

# Stahlspundwände

Rüttelspülverfahren  
beim Einbringen von Spundbohlen

# EINLEITUNG

Obwohl Spülverfahren eine durchaus bekannte Technik zur Unterstützung beim Einbringen von Spundbohlen darstellen, werden die entsprechenden Ergebnisse allzu häufig vertraulich zurückgehalten oder gehen in den Bergen abgeschlossener und archivierter Projektakten unter. Mangels ausreichender Verbreitung von Informationen stößt diese Technik nicht auf das verdiente Interesse. Wenn sie eingesetzt wird, kommen häufig nur „hausgemachte“ Vorgehensweisen der Unternehmen zum Tragen, ohne dass die Ergebnisse fremder Forschungsarbeiten und Projektausführungen genutzt werden.

Mit vorliegender Broschüre stellen wir die Ergebnisse der in Frankreich durchgeführten Rüttelspülversuche vor, die sich in ihrer Aussage mit vorliegenden Resultaten gleicher Einbringverfahren in der BRD decken.

Ziel dieser Broschüre ist es, das auf Bauherren- und Planerseite bestehende Informationsdefizit über die Vorteile dieser Einbringungsmethode auszuräumen sowie den bauausführenden Unternehmen einige grundlegende Verfahrensrichtlinien an die Hand zu geben.

Folgende stets wiederkehrende Fragen sollen hierbei beantwortet werden:

- Welche Vorteile bringen Spülverfahren?
- Sind alle Bodenarten für diese Technik geeignet?
- Ist es möglich, je nach anstehendem Boden, gewisse Grundsätze zur optimierten Auswahl der Spülparameter zu identifizieren?
- Wie reagiert der anstehende Boden?

Die folgende Publikation „Spülverfahren – eine Einbringhilfe“ wurde anlässlich der neunten internationalen DFI Konferenz über Pfahl- und Tiefgründungen im Juni 2002 in Nizza präsentiert.

Sie stellt die Ergebnisse diverser Versuchsreihen vor, die im Zeitraum 1998 bis 2001 an vier Standorten mit unterschiedlichen geologischen Verhältnissen durchgeführt wurden:

- Ein toniger Standort in Mittersheim im Departement Moselle,
- Ein kiesiger Standort in Straßburg in Rheinnähe,
- Ein kiesig-sandiger Standort in Lyon,
- Ein Standort mit Molasseboden in Toulouse.

# RÜTTELSPÜLVERFAHREN BEIM EINBRINGEN VON SPUNDBOHLLEN

**Marie-Pierre Bourdouxhe-Barnich,**

ProfilARBED Research and Development/ProfilARBED

Forschung und Entwicklung,

Sheet piles Department,

Esch/Alzette, Großherzogtum Luxemburg

**Dominique Piault,**

Arcelor RPS France,

Esch/Alzette, Großherzogtum Luxemburg

**Paul Ursat,**

Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées

de Strasbourg, Straßburg, Frankreich

**Sebastien Hervé,**

Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées

de Strasbourg, Straßburg, Frankreich

Seit 1997 betreibt ProfilARBED in Kooperation mit dem Laboratoire Central des Ponts et Chaussées ein breitangelegtes Forschungsvorhaben zur Qualifizierung der durch Spülhilfen erreichten Verbesserungen beim Einrütteln von Spundbohlen. Darüber hinaus werden die Einflüsse dieser Technik auf den umgebenden Boden und die Spundwandprofile selbst untersucht.

Das Spülverfahren beruht im Wesentlichen darin, ein Fluid (meistens Wasser, seltener ein Wasser-Luft-Gemisch) bei geregelter Druck und/oder konstanter Leistung in den Fußbereich der einzubringenden Spundbohle zu leiten. Die Spülrohre aus Stahl werden an der Spundbohle befestigt und über Schläuche mit der Spülpumpe verbunden. Der Wasserstrahl lockert den Boden und verringert den Spitzenwiderstand während des Einbringens und trägt je nach Bodenart zu einer weiteren Verringerung der Mantel- und Schlossreibung durch die entlang der Spundbohle aufsteigende Wassersäule bei.

SPÜLVERFAHREN ALS EINBRINGHILFE

## EINLEITUNG

Bei den üblichen Einbringverfahren für Spundbohlen wie Einrütteln, Rammen und Pressen stellt das Spülen mit Wasser eine Einbringhilfe dar, die selbst das Eindringen der Spundbohlen in dichtgelagerte bzw. feste Böden ermöglicht.

Durch Spülhilfen wird das Einbringen in der Regel beschleunigt, die Erschütterungen verringert und die Gefahr einer Beschädigung der Bohlen vermieden.

Foto 1 zeigt die aus den Spülrohren am Bohlenfuß austretenden Wasserstrahlen, während der Funktionsprüfung der Spüllanlagen vor dem Einbringen.



Foto 1: Fuß einer U-Spundbohle mit zwei in Betrieb befindlichen Spülrohren.

Die in der folgenden Kurzfassung erwähnten Ergebnisse und Auswertungen der durchgeführten Versuche lassen zum derzeitigen Stand des Forschungsvorhabens eine Übertragbarkeit der Erkenntnisse und Schlussfolgerungen nur bei Bodenverhältnissen zu, die mit den jeweils angetroffenen an den 4 Versuchsstandorten vergleichbar sind. Allerdings lässt der länderübergreifende, zunehmende Einsatz dieses Verfahrens, insbesondere bei den großen Bauvorhaben des Verkehrswegebbaus, das Zusammentragen weiterer umfangreicher Daten zu und erweitert den Erfahrungsaustausch über diese Einbringhilfe.

Zu den einzelnen Standorten

## MITTERSHEIM

### Standortmerkmale

Der Standort Mittersheim wies einen tonigen Untergrund auf, der unterhalb 5 m Tiefe leicht überkonsolidiert war und zum Erreichen von Einbindetiefen über 6 m den Einsatz eines schweren Dieselhammers erforderte.

Eine steife bis halbfeste Konsistenz des anstehenden Bodens konnte gemäß Pressuremeter Ergebnisse vorausgesetzt werden.

- $p_1^* = 0,6$  bis  $2,5$  MPa ( $\equiv$   $[\text{MN}/\text{m}^2]$ )
- $w_1 = 50\%$  bis  $60\%$ , und  $I_p = 20$  bis  $35$
- $\varphi' = 25^\circ$  bis  $30^\circ$  bei  $c' = 0$  bis  $20$  kPa. ( $\equiv$   $[\text{kN}/\text{m}^2]$ )

### Versuchskonfigurationen

Es wurden folgende Varianten untersucht:

- 9m lange ProfilARBED AZ18 und L3S Profile, die als Doppelbohlen eingebracht wurden;
- 2, 4 oder 5 Spülrohre pro Doppelbohle;
- Spülrohraustritt: offenes Rohrende oder gerichteter Strahl.

### Geräteausstattung

Als Einbringgerät kamen ein hydraulischer Vibrator ICE 416-L und ein Delmag D22 Dieselhammer zum Einsatz.

Das Spülen erfolgte über zwei einstufige KSB Kreiselpumpen mit doppeltem Ausgang (für 2 und 4 Spülrohre). Das fünfte Spülrohr wurde durch eine zusätzliche Pumpe (Kolbenpumpe) versorgt.

### Hauptergebnisse

Aufgrund des Druckabfalls lagen die Druckverhältnisse am Spülrohrende bei 0,5 bis 1,0 MPa bei einem Wasserdurchfluss von 250 l/min/Spülrohr.

Spätere Versuche belegten allerdings, dass auch ein weit aus geringerer Druck ausreichend gewesen wäre (siehe u.a. „Toulouse“).

Die gemessenen Pressiometergrenzdrücke ( $p_1 = 0,6$  bis  $0,8$  MPa auf den ersten 6 Metern;  $1,2$  bis  $2,5$  MPa darunter), denen diese effektiven Spüldrücke gegenüberstehen, erklären die effizientere „mechanische“ Wirkung des Wasserstrahls über die ersten Meter.

Die Anzahl der Spülrohre und die Form des Rohraustritts haben sich nicht als relevante Parameter erwiesen. Der Einsatz von 5 anstatt 2 Spülrohren sowie eine Verengung der Lanzenspitzen bewirkten einen nur relativ bescheidenen Zeitgewinn verglichen mit dem zusätzlichen technischen Aufwand (Vervielfachung der Spülvorrichtungen, Formgebung der Austrittsdüsen...).

*Hinweis: Es sei von einer ungeraden Spülrohrzahl abgeraten: Die Asymmetrie beim Spülvorgang führte zu einer Schiefstellung der Spundbohle beim Einbringen.*

Durch das Spülen konnte die Solltiefe von 8 m erreicht werden, während das Einbringen ohne Spülhilfe bereits bei 3,5 bis 4 m zu stehen kam und den Einsatz des Dieselhammers zum Erreichen der Endtiefe erforderlich machte.

Der Vergleich der Einbringzeiten des Einrüttelns mit und ohne Spülhilfe ergab, dass sich die Eindringgeschwindigkeit auf das 8- bis 10fache durch die Spülung erhöhte und dies sowohl bei der breiten AZ 18 als auch bei der schmaleren L 3S Doppelbohle.

Abb. 1 stellt die unterschiedlichen Eindringzeiten für eine L 3S Doppelbohle, die zum einen ohne Spülhilfe und notwendigem Nachschlagen und zum anderen mit Spülhilfe unter Verwendung von 4 Spülanzlen eingebracht wurde, dar.

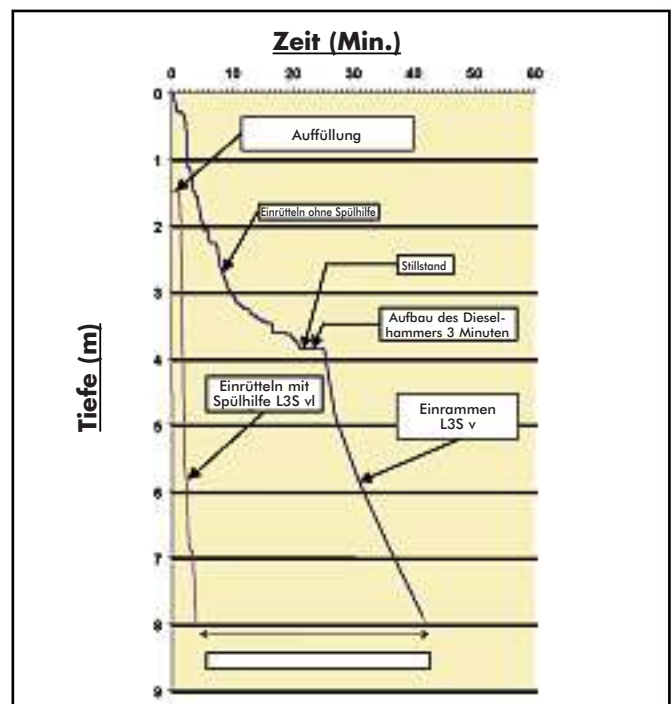


Abb. 1: Vergleich der Einbringzeiten

Die Porenwasserdrücke wurden in 2 bis 10 Minuten abgebaut.

Nachträgliche Untersuchungen der Bodeneigenschaften im unmittelbaren Umfeld der durch Rüttelspülen eingebrachten Bohle ergaben, dass sich diese lediglich in einem Bereich von 1-2 cm merklich verändern, während im weiteren Umfeld von 10-20 cm diese Veränderungen kaum noch feststellbar waren.

Weiter belegten Ziehversuche (in 20 cm Schritten) eine Herabsetzung der Mantelreibung von 10 % bis 40 %.

Außerdem konnte durch ein erneutes Einrammen der gezogenen Bohle am selben Einbauort und bis auf 50 cm unterhalb der ursprünglichen Solltiefe nachgewiesen werden, dass infolge Spülens eine Reduzierung des Spitzenwiderstandes und der Mantelreibung in der zuvor genannten Größe verbleibt. (s. Abb. 2)

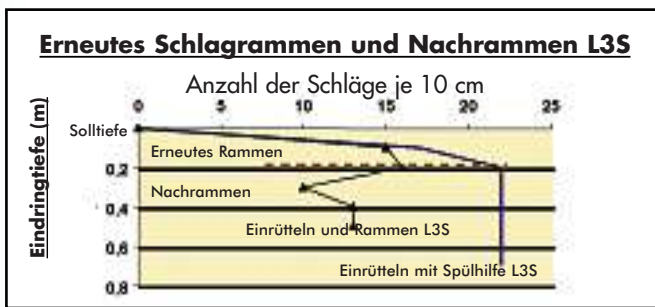


Abb. 2: Vergleich des erneuten Rammens und des Nachrammens von L3S (ES 12 L3S) Profilen, die ohne Spülhilfe eingerüttelt und anschließend gerammt wurden sowie von L3S (ES 5 L4) Profilen, die mit Spülhilfe eingebracht wurden.

### Schlussfolgerungen

Bei diesem bindigen Boden erwies sich das Spülverfahren als eine sehr wirkungsvolle Einbringhilfe. Neben einem erheblichen Zeitgewinn und einer verringerten Gefahr des Stehenbleibens der Bohlen beim Einrütteln wurde jedoch eine erhebliche Störung des Bodens im unmittelbaren Bohlenbereich festgestellt, die zu einem bleibenden Verlust von Mantel-, bzw. Wandreibungs- und Spitzenwiderstand von 10 bis 40 % führte.

## STRASSBURG

### Standortmerkmale

Der zweite Versuch betraf einen Boden des Rheintals (Kies  $\varnothing < 60$  mm mit vereinzelt Geröll  $> 100$  mm, eng gestuft, keine Feinsande mit örtlicher Schluffüberdeckung, die am Versuchsstandort abgetragen wurde), der stark durchlässig war.

Seine Festigkeiten waren gering:  
 $(2,0 \text{ MPa} < p_1^* < 4,7 \text{ MPa})$ .

Das Grundwasser stand 1,30 m unter GOK.

In diesem Versuch wurden die Einflüsse des Spülens auf die Eindringgeschwindigkeiten und Erschütterungen festgehalten. Voruntersuchungen ergaben, dass die trockene Vibration in diesem Boden als geeignetes Einbringverfahren anzusehen sei.

### Versuchskonfigurationen

Folgende Varianten wurden untersucht:

- 14 m lange ProfilARBED L4S und AZ26 Profile, die als Doppelbohlen eingebracht wurden;
- 2 oder 4 Spülrohre pro Doppelbohle;
- Spülrohraustritt: offenes Rohrende oder horizontal gerichteter Strahl.

### Geräteausstattung

Zum Einbringen der Spundbohlen kam ein ICE 416-L Vibrator zum Einsatz. Die Spülrohre wurden durch eine KSB Multitec Pumpe versorgt.

Da sich Spülhilfen mit verengten Lanzenspitzen in den Vorversuchen als nur beschränkt vorteilhaft erwiesen, beließ man es bei den folgenden Versuchsschritten lediglich bei einem einfachen Spülrohraustritt.

### Hauptergebnisse

Im Laufe der Versuche blieben die Spülparameter konstant mit:

- Wasserdurchfluss: 130 l/Min.
- effektiver Spüldruck am Spülrohraustritt: 0,8 MPa (= 8 bar).

Die hohe Durchlässigkeit des Bodens hatte einen raschen Abbau des Spüldruckes unterhalb der Lanzenspitzen zur Folge. Folgende Werte wurden gemessen:

- 0,1 MPa unterhalb der Lanzenspitze (10 cm)
- bei 50 cm nicht mehr messbar.

Dies führt zu dem Resultat, dass die Erhöhung der Eindringgeschwindigkeit infolge Spülhilfe bei kiesigen, nicht bindigen Böden mit ca. 10-30 % etwas geringer ausfällt als bei bindigen Böden.

Das Spülen mit 2 Spülrohren ist weniger effizient als mit 4 Spülrohren, was sich durch:

- eine insgesamt schwächere Durchflussleistung
- eine schlechtere Verteilung des Wasserstrahls über den Bohlenquerschnitt erklären lässt.

Die Einbringgeschwindigkeit kann auch nicht durch Erhöhung des Spüldruckes mittels eines verringerten Düsenquerschnittes gesteigert werden.

In sehr durchlässigen Kiesen hängt eine Verbesserung der Einbringung durch Spültechnik nicht direkt vom Wasserdruck ab, sondern eher von der Durchflussleistung.

### Erschütterungen

Das Spülverfahren verringerte in erheblichem Maße die Erschütterungen, die zwischen 3 m und 20 m Entfernung vom Vibrator gemessen wurden. Diese Verringerung liegt in einer Größenordnung von 20 % bis 30 %.

Abb. 3 stellt die in 11 m Entfernung gemessenen Erschütterungen während des Einbringens einer AZ 26 Doppelbohle, die zum einen ohne Spülhilfe (blau) und zum anderen mit Spülhilfe (rot) abgeteufelt wurde, dar.

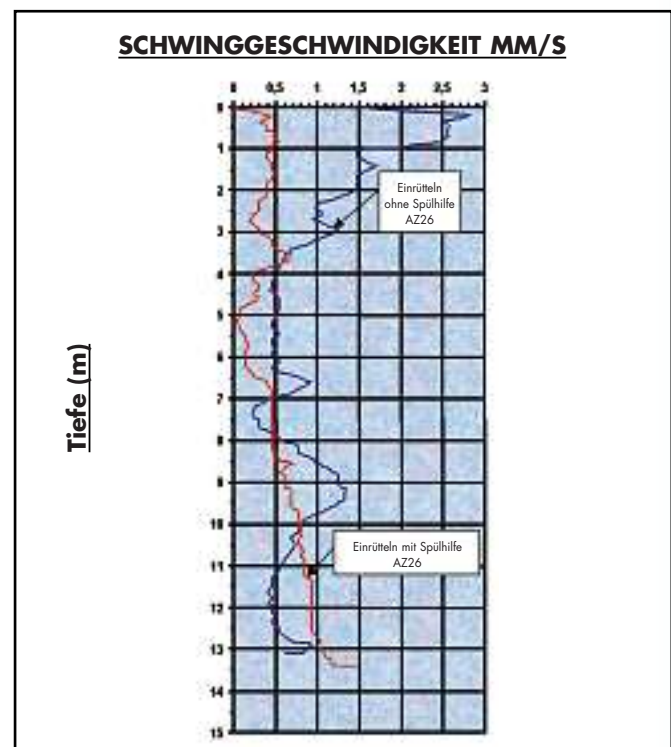


Abb. 3: Aufzeichnung der beim Einrütteln ohne Spülhilfe (in blau) und mit Spülhilfe (in rot) erzeugten Erschütterungen.

In beiden Fällen unterschritten die gemessenen Erschütterungen die vorgegebenen „kritischen“ Grenzwerte (z. B. = 15 mm/s bei 10 m Entfernung bei Deichbauten).

### Einfluss auf den anstehenden Boden

Eine leichte Verdichtung der Böden wurde zumindest an der Oberfläche (in der überlagernden Deckschicht aus mittelmäßig verdichteter Auffüllung) festgestellt. Die darunter liegenden Kiese wurden offenbar weder durch das Einrütteln noch durch das Spülen beeinträchtigt und haben ihre ursprünglichen mechanischen Eigenschaften bewahrt.

Beide Verfahren änderten die Werte der Mantelreibung zwischen Boden und Spundbohle nicht, so dass die ursprünglichen Bodeneigenschaften erhalten blieben.

Nicht zuletzt lieferte auch das erneute Rammen der gezogenen Doppelbohlen mit dem Dieselhammer keine Hinweise auf Veränderungen der Spitzenwiderstände nach dem Spülen.

### Schlussfolgerungen

Das Spülverfahren im kiesigen Boden brachte eine leichte Verbesserung der Einbringungsgeschwindigkeit (10 bis 30 %), sowie eine Verringerung der erzeugten Erschütterungen (20 bis 30 %) ohne die vorhandenen Bodeneigenschaften hinsichtlich Mantel-, bzw. Wandreibung und Spitzenwiderstand merklich zu verändern.

## **LYON**

Dieser Versuch konnte bei einer laufenden, unter erheblichen Schwierigkeiten ausgeführten Baumaßnahme durchgeführt werden. Versuchsparameter und die Instrumentierung fielen hier weniger aufwendig aus als an den beiden vorhergehenden Versuchsstandorten. Das Ziel bestand darin, die Vorzüge und die Grenzen des Spülverfahrens in sehr dichtgelagerten sandig-kiesigen Alluvionsschichten mittlerer Durchlässigkeit zu ermitteln.

### Geräteausstattung

13 m lange PU 20 Einzelbohlen wurden mit einem PTC 30 Vibrator eingebracht.

Das herkömmliche Einrütteln der Bohlen ohne Spülhilfe führte bereits in Tiefen von 3,0 bis 5,0 m zum Stillstand der Eindringung.

### Hauptergebnisse

Das Spülen ermöglichte ein Einbringen der Bohlen auf 8,00 bis 12,00 m je nach Bereich. Trotz dieser spürbaren Verbesserung konnte die Solltiefe von 13 m nicht erreicht werden. In den Molasseformationen konnten die Spundbohlen nicht mehr als 1,00 bis 1,50 m in die stark verfestigte Schicht eindringen.

Die effektiven Spüldrücke waren schwach (0,3 MPa) und lagen weit unter den Grenzdrücken des anstehenden Bodens ( $p_i > 5$  MPa) (die durchschnittlichen Durchflussleis-

tungen lagen bei 300 l/min). Es sei darauf hingewiesen, dass das Spülverfahren bei dieser Baumaßnahme unter relativ ungünstigen Bedingungen eingesetzt wurde. Die übermäßige Länge der Versorgungsschläuche (110 m), die einen erheblichen Druckabfall zur Folge hatte, und der große Querschnitt des einzigen Spülrohres pro Spundbohle (Durchmesser 46/35 mm) erwiesen sich als sehr nachteilig.

Man kann davon ausgehen, dass angemessenere Spülparameter zu höheren Einbindetiefen geführt hätten.

## **TOULOUSE**

### Standortmerkmale

Anhand dieser Testbaustelle konnte die Wirkungsweise einer Spülhilfe mit erhöhtem Wasserdruck im Molasseboden des Raums Toulouse beurteilt werden, der für seine sehr schlechte Rammpbarkeit bekannt ist.

Die Rahmenbedingungen dieses Spülversuches wurden auf Grundlage der Erkenntnisse der Standorte Mittersheim und Lyon festgelegt, wobei der Spüldruck zur Erzielung eines besseren Wirkungsgrades erhöht wurde.

### Geräteausstattung

Kenndaten der Einbringung:

- 10 m lange ProfilARBED L3S Profile;
- PTC 60HD Vibrator;
- GBE Spülpumpe (Leistung 20 l/Min., max. Druck 16 MPa);
- Rohraustritt mit zwei Arten Ausrichtung des Strahls: konische Düse.

### Hauptergebnisse

Pressiometermodule von 35 bis 82 MPa kennzeichnen die stark verdichteten anstehenden Molasseformationen.

Das Einrütteln der Bohlen ohne Spülhilfe erwies sich als äußerst schwierig. Nur die erste der beiden Spundbohlen erreichte die gewünschte Endtiefe. Das Einrütteln der zweiten Bohle musste (aufgrund eines Bruches im Kopfteil) nach 7,10 m eingestellt werden, wobei ab der Tiefe von 4,85 m bereits kritische Eindringgeschwindigkeiten zu verzeichnen waren. Erst durch den Einsatz der Spülhilfe konnte die gewünschte Endtiefe von 10 Metern, davon 6,5 Meter im Molasseboden, ohne nennenswerte Schwierigkeiten erreicht werden.

Durch den Einsatz des Rüttelspülverfahrens konnte bei dieser Maßnahme das Einbringen 1,3 bis 2 mal schneller erfolgen.

Kenngößen des Spülvorgangs:

- mäßiger Durchfluss von 10 l/Min. pro Spülrohr, bei 2 Spülrohren pro Spundbohle,
- ein Wasserdruck über 40 bar in den Molasseformationen,
- Düsen mit verengten Lanzenspitzen.

Diese Spüleinrichtung in Kombination mit einem Vibrator (PTC 60 HD) erwies sich als geeignet für die gegebenen Standortbedingungen. Sie führte zu einer spürbaren Herabsetzung der Mantelreibung und hatte zudem eine gleitfördernde Wirkung im Schlossbereich.

Wie das beim Ziehen aufgenommene Foto 2 zeigt, konnten die im Rüttelspülverfahren eingebrachten Spundbohlen unversehrt aus dem Boden gezogen werden.



Foto 2: Ziehen einer U-Spundbohle nach dem Rüttelspülverfahren.

Die Schwinggeschwindigkeiten wiesen bei beiden Einbringverfahren keine großen Unterschiede auf. Sie lagen bei 10 m Abstand unter 4 mm/s.

Diese Erschütterungen können angesichts der normalen Grenzwerte (von 5 bis 6 mm/s bei als sensibel eingestuftem Bauten) für die gewählten Arbeitsfrequenzen des eingesetzten Vibrators als gering bezeichnet werden.

Es sei darauf hingewiesen, dass die untersuchten Molasseböden nicht die maximale Konsistenz des Standortes aufwiesen. Vorliegende, übrigens sehr positive Ergebnisse dürfen daher ohne entsprechende Vorkehrungen nicht extrapoliert werden.

### Schlussfolgerungen

Das Spülen mit geeigneten Parametern wie einem relativ hohen Spüldruck (um 40 bar) und einer begrenzten Pumpleistung (10 l/Min./Spülrohr) hat in Verbindung mit einem leistungsstarken Vibrator das Einbringen der Spundbohlen in diesen stark verfestigten Boden ermöglicht.

### SCHLUSSFOLGERUNGEN

Diese Versuchsreihen haben den Nachweis erbracht, dass Spülhilfen besonders vorteilhaft bei Bodenverhältnissen sind, bei denen herkömmliche Rüttelverfahren an ihre Grenzen stoßen, wie mäßig verfestigte Tonböden und Molasseformationen.

Eine falsche instrumentierte Spüleinrichtung wie in den kiesig-sandigen Alluvionsschichten und im Molasseboden von Lyon hat gezeigt, wie wichtig die Auswahl angemessener Spülparameter ist.

In allen Fällen hatte das Rüttelspülverfahren als positive Nebenwirkung eine Verringerung der Erschütterungen zur Folge.

Die Bodeneigenschaften im unmittelbaren Bohlenbereich können in bindigen Böden durch das Spülen verändert werden. Während es die Mantelreibung in Tonböden um 10 bis 40 % herabsetzte, hatte es in reinen Kiesböden keine nennenswerte Wirkung auf den Boden.

Das Spülen erweist sich als erfolgreiche Einbringhilfe beim Vibrationsrammen von Spundbohlen in Böden mittlerer bis großer Festigkeit bzw. steifer und halbfester Konsistenz.

Außerdem ist es über die vorhandenen Spülrohre möglich, eine Zementsuspension zur Abdichtung und Vermeidung von Umläufigkeiten des Spundwandfußes nach Einbringung der Bohlen zu injizieren.

So könnte nicht nur die Gefahr einer Störung des Bodens im Rammbereich aufgehoben, sondern auch die Effizienz der Spundwand erheblich verbessert werden.

### REFERENZEN

DELTA PALPLANCHES INFO, 1. Semester 2001. Le lançage: une technique d'aide à la mise en œuvre. Europrofil France – ISPC, heute Arcelor RPS.

HERVE, S., 05/2001. Expérimentation de lançage de palplanche.

Site de Borderouge à Toulouse. Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées de Strasbourg, 00-72-068/B.

URSAT, P., HERVE, S., 10/2000. Fonçage des palplanches par lançage:

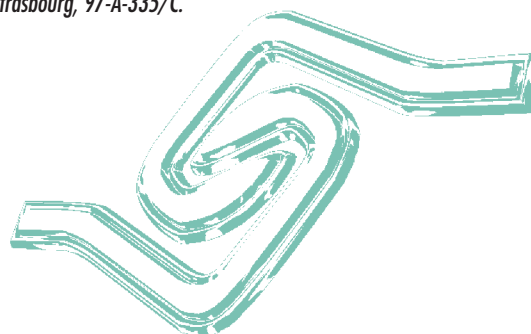
I. Expérimentation en site argileux à Mittersheim. Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées de Strasbourg, 97-A-335.

URSAT, P., HERVE, S., 10/2000. Fonçage des palplanches par lançage:

II. Expérimentation en site graveleux à Strasbourg. Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées de Strasbourg, 97-A-335/B.

URSAT, P., HERVE, S., 10/2000. Fonçage des palplanches par lançage:

III. Chantier EPSE – Lyon La Rivoire. Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées de Strasbourg, 97-A-335/C.



## PRAKTISCHER LEITFADEN ZU SPÜLVERFAHREN

Das Grundprinzip der Spültechnik kommt in Form zahlreicher, im Wesentlichen von den jeweiligen geotechnischen Verhältnissen abhängigen Varianten zum Einsatz.

Sollte die bauausführende Firma nicht auf örtlich vorhandene Erfahrungswerte zur Bodenbeschaffenheit zurückgreifen können, so empfiehlt es sich, die Spülparameter bei einem vorangehenden Einbringversuch möglichst genau zu bestimmen und zu optimieren.

Auch ist es zu empfehlen, die immer häufiger geforderte, maschinelle Aufzeichnung der Rammdaten (Leistung/Druck des Pumpaggregats, eingesetzte Energie, Wasserdurchfluss und Spüldruck, Einbringdauer, ...) während der Einbringarbeiten zu gewährleisten, zumal hierzu keine zusätzlichen Arbeitskräfte erforderlich sind. Das so erstellte Rüttelprotokoll ermöglicht es, die Spülparameter im Laufe der Einbringarbeiten zu optimieren, Erfahrungen mit dieser Technik zu sammeln und diese in einer Datenbank abzulegen, die bei anderen Standorten gewinnbringend ausgewertet werden kann.

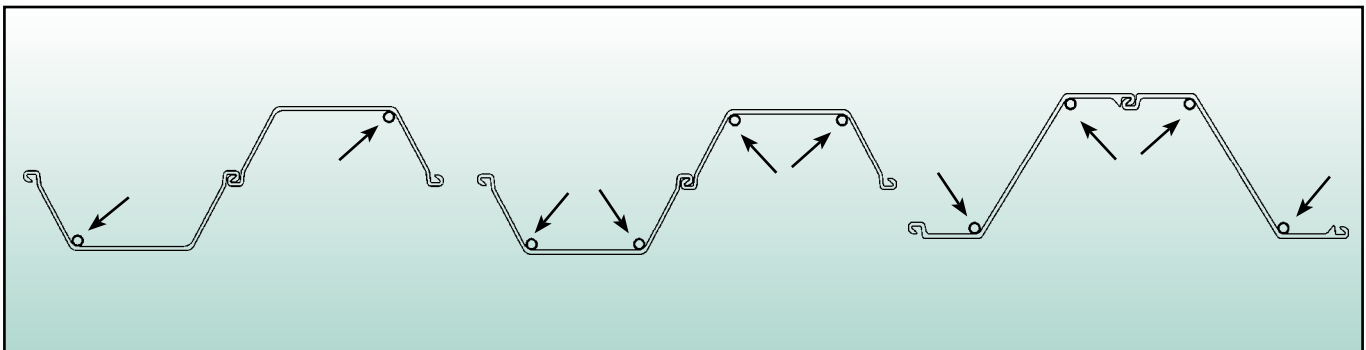
### **Niederdruck- und Mitteldruckspülen (1,5 bis 4 MPa)**

Dieses wahrscheinlich bekannteste Verfahren erlaubt es, Spundbohlen in sehr kompakte Böden einzubringen.

#### Spüllanzen

Die aus Stahlrohren mit einem Durchmesser von  $\frac{1}{2}$ " bis 1" bestehenden Spüllanzen werden mittels einiger Schweißpunkte in den Profilrundungen befestigt.

Pro Bohlenpaar werden im Allgemeinen 2 bzw. 4 Spülrohre eingesetzt. Es hat sich in der Praxis erwiesen, dass eine ungerade Anzahl oder eine unsymmetrische Anordnung zu einer Schiefstellung der Spundbohle beim Einbringen führt.



Die Lanzenenden plangleich mit dem Bohlenfuß

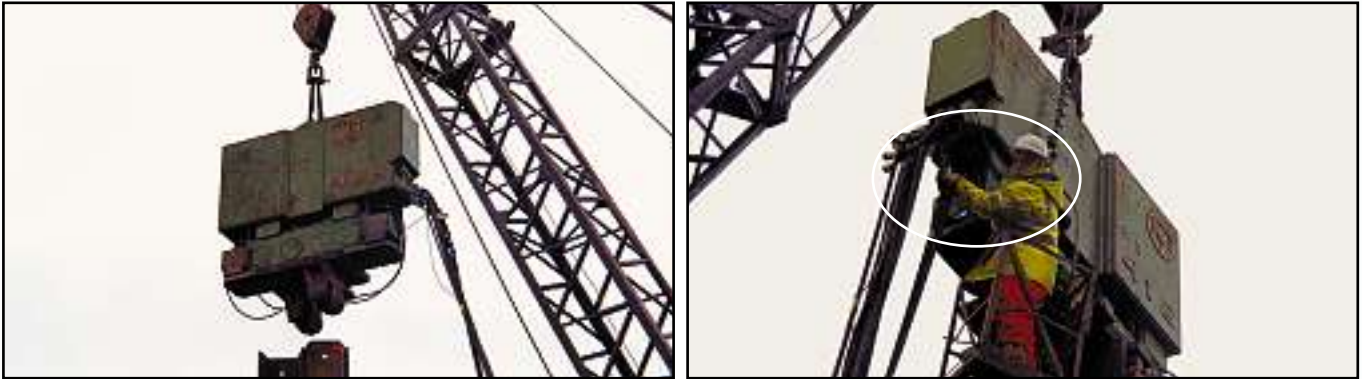


Das Kopfstück des Spülrohrs kann gebogen werden, um den Anschluss an den Versorgungsschlauch zu erleichtern.



## Versorgungsschläuche

Die an der Spundbohle befestigten steifen Spülrohre werden über Schläuche versorgt, die an Spülpumpen angeschlossen sind.



Anschließen der Versorgungsschläuche an die Spülrohre

Um die Beschädigung der Schläuche zu vermeiden, ist auf deren sorgfältige Führung zu achten!



Ansicht der an die Spülrohre angeschlossenen Versorgungsschläuche (hier bei Ende des Einbringvorgangs)

## Wasserversorgung

Unabhängig vom eingesetzten Wasserversorgungssystem ist ein Puffertank erforderlich, um den kontinuierlichen Baufortschritt zu gewährleisten. Dabei sollte er in einem angemessenen Abstand von der Einbringstelle angeordnet werden, um den Druckabfall in den Schläuchen zu begrenzen.



Installation mit Tank und Pumpe für ein kleines Bauvorhaben



Bei einer großen Baulänge kann der Einsatz eines LKWs mit einem Container zur Unterbringung der Pumpen sehr wirtschaftlich sein

## Spülpumpen

Ideal ist der Einsatz einer Kreiselpumpe pro Spülrohr.

Die Pumpe wird je nach dem gewünschten Spüldruck (1,5 bis 4,0 MPa wobei der Druckabfall unbedingt zu berücksichtigen ist) ausgewählt.

Der Wasserdurchfluss hängt von der anstehenden Bodenart ab. So benötigt man bei einem durchlässigen Boden eine große Wassermenge (120 bis 250 l/Min. pro Rohr) aber einen niedrigeren Druck (ca. 1 MPa), während bei Ton oder Mergel ein weitaus schwächerer Wasserdurchfluss, gekoppelt mit einem höheren Druck (oberhalb des beim Pressiometerversuch ermittelten Grenzdrucks), das Aufschneiden des Bodens durch den Wasserstrahl begünstigt.

Auch die Wasserqualität (sauberes oder belastetes Wasser) beeinflusst die Pumpenwahl.

### Prüfung der Spüleinrichtung

Wenn die Versorgungsschläuche an einem Ende mit der Spülpumpe und am anderen mit den Spülrohren verbunden sind, muss vor dem Einbringen der Spundbohle überprüft werden, ob die Einrichtung einwandfrei funktioniert.



Dabei ist jedoch darauf zu achten, dass das Spülen nicht unter zu hohem Druck erfolgt, da die Spundbohle sonst durch die dem Wasserstrahl entgegengesetzte Reaktionskraft nach oben geschleudert werden könnte.

### Einbringvorgang

Um ein Verstopfen der Spülrohrenden zu vermeiden, sollte der Spülvorgang zeitgleich mit dem Rammvorgang einsetzen (der Druck darf jedoch nicht zu hoch sein, solange das Profil nicht im Boden ist!).



Wenn die Einbringgeschwindigkeit  $\geq 1$  m/Min. liegt (EAU Empfehlung), kann der Spüldruck bis zum Erreichen der Solltiefe beibehalten werden.

Bei Ende des Spülvorgangs kann noch Wasser im Bohlenbereich stagnieren.

## Hinweis

Die durch den Spülvorgang hervorgerufene Bodenstörung im unmittelbaren Bohlenbereich muss bei der Berechnung der Tragfähigkeit der eingebrachten Spundwand (Herabsetzung der Mantelreibung von 10 bis 40 % in Tonböden) berücksichtigt werden. Siehe hierzu EAU 2004, (E 203).

## **Hochdruckspülen (25 bis 50 MPa)**

Hochdruckspülverfahren erfreuen sich in Deutschland und in den nordischen Ländern zunehmender Beliebtheit. Sie erlauben das Einbringen von Spundbohlen sowohl in schluffigen und tonigen Böden als auch in extrem festgelagerten Böden wie weicher Sandstein.

Geschätzt wird dieses Verfahren auch bei Setzungsgefahr, da es nur sehr begrenzte Wassermengen erfordert.

Bei einem Druck von 25 bis 50 MPa am Pumpenausstritt ist es unverzichtbar, Präzisions-Spülrohre (z. B. Ø 30 x 5 mm) sowie Spezialdüsen zu verwenden, die an der Lanzenspitze angeschraubt werden (Ø 1,5 bis 3 mm).

Die Spülrohre werden am Bohlenkopf befestigt und durch Rohrschellen geführt, die entlang des Spundwandprofils angeschweißt sind. Die Düsen stehen am Bohlenfuß 5-10 mm zurück. Die EAU empfiehlt einen Wasserverbrauch von 30 bis 60 l/Min./Spülrohr mit einer Versorgung durch Hochdruckpumpen (z. B. Kolbenpumpen).

Bei den Einbringmaßnahmen sind die mit dem sehr hohen Druck verbundenen Gefahren zu berücksichtigen und die Einbringarbeiten müssen mit großer Sorgfalt ausgeführt werden. Einbringversuche in Kreide, Geschiebelehm und steifem Ton ergaben keine Veränderung der mechanischen Bodenkennwerte.

# SCHLUSSFOLGERUNG

Wie diese Ausführungsbeispiele gezeigt haben, bietet das Spülverfahren bei geringen Mehrkosten eine generelle, zuweilen gar außerordentliche Verbesserung der Einbringgeschwindigkeit. Ein Vorzug, den alle an einem Bauvorhaben Beteiligten zu schätzen wissen. Die Spültechnik ermöglicht es – jedenfalls schneller als Vorbohrungen – in Böden einzudringen, bei denen das Einbringen mit herkömmlichen Verfahren zu früh zum Stehen kommt. Dies wurde in tonigen Böden, in dichten Kiesböden, in Mergel- und in Molasseböden nachgewiesen. Zusätzlich verringert das Spülverfahren die Schwinggeschwindigkeiten im Boden erheblich, eine wichtige Voraussetzung bei Baumaßnahmen in der Nähe von Bauten, deren Standsicherheit nicht gefährdet werden darf.

Mittlerweile wurden in zahlreichen Ländern mit sehr unterschiedlichen geologischen Bedingungen (wie der Schweiz, Deutschland, den nordischen Ländern und den Niederlanden) mittels Rüttelspülverfahren mehrere tausend Tonnen – insbesondere bei Bauvorhaben mit großer Längenausdehnung (wie bei den Verkehrswegebauten) – erfolgreich in kaum vibrierbaren Böden eingebaut. Die mittlerweile vorliegende Erfahrung und das gesammelte Datenmaterial für zahlreiche Bodenarten, Profile und Einbringgeräte haben erheblich an Umfang zugenommen.

Obwohl jedes Bauvorhaben einer besonderen technischen Planung bedarf, kann festgestellt werden, dass als signifikantes Merkmal eines erfolgreichen Einsatzes dieser Einbringmethode die symmetrische Anordnung von Spüllanzen kleinen Durchmessers zur Begrenzung des Druckabfalles heraus gestellt werden kann. Dabei erweist sich in kiesigen Böden die Durchflussmenge und in bindigen Böden der Spüldruck als ausschlaggebender Parameter. Bei optimaler Einstellung der verschiedenen Einflussgrößen ist das Spülverfahren eine wertvolle und effiziente Hilfe beim Einbringen von Spundbohlen. Allerdings ist bei seinem Einsatz zu beachten, dass es die verbleibende Mantel-, bzw. Wandreibung bei bindigen Böden herabsetzt, während es bei nichtbindigen Böden unveränderte Bodeneigenschaften hinterlässt. Die weitere Nutzung der Spülrohre zur Injektion von Zementsuspension in den Fußbereich der Spundwand stellt eine interessante Ergänzung zur Verbesserung der Festigkeit bzw. der Dichtigkeit im unteren Bereich des Spundwandverbaus dar.

## *Danksagung*

*Wir bedanken uns:*

- *bei Paul Ursat (LRPC Straßburg) für die ausgezeichnete Qualität seines Beitrags anlässlich der Konferenz von Nizza,*
- *bei der Forschungs- und Entwicklungsabteilung von ProfilARBED für ihre hilfreiche Unterstützung bei der Ausarbeitung dieses Dokuments,*
- *bei Hermann Zeilinger sowie bei Professor Dr.-Ing. Richard Jelinek und Professor Dr.-Ing. Rudolf Floss von der Technischen Universität München, Institut für Grundbau, Bodenmechanik und Felsmechanik, für ihre früheren Arbeiten,*
- *bei Guy Coronio, Verlagsdirektor von ENPC für seine großzügige Genehmigung der Veröffentlichung.*



**Spundwand**

66, rue de Luxembourg  
L-4221 Esch-sur-Alzette (Luxemburg)

Tel.: (+352) 5313 3105  
Fax: (+352) 5313 3290

E-mail: [spundwand@arcelor.com](mailto:spundwand@arcelor.com)  
Internet: [www.spundwand.arcelor.com](http://www.spundwand.arcelor.com)