kann (...) darauf verzichtet werden, wenn Erfahrungen in den zu festigenden Böden vorliegen.“[20]

Probesäulen dienen der Ermittlung von Verpressparametern. Diese haben entscheidenden Einfluss auf den erreichbaren Säulendurchmesser und damit auf das Bohr- bzw. Düsraster. Darüber hinaus wird die geeignete Suspension getestet.

Die folgenden Parameter sind einzustellen:

- Ziehzeit des Gestänges [m/min] od. [min/m],
- Umdrehung des Gestänges [U/min],
- Düsenzahl [St],
- Düsendurchmesser [mm],
- Düsenstellwinkel [°],
- Pumpdruck - Wasser [bar],
- Pumpdruck - Suspension [bar],
- Pumpvolumen - Wasser [l/min],
- Pumpvolumen - Suspension [l/min],
- Luftdruck [bar],

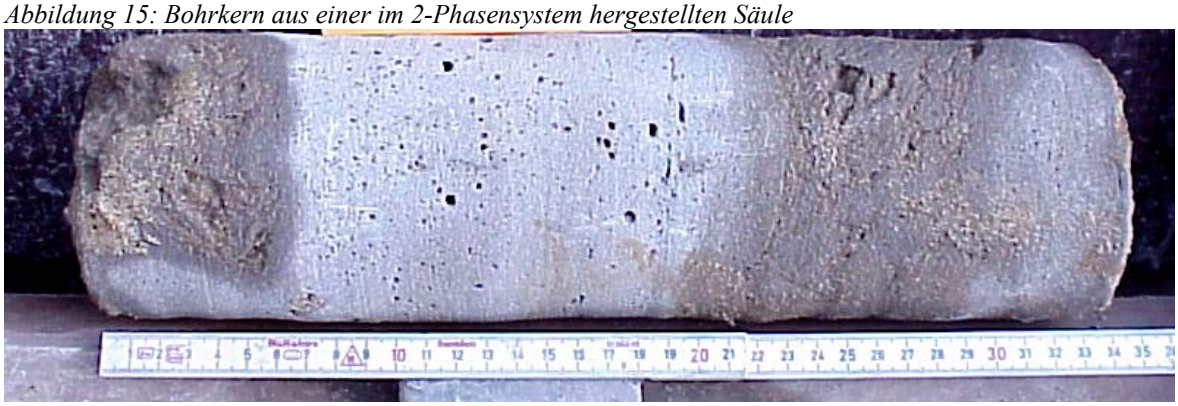
- Luftmenge [l/min],
- Strahlgeschwindigkeit [m/s],
- Verbrauch [kg/m³].

„Die Fülle der Produktionsparameter lässt eine Vielzahl von Kombinationsmöglichkeiten zu. Die Parameter werden möglichst konstant gehalten, um die Zahl der Fehlerquellen zu minimieren. Bei geschichtetem Aufbau des Baugrundes wird in der Praxis meist die Ziehzeit und die Rotation variiert.“[10]

Das 1-Phasensystem wird für die Herstellung von Säulen kleiner bis mittlerer Durchmesser angewendet [18]. In schwierigen Baugründen, sowie in mittel- bis schwererodierbaren Böden wird bevorzugt das 2-Phasensystem zur Herstellung von Verfestigungs- und Dichtelementen eingesetzt. Das 3-Phasensystem findet im Baugrund mit sehr hohen Festigkeiten Verwendung, sowie in Böden mit Korndurchmessern um 2 µm. In diesem Bereich ist es das einzige Injektionsverfahren, welches noch angewandt werden kann (*Abb. 14*).

Auf Grund der Verwirbelungen beim Arbeiten mit Luftunterstützung kommt es zu unterschiedlichen Strömungsbedingungen innerhalb der Säule. Diese erzeugen Inhomogenitäten und Lufteinschlüsse, die sowohl zu einer erhöhten Durchlässigkeit als auch zu einer verminderten Festigkeit der Körper (*Abb. 15*) führen können. Dem wird durch eine Erhöhung des Querschnitts in Belastungsrichtung und durch Überschneidungen der einzelnen Elemente entgegengewirkt. Kleinere Sandeinschlüssen bedeuten nicht unbedingt die Gefährdung der Gesamttragfähigkeit.

Abbildung 15: Bohrkern aus einer im 2-Phasensystem hergestellten Säule



4 Bemessung und Qualitätssicherung beim Düsenstrahlverfahren

4.1 Bemessung

Soweit nichts anderes festgelegt ist, muss die innere Tragfähigkeit nach DIN 1045 bestimmt werden. Eine höhere Festigkeitsklasse als B15 darf rechnerisch nicht in Ansatz gebracht werden [10], wobei eine Serienfestigkeit von 20 N/mm² nur mit einem erhöhten Aufwand erreichbar ist. Für Unterfangungskörper werden die Nachweise der Tragfähigkeit wie bei konventionellen Unterfangungen geführt [20].

4.2 Qualitätssicherung

Der Düsenstrahlkörper entzieht sich einer visuellen Inspektion während der Herstellung. Bei moderneren Anlagen werden die Injektionspumpen nach den Sollvorgaben automatisch geregelt. Für jeden Düsvorgang wird während der Ausführung ein Einpressprotokoll erstellt. Bei der Firma Bauer geschieht das mittels des eigens entwickelten elektronischen Messdatenerfassungssystems (Medef). Das Protokoll verfügt über Standardinformationen wie Firmen- und Baustellenbezeichnung, Auftraggeber und Auftragsnummer, Gerätefahrer, Bohrgerät- und Pumpennummer, Gestängedurchmesser. Ebenso sind das Verfahren, die Suspensionsdichte, Punktnummer und Neigungswinkel ablesbar. An einer Grafik sind der Verpressdruck, Verpressmenge, Abbohr- und Ziehgeschwindigkeit über die Bohrstrecke dargestellt. Des weiteren werden statische Informationen wie Startzeit, Stopzeit, Dauer, Höhen- bzw. Tiefenangaben und die abgebohrten und verfüllten Mengen ausgedruckt (siehe *Anlage II*). Kleinbohrgeräte sind z. Z. noch nicht mit dem Medef ausgerüstet. Für sie werden in einem Tagesbericht die zu dokumentierenden Parameter vom Pumpenfahrer festgehalten (*Anlage III*). Bei der Herstellung von HDI-Sohlen werden die Bohransatzpunkte im Regelfall mit einem elektronischen Positionierungssystem eingemessen. Die Bohrtiefe wird mit einem Rotationslaser eingerichtet. Der Bohrlochverlauf kann mit einer Inklinometersonde bestimmt werden. Eine Dichtsohle wird über die Ermittlung der hindurchsickernden Wassermenge überprüft. Dieser „Restwassermenge“ genannte Wert gilt als Qualitätskriterium und wird in l/sec je 1000 m² angegeben [6]. Er spiegelt den erreichten Durchlässigkeitsbeiwert k_f [m/s] der Abdichtung wider. Risiken ergeben sich bei tiefliegenden Sohlen vor allem durch die Bohrlochabweichung und im Durchmesser der einzelnen Säulen. Die Gesamtdurchlässigkeit setzt sich zusammen aus der Materialdurchlässigkeit des Betons und der Durchlässigkeit der Fugen bzw. Zwickel zwischen den Einzelelementen [6]. Auf das Problem der Durchmesserbestimmung wird am Ende diesen Abschnittes eingegangen.

Wegen des Risikos von Hebungen und Setzungen bei Unterfangungen werden an den betreffenden Bauwerken sowie an Nachbarbebauungen, während und nach der Baumaßnahme Messungen durchgeführt.

In der seit diesem Jahr (2001) geltenden EN 12716 [24] „Ausführungen von besonderen geotechnischen Arbeiten (Spezialtiefbau) – Düsenstrahlverfahren (Hochdruckinjektion, Hochdruckbodenvermörtelung, Jetting)“ (03.1999) Abs. 9.1.3 „ muss als Mindestkontrolle die Aufzeichnung der Düsparameter und die Beobachtung des Rückflusses bei allen hergestellten Elementen erfolgen.“ Die Beobachtungen betreffen die Menge und das Aussehen des Rückflusses (Abs. 9.3.5). Des weiteren „sollte die Dichte des Rückflusses regelmäßig bestimmt und protokolliert werden. Unerwartete Veränderungen sollten analysiert werden.“ (Abs.9.3.6). Davon verspricht man sich das Erkennen von Fehlstellen schon bei der Herstellung.

Hieran wird deutlich, dass die Qualitätssicherung sehr vom Ausführenden abhängig ist. Durch die im Konjunktiv gemachten Vorschriften bzw. Empfehlungen bleibt viel Spielraum für Interpretation.

„Wenn in der Planung nicht anders festgelegt, sollte die Druckfestigkeitsprüfung an 4 Proben aus je 1000 m³ Volumen durchgeführt werden.“ (Abs. 9.4.2.3). Von denen brauchen nur 3 Einzelproben ausgewertet werden. Im Gegensatz zur Zulassung wird hier keine Aussage über den Ort und die Art der Probenahme gemacht.

Bisher war Art und Umfang des Festigkeitsnachweises bei tragenden Injektionskörpern die statische Funktionen übernehmen in der DIN 4093 [23] „Einpressen in den Untergrund“ (September 1987) und durch die Einzelzulassungen geregelt. Hier steht im Abschnitt 8.3.3.1.1 der DIN 4093: „Die Festigkeitsprüfung im Labor wird durch Bestimmung der Druckfestigkeiten nach DIN 1048 Teil 1 an Zylindern oder Würfel durchgeführt. Einpresskörper aus Tonzementsuspensionen, die nach 28 Tagen eine Festigkeit von 5 N/mm² nicht erreichen, müssen nach DIN 18136 geprüft werden. (...) Nach DIN 18136, Ausgabe März 1987, Abschnitt 6 und bei Kriechversuchen soll die Zylinderhöhe dem doppelten Durchmesser entsprechen.“ Hierzu muss gesagt werden, dass sich bei den verschiedenen Firmen unterschiedliche Prüfkörpergeometrien durchgesetzt haben. Auf ein einheitliches Schlankheitsmaß wird dabei nicht immer geachtet.

Die zu erreichende Druckfestigkeit richtet sich laut Zulassung [22] nach dem Zeitpunkt der statischen Inanspruchnahme. Als Bemessungswert σ_d ist der kleinste der folgenden Werte maßgebend: $\sigma_d = \beta_m / 5$, $\sigma_d = \min \beta_i / 3$, $\sigma_d \leq 5{,}0$ N/mm² (β_m – Mittelwert aus Probenserie, $\min \beta_i$ – kleinster Einzelwert).

Auf Grund bisheriger Erfahrungen lässt sich sagen, dass eine Druckfestigkeit von σ_d = 1,5 N/mm² für unverankerte Unterfangungskörper und σ_d = 3 N/mm² für verankerte Wände ausreichend ist [20].

Bei Hochdruckinjektionen werden meist vereinfacht Proben aus dem Suspensionsrücklauf gegossen, wobei argumentiert wird, dass die Injektion selbst mindestens genau so fest sein muss. Anderenfalls sind ungestörte Proben mittels Kernbohrung zu ziehen [5]. Die DIN 4093 fordert für statisch beanspruchte Einpresskörper eine Kontrollprüfung je 500 m³, wobei mindestens 4 Einzelproben (1 Satz) aus dem Einpresskörper zu entnehmen sind. „Die Proben sind an repräsentativen Stellen, insbesondere an Stellen höchster Beanspruchung zu entnehmen." Dies führt zu der Kritik von Dr. Hock-Berghaus [5], „...warum gerade an Stellen höchster Beanspruchung eine planmäßige Schwächung des Einpresskörpers vorgenommen werden soll. Weiterhin können Injektionen in Bereichen mit höherem Spannungsniveau zu höheren erreichbaren Festigkeiten führen, was nach Versuchen von Schubert [13] und Stetzler-Kaufmann [17] zumindest wahrscheinlich ist."

In Abhängigkeit von der jeweiligen Länge, des vom Rücklauf zu durchströmenden Bohrkanals entstehen mehr oder minder aussagekräftige Ergebnisse. Bei Unterfangungen ist es möglich, dass der Rückfluss auf Grund seines kurzen Weges an die Oberfläche für den Säuleninhalt repräsentative Werte liefert. An einer von der Firma Bauer durchgeführten Baumaßnahme (Lehrter Bahnhof, Berlin), bei der eine rückverankerte Düsenstrahlsohle die Baugrube in 25 m Tiefe von unten her abdichten soll, wies der Rückfluss erhebliche Mengen an Torf auf, der aus den darrüberliegenden Schichten durch den Rückfluss ausgespült war. Dies führte folglich zu einer erheblichen Festigkeitsminderung, so dass ein Verlassen auf die erreichten Druckfestigkeiten ein nochmaliges Düsen (mit dem selben Ergebnis) nach sich gezogen hätte. Wegen der unregelmäßigen Verteilung der organischen Bestandteile im Rückfluss war die Schwankungsbreite der Druckfestigkeiten enorm. Einen einheitlichen Umrechnungswert von Rückflussfestigkeit auf Säulenfestigkeit kann auf Grund der dargestellten Sachverhalte nicht aufgestellt werden.

Die Annahme, dass, „wenn schon der Rücklauf ausreichende Festigkeit aufweist, die Injektion selbst mindestens genau so gut sein muss", trifft zwar mit ausreichender Sicherheit zu, führt aber häufig zu einer Unterschätzung der tatsächlichen Festigkeiten, da selbst dieser Wert schon mit 3facher Sicherheit belegt ist. Auf diese Art und Weise werden Bindemittel stellenweise unnötig hoch dosiert eingesetzt.

Die EN 12716 muss als eine Ausführungsnorm verstanden werden. Sie besitzt in ersten Linie technischen, aber auch bis zu einem gewissen Grad vertraglichen Charakter. „Die Anforderungen und Hinweise bleiben für Verfahrensverbesserungen offen, so dass Weiterentwicklungen des Düsenstrahlverfahrens nicht eingeschränkt werden.“[2]
An der Aufstellung der Allgemeinen Technischen Vorschriften zur Verdingungsordnung für Bauleistungen, Teil C (VOB/C) für dieses Verfahren wird ebenso noch gearbeitet. „Anlass dazu waren Fehlstellen in den HDI-Baugrubensohlen und Dichtblöcken für Schildvortriebe im Tunnelbau.“[2]
Die wesentlichen Prüfungen für Suspension sind in der Euronorm 12716 [24] im Abschnitt 9.3 festgelegt. Dazu gehören im Vorfeld einer Baumaßnahme die Bestimmung der Rohdichte, die das festgelegte Mischungsverhältnis von Wasser zu Bindemittel widerspiegelt, das Absetzmaß, dies ist ein Indikator für die Stabilität der Mischung, die Marsh-Zeit, die die Viskosität anzeigt, die Abbindezeit, sowie die Druckfestigkeit nach 3, 7, 28 und nach 56 Tagen (bei Einsatz von langsam erhärtenden Bindemitteln), um den Festigkeitsverlauf der Suspension abschätzen zu können. Während der Ausführung sind die Dichte, die Marsh-Viskosität und das Absetzmaß wenigstens einmal pro Arbeitstag zu bestimmen. Die Wiegeeinheit der Mischanlage ist mit einem Rechner verbunden, der eine gleichbleibende Mischung gewährleistet. Auf Grund des vorgeschriebenen Prüfungsprogramms können Fehler beim Düsenstrahlverfahren durch die Ausgangssuspension weitestgehend ausgeschlossen werden.

4.3 Durchmesserbestimmung von Düsenstrahlkörpern

Durch das Vermessen von freigelegten Probesäulen im Vorfeld einer Baumaßnahme kann für einen bestimmten Bereich eine Aussage gemacht werden. Da sich jedoch Bodenverhältnisse auf wenigen Metern ändern können und jeder zusätzliche Aufschluss für ein Bodengutachten mit hohen Kosten verbunden ist, sind während der Bauausführung Folgemessungen erforderlich. An Verfahren zur Durchmesserbestimmung während des Düsvorganges wird seit langem gearbeitet. Es hat sich jedoch noch kein Verfahren in der Praxis durchgesetzt. Neuere Versuche gehen in Richtung Ultraschallmessung, wobei beim Frischmörtel auf Grund seiner hohen Dichte, Signale nur schwer messbar sind.

Neben dem Abmessen freigelegter Säulen kommt im frischen Düsbereich ein mechanischer Messschirm (*Abb. 16*) zum Einsatz. „Der Schirm besteht aus drei Armen, die sich gleichzeitig durch einen Klappmechanismus an die Säulenwandung anlegen. Ähnlich wie das Aufspannen eines Regenschirmes werden die Arme über eine flexible Seele an die Außenwand gedrückt. Der Weg des innenliegenden Seilzuges ist somit das Maß für die Öffnungsweite der Arme. Der Seilzug wird an der Oberfläche durch eine Kurbel in der Seele ein- und ausgespindelt. Nach Erreichen der maximalen Öffnungsweite kann diese an einer Skala abgelesen werden. Die ausgeklappten Arme bilden ein gleichschenkliges Dreieck, das einen maximalen Durchmesser von 3,0 Metern ausmessen kann.“ [14].

Abbildung 16: Mechanischer Messschirm - Firma Bauer



Dieses Verfahren ist mit hohem Kraftaufwand verbunden. Der Schirm verhakt sich häufig im Boden und geht dadurch verloren.

Einige Firmen vermessen ihre Düsenstrahlkörper mittels Schallpegelmessung. Hierzu werden Pegelmessrohre um das Bohrloch herum gesetzt. Die Schallwellen, die beim Auftreffen des Düsenstrahls auf das Rohr entstehen, werden mit einem Schallpegelmesser aufgezeichnet.

5 Das Probenahmegerät

Die Ungewissheit über die Vorgänge beim Düsen unter der Erdoberfläche und das Auftreten von unerwarteten Mängeln wie Undichtigkeiten von Sohlen und mangelnde Druckfestigkeiten von Bohrkernen, stellen die Forderung nach einem Gerät zur Entnahme von Frischmörtelproben.

Hierfür sind folgende Punkte zu betrachten:

- Wie bekommt man ungestörte Proben aus Tiefen bis über 20 m?
- Auf welche Art und Weise kann man einen Behälter in solche Tiefen absenken (Auftriebsproblem)?
- Welche Öffnungs- und Schließmechanismen arbeiten in Mörtel mit relativ unbekannten Zuschlagskorngrößen?
- Wie kann man den Mechanismus ansteuern, um nur aus der gewünschten Tiefe Proben zu entnehmen?
- Wie groß ist die Wahrscheinlichkeit, dass der Behälterinhalt den Säuleninhalt repräsentiert?
- Was führt zu Verfälschungen (Spülwasser) und wie können diese eingeschränkt werden?

Daneben stellen sich noch weitere Fragen:

- Wie kann der Inhalt ohne größere Verluste und Verfälschungen (Entmischen) dem Behälter wieder entnommen werden?
- Wie groß darf der Aufwand sein, das Gerät einzusetzen (Handling, Behinderung des Arbeitsablaufes)?
- Wie groß ist der Reinigungs- und Wartungsaufwand?

Die meisten dieser Fragen treten erst im Einsatz auf.

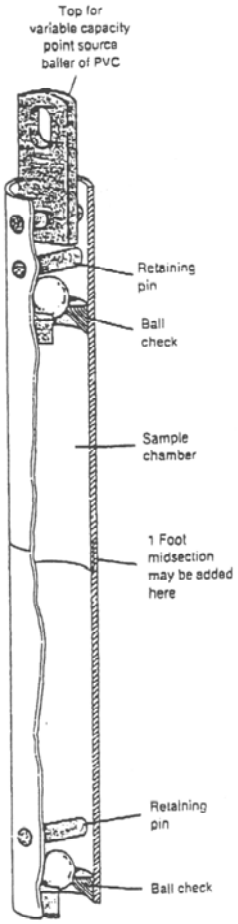
Abbildung 17: Probenahmegerät für Schlitzwandsuspensionen



Eine vergleichbare Problemlösung stellt ein Entnahmegerät für Schlitzwandsuspension dar (*Abb. 17*). Es wird an einer Leine in die

Suspension abgesenkt. Der Behälter wird durch zwei außenliegende Kugelventile verschlossen. Es handelt sich hierbei um ein von der Firma Bauer 1988 für Suspensionen entwickeltes System. Das Prinzip ist sehr einfach, dadurch hat es sich in der Praxis bewährt. Da der Düsenstrahlmörtel sehr weich ist, kann ein ähnliches System zur Anwendung kommen.

Abbildung 18: Entnahmegerät (1982)



Erste eigene Entwürfe wurden durch die Entdeckung nebenstehender *Abbildung 18* bestätigt. Diese stammt von einer „Tlmco Manufacturing Company“ aus dem Jahre 1982. Beim Absenken des Entnahmegerätes durch den mit Mörtel gefüllten Bohrkanal wird der Behälter seitlich und zentral durchströmt. Ist es in der gewünschte Tiefe, stoppt es, und der innere Verschlussball, dessen Wichte größer als die des Mörtels ist, verschließt die Öffnungen dicht auf dem Sattel sitzend. Beim Herausziehen entsteht unter dem Gerät ein Unterdruck, der den dichten Abschluss unterstützt. Das Entleeren erfolgt, indem der Ball mit Hilfe eines in einem Eimer stehenden Stabes, angehoben wird.

Das erste bei einem Maschinenprobelauf eingesetzte Gerät zeigen die *Abbildungen 19-21*. Wegen der Mörteldichte von bis zu 2 t/m³ entspricht ein großer Teil des Auftriebs dem Eigengewicht des Behälters. Um ihn auf eine Tiefe von >3,0 m abzuteufen, wurde er mit einem Gewindekopf versehen, und an Stelle des Bohrkopfes an das Bohrgestänge montiert. Dadurch ist auch eine bessere Führung, durch den nie ganz gerade verlaufenden Bohrkanal möglich. Ein Verkanten kann verhindert werden. Die hierbei genommenen Proben waren ein erster erfolgreicher Schritt.

Kenndaten:

Durchmesser: 160 mm

Gesamthöhe: 540 mm

Gewicht: 18 kg

Füllmenge: ca. 6 l (≅ 12 kg Mörtel)

Verschluss: 1 Ball unten

Abbildung 19: Probenahmegerät 1



Abbildung 20:
Probenahmegerät 1

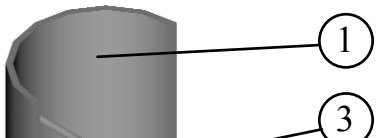


Abbildung 21:
Probenahmegerät 1 im Einsatz am Bohrgerät



Da es sich bei dem oben eingesetzten Bohrgerät um eine Sonderanfertigung, mit anderen als den üblichen Gestängemaßen und Gewinden handelte, und der Einsatz des 1. Probenehmers einige Modifikationen erforderte, wurde ein zweites Gerät hergestellt. Dieses war wegen der erforderlichen Volumenmenge wesentlich größer und hatte ähnlich wie in der *Abbildung 18* gezeigt, auch am oberen Ende einen Verschlussball, um Spülwasser am Eindringen zu hindern (*Abb. 22*).

Abbildung 22:Probenahmegerät 2



1 – Gewindevaterteil (∅ 133 mm)
2 – Verschlusskugel (∅ 90 mm)
3 – Rückhaltestab
4 – Sattelfuß
5 – Zwischenstücke
6 – Behälterrohr aus Stahl
(∅ 160 mm, h = 600 mm, Wandstärke s = 5 mm)

Dieses zweite Gerät kam während der Herstellung der mittelhochliegenden rückverankerten Dichtsohle (Lehrter Bahnhof, Berlin) zum Einsatz. Die Sohle wurde in einer Tiefe von ca. 25 m hergestellt. Es zeigte sich, dass das Gerät für diese Bedingungen nicht gut geeignet war. Der Bohrkanal war weitgehend instabil und Engstellen bildeten sich. Große Torfklumpen im Mörtel innerhalb des Kanals verstopften daher bereits beim Einführen auf den ersten Metern das Gerät. Die folgenden Bilder zeigen ein Entnahmegerät, welches dem beschriebenen entspricht, aber mit einem veränderten Fußbereich, der das Abtragen der Bohrkanalwandung beim Durchfahren verringern soll. Es wurde noch nicht getestet.

Abbildungen 23: Probenahmegerät 2





Kenndaten:

Durchmesser: 160 mm

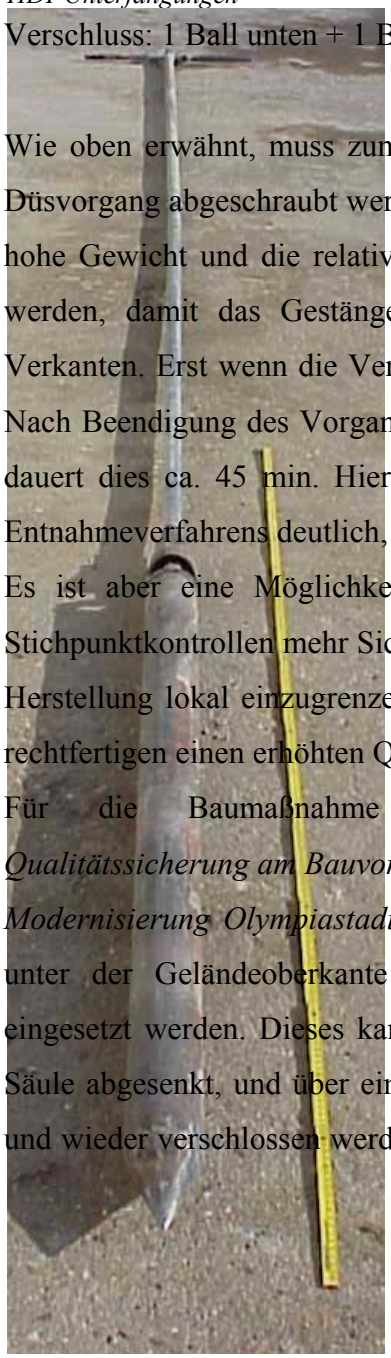
Gesamthöhe: 950 mm

Gewicht: 23 kg

Füllmenge: ca. 11 l (≙ 22 kg Mörtel)

Verschluss: 1 Ball unten + 1 Ball oben

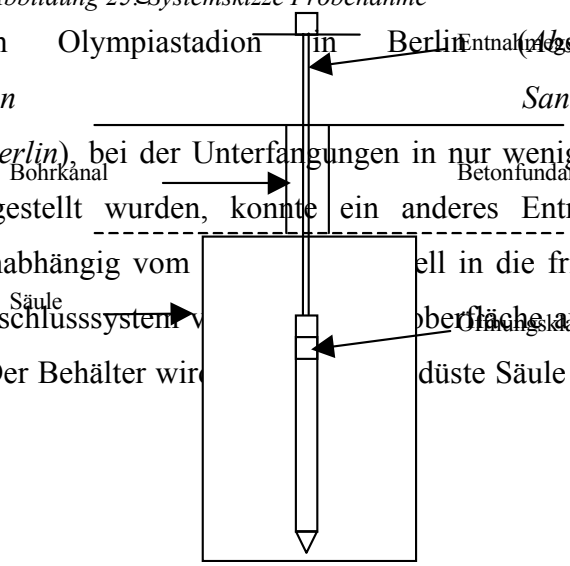
Abbildung 24: Probenehmer für HDI-Unterfangungen



Wie oben erwähnt, muss zum Einsatz dieses Entnahmegerätes die Bohrkrone nach dem Düsvorgang abgeschraubt werden. An ihrer Stelle wird der Behälter angebracht. Durch das hohe Gewicht und die relative Unhandlichkeit muss es in die Backenzange eingespannt werden, damit das Gestänge aufgepasst werden kann. Dabei kommt es leicht zum Verkanten. Erst wenn die Verbindung stimmt, kann mit der Entnahme begonnen werden. Nach Beendigung des Vorgangs muss die Bohrkrone wieder angesetzt werden. Insgesamt dauert dies ca. 45 min. Hierbei wird der Nachteil eines an das Bohrgerät gebundenen Entnahmeverfahrens deutlich, das es den Produktionsprozess erheblich stört.

Es ist aber eine Möglichkeit, gerade bei zweifelhaften Baugrundverhältnissen, über Stichpunktkontrollen mehr Sicherheit zu gewinnen, und mögliche Störstellen schon bei der Herstellung lokal einzugrenzen. Die immensen Zusatzkosten einer kompletten Sanierung rechtfertigen einen erhöhten Qualitätssicherungsaufwand.

Abbildung 25: Systemskizze Probenahme



Für die Baumaßnahme am Olympiastadion in Berlin (*Abschnitt 7 Qualitätssicherung am Bauvorhaben Sanierung und Modernisierung Olympiastadion Berlin*), bei der Unterfangungen in nur wenigen Metern unter der Geländeoberkante hergestellt wurden, konnte ein anderes Entnahmegerät eingesetzt werden. Dieses kann unabhängig vom ell in die frische HDI-Säule abgesenkt, und über ein Verschlusssystem v oberfläche aus geöffnet und wieder verschlossen werden. Der Behälter wir düste Säule eingeführt.

Die Einlauföffnung befindet sich in 130 cm Höhe, d.h. die Gesamthöhe der Säule muss größer sein. Die Behälterspitze steht auf dem Säulenboden auf (siehe *Abb. 25*).

Auf Grund des Bohrlochdurchmessers und der geringen Behälterhöhe musste dieses zweimal in die Säule eingetaucht werden, um genügend Material für Probekörper und Versuche zu gewinnen. Die entnommenen Mörtel wurden vor der Durchführung der Prüfung und der Probenherstellung miteinander vermischt.

<u>Kenndaten:</u>

Durchmesser (Behälter): 80 mm

Behälterhöhe (Füllhöhe): 1300 mm

Gesamtlänge: 5,50 m

Gewicht: 20 kg

Füllmenge: ca. 6,5 l (≅ 13 kg Mörtel)

Verschluss: Klappe (manuell)

Abbildung 26: Einzelelemente Probenehmer



Bei allen Entnahmegeräten findet eine Probenahme nur unmittelbar aus dem Zentrum der Säule statt. Es gibt bereits Überlegungen über abwinkelbare Entnahmeeinheiten Proben aus Nachbarbereichen zu gewinnen.

6 Mischungsberechnung

Die Mischungsberechnung dient einer rechnerischen Abschätzung der Stoffverhältnisse zur kalkulatorischen Vorbestimmung der Druckfestigkeiten. An im Rahmen der Qualitätssicherung gewonnener Werte, muss diese überprüft und ggf. abgeglichen werden. Das kann bereits bei der Herstellung von Probesäulen erfolgen. Eine Weiterführung dieser Berechnungsmatrix soll anhand von Frischmörteldaten (wie Dichte, Sandgehalt, Wassergehalt) das Verfahren sicherer machen. Sie bildet dann die Grundlage zur Festlegung des Umfangs der Qualitätssicherung, und soll über Korrekturen von Herstellungsparametern gezielt Eigenschaften des Mörtels sicherstellen.

Hierzu mussten zunächst Annahmen getroffen werden:

- Die Mischung innerhalb der HDI-Säule ist homogen.
- Es entsteht ein gleichmäßiger zylindrischer Körper.
- Die Bodenverhältnisse ändern sich über die Ziehstrecke nicht.
- Das Ausfiltern bzw. das Absetzen (Bluten) von Anmachwasser in der Säule wird zunächst in der Berechnung nicht berücksichtigt.

Annahme 1 ist nicht unbedingt gültig. Bohrkernentnahmen an ausgegrabenen Säulen haben gezeigt, dass die Druckfestigkeit zwischen Randbereichen und dem Zentrum stark schwanken kann. Die Druckfestigkeit ist ein Indikator für die Stoffverhältnisse in der Ausgangsmischung. Wie Bilder von freigelegten Düsenstrahlsäulen zeigen (siehe *Abb. 11* und *12*), kann man nie von einer klaren Zylinderform sprechen (Annahme 2). Die verschiedenen Bodenschichten (Annahme 3) führen bei konstanten Düsparametern (Ziehzeit, Durchflussmenge, Düsdruck) auf Grund ihrer unterschiedlichen Eigenschaften zu unterschiedlichen Reichweiten des Düsstrahles. Das äußere Erscheinungsbild ist ebenso vom angewanden Verfahren abhängig. Zur Annahme 4 muss gesagt werden, dass Ausfilterung und Absetzen einen großen Einfluss auf die Mischungsverhältnisse innerhalb der frisch hergestellten Säule besitzen. Diese werden jedoch erst später im Bereich der Auswertung näher betrachtet.

Generell gilt für die Ausgangsstoffe und Endprodukte der Massenerhaltungssatz, d. h. dass die in den Boden (ohne nennenswerten Luftporengehalt) eingebrachte Menge, auch am Bohrlochmund wieder austritt.

Tabelle 1: ***Verwendete Symbole***

Bezeichnung	Kurzzeichen	Maßeinheit
Dichte Boden (erdfeucht)	ρ	t/m³
Korndichte/ Dichte Zuschlag	ρ_s	t/m³
Trockendichte Boden	ρ_d	t/m³
Dichte Wasser	ρ_W	t/m³
Dichte Zement	ρ_C	t/m³
Dichte Mörtel	$\rho_{Mörtel}$	t/m³
Wassermenge je 1m³ Mörtel	W	l/m³ bzw. kg/m³
Wassermenge aus Suspension	W_S	l/Säule
Wassermenge aus Suspension je 1000 l	w_S	l/m³
(Gesamt-)Wassermenge im Mörtel	$W_{Mörtel}$	l
Porenwassermenge	m_W	l
Wassergehalt	w	%
Zementmenge je 1m³ Mörtel	C	kg/m³
Zementmenge aus Suspension	C_S	kg/Säule
Zementmenge aus Suspension je 1000 l	c_S	kg/m³
Zuschlagsmenge je 1m³ Mörtel	G	kg/m³
Zuschlagsmenge je Säule (Zylinder)	G_Z	kg/m³
Masse Mörtel	$M_{Mörtel}$	kg/m³
Volumen Mörtel	$V_{Mörtel}$	m³
Volumen Säule	V_Z	m³
Säulendurchmesser	D	M
Säulenhöhe	h	M
Ziehzeit	t	min/m
Durchflussrate	q	l/min
Suspensionsmenge	Q_S	l/Säule
Porenvolumen	p	l

S – Suspension

Z – Zylinder/ Säule

Die Angabe „je Säule“ bezeichnet die im Gesamtmörtel enthaltenen Mengen, wovon ein Teil in der Säule verbleibt und der Rest als Rückfluss die Säule verlässt.

Als Eingangsinformation zur Abschätzung der Mischungsverhältnisse werden die folgenden Werte benötigt:

- Bodenkennwerten:
  - Dichte (erdfeucht) - ρ [t/m³],
  - Feuchtegehalt – w [%].

Dazu kommen Angaben über die hydrologischen Verhältnisse (Grundwasserstände).

- Säulengeometrie:
  - Durchmesser – D [m],
  - Säulenhöhe – h [m],
- Maschinentechnische Parameter:
  - Ziehzeit pro 1 m – Höhe gedüste HDI-Säule – t [min/m],
  - eingebrachte Suspensionsmenge pro 1 min (Durchflussrate) – q [l/min],
- konstante Größen:
  - Korndichte Zuschlag/ Boden – $\rho_s \approx 2{,}65$ t/m³
  - Dichte Zement (Portlandzement) – $\rho_C \approx 3{,}1$ t/m³
  - Dichte Wasser (Leitungswasser mit Trinkwasserqualität) – $\rho_W \approx 1{,}0$ t/m³

Aus dem Verhältnis von Wasser zu Bindemittel ergeben sich die Stoffraummengen je 1 m³ bzw. 1000 l Suspension.

Grundlage für die Rechnung ist die Gleichung für das Volumen von 1000 l:

$$1000 = \frac{C}{\rho_C} + \frac{W}{\rho_W} + \frac{G}{\rho_s} + p \qquad [l], \tag{6.1}$$

bzw. $1000 = \frac{c_S}{\rho_C} + \frac{w_S}{\rho_W}$ [l] für die Ausgangssuspension, mit:

C – Zementmenge [kg/m³],

W – Wassermenge [l/m³],

G – Zuschlagmenge [kg/m³],

p – Porenvolumen [l/m³].

Das Säulenvolumen V_Z [m³] errechnet sich über die Formel zur Berechnung von Zylindervolumen:

$$V_Z = \frac{\pi}{4} * D^2 * h \qquad [m³]. \tag{6.2}$$

Die Suspensionsmenge Q_S [l/Säule] ergibt sich aus dem Produkt von Ziehzeit pro Meter, der Suspensionsförderrate und der Säulenhöhe:

$$Q_S = t * q * h \qquad \text{[l/Säule]}. \tag{6.3}$$

Aus der eingebrachten Suspensionsmenge [l/Säule] und deren Wassermenge [l/m³], errechnet sich die eingebrachte Wassermenge:

$$W_S = Q_s * w_S \qquad \text{[l/Säule]}. \tag{6.4}$$

Auf dem selben Weg wird die eingebrachte Zementmenge pro Säule berechnet:

$$C_S = Q_s * c_S \qquad \text{[kg/Säule]}. \tag{6.5}$$

Das Säulenvolumen [m³] multipliziert mit der Trockendichte des Bodens [kg/m³], führt zur Gesamtbodenmasse in der Säule:

$$G_Z = V_Z * \rho_d \qquad \text{[kg/Säule]}. \tag{6.6.1}$$

Die Trockendichte ist dabei:

$$\rho_d = \frac{\rho}{1+w} \qquad \text{[kg/m³]}. \tag{6.6.2}$$

Somit ist der Anteil des Wassers aus der Bodenfeuchte:

$$m_w = G_Z * w \qquad \text{[l]}. \tag{6.7}$$

Die Gesamtwassermenge im HDI-Mörtel, wenn nicht im Grundwasser gearbeitet wird, berechnet sich nach:

$$W_{Mörtel} = m_w + W_S \qquad \text{[kg/m³]}. \tag{6.8}$$

Hierbei ist weder ein Absetzten der Suspension nach dem Düsen noch die Ausfilterung durch den umgebenden Boden berücksichtigt. Beide Faktoren führen zu einem niedrigeren effektiven Wassergehalt und dadurch zu einem niedrigeren Wasser-Bindemittel-Wert im Düsenstrahlmörtel.

Aus den oben berechneten Mengen und den zugehörigen Volumen ergibt sich das Gesamtvolumen. Dieses, zu den Ausgangsmengen ins Verhältnis gesetzt, bildet die theoretische Frischmörteldichte $\rho_{Mörtel}$ [t/m³]:

$$V_{Mörtel} = \frac{W_{Mörtel}}{\rho_W} + \frac{C_S}{\rho_C} + \frac{G_Z}{\rho_S} \qquad \text{[m³]}, \tag{6.9.1}$$

$$\rho_{Mörtel} = \frac{M_{Mörtel}}{V_{Mörtel}} = \frac{C_S + W_{Mörtel} + G_Z}{V_{Mörtel}} \qquad \text{[kg/m³]}. \tag{6.9.2}$$

Um die ermittelten Mengen auf 1 m³ umzurechnen, müssen sie durch das gesamte Mörtelvolumen dividiert werden:

$$C,W,G/1m^3 = \frac{C_S, W_{Mörtel}, G_Z}{V_{Mörtel}} \text{ [kg/m³]}. \tag{6.10}$$

Aus dem Verhältnis von der Wassermenge zur Zementmenge pro 1 m³ erhält man den Wasser-Zement-Wert. Über „Walz"-Kurven, wie sie im Anschluss aufgeführt sind, lassen sich Prognosen über die zu erwartenden Druckfestigkeiten treffen.

$$\frac{W}{Z} = \frac{W}{C}. \tag{6.11}$$

Die „Walz"-Kurven müssten für die jeweiligen Gegebenheiten wie Suspensionsart und Baugrund gesondert erstellt werden.

Beispiel

Die Eingangswerte entsprechen dem Bauvorhaben Olympiastadion Berlin (siehe *Abschnitt 7*).

Bodenkennwerte:

- Dichte erdfeucht – $\rho = 1{,}75$ t/m³;
- Feuchtegehalt – $w = 5$ %;

Das Grundwasser wird nicht berührt.

Säulengeometrie:

- Durchmesser – $D = 1{,}75$ m;
- Säulenhöhe – $h = 2{,}20$ m;

Düsparameter:

- Ziehzeit – $t = 6$ min/m;
- Förderrate – $Q_S = 230$ l/min;

Konstanten:

- Dichte Zuschlagskorn – $\rho_s = 2{,}65$ t/m³;
- Dichte Zement (CEM I 32,5 R) – $\rho_C = 3{,}1$ t/m³;
- Dichte Wasser – $\rho_W = 1{,}0$ t/m³.

Aus *Gleichung 6.2* ergibt sich das Säulenvolumen V_Z zu

$$V_Z = \frac{\pi}{4} * 1{,}75^2 * 2{,}20 = 5{,}29 m^3.$$

Die Suspensionsmenge Q_S je Säule ist (*Gleichung 6.3*)

$$Q_S = 6 * 230 * 2{,}20 = 3036 l / Säule.$$

Die *Gleichung 6.1* auf die Ausgangssuspension bezogen, führt zu den folgenden Bindemittel und Wassermengen je 1000 l, bei einem Wasser-Zement-Verhältnis von 1,0:

$$1000 l = \frac{756{,}1}{3{,}1} + \frac{756{,}1}{1{,}0}.$$

Dass heißt, dass in 1000 l Suspension 756 kg Zement und die gleiche Masse Wasser enthalten sind. Zuschläge und signifikante Luftporen gibt es nicht.

Die in den Boden eingebrachte Wassermenge W_S aus Suspension ist nach *Gleichung 6.4* dann:

$W_S = 3036 * 756 / 1000 = 2296 l / Säule.$

Die eingebrachte Zementmenge C_S ist nach *Gleichung 6.5*:

$C_S = 3036 * 756 / 1000 = 2296 kg / Säule.$

Um die Bodenmasse in der Säule auszurechnen, braucht man die Trockendichte ρ_d aus *Gleichung 6.6.2*:

$$\rho_d = \frac{1{,}75}{1 + 0{,}05} = 1{,}667 t / m^3.$$

Mit *Gleichung 6.6.1* ist die Bodenmasse G_Z:

$G_Z = 5{,}29 * 1{,}667 = 8819 kg / Säule.$

Darin sind nach *Gleichung 6.7* bei einer Bodenfeuchte von 5 %

$m_W = 8819 * 0{,}05 = 441 l$

Bodenwasser enthalten.

Die Gesamtwassermenge beträgt dann (*Gleichung 6.8*):

$W_{Mörtel} = 2296 + 441 = 2737 l.$

Aus den *Gleichungen 6.9.1* und *6.9.2* erhält man die theoretische Frischmörteldichte $\rho_{Mörtel}$:

$$\rho_{Mörtel} = \frac{M_{Mörtel}}{V_{Mörtel}} = \frac{2296 + 2737 + 8819}{\frac{2296}{3{,}1} + \frac{2737}{1{,}0} + \frac{8819}{2{,}65}} = 2{,}04 t / m^3 .$$

Auf 1m³ kommen nach *Gleichung 6.10* somit:

Zement- $C = 337 kg / m^3$,

Wasser- $W = 402 kg / m^3$ und

Zuschlag- $G = 1296 kg / m^3$.

Nach dem sich einstellenden Wasser zu Zement Verhältnis erhält man einen W/Z-Wert von (*Gleichung 6.11*):

$$\frac{W}{Z} = \frac{W}{C} = 1{,}19.$$

Auf der CD-ROM befindet sich in der Datei „*Mischungsberechnung-Beispiele.xls*“ die Matrix, in die durch Eingabe der Werte die Stoffmengen und der W/Z-Wert ausgerechnet werden können. Im Anhang ist unter *Anlage VIII* die Ein- bzw. Ausgabeoberfläche der Excel-Berechnung abgebildet.

In der Folge werden die Eingangswerte mit entsprechenden Faktoren versehen (siehe *9.5 Auswirkungen auf die Mischungsmatrix*), um den tatsächlichen Mengen näher zu kommen, und um das Ausfiltern und Absetzen rechnerisch mit zu berücksichtigen.

7 Qualitätssicherung am Bauvorhaben Sanierung und Modernisierung Olympiastadion Berlin

7.1 Projektbeschreibung

Im Rahmen der Sanierungs- und Modernisierungsmaßnahmen am und im Olympiastadion Berlin wurden die im Baugrund- und Gründungsgutachten [10] empfohlenen Sicherungsmaßnahmen an bestehenden Fundamenten in Form von Unterfangungen durch das Düsenstrahlverfahren durchgeführt. Die Unterfangungen dienen einer Tiefergründung zur Reduzierung von Setzungen durch Auflasterhöhung. Da der Einbau von Bohlen für einen Verbau Lockerungen des rolligen Bodens zur Folge gehabt hätte, und eine Feinstzementinjektion einen erhöhten Bodenuntersuchungsaufwand, wurde dem substanzschonenden, da erschütterungsarm arbeitenden Düsenstrahlverfahren den Vorzug gegeben.

Insgesamt wurden 280 Säulen tangierend und 100 überschnitten unter Einzelfundamenten der Stahlbetonkonstruktion, sowie unter der äußeren Kellerwand (Winkelstützwand) geschaffen. Der 0,7 – 1,7 m dicke, z. T. bewehrte Beton, musste für jede Säule durchbohrt werden.

Im Rahmen der Diplomarbeit wurden Untersuchungen an insgesamt 7 Einzelsäulen durchgeführt. Diese gehören zur Unterfangung der Winkelstützwand und wurden vom Keller aus hergestellt.

7.2 Baugrund

Bei dem Boden handelt es sich um enggestuften Feinsand – sogenannten „Berliner Sand“. Die Entnahme aus der unmittelbaren Umgebung ergab einen Feuchtegehalt von ungefähr 5 %. Das Grundwasser befindet sich ca. 35 m unter Gelände. Der Sand kann als sehr durchlässig bewertet werden. Lt. Gründungsgutachten ist stellenweise mit Auftreten von schluffigen Sandschichten oder Schluff zu rechnen [10].

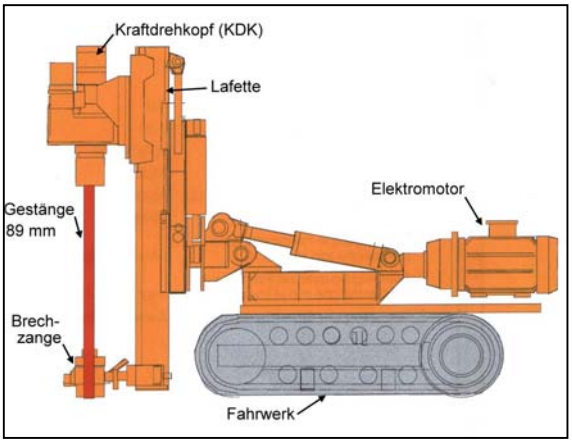
7.3 Maschineneinsatz

Bei den oben Beschriebenen Unterfangungsmaßnahmen kamen zwei verschiedene Bohrgeräte für die HDI-Maßnahme zum Einsatz. Im Außenbereich wurde eine Bauer IB 10, mit einer maximalen Bohrtiefe von 17,50 m verwendet. Im Kellerbereich wurde auf Grund der beengten Raumverhältnisse (lichte Höhe bis ca. 8 m) und wegen der besseren Manövrierfähigkeit eine Hütte 200/2 TF (*Abb. 27 und 28*) mit einem Gestänge-Durchmesser von 89 mm eingesetzt. Die Säule wurde in 2 Abschnitten (Schüssen) mit Unterbrechung für Gestängerückbau hergestellt. Das Düsen außen und innen fand zeitgleich statt.

Abbildung 27: Hütte 200/2 TF im Baufeld, im Vordergrund Absaugrüssel für Rückflussförderung



Abbildung 28: Bohrgerät Hütte 200/2 TF [9]



7.4 Düsenstrahlparameter

HDI-Düsenstrahlverfahren:

1-Phasensystem (B): Hochdruckschneiden mit Bindemittelsuspension (siehe *3.2.2 Herstellungsarten*),

Ziehzeit: 6 min/m, später Umstellung auf 7 min/m,

Suspensionspumprate: 230 l/min,

Suspension: Wasser / Zement = 1 / 1,

Zielvorgabe Säulendurchmesser: 1,80 m.

Der Säulendurchmesser wurde während der Ausführung mittels Messschirm 2mal überprüft. Dabei zeigte es sich, dass nur ca. 1,75 m erreicht wurden. Daraufhin wurde die Ziehzeit auf 7 min/m umgestellt.

7.5 Probenahme

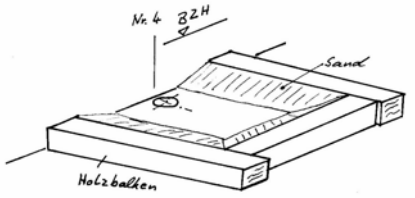
Die im folgenden beschriebenen Versuche zur Analyse der vorliegenden Mischungsverhältnisse im Baufeld, sowie deren Auswertung wurden mit geringem technischen Aufwand durchgeführt. Sie können bei nachfolgenden Projekten analog betrieben werden.

7.5.1 Rückfluss

Zum Zeitpunkt des Düsens wurde aus dem Rückfluss eine Probe genommen. Dies sollte zu einem Zeitpunkt geschehen, wenn der Inhalt des rückfließenden Materials dem Säuleninhalt im Boden voraussichtlich am nächsten kommt. Das heißt, dass sich zum Beispiel die Abbohrsuspension nicht mehr im Bohrkanal befinden kann. Somit ist in Abhängigkeit von der Tiefe der Säulenlage ein Zeitpunkt im letzten Drittel bzw. gegen Ende der gesamten Ziehzeit gewählt wurden. Im Anschlussbereich zur Fundamentunterkante verschiebt sich das Mischungsverhältnis zur Suspensionsseite hin, da weniger Boden freigeschnitten wird.

Bei der Probenahme mit dem Schöpfeimer (bzw. Becher) musste darauf geachtet werden, möglichst direkt aus der aufsteigenden Suspension zu entnehmen (Vermeidung des Absetzens), und kein Fremdmaterial aus dem Düstrichter, bzw. der Bohrlochumschließung (*Abb. 29*) mit einzubeziehen. Besonderheiten, die bei der Probenahme (Verwässerung durch Spülen, Entnahme aus Nachbarsäule, Entnahme nach Verstopfung des Kanals etc.) sowie beim Düsen auftraten, wurden auf einem Entnahmeprotokoll vermerkt. Das Entnahmeprotokoll wird durch das Mischungsprotokoll und den Tagesbericht (*Anlage III*) ergänzt. Um für die Probekörper und die Versuche genügend Material zu erhalten, mussten ca. 10 l gewonnen werden. Der Zeitpunkt wurde ebenso auf dem Entnahmeprotokoll vermerkt.

Abbildung 29: Bohrlochumschließung mit Kanthölzern und Sand [14]



Bei jedem Bauvorhaben und an jeder einzelnen Säule müssen die Störfaktoren und die Aussagekraft der Ergebnisse neu bewertet werden. Wie im *Abschnitt 4.2 Qualitätssicherung* erläutert, repräsentiert der Rückfluss mal mehr und mal weniger den Inhalt der Säule. Im vorliegenden Fall bestand der Düskanal aus Beton. Dadurch konnte kein Fremdmaterialien ausgespült werden. Da der Feinsand im Baugrund relativ homogen ist und der Unterfangungskörper unmittelbar unter dem Fundament hergestellt wurde, war das Absetzen schwererer Bodenbestandteile in der frischen Säule am Unterschied zwischen Rückfluss und direkter Entnahme nur geringfügig feststellbar.

7.5.2 Entnahme

(Der im folgenden verwendete Begriff „Entnahme“ steht für die Entnahme von Frischmörtel direkt aus der Düsenstrahlsäule mittels Entnahmegerät.)

Um die Aussagekraft des Rückflusses richtig einzuschätzen, und um eine Festigkeitsentwicklung bzw. einen Festigkeitsnachweis unabhängig von Bohrkernen aufstellen zu können, ist es nötig, direkt aus der frisch gedüsten HDI-Säule Proben zu entnehmen. Hier fand die Entnahme mit dem manuellen Probenehmer statt, der für diese Baumaßnahme entwickelt wurde (siehe *Abschnitt 5, Abb. 24-26*).

Die Säulen haben eine Höhe von ca. 2,20 m. Die Einlassöffnung des Probenehmers befindet sich in einer Höhe von 1,30 m. Somit lag die Entnahmehöhe in 1/2 - 2/3 der Säulenhöhe. Wie bereits erwähnt, wurden zwei Entnahmen durchgeführt, die gemischt wurden.

Zwischen der Rückflussentnahme und der Säulenentnahme vergingen ca. 1-2 Stunden. Während die Säule fertig gedüst und das Bohrgerät versetzt wurde, wurden die Rückflussmörtelproben verarbeitet.

7.6 In Situ Versuche

Bei der Prüfung und Probenherstellung wurde mit den Rückflussproben in gleicher Weise wie mit den Entnahmen verfahren. Bevor der Mörtel in die Behälter zur Probekörpergewinnung (Würfel oder Zylinder, wie im vorliegenden Fall) gefüllt wurde, musste er nochmals kräftig aufgemischt werden (Schneebesen), damit sich abgesetztes Material gleichmäßig verteilte. Da er wegen des hohen Wassergehaltes relativ flüssig war, konnte er direkt in Dosenformen abgefüllt werden. Ein Verdichten war nicht notwendig. Danach wurden die Behälter schnell verschlossen und beschriftet.

Die Messergebnisse stehen im Anhang in der *Anlage VII*.

7.6.1 Dichte

Die Dichtebestimmung kann mittels Spülungswaage (nur bei sehr feinen Sanden) oder über Wägung (Behälter mit einem bestimmten Volumen + Digitalwaage) vollzogen werden. Die Wägung führte zu genaueren Ergebnissen (siehe *8 Kalibrierungsversuche*).

Die Dichte wurde aus dem Mittelwert dreier Messungen gebildet.

7.6.2 Wassergehalt

Für die Bestimmung des freien und physikalisch gebundenen Wassers hat sich eine Menge von 200 – 300 g als günstig erwiesen. Sie wurde in eine Filtratpresse eingefüllt. Die Filtratpresse war an einen Kompressor angeschlossen, kann aber auch über Druckluftpatronen bestückt werden. Der eingefüllte Mörtel wurde mit einem Druck von 6 bar solange beaufschlagt, bis kein Wasser mehr aus der Presse tropfte. Das Filtratwasser wurde in einem Becherglas aufgefangen und gemessen. Der Filterkuchen (incl. Filterpapier) wurde in eine Schüssel gefüllt, bis zur Massenkonstanz gedarrt (Kocher, elektrischen Herdplatte) und erneut gewogen. Die Massedifferenz entspricht der Verdunstungswassermenge. Die Summe aus Verdunstungswasser und Filtratwasser bezogen auf die Trockenmasse des Filterkuchens (nach dem Darren) multipliziert mit 100 % stellt den tatsächlichen Wassergehalt dar:

$$WG = \frac{(m_{\text{Darren}} + m_{\text{Filtrat}})}{m_{\text{Filterkuchen}}} * 100\% \qquad [\%]. \tag{7.1}$$

Die Umrechnung in kg je m³ erfolgt über eine Verhältnisgleichung:

$$W = \frac{(m_{\text{Darren}} + m_{\text{Filtrat}})}{m_{\text{Einwaage}}} * m_{\text{Mörtel}} \qquad [\text{kg/m}^3]. \tag{7.2}$$

7.6.3 Sandgehalt

„Der Massenanteil des Bodens in der fertigen Säule beträgt je nach Körnung und Herstellungstechnik 10 bis 60 %, im Mittel 25 %.“[20] Die Auswertung eigener Versuche ergab bis 50 M.-% bei ca. 35 Vol.-%. Dieser relativ niedrige Gehalt hat nur unbedeutenden Einfluss auf die Druckfestigkeit, da im Gefüge kein Korn-zu-Korn–Kontakt zwischen den Zuschlägen zustande kommt.

Die Messung erfolgte mittels eines Sand-Content-Kit`s. Dieses Set wird allgemein für die Bestimmung des Sandgehaltes bei Bentonitsuspensionen bei der Dichtwandherstellung verwendet, wobei hierbei die Sandgehalte weit unter denen des HDI-Mörtels liegen. Es wird entsprechend der Anleitung zum Gerät verfahren. Dabei wird der Anteil an Sand größer 75 µm (Siebdurchgang) in Vol.-% ermittelt.

Das Einfüllen des Mörtels in den Glaskörper beinhaltet das größte Fehlerpotential bei diesem Versuch. Wegen der starken Entmischungsneigung des Mörtels, muss dies zügig vonstatten gehen. Dadurch ist es schwer, die Suspension exakt bis zur Begrenzungslinie („Mud to here“) aufzufüllen. Der weitere Vorgang verläuft nach Anleitung. Nachdem sich der ausgespülte Sand im Messkolben abgesetzt hat, kann der Gehalt an der Skala am Glasröhrchen abgelesen werden. Die Skalierung ist logarithmisch und geht bis 20 Vol.-%, d. h. dass ein Glas zur Bestimmung nicht ausreichend ist. Abschätzungen führen dabei zu großen Fehlern. Ein Arbeiten in Etappen und das gleichzeitige Verwenden mehrerer Glaskolben erleichtert die Messungen, und hilft ein genaueres Ergebnis zu erzielen. Die Summe der Siebrückstände im Glaskolben entspricht dem Sandgehalt in Volumen-%. Hierbei konnten Werte bis zu 80 % gemessen werden.

7.6.4 Kornverteilung

Während der Auswertung der Ergebnisse stellte sich die Frage, in wieweit sich die Kornverteilungslinien von Entnahme aus den Säulen und Rückfluss unterscheiden würden. Das ist über eine Sieb- und Schlämmanalyse des Frischmörtels möglich. Darüber ließen sich weitere Schlussfolgerungen anschließen, z. B. in Hinblick auf Absetzwassermenge und Entmischungsverhalten. Da diese Prüfung nicht mit eingeplant war, muss dies als Empfehlung für folgende Forschungen gelten.

Die Ergebnisse der in situ Versuche sind in einer Tabelle im Anhang (*Anlage VII*) einsehbar.

7.7 Laborversuche

Die Versuche fanden im Baustofflabor der Firma Bauer in Schrobenhausen statt.

Es wurden 6 Probekörper jeweils aus Rückfluss und Entnahme hergestellt. Drei Körper bildeten eine Serie. Nach 7 Tagen wurde die erste Serie geprüft und nach 28 Tagen die Zweite. Somit gab es für jede Säule 12 Probekörper, bei 7 Säulen ergibt das 84 Stück. Da von drei Säulen die Proben für den Transport nicht genügend erhärtet waren, mussten diese nachgeschickt werden. (Frischproben sollten mindestens 2 Tage alt sein, bevor sie transportiert werden, um Erhärtungsstörungen zu vermeiden!) Diese kamen erst nach 14 Tagen im Prüflabor an, sodass bei ihnen der 14-Tage-Wert genommen wurde.

Im Lager des Baustofflabors wurden die Proben im Normklima gelagert.

Der Vorteil der hier verwendeten Probedosen ist, dass die Proben nicht extra vor Austrocknung geschützt werden müssen, da diese fest verschlossen sind.

7.7.1 Absetzwasser

Nach dem Erreichen des Prüfalters, wurden die Dosen geöffnet. Auf dem erhärteten Mörtel der meisten Proben befand sich Absetzwasser (siehe *12 Auswertung*). Dieses wurde durch Wägung genau gemessen und über die Mörtelrohdichte in kg je m³-Düsenstrahlkörper umgerechnet (*Gleichung 7.3*). Die Absetzwassermengen waren im Rückfluss höher als bei den Entnahmeproben aus den Säulen. Diese enthielten teilweise überhaupt kein Absetzwasser.

$$m_{AW} = \frac{m_{AW\text{ - }Probe}}{(m_{Probe} + m_{AW}) / \rho_{Mörtel}} \qquad [kg/m^3] \qquad (7.3)$$

7.7.2 Dichte

Die Proben wurden ausgeschalt, im Nasssägeverfahren planparallel geschnitten und mit einer Schleifscheibe abgeglichen. Danach wurden die Maße aufgenommen, um über Volumen und Masse die Prüfkörperrohdichte zu ermitteln.

7.7.3 Druckfestigkeit (nach DIN 1048)

Die Druckfestigkeit der Prüfkörper wurde nach DIN 1048 im einaxialen Druckversuch bestimmt. Hierzu benutzt die Firma Bauer einen großen Lastrahmen für hohe Festigkeiten (50 – 3000 kN) (*Abb. 30*) und einen kleineren für geringere Festigkeiten der Marke „Toni Technik“. Die *Abbildung 31* zeigt das typischen Bruchbildes eines Probekörpers (Bruchkegel). Die Prüfergebnisse werden zusammen mit einem Last-Stauchungs-Diagramm auf einem Protokollblatt ausgedruckt (Beispiel siehe *Anlage IV*).

Abbildung 30:Prüfpresse zur Bestimmung der einaxialen Druckfestigkeit



Abbildung 31: HDI-Prüfkörper nach Prüfung (typisches Bruchbild)



Im Rahmen dieser Diplomarbeit wurden die Druckfestigkeiten einheitlich auf eine Prüfkörperschlankheit von h/d = 1,0 umgerechnet.

7.7.4 Physikalisch gebundenes Wasser/ Chemisch gebundenes Wasser

Physikalisch gebundenes Wasser

Von den Bruchstücken aus der Druckfestigkeitsprüfung wurden ca. 150 g zu Stücken à 10 – 20 g manuell weiter zerkleinert, gewogen und für 24 Stunden in einen Trocknungsofen bei 105 °C gestellt. Die Massendifferenz (m_{pW}), die den Gehalt an physikalisch gebundenem Wasser darstellt, wurde wiederum in kg je m³ umgerechnet. Dazu brauchte man die Absetzwassermenge bezogen auf die Einwaage an Bruchstücken ($m_{AW\text{-}Einwaage}$), die sich aus dem Verhältnis von Absetzwasser zur ursprünglichen Probemasse (m_{Probe}) herleiten lässt:

$$m_{\text{AW - E.Probe}} = m_{\text{AW}} \frac{m_{\text{E - Probe}}}{m_{\text{Probe}}} \quad [\text{g}], \tag{7.4}$$

$$m_{\text{pW}} = \frac{m_{\text{pW - E.Probe}}}{\frac{m_{\text{E.Probe}} + m_{\text{AW - E.Probe}}}{\rho_{\text{Mörtel}}}} \quad [\text{kg/m}^3]. \tag{7.5}$$

Aus der Summe von *Gleichung 7.3* und *Gleichung 7.5* bildet sich der Wassergehalt je m³ abgesetzten Düsenstrahlmörtel:

$$W = m_{\text{AW}} + m_{\text{pW}} \quad [\text{kg/m}^3]. \tag{7.6}$$

Auf Grund der Homogenisierung der Proben vor dem Abfüllen entstanden gleichmäßige Probekörper mit annähernd gleichen Druckfestigkeiten, Dichten und Wassergehalten. Dies spiegelt nicht unbedingt die tatsächliche Situation in den Säulen wider *(*siehe *Abb. 15*: *Abschnitt 3.7).*

Chemisch gebundenes Wasser

Über das Verhältnis von chemisch gebundener Wassermenge zum Zementgehalt lässt sich auf den Grad der Hydratation des Zementsteins schließen. Als Anhaltswert gilt für eine weitgehende Hydratation (in Abhängigkeit von der Lagerungsbedingung) für ein Wasser-Zement-Verhältnis von > 0,5 : $W_{\text{chem.geb.}}/Z$ = 0,21...0,23, bzw. 0,17...0,19 für schnell abbindende Portlandzemente geringer Mahlfeinheit [19].

Die Menge an chemisch gebundenem Wasser errechnet sich aus der Differenz vom Wassergehalt im Frischmörtel (siehe *Gleichung 7.2*) abzüglich der Absetzwassermenge (siehe *7.7.1*, *Gleichung 7.3*) und der Menge an physikalisch gebundenem Wasser (*Gleichung 7.6*):

$$m_{\text{cW}} = W - m_{\text{AW}} + m_{\text{pW}} \quad [\text{kg/m}^3]. \tag{7.7}$$

7.8 Bohrkerne

Im Rahmen des Festigkeitsnachweises der Baustelle wurden aus 10 Säulen Bohrkerne entnommen. Deren Erscheinungsbilder zeigte die unterschiedliche Qualität der Säulen. Die Kerne wurden in Abhängigkeit des Durchmessers zu einzelnen Probekörpern mit der Schlankheit l/h = 1,0 gesägt und abgedrückt. Hier wurde wieder die physikalisch gebundene Wassermenge im Trockenofen ermittelt. Von 3 der 10 Kerne wurde darüber hinaus eine Glühverlustbestimmung zur Ermittlung der chemisch gebundenen Wassermenge veranlasst. Dies betraf die 3 Kerne, aus deren Säulen die Rückfluss- und

Entnahmewerte vorliegen. Als Prüfalter für die einaxiale Druckfestigkeit wurde 56 Tage gewählt.

Eine Festigkeitsentwicklung, wie bei Rückfluss und Entnahmeproben, ist an Bohrkernen nur sehr schwer feststellbar. Dazu müssen diese sehr homogen und aus eng beieinander liegenden Bereichen sein.

8 Kalibrierungsversuche und Fehlerbetrachtung

Um die Genauigkeit der Messergebnisse von Baustelle und Labor zu überprüfen, mussten Kalibrierungsversuche der eingesetzten Gerätschaften an Labormischungen mit bekannten Zusammensetzungen durchgeführt werden.

Dichtemessung durch Wägung (Digitalwaage, Becher):

An den nachgestellten Düsenstrahlmörteln (siehe *10 Nachstellmischung*) wurde die Dichte wie auf der Baustelle (siehe *7. QS – Olympiastadion Berlin*) bestimmt. Hierbei konnte festgestellt werden, dass auf diese Art ermittelte Dichten, bei entsprechender Sorgfalt den rechnerischen Dichten sehr nahe kommen. Die ermittelten Werte lagen um weniges über den Berechneten. Die Höhe des Fehlers hängt entscheidend von der Stabilität der Mischung ab, d.h. je geringer das Absetzen der Mischung ist, desto kleiner ist die Abweichung. Beim Abstreichen des Mörtels in dem Becher werden, selbst wenn es sofort nach dem Einfüllen geschieht, größere Zuschläge in das Behältnis gedrückt, während Suspension und Wasser abgezogen werden.

Dichtemessung mittels Spülungswaage:

Die Spülungswaage eignet sich hervorragend zum Messen der Dichte von Suspensionen. Sie ist dafür ein genaues und leicht zu handhabendes Messgerät. Sie ist nicht zur Bestimmung von Mörteln mit sandigen Zuschlägen gedacht. Die Dichtemessung des Rückflusses am Bohrloch erfolgt jedoch ungeachtet dessen mittels dieser Waage. Auch hier gilt: Selbst bei sorgfältiger Handhabung (genaues Kalibrieren, rasches und exaktes Füllen, Reinigen und Trocknen, Ausbalancieren und Ablesen) kann nur ein mehr oder weniger angenäherter Wert gemessen werden. Der Deckel verschließt den Behälter sehr passgenau. Sandkörner können das dichte Verschließen des konisch gearbeiteten Deckels verhindern. Dadurch befindet sich mehr Mörtel im Behälter, der zu einem höheren Ablesewert führt. Des weiteren ist das Gerät so gearbeitet, dass beim Verschließen der Waage durch den Deckel Luft und überstehende Suspension entweichen kann. Wenn jedoch Mörtel mit einem höheren Sandgehalt gemessen wird, entweicht lediglich Wasser bzw. Suspension. Schwerere Bestandteile haben sich schon abgesetzt. Größere gelangen nicht durch die Überlauföffnung.

Die mit dieser Methode gemessene Dichte liegt je nach Sandgehalt und Größtkorn bis 0,05 g/cm³ höher als tatsächlich vorhanden. Bei einem Mörtel mit einer Dichte von 1,90 g/cm³ kann ein Korn von nur 1 mm zwischen Deckel und Auflager rechnerisch schon zu einer

Dichte von 1,94 g/cm³ führen. Da dies nicht regelmäßig auftritt und auch die Korngrößen schwanken, kann man nicht von vorn herein den Messwert korrigieren.
Nach der EN 12716 muss die Rückflussdichte in regelmäßigen Abständen bestimmt werden. Dieser Art der Bestimmung hat durch die große Unsicherheit eher einen beobachtenden Charakter. Ein Ausbleiben von Bodenmaterial, was z. B. beim Durchdüsen von Felsgestein oder Findlingen, erhärteten Säulen oder sehr bindigen Böden auftreten kann, führt zu einem Dichteabfall, der dadurch bemerkt werden würde.

Sandgehaltbestimmung mittels Sand-Content-Kit:
Die Sandgehaltbestimmung mittels Sand-Content-Kit verlangt ein gewisses Fingerspitzengefühl und ist sehr fehlerhaft. Grundsätzlich ist dieses Gerät ebenso nicht für die Bestimmung von Mörtel vorgesehen. Es kommt zu Abweichungen zwischen 10 – 20 Vol.-%.
Um den Sandgehalt in Volumen-% in einen Sandgehalt in kg/m³-Mörtel umrechnen zu können, bedarf es einer Kalibrierung.
Zunächst muss man die Lagerungsdichte des Feststoffs im Sand-Content-Kit kennen. Vorversuche an stabilisierten Sand-Wasser-Gemischen ergaben, dass man den Sandgehalt in Vol.-% über die Sanddichte von 1,9 g/cm³ in einen Feststoffgehalt in kg/m³-Mörtel umrechnen kann.
Wie bereits erwähnt, hat das Sieb eine Lochweite von 75 µm. Sieht man sich die Kornverteilungslinien vom Zuschlagssand und vom Bindemittel an (*Anlagen IV* und *V*), muss man feststellen, dass sowohl ein Teil vom Boden darunter als auch ein Teil des Bindemittels darüber liegt.
Um den in der Feststoffmenge enthaltenen Zementanteil zu ermitteln, wurden Versuche an Suspensionen mit einem Wasser-Zement-Verhältnis von 1,0 durchgeführt. Um auch den Zeitfaktor bei der Produktion mit zu berücksichtigen, wurden Messungen im 30 min-Takt bis zu einer maximalen Dauer vom Ansetzen der Suspension bis zur Prüfung der Entnahme auf der Baustelle von 150 min durchgeführt. Zur Stabilisierung gegen Entmischen wurde 4 M.-% Bentonit (bezogen auf die Zementmenge) zugegeben. Das Ergebnis zeigt die *Tabelle 2*.

Tabelle 2: Kalibrierungsversuch Sand-Content-Kit

t [min]	Mittelwert [Vol.-%]
0	6
30	8
60	8
90	8
120	7
150	8

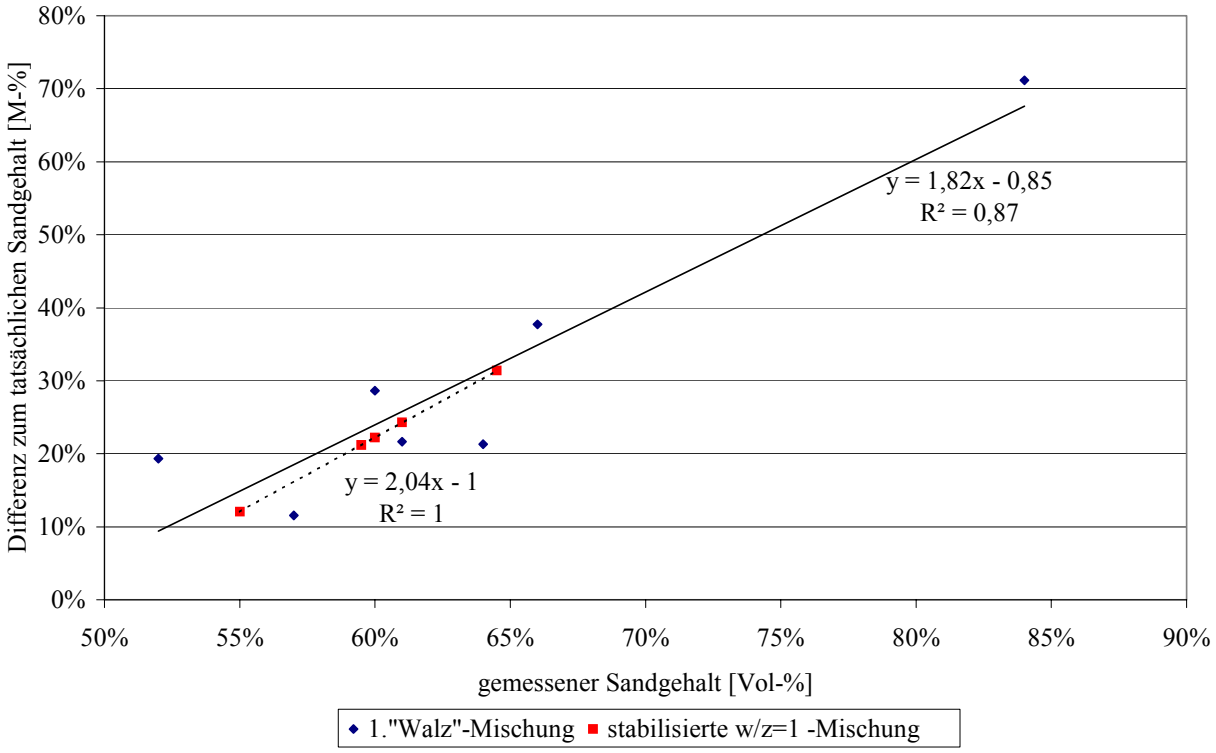
Bei der Zementhydratation beginnt nach ca. 30 min die Dormante Periode, d. h. die anfänglich rasche Reaktion zwischen dem Tricalciumaluminat (C_3A) im Portlandzementklinker und dem Wasser bzw. Sulfationen klingt ab und größere Kristallisationskeime bilden sich aus [15]. Wenn man von einem Gehalt von 8 Vol.-% über 75 µm bei einer reinen Suspension ausgeht, liegt der als Sandgehalt gemessene Zement beim Düsenstrahlmörtel, mit Zementanteilen von ca. 15 Vol.-% lediglich bei 2,5 %. Dies wird durch den Schluffanteil im Boden annähernd ausgeglichen.

Es hat sich gezeigt, dass die mit Bentonit stabilisierte Mörtelprobe die Arbeit mit dem Sand-Content-Kit wesentlich vereinfachte. Die Schwankungsbreite der Messergebnisse ist deutlich geringer, da das genaue Einfüllen des Mörtels in den Kolben wegen der geringeren Entmischungsneigung sorgfältiger vollzogen werden konnte. Ebenso fiel die Dichtebestimmung leichter.

Da die Ergebnisse der Baustellenprüfungen offensichtlich zu hoch waren, wurden im Labor an verschiedenen Mischungen Prüfungen durchgeführt. Die hierbei gewonnenen Ergebnisse ließen zunächst keinen Zusammenhang von eingewogenen und gemessenen Sandgehalt erkennen. Betrachtet man nur den in kg/m³ umgerechneten Sandgehalt (siehe *Gleichung 7.3*) in Abhängigkeit zur Differenz vom tatsächlichen Sandgehalt der Ausgangsmischung (in %), wird eine eindeutige Linearität erkennbar. Der Zusammenhang ist im *Diagramm 1* dargestellt. Über dieser Beziehung wurden die auf der Baustelle ermittelten Werte korrigiert (siehe *Abschnitt 9.1*). Die zweite Reihe resultiert aus einem Versuch mit dem stabilisierten Mörtel W/Z = 1,0. Diese Reihe bestätigt die vorherigen Ergebnisse.

Dieser Zusammenhang ist wahrscheinlich auf das ungenaue Einfüllen des Mörtels in den Glaskolben zurückzuführen, dass wie oben beschrieben, selbst bei großer Sorgfalt zu Ungenauigkeiten führt.

Diagramm 1: Ausgleich der Messwertschwankungen beim Arbeiten mit dem Sand-Content-Kit



Ob diese Kalibrierungsgerade von der Sieblinie abhängt, und ob sie auf andere Baugründe übertragbar ist, müsste noch untersucht werden.

Wassergehaltbestimmung aus Darren (Mörtel):

Auf die selbe Art und Weise wurde mit der auf der Baustelle durchgeführten Wassergehaltbestimmung verfahren. Hierbei wurde deutlich, dass die auf der Baustelle ermittelten Mengen an freiem Wasser mit ausreichender Genauigkeit der Wirklichkeit entsprechen und somit als Grundlage für eine Mengenermittlung dienen können. Das Darren im Labor kann auch in einem Mikrowellenofen vollzogen werden. Bei sehr flüssigen Mörteln empfiehlt sich ein vorhergehendes Filtrieren unter Druckluft.

Wassergehaltbestimmung aus Darren (Probekörper):

Die Bestimmung des freien, physikalisch gebunden Wassers am erhärteten Mörtel führte zu keinen klaren Erkenntnissen. Durch das Nasssägen, Schleifen, (Ziehen der Bohrkerne) und den unterschiedlichen Bearbeitungszeiträumen zwischen Entschalen und Einwiegen der Darrproben, ist keine klare Bewertung der Ergebnisse möglich. Dadurch kann auch die errechnete chemisch gebundene Wassermenge (siehe *Abschnitt 7.7.4*) nicht für Auswertungen mit angeführt werden. Der Vergleich des chemisch gebundenen Wassers

mit der Glühverlustmenge an den Bohrkernen (siehe *Abschnitt 7.8*) ergab keinen ersichtlichen Zusammenhang. Hierzu muss gesagt werden, dass der Glühverlust ca. 70 Tage nach Herstellung ermittelt wurde, während sich die chemisch gebundene Wassermenge auf ein Prüfalter von 28 Tagen bezieht.

Da das Problem der Durchmesserbestimmung schon ausführlich betrachtet wurde, soll an dieser Stelle nur noch einmal erwähnt werden, dass auf Grund geringer Veränderungen im Säulendurchmesser das Säulenvolumen überproportional schwankt. Dies ist bei der Berechnung der Bodenmenge aus *Gleichung 6.4* und darauf basierender Werte zu beachten.
Das selbe trifft auf die als konstant anzunehmenden maschinellen Herstellungsparameter (z. B. Suspensionsförderrate) zu. Auch hierbei sind Schwankungen nicht auszuschließen.

Bei der im folgenden Abschnitt (*Abschnitt 9*) angeführten Rechnung zur Bestimmung der Mischungsverhältnisse auf Grundlage der im Baufeld gemessenen Werte, kann es zu einer Fehlerfortpflanzung kommen. Die Mörtelrohdichte ist dabei als Unsicherheit kritisch zu betrachten. Über sie wird der Basiswert – der Wassergehalt – in kg je m³ umgerechnet.

Des weiteren sorgen die relativ geringen Probemengen, die mehrere m³ Mörtel repräsentieren, durch ihre Hochrechnung zu Abweichungen. Diese lassen sich durch genaues Arbeiten verringern.

9 Ergebnisse

9.1 Aufstellung der Mischungsverhältnisse

Die Werte, die im Rahmen der Qualitätssicherung auf dem Baufeld am Olympiastadion Berlin gewonnen wurden, ergeben nun im Zusammenhang mit den Kalibrierungsversuchen Werte zum Weiterarbeiten. Jetzt kann für jede Mörtelprobe eine Mischungszusammensetzung aufgestellt werden.

In diesem Zusammenhang stehen folgende Werte zur Verfügung:

Von der Baustelle:

Rohdichte Mörtel [g/cm³],

Wassergehalt Mörtel [M.-%],

Feststoffgehalt Mörtel [Vol.-%].

Wenn man die Summe aus Darr- und Filtratwassermenge m_{DW} [g] auf die Einwaagemenge an Frischmörtel $m_{E.Mö}$ [g] bezieht, erhält man über die Mörtelrohdichte ($\rho_{Mörtel}$) [kg/m³] den Wassergehalt W je 1 m³ Mörtel in [kg/m³]:

$$\frac{m_{E.Mö}}{m_{DW}} = \frac{\rho_{Mörtel}}{W}. \qquad (9.1)$$

Dieser Wert bildet die Basis für die weitere Rechnung. Er liegt im Bereich um die 500 kg/m³. Die Feststoffmenge im Mörtel ergibt sich somit aus der Differenz aus der Mörtelmasse pro 1 m³ und seinem Gehalt an Wasser:

$$M_{Feststff} = M_{Mörtel} - W \qquad [kg/m^3]. \qquad (9.2)$$

Hierin sind Zuschläge und Bindemittel enthalten.

Nimmt man den gemessenen Sandgehalt [Vol.-%] und multipliziert ihn mit der sich im Sand-Content-Kit einstellenden Feststoffdichte von 1,9 g/cm³, erhält man den Gehalt an Sand im Mörtel:

$$G_0 = SG * 1{,}9 * 1000 \qquad [kg/m^3]. \qquad (9.3)$$

Die Differenz zum Gesamtfeststoffgehalt ist Bindemittel:

$$C_0 = M_{Feststoff} - G_0 \qquad [kg/m^3]. \qquad (9.4)$$

Hierbei erhält man Zementgehalte zwischen 0 und fast 400 $kg/m^3_{Mörtel}$. Diese ergeben offensichtlich keinen Sinn, nicht zuletzt im Hinblick auf die erreichten Druckfestigkeiten. Korrigiert man nun den errechneten Sandgehalt über die Beziehung aus *Abschnitt 8*, erhält man sowohl sinnvolle Gehalte an Sand als auch an Zement. Die Gleichung der Korrelationsgeraden ist (siehe *Diagramm 1*: *8 Kalibrierungsversuche*):

$$y = 1{,}82x - 0{,}85. \qquad (9.5)$$

y – Korrekturwert in %

x – gemessener Sandgehalt in Vol.-%

Der neue Sandgehalt berechnet sich danach mit:

$$G = \frac{G_0}{(1+y)} \qquad [\text{kg/m}^3]. \tag{9.6}$$

Der neue Zementgehalt ist dann:

$$C = M_{\text{Feststoff}} - G \qquad [\text{kg/m}^3]. \tag{9.7}$$

Jetzt ergeben sich für das Düsenstrahlverfahren realistische Werte: Sandgehalte zwischen 907 und 941 kg/m³-Düsenstrahlmörtel bei Zementgehalten zwischen 420 und 540 kg/m³. Die Überprüfung der Mörtelzusammensetzung lässt noch eine kleine Ungenauigkeit in der Gesamtvolumenmenge erkennen. Diese max. 3 % Abweichung entsteht auf Grund der Rechnung mit den kalibrierten Werten und lässt sich leicht auf ein Volumen von 1000 l bzw. 1 m³ korrigieren. Die Stoffverhältnisse untereinander werden dabei nicht verändert.

Es stehen die folgenden Werte zur Weiterverarbeitung und vergleichenden Auswertung zur Verfügung:

- Frischmörtel: Rohdichte, Wassergehalt, Sandgehalt, Zementgehalt;
- Prüfkörper: Druckfestigkeit (7 d bzw. 14 d, 28 d), Rohdichte, Absetzwasser, Wassergehalt (physikalisch gebundenes Wasser), chemisch gebundenes Wasser, Sandgehalt (wie Mörtel), Zementgehalt (wie Mörtel), Wasser-Zement-Verhältnis.

Die berechneten Mörtelzusammensetzungen sind der *Anlage VIII* im Anhang zu entnehmen. Beispielhafte Darstellungen für grundlegende Zusammenhänge zwischen den Ergebnissen, wie Zementgehalt oder Rohdichte (Frischmörtel, Festkörper) zur Druckfestigkeit, sind auf der CD-ROM *Diagramme+Beispiele.xls* abgelegt.

9.2 Vergleich zur Mischungsberechnung

Tabelle 3: Vergleich Mischungsberechnung und Probenahme

[kg/m³]	Mischungsberechnung	Mittelwert aus Probenahme
M_C	337	467
M_W	402	502
M_G	1296	921
W/Z	1,19	1,07

Mischungsberechnung-Beispiele.xls/Rechnung (1-6min)/; Auswertung-Probenahme.xls./AlleWerte/

Die folgenden Beziehungen sind für die mit kürzerer Ziehzeit hergestellten Säulen aufgestellt. Die Ergebnisse der Säulenentnahmen und der Rückflussproben sind wegen der nur geringen Differenzen zu Mittelwerten zusammengefasst. Die Tabellenwerte sind den angegebenen Dateien auf der CD-ROM entnommen.

In dieser Tabelle ist das Absetzen des Suspensionswassers im Mörtel bzw. im Probenbehälter noch nicht eingerechnet. Die Absetzwassermengen sind sehr gering, und beeinflusst den W/Z-Wert nur im Einhundertstelbereich (1,07→1,05).

Es wird deutlich, das wesentlich mehr Suspension im Gemisch enthalten ist, als durch die Berechnungsmatrix zunächst einmal angenommen. Die Wassermenge im Frischmörtel ist auf Grund von Ausfilterung im Verhältnis zum Zement deutlich geringer. Da mehr Suspension im Gemisch vorliegt, ist weniger Bodenmaterial enthalten. Daraus folgt, dass in der Berechnungsmatrix der Eintrag an Suspension mit einem Faktor versehen werden muss, um den realen Bedingungen gerecht zu werden. Bei dem Bodenmaterial handelt es sich um einen stark durchlässigen Feinsand. Also ist hier die Ausfilterung in jedem Fall mit zu beachten.

Setzt man in der *Gleichung 6.3* der Mischungsberechnung den Faktor *1,08* vor die Faktoren zur Berechnung der in den Boden eingebrachten Suspensionsmenge Q_s, erhöht sich diese auf 3279 l. Von der nun wesentlich mehr im Boden enthaltenen Gesamtwassermenge (die Bodenfeuchte ist auf Grund des geringen Gehaltes von untergeordneter Bedeutung) werden *3 %* infolge Ausfilterung abgezogen. Das Absetzwasser, das auf Grund der Entmischungen entsteht, versickert ebenfalls, geht aber nicht explizit in die Rechnung mit ein. Um das Mörtelvolumen dem Säulenvolumen gleich zu setzen (Annahme für Rechenansatz), muss der Bodenanteil über den Faktor *0,56* abgemindert werden.

Durch diese Korrekturen verringert sich der in 1 m³ HDI-Mörtel enthaltene Boden von 1296 auf 930 kg. Der Zementanteil erhöht sich auf 467 kg und der Wasseranteil auf 498

kg. Es stellt sich ein Wasser-Zement-Verhältnis von 1,07 ein. Verglichen mit den Werten in *Tabelle 3* kommt man nun den umgerechneten Entnahmewerten sehr nahe.

Die Ermittlung der Faktoren geschieht durch Iteration.

Der Vollständigkeit halber ist hier noch der Vergleich von einer mit erhöhter Ziehzeit hergestellten Säulen zur veränderten Mischungsberechnung dargestellt. Folgende Faktoren wurden eingesetzt: 1,24 * Suspensionsmenge, 0,54 * Bodenanteil, Wasseranteil –11 %.

Tabelle 4: Vergleich Mischungsberechnung und Probenahme (bei erhöhter Ziehzeit)

[kg/m³]	Mischungsberechnung	Probenahme (Säule 319)
M_C	510	511
M_W	494	496
M_G	903	904
W/Z	0,97	0,97 (effektiv 0,88)*

*nach Abzug der Absetzwassermenge

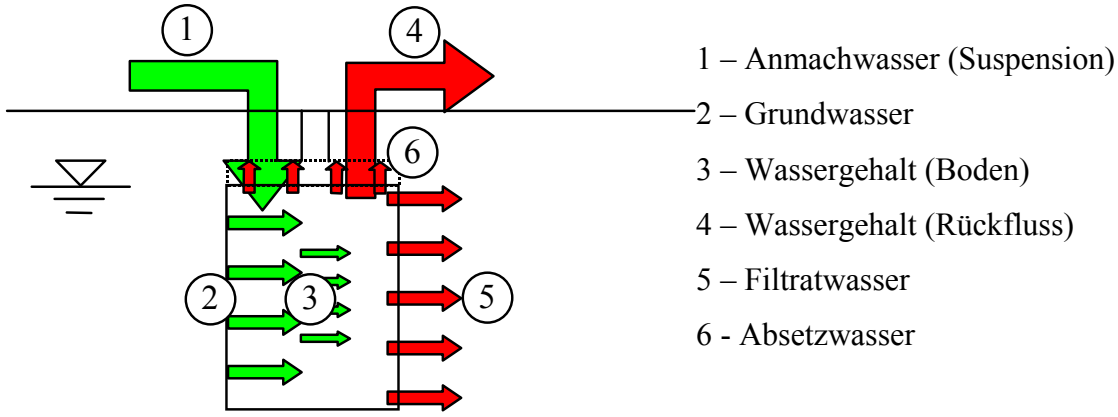
Mischungsberechnung-Beispiele.xls/Rechnung (2-7min)/; Auswertung-Probenahme.xls/Alle Werte/

9.3 Nachstellmischung

Um weitere Sicherheit über die gemessenen und die korrigierten Werte von der Entnahme- und Rückflussanalyse zu erlangen, mussten Nachstellmischungen angefertigt werden. Diese sollten den Düsenstrahlmörtel möglichst genau simulieren.

Dabei stand die Frage nach dem Wasser-Bindemittel-Verhältnis im Vordergrund. Dieser bestimmt maßgeblich die späteren Druckfestigkeiten und die Festigkeitsentwicklung. Die Bindemittelmenge ist dabei auf Grund der eingebrachten Suspensionsmenge und deren Mischung bei der Annahme eines homogenen Suspensions-Boden-Gemisches als relativ konstant einzustufen. Das heißt, das einzig die Komponente des Wassers bei ansonsten gleichen Parametern das Endprodukt bestimmt. Das Wasser beim Düsenstrahlverfahren ist Anmachwasser der Suspension (1) und Grundwasser (2), bzw. Bodeneigenfeuchte (3). Davon geht das im Rückfluss enthaltene Wasser (4), das Filtratwasser (5) und das Absetzwasser (6) aus dem Mörtel (siehe Graphik *(Abb. 32)*).

Abbildung 32: Wege des Wassers beim Düsenstrahlverfahren



Neben verschiedenen Versuchen zum Festigkeitsverlauf innerhalb von Standzylindern bei denen versucht wurde, Absetzerscheinungen und Wassergehaltsgradienten in einer simulierten HDI-Säule nachzustellen, lag das Hauptaugenmerk aller weiteren Untersuchungen auf der Erstellung einer „Walz“-Kurve. „Walz“-Kurven werden in der Betontechnologie zur Berechnung der Mischung verwendet. Bei ihnen kann nach Zementfestigkeitsklassen getrennt, bei einer vorgegebenen Betondruckfestigkeit β_{W28}, der Wasser-Zement-Wert entnommen bzw. für Betone mit besonderen Eigenschaften begrenzt werden.

Diese Kurven existieren lediglich für Wasser-Zement-Bereiche zwischen 0,3 bis 1,00 und gelten für Würfeldruckfestigkeiten (200 mm x 200 mm – Kantenlänge), die nach 28 Tagen Normlagerung geprüft werden. Höhere W/Z-Werte finden in der Betontechnologie keine

Anwendung. Auch unterscheiden sich Zemente gleicher Festigkeitsklassen unterschiedlicher Lieferfirmen und Chargen zum Teil erheblich, so dass eigene Untersuchungen unerlässlich waren.

Die Messungen und Berechnungen ließen Wasser-Zement-Werte im Bereich von 0,8 bis 1,2 vermuten. Daher wurde zunächst für einen konstanten Wassergehalt von 490 kg/m³-Mörtel für die unterschiedlichen W/Z-Werte im eben genannten Bereich 7 Mischungen mit unterschiedlichen Mischungsverhältnissen angesetzt (*Tabelle 5*) (siehe *Gleichung 6.1*).

Tabelle 5: Mischungsaufstellung „Walz" 1

W/Z	Wasser [kg/m³]	Zement [kg/m³]	Sand [kg/m³]	Rohdichte [g/cm³]
0,80	490	613	828	1,93
0,90	490	544	886	1,92
0,95	490	516	911	1,92
1,00	490	490	933	1,91
1,05	490	467	953	1,91
1,10	490	445	971	1,91
1,20	490	408	1002	1,90

Als Zuschlagssand wurde der an der Baumaßnahme am Olympiastadion anstehende „Berliner Sand" verwendet. Der Zement ist ein Portlandzement CEM I 32,5 R aus Rückstellproben bei der Siloanlieferung. Die Werte entsprechen denen, die durch Probenahme und Korrekturen ermittelt wurden.

Die Mischungen erwiesen sich als äußerst instabil. Dadurch traten starke Entmischungserscheinungen auf, die ein Absetzen schon kurz nach Befüllen der Probedosen zur Folge hatten. Die Festigkeiten und die nach Abzug der Absatzwassermenge ermittelten effektiven W/Z-Werte lagen weit über (bzw. unter) den erhofften. Bei einem W/Z-Wert von 1,0 lag das Absetzmaß $\Delta H/H \approx 25$ % (zum Vergleich: Rückfluss $\Delta H/H \approx 3$ %, Entnahme $\Delta H/H \approx 0$ %).

Daran wurde deutlich, dass man nur mit einer stabilisierten Mischung arbeiten kann. In der Geotechnik werden Suspensionen mit hohen Wasseranteilen und somit starker Entmischungsneigung mit Bentonit stabilisiert. Das verursacht jedoch eine gewisse Festigkeitsminderung, da sich auf Grund des Gefügeaufbaues des Tons bei Lasteintrag winzige Gleitflächen im Beton ausbilden. Um die Mischung zu stabilisieren wurde daher entschieden, die Zuschlagsmenge auf 600 l/m³ zu erhöhen. Dies entspricht zwar nicht den

bisher festgestellten Mengen, hatte aber eine ausreichende Stabilisierung des Mörtels zur Folge, bei der durch den erhöhten Zuschlagsanteil noch ein Korn-zu-Korn-Kontakt und dadurch eine ungewollte Festigkeitszunahme durch Verzahnung ausschließbar war. Ebenso erhöhten sich die Mörtelrohdichten auf für Düsenstrahlmörtel ungewöhnliche Werte. Da die Zuschlagmenge als Konstante in die Rechnung eingeht, ergeben sich verschiedene Wasser- und Zementgehalte über die unterschiedlichen W/Z-Verhältnisse. Der Mörtel musste beim Einfüllen leicht verdichtet werden. Trotzdem waren in den Prüfkörpern stellenweise Luftblasen eingeschlossen und Setzungen um 2 % eingetreten.

Tabelle 6: Mischungsaufstellung „Walz“ 2

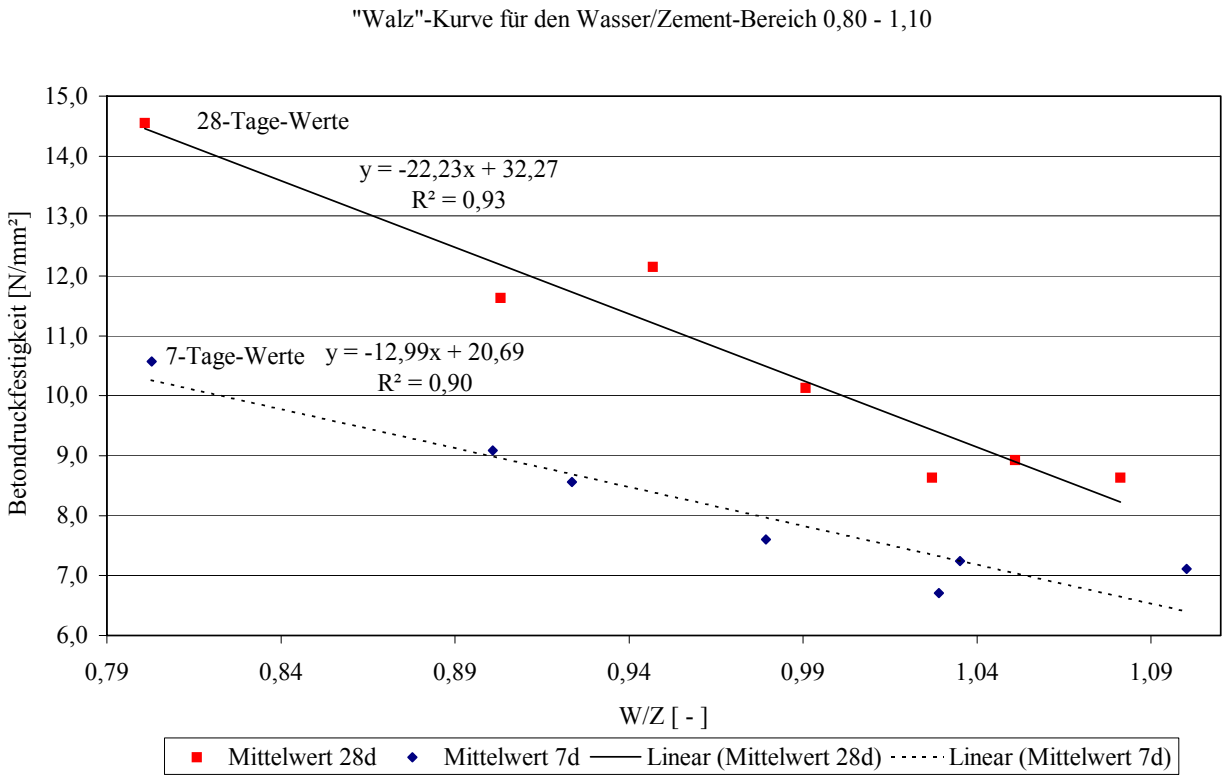
W/Z	Wasser [kg/m³]	Zement [kg/m³]	Sand [kg/m³]	Rohdichte [g/cm³]
0,80	285	356	1590	2,23
0,90	294	327	1590	2,21
0,95	299	314	1590	2,20
1,00	302	302	1590	2,19
1,05	306	291	1590	2,19
1,10	309	281	1590	2,18
1,20	315	263	1590	2,17

Es wurden sowohl Proben für die 7-Tage-Festigkeit als auch für die 28-Tage-Festigkeit angefertigt.

Es zeigte sich, dass die 7-Tage-Festigkeiten sehr gut in den Bereich der Baustellenwerte passen. Sie liegen zwischen 6,3 N/mm² als kleinsten Einzelwert und 11,0 N/mm² als Maximum. Da für jedes W/Z-Verhältnis eine Serie von 3 Proben hergestellt wurde, kann mit Mittelwerten weitergearbeitet werden. Die Gegenüberstellung von den gemittelten Druckfestigkeiten zu dem effektiven W/Z-Wert (nach Abzug der geringen Absetzwassermenge) ergab eine klare Korrelation. Dieser Zusammenhang ist im *Diagramm 2* dargestellt. Für diesen relativ kurzen Wertebereich genügt das Aufstellen einer linearen Trendlinie. Das Anpassen der Funktion an ein Polynom oder eine Exponentialfunktion bewirkt lediglich Veränderungen des W/Z-Verhältnisses um ± 1/100stel gegenüber der linearen Gleichung. Bei geringer Überschreitung der Grenzen der „Walz“-Kurve in höhere bzw. niedrigere Druckfestigkeitsbereiche ist eine W/Z-Wert-Zuordnung dadurch besser möglich.

Die Druckfestigkeiten der 28-Tage-Werte zeigten ebenso eine gute Übereinstimmung mit den Probenahmewerten. Auch hier ist eine eindeutige Linearität zwischen den Druckfestigkeiten und den W/Z-Verhältnissen feststellbar.

Diagramm 2: Abhängigkeit der Zylinderdruckfestigkeit β_{C28} (Zylinder: ∅ 10 cm, h=10 cm) des Mörtels vom W/Z-Wert (CEM I 32,5 R)



Die Werte können im Anhang den *Anlagen X* und *XI* entnommen werden.

Über diese Trendlinie ist es nun möglich, zu den vorgegebenen 7- bzw. 28-Tage-Druckfestigkeiten aus Rückfluss und Entnahme Wasser-Zement-Werte abzulesen bzw. auszurechnen. Hieran wurde deutlich, dass wie schon zu Beginn vermutet, die W/Z-Werte noch unter den analytisch bestimmten liegen.

Aus dem Wassergehalt des Düsenstrahlfrischmörtels auf der Baustelle, der als Eingangswert ausreichend sicher gilt, und dem aus der Druckfestigkeit errechneten W/Z-Wert ergibt sich der Zementgehalt. Über die Stoffraumrechnung, die die Stoffmengen je 1 m³-Mörtel betrachtet, folgt die Feststoffmenge (Zuschlag) (siehe *Gleichung 6.1*). Zur Kontrolle kann der Sandgehalt ebenso über die auf der Baustelle ermittelten Frischmörteldichten ausgerechnet werden. Auch hier weisen die Werte eine hohe Übereinstimmung auf. Die Werte über die Stoffraumrechnung dürfen als genauer

angesehen werden, da sie den Messwert Mörtelrohdichte nicht beinhalten. Es ergeben sich Sandgehalte bis 900 kg/m³ bei den Säulenentnahmen und etwas weniger im Rückfluss.
Die neuen Mischungsverhältnisse für die Mörtelproben von der Baumassnahme am Olympiastadion Berlin sind der *Anlage XII* zu entnehmen.

Tabelle 7: Vergleich der Mischungen errechnet über die 7-Tages„Walz"-Kurve zu den kalibrierten Probenahmewerten

[kg/m³]	Mittelwert aus Probenahme	über „Walz"-Kurve
M_C	467	511
M_W	502	506
M_G	921	873
W/Z	1,05	0,96

Auswertung-Probenahme.xls/AlleWerte/; Auswertung-WALZ.xls./7d/

Der Wassergehalt (Probenahme) beinhaltet die geringe Absetzwassermenge (12 kg/m³). Der W/Z-Wert ist der effektive Wert, wie er tatsächlich im Mörtel vorliegt.
Das Mischungsverhältnis hat sich weiter in Richtung Suspension hin verschoben. Boden steht zur Suspension in einem Volumenverhältnis von 1:1. Auf Grund der relativ hohen Festigkeiten kann der W/Z-Wert nur im Bereich kleiner 1,0 liegen. Hieran wird die Ausfilterung offensichtlich, da mit einer Suspension mit W/Z = 1,0 im erdfeuchten Boden ($w \approx 5$ %) gearbeitet wurde. Die folgenden Diagramme stellen eine Gegenüberstellung der Mischungsverhältnisse aus den einzelnen Berechnungsansätzen dar. Das zweite Diagramm zeigt die Frischmörtelrohdichten und die Wasser-Zement-Werte.

Diagramm 3: Gegenüberstellung der errechneten Mischungsverhältnisse über die unterschiedlichen Berechnungswege (7-Tage-Werte)

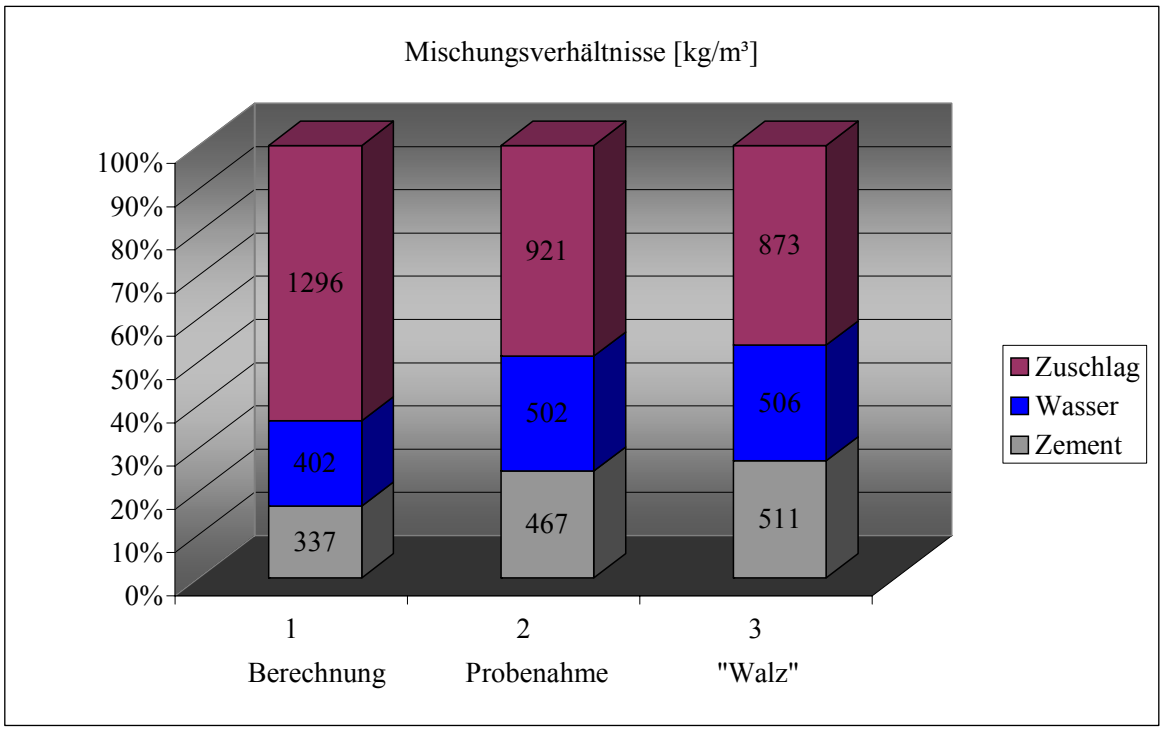
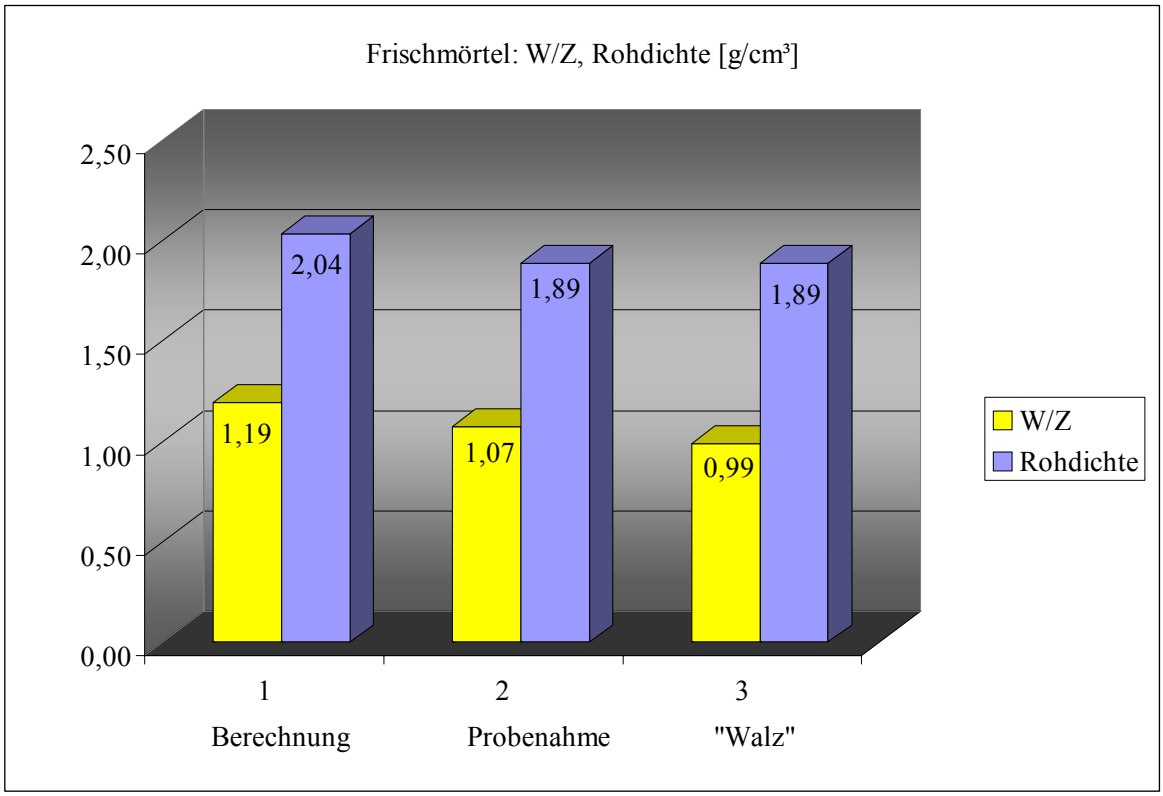


Diagramm 4: Gegenüberstellung der Wasser-Zement-Verhältnisse und der Mörtelrohdichten



(siehe *Tabelle 3*: Berechnung, *Tabelle 7*: Probenahme, „Walz“)

9.4 Vergleich der „Walz“-Kurven

Der Vergleich der 7-Tage-Werte und der 28-Tage-Werte gibt unter anderem einen Hinweis auf die Genauigkeit der getroffenen Annahmen.

Die von den Prüfkörpern aus der Baumaßnahme über die „Walz“-Kurve errechneten Wasser-Zement-Verhältnisse der 28-Tage-Werte liegen im allgemeinen etwas niedriger als die der 7-Tage-Werte. Das kann verschiedenen Gründe haben. Ein Einfluss des erhöhten Sandgehalts der Nachstellmischung ist nicht vollständig auszuschließen, weil dadurch auch mit einer verhältnismäßig geringeren Suspensionsmenge gearbeitet wurde. Ein offensichtlicher Unterschied zwischen den 7 Tage alten Proben und den 28tägigen liegt in der Absetzwassermenge. Diese ist bei den nach 7 Tagen geprüften im Durchschnitt etwas höher. Man kann also von einer nachträglichen Wasseraufnahme sprechen. Das spiegelt sich auch in der etwas höheren Dichte der 28-Tage-Prüfkörper wieder. In diesem Fall deutet auch die größere chemisch gebundene Wassermenge darauf hin, wobei dieser Wert auf Grund der Unsicherheiten seiner Ermittlung (siehe *Abschnitt 8*) mit Vorsicht zu behandeln ist. Grundsätzlich kann man sagen, dass die 7- und die 28-Tage-Werte eine recht gute Übereinstimmung vorweisen, was die folgende *Tabelle 8* verdeutlichen soll. Die Einzelwerte können der *Anlage XII* im Anhang entnommen werden.

Die Ziehzeit lag bei 6 min/m. Wie erwähnt, existieren bei den mit 7 min/m hergestellten Säulen statt der 7-Tage-Werte die 14-Tage-Werte. Um diese Werte vergleichen zu können, müsste eine neue Probenserie angefertigt werden,.

Die Ermittlung der Stoffmengen verlief analog der oben beschriebenen Berechnung.

Tabelle 8: Vergleich der Mischungen errechnet aus den 7-Tage-Werten und den 28-Tage-Werten

[kg/m³]	„Walz“-Kurve: 7d	„Walz“-Kurve: 28d
M_C	511	549
M_W	506	506
M_G	873	917
W/Z	0,96	0,90
	Auswertung-WALZ/7d/;	*Auswertung-WALZ/28/*

9.5 Auswirkung auf die Mischungsmatrix

Die Erkenntnisse über die Mischungsverhältnisse fließen in die Berechnungsmatrix aus *Abschnitt 6 Mischungsentwurf* ein.

Es stellte sich heraus, dass gegenüber der ersten Korrektur der Rechnung der Gehalt an Suspension im HDI-Mörtel fast konstant geblieben ist. Der Faktor wird zu *1,19* in *Gleichung 6.3* der Mischungsberechnung. Der Sandgehalt hat sich verringert. Hier wird der Faktor zu *0,52* (vorher *0,56*).

Von der Gesamtwassermenge muss auf Grund der starken Ausfilterung mehr Wasser abgezogen werden. Dem wird durch den Entzug von *9 %* der Gesamtwassermenge Folge geleistet.

Die folgende Tabelle zeigt die angeglichenen analytischen Ergebnisse im Vergleich zu den im Labor ermittelten Werten.

Tabelle 9: Vergleich Mischungsberechnung - Mischung über 7-Tages-"Walz"-Kurve

[kg/m³]	Berechnung	über „Walz“-Kurve
M_C	515	511
M_W	508	506
M_G	864	873
W/Z	0,99	0,96

Mischungsberechnung-Beispiele.xls/Rechnung(3-6min)(7d)/; Auswertung-WALZ/7d/

Die Mörtelrohdichte ist in beiden Fällen ca. 1,90 g/cm³. Die Frage, die sich daraus ergibt ist die der Erklärbarkeit dieser Faktoren. Warum mindert sich der Bodengehalt scheinbar auf 52 % ab, während die eingebrachte Suspensionsmenge auf 119 % (!) ansteigt. Wohin gehen die Materialien und welche Umlagerungsvorgänge können zu solchen Schwankungen führen?

Da die 28-Tage-Werte zu etwas anderen Mischungsverhältnissen geführt haben, ergeben sich für die Rechnung weitere Änderungen. Hier steigt die eingebrachte Suspensionsmenge auf 125 %. Der Bodengehalt fällt auf 55 %. Das geringere Wasser-Zement-Verhältnis bei gestiegenem Suspensionseintrag wird durch Minderung der Wassermenge um 18 % erreicht.

Tabelle 10: Vergleich Mischungsberechnung - Mischung über 28-Tages-"Walz"-Kurve

[kg/m³]	Berechnung	über „Walz“-Kurve
M_C	541	549
M_W	481	506
M_G	914	917
W/Z	0,89	0,90

Mischungsberechnung-Beispiele.xls/Rechnung(3-6min)(28d)/; Auswertung-WALZ/28d/

(Da bei den umgerechneten Probenahmewerten mit Mittelwerten gerechnet wird, ergeben die Stoffmengen nicht immer 1000 l. Daher kommen geringe Abweichungen in der Rechnung zustande)

Die eben erläuterten Beziehungen gelten wiederum für die mit 6 min/m hergestellten Säulen, von den sowohl die 7-Tage-Druckfestigkeiten als auch die 28-Tage-Druckfestigkeiten existieren.

Im gleichen Maße verhält es sich mit den mit erhöhter Ziehzeit (7 min/m) gedüsten Säulen. Wenn man mit den Zielwerten aus den über die „Walz“-Kurve ermittelten Stoffmengen in die Rechnung geht, und es darauf anlegt, den Mörtel für 100 % Säuleninhalt zu berechnen (Annahme für Berechnungsansatz), bedarf es einer Wertekorrektur durch empirische Faktoren: für die eingebrachte Suspensionsmenge um *1,43*, für den Bodenanteil im HDI-Körper um *0,49* und für den Wasseranteil aus Boden und Suspension um abzüglich *20 %*. Die Tabelle stellt die Ergebnisse der Mischungsberechnung, mit den gegenüber den ersten Säulen auf 7 min/m verlängerter Ziehzeit und der Durchmessererhöhung auf 1,80 m, den korrigierten und den Rechnungseingangswerten gegenüber.

Tabelle 11: Gegenüberstellung der Stoffmengen bei erhöhter Ziehzeit (7min/m)

[kg/m³]	Berechnung	Korrigierte Berechnung	über „Walz“-Kurve
M_C	356	587	581
M_W	418	502	506
M_G	1239	817	816
W/Z	1,17	0,86	0,87 (effektiv 0,80)*

*nach Abzug der Absetzwassermenge

Mischungsberechnung-Beispiele.xls/Rechnung (1-7min)/;
Mischungsberechnung-Beispiele.xls/Rechnung (3-7min)/;
Auswertung-WALZ/28d/.

10 Auswertung

10.1 Druckfestigkeiten

Für den betrachteten Unterfangungsbereich am Olympiastadion war die Vorgabe der Statiker, einen Beton der Festigkeitsklasse B 5 herzustellen. Das bedeutet, dass die Würfeldruckfestigkeit nach 28 Tagen mindestens 5 N/mm² betragen muss. Die Serienfestigkeit liegt demnach bei 8 N/mm². Die Vorgabe bezieht sich auf Würfel (20 cm x 20 cm). Die Zylinderdruckfestigkeit β_C lässt sich über den Faktor 1,05 in die Würfeldruckfestigkeit β_{W200} umrechnen: $\beta_{W200} = \beta_C / 1{,}05$. D. h., dass theoretisch eine Serienfestigkeit von mindestens 8,4 N/mm² bei den Zylindern mit dem Durchmesser von 10 cm und einer Höhe von 10 cm erreicht werden mussten. Die Druckfestigkeit bei den Mörtelproben lag im Mittel bei 12,8 N/mm² nach 28 Tagen.

Die Werte können im Anhang der *Anlage IX*, sowie auf der CD-ROM der Datei *Auswertung-Probenahme.xls* entnommen werden.

10.2 Absetzverhalten und Viskosität

Neben den Inhomogenitäten in den Säulenelementen hat der Wasser-Zement-Wert den entscheidenden Einfluss auf die Druckfestigkeit des Düsenstrahlmörtels. Die Laborversuche haben gezeigt, dass hierbei das Absetzverhalten von wesentlicher Bedeutung ist. „Unter Wasserabsondern, Bluten oder Wasserabstoßen versteht man die Sedimentation bei Zementleim, Frischbeton oder -mörtel vor dem Erstarren, wobei die Feststoffteile absinken und das verdrängte Anmachwasser aufsteigt“ [19, S.61]. In den Probedosen, in denen eine seitliche Ausfilterung nicht möglich ist, setzte sich auf der Probenoberfläche gleich nach dem Einfüllen ein Wasserfilm ab. Dies ist beim Düsenstrahlverfahren in fast allen Fällen zu beobachten. Zunächst steigt die Zement-Wasser-Suspension auf. Diese kann in Form kleiner Fontänen aus dem Mörtel entweichen. Nachdem sich im oberen Bereich eine Art Filterkuchen ausgebildet hat, steigt nur noch Wasser auf. Dabei entstehen innerhalb der Säule vertikal verlaufende Sandadern, in denen das Wasser fließt. Diese Sandadern sind immer wieder an Bohrkernen, die in vertikaler Richtung den Säulen entnommen werden, feststellbar. Bei der ersten Nachstellmischung zur Aufstellung einer „Walz“-Kurve (siehe *Abschnitt 9.3*) trat ebenso dieser Effekt ein. In den Dosen hatte sich viel Wasser abgesetzt (verglichen mit den Probenahmen auf der Baustelle etwa die 10fache Menge). Dadurch wurde die Prüfkörperhöhe dementsprechend geringer. Auf der Oberfläche sind Krater zu sehen, aus denen das Wasser ausgetreten war. Im oberen Bereich hat sich ein Filterkuchen aus Zement gebildet. Der dunklere (feuchte)

Bereich ist mit Sand angereichert. Auf der Außenseite sind die typischen Sandadern durch die höhere Feuchte deutlich zu erkennen (*Abb. 33*).

Durch das Absetzen und Ausfiltern verringert sich der Wassergehalt im Frischmörtel. Dadurch entstehen bei steiferen Mörteln Poren. Dies ist bei den Laborproben nicht

Abbildungen 33: Probekörper mit Inhomogenitäten infolge Ausfilterung



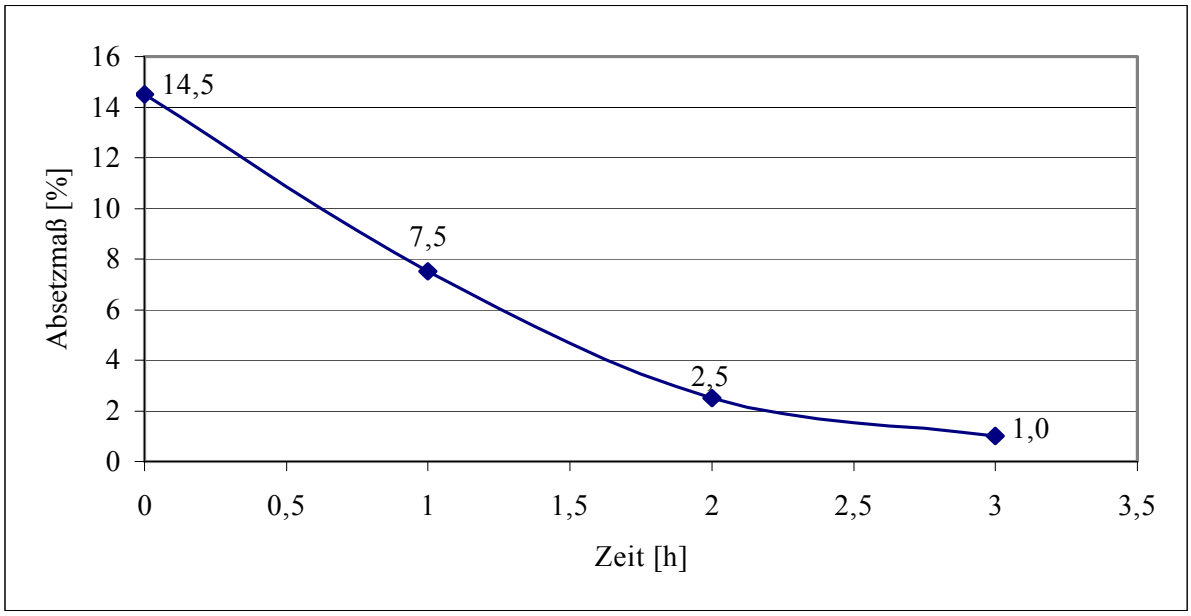
festzustellen, da der Mörtel sehr flüssig ist und sich nachverdichtet. An den Bohrkernen ist eine höhere Porosität bemerkbar. Diese könnte auf diesen Effekt zurückzuführen sein.

Da man beim Düsenstrahlverfahren, wenn nicht im Grundwasser gedüst, und der umgebende Boden entsprechend durchlässig ist, von einer Art drainierte Situation sprechen kann, bildet sich der Filterkuchen rund um die Säule herum aus. Das ist eine Erklärung dafür, dass in diesen Bereichen erhöhte Druckfestigkeiten an Bohrkernen gemessen werden.

Nach [19] ist der Zement für das Bluten nur von untergeordnetem Einfluss. Eher wirken sich Zuschlag, Bauablauf und Zusätze darauf aus.

Um den Einfluss der Mischdauer bzw. der eingetragenen Düsenergie in den Mörtel zu prüfen, wurde die erste „Walz“-Mischung, bei der starke Entmischungserscheinungen auftraten, mit einem W/Z-Wert von 1,0 nochmals zusammengestellt. Dieses Mal wurde ein Teil der Mischung nach 5minütigem kräftigen Durchmischen in einen Standzylinder zum Absetzen gefüllt. Nach 15 Minuten hatte sich bereits 12,5 % (von insgesamt 13,5 %) abgesetzt. Die restliche Mischung wurde fortlaufend kräftig durchmischt (Bohrmaschine + Rührstab). Nach 2 und nach 3 Stunden wurden weitere Standzylinder angesetzt. Die Messergebnisse zeigt das *Diagramm 5*.

Diagramm 5: Absetzversuch



An diesem Diagramm wird das zeitliche und herstellungsbedingte Verhalten des Absetzens deutlich. Mit wachsender Mischzeit und mit Erhöhung der Mischintensität kommt es auf Grund von Partikelzerstörungen, mit dadurch verbundener Erhöhung der spezifischen (inneren) Oberfläche, zu einem Anwachsen der Viskosität. Die Ausgangsstoffe werden besser dispergiert.

Das Ansteigen der Viskosität hat zwei Ursachen. Zunächst sinkt die Viskosität, da beim Zusammenführen der Komponenten gebildete Agglomerate durch das Mischen zerfallen und sich Gleitschichten ausbilden. Nach wenigen Minuten beginnt die Viskosität anzusteigen, da erste Keimbildungsreaktion des Tricalciumaluminates (C_3A) zu Ettringit bzw. Monosulfat (Ettringit) das System verdichten [15]. Die zweite Ursache, die eng mit der ersten zusammenhängt ist, dass durch das Düsen und Pumpen Zementkörner zermahlen und ihre Oberfläche aufgeraut werden. Die erhöhte innere Reibung und das gestiegene Bestreben der Zementklinkerinhalte mit dem Wasser zu reagieren wirkt sich fördernd auf die Viskosität aus.

Durch die zusätzlich eingetragene Mischenergie fallen die Absetzmaße beim Laborversuch auf das Niveau der Baustellenwerte. Beim Düsenstrahlverfahren wird die Ausgangssuspension nach dem Mischen der einzelnen Komponenten zunächst in einen Vorratsbehälter gepumpt. Hier wird sie so lange gerührt, bis sie benötigt wird. Durch das Pumpen wird zusätzliche Energie eingetragen. Dabei kommt es zur Erwärmung. Beim Verdüsen mit hohem Druck, dem Aufprallen des Mörtels auf das Bodenmaterial und den

starken Verwirbelungen innerhalb der Säule erhöht sich die Viskosität, wie beim verlängerten Mischen im Labor.

Eine Erklärung, warum bei fast gleichen Wassergehalten der Rückfluss stärker zum Absetzen neigt als die Entnahme, könnte darin liegen, dass der Rückflussmörtel nicht direkt auf die Bodenkörner aufschlägt, sondern über eine Art Rückstauwirkung die Säule verlässt.

Da die Temperatur der Mischung eine entscheidende Rolle spielt, wurde der Versuch mit angewärmten Anmachwasser gefahren und im Wasserbad isoliert.

Innerhalb der Säulen betrug das Absetzmaß $\Delta H/H \approx 10$ %. Das wurde auf der Baustelle nicht direkt gemessen, sondern ist nur über die Auffüllmenge bei der Nachstützung abschätzbar. Der Bohrkern einer Säule zeigt deutlich den Unterschied zwischen HDI-Mörtel und Nachstützsuspension (Wasser-Zement-Gemisch: W/Z = 1,0). Die Höhe dieses Bereiches ist ca. 25 cm. Die Gesamthöhe der Säule ist laut Tagesbericht 2,25 m. Dies bedeutet einen Volumenverlust infolge Ausfilterung von gut 10 %, was einen gewöhnlichen Wert darstellt.

Abbildung 34: Bohrkern aus HDI-Säule mit Suspensionshorizont



Im Gegensatz zu Material in den Probedosen findet die Ausfilterung in der Säule auch über die Mantelfläche und schon zum Zeitpunkt des Düsens statt. Hier spielen auch die Drücke eine Rolle, denen das Material im Boden ausgesetzt ist.

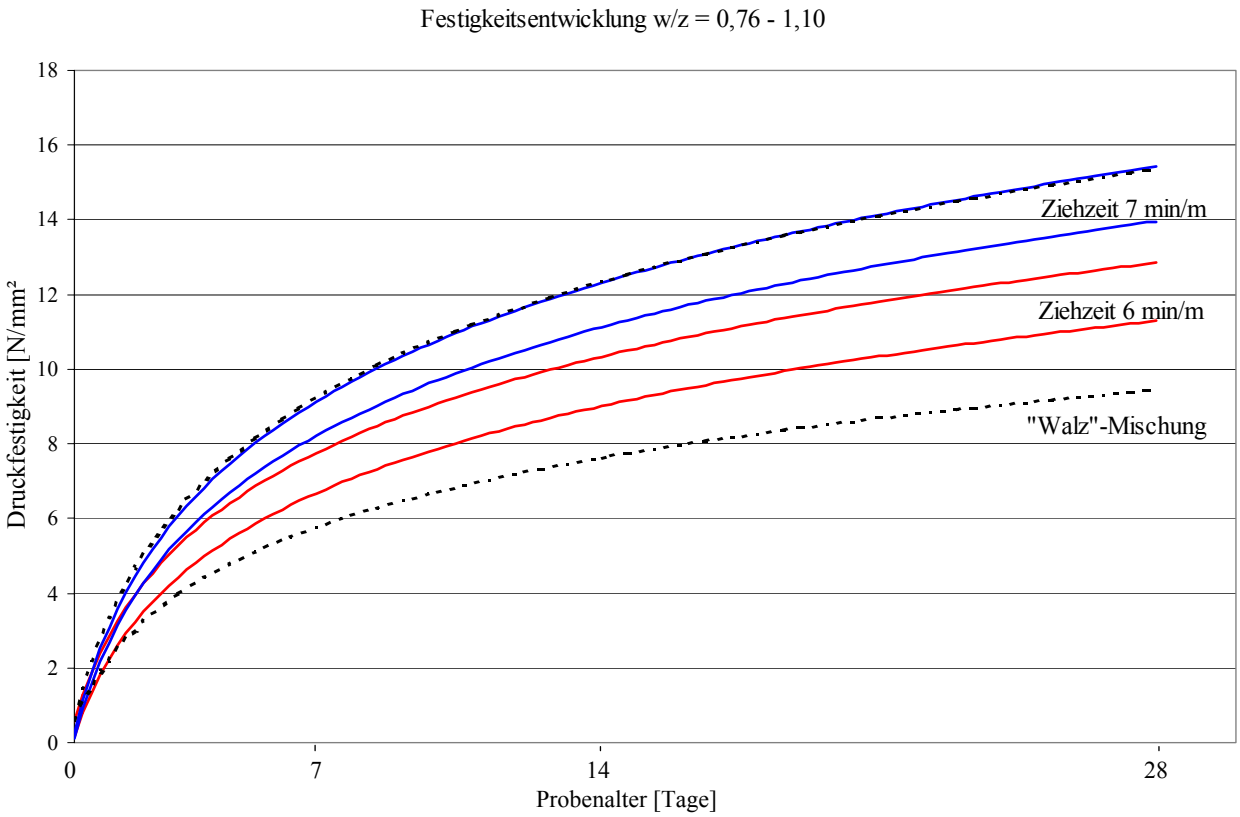
Die Druckfestigkeitswerte von HDI-Mörtel und Nachstützflüssigkeit zeigen einen deutlichen Unterschied. Im Einzelnen erreicht die Festigkeit der erhärteten Suspension über 40 N/mm² während nur 10 cm tiefer im HDI-Körper Festigkeiten von durchschnittlich 10 N/mm² gemessen wurden.

10.3 Auswirkungen der Ziehzeiterhöhung

Während der Baumassnahme am Olympiastadion in Berlin wurde die Ziehzeit von 6 min/m-Düsenstrahlsäule auf 7 min/m erhöht. Dies sollte der Durchmessererhöhung dienen. Der Solldurchmesser war mit 1,80 m vorgegeben. 2 Schirmmessungen zeigten, dass im Säulenfußbereich nur 1,70 m bis 1,75 m erreicht wurden sind. Eine Ziehzeiterhöhung um eine Minute, sollte den erwünschten Erfolg haben. Wegen des hohen Messaufwands und der bestehenden Erfahrungen ist keine Kontrollmessung durchgeführt wurden. Es kann von einem neuen mittleren Durchmesser von 1,80 m ausgegangen werden.

Die einaxialen Druckfestigkeiten der Proben aus längerer Ziehzeit (Rückfluss und Entnahme wegen der hohen Übereinstimmung zusammengefasst) sind deutlich höher als bei den anderen. Im folgenden Diagramm sind die Druckfestigkeitsverläufe gegenübergestellt. Von den 6 min/m gezogenen stehen die 7- und die 28-Tage-Werte zur Verfügung, von den 7 min/m hergestellten die 7- bzw. 14- und ebenso die 28-Tage-Werte.

Diagramm 6: Druckfestigkeitsentwicklung der Baustellenproben in Abhängigkeit von der Ziehzeit



Es zeigt sich, dass bei kürzerer Ziehzeit nach 7 Tagen ca. 67 % der 28-Tage-Festigkeit erreicht ist. Bei der längeren Ziehzeit verläuft die Festigkeitsentwicklung rascher, sodass nach 14 Tagen bereits 89 % (gegenüber 83 % bei 6 min/m) geprüft wurde. Dies bedeutet,

dass bei einem kleineren Wasser-Zement-Verhältnis, welches aus der längeren Ziehzeit resultiert, nicht nur eine höhere Endfestigkeit erreicht wird, sondern auch eine relativ höhere Anfangsfestigkeit. Diese Feststellungen decken sich mit Erkenntnissen aus der Betontechnologie [19].

Die gestrichelten Linien grenzen den Bereich der durch die „Walz"-Kurve abgedeckt ist ein. Durch die Ziehzeiterhöhung ist ein verstärktes Absetzen (bis 7 %) zu beobachten. Bei gleichen Darrwassermengen und erhöhten Zementgehalten liegt der W/Z-Wert deutlich unter denen mit 6 min/m-Säulenhöhe hergestellten.

Die über die W/Z-Verhältnisse (aus der „Walz"-Kurve) ermittelten Stoffmengen sind in einer vergleichenden Darstellung abgebildet (*Tabelle 12*). Grundlage bilden hier die 28-Tage-Festigkeiten.

Tabelle 12: Vergleich der Stoffmengen bei unterschiedlicher Ziehzeit

[kg/m³]	6min/m	7min/m
M_C	549	581
M_W	506	506
M_G	917	816
W/Z	0,90	0,87 (effektiv 0,80)

Auswertung-WALZ/28d/

Der W/Z-Wert ist der effektive W/Z-Wert, und errechnet sich aus der Darrwassermenge des Frischmörtels abzüglich Absetzwassermenge.

Die Druckfestigkeiten liegen sowohl bei den mit 6 min je m, als auch bei denen mit 7 min je m hergestellten weit über den geforderten. Im Mittel betragen sie 12,1 und 14,4 N/mm². Gefordert war ein Beton B 5 mit umgerechneten 8,4 N/mm² Serienfestigkeit nach 28 Tagen. Geht man mit diesem Wert in die „Walz"-Kurve (*Diagramm 2*) ist ein Wasser-Zement-Wert von 1,07 ablesbar bzw. errechenbar. Dies als Zielwert in der Mischungsberechnung führt zu einem W/Z-Verhältnis der Ausgangssuspension von 1,26 (siehe *Mischungsberechnung-Beispiele.xls/Rechnung(3-7min)(1,07)/*).

Alle anderen Parameter werden beibehalten (siehe *Abschnitt 9.5* (bei 7 min/m)). Bei einem Säulenvolumen von 5,60 m³ führte dies zu einer theoretischen Zementreduzierung von 540 kg je Säule.

Dies ist ein weiteres Beispiel für die praktische Anwendung der Mischungsberechnung.

11 Zusammenfassung

Bisher gab es lediglich die Mischungsmatrix (siehe *Abschnitt 10*), mit deren Hilfe man versuchte Mischungsverhältnisse auf der Basis einfacher Massenbetrachtungen in Kombination von Erfahrungen und Abschätzungen (Absetzverhalten, Ausfilterung, Verhältnis zwischen eingebrachter Menge und Rückflussmenge) zu berechnen. Letztendlich bestand die Aufgabe dieser Diplomarbeit darin, die Richtigkeit dieser Rechnung über geeignete Feldversuche zu überprüfen, bzw. der Berechnungsmatrix Bestandteile hinzuzufügen, um den festgestellten Stoffmengen und Verhältnissen innerhalb der Säule rechnerisch nahe zu kommen.

Der innerhalb des Bodens entstehende Mörtel unterscheidet sich in seinen Eigenschaften deutlich von „normalen“ hydraulisch abbindenden Mörteln. Da man ihn auf Grund der technologischen Besonderheiten des Düsenstrahlverfahrens nicht nach einer Rezeptur herstellen kann, muss man durch einen gesteigerten Arbeitsaufwand seine Qualität sichern. Für die nachträgliche Bestimmung der Zusammensetzung eines Mörtels oder eines Betons gibt es keine allgemeingültige Arbeitsanleitung. Daher musste versucht werden Messmethoden zu finden, die sich dazu eignen in situ und im Labor zu einem Ergebnis zu führen. Als Schlüssel hat sich die Aufstellung einer „Walz“-Kurve herausgestellt. Hierüber konnten die mit einigen Unsicherheiten belegten Mischungszusammensetzungen aus den Probenahmen bekräftigt werden. D. h., dass die angewandten Versuche und Messmethoden eine Bestimmung ermöglichen.

Die ermittelten Stoffmengen für das untersuchte Bauvorhaben wiesen ein wesentlich höheres Bindemittel-Zuschlag-Verhältnis auf, als durch den rechnerischen Ansatz erklärbar ist.

Durch die Einführung empirischer Faktoren in der Berechnungsmatrix war es möglich, die gemessenen Werte nachzuvollziehen. Es bleiben aber noch eine Vielzahl offener Fragen, die sich erst im Laufe der Auswertung herausgebildet haben.

Die folgende Tabelle zeigt noch einmal das Ergebnis, dass die ermittelten Stoffmengen innerhalb des frisch gedüsten HDI-Mörtels auf die Mischungsberechnung hat. Hieran Beziehungen zu den Ausgangsparametern aufzustellen, und feste Größen zu finden, die für andere Bedingungen (Baugrundverhältnisse, Düsparameter) gelten, muss Ziel weiterer Untersuchungen werden.

Tabelle 13 : Gegenüberstellung der empirischen Faktoren für die Berechnungsmatrix

Ziehzeit:	6 min/m	6 min/m	7 min/m
Säulendurchmesser:	1,75 m	1,75 m	1,80 m
Prüfalter:	7 d	28 d	28 d
Suspensionsmenge eingebracht in den Boden *	1,19	1,24	1,43
Bodenanteil im Düsenstrahlkörper *	0,52	0,54	0,49
Wasseranteil aus Boden und Suspension *	-9 %	-11 %	-20 %

Mischungsberechnung-Beispiele.xls

Die Werte aus dieser Tabelle dürfen als Orientierungswerte verstanden werden. Die Rechnung allein ist jetzt noch nicht aussagekräftig genug, um eine Qualitätssicherung ersetzen zu können. Dazu wird es voraussichtlich nie kommen, da der natürliche Baugrund durch Parameter nur bereichsweise klar definierbar ist.

Über eine gezielte Probenahme im Zusammenhang mit Laboruntersuchungen können auf Grund der festgestellten Mischungsverhältnisse Aussagen über Festigkeitsentwicklungen getätigt, sowie kurzfristige Eingriffe in die Herstellungsparameter geplant werden.

Literaturverzeichnis

[1] Baugrund- und Gründungsgutachten zur Sanierung und Modernisierung des Olympiastadions in Berlin, GuD – Consult GmbH Berlin, 07/2000

[2] Brux G.: Möglichkeiten und Grenzen der Anwendung der Düsenstrahlverfahren, tis, 01/2000

[3] Hochdruckinjektion (HDI) – ein neues Bauersystem, 02/1984

[4] http://www.bauer.de, (08/1999), Homepage der Firma Bauer Spezialtiefbau GmbH, HDI-Hochdruckinjektion, Zugriff: 02/2001

[5] http://www.geotechnik-online.de/referenz/veroeff/artik20.htm, Dr.-Ing.habil- K. Hock-Berghaus, Bergische Universität-GH Wuppertal, In-Situ-Kriechversuch bei Injektionen, Zugriff: 02/2001

[6] Inject `99 Essen: 1. Internationale Fachtagung für Injektionstechnik in Bergbau und Bauwesen, 15. und 16. September 1999, Verlag Glückauf GmbH Essen, 1999

[7] Kauschinger, Hankour, Perry: Methods to estimate Composition of Jet Grout Bodies

[8] Kutzner C.: Injektionen in Böden, Enke Verlag, 1991

[9] Prospekt: Bauer Spezialtiefbau GmbH, Das BAUER HDI Düsenstrahlverfahren, 03/1999

[10] Prospekt: Bilfinger + Berger, Hochdruck – Injektionen HDI, 1989

[11] Prospekt: Keller Grundbau GmbH, Das Soilcrete-Verfahren, 2000

[12] Prospekt: Philip-Holzmann AG, Marinearsenal Kiel: Kajenerneuerung mit Philip-Holzmann-Pfählen, 02/2000

[13] Schuber A.: Ein Beitrag zum Spannungs-Verformungsverhalten Silikatgel-injizierter Sande, Heft 4 der Schriftenreihe des Lehrstuhle und Prüfungsamtes für Grundbau, Bodenmechanik und Felsmechanik der Technischen Universität München, 1985

[14] Schützenmeier M.: Optimierung einer HDI-Anlage, Diplomarbeit an der Fachhochschule Augsburg, unveröffentlicht, 03/2001

[15] Shaughnessy R., Clark P. E.: The rheological behavior of fresh cement pastes, Cement and Concrete Research Vol. 18, 1988

[16] Stark J., Wicht B.: Anorganische Bindemittel, Schriften der Bauhaus-Universität Weimar, 1998

[17] Stetzler-Kaufmann, B.: Stoffverhalten chemisch injizierter Sande, Heft 94 der Veröffentlichungen des Institutes für Bodenmechanik und Felsmechanik der Universität Fridericiana in Karlsruhe, 1983

[18] Tkachuk S.: Theoretische Untersuchung des Eindringprozesses des Hochdruckstrahls in Lockergestein beim Düsenstrahlinjektions-Verfahren, Verlag der Augustinus Buchhandlung, 1997

[19] Wesche K.: Baustoffe für tragende Bauteile, Band 2, Bauverlag GmbH, 1993

[20] Witt K.J.: Unterfangungen, Vorabzug für einen Beitrag zum Grundbau-Taschenbuch, Teil 2, Verlag Ernst & Sohn, 2001

[21] Zysk K.-H.: Einsatz von Steinkohlenflugasche in Suspensionen für das Düsenstrahlverfahren, Deutsche Montan Technologie GmbH, 2000

Zitierte Normen und Zulassungen:

[22] Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung für das Düsenstrahlverfahren „BAUER (HDI)“, Deutsches Institut für Bautechnik, 10/1997

[23] DIN 4093: Einpressen in den Untergrund, Beuth Verlag GmbH, Berlin, 09/1987

[24] EN 12716: Ausführung von besonderen geotechnischen Arbeiten (Spezialtiefbau) Düsenstrahlverfahren (Hochdruckinjektion, Hochdruckbodenvermörtelung, Jetting), Beuth Verlag GmbH, Berlin, 03/1999