

170	MITTEILUNGEN der GEOTECHNIK SCHWEIZ PUBLICATION de la GÉOTECHNIQUE SUISSE AVVISO di GEOTECNICA SVIZZERA
	Frühlingstagungen vom 7. Mai 2015, Journée d'étude du 7 mai 2015, Luzern

**Tiefe DSV / Jetting-Sohle in Trogbaugrube,
Neubau U-Bahn U5 in Berlin**

Ralf Hebecker
Dipl.-Bauingenieur (FH)

Tiefe DSV / Jetting - Sohle in Trogbaugrube, Neubau U-Bahn U5 in Berlin

1 Einführung

Der Bauherr, die Berliner Verkehrsbetriebe AöR vertreten durch die Projektrealisierungs GmbH U5, errichtet in Berlins historischer Mitte den Lückenschluss zwischen dem U-Bahnhof Alexanderplatz und Brandenburger Tor (U55). Bei diesem Artikel geht es um das Teilprojekt Museumsinsel (MUI), welches Bestandteil des Los 1 ist.



Bild 1: Übersicht Stadtplan [3]

1.1 Bestandteile Los 1

Das Los 1 beinhaltet die Stationen:

- Unter den Linden (UDL)
- Museumsinsel West und Ost (MUI)
- Gleiswechselanlage / Startschacht GWA

und damit:

- 5 Baugruben
- 2 Tunnel \varnothing 6.5 m je 1.6 km lang, mit Unterquerung der Spree und des Spreekanals
- den Anschluss an den U-Bahnhof Brandenburger Tor und am Bestandstunnel Alexanderplatz
- 105 m Vereisungsstrecke unter dem Spreekanal in bergmännischer Bauweise

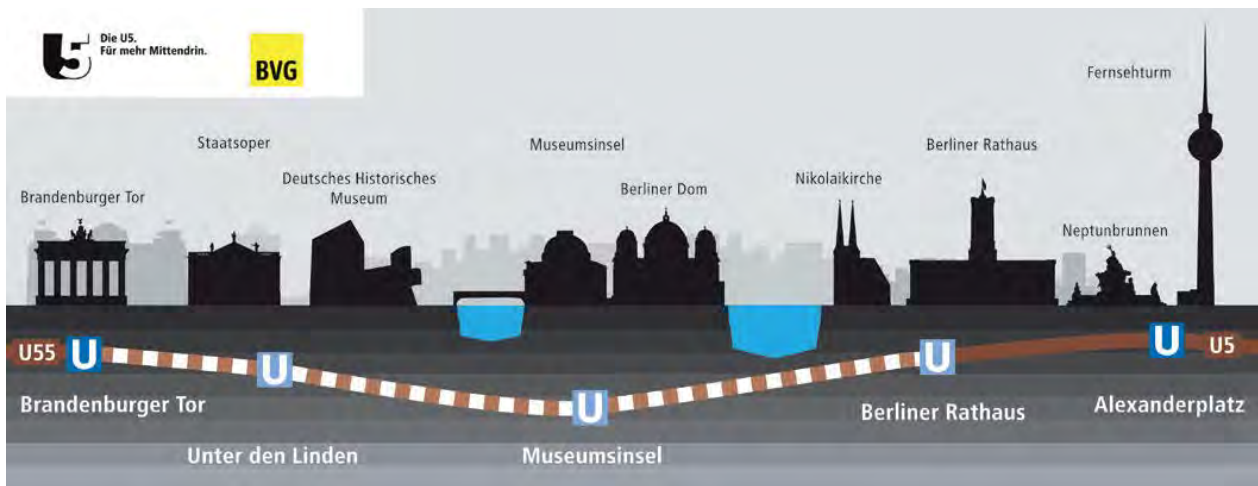


Bild 2: Längsschnitt Los 1 [2]

Die Ausführungsplanung wurde durch die PG U5, vertreten durch ISP Ziviltechniker Wien, erstellt. Der Auftragnehmer für den Rohbau ist die Bilfinger Construction GmbH, als interne Arbeitsgemeinschaft mit der Bilfinger Spezialtiefbau GmbH und dem Bilfinger Tunnelbau, für den der Autor an diesem Projekt tätig war. Die genannten Teilunternehmen von Bilfinger gehören heute zu Implenia.

Teile der Ausführungsplanung wurden von Bilfinger optimiert. Die ursprünglich geplante Bauzeit für den Rohbau war von 2012 bis 2018 und die ursprünglich geplanten Baukosten lagen bei 159 Mio. Euro. Die Inbetriebnahme der kompletten Strecke Alexanderplatz bis Brandenburger Tor ist für 2020 geplant.

1.2 Allgemeines zu DSV / Jetting-Sohlen [1]

"Seit 1979 wird das Düsenstrahlverfahren (auch als HDI oder Soilcrete bezeichnet) in Deutschland eingesetzt. Mit dem DS-Verfahren können unterschiedlichste verfestigte Bodenkörper hergestellt werden. Neben der Ausführung von Unterfangungskörpern sind dichte Sohlen in Trogbaugruben die am häufigsten genutzte Anwendung.

Trotz zahlreicher Verbesserungen bei der Düsenstrahltechnik ist die Herstellung immer noch mit Risiken verbunden und zwar insbesondere dann, wenn Dichtigkeitsanforderungen an den DS-Körper gestellt werden. Dies liegt im Wesentlichen daran, dass der Düsendurchmesser, also die Reichweite des Suspensionsstrahles, nicht online erfasst werden kann. Mit den neuesten Bohrtechniken ist es möglich, die Vertikalität der Düsenstrahlbohrungen zu vermessen, so dass die genaue Lage der Düsenstrahlsäule bekannt ist.

Neben einer unzureichenden Reichweite des Düsenstrahles infolge unterschiedlicher Bodenverhältnisse (z. B. dichtere Lagerung, grössere bindige Anteile) können auch DÜSSchatten durch Hindernisse im Baugrund (z. B. Blöcke, Holzreste, unbekannte Pfähle und Brunnen) zu Undichtigkeiten im DÜSKörper führen.

Unabhängig von der Grösse des Wasserdruckes auf Dichtsohlen wird in Berlin in der Regel eine Zuflussrate von $< 1.5 \text{ l/sec je } 1'000 \text{ m}^2$ benetzter Fläche gefordert.

Bereits kleinste Löcher können bei hohen Wasserdrücken zu höheren Zuflussraten führen. Trotz der Möglichkeit, durch nicht erkannte Baugrundinhomogenitäten oder Hindernisse die prognostizierte Reichweite bzw. den Düsendurchmesser nicht gesichert zu realisieren, wird von Behörden und Auftraggebern an den vor erwähnten geringen Zuflussraten festgehalten und auch die ausführenden Firmen akzeptieren durch Vertragsunterzeichnung diese Werte."

2 DSV / Jetting - Sohlen für den Bahnhof Museumsinsel (MUI)

2.1 Überblick

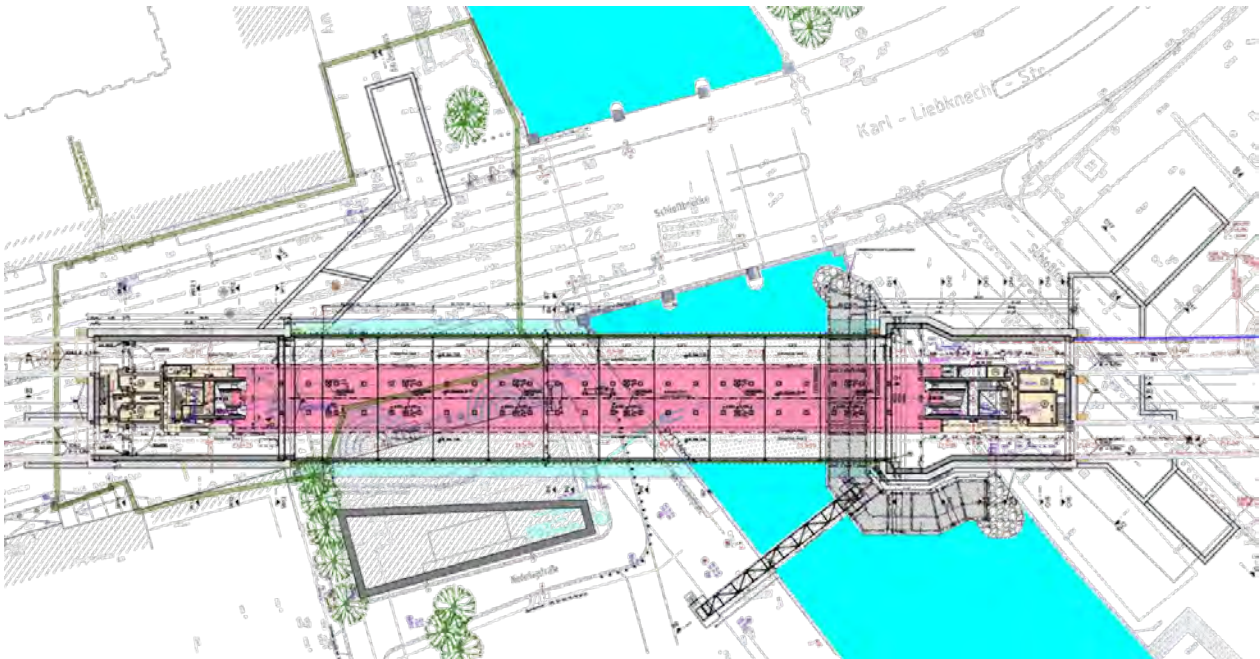


Bild 3: Grundriss Station Museumsinsel, Schacht West und Ost [3]

Für die Station Museumsinsel sind 2 Hauptbaugruben (West und Ost) mit Zugangsbauwerken sowie der Verbindungsstrecke, teilweise unter dem Spreekanal, in bergmännischer Bauweise im Schutz einer ringförmigen Vereisung vorgesehen. Die Baugruben wurden in Schlitzwandbauweise Dicke= 80 - 120 cm, Tiefe= 45 m erstellt. Der Ostschacht ragt in den Spreekanal, so dass die Herstellung der Schlitzwände und der Sohlen nur im Schutze eines Kastenfangedammes im Spreekanal ausgeführt werden konnte.

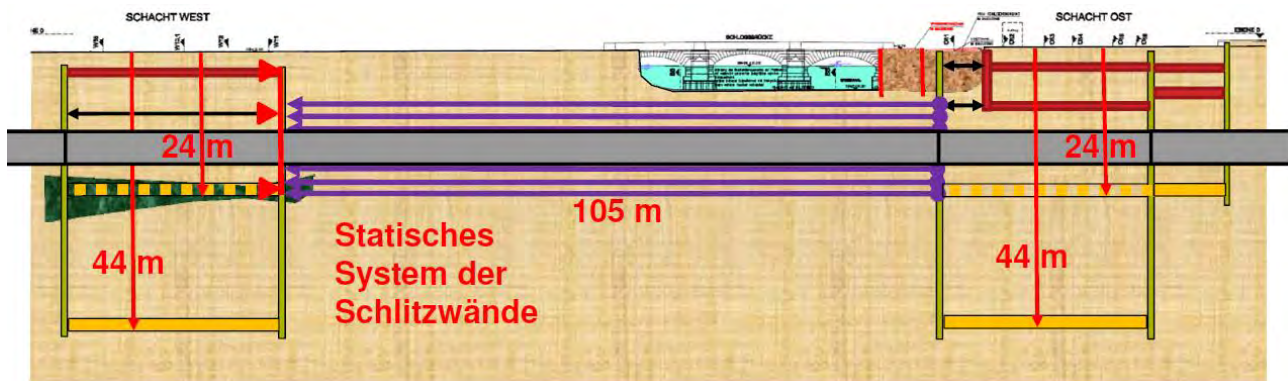


Bild 4: Längsschnitt Station MUI, Schacht West und Ost, dazwischen die Vereisungsstrecke [3]

Beide Schächte erhalten eine tiefliegende Dichtsohle sowie eine Aussteifungssohle nahe dem Aushubniveau, welche im DSV-Verfahren hergestellt wurden. In diesem Bereich liegen wechselnde Baugrundbedingungen vor. Sande in verschiedenen Abstufungen und Lagerungsdichten, Geschiebemergel in unterschiedlicher Konsistenz. Steine und Blöcke mussten mit den Bohrungen überwunden werden. Der Grundwasserspiegel steht bei etwa 3 m unter Gelände an, was für den tiefsten Aushub eine Wasserdifferenz von etwa 20 m bedeutet. Die Ausführung der DSV-Sohlen erfolgte mit speziell hierfür angeschafften Bohrgeräten (BG 24, siehe Bild 5 Markierung) mit verlängerten Mäklern, die nahezu in der Lage sind die erforderliche Bohrtiefe von 44 m in einem Arbeitsgang, also ohne Nachlegen / Entnehmen von Rohrschüssen, abzubohren. Der Rohbau der Schächte wurde unter einem aussteifenden Deckel ausgeführt. Die Baugrubenwände wurden ausserdem durch Stahlkonstruktionen ausgesteift.

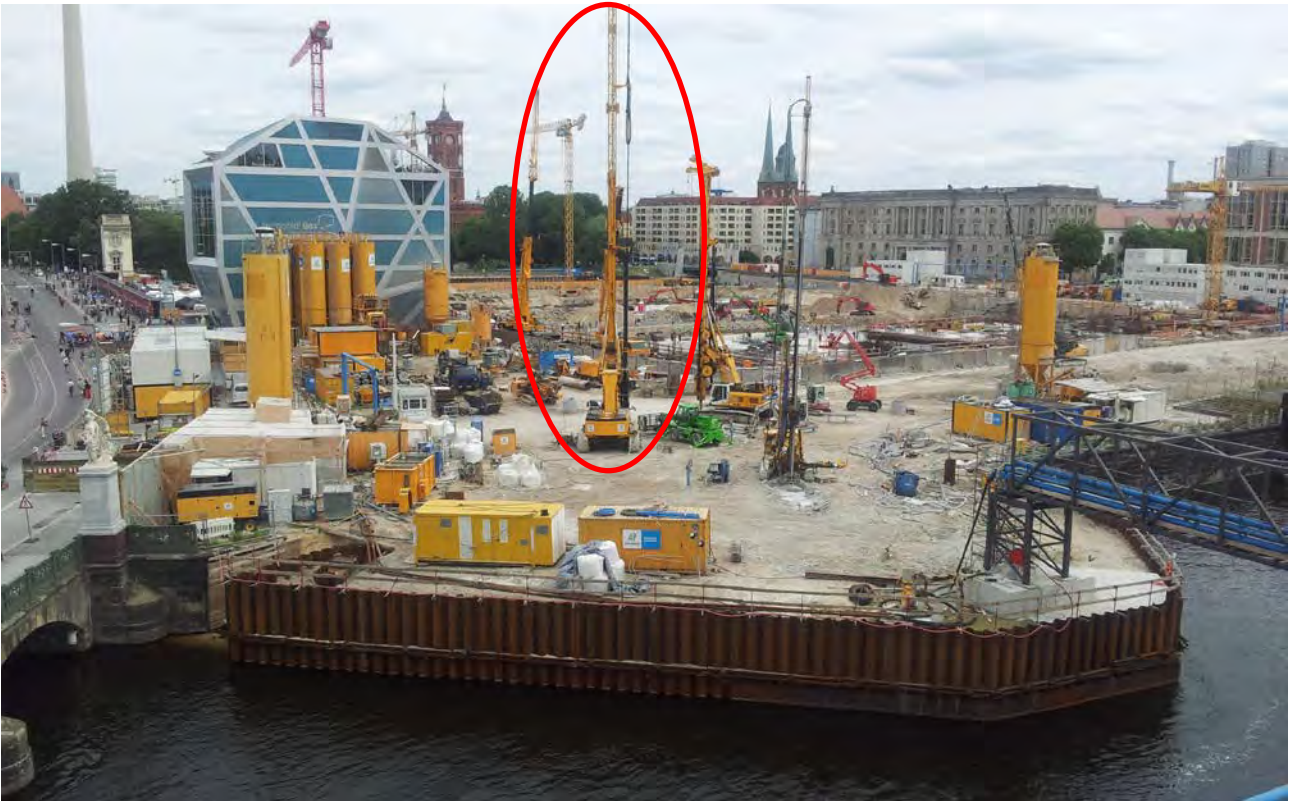


Bild 5: MUI-Ost, Kastenfangedamm im Spreekanal, Herstellung DSV-Sohle [3]

2.2 Herstellungsparameter

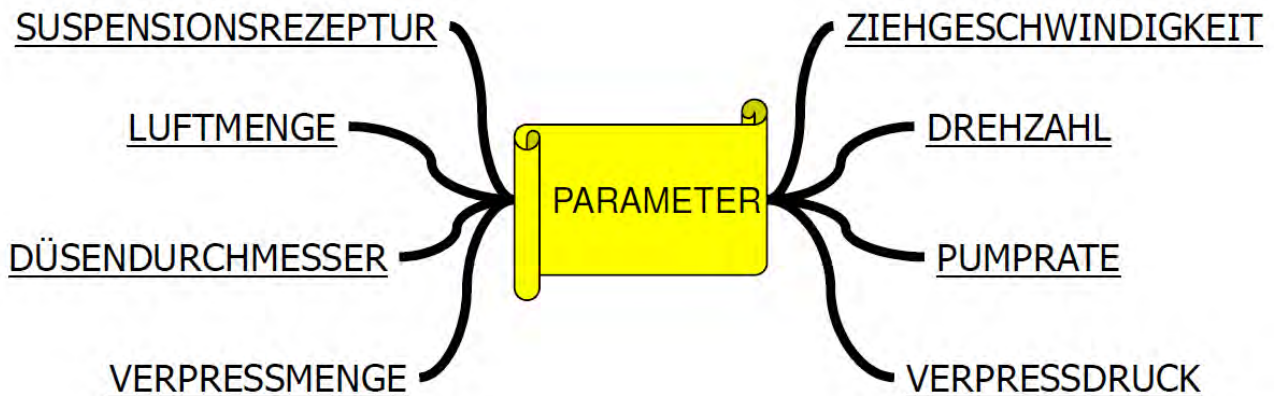


Bild 6: Herstellungsparameter [3]

Mit den vorgenannten Herstellungsparametern können, in Abhängigkeit von den Eigenschaften des anstehenden Baugrundes und dem Herstellungsverfahren, die Abmessungen der Düskörper und damit die Eigenschaften des Endproduktes beeinflusst werden. Die Standard-Herstellungsparameter sind informativ in der nachfolgenden Tabelle, in Abhängigkeit zu den DSV-Verfahren, dargestellt.

		Einfach	Zweifach	Dreifach
Pumpendruck Suspension	[bar]	450	450	10 bis 40
Pumpendruck Wasser	[bar]	--	--	400
Pumpendruck Luft	[bar]	--	2 bis 12	2 bis 12
Suspensionsmenge	[l/min]	100 bis 550	100 bis 550	80 bis 200
Wassermenge	[l/min]	--	--	100 bis 200
Rohdichte Suspension	[g/cm ³]	1,503	1,503	1,730
w/z-Wert	[-]	1,00	1,00	0,56

Tabelle 1: Standard-Herstellungparameter [3]

2.3 Probesäulen und Reichweitentest mit Hydrophonvermessung

Gemäss SN EN 12716 [4] "müssen, wenn Erfahrungen unter vergleichbaren Bedingungen nicht vorliegen, vor Beginn der Arbeiten Probeelemente vorgesehen und hergestellt werden, (wie es hier auch die Ausschreibung vorsah). Dabei müssen alle wesentlichen Bedingungen die auf der Baustelle möglicherweise gleichzeitig zusammentreffen können, erfasst werden um:

- das bestgeeignete System und die günstigsten Düsenstrahlparameter auszusuchen;
- nachzuweisen, dass mit dem ausgewählten System und den ausgewählten Düsenstrahlparametern die Planungserfordernisse erfüllt werden."

Nach Ausschreibung war vorgesehen [2] "vor Beginn der DSV-Arbeiten je Baubereich (UDL, MUI) und Homogenitätsbereich (Bodenschichtung) mindesten drei separate Probesäulen sowie ein Feld aus mindesten 3 überschrittenen Düsenstrahlsäulen herzustellen"

Die ausführende Unternehmung, Bilfinger Spezialtiefbau GmbH, wendet für den Reichweitentest, wenn ein freilegen der Probesäulen nicht in Frage kommt oder zu aufwendig wird, das Hydrophon-Verfahren an. Hiermit können Probesäulen und auch Produktionssäulen in beliebiger Tiefe getestet werden. Ein weiterer Vorteil liegt darin, dass schon beim "Düsen" die Herstellungparameter zur erforderlichen Strahlreichweite hin optimiert werden können.

Das Grundprinzip der Messung besteht darin [3], dass ein definitiv bekannter Punkt radial zum Bohrgestänge vom Schneidstrahl erreicht wird und die auf diesen Punkt treffende Energie in ein Analogsignal umgewandelt wird (siehe Bild 7).

Die Sensoren zur Messung dieser energieanalogen Grössen werden höhengleich mit dem Schneidstrahl in wassergefüllten Horchpegeln geführt.

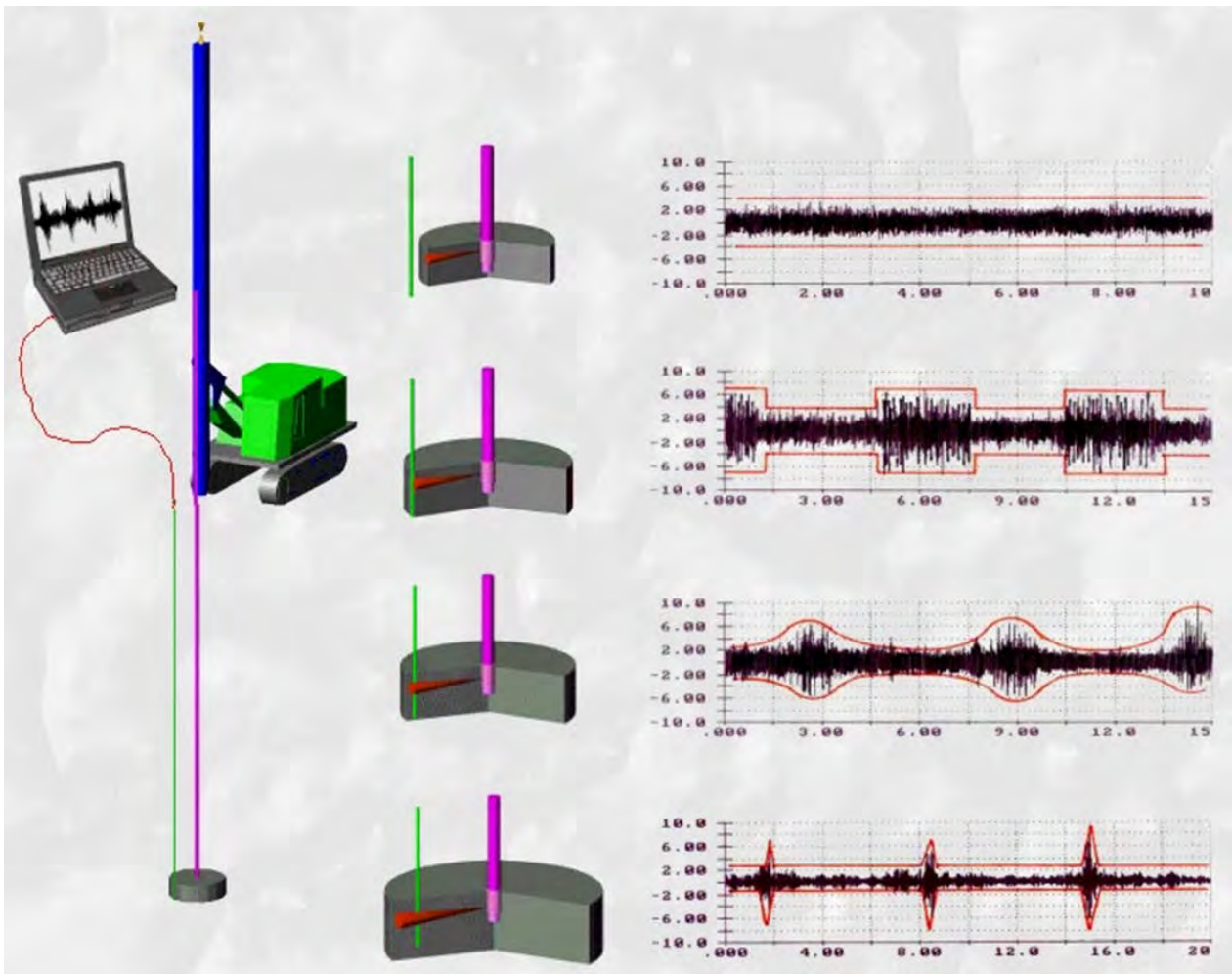


Bild 7: Hydrophonvermessung bei Bilfinger Spezialtiefbau GmbH [3]

Insbesondere für grosse Bohrtiefen mit entsprechend grossen absoluten Bohrabweichungen bei den Probesäulen und den Pegeln, ist die Anwendung von Probesäulengruppen mit mehreren Pegeln, wie z. B. im Bild 8 dargestellt, zweckmässig. Auf Grund der Vertikalitätsabweichungen der Bohrungen kann es sonst bei Einzelsäulen eher dazu kommen, dass die Distanz eines Pegels zur Probesäule eine Vermessung unmöglich macht.

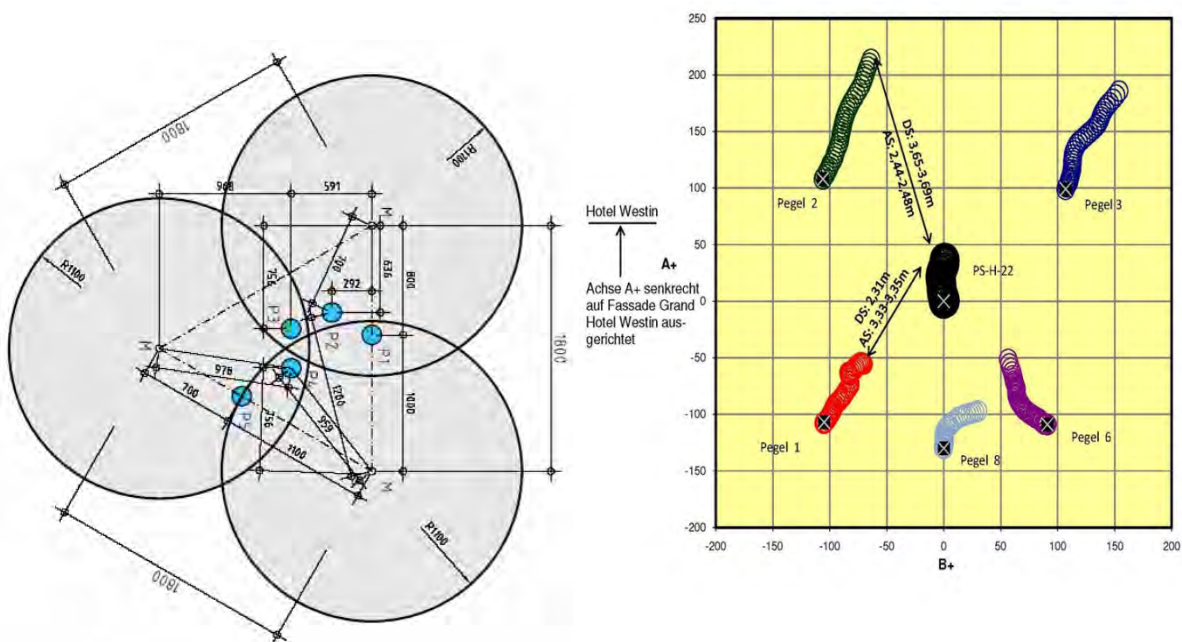


Bild 8: Anordnung Probesäulengruppe für Reichweitentest mit Darstellung des vermessenen Bohrverlaufes (eines anderen Beispiels) [3]

2.4 Vertikalitätsmessung

Genauso entscheidend für den Erfolg einer DSV-Dichtsohle wie der erreichbare Säulendurchmesser ist, ist auch die Kenntnis über die Lage der Säule, welche mit der Bohransatz-Genauigkeit sowie mit der Vertikalität der Bohrung bestimmt wird. Die bei dieser Massnahme eingesetzten Messverfahren für die Kontrolle der Vertikalität waren die Inklinometer-Sonde (Fabr. Glötzl) und die Tigor-Sonde (Fabr. Jean Lutz) (siehe Bilder 9-11).



Bild 9: Inklinometer-Sonde [3]



Bild 10: Inklinometer-Kette [3]



Bild 11: Tigor-Sonde [3]

Während für den Messvorgang mit den Inklinometern das Bohrgestänge nach dem Abbohren gebrochen werden muss und dieser dann etwa 20-30 Minuten in Anspruch nimmt, ist dies beim Einsatz der Tigor-Sonde nicht erforderlich.

Hierbei muss beim Abbohren [5] alle 3m für 20 Sekunden die Rotation gestoppt werden. Dieser Stopp wird vom Tigor erkannt und er führt die Neigungsmessung durch. Die Messungen werden im internen Speicher abgelegt. Wenn das Bohrgestänge wieder gezogen ist, wird die Ausleseschelle um den Tigor gelegt. Damit werden die Daten vom internen Speicher auf die Speicherkarte MEMOBLOCK übertragen, was ca. 10 Sekunden dauert. Anschliessend werden die Daten mit einer speziellen Software ausgewertet.

2.5 Vorläufige Ausführungsplanung, dynamische Planung / as built-Plan

Gemäss Ausschreibung [2] soll vom Unternehmer, zur Ermittlung der Lagerungsdichte, zusätzlich zum Baugrundgutachten mindestens eine Drucksondierung je Baugrube ausgeführt werden.

Die Planungsvorgaben [2] waren im Wesentlichen für die Aussteifungssohle:

- eine Stärke von mindestens 1.50 m,
- eine Bohrtiefe von etwa 24 m,
- hat Anforderungen an die Druckfestigkeit, $f_{m,d} \leq 2.5 \text{ N/mm}^2$ im Sand,
- darf nicht geschlossen sein und

für die Dichtsohle:

- eine Stärke von mindestens 2.00 m,
- eine Bohrtiefe von 44 m und
- eine maximale Systemdurchlässigkeit von 1.5 l/s je 1'000 m² benetzte Fläche.

Ein Dreiecksraster zwischen den Reihen ergibt sich allein durch die runde Säulenform. Die Maximalabstände der Säulen in der Reihe und zwischen den Reihen ergeben sich zunächst aus der Forderung, dass keine planmässigen Lücken entstehen dürfen. Wegen der zu berücksichtigenden Bohrabweichungen (Vertikalität) sowie möglichen Toleranzen am Einstichpunkt, müssen grössere Überschneidungen gewählt werden, insbesondere bei der tiefliegenden Dichtsohle. Bei Berücksichtigung von nur einem Prozent Schrägstellung und der extremen Bohrtiefe von 44 m wird schnell klar, dass man hier nur mit grossen Säulendurchmessern arbeiten kann (siehe Bild 12).

Die Ausführungsplanung wurde auf Grund der Ergebnisse aus den Reichweitentests und der zu erwartenden Bohrabweichungen vom Unternehmer erstellt. Ausserdem wurde die tägliche dynamische Planung auf Grund der gemessenen IST-Lagen der einzelnen Säulen und der "as built"-Planung der Schlitzwandlamellen vorgenommen.

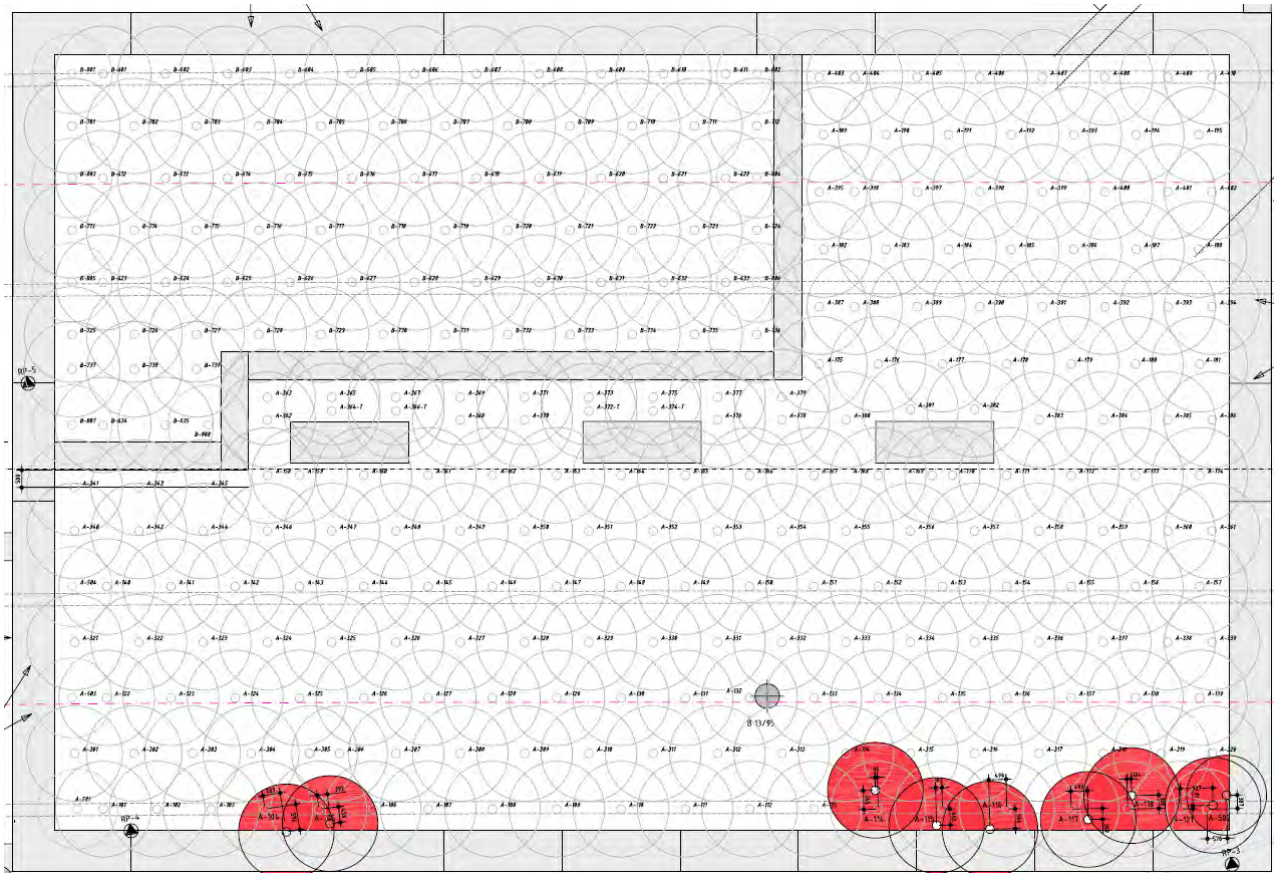


Bild 12: Ausführungsplan Westschacht, Grundriss tiefliegende Dichtsohle, mit ersten IST-Lagen [3]

2.6 Ausführung

Beide Sohlen wurden im gleichen Bohrraster in einem Arbeitsgang hergestellt. Das bedeutet, es wurde nach dem Abbohren zunächst die Säule für die Dichtsohle gedüst, dann das Gestänge bis in die Höhe der Aussteifungssohle gezogen, nun wurde die Säule für die Aussteifungssohle mit geänderten Parametern hergestellt und schliesslich wurde das Gestänge komplett gezogen.

Die Herstellreihenfolge innerhalb einer Reihe wurde im Prinzip "frisch in frisch" ausgeführt, wobei dies immer nur die Tagesproduktion betrifft. Am Folgetag ist der Anschluss schon nicht mehr wirklich "frisch in frisch". Dann ist es von der Tagesleistung abhängig, wie gross der Anteil an "frisch in frisch" - Arbeitsfugen tatsächlich ist. Bei der vorbeschriebenen Arbeitsweise und der enormen Bohrtiefe war der Anteil der "kalten" Arbeitsfugen nicht gering.

Die einzelnen Reihen wurden in Primär- und Sekundärreihen abgearbeitet (siehe Bild 13). Wie auf diesem Bild erkennbar, war es teilweise schwierig die Sekundärreihe herzustellen und dabei auszuschliessen, dass die Bohrung einer Sekundärsäule in einer Primärsäule landet. Somit wurde im Laufe der Ausführung (MUI-Ost und MUI-West Teil 2) das Prinzip Primär- und Sekundärreihen auf Doppelreihen angepasst (siehe Bild 14). Ausserdem wurden die Sekundärsäulen mit einer "Unterdeckelung" ausgeführt (siehe Bild 14), um das Risiko von Leckagen infolge von Düsschatten, die durch die Lage einer Bohrung zu bereits hergestellten Säulen entstehen können, zu minimieren.

Als nicht unbedeutende Nebenerscheinung wurde schon zu Beginn der Ausführung festgestellt, dass sich der Grundwasserspiegel plötzlich fast bis OK Bohrebene erhöhte, was aus mehreren Gründen unverzüglich mit einer temporären oberflächennahen Wasserhaltung verhindert werden musste. Die Ursache dafür konnte natürlich nur die DSV-Produktion sein, die innerhalb der Baugrubenumschliessung Zementsuspension und Luft in grossen Mengen und mit grosser Energie einbringt.

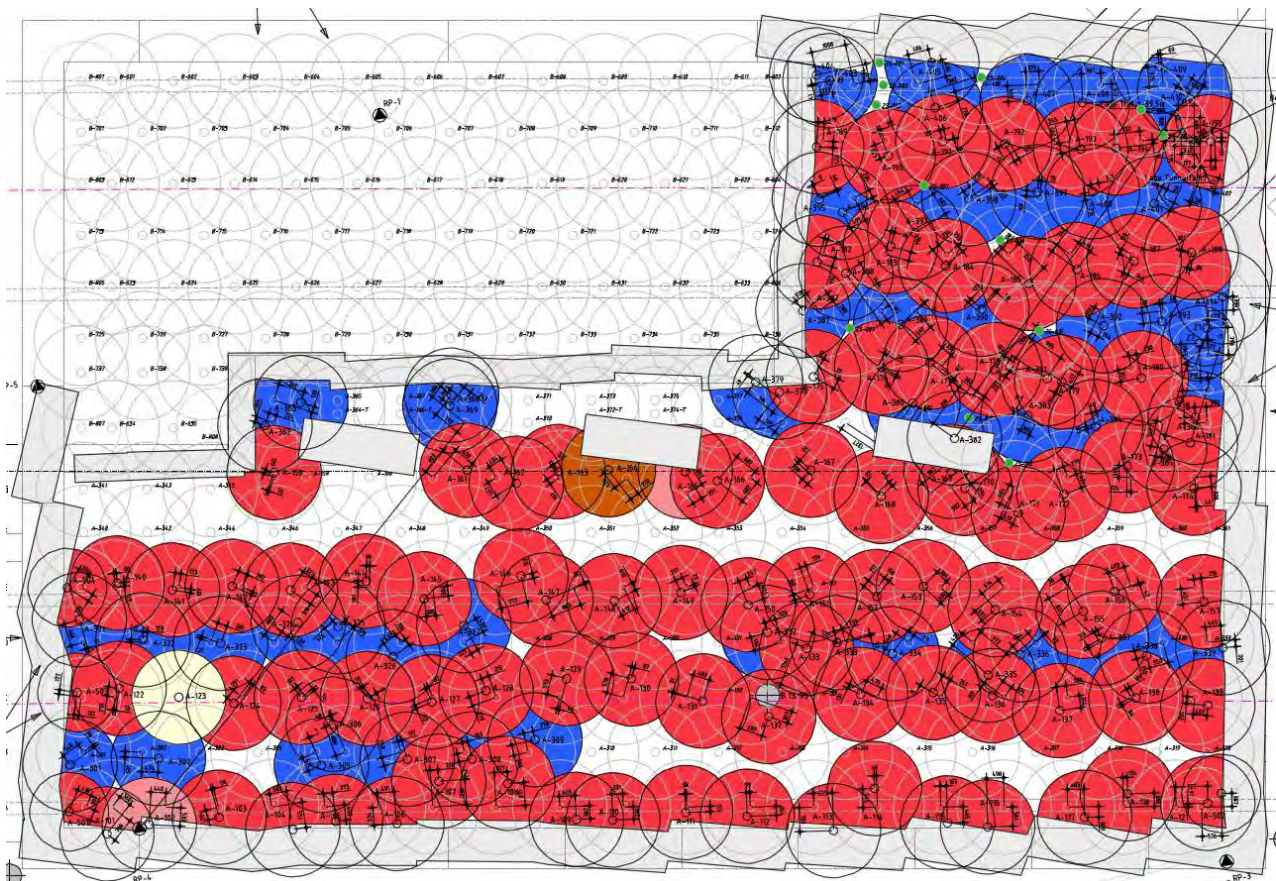


Bild 13: As built Plan Westschacht, Grundriss Dichtsohle, mit IST-Lagen der Primär- und Sekundärreihen sowie der SW-Lamellen [3]

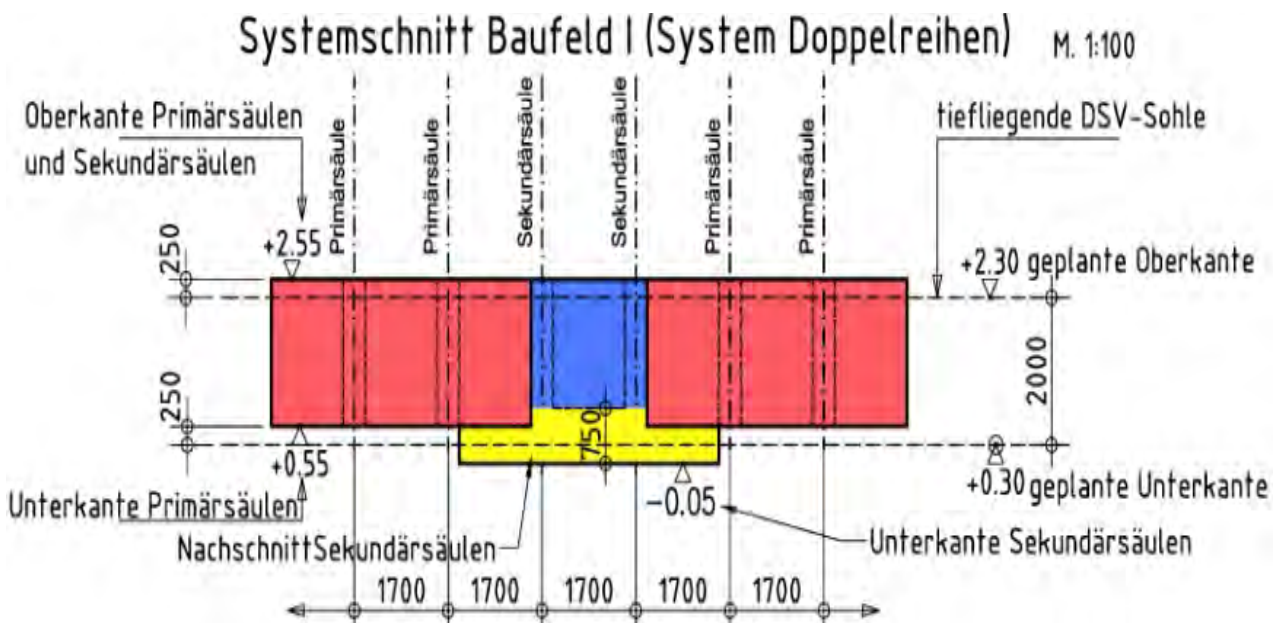


Bild 14: Dichtsohle Westschacht, Schnitt System Doppelreihen [3]

2.7 Pumpversuch, thermische Leckortung

Gemäss Ausschreibung [2] war vor dem Beginn des Lenzens ein Pumpversuch bis zum Absenkeziel mit parallel erfolgender Leckortung durchzuführen, mit dem die Dichtheit der Trograugrube nachzuweisen war. Das hier vom Unternehmer eingesetzte Verfahren für die Leckortung ist von der Firma GTC Kappelmeyer GmbH und basiert auf der Wassertemperatur-Differenz zwischen Trogrwasser und zuströmendem Wasser

von ausserhalb. Das Wasser im Trog erwärmt sich infolge der Hydratationswärme der mit der Sohlenherstellung eingebrachten Zementmengen, welche je nach Herstellungsparameter bei etwa 5-10 to je Säule liegen können.

Um diese Temperaturdifferenzen messen zu können, werden im Rasten von etwa 5 m über die Sohlenfläche verteilt Temperaturmesspegel bis 1m über die Sohle gebohrt. Über diese Pegel wird die Grundwassertemperatur alle 1m Tiefe und über einen gewissen Zeitraum gemessen. Die Daten werden in nachfolgend dargestellten Protokollen [6] (siehe Bild 15) dokumentiert und bieten, wie hier erkennbar, Aussagen über Temperaturdifferenzen über den Tiefenverlauf sowie über einen zeitlichen Verlauf.

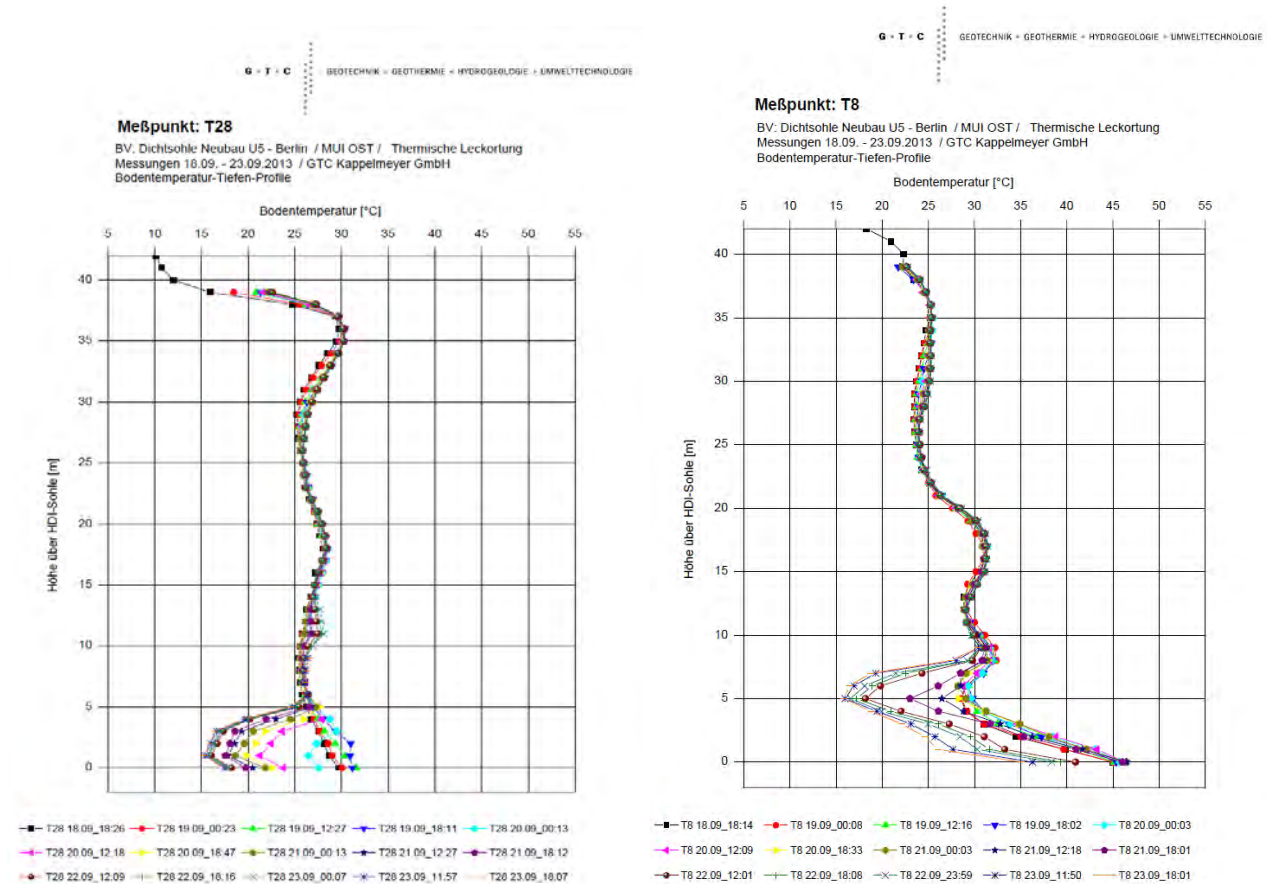


Bild 15: Protokolle der thermischen Leckortung [6]

Beide Messpunkte weisen eine erhebliche Abkühlung oberhalb der Dichtsohle auf, so dass man hier von Leckagen ausgehen muss. Allerdings zeigt der Messpunkt T 28 den Temperatur-Tiefpunkt deutlich näher an der Sohle als T8. Hieraus kann man deuten, dass hier möglicherweise der Zustrom eher aus einer Wandfuge erfolgt und nicht aus der Sohle.

Grundsätzlich sind, nach Ansicht des Autors, für die Auswertung und Interpretation der Messergebnisse sehr gute Projektkenntnisse von der Ausführungsseite sowie die Erfahrungen des Büro Kappelmeiers unerlässlich.

3 Abschluss

Bedeutende Voraussetzungen für eine erfolgreiche Ausführung einer so anspruchsvollen Bauaufgabe sind erfahrene Personal in Einheit mit bewährten und leistungsfähigen Geräten, die auch unter den vorliegenden Bedingungen in der Lage sind einen entsprechend grossen Säulendurchmesser herzustellen sowie eine zuverlässige Messtechnik.

Nach dem ersten und zweiten Pumpversuch wurden zu hohe Zulaufraten gemessen, so dass zwei Nachdichtungskampagnen erforderlich waren, um eine deutliche Verringerung der Pumprate in Richtung der ausgedruckten Pumprate zu erreichen. Ausserdem brachte die Vervollständigung der Schlitzwand im 2.

Bauabschnitt, welcher vorerst mit einer Dichtwand abgeschottet war, eine spürbare Verbesserung. Wie eingangs erwähnt kann in Frage gestellt werden, ob dieser Grenzwert -bei der hier vorliegenden Wasserdruckdifferenz von ca. 20 m und den übrigen Randbedingungen- noch mit vertretbarem Aufwand erreicht werden kann. Massgeblicher als dieser theoretische Wert sind sicher Auswirkungen auf den Wasserspiegel ausserhalb des Troges und damit verbunden eine mögliche Beeinträchtigung der Umwelt.

Seit 2013 wurde die Trogbaugrube Museumsinsel West von den Projektbeteiligten in technischer Hinsicht als ausreichend wasserundurchlässig eingestuft und wurde jedoch bis heute nicht gelenzt. Grund dafür ist, dass gemäss der Planung des Bauherrn die zwei Hydroschildvortriebe durch nicht gelenzte und nicht ausgehobene Baugruben gebohrt werden.

4 Literatur

- [1] Borchert, K.-M.; Mittag, J.; Richter, Th.: Erfahrungen und Risiken bei Düsenstrahlsohlen in Trogbaugruben; Baugrundtagung 2006 in Bremen
- [2] Projektrealisierungs GmbH U5
- [3] Bilfinger Spezialtiefbau GmbH
- [4] SN EN 12716
- [5] Beschreibung TIGOR von Jean Lutz SA
- [6] GTC Kappelmeyer GmbH

Autor:

Ralf Hebecker
Dipl.-Bauingenieur (FH)
Gruner AG
Basel