

RHEinstr. 46 - 12161 BERLIN

TELEFON 030 / 859 63 856

TELEFAX 030 / 859 63 857

e-MAIL igb-berlin@igb-ingenieure.de

BERATENDE INGENIEURE

Ausführungsrisiken tiefliegender und hochliegender HDI-Sohlen

Dipl.-Ing. Ralf Zöller, Dr.-Ing. Heinz Heil

Zusammenfassung

HDI-Sohlen stellen neben Unterwasserbetonsohlen in Berlin die Regelbauweise zur horizontalen Abdichtung tiefer Baugruben dar. Aufgrund behördlicher Auflagen ist die zulässige Restdurchlässigkeit auf 1,5 l/s je 1.000 m² benetzter Fläche begrenzt. Insbesondere sehr tief in das Grundwasser eintauchende Baugruben mit HDI-Sohlen erreichen häufig nicht die geforderte Dichtigkeit. Wie ausgeführt wird, stellt das Dichtigkeitsziel keine realistische Zielvorgabe dar. In der Regel wird es bauvertraglich als Qualitätskriterium vereinbart, so daß eine Vielzahl der Baugruben im Sinne der VOB als mangelhaft bezeichnet werden müssen. Hieraus ergeben sich für die ausführenden Firmen Haftungsrisiken.

Bei tiefliegenden HDI-Sohlen bestehen diese aus den finanziellen und terminlichen Risiken durch die Pflicht zur Nachbesserung. Anhand von Beispielen wird gezeigt, daß bei hochliegenden HDI-Sohlen das Risikopotential deutlich größer ist, da hier die kaum prognostizierbare Möglichkeit von Sohlaufbrüchen und damit fast immer die Unmöglichkeit der Ingebrauchnahme der Baugrube gegeben ist. Die erforderlichen Sanierungsaufwendungen sind erheblich, die finanziellen und terminlichen Risiken dementsprechend groß.

1 Einführung

Tiefe Baugruben werden in Berlin wegen des sehr hoch anstehenden Grundwassers in der Regel als quasi wasserdichte Tröge hergestellt. Als wasserdruckhalrende Verbauwände kommen je nach den vorherrschenden Randbedingungen eine Vielzahl von Bauverfahren wie Spundwände, Schlitzwände, Bohrpfahlwände oder Dichtwände, in die Spundwände oder Stahlträger eingestellt werden, zum Einsatz. Auch für die künstliche horizontale Abdichtung der Tröge gegen das Grundwasser stehen verschiedene Bauweisen zur Verfügung. Neben Unterwasserbetonsohlen wurden Injektionssohlen mit Weichgelenk und Feinstzementen als Injektionsmittel sowie Sohlen im Hochdruckinjektionsverfahren hergestellt.

Aus Gründen des Grundwasserschutzes werden Weichgelinjektionen von der Wasserbehörde in Berlin nur noch in Ausnahmefällen, zum Beispiel bei Havarien, genehmigt. Feinstzementsohlen haben sich wegen des sehr häufig unbefriedigenden Abdichtungserfolges bisher nicht durchsetzen können. Die Herstellung von Unterwasserbetonsohlen ist im innerstädtischen Bereich insbesondere aus logistischen Gründen häufig nicht möglich.

Somit können HDI-Sohlen in Berlin als die Regelbauweise zur horizontalen Abdichtung von Baugruben gegen das Grundwasser angesehen werden (Stocker 1999). Der vorliegende Aufsatz befaßt sich mit den spezifischen Risiken, die mit der Ausführung von Dichtsohlen in HDI-Bauweise verbunden sind.

1.1 Beanspruchungen einer HDI-Sohle

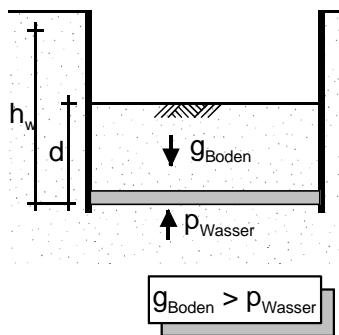
Hinsichtlich der Beanspruchungen, denen eine HDI-Sohle ausgesetzt ist, ist zwischen tiefliegenden Sohlen und hochliegenden Sohlen zu unterscheiden, vgl. Bild 1.

Die Auftriebssicherheit einer tiefliegenden HDI-Sohle wird allein durch das Eigengewicht der Sohle und der überlagernden Bodenschichten gewährleistet, d. h. das Eigengewicht ist – unter Beachtung der erforderlichen Sicherheiten – größer als der von unten auf die Dichtsohle wirkende Wasserdruck. Die tiefliegende HDI-Sohle wird dementsprechend hydraulisch beansprucht – sie muß eine ausreichend geringe Durchlässigkeit aufweisen, um die aus der Baugrube zu fördernden Restwassermengen wirksam zu begrenzen.

Hochliegende HDI-Sohlen werden mit geringem Abstand unterhalb der Baugrubensohle hergestellt. Das Eigengewicht der Sohle und der überlagernden Bodenschicht ist geringer als der wirksame Wasserdruck. Es reicht zur Auftriebssicherung nicht aus, so daß eine Verankerung der Sohle in den tieferen Untergrund erforderlich ist.

Der in Form einer gleichmäßigen Flächenlast wirkende Wasserdruck muß über Gewölbe- bzw. Schubspannungen in die punktuell angeordneten Zugpfähle eingeleitet werden. Meist werden hochliegende HDI-Sohlen gleichzeitig als Steifenlage zur Abstützung der Verbauwände herangezogen, wodurch sich die Wandverformungen deutlich reduzieren lassen.

a) tiefliegende Dichtsohle



b) hochliegende Dichtsohle

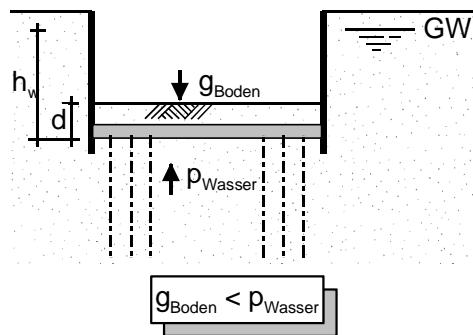


Bild 1 Tiefliegende und hochliegende HDI-Sohlen

1.2 Anforderungen an die Dichtigkeit von Trogbaugruben

Die Anforderungen an die Dichtigkeit, die in Trogbauweise hergestellte Baugruben erfüllen müssen, ergeben sich aus den Auflagen in der Wasserbehördlichen Erlaubnis. Darin wird regelmäßig gefordert, daß die Restdurchlässigkeit von Trogbaugruben einen Grenzwert von 1,5 l/s je 1.000m² benetzter Baugrubenfläche¹⁾ nicht überschreiten darf. Weitere Anforderungen beschreiben die zulässigen Wasserstandsänderungen außerhalb der Trogs, die in Abhängigkeit von der Nutzung des Umfelds fallweise festgelegt werden.

In der Praxis wird die erreichte Restdurchlässigkeit des Gesamtsystems Baugrube anhand einer Probeabsenkung, die vor Ingebrauchnahme einer Baugrube durchgeführt wird, ermittelt und dem zulässigen Grenzwert gegenübergestellt.

2 Trogbaugruben mit tiefliegenden HDI-Sohlen

Seit Beginn der neunziger Jahre wurden in Berlin eine Vielzahl von Baugruben mit tiefliegenden HDI-Sohlen errichtet. In vielen Fällen, insbesondere bei sehr tief in das

¹⁾ benetzte Fläche = Sohlfläche + ins Grundwasser eintauchender Teil der Verbauwandfläche

Grundwasser eintauchenden Baugruben, konnte der oben genannte Grenzwert der Restdurchlässigkeit nicht eingehalten werden (Borchert 1999).

Eine im HDI-Verfahren hergestellte Sohle stellt keine undurchlässige, in den Untergrund eingebrachte Membran dar. Vielmehr wird durch das Einbringen des Injektionsmaterials eine Zone geringerer Durchlässigkeit geschaffen. Es ist daher folgerichtig, daß mit zunehmendem Absenkmaß die erreichbare Abdichtungseffekt in einer Baugrube abnimmt.

Berliner Baugruben mit tiefliegenden HDI-Sohlen, deren gemessene Restdurchlässigkeiten bekannt sind, wurden unter Berücksichtigung des jeweiligen Absenkmaßes ausgewertet. Nachfolgend wird zunächst über die Ergebnisse der Auswertungen berichtet. Im Anschluß werden die Folgerungen im Hinblick auf die Risiken bei der Ausführung von HDI-Dichtsohlen dargestellt.

2.1 Restdurchlässigkeiten von ausgeführten Baugruben

Die Meßwerte von ausgeführten Baugruben in Berlin konnten entweder aus der Literatur (Borchert et al. 1997) entnommen werden oder sind den Autoren aus ihrer Berufspraxis heraus zugänglich.

In einem ersten Auswertungsschritt wird die erreichte Restdurchlässigkeit q_{rest} auf das Absenkmaß Δs bezogen. Die vorliegenden Meßwertpaare sind in Bild 2 dargestellt.

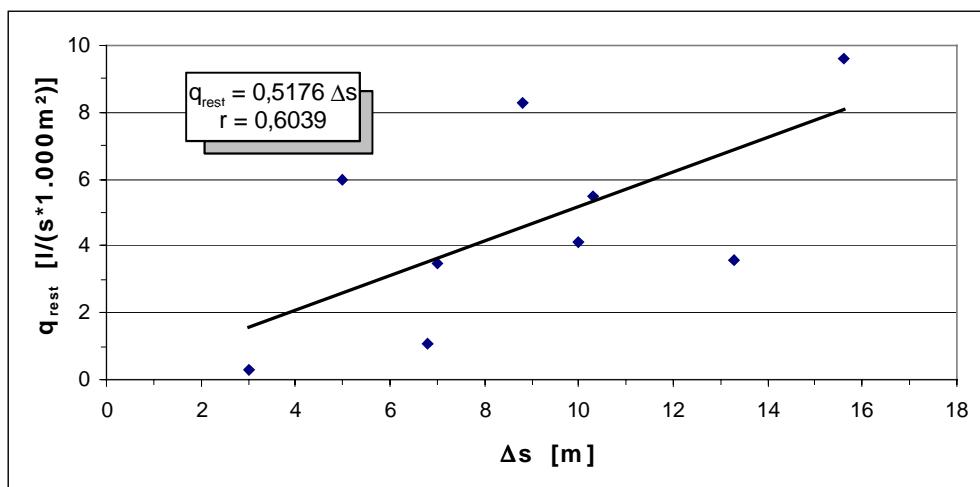


Bild 2 Baugruben mit tiefliegenden HDI-Sohlen – Restdurchlässigkeit versus Absenkmaß

Deutlich ist eine Vergrößerung der Restdurchlässigkeit mit zunehmendem Absenkmaß zu erkennen. Eine lineare Regressionsanalyse der Form

$$q_{\text{rest}} = F_1 * \Delta s \quad (1)$$

liefert eine Steigung der Ausgleichsgeraden von etwa $0,52 \text{ l/(s*m)}$ je 1.000 m^2 be- netzter Baugrubenfläche. Der Wert stimmt gut mit dem von (Borchert 1999) ermittel- ten Wert von $1,8 \text{ m}^2/\text{h}$ je 1.000 m^2 Baugrubenfläche überein.

Die Meßwertpaare streuen relativ stark, der Korrelationskoeffizient r ist mit einem Wert von 0,60 entsprechend klein.

Sinnvoller als der Bezug der Restdurchlässigkeit auf das Absenkmaß ist ein Bezug auf den hydraulischen Gradienten i_{hyd} gemäß Gleichung (2).

$$q_{\text{rest}} = F_2 * i_{\text{hyd}} \quad (2)$$

Der hydraulische Gradient ergibt sich aus dem Verhältnis von Absenkmaß zu Dicke der HDI-Sohle:

$$i_{\text{hyd}} = \Delta s / d_{\text{Sohle}} \quad (3)$$

In der nachfolgenden Auswertung wurde die Restdurchlässigkeit der Verbauwände vernachlässigt. Bild 3 zeigt die gemessenen Restdurchlässigkeiten über die hydraulischen Gradienten. Die Korrelation zwischen den Meßwertpaaren und der Regres- sionsgeraden ist gegenüber Bild 2 verbessert.

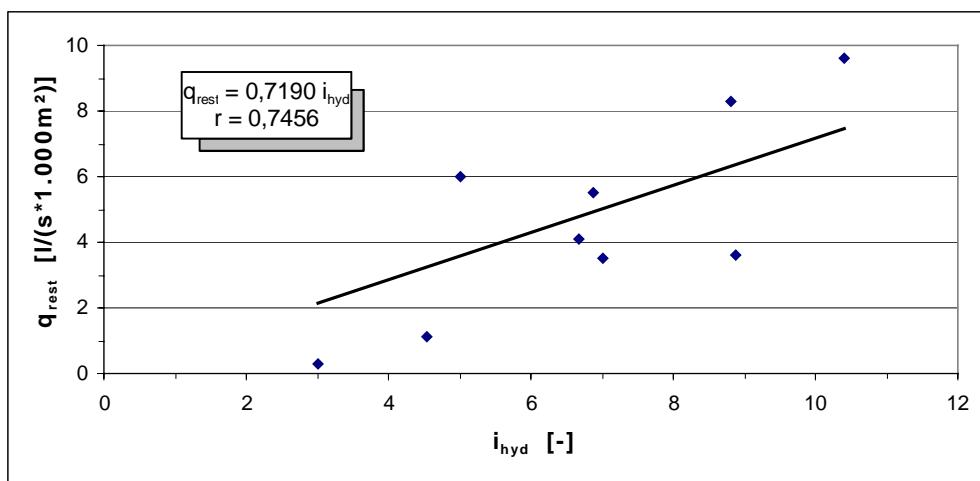


Bild 3 Baugruben mit tiefliegenden HDI-Sohlen – Restdurchlässig- keit versus hydraulischem Gradienten

Die empirische Gleichung (2) entspricht dem Gesetz von Darcy über die Proportionalität von hydraulischem Gradienten und der Filtergeschwindigkeit in porösen Medien

$$V_{\text{Filter}} = k_f * i_{\text{hyd}} \quad (4a)$$

unter Berücksichtigung der durchströmten Fläche A

$$\begin{aligned} q_{\text{rest}} &= A * V_{\text{Filter}} \\ &= A * k_f * i_{\text{hyd}} \end{aligned} \quad (4b)$$

Der Faktor F_2 in Gleichung (2) entspricht also dem Produkt aus durchströmter Fläche A und Durchlässigkeitsbeiwert k_f in Gleichung (4b). Mit dem in Bild 3 angegebenen Wert für F_2 und einer durchströmten Fläche von 1.000 m² kann der im Mittel erreichte Durchlässigkeitsbeiwert

$$k_f = 7,2 * 10^{-7} \text{ m/s} \quad (5)$$

berechnet werden. Bezogen auf durchschnittliche Berliner Untergrundverhältnisse bedeutet dieser Wert eine Abnahme der Durchlässigkeit im Bereich der HDI-Sohle von etwa 3 bis 4 Zehnerpotenzen. Er spiegelt damit den Bereich der Leistungsfähigkeit des HDI-Verfahrens wider.

Zur Konkretisierung der Ausführungen werden exemplarisch zwei Baugruben mit unterschiedlichen Absenkzielen und stark voneinander abweichenden Restdurchlässigkeiten vorgestellt:

Baugrube 1 Teilbaugrube für einen Wohn- und Geschäftshaus-Komplex in Berlin-Mitte

Baugrube 2 Teilbaugrube des Projektloses 1.1 – Lehrter Bahnhof – der Verkehrsanlagen im Zentralen Bereich Berlin

Der Übersichtlichkeit halber sind die relevanten Daten der beiden Baugruben in Tabelle 1 zusammengestellt.

Die mit einer Fläche von ca. 800 m² recht kleine Baugrube 1 wurde zur Aufnahme von Doppel- bzw. Dreifachparksystemen innerhalb einer eingeschossigen Baugrube, deren Sohle über dem Grundwasserspiegel lag, angeordnet. Das für Trogbaugruben geringe Absenziel von etwa 3,0 m ermöglichte trotz voller Auftriebssicherheit durch Bodenauflast eine sehr geringe Tiefenlage der Sohle. Als Verbauwände wurden Stahlspundbohlen eingerüttelt. Ohne besondere Maßnahmen zur Qualitäts-

sicherung wurde eine Systemdichtigkeit erreicht, die den zulässigen Grenzwert deutlich unterschreitet.

	Baugrube 1	Baugrube 2
Baugrubenfläche	800 m ²	1.650 m ²
HDI-Sohle		
- Sohldicke	1,0 m	1,5 m
- Bohrtiefe	6,5 m	13,0 m
Absenkmaß	3,0 m	10,0 m
Restdurchlässigkeit		
- nach Herstellung	0,25 l/(s*1.000m ²)	7,3 l/(s*1.000m ²)
- nach lokaler Sanierung	-	7,4 l/(s*1.000m ²)
- nach flächiger Sanierung	-	3,5 l/(s*1.000m ²)

Tabelle 1 Baugruben 1 und 2 mit tiefliegenden HDI-Sohlen

Das Absenkziel innerhalb der Baugrube 2 fällt mit etwa 10 m ungleich größer aus, was unter anderem zur Wahl einer größeren Dicke der HDI-Sohle führte. Anhand des nach der Herstellung durchgeföhrten Pumpversuchs wurde auf eine deutlich zu große Restdurchlässigkeit geschlossen. Anhand der Ergebnisse von geophysikalischen Untersuchungen wurden daraufhin lokale, als kritisch angesehene Bereiche in der Sohle, im Übergangsbereich zu den Verbauwänden und auch an den Wänden saniert – wie der Tabelle 1 entnommen werden kann, ohne meßbaren Erfolg. In der Folge wurden Sohlbereiche großflächig nachgearbeitet.

Die Maßnahmen führten zu einer Halbierung der Restdurchlässigkeit, mit einem Wert von ca. 3,5 l/(s*1.000m²) lag sie jedoch weiterhin deutlich über dem zulässigen Wert von 1,5 l/(s*1.000m²). Der rechnerische Durchlässigkeitsbeiwert der Sohle betrug etwa $5,3 \cdot 10^{-7}$ m/s.

Die in den Überwachungspegeln außerhalb der Baugrube festgestellten Beeinflus- sungen des Grundwasserspiegels lagen im Bereich weniger Dezimeter.

2.2 Folgerungen

Auf der bautechnischen Ebene ist festzustellen, daß der von der Wasserbehörde in Berlin für Trogbaugruben zugelassene Wert der Restdurchlässigkeit von 1,5 l/s je 1.000 m² benetzter Baugrubenfläche insbesondere bei Baugruben, die sehr tief in das Grundwasser eintauchen, aus mehreren Gründen keine realistische Zielvorga-

be darstellt. Zum einen kann der Grenzwert mit wirtschaftlich vertretbarem Aufwand in der Regel nicht erreichbar werden. Zum anderen ist die Überschreitung des Grenzwerts als unkritisch für den Grundwasserhaushalt anzusehen, da Beobachtungen des Grundwasserstands im Einflußbereich solcher Baumaßnahmen gezeigt haben, daß auch die Entnahme größerer Restwassermengen den Wasserhaushalt lediglich im Rahmen jahreszeitlich bedingter Schwankungen beeinflußt.

Der vorgenannte Grenzwert der Genehmigungsbehörde wird in der Regel bauvertraglich als ein maßgebliches Qualitätskriterium für die Baugrube festgeschrieben. Dieses ist einerseits verständlich, kann doch vom Bauherrn schwerlich erwartet werden, eine Bauleistung zu bestellen, die den Genehmigungsauflagen nicht genügt. Andererseits formuliert in einem solchen Fall der Bauvertrag Anforderungen an die Eigenschaften an ein Gewerk, die vom Bieter – auch infolge der bekannten Marktverhältnisse – zugesichert, jedoch mit großer Wahrscheinlichkeit nicht erreicht werden können.

Die Mehrzahl der tiefen Baugruben in Berlin ist folglich als mangelbehaftet im Sinne der VOB anzusehen, woraus Haftungsrisiken für die ausführenden Firmen resultieren. Sie hat entweder die Möglichkeit, durch Nachbesserungen die Qualität des Gewerks zu verbessern, dieses ohne Vergütungsanspruch und mit den Risiko, wegen Stillständen und Verzögerungen in Regress genommen zu werden. Alternativ sind die Mehrkosten bei der Wasserhaltung (Entnahmgebühren, Betriebskosten, Einleitungsgebühren) von der ausführenden Firma zu tragen.

Häufig werden die Verbauwände und die Sohlabdichtung einer Baugrube von verschiedenen Firmen hergestellt. Eine quantitative Differenzierung der Restdurchlässigkeits für einzelne Bauteile (Wände, Sohle) kann mit den heute zur Verfügung stehenden Mitteln nicht vorgenommen werden. Im Fall einer zu hohen Restdurchlässigkeit ist damit der Streit über die Verantwortung für diesen Mangel vorprogrammiert.

3 Trogbaugruben mit hochliegenden HDI-Sohlen

3.1 SAT.1 Medienzentrum in Berlin-Mitte

Die SAT.1 SatelitenFernsehen GmbH errichtet in Berlin-Mitte ein aus mehreren Bauabschnitten bestehendes Medienzentrum. Zentrales Bauwerk ist ein ca. 2.000 m² großer Neubau mit dreifacher Unterkellerung. Zur Trockenhaltung der 13 m tiefen Baugrube war eine Grundwasserabsenkung in der Baugrube von ca. 9,5 m erforderlich. Die Baugrube wurde hydraulisch in den nördlichen, etwa

1.200 m² großen Trog Jägerstraße und den südlichen Trog Taubenstraße unterteilt, siehe Bild 4.

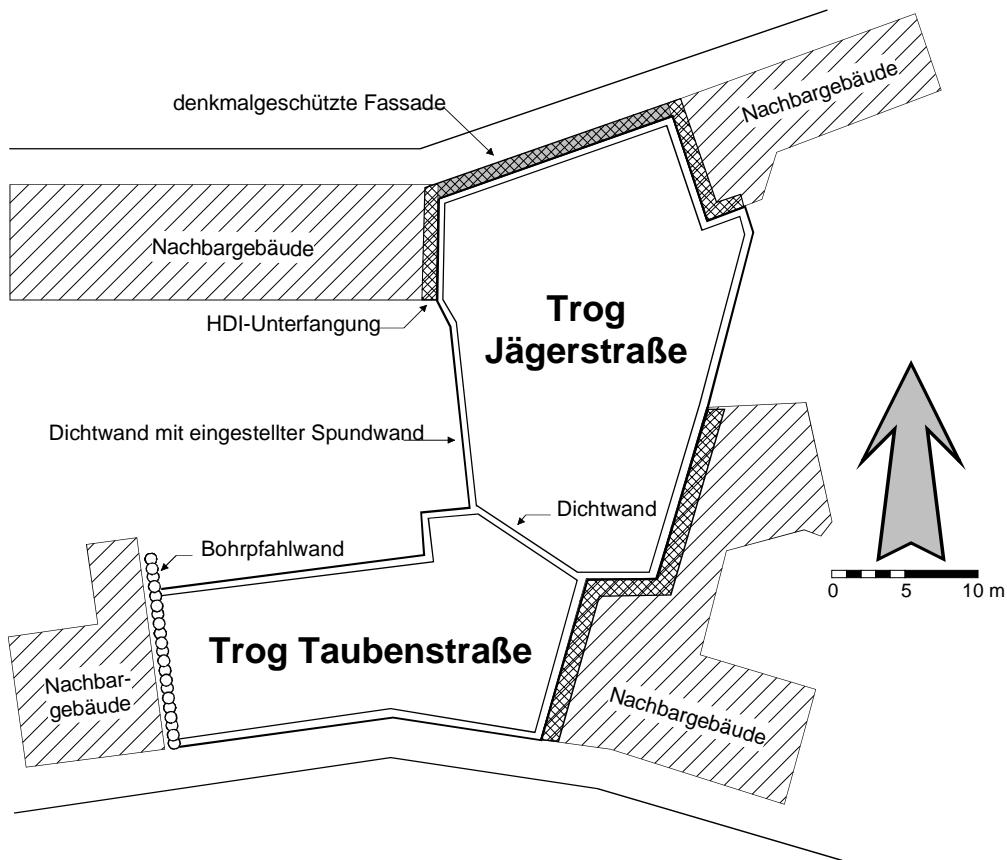


Bild 4 SAT.1 Medienzentrum – Übersichtsplan

Die ursprüngliche Ausführungsplanung sah eine Trogbaugrube mit tiefliegender HDI-Sohle sowie vertikalen Abdichtungen aus Schlitzwänden, überschnittenen Bohrpfahlwänden, Dichtwänden und HDI-Unterfangungen vor. Eine Prinzipdarstellung der geplanten Baugrubensicherung enthält Bild 5a, wobei auf die Darstellung von Details zugunsten einer besseren Übersichtlichkeit verzichtet wurde.

Nach Herstellung der Baugrube durchgeführte Untersuchungen ergaben, daß die HDI-Unterfangungen nicht die geplante Qualität aufwiesen. Um mögliche Wasser einbrüche durch die HDI-Unterfangungen auszuschließen, wurden vor den Unterfangungen Dichtwände mit eingestellten Spundbohlen durch Überfräsen der vorhandenen Dichtwände angeordnet, siehe Bild 5b. Weiter war vorgesehen, die Verbauwände durch eine hochliegende, aufgelöste HDI-Sohle auszusteifen. Bei einer

Mächtigkeit von 1,0 m bis 1,2 m liegt die Sohle ca. 0,5 m unterhalb der geplanten Baugrubensohle.

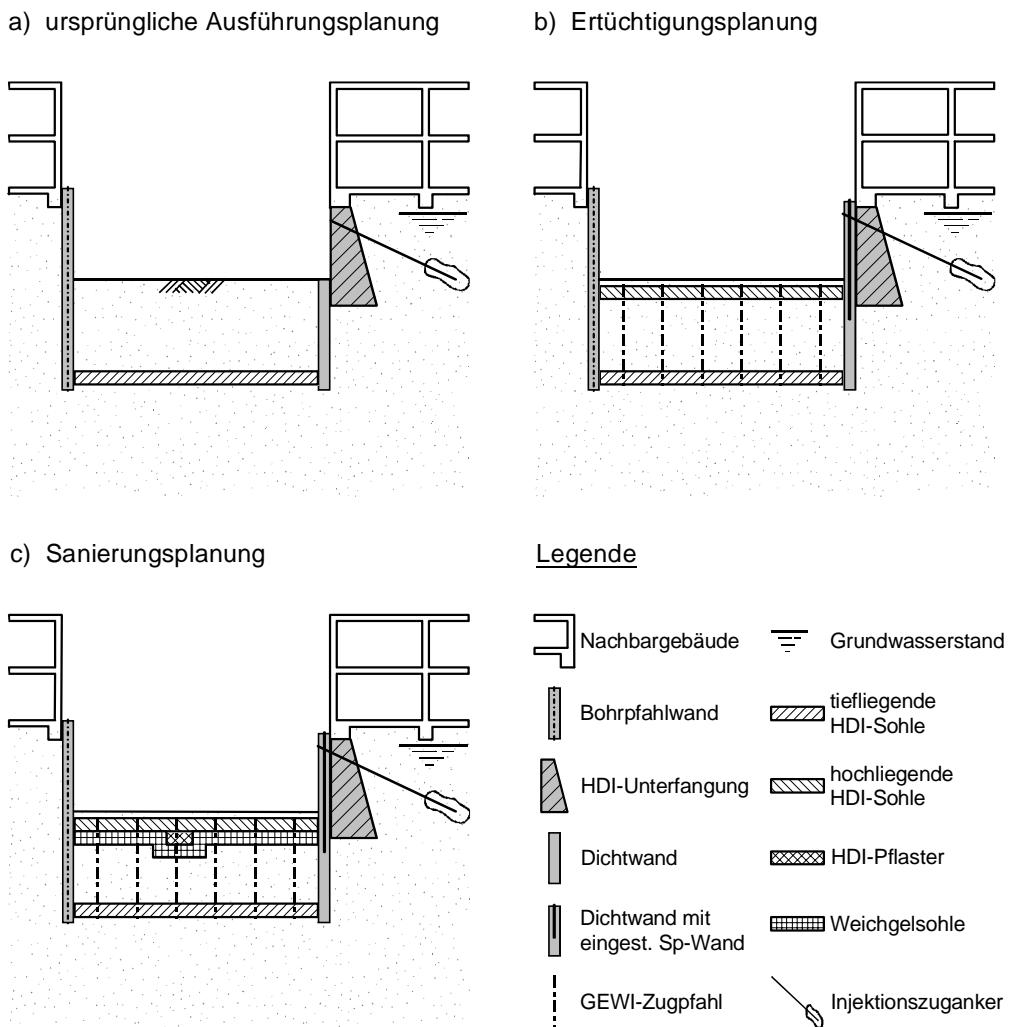


Bild 5 SAT.1 Medienzentrum – Phasen der Baugrubenherstellung

Nachdem Probeabsenkungen zeigten, daß auch nach Herstellung der Spundwände die Systemdurchlässigkeit der Baugrube mit etwa $33 \text{ l}/(\text{s} \cdot 1.000\text{m}^2)$ wesentlich zu groß war, wurde beschlossen, die noch nicht hergestellte hochliegende HDI-Sohle vollflächig und damit gegen das Grundwasserabdichtend auszuführen. Zur Auftriebssicherheit wurden Zugpfähle System GEWI eingebaut, siehe Bild 5b.

Eine besondere Randbedingung für die Herstellung der hochliegenden HDI-Sohle waren die Schleote der HDI-Bohrungen der tiefliegenden Sohle. Die ausgehärtete Suspension stellte potentielle Düshindernisse im Zielhorizont der hochliegenden Sohle dar. Die Schleote waren somit bestimmend für das Herstellraster der zweiten Sohle.

Nachdem in Probeabsenkungen Restdurchlässigkeiten von $1,3 \text{ l}/(\text{s} \cdot 1.000\text{m}^2)$ – Trog Jägerstraße – bzw. $1,1 \text{ l}/(\text{s} \cdot 1.000\text{m}^2)$ – Trog Taubenstraße – ermittelt wurden, begannen der Aushub und die Verankerung der Verbauwände.

Im Juli 1997 tritt kurz vor Erreichen des Aushubziels im Trog Jägerstraße während der laufenden Aushubarbeiten ein plötzlicher Wassereintritt auf. Eine ca. 0,6 m starke und etwa 0,7 m hohe Wasser-Sand-Fontäne schießt aus dem Boden. Als Sofortmaßnahme wird ein bereitstehendes Schwergewicht auf die Leckagestelle gestellt. Mit dem in der Baustelle verfügbaren Gerät wird Boden im Bereich der Leckage gestelle eingebaut. Der Versuch, Injektionslanzen für spätere Abdichtungszwecke einzubringen, schlägt fehl.

Als erkennbar wird, daß die Bodenmassen in der Baugrube zur Beherrschung der Havarie nicht ausreichen, wird ein Pendelverkehr mit 29 Lkw-Zügen eingerichtet. Über einen Zeitraum von 9 Stunden wird Boden herangefahren und im Trog Jägerstraße verfüllt. Nach insgesamt etwa 15 Stunden Einsatzdauer wird der Wasserzustrom zur Baugrube wieder beherrscht. Der Trog Jägerstraße ist bis zu diesem Zeitpunkt etwa 8 m hoch verfüllt. Die Arbeiten in der Baugrube gehen an die Grenze des Verantwortbaren, der Erfolg der Rettungsmaßnahme steht lange Zeit auf des Messers Schneide.

Zur Sanierung der Leckage wurde unterhalb der hochliegenden Sohle zunächst ein HDI-Pflaster von 1,5 m Dicke hergestellt. Nach einer Risikoabschätzung wurde zur Vermeidung weiterer möglicher Havarien vollflächig eine 2,0 m mächtige Weichgeldichtung unterhalb der HDI-Sohle eingebracht, siehe Bild 5c.

Durch die eingetretene Havarie wurde die Baugrube mit etwa $1\frac{1}{2}$ Monaten Verspätung an den Bauherrn übergeben. Der finanzielle Schaden beläuft sich auf einen siebenstelligen Betrag.

3.2 Spanische Botschaft in Berlin-Tiergarten

In den Jahren 1938 bis 1941 wurde im Diplomatenviertel in Berlin-Tiergarten die Spanische Botschaft errichtet. Nach Beschädigungen im 2. Weltkrieg wurde das Gebäude nur unvollständig wiederhergestellt und genutzt. Im Zuge der Wiedernutzungsbarmachung als Botschaft des Königreichs Spanien wurde der Altbau bis auf eine unter Denkmalsschutz stehende Fassade und das Hauptoyer abgerissen. Der Neubau sieht eine zweifache Unterkellerung des ca. 2.000 m^2 großen Grundstücks vor, siehe Bild 6.

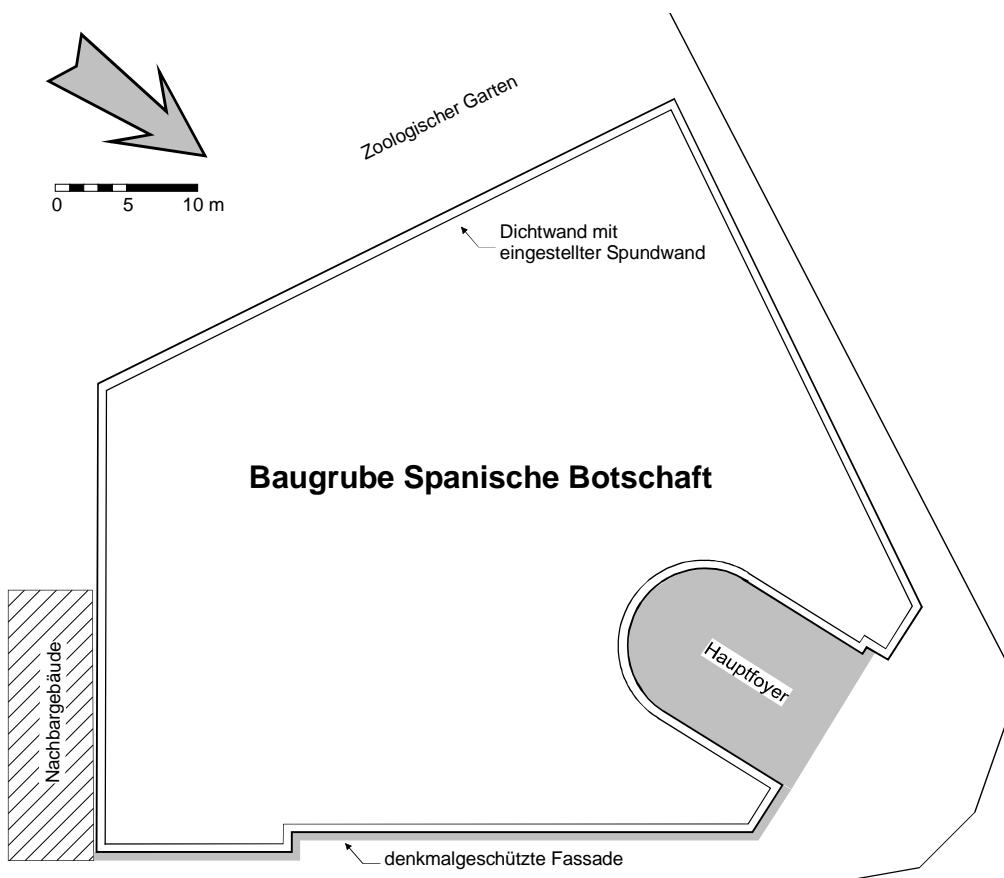


Bild 6 Spanische Botschaft – Übersichtsplan

Bei der Ausführungsplanung war zu berücksichtigen, daß auf dem Baufeld ein Geröllhorizont aus sandigen Kiesen und Steinen – ein Erosionsrelikt des Geschiebebergels im Übergangsbereich von Saale- zu Weichselkaltzeit – ansteht, der bei erkundeten Mächtigkeiten bis zu 1 m in den Zielhorizont der HDI-Arbeiten einfällt.

Zur Trockenhaltung der ca. 8,9 m tiefen Baugrube war eine Absenkung des Grundwassers um etwa 6,4 m erforderlich. Die vertikale Abdichtung der Trogbaugrube erfolgte mit Dichtwänden, in die Stahlspundbohlen eingestellt wurden. Zur horizontalen Abdichtung wurde eine hochliegende, mit Zugpfählen System GEWI rückverankerte HDI-Sohle eingebracht. Darüber hinaus wurde die HDI-Sohle rechnerisch zur horizontalen Abstützung der Verbauwände herangezogen. Ein Teil der Zugpfähle dient im Endzustand der Auftriebssicherung des Botschaftsgebäudes. In Bild 7 ist das gewählte Baugrubensystem dargestellt.

Die Sohle wurde mit einer Regelmächtigkeit von 2,0 m ausgeführt. Zwischen der Sohloberkante und der Aushubordinate verblieb eine 1,5 m dicke Bodenschicht. Die Sohlherstellung erfolgte "frisch in frisch" mit 2 Geräteeinheiten im 24 Stunden-

Betrieb. Wenn planmäßig (zum Beispiel zwischen Herstellabschnitten) oder unplanmäßig (zum Beispiel bei Geräteausfall) ein definierter zeitlicher Abstand zwischen der Herstellung zweier benachbarter Säulen überschritten wurde, wurde die jüngere Säule verlängert mit einer Über- und Unterdeckelung von jeweils 0,5 m ausgeführt, siehe Bild 8b.

Geplant und anfänglich ausgeführt wurde eine andere Herstellvariante. In einem ersten Herstellstreifen entlang der nordöstlichen Verbauwand wurde die Sohle in Primär- und Sekundärreihen hergestellt. Der Aufbau der HDI-Sohle für diese Variante ist in Bild 8a dargestellt. Beim Abteufen der HDI-Bohrungen für die Sekundärsäulen wurde häufig ein stark erhöhter Bohrwiderstand im Tiefenabschnitt der Primärsäulen festgestellt. Es mußte davon ausgegangen werden, daß infolge der Baugrundinhomogenitäten lokal deutlich größere Säulendurchmesser als geplant und als in Versuchen nachgewiesen erzielt wurden. Die Herstellung der HDI-Sohle in Primär- und Sekundärreihen beinhaltete demzufolge das Risiko selbsterzeugter Düshindernisse.

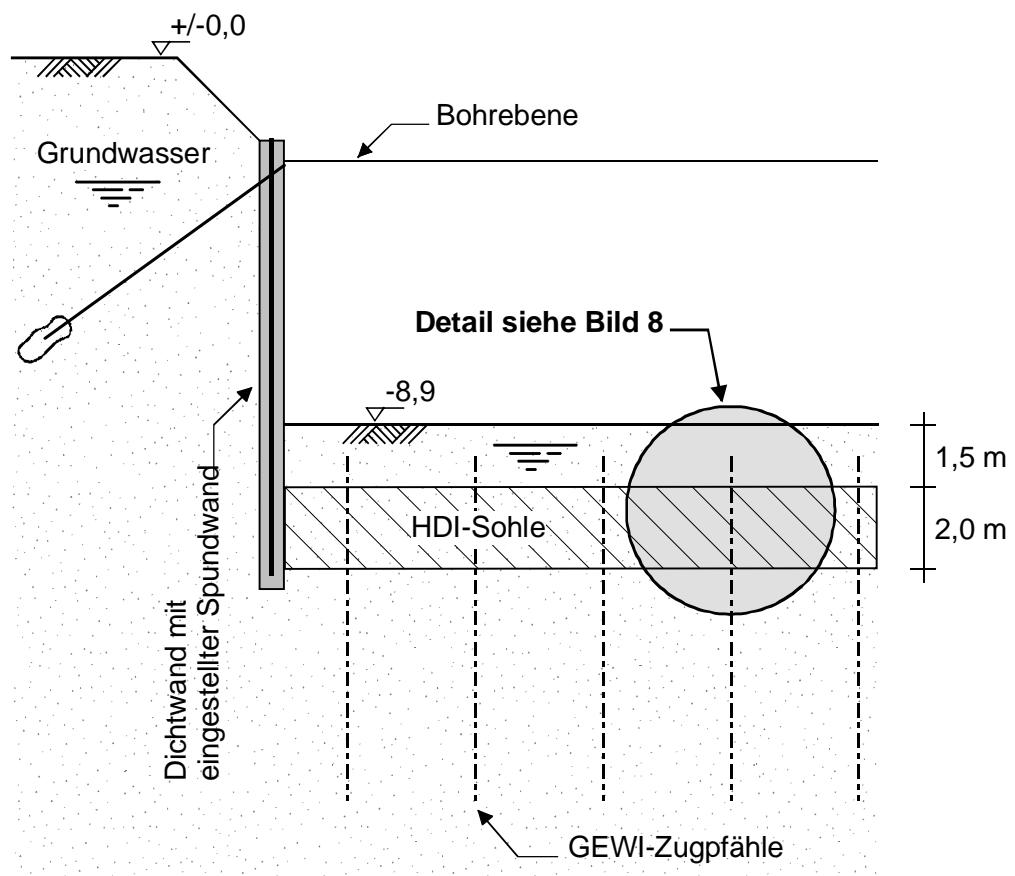
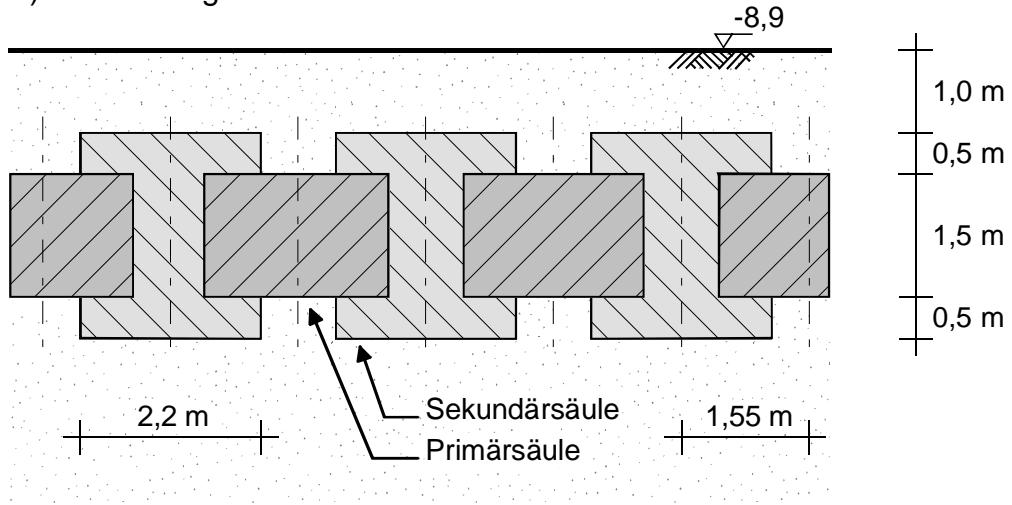


Bild 7 Spanische Botschaft – Baugrubenverbau und –abdichtung

a) Herstellung in Primär- und Sekundärreihen



a) Herstellung "frisch in frisch"

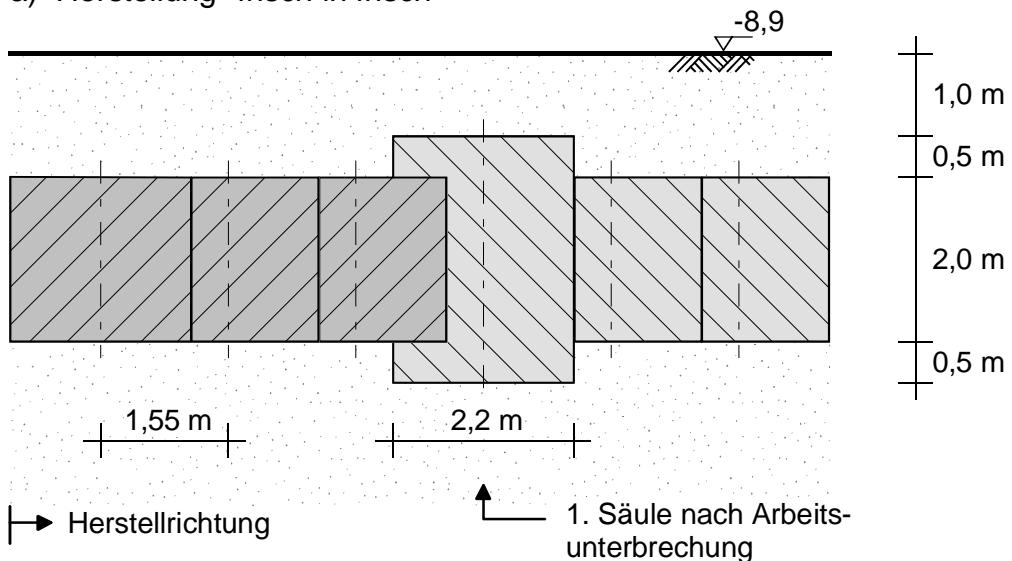


Bild 8 Spanische Botschaft – Aufbau der HDI-Sohle

In der Folge wurde die Herstellung auf die oben beschriebene "frisch in frisch"-Bauweise umgeplant.

Die Wirksamkeit der 1,5 m mächtigen Bodenauflast auf der HDI-Sohle wurde nach dem an der TU Karlsruhe entwickelten Ansatz (Bieberstein et al. 1999) abgeschätzt. Bei den gegebenen Verhältnissen konnte demnach durch die Bodenauflast eine Fehlstelle in der Sohle mit einem Radius von knapp 10 cm kompensiert werden, bevor es durch das eintretende Wasser zum Auftrieb des überlagernden Bodens und in der Folge zum Sohlaufbruch kommen würde.

Im nördlichen Baugrubenbereich insbesondere rund um das Hauptfoyer wurden mit der Rücklaufuspension zum Teil erhebliche Mengen an Holzstücken und Kohle zu Tage gefördert, was zu Bedenken hinsichtlich der Dichtigkeit und Festigkeit der HDI-Sohle im fraglichen Bereich führte. Anhand der nachfolgend mit aufgeführten Erkundungsmaßnahmen in der ausgehärteten Sohle ergaben sich jedoch trotz der bekannten negativen Einflüsse organischer Bestandteile im Boden auf das HDI-Verfahren (Gudehus, Schwarz 1998) keine Anhaltspunkte für eine nicht ausreichende Qualität der hergestellten Sohle.

Vor Beginn, während und nach Abschluß der Sohlherstellung wurden folgende Maßnahmen zur Sicherung und Überprüfung der Herstellqualität getroffen:

- Anlegen eines HDI-Probefelds mit GEWI-Zugpfählen
- Pfahlprobobelastungen zum Verbund HDI – Zugpfahl und Zugpfahl – Boden
- Bestimmung des Durchmessers der HDI-Säulen
- Vertikalitätstsmessungen im Bohrgestänge
- Abtastbohrungen²⁾ in dem Bereich mit Primär- und Sekundärreihen
- Abtastbohrungen in Bereichen, in denen Holz und Kohle in der Rücklaufuspension angetroffen wurde
- Kernbohrungen durch die fertiggestellte HDI-Sohle schwerpunktmäßig im Bereich mit Holz- und Kohlefunden
- einaxiale Druckversuche an Kernproben

Die gemessene Restdurchlässigkeit der Baugruben belief sich auf ca. $0,1 \text{ l}/(\text{s} \cdot 1.000\text{m}^2)$. Probleme wie Erosionen oder Aufbrüche der Baugrubensohle stellten sich nicht ein. Die Bauwerkssohle konnte Mitte Dezember 1999 in einem Abschnitt betoniert werden.

3.3 Folgerungen

Zunächst haben die Ausführungen zu den Risiken, die im Abschnitt 2.2 im Zusammenhang mit der Ausführung tiefliegender HDI-Sohlen gemacht wurden, auch bei hochliegenden Sohlen Gültigkeit.

Die Risiken sind bei hochliegenden Sohlen jedoch ungleich höher. Eine Havarie wie im obigen Beispiel führt in der Regel zu einer vollständigen Unbrauchbarkeit der Baugrube bzw. des betroffenen Baugrubenabschnitts. Die erforderlichen Maßnahmen zur Ertüchtigung der Sohle sowie gegebenenfalls des gestörten Untergrunds

²⁾ Bohrung mit dem HDI-Gerät in die ausgehärtete Sohle mit Kontrolle des Bohrfortschritts als Vergleichswert für die Festigkeit der Sohle

oder zur Sanierung beschädigter Nachbarbebauung ist praktisch immer mit erheblichen Verzögerungen und großen finanziellen Aufwendungen verbunden.

Gerade das Beispiel SAT.1 zeigt, daß die Einhaltung des anspruchsvollen Grenzwertes für die zulässige Restdurchlässigkeit kein hinreichendes Kriterium für die Sicherheit gegen das Versagen einer hochliegenden Sohle ist. In diesem Zusammenhang ist als besonders problematisch anzusehen, daß es bisher keine Möglichkeit gibt, die Gebrauchstauglichkeit einer hochliegenden Sohlkonstruktion vor ihrer Ingebrauchnahme wirksam zu überprüfen. Dieses leisten weder die auf dem Markt angebotenen geophysikalischen Meßverfahren, anhand derer qualitative Aussagen zum Durchströmungsverhalten einer Baugrubenumschließung gemacht werden können, noch Berechnungsverfahren wie das von Bieberstein et al. (1999).

Am Beispiel der Spanischen Botschaft wird deutlich, daß sich heute mit entsprechend großem Aufwand bei Planung, Ausführung und Überwachung sehr gering durchlässige und fehlstellenfreie HDI-Sohlen herstellen lassen.

Literatur

Bieberstein, A.; Herbst, J.; Brauns, J. (1999)

Hochliegende Dichtsohlen bei Baugrubenumschließungen – Bemessungsregel zur Vermeidung von Sohlaufbrüchen im Bereich von Fehlstellen.
in: Geotechnik, 2

Borchert, K.-M.; Schran, U.; Trunks, M. (1997)

Grundwasserbeeinflussung durch Trogbaugruben für die Tunnelbauwerke der Verkehrsanlagen im Zentralen Bereich Berlin.
in: STUVA-Tagung 1997, Forschung und Praxis, 37

Borchert, K.-M. (1999)

Dichtigkeit von Baugruben bei unterschiedlichen Sohlen-Konstruktionen – Lehren aus Schadensfällen.
in: VDI-Tagung Tiefe Baugruben, VDI Berichte, 1436

Gudehus, G.; Schwarz, W. (1998)

Düsenstrahlverfahren in holzhaltigem, nicht bindigem Baugrund.
in: Vorträge der Baugrundtagung in Stuttgart

Stocker, M. (1999)

Zum Stand der Technik in der Hochdruckinjektion unter besonderer Berücksichtigung der Berliner Erfahrungen.
in: VDI-Tagung Tiefe Baugruben, VDI Berichte, 1436