

# Anwendung des *Jet-Grouting*-Verfahrens unter dem Hauptbahnhof Amsterdam unter besonderen technischen und geologischen Randbedingungen

**Dr.-Ing. Karsten Dörendahl / Dipl.-Ing. Reiner Otterbein**  
Smet-Keller Funderingstechnieken VOF beide Keller Grundbau GmbH

**Vortrag im Namen der Autoren Steuergruppe:**

**J. de Wit, J. Bogaards, B. Essler**

Berater Noord/Zuidlijn Amsterdam \*1

**O. Langhorst, J. Maertens**

VOF Stationseiland Amsterdam \*2

**B. Obladen, C. Bosma**

Generalunternehmer CSO, Combinatie Strukton Betonbouw van Oord ACZ

**Y. Sleuwaegen, H. Dekker**

Nachunternehmer jetgrouten Smet-Keller Funderingstechnieken VOF \*3

## 1 Gesamtbaumaßnahme

Die neue Metro-Verbindung Noord-Zuidlijn verbindet die Regionen Amsterdam Nord und Amsterdam Süd mit dem Zentrum der Stadt. Hierdurch wird unter dem Hauptbahnhof eine neue Metrostation erforderlich. Auf dem Bild ist das Bahnhofsgebäude mit dem neu zu erstellenden Tunnelbauwerk zu erkennen.



**Bild 1**      **Bahnhofsgebäude mit neuem Tunnel**

Das Bahnhofsgebäude wurde Ende des 19. Jahrhunderts gebaut und befindet sich auf einer künstlichen Insel unmittelbar im Flussbett der IJ. Das Gebäude ist auf etwa 9.000 Holzpfählen gegründet und hat sich in den über 100 Jahren um ca. 18 cm abgesenkt. Eine zentrale Forderung für den Bau der neuen Metrostation unterhalb des Hauptbahnhofs ist, dass sowohl für den Zugverkehr sowie für die Reisenden nur minimale Behinderungen entstehen. Die Baumaßnahme ist zudem unter extrem beengten Verhältnissen und schwierigen Randbedingungen auszuführen.

Die Gemeinde Amsterdam, Bauherr bei der Baumaßnahme, wird durch das Adviesbureau Noord/Zuidlijn sowie das Büro VOF Stationseiland Amsterdam vertreten. Die Arbeiten werden von der Combinatie Stukton Betonbouw / van Oord ACZ als Generalunternehmer ausgeführt. Die Jet-Grouting Arbeiten wurden an die Smet Keller Funderingstechnieken VOF als Nachunternehmer vergeben.

## 2 Geologische Verhältnisse

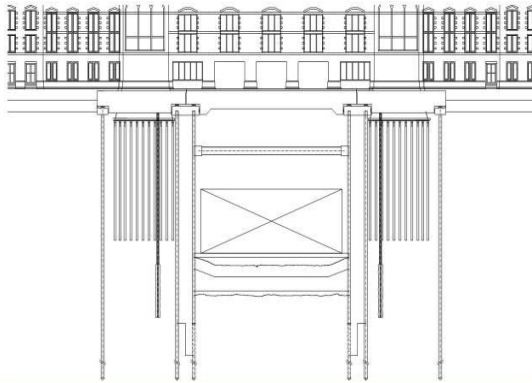
Der Bodenaufbau direkt ab Geländeoberkante (Normal Amsterdam Water Level = NAP +3 m) besteht zunächst aus einer 8 m starken, aufgefüllten Sandlage (bis NAP -5 m). Darunter bis NAP -15 m folgt der weiche Ij-Klei mit eingelagerten Sandbändern. Von diesem Niveau bis ca. -28 m / -29 m NAP folgt die zweite Sandschicht bestehend aus mitteldicht bis dicht gelagerten Sanden mit geringfügigen Schluff- und Kleianteilen. Unterlagert werden diese Schichten bis NAP -45 m durch eine ausgeprägte Eemkleischicht gefolgt von etwa 1 m mächtigen Torflagen. Im Anschluss daran bis -56 m NAP folgt der glaciale Klei und dann die unterlagernde dritte Sandlage mit sehr hohen Sondierspitzenwiderständen und hoher Tragfähigkeit bis in eine Tiefe von NAP -70 m. Das Grundwasserniveau liegt etwa bei NAP 0,0 m und somit ca. 3 m unter Gelände. Das geologische Längsprofil ist im nachfolgenden Bild 2 wiedergegeben.



**Bild 2** Längsschnitt Bahnhofsgebäude und Gleisanlagen

### 3 Bauphasen der Tunnelherstellung/ Sicherung

Für die Abfangung der Bauwerkslasten bzw. Herstellung des Tunnels unterhalb des Bahnhofsgebäudes sind folgende Bauphasen vorgesehen:



**Bild 3 Querschnitt Bahnhof/Tunnel**

Bauphasen:

1. Ziehen der vorhandenen Holzpfähle und Herstellung der Tubex-Pfähle
2. Herstellung der Sandwichwände
3. Herstellung der Abfangungskonstruktion für das Bahnhofsgebäude
4. Absenkung des Grundwasserniveaus
5. Aushub bis zur ersten Steifenlage
6. Herstellung der tief liegenden Aussteifungssohle
7. Anbringen der oben liegenden Steifenlage
8. Ausgleich des Grundwasserspiegels
9. Unterwasser-Aushub
10. Einschwimmen und Absenken der Tunnel-elemente
11. Wiederauffüllung mit Boden

Parallel zu den Arbeiten unter dem Bahnhofsgebäude werden zeitgleich weitere Baumaßnahmen im Bereich der Bahnhofsinsel ausgeführt. Unter anderem werden die Gleisanlagen auf der Westseite erweitert, ein neuer Durchfahrtunnel für den Autoverkehr hergestellt sowie die Busstation mit Überdachung auf der IJ-Seite ausgebaut. Die gesamten Arbeiten im Bahnhofsbereich sollen Ende 2010 abgeschlossen sein.

### 4 Sandwichwand Lösung

Aufgrund der besonderen technischen und geologischen Randbedingungen bei der Herstellung des Metro-Tunnels unterhalb des Hauptbahnhofs wurde eine spezielle Sandwichwand-Lösung zur Abtragung der Lasten erarbeitet. Hierbei sollte die Sicherung des historischen Bahnhofsgebäudes im Vordergrund stehen.

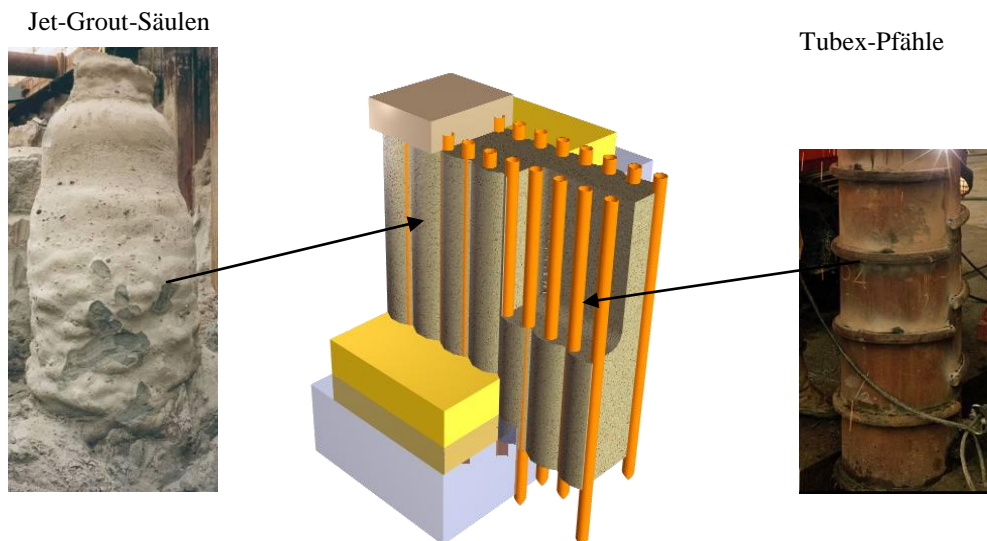
Das Konzept der Sandwichwand beruht auf der Herstellung einer sehr steifen Wand, bestehend aus mehreren Einzelkomponenten. Aufgrund dieser Planung können innerhalb des Bahnhofsgebäudes relativ leichte Baumaschinen und -geräte zum Einsatz kommen, die keine besonderen Bauwerkseingriffe erforderlich machen.

#### 4.1 Aufbau der Baugrubenwand

Die Sandwichwand besteht aus 2 Reihen Tubex-Pfählen mit einem Durchmesser von 457 mm, einer Stärke von 25/16 mm und einer Länge von 26 bis 60 m. Die Pfähle ha-

ben etwa einen Achsabstand von 1 m parallel zur Wandachse und stehen in Querrichtung 2,5 m auseinander. Zur besseren Kraftübertragung zwischen den Pfählen und dem Jet-Grout-Körper sind auf den Tubex-Pfählen Ringe mit einer Dicke von 32 mm angeschweißt. Die Pfähle werden in Teillängen von 2 bis 5 m mit einer speziell für diese Arbeiten angepassten Tubex-Maschine eingebaut.

Der Zwischenraum zwischen den Pfählen in Längsrichtung wird durch Jet-Grout-Säulen mit Durchmessern von 800 mm bis 1.200 mm und Längen von 28,5 m ausgefüllt. Zwischen den beiden Tubexpfahlreihen werden ebenfalls Jet-Grout-Säulen bei Durchmessern von 1.400 bis 2.200 mm und Längen von 26 bis 28,5 m angeordnet, wie in Bild 4 dargestellt. Die für die derzeitige Gründung vorhandenen Holzpfähle werden vor Beginn der Baumaßnahmen mit einer speziell entwickelten Verfahrenstechnik gezogen und die entstehenden Löcher mit Sand aufgefüllt.



**Bild 4 Einzeldarstellung Sandwichwand**

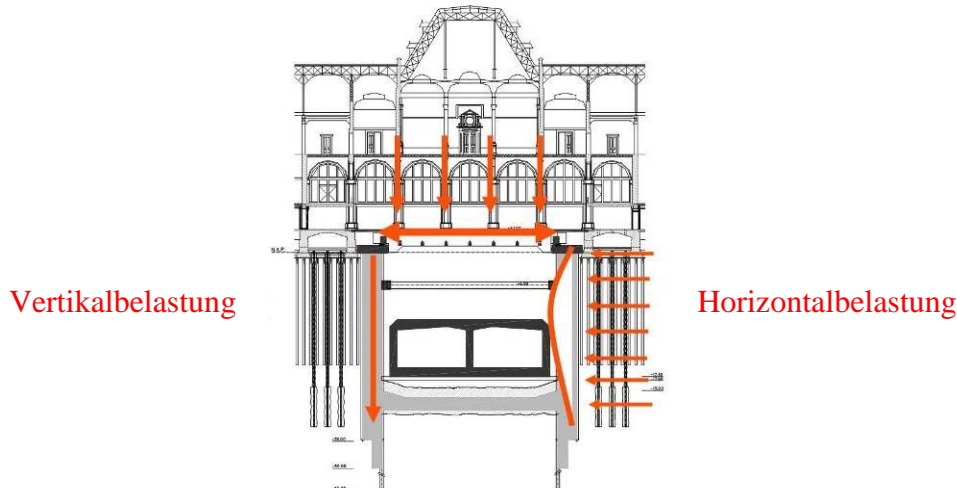
#### **4.2 Konstruktive Aspekte**

Während der Herstellung der tief liegenden Aussteifungssohle von NAP -4,5 m wird die Wasserdruckdifferenz etwa 5 m betragen. Zum Zeitpunkt des Endaushubs wird die frei tragende Höhe der Wand bei einer Wasserdruckdifferenz von 3 m etwa 18 m betragen.

Die Horizontalverformung wird durch die Biegesteifigkeit der Verbundkonstruktion (Tubex-Pfähle / Jet-Grout-Körper) sowie dreier Aussteifungslagen gemäß nachfolgendem Bild 5 begrenzt. Trotz der sehr hohen Eigensteifigkeit werden Verformungen in einer Größe von 20 bis 30 mm erwartet.

Die vertikalen Lasten aus den Gebäudeabfangungen oberhalb der Baugrube werden ebenfalls über die Sandwichwand abgetragen. Hierfür werden die Tubex-Pfähle bis in die dritte Sandlage geführt.

Das Tragverhalten der Sandwichwand beruht auf dem Zusammenwirken der Tubex-Pfähle mit dem Jet-Grout-Körper. Da der Versagensmechanismus jedoch mit einem spröden Verformungsverhalten einhergeht, wurden die Sicherheiten deutlich erhöht. Zudem wurde bereits die Festigkeit der Tubex-Pfähle so gewählt, dass ein Versagen des Gesamtsystems ausgeschlossen werden kann.



**Bild 5 Schnitt Bahnhofsgebäude und Tunnel**

#### **4.3 Weitere Planungsaspekte**

Die Entwurfsvorgaben sehen eine weitgehend wasserundurchlässige, erddruckstützende Konstruktion vor, die während der Bauphase einen uneingeschränkten Zugverkehr ermöglicht und die Behinderungen des Personenverkehrs auf ein Minimum beschränkt. Dieses hat zum Entwurf der Sandwichwand geführt.

Bisherige Erfahrungen haben gezeigt, dass die Wasserundurchlässigkeit von Jet-Grout-Körpern, bestehend aus Einzelsäulen, im besonderen Maße von den tatsächlichen Abweichungen während der Herstellung abhängig ist. Hierbei spielt die Abstimmung zwischen den Entwurfsvorgaben und dem Herstellprozess eine wesentliche Rolle.

In dem Entwurf der Sandwichwand wurde den zuvor genannten Aspekten der weitgehenden Wasserundurchlässigkeit Rechnung getragen, indem insgesamt 4 Reihen Jet-Grout-Säulen ausgeführt werden, wobei die äußersten beiden Reihen zwischen den Tubex-Pfählen hergestellt werden.

### **5 Risikoabschätzung**

Infolge eines möglichen Versagens des Wandsystems kann ein erheblicher Schaden für das Bahnhofsgebäude sowie die nahe liegenden Gleisanlagen entstehen. Aus diesem Grunde ist es von großer Bedeutung, die Risiken so weit wie möglich einzugrenzen. Während der Entwurfsphase wurden daher umfangreiche Risikoanalysen ausgeführt. So ist als Teil eines umfangreichen Untersuchungsprogramms insbesondere die Anwendungsmöglichkeit der Jet-Grout-Technik im Rahmen eines Groß-Versuchs im Norden



Amsterdams eingehend untersucht worden. Hierbei wurden mehrere Säulen entsprechend den Entwurfsvorgaben der Sandwichwand ausgeführt, um die erzielbaren Festigkeiten und den erreichbaren Minstdurchmesser in den Amsterdamer Böden zu bestimmen. Das grundsätzliche Entwurfskonzept wurde bestätigt und die weiteren Planungsparameter festgelegt.

Der Entwurf sieht weiterhin eine maximale vertikale Abweichung der Tubex-Pfähle von 0,5% vor, bezogen auf deren Gesamtlänge. Für den Bohrlochverlauf der Jet-Grout-Säulen ist eine Abweichung von  $\leq 200$  mm für die ersten 20 m Tiefe (=1 %) und 300 mm über die gesamte Länge vorgesehen. Die Abweichung der hergestellten Durchmesser im Vergleich zum theoretischen Durchmesser muss kleiner sein als 15 % bei Durchmessern bis 1.000 mm und kleiner als 10 % bei Durchmessern größer als 1.500 mm. Der charakteristische Wert für die Druckfestigkeit wurde auf  $1,75 \text{ N/mm}^2$  nach 28 Tagen festgelegt.

## **6 Ergebnisse der Vorversuche**

Nach Beginn der Arbeiten am Hauptbahnhof ist ein zweiter Vorversuch im Bereich des Vorplatzes ausgeführt worden. Innerhalb dieses Testfeldes sollten die beauftragten Firmen die geplante Jet-Grout-Verfahrensweise überprüfen, um die Ausführungsbedingungen zu bestätigen bzw. eine zusätzliche Risikoeinschätzung vorzunehmen. Während dieses Versuchs wurden die Vertikalität der Bohrungen, die erreichbaren Festigkeiten und die erreichten Durchmesser bestimmt. Für letztere Messung kamen sowohl ein mechanischer Messschirm als auch eine Hydrophonmessung zum Einsatz.

Die Resultate des Versuchs ergaben weitere Erkenntnisse. Die Bestimmung der Durchmesser stellte sich schwieriger heraus als erwartet. Die erwarteten Festigkeiten wurden in den stark tonigen Bereichen tendenziell unterschritten. Als Hauptursache wurden die unterschiedlichen Bodenverhältnisse im Vergleich zum Testfeld im Norden Amsterdams bewertet. Dennoch war es möglich die erforderlichen Randbedingungen und Parameter für den Start der Arbeiten festzulegen.

Für die Ausführung der endgültigen Arbeiten hat dieser Vorversuch sowohl technische als auch verfahrensrelevante Bedeutung. Die wesentlichen Punkte sind:

- Trennung der Parameter Durchmesser und Druckfestigkeit. Hierbei ist zunächst in einer Vorschneidphase der Säulendurchmesser herzustellen, um anschließend in einer Nachschneidphase den notwendigen Bindemittelanteil in Abhängigkeit der erforderlichen Druckfestigkeit einzubringen.
- Herstellen der Säulen in Einzelabschnitten (5 bis 10 m Länge) zur Begrenzung von zeitlichen Effekten. (Sedimentation/Abbindevorgang)
- Sicherstellung der Druckfestigkeit durch eine verbesserte Qualitätsüberwachung auf der Baustelle.

- Bessere Abstimmung des Bindemittelgehaltes auf den sehr heterogenen Bodenaufbau.
- Anpassung der Festigkeitsforderungen an die Baustellenbedingungen. Der charakteristische Wert der Druckfestigkeit nach 120 Tagen wurde auf 1,5 N/mm<sup>2</sup> festgelegt, der charakteristische Wert der Spaltzugfestigkeit nach 120 Tagen auf 0,15 N/mm<sup>2</sup>.
- Vergrößerung der zulässigen Abweichungen des Säulendurchmessers auf  $\pm 20\%$ . Weiterhin sollte das Säulenraster an die tatsächliche Lage der Tubex-Pfähle bzw. auch noch teilweise vorhandenen Holzpfähle angepasst werden.

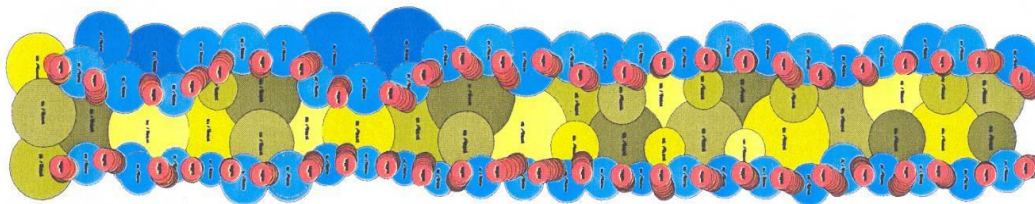
Bezüglich der Ausführung ergaben sich folgende Veränderungen:

- Ausführung eines umfangreichen Messprogramms für das Jet-Grouting (Registrierung der Herstellparameter, Durchmessermessungen mit mechanischem Messgerät und Hydrophonmessungen in den Tubex-Pfählen, Festigkeitsprüfung).
- Darstellung des Säulenrasters in der Ist-Situation (3D-Einmessung der Tubex-Pfähle sowie der teilweise vorhandenen Holzpfähle, abschnittsweise Herstellung der Jet-Grout-Säulen), wobei die Ausführungsparameter der Ist-Situation angepasst werden.
- Verstärkung der Überwachung der Jet-Grout-Arbeiten durch
  - Gründung einer Steuergruppe
  - Zusätzliche „realtime“ Kontrolle der Herstellparameter auf der Baustelle
  - Tagesaktuelle Planungsaktualisierung auf der Baustelle

## 7 Ausführungskonzept

Das Ausführungskonzept beruht unter anderem auf der Beobachtungsmethode. Hierbei werden die Informationen einzelner abgeschlossener Arbeitsschritte umgehend in die Planung eingearbeitet und eventuell erforderliche Änderungen bzw. Anpassungen vorgenommen. Für die Jet-Grout-Arbeiten bedeutet das vor Beginn der Produktion eine Aufnahme der vorhandenen Tubex-Pfähle und Holzpfahlreste in einen Bestandsplan und eine diesbezügliche Anpassung des Säulenrasters. Während der Ausführung der Jet-Grout-Arbeiten wird gleicher Wert sowohl auf die Qualität der Einzelsäule wie auf die Qualität der gesamten Wandkonstruktion gelegt.

Für beide Komponenten werden umfangreiche Messungen vorgesehen und Anpassungsmöglichkeiten eingeplant. Die nachfolgende Abbildung zeigt beispielhaft einen Planausschnitt mit farbigen Tubex-Pfählen (rot) und Jet-Grout-Säulen (gelb/blau).



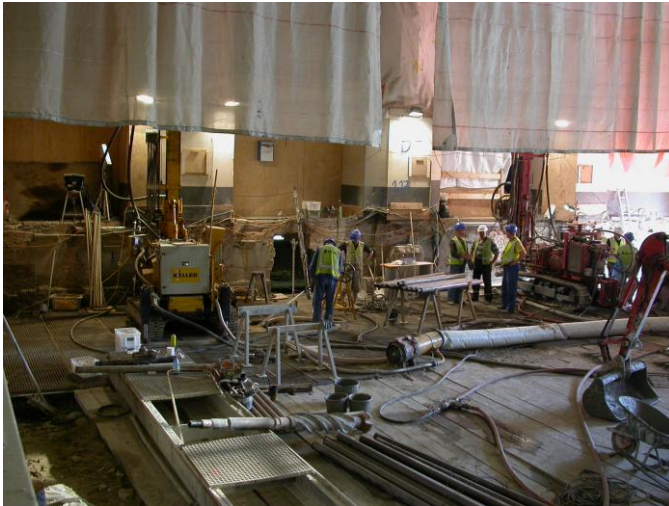
**Bild 6 Grundriss Sandwichwand (Ist-Situation)**

Für jede Einzelsäule wird ein individueller Arbeitsplan erstellt, bestehend aus Herstellparameter, Messprogramm, zulässige Abweichungen und Maßnahmen im Falle einer Abweichung. Somit wird jede Säule mit individuellen Parametern hergestellt, wobei eine Abstimmung aus aktuellen Daten der bisherigen Produktion erfolgt.

Im Rahmen der Qualitätssicherung werden sämtliche Herstellungsparameter online aufgezeichnet und dokumentiert.

In einem „Logbuch“ werden zudem sämtliche Abnormalitäten während des Produktionsprozesses und die darauf folgenden Anweisungen der überwachenden Ingenieure dokumentiert. Hierdurch steht zu jedem Zeitpunkt ein Ist-Plan zur Verfügung, der einen Überblick über die bisherigen und eventuell zukünftigen Änderungen gibt.

Zur Herstellung der Säulen kommen sowohl das 1-Phasen-System (ohne Luft/Single) für Säulendurchmesser von 800mm bis 1200mm als auch das 2-Phasen-System (mit Luft/Double) für Säulendurchmesser von 1400mm bis 2200mm zum Einsatz. Die Säulen werden in 2 Arbeitsschritten hergestellt, ein Vorschneiden mit einer feststoffarmen Suspension zum Erreichen der erforderlichen Durchmesser und ein Nachschneiden mit einer feststoffreicheren Suspension zum Erreichen des erforderlichen Zementgehalts. Um den Einfluss von Zeiteffekten auf die Qualität der Säulen möglichst gering zu halten, wurden die einzelnen Säulen zusätzlich in Sektionen hergestellt. Hierdurch wird der Zeitunterschied zwischen dem Vorschneiden und dem Nachschneiden möglichst gering gehalten.



**Bild 7**      **Jet-Grouting-Gerät  
im Arbeitsbereich**

Die gleich bleibende Qualität der Säulen über unterschiedliche Bodenschichten hinweg wird erreicht durch Anpassung der Herstell-Parameter für jede einzelne Bodenschicht. Hierdurch kommen stellenweise bis zu sieben Parameterkombinationen pro Säule zum Einsatz. Der einzelne Arbeitsplan enthält nicht nur diese Kombinationen, er enthält auch mögliche Variationen im Falle von Abweichungen bestimmter Messwerte. Zu Kontrollzwecken finden ferner Rückrechnungen der Durchmesser aus den Ergebnissen der Rückflusswichtemessungen statt.



## 8 Qualitätssicherungsmaßnahmen

Die außergewöhnlich schwierigen Randbedingungen in Kombination mit der Anforderung einer flexiblen und kurzfristigen Anpassung der Produktionsparameter noch während des Jet-Grouting-Prozesses erforderten die Einrichtung einer sog. „Steuergruppe“ und eines „Monitoring Teams“..

Die Steuergruppe hat die Aufgabe, sowohl das umfangreiche Pflichtenheft für jede einzelne Säule festzulegen als auch die bisherigen Messergebnisse zu beurteilen und die kommende Produktion darauf abzustimmen. Sie setzt sich zusammen aus Mitgliedern des Auftraggebers, der Gutachter, des Generalunternehmers und des Nachunternehmers.

Jede Säule wird während und nach der Herstellung einer eingehenden Qualitätsbetrachtung unterzogen. Werden die Anforderungen gemäß Ausführungsplan erfüllt, so sind keine Änderungen der weiteren Vorgehensweise erforderlich. Werden die Anforderungen nicht erfüllt, müssen Korrekturmaßnahmen vorgenommen werden. Hierfür wird ein neuer Arbeitsplan erstellt. Dieser berücksichtigt die neuen Gegebenheiten und führt ggf. weitere Maßnahmen an (Herstellung einer zusätzlichen Säule, Veränderung des Durchmessers der aktuellen Säule oder einer Nachbarsäule etc.).

Eine der zentralen, zugleich aber auch schwierigsten Aufgaben innerhalb der Qualitätssicherung ist die Kontrolle der hergestellten Säulendurchmesser. Dieses gestaltet sich umso schwieriger, wenn die Säulen nicht frei stehen, sondern zum großen Teil an bereits vorhandene Körper (Tubex-Pfähle, Holzpfahlreste oder bereits hergestellte Säulen) anschließen. Unter diesen äußerst ungünstigen Randbedingungen stellte sich die Methode der Durchmesserbestimmung mittels Tastarmen als einzige anwendbare Möglichkeit heraus.



**Bild 8 Messgerät zur Durchmesserüberprüfung**

Zum Einsatz kam ein von Keller Grundbau entwickelter mechanischer Messschirm mit zwei hydraulisch steuerbaren Messarmen. Dieser wird unmittelbar nach der Herstellung in die frische Säule eingebracht, um die Wandung der Säule abzutasten. Erreichen die Arme die Säulenwandung, ist dieses durch einen Druckanstieg im System messbar. Über eine Vor- und Nachkalibrierung ausserhalb der Säule kann dann ein Rückschluss auf den Durchmesser der Säule gezogen werden.

Zur Bestimmung der Festigkeit des Wandsystems werden neben den Rückflussproben auch Druckversuche an zahlreichen Kernbohrungen durchgeführt. Die Kerne zeigen eine weitestgehend durchgängige Qualität auf (Bild 9). Im Rahmen der Testversuche wurde bereits festgestellt, dass die Festigkeitswerte über die einzelnen Bodenschichten starken Schwankungen unterliegen, jedoch bei den jetzigen Kontrollbohrungen insgesamt eine gute Qualität aufweisen.



mungen an verschiedenen Punkten

**Bild 9 Kernbohrungen**

Zur Überwachung der Setzungen des Bahnhofsgebäudes kommen drei voneinander unabhängige Messsysteme zum Einsatz: Messungen zur Bestimmung der Verformungen im Baugrund (Inklinometer, Extensiometer, Porenwasserdruckmessungen), Schlauchwaagensystem zur Bestimmung der Verformungen einzelner Bereiche des Bahnhofsgebäudes und geodätische Höhenbestim-

der Fassade.

## 9 Zusammenfassung

Mit der Herstellung der Metro-Station unter dem Amsterdamer Hauptbahnhof erreicht das Jet-Grouting-Verfahren die Grenzen aller bisherigen Erfahrungen. Unter extrem ungünstigen Bodenbedingungen und unter sehr beengten Platzverhältnissen wird eine äußerst starre Wandkonstruktion in Verbundbauweise aus Jet-Grout-Körper und Tubex-Pfählen in Tiefen bis zu fast 30m hergestellt. Dieser außergewöhnlichen Bauaufgabe kann nur mit außergewöhnlichen Maßnahmen begegnet werden. Hierfür wurde ein aufwändiges Ausführungskonzept entwickelt, das auf der Beobachtungsmethode basiert kombiniert mit einer adaptiven Anpassung der Herstellparameter.

### **\*) Autoren der Steuergruppe:**

- \*1 Zusammenarbeit zwischen Royal Haskoning, Witteveen & Bos en Ingenieursbureau Amsterdam
- \*2 Zusammenarbeit zwischen Holland Railconsult en Arcadis
- \*3 Zusammenarbeit zwischen Smet F&C BV en Keller Funderingstechnieken BV