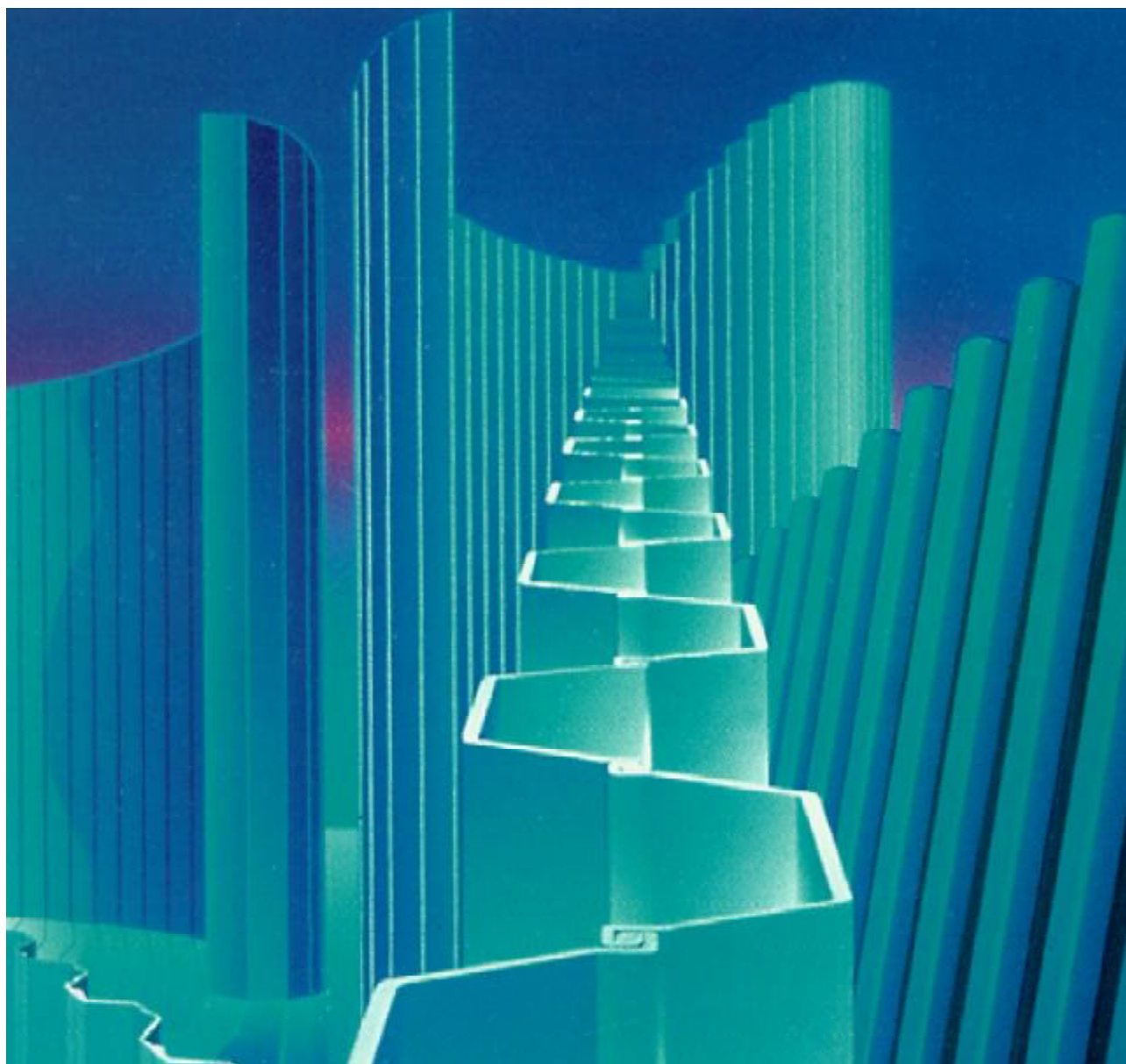




## Stahlpundwände - Planung und Anwendung



## Inhalt

	Seite
Prof. Dr.-Ing. Rudolf Floss, München <b>Vorwort</b> .....	5
Dipl.-Ing. Klaus Schwersenz, Aschaffenburg <b>Ausbau der Nordschleuse Offenbach: Integration von Bau- und Endzustand unter Aufrechterhaltung des Schleusenbetriebs</b> .....	9
Dipl.-Ing. Wolf-J. Gerasch, Hannover <b>Expertensystem für Lärm- und Erschütterungsprognosen beim Einbringen von Spundbohlen - Teil 1: Erläuterung der physikalischen und theoretischen Grundlagen</b> .....	15
Dipl.-Math. Katrin Funk, Hannover <b>Expertensystem für Lärm- und Erschütterungsprognosen beim Einbringen von Spundbohlen - Teil 2: Aufbau und Handhabung des Prognoseprogramms</b> .....	23
Dipl.-Ing. Roland Jörger, Mannheim und Dipl.-Ing. Andreas Wieners, Dortmund <b>Stahlspundwände als Baugrubenverbau im innerstädtischen Bereich von Wiesbaden: Bewältigung schwierigster Baugrundprobleme</b> .....	27
Dipl.-Ing. Andreas Wieners, Dortmund <b>Vermeidung und Eingrenzung von Umweltschäden durch dauerhafte Einkapselung kontaminierter Bereiche mit Stahlspundbohlen</b> .....	31
Dr.-Ing. Alex Schmitt, Luxemburg <b>Rechnerische Behandlung der Dichtigkeit von Spundwandbauwerken</b> .....	43
Dipl.-Ing. Klaus Hudelmeier, München <b>Entwicklung der Rammtechnik und Rammhilfen in den letzten Jahren: Optimierung der Arbeitsabläufe durch Steuerung und moderne Regeltechnik</b> .....	47
Dipl.-Ing. Norbert Gruber, München <b>Schwingungsausbreitung beim Einbringen und Ziehen von Stahlspundwänden</b> .....	55
Dr.-Ing. Magret Geil, Bochum <b>Stahlspundwand und Sicherung von Altlasten: Auswahl von Stahlspundwand-Dichtungssystemen</b> .....	67
Prof. Dr.-Ing. Armin Horn, Neubiberg: <b>Die Dichtspundwand zur Sicherung von Altlasten am Beispiel der Deponie Penzberg</b> .....	73
Dipl.-Ing. Christian Arndts, Hamburg <b>Neuartiger Einsatz gemischter Spundwand-Systeme</b> .....	77
<b>Autorenverzeichnis</b> .....	81

## Rechnerische Behandlung der Dichtigkeit von Spundwandbauwerken

Dr. Ing. Alex Schmitt, Luxemburg

Bisher war es dem Ingenieur nicht möglich, im Entwurfsstadium die Dichtigkeit einer Spundwand und deren Einfluß auf die Grundwasserströmung abzuschätzen. Da die Anforderungen an die Dichtigkeit der Spundwand je nach Bauwerkstyp sehr unterschiedlich sind (Baugrube, Tiefgarage, Umspundung einer Altlast), wurden oft Abdichtungsmaßnahmen gewählt, welche den Erfordernissen nicht angepaßt waren. ProfilARBED (Luxemburg) hat zusammen mit Grondmechanica Delft (Niederlande) ein Forschungsprojekt mit dem Ziel durchgeführt, die Dichtigkeit der Spundwand den Anforderungen des jeweiligen Bauwerkes anzupassen.

Einerseits erlaubt der entwickelte Rechenansatz, diese Anpassung schon beim Entwurf vorzunehmen. Andererseits geben die aufgestellten Ausführungsrichtlinien klare Hinweise zur fachgerechten Bauausführung. Dieses Projekt war in zwei Teile gegliedert:

- Konzept zur Beschreibung der Sickervorgänge im Schloß,
- Feldversuche zur Verifizierung und Kalibrierung des Modells.

Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurden folgende Abdichtungsmaßnahmen untersucht:

- "Leeres Schloß"
- Schloß mit bituminöser Dichtung
- Schloß mit Quelledichtung
- Verschweißtes Schloß.

### 1. Das Konzept des Schloßwiderstands

Das Darcy'sche Gesetz wird im allgemeinen benutzt, um Sickerströmungen in porösen Medien (zum Beispiel Sand) zu beschreiben. Dabei wird vorausgesetzt, daß die Strömung ablösungsfrei ist. Diese Vorgehensweise ist jedoch nicht ohne weiteres auf die Spundwand übertragbar. Hier erfolgt der Sickervorgang lokal durch den engen Zwischenraum, welcher zwischen den verhakten Schloßern übrigbleibt. Der größte Anteil der Wandfläche ist jedoch absolut wasserdicht, da er aus Stahl besteht. Aus diesen Überlegungen heraus schlug Grondmechanica Delft das Konzept des Schloßsickerwiderstandes vor. Es geht davon aus, daß die Sickermenge durch das Schloß proportional ist der Druckdifferenz auf beiden Seiten des Schlosses (Bild 1).



Bild 1

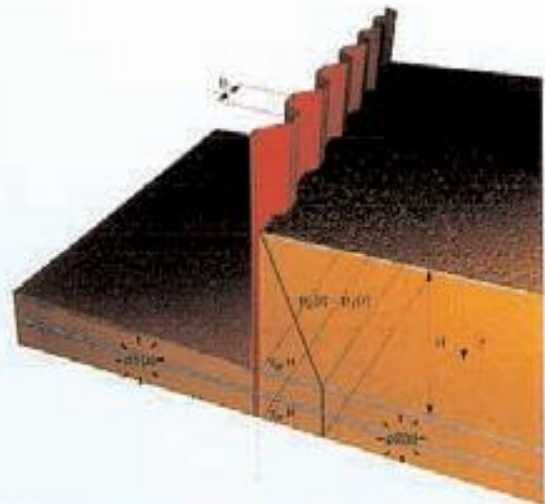


Bild 2

Für die in Bild 2 angegebene Situation gilt somit  $q(z) = \rho \cdot p(z) / \gamma$ . (1)

Mit:

$q(z)$ : Sickermenge pro m Schloß in z,  $m^3/s/m$

$p(z)$ : Druckdifferenz an der Stelle z,  $kN/m^2$

$\gamma$ : Wichte des Wassers  $kN/m^3$

$\rho^{-1}$ : Schloßsickerwiderstand, welcher alle Eigenschaften des Schlosses berücksichtigen muß. Dieser Wert ist experimentell bestimmt worden.

Zur Beschreibung des Sickervorganges im Spundwand-schloß wird somit keine Strömung vom Darcytyp (Potentialströmung) vorausgesetzt. Die Strömung in Schloßlängsrichtung kann hierbei vernachlässigt werden.

### 2. Die Feldmessungen

Insgesamt wurden über 150 Feldversuche durchgeführt. Folgende Varianten wurden untersucht:

- Schloß mit bituminösem Dichtmaterial,
- Schloß mit Quelledichtung,
- und zum Vergleich ebenfalls die beiden Varianten "leeres" Schloß sowie das verschweißte Schloß.

Eine erste Versuchsreihe diente dazu, eine Vorauswahl der Dichtmaterialien zu treffen und das jeweils ungünstigste Einbringverfahren zu ermitteln. Anschließend wurden die Versuchsreihen zur Bestimmung der Schloßsickerwiderstände gefahren. Jeweils eine Reihe pro Produkt und mehrere Produkte pro Variante wurden durchgeführt. Bei den Versuchen wurde nach dem Abteufen der Bohlen die Sickermenge auf einer definierten Schloßlänge (1m) bei verschiedenen Wasserdrücken (0.5 bis 3 bar) in Abhängigkeit von der Zeit gemes-

sen. Jedes Druckniveau wurde dabei mindestens 24 Stunden gehalten. In Bild 3 sind die Ergebnisse einiger Versuche dargestellt.

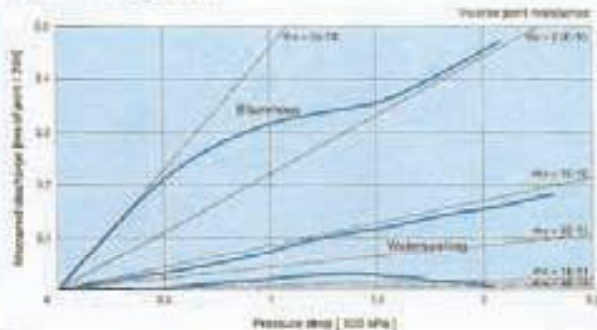


Bild 3

Es zeigt, daß der lineare Ansatz durchaus berechtigt ist, zumindest für ein bestimmtes Druckintervall. Weiter wurde festgestellt, daß die Dichtungsmaterialien in den Spundwandschlössern den Sickerwiderstand um mehrere Zehnerpotenzen verbessern. Sogar bei dem ungünstigsten Einbringverfahren (in der Regel die Vibrationsrammung) bleiben die zurückgehaltenen Dichtungstoffe voll funktionsfähig, vorausgesetzt, die herstellere-spezifischen Verarbeitungsregeln werden beachtet und die von ProfilARBED entwickelten Auftragsverfahren werden angewendet. Die folgende Tabelle gibt einen Überblick über die untersuchten Verfahren.

Spundwanddichtung	$p [ 10^{-9} \text{ m/s } ]$		Anwendung des Systems	Bezogene Kosten **
	100 kPa	200 kPa		
"Leeres Schloß"	< 100 *	*	-	0
Bituminöse Schloßdichtung	< 60	nicht empfohlen	einfach	1
Quelldichtung	0,3	0,3	muß fachgerecht erfolgen	3 + 4,5
Dichtschweißen der Schlösser	0	0	nur nach Aushub für das Baustellenschloß möglich	5 + 8

\* Werte sind stark vom Boden abhängig. \*\* Bezogene Kosten = Kosten des Dichtungssystems/Kosten für bituminöse Schloßdichtung

### 3. Die praktische Anwendung des Konzepts

#### 3.1 Grundlegendes Beispiel

Die Sickermenge in einer Baugrube soll mit einer einfachen Näherung ermittelt werden. Der in Bild 4 dargestellte Schnitt zeigt die hydrostatischen Verhältnisse.

Die Sickermenge pro Schloß (über die gesamte Höhe) kann wie folgt ermittelt werden:

$$Q_1 = \int_0^{H+h} q(z) dz = (\rho/\gamma) \int_0^{H+h} \Delta p(z) dz \quad (2)$$

$$\text{Dabei ist: } \Delta p(z) = \begin{cases} \gamma z, & z \leq H \\ \gamma H, & H < z < H+h \end{cases}$$

$I$  ist dabei der Flächeninhalt des resultierenden hydrostatischen Druckdiagrammes. Der Durchfluß pro Schloß ergibt sich somit zu:

$$Q_1 = p \cdot H = (0,5 \cdot H + h) \quad (3)$$

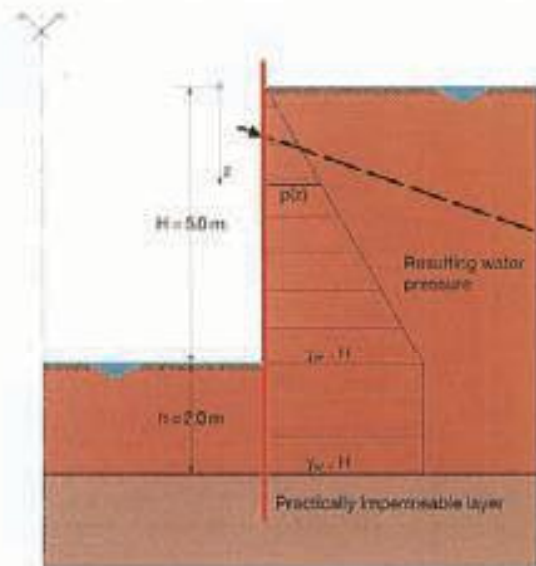


Bild 4

Geht man davon aus, daß für die Spundwand Doppelbohlen verwendet werden, bei denen das Mittelschloß nicht verschleißt wurde, so erhält man die Anzahl der Schlösser aus Umfang der Baugrube / Systembreite der Spundbohle. Die gesamte Sickermenge in die Baugrube ist somit Anzahl der Schlösser \*  $Q_1$ .

Diese Vorgehensweise stellt nur eine grobe Näherung dar, da der Einfluß der Strömung auf die Geometrie des Grundwasserspiegels vernachlässigt wurde. Dies ist jedoch in der Regel für die Baupraxis völlig ausreichend. Voraussetzung für dieses Verfahren ist jedoch, daß der Spundwandfuß in eine "dichte" Bodenschicht einbindet. Die Frage, wann in diesem Zusammenhang eine Schicht als "dicht" zu betrachten ist, wird in Abschnitt 3.3 angeschnitten.

#### 3.2 Vergleich mit porösen Dichtwänden

In der Praxis kann es erforderlich sein, einen Vergleich durchzuführen zwischen der Dichtigkeit einer porösen Wand (zum Beispiel einer Schlitzwand) und einer Spundwand. Für poröse Medien gilt das Darcy'sche Gesetz. Dieses ergibt für den Durchfluß durch eine Betonwand der Dicke  $d$  (Bild 5), bezogen auf einen Quadratmeter Wandfläche

$$Q_{SW} = K \cdot (\Delta p / \gamma) / d \quad (4)$$

Dabei sind  
 K: der Durchlässigkeitsbeiwert in m/s  
 $\Delta p$ : der Druckunterschied auf beiden Seiten der Wand.



Bild 5

Für eine Spundwand, welche durch dieselbe Druckdifferenz beaufschlagt wird, gilt gemäß (1) für den Durchfluß durch einen Meter Schloß

$$Q_{SPW,1} = \rho \cdot \Delta p / \gamma$$

Dies ergibt bei einer Systembreite b der Spundwand einen Durchfluß pro Quadratmeter Wandfläche

$$Q_{SPW} = \rho \cdot \frac{\Delta p}{\gamma} \cdot \frac{1}{b} \quad (5)$$

Ein Vergleich der beiden Dichtwandssysteme ist nur unter der Voraussetzung gleicher Durchflüsse pro Wandflächeneinheit möglich. In diesem Falle gilt durch Gleichsetzen von (4) und (5):

$$Q_{SW} = Q_{SPW} \Rightarrow \frac{k}{d} = \frac{\rho}{b} \quad (6)$$

Diese Formel erlaubt somit einen Vergleich zwischen einer Spundwand und zum Beispiel einer Schlitzwand bei gleichen Sickerleistungen und gleichen Wasserdrücken.

Zahlenbeispiel:

Gegeben sei eine Dichtwand aus Spundwandprofilen AZ18. Diese werden als Doppelbohlen mit verschweißtem Mittelschloß und einer Quelledichtung im Baustellenschloß eingesetzt. Es soll angegeben werden, welchen K-Wert eine 80 cm dicke Schlitzwand haben müßte, um durchflußmäßig äquivalent zu sein. Da die Doppelbohlen verschweißte sind, beträgt die Systembreite  $b = 1,26$  m. Für das Schloß mit der Quelledichtung kann ein Wert  $\rho = 10^{-9}$  m/s angesetzt werden. Damit ergibt sich der entsprechende K-Wert für die Schlitzwand

$$K = \frac{\rho \cdot d}{b} = \frac{10^{-9} \cdot 0,8}{1,26} = 6,3 \cdot 10^{-10} \text{ m/s.}$$

### 3.3 Das zweidimensionale Problem

Bei dem in 3.1 vereinfacht behandelten Problem ergab sich die Frage, wie der Einfluß der als "dicht" vorausge-

setzten unteren Schicht auf den berechneten gesamten Durchfluß ist. Die Klärung dieser Frage erfolgt mit Hilfe eines 2D-Sickerströmungsprogrammes, welche für PCs erhältlich sind (zum Beispiel plaxis, m-seep). Um diese auf das vorliegende Problem anwenden zu können, wird die Spundwand in eine durchflußmäßig äquivalente poröse Wand (Dicke = 1m) mit Hilfe von (6) umgewandelt. Anschließend wird die in Bild 6 dargestellte Situation für 4 Parameterkombinationen berechnet. Für Vergleichszwecke wurde der dimensionslose Parameter  $\frac{K_w \cdot L_w}{K_f \cdot L_f} = \frac{\text{Durchlässigkeit der Wand}}{\text{Durchlässigkeit der unteren Schicht}}$

eingeführt. Die verwendeten Eingabewerte sind in untenstehender Tabelle zusammengefaßt.

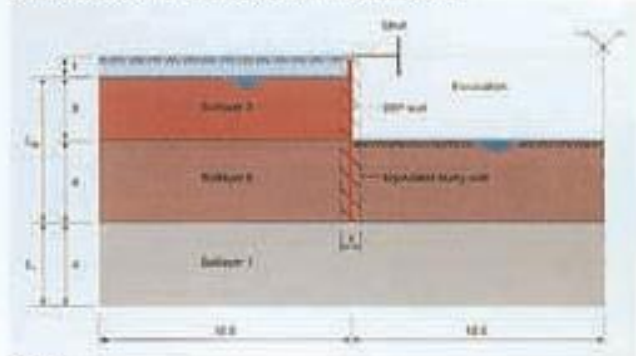


Bild 6

Zelle		Fall 1	Fall 2	Fall 3	Fall 4
1	Ki [m/s]: Bodenschicht 1, i = 1 Bodenschicht 2, i = 2 Bodenschicht 3, i = 3	$10^{-4}$ $10^{-6}$ $10^{-8}$	$10^{-4}$ $10^{-4}$ $10^{-6}$	$10^{-7}$ $10^{-5}$ $10^{-3}$	$10^{-4}$ $10^{-4}$ $10^{-3}$
2	äquivalente poröse Wand: $K_w = \rho \cdot d / b$	$10^{-6}$	$10^{-3}$	$10^{-4}$	$10^{-5}$
3	Geometrie: $L_w / L_f$	7/4	7/4	7/4	7/8
4	$K_w \cdot L_w / K_f \cdot L_f$	0,02	0,18	17,5	0,09
5	gesamte Sickerwassermenge gemäß 2D-Modell: $D_s$ (l/h)	518	742	60,5	887
6	Sickerwasserstrom durch die Wand gemäß 3.1: $D_w$ (l/h)	59,4	594	59,4	504
7	$D_w / D_s$ (%)	11,5	80	98,2	67

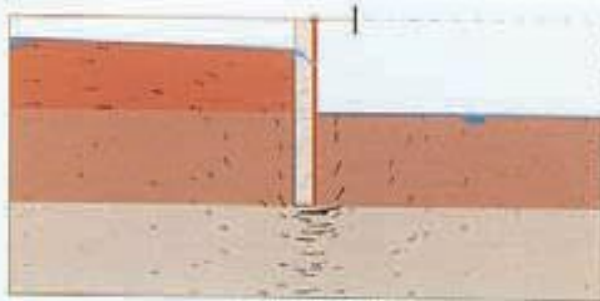
Bei den Fällen 1, 2, 3 ist die Geometrie gleich, die K-Werte sind aber verschieden. Für Fall 4 wurden die K-Werte von Fall 2 benutzt, aber die untere Schicht ist doppelt so mächtig. Die zahlenmäßigen Ergebnisse sind obenstehender Tabelle zu entnehmen. Die Bilder 7, 8, 9 und 10 verdeutlichen sehr anschaulich durch die Strömungsgeschwindigkeitsvektoren die Ergebnisse der 4 Fälle.

Es zeigt sich, daß für einen Wert

$$\frac{K_w \cdot L_w}{K_f \cdot L_f} > 0,18$$

80 % des gesamten Sickerwasserstroms auf die Wand entfällt. Die untere Bodenschicht kann somit als "dicht" angenommen werden, vorausgesetzt, die oberen Schichten sind entsprechend durchlässig. Dann stellt das

unter 3.1 dargestellte vereinfachte Verfahren eine für die Praxis gut geeignete Näherung dar.



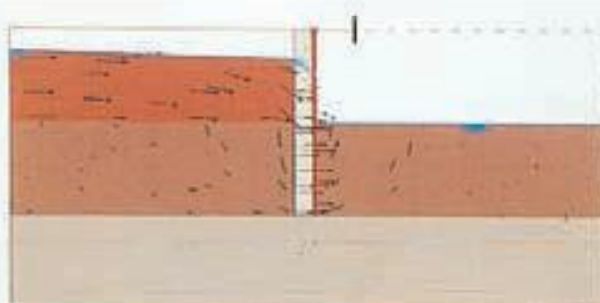
Ultimate flow field with glivatic line  
Extreme velocity: 8.57E-01 m/s

Bild 7



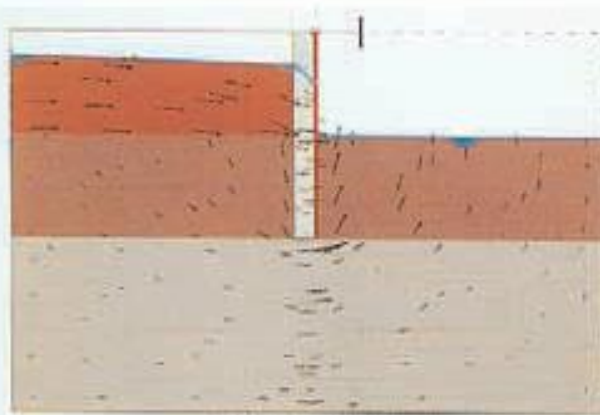
Ultimate flow field with glivatic line  
Extreme velocity: 4.21E-01 m/s

Bild 8



Ultimate flow field with glivatic line  
Extreme velocity: 4.81E-01 m/s

Bild 9



Ultimate flow field with glivatic line  
Extreme velocity: 6.74E-01 m/s

Bild 10

### Bemerkung

Weitergehende Informationen zur Wahl eines Schloßabdichtungsproduktes, zu den Einbringverfahren sowie zu den jeweils anzusetzenden Werten für  $p$  enthält die Broschüre "The Impervious Steel Sheet Pile Wall", herausgegeben von ISPC, ProfilARBED, Luxembourg.

## Entwicklung der Rammtechnik und Rammhilfen in den letzten Jahren: Optimierung der Arbeitsabläufe durch Steuerung und moderne Regeltechnik

Dipl.-Ing. Klaus Hudelmeier, München

Im Vorwort wurde bereits mehrfach erwähnt, daß die Spundwandbauweise mit der Technik des Einbringens sehr eng verbunden ist und von dem guten Ergebnis dieser Spezialarbeit lebt.

Da sich sowohl bei den Spundbohlen als auch in der Gerätetechnik - und in dieser besonders - ein ständiger Wandel vollzieht, müssen Erfahrungen und Neuerungen gekonnt aufeinander abgestimmt werden.

Die Einbringmethode und somit die Ausführbarkeit der Spundwandbauweise erfordert Umsicht, Erfahrung und Sachverstand. Sie hat für den Erfolg der Baumaßnahme eine ebenso große Bedeutung wie die Baugrundaufschlüsse für einen technisch ausgereiften Entwurf.

Die Wahl des Einbringverfahrens ist abhängig von den Bodenverhältnissen, der Bohlenlänge, der Rammtiefe, dem Rüttel- oder Rammbar und auch der Trägergeräte. Die wohl bekannteste Einbringmethode ist das Einbringen der Spundbohlen durch Einrammen.

Die Rammtechnik zum Einbringen von Spundbohlen, Trägern oder anderem Rammgut ist über Jahrhunderte, ja sogar seit Anbeginn der Ingenieurtechnik von Rammhämern bestimmt worden.

Waren dies seit der Antike Freifallbäre, so kamen mit dem Beginn des industriellen Zeitalters Dampfhammern, gefolgt von Preßlufthämern, Dieselhämern und Hydraulikhämern zum Einsatz. Und aus den Hydraulikhämern entwickelte sich das heute modernste Verfahren zum Einbringen von Spundbohlen, die Vibrationstechnik.

Ganz kurz sei erwähnt, daß dieses Verfahren auf ein deutsches Patent von Hertwig aus dem Jahre 1932 zurückgeht und in der ehemaligen UdSSR bis zur Ausführungsreife entwickelt wurde. Ein Beispiel dafür, daß Erfinder immer dann leer ausgehen, wenn sie ihrer Zeit voraus sind. Denn diese Technik hat erst in den letzten Jahren zunehmend an Bedeutung gewonnen, da die Vibrationsbären, und das ist ein entscheidender Punkt, sowohl für das Einbringen und das Ziehen gleich gut geeignet sind und die Geräuschentwicklung wesentlich geringer ausfällt als beim Einsatz von Schlagrammen. Deshalb wird hier auf die Vibrations-Ramm- und Ziehtechnik und auf die Wechselwirkung zwischen Maschine und Erdreich näher eingegangen.

### Die Technik der Vibration, Rammen und Ziehen

Wenn man über die Vibrationsrammung diskutiert, dann hört man widersprüchliche Ansichten: Einerseits werden schier unglaubliche Leistungen aufgezählt, und im gleichen Augenblick hört man Klagen

über ein manchmal völliges Versagen solcher Maschinen und ihrer Einbringtechnik. Unstrittig ist jedoch die Tatsache, daß diese Vibrations-Ramm- und Ziehtechnik einen immer breiteren Raum beim Einsatz von Spundwänden einnimmt.

Die Widersprüche lassen sich weitgehend auflösen, wenn man etwas tiefer in diese Materie eindringt und das im Vergleich zu den herkömmlichen Rammbären doch weit kompliziertere Innenleben der Vibrationsgeräte studiert. Vor allem dem Wechselspiel zwischen dem vibrierenden Rammgut, das heißt der Bohle, und dem umgebenden Erdreich sollte nachgespürt und nachgegangen werden.

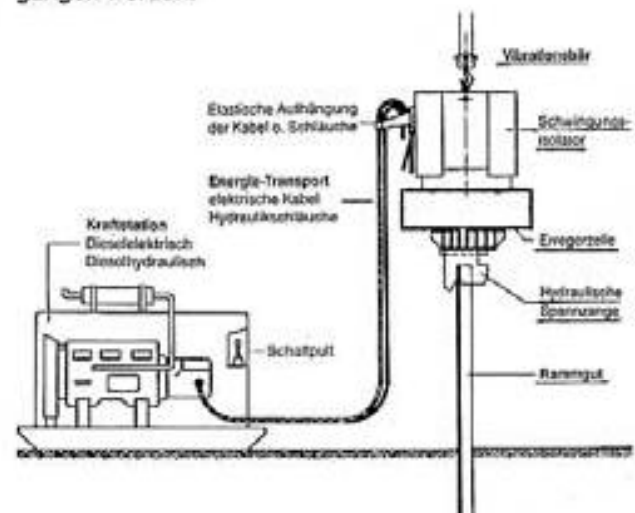


Bild 1: Vibrations-Rammsystem: Typische Bauart

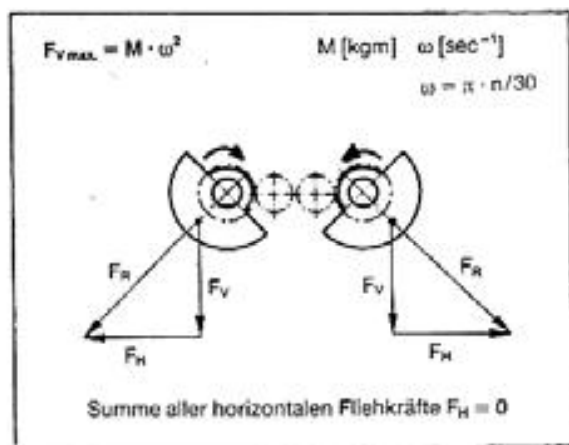
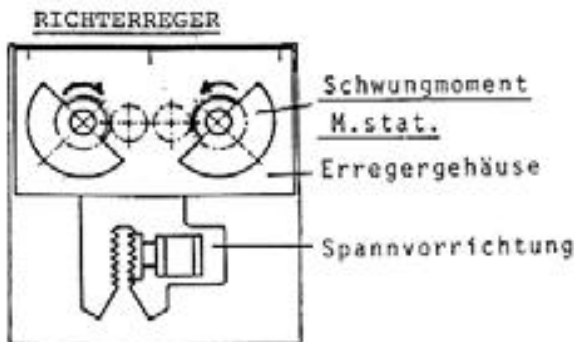
### Wirkungsweise der Vibration

Das System eines Vibrationsbären soll kurz anhand untenstehender Abbildungen erläutert werden. Der Vibrationsbär ist im wesentlichen ein Schwingungserzeuger. Er ist auf der unteren Seite mit einer hydraulisch wirkenden Spannvorrichtung versehen, mit der die Bohle schwingungsfest eingespannt ist. Auf der Oberseite ist ein Federelement angebracht, welches das Trägergerät gegen Schwingungen des Vibrators isoliert. Der Schwingungserzeuger - auch Erregerzelle genannt - arbeitet in der Regel nach dem Prinzip der rotierenden Unwuchten, von denen jeweils zwei gleich große mit gleicher Drehzahl und gegenläufigem Drehsinn drehen. Bei der Rotation entstehen Fliehkkräfte, deren Komponenten sich in der Horizontalen gegenseitig aufheben und in der Vertikalen addieren. Es entsteht eine dem Sinusverlauf entsprechend periodisch wirkende Kraft, die als Erregerkraft oder einfacher als Fliehkraft bezeichnet wird.

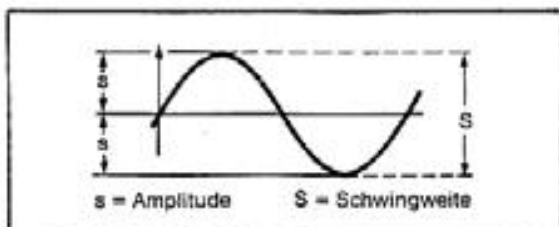
## Die Maschinenkenngrößen eines Vibrators

### Schwungmoment, Fliehkraft, Drehzahl und Amplitude

Die Grundgröße eines Vibrators, die die Leistungsfähigkeit bestimmt, ist das statische Moment oder Schwungmoment. Je größer die bewegten Unwuchten sind, desto leistungsfähiger ist die Maschine.



Fliehkraft  $F = M \cdot \omega^2$   
F [kN]       $F = M \cdot 10^{-3} \cdot n^2 \cdot 0,011$



Schwingweite  
S [m]       $S = 2s = \frac{2 \cdot M \text{ [kgm]}}{G_{dyn} \text{ [kg]}}$

Bild 2: Kenndaten eines Vibrationsgeräts

Die Fliehkraft ist wichtig und notwendig, um den Verbund zwischen Rammgut und Boden zu überwinden. Erst wenn die Fliehkraft größer ist als die Haltekraft zwischen Boden und Rammgut, wird eine Bewegung zwischen beiden möglich, und erst dann können die

Faktoren wirksam werden, die das Rammen und Ziehen mit Vibration begünstigen.

Das sind die Reduzierung der Mantelreibung, die Auflösung des Korngerüsts um das Rammgut herum und damit eine Reduzierung der Reibungskräfte.

Ein weiterer Faktor ist die Drehzahl. Da es sich um einen Schwingungsvorgang handelt, hat die Drehzahl als aufgezogene Erregerfrequenz einen hohen Stellenwert in dem schwingenden System. Im Hinblick auf die Bearbeitung des Bodens wäre es deshalb vorteilhaft, diesen in seiner Eigenfrequenz zu erregen, da dann mit einem Minimum an Energie der größte Erfolg an Korngerüstauflösung zu erwarten ist.

Die Schwingweite oder zweifache Amplitude ist praktisch der Hub des Vibrators während des Betriebes und das Ergebnis der gerichteten Fliehkraften.

## Die verschiedenen Vibratortypen

### Der Mittelfrequenzvibrator

Aus der Erkenntnis heraus, daß der Umlagerungsprozeß im Boden sich am einfachsten erzielen läßt, wenn der Vibrator im Eigenfrequenzbereich des Bodens arbeitet, wurde der sogenannte klassische Mittelfrequenzvibrator entwickelt. Diese Geräte arbeiten in den Drehzahlbereichen bis maximal 25 Hertz, das sind also 1500 Umdrehungen in der Minute. Mit diesem Frequenzbereich wurde bislang erfolgreich gearbeitet.

Mit dieser Eigenfrequenzerregung des Bodens kann jedoch eine ungewünschte Schwingungsausbreitung einhergehen. Dann wird es zwingend notwendig, diesen Frequenzbereich zu verlassen und auf einen anderen auszuweichen.

### Der Hochfrequenzvibrator

Um diesen Effekt mit seinen negativen Auswirkungen auf benachbarte Bebauung und deren sensible Einrichtungen und die Bewohner zu verhindern, wurden von den Herstellern Hochfrequenzvibratoren entwickelt. Diese Geräte werden mit Frequenzen von über 30 bis maximal 45 Hertz angeboten. Da mit der höheren Drehzahl bei gleichem statischen Moment die Leistungsaufnahme steigt, ist auch das Antriebsaggregat mit entsprechender Leistung auszustatten, um den Vibrator mit der zunehmenden Leistungsaufnahme drehzahlstabil im hochfrequenten Bereich zu halten.

Beide Typen, der Hochfrequenzrüttler wie auch der Normalfrequenzrüttelbar, haben einen gemeinsamen Nachteil: Beim An- und Abfahren, das heißt beim An- und Ausschalten, durchlaufen diese Geräte zwangsweise den Eigenfrequenzbereich des Bodens mit sehr hohen Erschütterungswerten, die trotz der sehr kurzen Dauer oft Ursache für Bauschäden und nicht zumutbare Belastungen und Belästigungen für die Umgebung sein können.

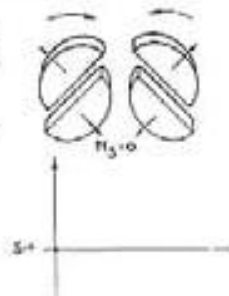


### Der Vibrator mit variablem statischen Moment

Dieser Effekt ließ die Anwender und Hersteller eine schon seit langem bekannte Idee erneut aufgreifen: Die Entwicklung eines Vibrators mit stufenlos regelbarer Drehzahl und verstellbarem statischen Moment während des Betriebes. Diese Maschinen haben den Vorteil, daß sie mit einer Schwingungsamplitude von Null resonanzfrei angefahren werden können. Erst nach Erreichen der vorgewählten Drehzahl werden die Unwuchten verstellt und dann eingeregelt. Damit werden die bekannten An- und Abfahrpeaks eliminiert, und die Maschine bewegt sich nur noch im Dauerpegel.

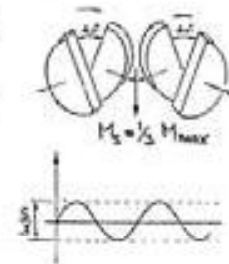
Die gegenüberliegenden Unwuchten werden in entgegengesetzter Stellung gehalten.

Das resultierende statische Moment ist 0.



Eine Hälfte der Unwuchten wird um 60° verdreht.

Das resultierende Moment und die Amplitude sind 33 % vom Maximum.



Eine Hälfte der Unwuchten wird um 180° verdreht.

Das resultierende Moment und die Amplitude erreicht Maximum.

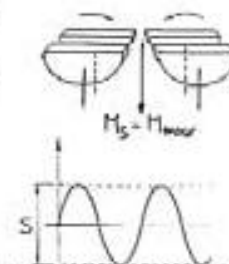


Bild 3: Prinzip der HFV Vibrationsramme: Veränderung des statischen Momentes

Erreicht wird dies folgendermaßen: Im Innenleben des Rüttlers befinden sich zum Beispiel vier Unwuchten, die in der sogenannten Nullposition in entgegengesetzter Stellung gehalten werden, so daß sich alle Rotationskräfte in horizontaler und vertikaler Richtung aufheben. Die Schwingungsamplitude bleibt also auf Null, wenn die Gewichte in Rotation gebracht werden. Die Unwuchten können dann bei jeder Drehzahl stufenlos auf den gewünschten Spreizwinkel verstellt werden. Unter 180 Grad wird die volle Leistung und das volle statische Moment und somit die maximale Amplitude erreicht. Die Möglichkeit, das statische Moment während des Betriebes zu ändern, erlaubt es, sich sowohl den geolo-

gischen Verhältnissen als auch den örtlichen Gegebenheiten optimal anzupassen. Mit diesem Gerät hat man nun ein Instrument zur Hand, das sich sowohl auf die Umweltbelange als auch auf ein wirtschaftliches Einbringen der Spundbohle einstellen läßt. Es ist nun möglich, durch die veränderbare Momentenumstellung die Amplitude so zu beeinflussen, daß die Rüttelfrequenz über kritische Eigenfrequenzen gefahren werden kann. Durch diese Verstellbarkeit des statischen Moments ist jedoch auch gewährleistet, daß die Leistung des Gerätes bei jeder Amplitude voll ausgenutzt werden kann.

Es zeigt sich jedoch in der Anwendung der Vibrationsbären, daß neben der Erfahrung eine fundierte Kenntnis der Problemstellung, der geologischen und örtlichen Verhältnisse notwendig ist. Um allen Gegebenheiten zu entsprechen, sind oft weitere Hilfsmittel zum Einbringen des Rammgutes erforderlich.

### Einbringhilfen zur Rammtechnik

Als Einbringhilfen bezeichnen wir Zusatzmaßnahmen, die bei den üblichen Einbringverfahren von Stahlelementen zur Unterstützung des Einbringens eingesetzt werden können. Dabei spielt es grundsätzlich keine Rolle, ob das einzubringende Element ein Trägerprofil, eine Spundwand oder ein Rohr ist.

Einbringhilfen werden aus verschiedenen Gründen angewendet. Durch Einbringhilfen kann das Einbringen der Spundbohlen generell erst ermöglicht werden, wenn die Vibrationstechnik alleine nicht mehr ausreichend Rammenergie zur Überwindung der Rammwiderstände zur Verfügung hat. Durch die Einbringhilfe kann das Einbringen der Spundbohlen überdies wesentlich erleichtert und beschleunigt werden. Außerdem werden durch die Einbringhilfe die an die Umgebung abgegebenen Lärm- und Erschütterungsemissionen erheblich reduziert.

Welche Einbringhilfen gibt es, wie werden sie angewandt, wie wirken sie?

In den Empfehlungen des Arbeitsausschusses Uferbefestigungen (EAU) von 1990 werden an verschiedenen Stellen Einbringhilfen aufgezählt. Im einzelnen sind dies:

- das Vorbohren des Bodens,
- Spülen mit Druckwasser und
- Lockerungssprengungen.

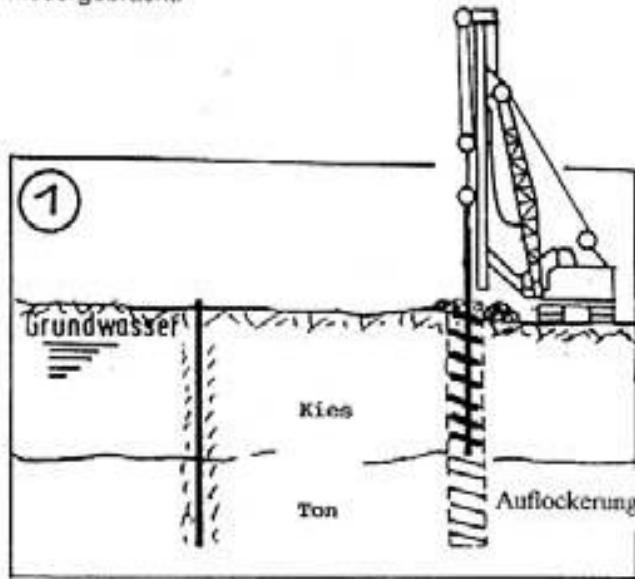
Kriterien für die Wahl der geeigneten Einbringhilfen sind die Bodenverhältnisse, die Einbringtiefe, das Profil, der Geräteeinsatz und die äußeren Bedingungen der Umwelt und des Umfelds.

### Rammhilfen und ihre Wirkungsweisen

#### Vorbohren mittels Lockerungsbohrung

Die Wirkungsweise beruht darauf, daß dichtgelagerte nichtbindige Böden aufgelockert werden. Feste bindige Böden, zum Beispiel Tone, werden aufgebrochen. Es

wird dabei kein oder nur sehr wenig Bodenmaterial gefördert. Mittels eines Bohrgerätes werden Schnecken mit Durchmessern von 200 bis ca. 750 mm in den Boden eingedreht. Der Abstand richtet sich zum Beispiel nach dem Raster der Spundbohlen. Es ist also sinnvoll, die Bohrungen immer im Bereich der Schlösser anzusetzen, so daß das übliche Maß der Abstände der Teilung von 50 cm, 1 m oder bei 60 cm, 1,2 m entspricht. Die Bohrungen werden in der Spundwandachse niedergebracht.



Lockerungsbohrung

Bild 4: Lockerungsbohrung

Das Problem dieser Lockerungsbohrungen ist, daß sie nicht aneinandergereiht oder eingeschnitten werden können. Es muß also immer ein Steg zwischen zwei Bohrungen stehenbleiben, weil sonst die nächste Bohrung das vorhergehende Loch ansteuern würde. Dieser Steg zwischen den einzelnen Bohrelementen bedingt, daß beim Abteufen der Spundbohlen ein Teil sich nicht im gelockerten Boden bewegt. Dadurch ist es sicher problematisch, in bindigen Böden, zum Beispiel in Tonen, mit Lockerungsbohrungen zu arbeiten, weil hier neben den aufgelockerten Kaminen feste Bodensäulen stehenbleiben, die trotzdem von dem Rammgut durchfahren werden müssen. Durch unterschiedliche Rammwiderstände und asymmetrische Belastungen können die Spundbohlen verlaufen und Deformationen entstehen, die bei der Weiterarbeit oder bei der Wasserdichtigkeit zu Problemen führen können.

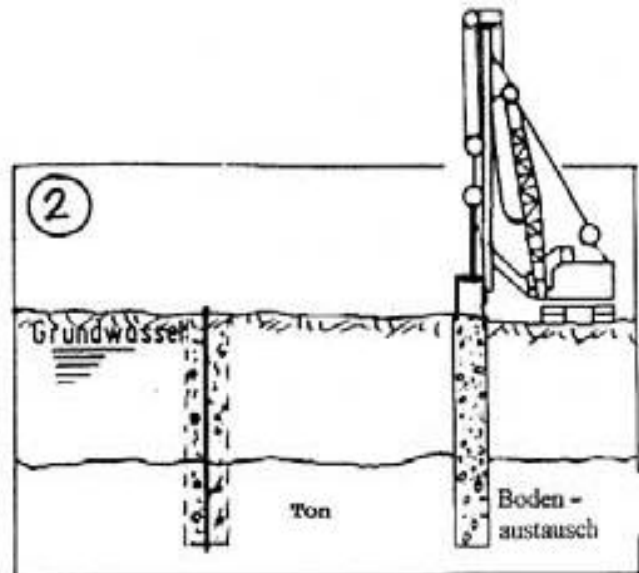
Der Einsatz von Lockerungsbohrungen ist auch abhängig von der Bodenbeschaffenheit. Es ist nicht ohne weiteres möglich, mit den Bohrschnecken maßgenau in Bohrtiefen über 15 m abzuteufen. Die Anwendung die-

ser Technik ist neben der Tiefe auch abhängig von der Bodenbeschaffenheit, dem Schneckendurchmesser und dem zur Verfügung stehenden Drehmoment des Bohrgerätes.

### Bohrungen mit Bodenaustausch

Eine Alternative zur Lockerungsbohrung ist die Bodenaustauschbohrung.

Hierbei wird wie bei einer Bohrpfehlwand eine überschnittene, verrohrte Bohrung hergestellt, und zwar so, daß das gesamte Rammprofil abgedeckt wird. Diese Bohrung wird mit einem rüttelfähigen und dichtenden Material wieder aufgefüllt. Anschließend wird die Spundbohle in den aufgefüllten Bereich eingerüttelt.



Bodenaustausch

Bild 5: Bodenaustauschbohrung

Die Problematik der Lockerungsbohrung tritt bei diesem Verfahren nicht auf. Das Ergebnis ist ein durchgehender Schlitz mit homogenem und vibrierfähigem Bodenmaterial, in den die Spundbohle ohne Schwierigkeiten eingebracht werden kann.

Dieses Verfahren erlaubt es auch bei schwierigen Bodenverhältnissen, Spundwände einzusetzen und die Emissionen auf sehr niedrigem Niveau zu halten.

### Anwendung von Spülhilfen

Eine weitere, schon oft erwähnte Rammhilfe beim Einbringen von Spundwänden ist die Spülhilfe mit Druckwasser über Spülhilfen. Hier gibt es zwei Möglichkeiten:

Einmal das Niederdruckspülen mit 10 bis 20 bar. Hier werden bis zu 4 Spülhilfen mit einem Durchmesser von ca. 3/4" je Doppelbohle angebracht. Der Wasseraustritt erfolgt am Bohlenfuß über die Spülhilfen, die unten geöffnet sind. Die Lanzen werden meistens über Kreiselpumpen versorgt, wobei jedes Rohr mit einer Pumpe bestückt werden sollte. Die Wassermenge, die durch die Rohre gedrückt wird, beträgt zwischen 8 bis 10 l pro Sekunde. Das sind also bei einer Rütteldauer von 10 Minuten rund 6 m<sup>3</sup> pro Spülrohr.

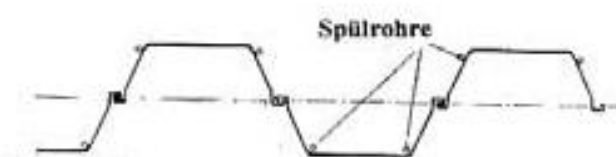
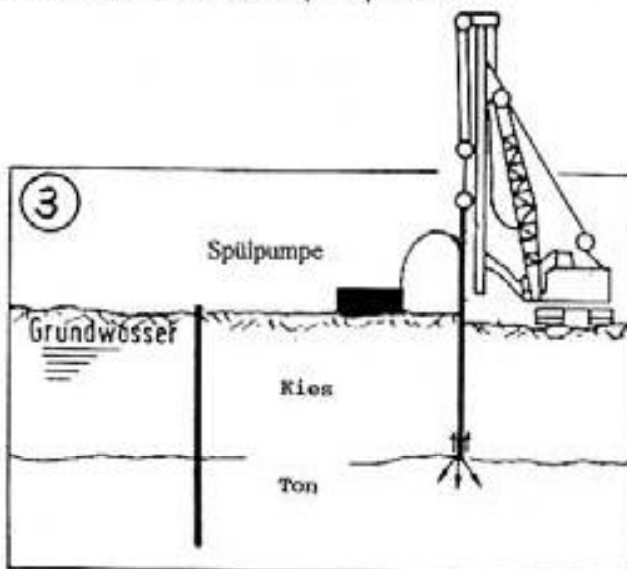


Bild 6: Spülen

Diese Spültechnik hat sich im süddeutschen Raum sehr gut bewährt. Mit der Vibrationstechnik mit Niederdruckspülung wird durch die Wassermengen zum Beispiel im Kies eine Umlagerung in der Form erfolgen, daß Feinteile an die Bohle herangezogen werden und sich dadurch an der Bohle ein Schmierfilm bildet, der am Rammgut die Reibung verringert.

Im Ton wird durch den Vibrationsvorgang das Bodenmaterial am Fuß der Rammbohle praktisch abgebaut und durch den Spülstrom nach oben gefördert, so daß auch hier durch die gelösten Bodenteile mit dem Wasser eine Schmierschicht zwischen der Bohle dem Boden entsteht.

Dieser Vorgang kann mit der Spülbohrung in der Bohrtechnik verglichen werden. Es ist natürlich darauf zu achten, daß die Spülung den Bodenverhältnissen angepaßt wird, daß die Spülrohre nicht verstopfen und daß ein ständiger Fluß des Spülwassers gewährleistet ist.

Es sei noch auf einige weitere Details hingewiesen: Die Spülrohre sind nach dem Abrammen am Kopf zu verschließen, damit die nachfolgende Spülung nicht in die bereits eingebrachten Spülrohre nach oben ausweicht.

Beim Ziehen der Bohlen kann dann über die Spülhilfen der Schlitz der Spundwände mit Zement oder Zementbentonit verpreßt werden, so daß sich die möglichen Setzungen beim Ziehen des Rammgutes beherrschen lassen. Dies ist ein zusätzlicher und nützlicher Effekt, den die Anwendung der Spültechnik mit sich bringt. Die Kombination der Vibrationstechnik mit dem Niederdruckspülen ist nahezu für alle Bodenverhältnisse ein optimales Einbringverfahren.

Beim Hochdruckspülen erfolgt der Wasseraustritt über Rundstrahldüsen mit Durchmessern von 1,3 bis 3,0 mm. Dazu sind Hochdruckpumpen mit Drücken zwischen 300 und 500 bar erforderlich. Der Wasserbedarf liegt bei ca. 0,5 bis 1 l pro Sekunde.

In der Literatur wird berichtet, daß es mit diesem Verfahren möglich ist, einen festen Boden aufzuschneiden, wodurch das Einbringen der Bohlen erleichtert wird. Uns sind jedoch nur wenige Anwendungsfälle bekannt, bei denen dieses Verfahren Erfolg gebracht hat. Unserer Meinung nach werden durch die Düsenstrahle nur örtlich begrenzte Bereiche aufgeschnitten, aber kein durchgehender Ramm Schlitz erzeugt. Das hat dann zur Folge, daß hier auch wieder Bodenstege stehen bleiben und beim Abrammen überwunden werden müssen.

### Die Lockerungssprengung

Zum Abschluß sei auf eine weitere, auch sehr bekannte Einbringhilfe hingewiesen: das Lockerungssprengen oder Vorspaltsprengen.

Hiermit kann in felsartigen Böden durch Schock- oder Vorspaltsprengung der Fels gelockert und in einem begrenzten, grabenbreiten Bereich zerstört und somit rammfähig aufbereitet werden. Bohrlöcher längs der Wandachse und in kurzen Abständen von 60 - 120 cm werden mit Plastikrohren bestückt und entsprechend der Gesteinsfestigkeit mit Sprengstoff verteilt über die Bohrlöchtiefe besetzt. Eine ausgeklügelte Zeitverzögerung beim eigentlichen Sprengvorgang bewirkt eine Überlagerung der Schockwellen und begrenzt die Sprengwirkung auf einen relativ schmalen Spalt. In diesem gestörten Bereich mit auf Schottergröße zertrümmertem Gestein läßt sich dann die Spundbohle einrütteln oder abrammen.

Die aufgezählten und erläuterten Verfahren sind im großen und ganzen die bekanntesten Einbringhilfen beim Rütteln.

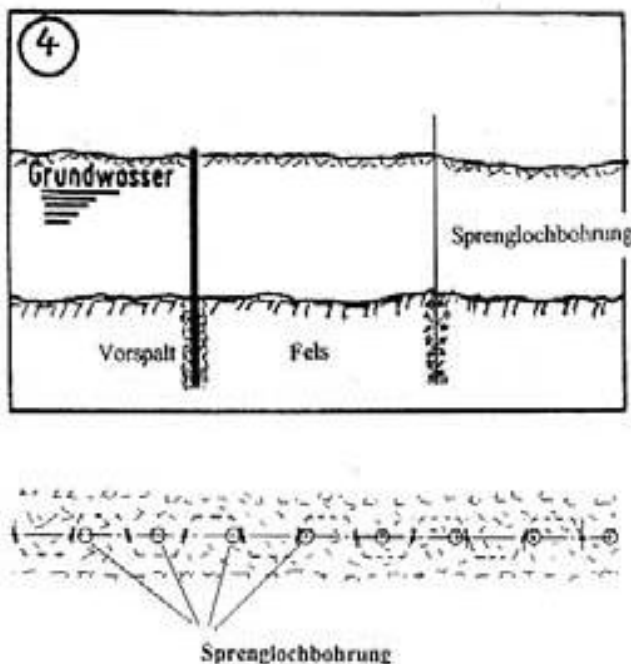


Bild 7: Lockerungs- oder Vorspaltsprengung

### Mess- und Regeltechnik in der modernen Rammtechnik

Ein weiterer Punkt, der noch angesprochen werden soll, ist der Einsatz der Meß- und Regeltechnik. Zur Qualitätskontrolle ist eine lückenlose Erfassung aller Einflußfaktoren des Rüttelprozesses erforderlich. Von Anbeginn der Entwicklung des Rüttelspülverfahrens wurden Maschinendaten und Arbeitsdaten erfaßt, um so einen besseren Einblick in den Ablauf der Vibrationstechnik zu erhalten.

Heute werden mit Hilfe von modernen Datenerfassungsgeräten die wichtigsten Rütteldaten aufgezeichnet und ausgedruckt. Der Fahrer oder Operateur am Gerät hat die Möglichkeit, all diese Daten während des Arbeitsvorganges zu beobachten und für die Optimierung der Rammung einzusetzen.

#### Das Rüttelprotokoll: Aufzeichnung der Rammdaten

Im einzelnen werden durch das Rüttelprotokoll folgende Werte erfaßt:

- die Eindringtiefe der Spundbohle über die Zeit und damit natürlich auch die Eindringgeschwindigkeit,
- die Rüttelfrequenz über die Zeit,
- der Öldruck des Antriebsmotors des Rüttlers über die Zeit und
- der Wasserdurchfluß, bzw. der Suspensionsdurchfluß bei einer Schmalwand und der Betriebsdruck der Pumpen.

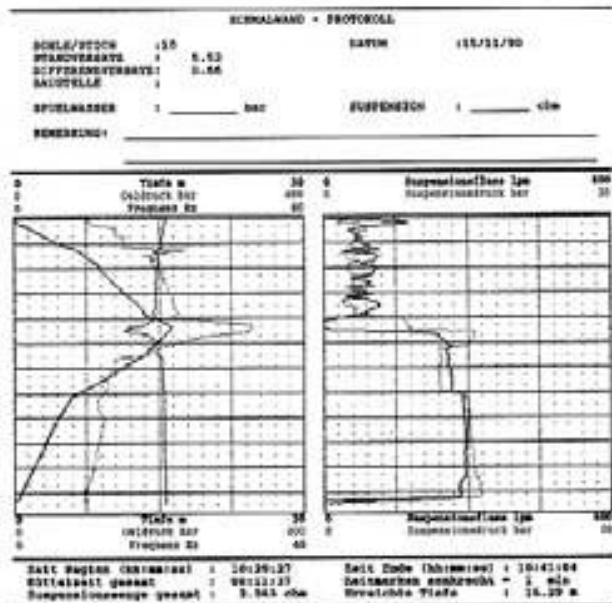


Bild 8: Mobile Datenerfassung

Das ist zur Zeit der Stand der Aufzeichnungstechnik. Zusätzlich kann bei Bedarf noch in Erwägung gezogen werden, die Beschleunigungswerte der Rammereinheit Vibrator und Bohle direkt am Kopf der Bohle zu messen. Damit erhält man genauere Daten über die tatsächlich eingeleitete Energie und kann Rückschlüsse auf die maximalen Schwinggeschwindigkeiten ziehen.

#### Auswertung der Rüttelprotokolle

Mit diesen Daten lassen sich charakteristische Profile für jede eingebrachte Bohle aufzeichnen. Daraus sind die verschiedenen Schichtlagen mit ihren unterschiedlichen bodenmechanischen Werten deutlich zu erkennen. Ein Vergleich dieser Protokolle mit den vorhandenen analogen lokalen Aufschlußbohrungen läßt eine sehr genaue Zuordnung zu den Hauptbodenschichten erkennen.

Damit können die Bohrprofile mit den Rüttelprotokollen kalibriert werden, und es ist möglich, für andere Bereiche, für die nur Bohrprofile vorliegen, eine entsprechende Aussage über die Rammarbeiten zu machen.

Dieses Verfahren ist natürlich eine rein empirische Ermittlungsmethode. Aber über die Zeit konnten sehr viele Werte gesammelt werden, und heute ist man tatsächlich in der Lage, an einem vorhandenen Bohrloch die Geologie rammtechnisch zu kalibrieren. Wird zum Beispiel die Frequenz konstant gehalten, kann man aus den analogen Rüttelprotokollen Rückschlüsse ziehen, wie sich Öldruck und Eindringgeschwindigkeit verändern werden. Somit hat man Aussagen über Abfall oder Anstieg der erforderlichen Leistungsdaten des Vibrators in den wechselnden Bodenschichten und kann dadurch optimale Arbeitsbedingungen schaffen.

## Messungen zur Kontrolle der Umweltbeeinflussung

Zur Kontrolle der Umweltbelastung bzw. Umweltbeeinflussung durch den Rammvorgang sind zusätzliche Messungen erforderlich, die üblicherweise durch externe Meßeinrichtungen erfaßt werden.

### Messung der Lärmemissionen

Lärmbeeinträchtigung ist normalerweise beim Einsatz von Vibratoren der neueren Generationen nicht relevant. Die Geräteeinheiten erfüllen schon ab Werk die Auflagen der einschlägigen Normen oder Vorschriften. Nur in besonderen Fällen kann es durch Querschwingungen zum Scheppern oder Rattern der Bohlen kommen, wenn zum Beispiel vor dem Abrammen ganze Wandteile aufgestellt werden, um diese dann anschließend schrittweise einzuvibrieren. Dazu kann es ebenfalls bei hoch über Grund anstehenden Sollhöhen des Spundwandbauwerks kommen. Die Spülhilfe hat keinen direkt feststellbaren Einfluß auf die Lärmentwicklung der Baustelle, bewirkt aber indirekt durch die Reduzierung der erforderlichen Energie und die Verkürzung der Rammzeiten eine Verringerung der Emissionswerte.

### Messung der Erschütterungen durch Vibration

Erschütterungen, die durch die Rammarbeiten ausgelöst werden, sind ein weiterer Punkt, der entsprechend der gültigen DIN 4150 zu berücksichtigen ist. Bei den Rüttelarbeiten werden sowohl der Bauherr als auch der Unternehmer und das bauende Ingenieurbüro mit den Schwingungserschütterungen konfrontiert. Sie alle müssen die Auswirkungen auf die benachbarte Bebauung, auf Betriebseinrichtungen und auf Personen berücksichtigen.

Zur Beurteilung der Schwingstärke und der Einwirkungen auf Gebäude und Menschen sind die Beurteilungskriterien der DIN 4150, Teile 2 und 3, heranzuziehen. Hier soll nicht auf die Grenzwerte eingegangen werden, da in nachfolgenden Vorträgen die Problematik ausführlicher zur Sprache kommt.

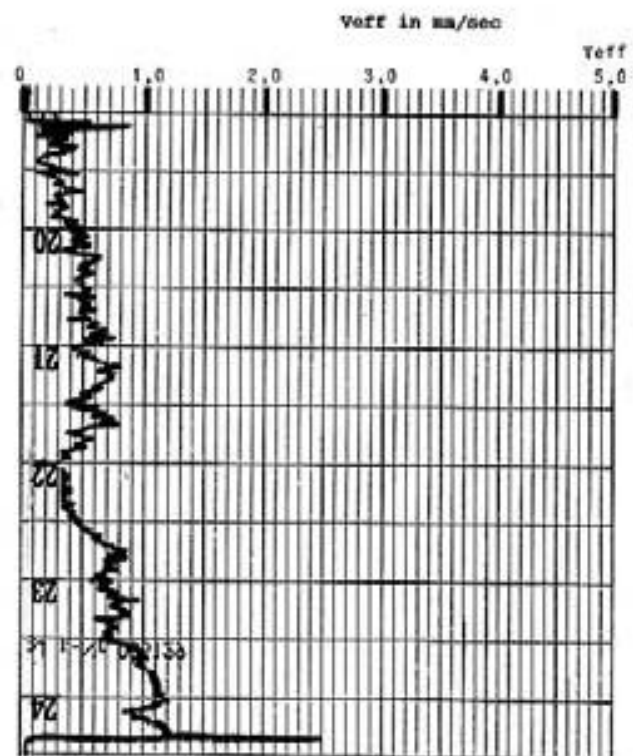
Es ist heute mit den Hochfrequenzgeräten mit verstellbaren Momenten und mit den notwendigen Rammhilfen möglich, in den Bereichen zu arbeiten, die die DIN vorgibt. Damit können auch in innerstädtischen Gebieten die Schwingungsprobleme beim Einbringen von Spundwänden beherrscht werden.

Durch die Hilfsmethoden, wie Niederdruckspülen und Bodenaustausch, können sogar Werte eingehalten werden, die so klein sind, daß sogar in unmittelbarer Nähe von sehr schwingungsempfindlichen Gebäuden mit sehr sensitiven Einrichtungen gearbeitet werden kann.

## Rammverfahren und Rammausrüstung

### Auswahl und Optimierung

Zur Optimierung der Arbeitsabläufe und Auswahl der Rammverfahren und Rammausrüstung sind alle vorher



Maximaler Wert 2.5 mm/sec  
Zulässiger Wert 5.0 mm/sec  
Bild 9: Schwinggeschwindigkeit

aufgeführten Daten und Erkenntnisse erforderlich und in den Entscheidungsprozeß mit einzubeziehen. Nur dadurch kann die Einbringtechnik in ihrer Abhängigkeit von den Bodenverhältnissen erfaßt werden.

Über eine gegebene Datenbank kann die Kalibrierung der örtlichen Bodenuntersuchungen vorgenommen werden. Damit ist es dann möglich, eine erste Aussage über die erforderlichen Kenngrößen des Rammverfahrens zu machen. Diese Kenndaten sind bereits die Leistungsdaten der Maschineneinheit, die erforderlich ist, um die Aufgabe zu bewältigen. Erforderlich sind:

- der Frequenzbereich, in dem gearbeitet werden muß, und damit
- die erforderliche Drehzahl des Vibrators,
- die erforderliche Amplitude, um die Bodenwiderstände zu überwinden, und daraus
- Fliehkraft und statisches Moment des Vibrators, um die erforderliche Leistung zu gewährleisten.

Sind diese Kriterien ermittelt, ist der erste Schritt der Arbeitsvorbereitung getan.

Das eigentliche Problem beginnt auf der Baustelle mit dem Einsatz der ersten Bohle. Hier ist der Fahrer und Operator der Rammeinheit besonders gefordert. Durch Beobachtung und Bewertung der laufenden Meßergebnisse, wie Öldruck im Rüttelkreislauf, Einbringgeschwindigkeit und der Verlauf der Frequenz über die Tiefe, muß der Operator die Leistung des Vibrators überwachen und ständig an die wechselnden Bodenverhältnisse anpassen. Voraussetzung dafür ist, daß ihm

ein ausreichend dimensionierter Rüttler und eine Kraftstation mit genügend Reserven zur Verfügung stehen.

Die neue Rüttlergeneration mit permanent stufenlos regelbaren statischen Momenten und Frequenzen, die jetzt auf den Markt drängt, bietet dafür die besten Voraussetzungen. Endziel dieses Optimierungsprozesses ist die Vision, daß die Meß- und Regeltechnik es in naher Zukunft erlaubt, die Geräte mit den entsprechenden Programmen auszustatten, die automatisch die erforderliche Anpassung an die vorgegebenen Randbedingungen und die wechselnden Bodenverhältnisse vornehmen.

Ob später vollautomatisch oder wie heute noch durch den Operateur: Ziel dieser Abstimmung ist und bleibt, die Auflagen und Grenzwerte bezüglich einer verträglichen Umweltbelastung einzuhalten und mit der möglichen Einsparung an Stoffkosten und wirtschaftlichen Leistungsdaten zu koordinieren.

## Das Produkt Spundwand

### Seine Qualitätsmerkmale

Das Produkt Spundwand hat seinen festen Platz im Spezialtiefbau. Seine geometrischen und physikalischen Daten sind gegeben. Die Spundbohlen sind Fertigungselemente, deren Parameter dem Planer und dem Anwender bekannt sind. Bis auf einen einzigen Faktor: das Einbringen, das immer mit Ungewißheiten verbunden ist. Aber dies ist der einzige Parameter, der ungewiß ist. Alle anderen Dinge sind vorgegeben, und damit steht und fällt die Spundwandbauweise mit dem erfolgreichen Einbringen.

Das Produkt selbst unterliegt einer ständigen Qualitätskontrolle, von der Auswahl der Rohstoffe über die Fließphase bis hin zum fertigen Walzprodukt. Die Qualitätssicherung erfaßt natürlich auch die Endfertigung, wie das Richten und Zuschneiden, das Zusammenziehen und Verpressen der Doppelbohlen und den Versand auf die Baustelle.

Die Rüttelverfahren mit Rammtiefen bis zu 30 m, die heute eingesetzt werden, erfordern eine optimale Verarbeitung des Rüttelguts. Es ist deshalb neben den statischen Werten ein besonderes Augenmerk auf die Geometrie zu richten. Im einzelnen sind das die Richtungstreue, die Flanschparallelität, das Schloßspiel und die gute Verhakung der Schlösser für eine hohe Wasserdichtigkeit.

All diese Eigenschaften sind mit verantwortlich und notwendig, um eine optimale Arbeit mit den Spundbohlen leisten zu können.

Der Einfluß eines hohen Qualitätsstandards ist für den Erfolg der Rammarbeit, für den Leistungsfortschritt und für die Rammgenauigkeit und die Fehlervermeidung unbedingt notwendig und sollte nicht unterschätzt werden.

### Einsatz, Anwendung und Nutzen

Das Produkt Spundwand kommt als permanentes Bauwerk oder als temporärer Verbau zum Einsatz, der wieder vollständig entfernt werden kann. Generell kann jedes Spundwandbauwerk unabhängig von der Lebens- und Nutzungsdauer ohne große Aufwendung rückgebaut werden und erneut als Rohstoff wieder dem Herstellungskreislauf zugeführt werden.

Der Spundwandverbau ist kostengünstig, platzsparend und weitestgehend wasserdicht. Durch den Einsatz von Schloßdichtsystemen kann die Dichtigkeit noch wesentlich verbessert werden.

Spundwandbauwerke können nach den statischen Erfordernissen durch die breite Profillalette optimal angepaßt werden. Der Werkstoff Stahl hat sehr hohe Belastungsreserven, und der Spundwandverbau ermöglicht sehr raschen Baufortschritt.

Die Wasserhaltung mit ihren hohen Betriebskosten kann auf die offene Baugrube beschränkt werden. Kritische Grundwasserabsenkungen mit ihrer immer gegebenen Setzungsgefahr können vermieden werden.

Spundwände können auch in Gewässern eingesetzt werden, in denen ein Schlitzwand- oder Pfahlwandverbau nicht mehr greift. Als Verankerungssysteme stehen sehr vielfältige Konstruktionen zur Verfügung und ermöglichen eine optimale Anpassung an die örtlichen Gegebenheiten.

Spundwände erfüllen Stütz- und Dichtfunktionen durch ein einziges Bauelement. Es sind die mannigfaltigsten Einbringverfahren bekannt, und damit ist fast in jedem Falle eine Anpassung an die örtliche Geologie und an die lokalen Umweltauflagen möglich.

### Literatur

- <sup>1</sup> Dipl.-Ing. S. Mahling: Alles über Vibrationsbären, 1985.
- <sup>2</sup> Dr.-Ing. G. Losansky: Baugrubenumschließungen, 1994.
- <sup>3</sup> Dipl.-Ing. L. Walter: Moderne Rammtechnik - Spundwandprofile, 1992.

## Schwingungsausbreitung beim Einbringen und Ziehen von Stahlpundwänden

Dipl.-Ing. Norbert Gruber, München

In diesem Beitrag sollen die Ergebnisse einer im WS 93/94 am Lehrstuhl für Grundbau, Bodenmechanik und Felsmechanik der TU München von Herrn Dipl.-Ing. Liebschner erstellten Diplomarbeit auszugsweise vorgestellt werden. Anlaß dieser Diplomarbeit war ein angeblicher Schadensfall beim Neubau der Tiefgarage des Hotels Kempinski am neuen Flughafen in München (Bild 1).

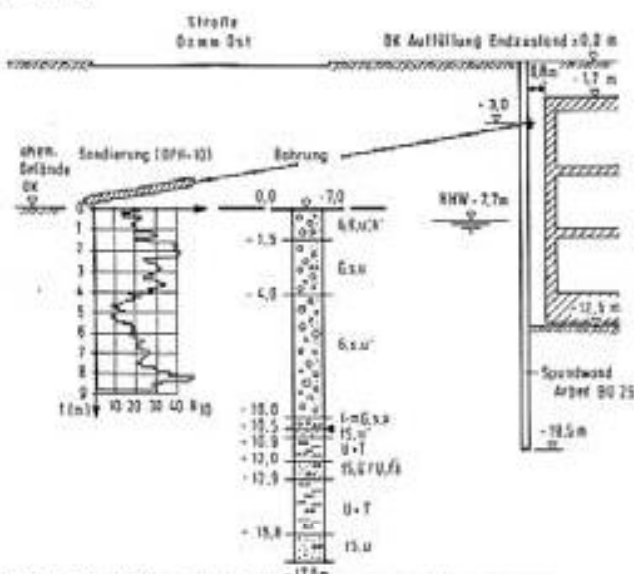


Bild 1: Hotel Kempinski. Schnitt: Spundwand - Tiefgarage.

Der Baugrubenverbau entlang des Damms Ost an der Westseite der Tiefgarage mußte aus Platzgründen mit Spundbohlen ausgeführt werden. Baugrubenverbau, Aushub und Ziehen der Verbauwand waren als eigenes Gewerk getrennt zum Hochbau vergeben. Die Ausführung der Tiefgarage erfolgte in wasserundurchlässigem Beton. Bei katastrophalen Grundwasserständen HHW beträgt der Wasserdruck auf die Sohlplatte ca. 4,8 m. Die Hochbau-Arge behauptete, daß durch die Erschütterungen beim Ziehen der Spundbohlen Undichtigkeiten in der Sohlplatte entstanden seien. Meiner Empfehlung nach Durchführung von Schwingungsmessungen zur Beweissicherung ist der Bauherr nicht nachgekommen, so daß im nachhinein eine Ursachenfeststellung wohl kaum mehr möglich ist.

Etwa zur gleichen Zeit erfuhr ich von den Entwicklungsarbeiten an einem Prognoseverfahren, das auf Grundlage von Bodenkennwerten, Maschinenparametern, Bauwerksdaten und geometrischen Randbedingungen die Erschütterungsemissionen beim Einbringen und Ziehen von Spundbohlen abzuschätzen gestattet. Zur Prüfung der Anwendbarkeit des Prognoseverfahrens auf die Verhältnisse im süddeutschen Raum, und

um solchen wie zuvor geschilderten Fällen nachträglich eine Verursacherwahrscheinlichkeit zuordnen zu können, wurden in Zusammenarbeit mit Arbed und dem Lehrstuhl für Grundbau, Bodenmechanik und Felsmechanik der TU München an Baustellen in München im Rahmen einer Diplomarbeit Schwingungsmessungen durchgeführt und die Meßergebnisse mit den Prognoseberechnungen verglichen.

Mit Herrn Liebschner fanden wir einen Diplomanden, der bereit war, in der äußerst kurzen Zeit von drei Monaten und dazu noch in der für Präzisionsmessungen ungünstigen Winterzeit, sich dieser Aufgabe zu unterziehen. Er wurde dabei von Herrn Dr.-Ing. Trunk als Lehrstuhlassistant und Herrn Dipl.-Ing. Schwarz, zuständig für dynamische Messungen am Prüfamt, betreut und unterstützt. In der vorgelegten Arbeit wurden eigene Messungen an drei Baustellen in München vorgenommen und zusätzlich Archivdaten von weiteren zehn Objekten ausgewertet, an denen Messungen durch das Prüfamt bzw. von Müller-BBM durchgeführt worden waren.

Von diesen möchte ich nun fünf Objekte exemplarisch vorstellen:

- U8/N7 Dülferstraße, München: Ziehen von zwei Doppelbohlen BU 25; Länge ca. 20 m mit Wasserspülung vor Wohngebäude KG, EG, 5. OG (Billfinger + Berger),
- NW-Sammler Heppstraße, München: Einrütteln von Doppelbohlen BU 25; Länge ca. 17 m mit Wasserspülung vor Lagerhalle EG (Techno-Grundbau),
- NW-Sammler, Oberschleißheim: Einrütteln von Doppelbohlen BU 25; Länge ca. 15 m mit und ohne Auflockerungsbohrungen, mit Wasserspülung, keine Bebauung vorhanden (Techno-Grundbau),
- Flughafen S-Bahn, Ismaning: Einrütteln von Doppelbohlen BU 25, Länge ca. 15 m mit und ohne Auflockerungsbohrungen, mit Bodenaustausch, jeweils mit Wasserspülung, vor Fabrikationsgebäude KG, EG, 1. OG (Techno-Grundbau),
- Flughafen München 2: Einrütteln von Doppelbohlen BU 25, Länge ca. 12 m mit Wasserspülung, neben Schmutzwasserkanal 320/200 (Bauer-Spezialtiefbau).

### 1. Meßeinrichtung

Die vom Prüfamt verwendete Meßkette (Bild 2) besteht im einzelnen aus folgenden Komponenten:

- dreiaxiale Meßstation (Meßrichtung x,y,z), bestehend aus drei piezoelektrischen Seismik-Beschleunigungsaufnehmern Typ 393C der Firma PCB Piezotronics, USA, mit eingebautem Verstärker (Auflösung 0.05 mm/s, Empfindlichkeit 1000 mV/g, Arbeitsfrequenzbereich 0.025-800 Hz). Die Aufnehmer sind in drei zueinander orthogonalen Raumachsen auf einer massiven Trägerplatte montiert und bilden so die dreiaxiale Meßstation.
- Zusatzverstärker im Bedarfsfall

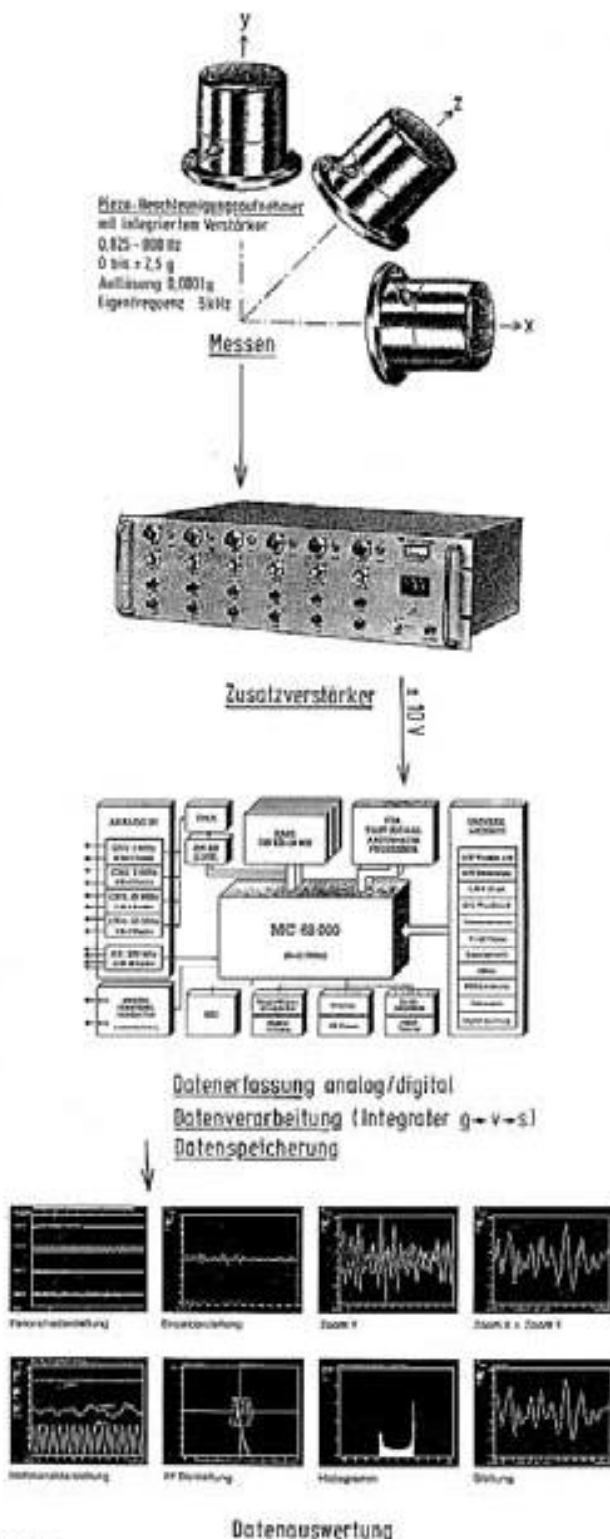


Bild 2

- computergesteuerte Datenerfassungsanlage Typ Multidata III der Firma B + S, München, bestehend aus einem Prozessor mit einer Taktfrequenz von 8 MHz, einem Random Access Memory (RAM) von 8 MByte (4 Mio. Meßwerte), einem A/D-Wandler 12 Bit und einem Meßeinschub für 16 Kanäle mit einer Abtastrate

von bis zu 300 kHz zur Erfassung und Auswertung der Meßsignale. Damit sind in Verbindung mit der Sample- and Holdprozedur langsame und mittelschnelle stationäre sowie transiente Signale quasi gleichzeitig ausreichend lang überwachbar. Die mitgelieferte Software gestattet verschiedene Arten der Datenauswertung und Ergebnispräsentation.

Zu Kalibrier- und Überwachungszwecken, aber auch als Meßstation, wird meist noch eine einaxiale Schwingungsaufnahmervorrichtung (Meßrichtung z) ergänzend eingesetzt:

- elektrodynamischer Absolutschwingungsaufnehmer SM6 mit zugehöriger Verstärker- und Anzeigeeinheit SMU 31 der Firma HBM, Darmstadt. Empfindlichkeit 0.005 mm/s.

Bei den Messungen im Rahmen der Diplomarbeit kamen drei dreiaxiale Meßstationen und eine einaxiale Meßvorrichtung zum Einsatz.

Für die Schwingungsmessungen am Objekt 4 (Flughafen S-Bahn, Ismaning) wurden von Müller-BBM einaxiale Beschleunigungsaufnehmer Typ 8306, Firma Brüel & Kjaer, in Verbindung mit eigenentwickelten Integrator- und Meßverstärkereinheiten verwendet. Die Registrierung der Meßwerte geschah digital über einen Rechner HP 1000 und analog durch einen elektrostatischen Plotter.

Neben den dynamischen Meßwerten werden seit einigen Jahren bei der Herstellung von Spund- und Schmaldichtwänden die Herstellungsparameter direkt an der Rüttel-einheit registriert (Bild 3). Aus den Anfängen der manuellen Protokollführung wurde ein automatisches Aufzeichnungsverfahren entwickelt, das die maßgebenden Herstellungsparameter, wie Öldruck bzw. Leistungsaufnahme am Rüttler, Rüttelfrequenz und Spülmenge bzw. Suspensionsmenge, in Abhängigkeit von der Eindringtiefe und somit der Bodenschichtung registriert und graphisch darstellt. Diese Aufzeichnungen der Herstellungsparameter stellen eine wertvolle Ergänzung der Meßschriebe der Schwingungsaufnehmer dar, insbesondere dann, wenn sich die Schwingungsgeschwindigkeiten mit den Herstellungsparametern korrelieren lassen. Möglicherweise kann in solchen Fällen der Meßaufwand reduziert werden.

## 2. Meßergebnisse und Prognosewerte

Bevor die einzelnen Objekte vorgestellt werden, möchte ich nochmals betonen, daß diese Arbeit einen ersten Versuch im süddeutschen Raum darstellt, mit Hilfe des Prognosesystems die Ausbreitung von Erschütterungen und ihre Einwirkung auf Bauwerke nachzuvollziehen.

Es ist zu bedenken, daß

1. die Messungen während der Wintermonate im laufenden Baubetrieb durchgeführt werden mußten;
2. wegen des Arbeitsfortschritts keine Wiederholungsmessungen für eine spezielle Anordnung möglich waren;



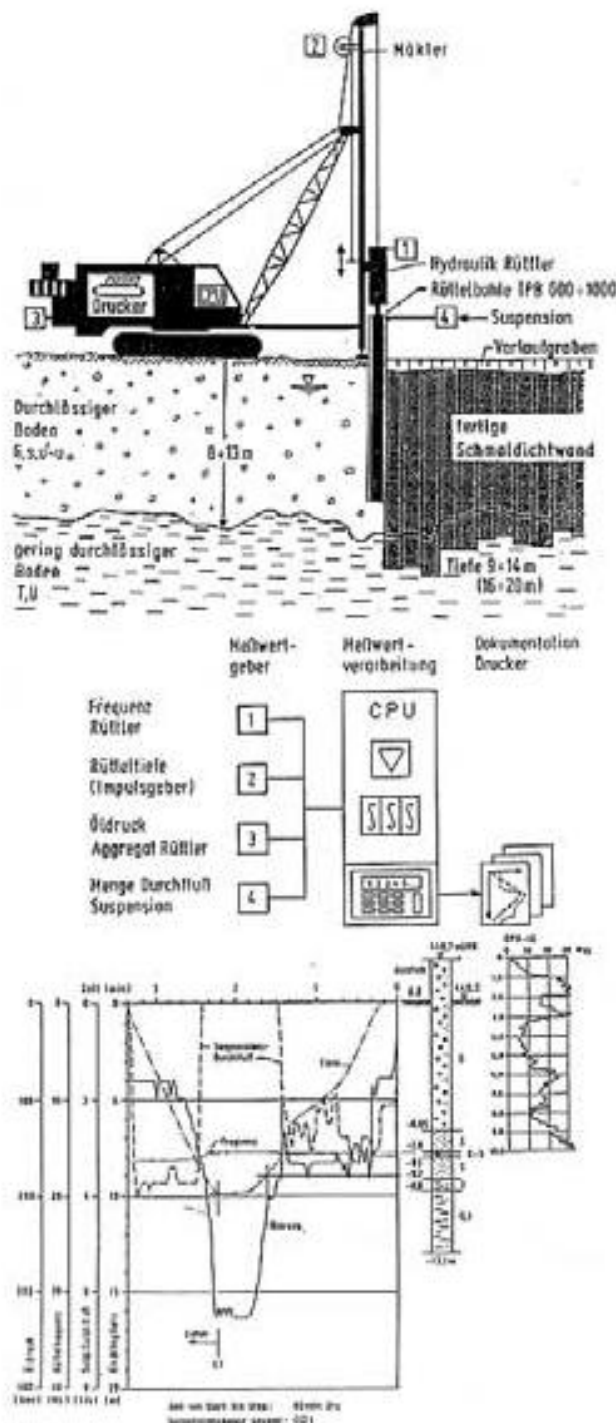


Bild 3

3. am Lehrstuhl noch keinerlei Erfahrungen mit dem Prognosesystem vorliegen;
4. wegen der geringen Anzahl der Messungen ihre Aussagekraft vorsichtig zu bewerten ist;
5. Probleme bei der kraftschlüssigen Ankoppelung der Aufnehmer bestanden. So ist z.B. die Verankerung der Aufnehmer mit Spieß in den grobkörnigen Boden schwierig. Hier sind Eignungsversuche erforderlich, um eine optimale Ankoppelung an die verschiedenen Bodenarten zu gewährleisten. Auch die kraft-

schlüssige Koppelung der Aufnehmer an Bauwerksteilen mit Dübeln wird oft nicht zugelassen. Man hat sich in diesen Fällen mit einer Ballastierung der Aufnehmer beholfen.

Wie die Erfahrungen zeigen, sind künftig weitere Messungen an Baustellen im süddeutschen Raum unter Berücksichtigung der hier üblichen Einbringhilfen, wie Spülen, Auflockerungsbohrungen, Bodenaustausch usw., in enger Abstimmung mit dem Entwickler des Prognosesystems durchzuführen. Ich hoffe, daß diese Anregung von den Baufirmen aufgenommen und bei geeigneten Baustellen eine Fortsetzung der Untersuchungen ermöglicht wird. Der Lehrstuhl ist gerne bereit, weitere Diplomarbeiten zu diesem Thema zu vergeben und zu betreuen.

## 2.1 Allgemeines zum Programm

Das Programm geht von einem stationären Zustand aus. Transiente Schwingungen, die zum Beispiel bei Anfahr- und Ausschaltvorgängen des Rüttlers auftreten, werden nicht berücksichtigt. Das Expertensystem berechnet anhand der Gerätedaten, der Untergrundverhältnisse und der bodenmechanischen Kennwerte sowie der Gebäudedaten die beim Einbringen des Rammgutes auftretenden Schwingungen (Amplituden von Beschleunigung, Geschwindigkeit und Verschiebung) auf dem Boden beispielsweise vor dem Gebäude, im Gebäude und am Fundament, sowie die Horizontalschwingungen des Obergeschosses und die Vertikalschwingungen auf den Geschoßdecken (Auflager, Deckenmitte), und vergleicht diese mit zulässigen Werten.

Zulässig bezieht sich hierbei auf :

- Schäden, die durch unterschiedliche Setzungen des Gebäudes entstehen können,
- Schäden, die durch Gebäudeschwingungen verursacht werden,
- erhebliche Belästigungen der Anwohner.

Werden die zulässigen Werte überschritten, so berechnet das System die maximal mögliche Einbringenergie und den zulässigen Mindestabstand zwischen Erregerpunkt und Immissionspunkt. An das System ist eine Datenbank angeschlossen, die eine Liste von Rammgeräten bzw. Vibratoren enthält. Bei Überschreitung zulässiger Werte werden die Geräte angezeigt, die maximal die Energie der berechneten zulässigen Energie aufbringen können. Ein Gerätevorschlag erfolgt entsprechend, falls das Einbringgerät oder gewisse Geräteparameter, wie zum Beispiel die Drehzahl oder Fliehkraft, im Fall eines Vibrators nicht bekannt sind.

Die für die Eingabe der Bodenart und Bodenparameter ausschlaggebende Schicht ist folgendermaßen definiert:

- bei einer Pfahlgründung ist diejenige Schicht ausschlaggebend, in der die Pfähle gegründet sind,

- bei einer Flachgründung wird die oberste Schicht mit einer Mindestdicke von 5 m als ausschlaggebend angenommen,
- für die einzugebenden Parameter sind Mittelwerte bzw. in dieser Schicht vorherrschende Werte anzusetzen.

Bei den Messungen im Rahmen der Diplomarbeit wurde die tatsächliche Amplitude am Rüttler nicht gemessen. Untersucht wurde jedoch bei der Auswertung der Einfluß auf den Prognosewert, wenn die aufgetretene bzw. erzielbare Amplitude kleiner ist als die im Datenblatt des Rüttlers angegebene. Für die Auswertung der Meßergebnisse mit Hilfe des Prognoseprogramms wurden entweder die Werte aus den Datenblättern des jeweiligen Herstellers oder, wenn vorhanden, aus den Aufzeichnungen der Herstellungsparameter beim Rütteln übernommen.

Die Abweichungen der Prognosewerte von den Meßwerten sind größer Null, wenn die Prognosewerte größer sind als die Meßwerte, kleiner Null, wenn die Meßwerte größer als die Prognosewerte sind.

Für die Beurteilung der Abweichung der prognostizierten Werte von den Meßwerten wird eine prozentuale Abweichung in Abhängigkeit der Schwinggeschwindigkeit  $v$  gebildet:  
 Abweichung (%) =  $(\text{Prognosewert} - \text{Meßwert}) / \text{Meßwert}$ .

**Schnitt**

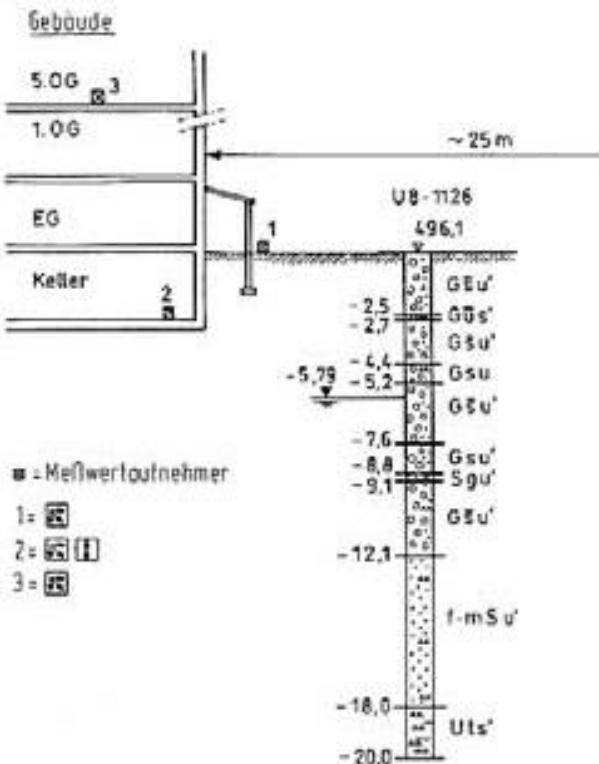


Bild 5

**Logeplan**

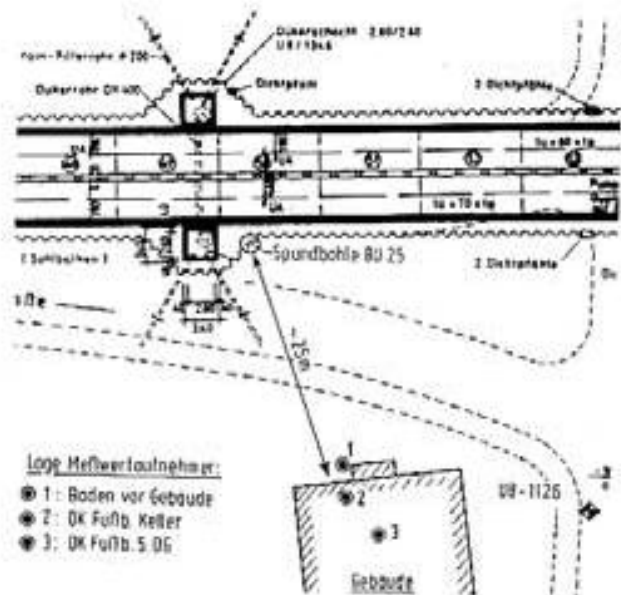


Bild 4

**2.2 Baustelle U-Bahn Linie 8 Baulos 7, Dülferstraße in München**

Die örtliche Situation geht aus Bild 4 hervor.

Unter einem etwa 12 m mächtigen Schichtpaket aus quartären Kiesen mit eingelagerten Verfestigungen folgen die tertiären Böden. Nach den Bohraufschlüssen bestehen sie bis zu einer Tiefe von 18 m unter Gelände aus Sanden, die bis zur Endteufe der Bohrungen von

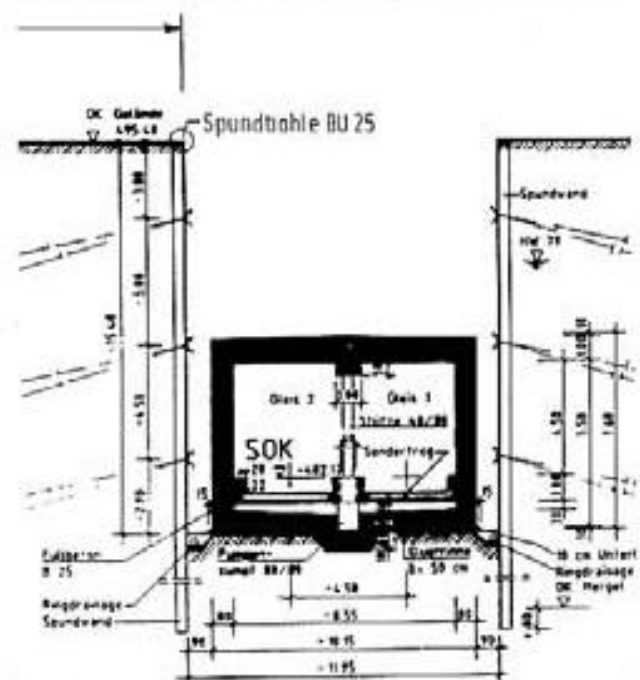


Bild 6

20 m von tonigen Schluffen unterlagert werden. Die Länge der eingerüttelten Doppelbohlen BU 25 beträgt ca. 20 m. Der Abstand der Erregerquelle zum Bauwerk beim Ziehen der Doppelbohlen wurde zu etwa 25 m eingemessen.

Die Anordnung und Art der Meßstationen ist auf den Bildern 5 und 6 dargestellt. Danach wurde eine dreiaxiale Meßstation vor dem Bauwerk auf der Geländeoberfläche und eine weitere im Kellergeschoß zusammen mit einer einaxialen zu Kalibrierzwecken eingesetzt. Die dreiaxiale Station vor dem Bauwerk wurde vor dem Ziehen der zweiten Bohle in das Obergeschoß umgesetzt. Die Bohlen wurden mit einem Rüttler (Fliehkraft 2600/ 2740 kN, Frequenz 38.3 Hz, Amplitude 6.5 mm), der an einem Autokran hing, unter Einsatz von Wasserspülung gezogen. Zum Lösen der Bohlen vom Boden wurde der Rüttler nach Erreichen der eingestellten Frequenz kurz abgesenkt, die Bohle dann nach dem Frei- bzw. Losrütteln gezogen.

Die Messungen beinhalteten nur das zügige Ziehen der Bohlen. Die Vorgänge beim Lösen der Bohle wurden meßtechnisch nicht erfaßt. Die maximalen Schwingungen traten, wie dies zu erwarten war, beim Lockern der Bohle auf. Während des Ziehens waren die Schwinggeschwindigkeiten dann deutlich geringer. Eine Zusammenstellung der Meßergebnisse ist in der folgenden Tabelle enthalten.

Frequenz 1/s	Standort Gebir	Abstand Erreger	V <sub>z</sub> mm/s	V <sub>trans.</sub> mm/s	V <sub>max</sub> mm/s
33	Funda- ment	24.5 m	0.6	Werte nicht brauch- bar	0.5
33	Boden	24.5 m	0.8	0.8	0.7
33	Funda- ment	24.5 m	0.7	0.4	0.7
33	Decke 5. OG	3 x 5 m	2.4	0.35	0.75

Die aus den Meßwerten ermittelten Resonanz- und Übergangsfaktoren ergaben nachstehende Werte:

Übergangsfaktoren:  
 vertikal  $D = 0.75$   
 horizontal senkrecht zur Geb. Wand  $D = 0.71$

Resonanzfaktoren (Fundament - 5. OG):  
 vertikal 3.7fach  
 horizontal senkrecht zur Welle 0.88fach  
 horizontal parallel zu Welle 1.07fach

Die Horizontalschwingungen wiesen geringe Amplituden auf. Ein meßbarer Unterschied zwischen der x- und y-Richtung bestand nicht. Die Bohle wurde beim Ziehen nicht oder nur gering zum Flattern angeregt.

Vor allem beim Ziehen der Spundwände ist die Festlegung der maßgebenden Bodenschicht für das Prognoseverfahren bis jetzt noch schwierig, da im vorliegenden Fall der Spundwandfuß in den festen kohäsiven

tertiären Schichten verankert ist, so daß in der Regel nur während des Freirüttelns hohe Schwinggeschwindigkeiten auftreten werden. Das Fundament des Gebäudes ist jedoch in den quartären Kiesen mit anderen Festigkeitseigenschaften gegründet.

Der Vergleich der Meßwerte mit den Prognosewerten ist auf Bild 7 zusammengestellt. Wie das obere Diagramm belegt, ergibt sich bei den verglichenen Bodenarten die beste Näherung für einen Kiesboden, da hier die Prognosewerte der Gebäudeschwingungen am meisten zur sicheren Seite tendieren.

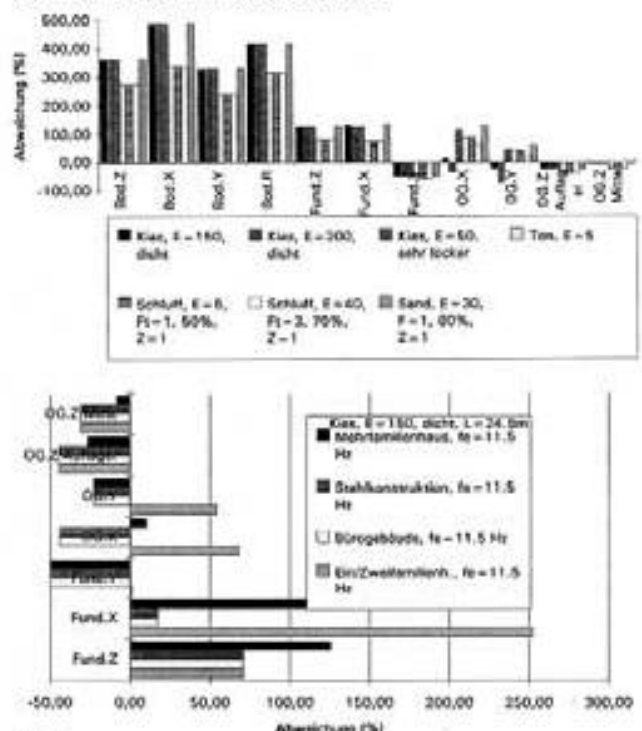


Bild 7

Die prognostizierten Schwingungen lagen mit 250 % bis 400 % unabhängig von der als maßgebend angegebenen Bodenart deutlich über den gemessenen. Die gemessenen Gebäudeschwingungen lagen zum Teil über (100 %), zum Teil unter (-50 %) den vorhergesagten. Generell werden die Gebäudeschwingungen am besten prognostiziert. Da der Steifemodul des Bodens ( $E_s$ -Modul) bei der uns zur Verfügung stehenden Fassung des Prognoseprogramms für jede Bodenart leider mit einem Vorgabewert besetzt ist, führt eine Änderung des  $E_s$ -Moduls in der Eingabe zu keinen anderen Prognoseergebnissen.

Unter Idealisierung des vorhandenen Gebäudes als Mehrfamilienhaus ergeben sich nach dem unteren Graph die zutreffendsten Prognosewerte. Die Vertikalschwingungen im Gebäude werden um bis zu 30% unterschätzt, wenn wie für den vorliegenden Fall zutreffend ein Mehrfamilienhaus als Gebäudeart angegeben wird. Bei den Fundamentalschwingungen liegen die Prognosewerte zum Teil über (x, z-Richtung), zum Teil unter (y-Richtung) den Meßwerten.

Den starken Einfluß der Schwingungsamplitude auf die prognostizierte Schwinggeschwindigkeit zeigt **Bild 8**. Dies unterstützt die Anregung vom Entwickler des Prognoseprogramms, neben den Gebäude- und Bodenschwingungen immer auch den tatsächlichen Verlauf der Rüttleramplitude zu messen. Eine Überschätzung der resultierenden Bodenschwingungen durch das Prognoseprogramm aufgrund der Verwendung der Nennamplituden aus dem Datenblatt, die meist über den tatsächlich gemessenen liegen, kann somit vermieden werden. Die Gebäudeschwingungen sind nochmals eigens zu diskutieren.

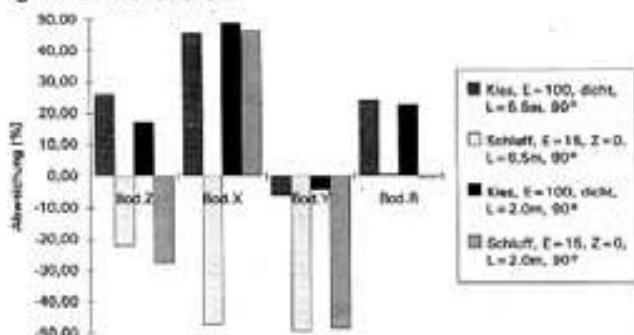


Bild 8

### 2.3 NW-Sammler Huppstraße in München

Für den Bau eines Abwassersammlers mußten neben einer bestehenden Lagerhalle im Norden von München bis zu 17 m lange Doppelbohlen bis in wasserundurchlässige bindige tertiäre Schichten eingerüttelt werden. Der Bodenaufbau und die örtliche Situation ist auf **Bild 9** skizziert. Etwa 11 m mächtige quartäre Kiese von dichter bis sehr dichter Lagerung mit schichtweisen Verfestigungen überlagern das Tertiär, das in starkem Wechsel feste feinsandige Schluffe und dichte schluffige Feinsande bis zur Aufschlußtiefe von 16 m unter Gelände aufweist. Die Doppelbohlen BU 25 binden aus Sicherheit gegen Sohlaufbruch bis ca. 3 m unter die Kanalsohle ein.

Zum Zeitpunkt der durchgeführten Schwingungsmessungen betrug der Abstand der Erregerquelle zur eingeschossigen Lagerhalle etwa 16 m. Das Konzept der Anordnung der Meßstationen sah am Köcherfundament mit den Abmessungen von ca. 2 x 2 m eine dreiaxiale kombiniert mit einer einaxialen Meßstation sowie in verschiedenen Entfernungen zwei dreiaxiale Meßstationen am Boden vor, wobei die Bodenstationen im Laufe der Messungen mehrfach versetzt wurden (**Bild 9**).

Die Meßstationen am Fundament durften nicht angedübelt und mußten daher ballastiert werden, so daß wegen des nicht einwandfrei kraftschlüssigen Kontaktes eher zu kleine Schwingungsamplituden am Fundament gemessen wurden. Die Messungen am Boden erfolgten entlang der Verbindungslinie zwischen Bohle und Fundament sowie senkrecht zur Spundwandachse. Die Bohlen wurden mit einem Rüttler PTC 46 HF1 (Fliehkraft 2600 kN, statisches Moment 451 kNm, Frequenz 37.8 Hz, Amplitude 5.6 mm), der an einem Trägergerät

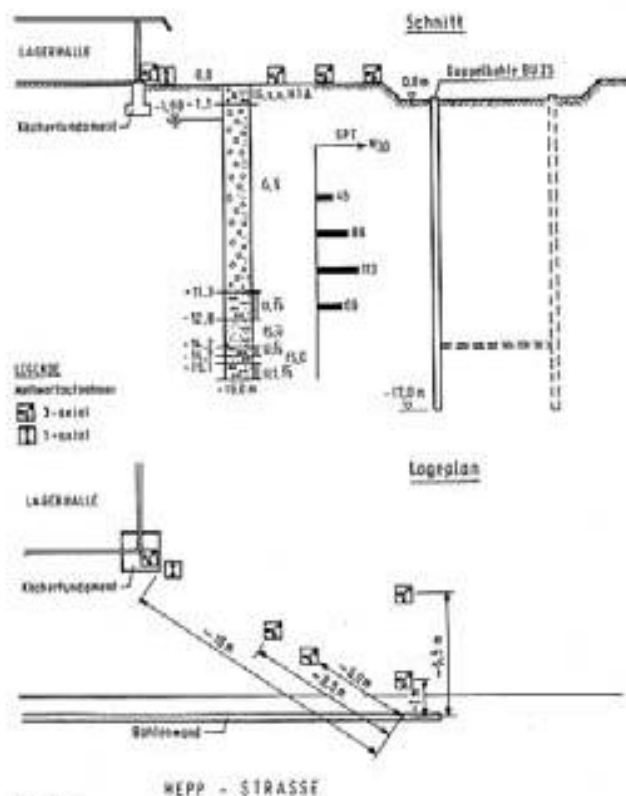


Bild 9

SW 190 mit Mäklor geführt wurde, unter Einsatz von Wasserspülung, jedoch ohne Auflockerungsbohrungen eingebracht.

Zwischen den Amplituden der Aufnehmer parallel und senkrecht zur Bohlenachse wurde im Nahbereich kein wesentlicher Unterschied festgestellt. Dies kann sowohl mit dem vorsichtigen Einrütteln der Bohlen als auch mit der achsunabhängigen Erschütterungsintensität im Nahbereich (< 7 m) zusammenhängen. Eine gute Übereinstimmung in den Verläufen der Schwinggeschwindigkeiten war selbst bei nebeneinander eingerüttelten Bohlen nicht erkennbar. Eine grobe Verhaltensähnlichkeit ist jedoch angezeigt. Die für die Auswertung im Prognoseprogramm verwendeten Übergangsfaktoren Boden - Fundament wurden aus den Meßwerten bestimmt und betragen:

$$U_z = 0.3 \text{ (aus den Meßwerten ca. } 0.38 - 0.42)$$

$$U_x = 0.1/0.3$$

$$U_y = 0.1/0.2$$

Nach den Ergebnissen der auf **Bild 10** dargestellten Auswertungen stimmen bei Annahme einer Stahlkonstruktion für die vorhandene Holzlagerhalle die Meß- und Prognosewerte am ehesten überein. Die Bodenschwingungen werden überschätzt, die Fundamentalschwingungen teilweise über- und teilweise um bis zu 30 % unterschätzt.

Durch die vergleichende Auswertung verschiedener Rüttlerdaten ergibt sich, daß eine geringe Variation der Fliehkraft um 2 % und der Schwingungsamplitude um 18 % die prognostizierten Schwingungswerte um 10 %

Frequenz	Standort Geber	Abstand Erreger	$V_z$ mm/s	$V_{max}$ mm/s	$V_{10}$ mm/s	$V_{max,stat}$ mm/s	$V_{max,dyn}$ mm/s
34 - 35	Boden	6, 8,5, 16 m	2,1 - 7,5	10 - 12	7 - 21	---	---
36	Boden	2, 6,5, 16 m	2,5 - 35	---	---	1 - 35	0,4 - 35
34 - 35	Fundament	16	1 - 1,2	0,5 - 1	0,5 - 1,4	---	---
36	Fundament	16	1,1	---	---	1	0,4

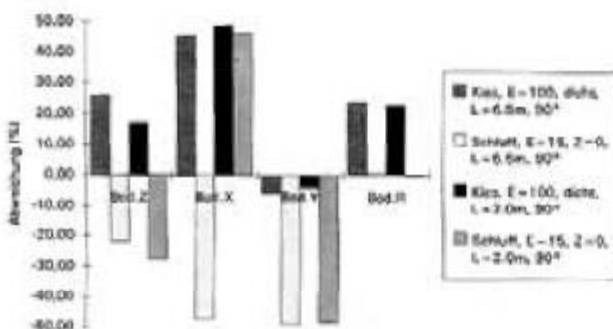
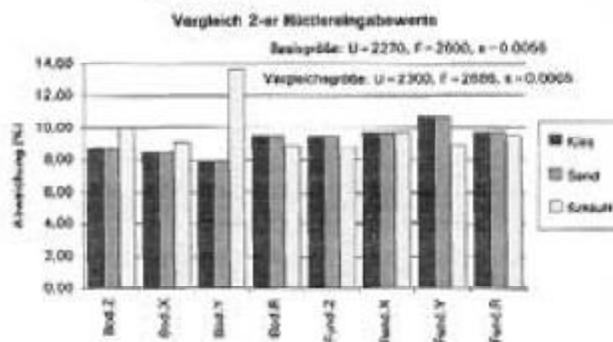
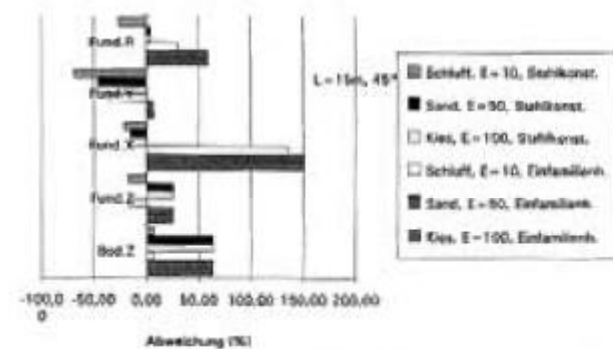


Bild 10

verändern. Wird als maßgebende Bodenschicht der quartäre Kies bestimmt, sind die Prognosewerte der Bodenschwingungen um bis zu 50 % größer als die Meßwerte. Wird die Schicht angegeben, in die die Bohlen einbinden (tertiäre Schluff), werden die Bodenschwingungen um bis zu 40 % unterschätzt.

Die Resultierende der Bodenschwingungen ergibt für den Kies Überschätzungen der prognostizierten Werte bis zu 25 %, wogegen beim Schluff als maßgebende Bodenschicht eine gute Übereinstimmung der Meß- mit den Prognosewerten erreicht wird.

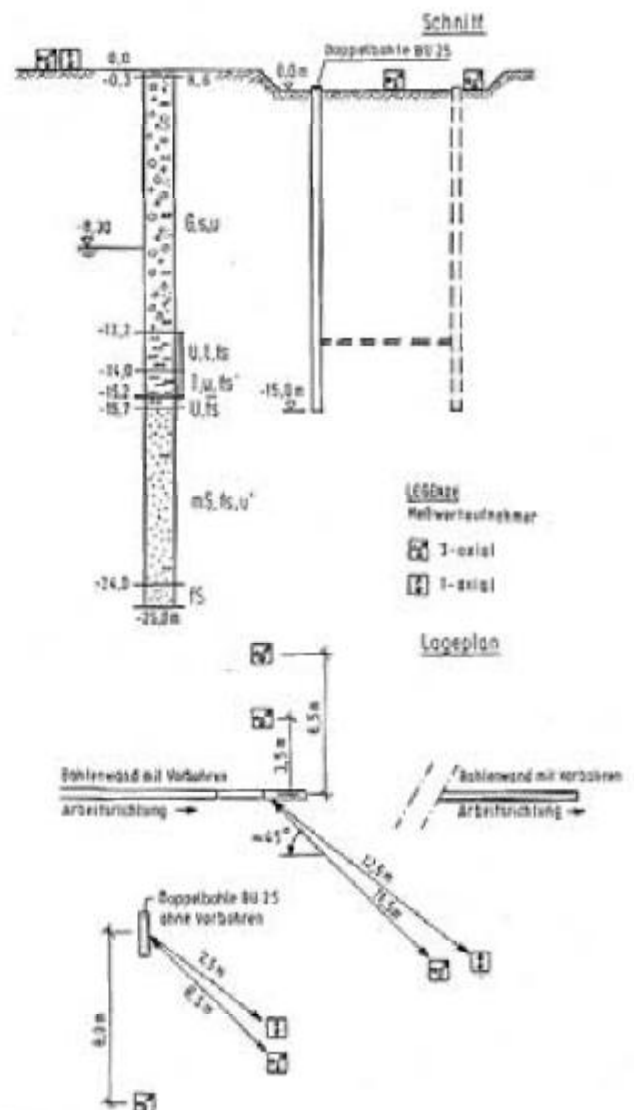


Bild 11

## 2.4 NW-Sammler Oberschleißheim

Auch hier steht die typische Münchner Bodenschichtung an (Bild 11). Unter etwa 12 m mächtigen quartären Kiesen von dichter bis sehr dichter Lagerung folgt die bindige tertiäre Deckschicht aus sandigen Schluffen und Tonen, die ab einer Tiefe von ca. 16 m tertiäre Feinsande überlagern. Die Länge der Doppelbohlen BU

25 beträgt 15 m, so daß eine ausreichende Einbindung in das bindige Tertiär gewährleistet ist.

Der anstehende, zum Teil sehr dicht gelagerte und lagenweise verfestigte Kies wurde vor dem Einrütteln der Doppelbohlen mit einer Schnecke mit einem Durchmesser von 750 mm auf Lücke bis ca. 1 m über der planungsgemäßen Endtiefe aufgelockert. Die Bohlen wurden mit einem Rüttler MS 47 HF (Fliehkraft 2600 kN, statisches Moment 470 kNm stufenlos verstellbar, Frequenz 37.4 Hz, Amplitude 5 mm), der an einem Trägergerät L 841 mit Mäklar geführt wurde, unter Einsatz von Wasserspülung eingebracht. Für das Meßprogramm wurde eine Doppelbohle auch ohne Vorbohren eingerüttelt.

Als zweckmäßige Anordnung der Meßstationen am Boden wurden neben einer dreiaxialen in Kombination mit einer einaxialen Meßstation mehrere dreiaxiale Stationen in verschiedenen Entfernungen ausgewählt, die im Verlauf der Messungen nach Bedarf versetzt wurden. Der diagonale und senkrechte Abstand der Erregerquelle zu den Meßstationen im freien Gelände betrug zwischen 7.5 m und 12.5 m.

Eine Zusammenfassung der Meßergebnisse zeigt die nachstehende Tabelle:

mit Vorbohrung					
Frequenz 1/s	Standort Geber	Abstand Erreger	$V_z$ mm/s	$V_{max}$ mm/s	$V_{110dB}$ mm/s
30	Boden	12.5 m	1.5	---	---
		11.5 m	2.2	4	4
		3.5 m	9	30	12
33	Boden	12.5	1.2	---	---
		11.5	3	Werte nicht brauchbar	3.5
		6.5	4.2	13.5	4.2
ohne Vorbohrung					
38	Boden	7.5 m	5		
		8.5 m	Werte nicht brauchbar	4	Werte nicht brauchbar
		8.0 m	20	15	25

Trotz der geringen Anzahl der Messungen lassen sich folgende Tendenzen erkennen:

- Die Rüttelzeit mit Vorbohren betrug 6 bis 10 min. Ohne Vorbohren verdoppelte sie sich auf ca. 14 min. Ebenso lagen die Schwinggeschwindigkeiten ohne Vorbohren ca. zwei- bis dreimal so hoch wie mit Auflockerungsbohrungen.
- Auffallend ist das ausgeprägte Flattern der Bohle, das senkrecht zur Spundwand im Vergleich zur Spundwandachse zu zwei- bis dreifachen horizontalen Schwinggeschwindigkeiten führte.
- Messungen in einem geringeren Abstand als 3.5 m von der Bohle sind schwierig, da die auftretenden

Schwingungen dort nicht mehr stationär, sondern transient sind und die bei der Prognose verwendete Theorie nicht mehr zutreffend ist.

Bild 12 zeigt den Vergleich der Schwinggeschwindigkeiten entlang der drei Meßachsen für die Einbringverfahren mit und ohne Vorbohren. L bezeichnet die Entfernung der Aufnahme vom Erreger. Bei Annahme von

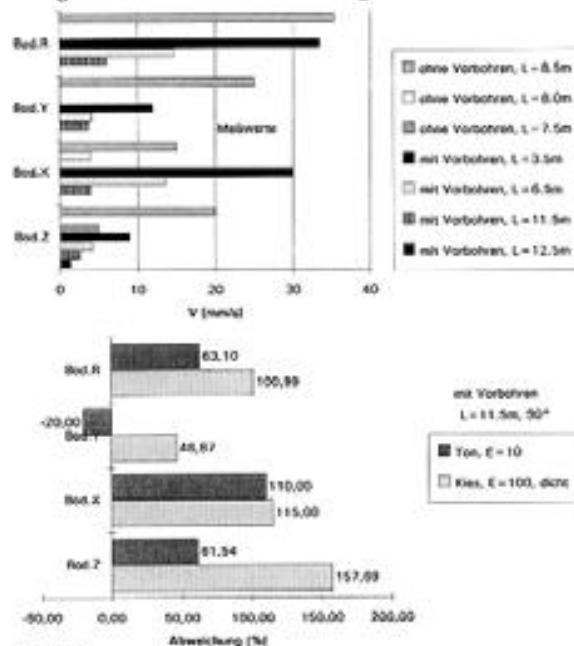


Bild 12

Kies als maßgebende Bodenschicht läßt sich mit Vergrößerung von L oder Zunahme des Winkels keine Verbesserung oder Verschlechterung der Abweichungen der prognostizierten Erschütterungswerte feststellen.

Bei Annahme von Ton als maßgebende Bodenschicht weist die prozentuale Abweichung eine geringere Schwankungsbreite auf. Insgesamt hat sich in diesem Fall eine bessere Näherung der Prognose- mit den Meßwerten ergeben. Dies liegt offensichtlich in der weicheren Bettung der Bohle im vorgebohrten Boden.

Im Fall des Vorbohrens wurden die auftretenden Schwinggeschwindigkeiten durch das Prognoseprogramm in der Regel überschätzt. Ohne Vorbohren (Bild 13) werden die Schwingungen deutlich unterschätzt. Die Unterschiede zwischen Kies und Ton als maßgebende Bodenschicht sind sehr gering. Schichtförmige Verfestigungen als mögliche Ursache der zu gering prognostizierten Schwinggeschwindigkeiten können wegen der programmseitig eingestellten Kennwerte für den Kies nicht berücksichtigt werden.

## 2.5 Flughafen S-Bahn Ismaning

Die Aufgabe dieser Rüttelversuche vor Baubeginn des S-Bahnhofes Ismaning war, die Auswirkungen auf die benachbarten Baulichkeiten zu untersuchen und insbesondere zu prüfen, ob betriebsbedingte Maximalwerte



bäudes durchschnittlich um 60 % zu gering prognostiziert werden (Bild 15).

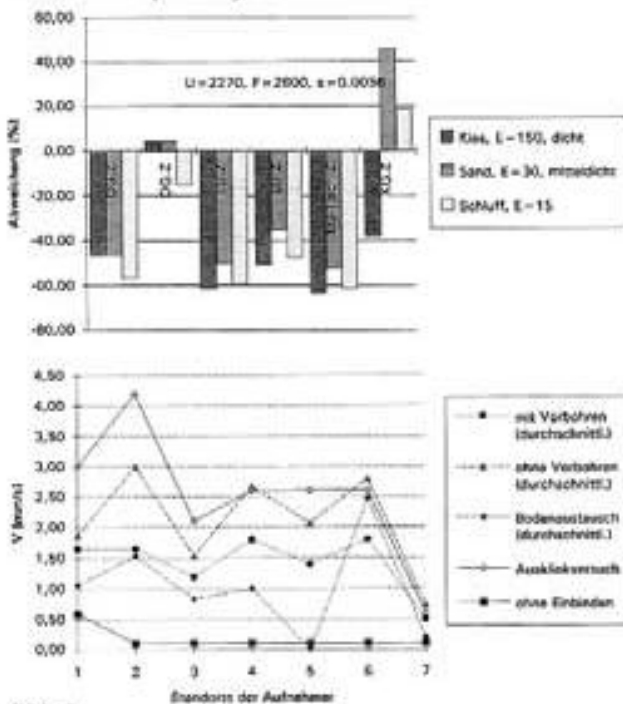


Bild 15

Für Schluff und Sand als maßgebende Bodenarten mit verschiedenen Bodeneigenschaften gibt es bei leicht veränderten Rüttlerwerten nur geringe Unterschiede in den Prognosewerten. Auch hier ist die modellkonforme Umsetzung der verschiedenen Einbringhilfen noch unbefriedigend. Da bei diesen Rüttelversuchen sehr umfassend und ausreichend dokumentiert gemessen wurde, können in einer Fortsetzung dieser Arbeit ergänzende Auswertungen mit einem Rechenprogramm vorgenommen werden, bei dem die Bodenparameter variierbar sein müssen.

Die Grafik auf Bild 15 unten verdeutlicht den unterschiedlichen Einfluß der Einbringmaßnahmen wie

- Auflockerungsbohrungen,
- Bodenaustausch,
- Ausklinkversuch und
- Rütteln ohne Einbindung in das Tertiär

auf die Schwinggeschwindigkeitsamplituden.

Die höchsten Werte wurden am Standort 2 (Boden, 20 m Abstand zur Rüttelachse), Standort 4 (Erdgeschoß Fußboden) sowie am Standort 6 (Erdgeschoß auf Isoliertisch) gemessen. Zusammenfassend hat sich ergeben, daß nach DIN 4050, Teil 3, für transiente Schwingungen und für stationäre Schwingungen unabhängig vom gewählten Rüttelverfahren für Gebäude im Abstand von etwa 20 m zum Erreger keine Schäden zu erwarten sind, was auch Erfahrungen belegen. Lediglich für die im Fabrikationsgebäude betriebenen, besonders schwingungsempfindlichen Apparaturen und für den Computerraum waren Maßnahmen zur Schwingungsisolierung empfohlen worden.

## 2.6 Flughafen München 2 Luftpostleitstelle

Im Achsenabstand von 7 m zum bereits vorhandenen Schmutzwasserkanal (Maulprofil 320/200) verlief die Baugrubenumschließung. Sie bestand aus einer kombinierten Spund- und Schmaldichtwand, die ausreichend tief bis in das wasserundurchlässige bindige Tertiär einbinden mußte. Die Ansatzhöhe der Verbauwand lag ca. 1.5 m tiefer als der Rohrscheitel des Kanals (Bild 16).

Die Untergrundverhältnisse entsprechen denen der zuvor beschriebenen Objekte und sind typisch für den nördlichen Bereich der Münchener Schotterebene. Das Liegende der schichtweise dicht bis sehr dicht gelagerten quartären Kiese bilden ab 7.5 m Tiefe tertiäre sandige halb feste Schluffe und Tone bis ca. 15 m, die bis in unbekannte Tiefen schluffige Feinsande überlagern.

Die Länge der Doppelbohlen BU 25 bzw. die Tiefe der Stiche der Dichtwand betragen wegen der zur Verhinderung eines Schlaufbruchs notwendigen Einbindung von etwa 4 m in das bindige Tertiär bis zu 12 m.

Die Spundbohlen und die Rüttelbohle der Dichtwand wurden mit einem Rüttler Müller H 50 (Fliehkraft 1400 kN bei 27.5 Hz, Amplitude 23 mm), der an einem Trägergerät SW 190 mit Mäklar geführt wurde, jeweils unter Einsatz von Wasserspülung (Spundbohlen) bzw. Suspensionszugabe (Dichtwand) eingebracht. Auf dem Trägergerät war eine Meßeinrichtung installiert, mit der während des Rüttelvorganges automatisch die Eindringtiefe, die Rüttelfrequenz und der Öldruck in Abhängigkeit der Rüttelzeit tiefenabhängig protokolliert wurden.

Zur kraftschlüssigen Installation der beiden dreiaxialen Meßstationen und der zu Kalibrierzwecken zusätzlich eingesetzten einaxialen Meßstation wurde der Rohrscheitel des Schmutzwasserkanals an den vorgesehenen Meßquerschnitten auf einer Länge von jeweils 1.5 m freigelegt. Der Abstand der Erregerquelle zu den Meßstationen diagonal und senkrecht zur Arbeitsrichtung lag zwischen 6 m und 12 m.

Bei Rüttelzeiten zwischen 5 und 12 Minuten mit Arbeitsfrequenzen zwischen 19 und 24 Hz betrug die gemessene maximale Schwinggeschwindigkeit  $V_z = 8.1$  mm/s bei einem Abstand des Rüttlers von 8 m, und die horizontale Amplitude bei einem Erregerabstand von 6 m sogar  $V_{H,1} = 10.9$  mm/s.

Als weitere Beweissicherungsmessung wurden nach Abschluß der Rüttelarbeiten mit einem Feinnivellement an 11 Punkten des Kanalscheitels Setzungsmessungen vorgenommen, die aber keine vertikale Lageveränderung des Kanals anzeigten. Da das Niveau der gemessenen Schwinggeschwindigkeiten selbst und auch die einschlägigen Regelwerke keine eindeutige Aussage über Schadenswahrscheinlichkeiten zuließen, wurde eine Kanalbegehung empfohlen. Die augenscheinliche Beurteilung der Innenseite des Kanals zeigte keine Schäden.



Nivellements an Kanälen bei den Rollbrücken NW und SW, bei denen der Abstand zwischen Spundwand und Kanal nur 1.5 m betrug, belegten Setzungen in einer Größenordnung von 0.4 - 2.1 mm (Brücke NW) und von maximal 7 mm (Brücke Südwest) bei vergleichbar hohen Schwinggeschwindigkeiten senkrecht zur Rohrachse. Eine Begehung des Kanals entlang der Rollbrücke SW nach Abschluß der Rüttelarbeiten ergab Risse in der Kanalwandung, die saniert werden mußten.

Bild 16 zeigt die Zunahme der Schwinggeschwindigkeitsamplituden  $V_z$  und  $V_{H \perp}$  in Abhängigkeit des Abstandes Erregerstandort - Meßstation. In die Auswertung wurden auch die Ergebnisse der Schwingungsmessungen an der Rollbrücke NW, die hier nicht näher beschrieben sind, mit einbezogen.

Im Vergleich der prognostizierten mit den aus den Meßergebnissen entfernungsabhängig abgeleiteten Schwinggeschwindigkeitskurven ist festzustellen, daß die Streuung der prognostizierten Werte wesentlich geringer ist, die entsprechenden Ausgleichskurven flacher verlaufen und die Meßkurven schneiden. Daraus läßt sich ableiten, daß beispielsweise die Prognosewerte  $V_z$  gegenüber den Meßwerten  $V_z$  für den Abstand von ca. 0 - 7 m immer unterschätzt und für Abstände > 7.5 m immer überschätzt werden.

### 3. Zusammenfassung

Die nachstehenden Wertungen erfolgen auf der noch relativ geringen Basis vorhandener Messungen an Bauwerken. Für die praxiserichte Ausreifung des Prognoseverfahrens ist es notwendig, weitere Messungen im süddeutschen Raum unter Einbeziehung der hier geäußerten Rammtechniken durchzuführen. Dabei ist es notwendig, zuvor das Konzept des Meßprogrammes gemeinsam mit dem Aufsteller des Programmes festzulegen und dann mit möglichen Eingriffen in das Versuchsprogramm versuchsbegleitend die Meßergebnisse in enger Abstimmung auszuwerten.

Die prognostizierten Schwingungen im Boden werden in der Regel überschätzt. Im Falle vorhandener Verfestigungen im Boden werden sie zu niedrig prognostiziert. Der Steifemodul  $E_s$  muß als variabler Eingabeparameter gewählt werden können, da ansonsten eine Anpassung des Modells an unterschiedliche Baugrundverhältnisse (zum Beispiel geschichteter Baugrund mit wechselnden Festigkeitseigenschaften) als nicht möglich erscheint. Die Amplitude des Rüttlers als maßgebende Eingangsgröße sollte direkt am Rüttler gemessen werden. Damit ist auch eine bessere Anpassungsmöglichkeit der Übergangsfaktoren vom Boden zum Bauwerk möglich.

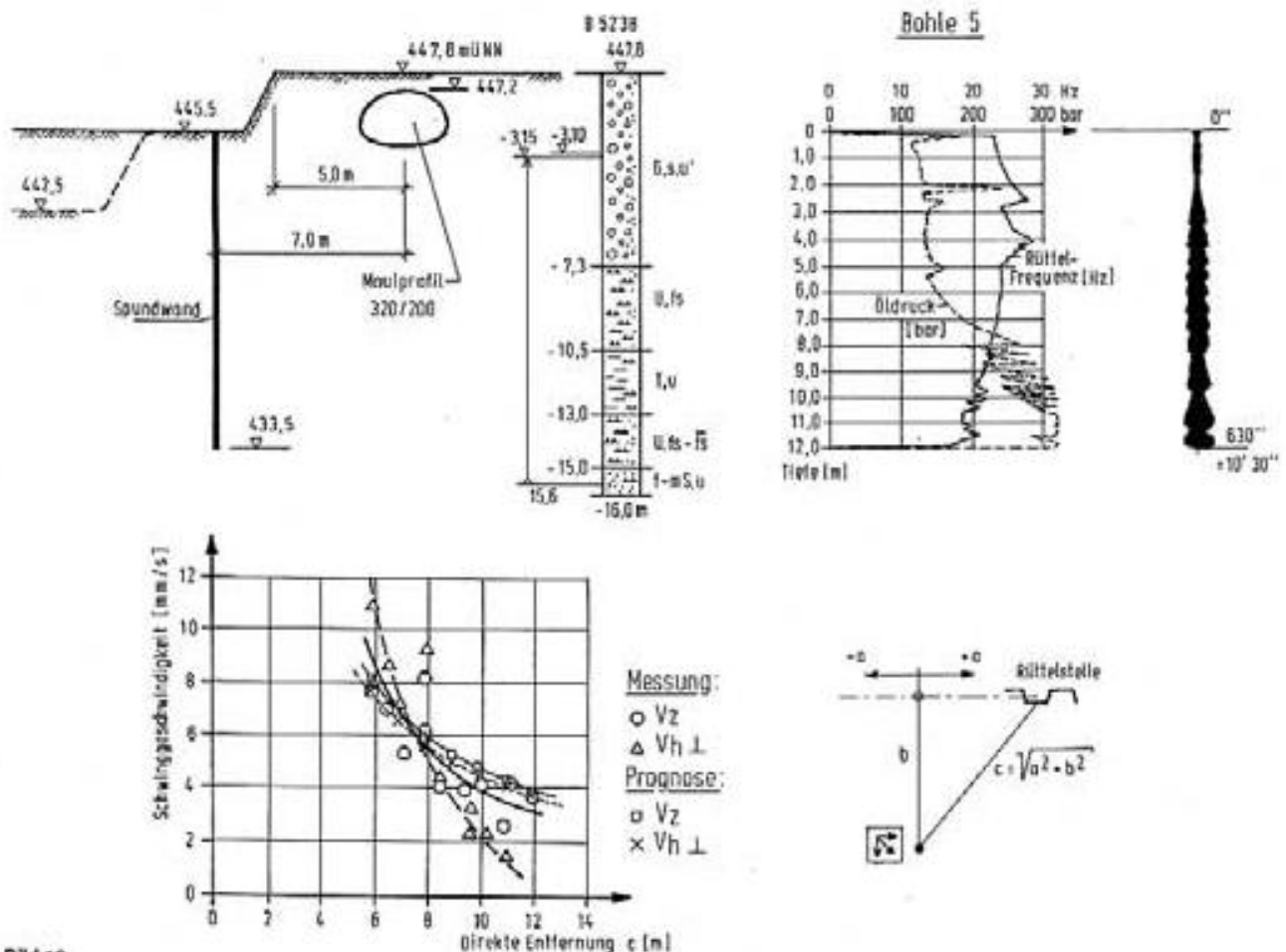


Bild 16

Trotz einer in situ häufig gegenüber den Katalogdaten geringeren gemessenen Amplitude des Rüttlers ergeben sich zu hohe prognostizierte Gebäudeschwingungen. Es ist anzunehmen, daß bei den im Raum München maßgebenden Bodenarten höhere Übertragungsfaktoren bei der Schwingungsübertragung vom Boden auf das Gebäude relevant sind als die bisher im Programm voreingestellten. Die gemessenen Werte lagen zum Teil über 0.45. Eine Kalibrierung des Programms für regional unterschiedliche Bodenverhältnisse scheint erforderlich zu sein.

Ebenso bedarf es einer Ergänzung des Prognoseverfahrens, um einerseits den Einfluß von Einbringhilfsmassnahmen wie Lockerungsbohrungen, Vorbohren mit Bodenersatz und Spülen zumindest ansatzweise (Dämpfungsfaktor, Bettungsmodul) quantifizieren und andererseits die Auswirkungen auf unterirdische Bauwerke erfassen zu können.

# Stahlpundwand und Sicherung von Altlasten: Auswahl von Stahlpundwand-Dichtungssystemen

Dr.-Ing. Magret Geil, Bochum

## 1. Einsatz der Stahlpundwand in Dichtungssystemen

Die Anwendung von Spundwänden als statisch wirksame und abdichtende Konstruktionselemente im Wasser- und Hafenbau sind seit Jahrzehnten erprobt und bewährt. Die Abdichtungswirkung wird in neuerer Zeit speziell im Deponiebau sowie zur Sanierung von Altlasten vermehrt genutzt. Spundwände können dabei als zusätzliche bzw. alleinige Dichtungskomponente in unterschiedlichen Dichtwandssystemen eingesetzt werden.

Von 14 bereits in situ erprobten Dichtwandssystemen (Bild 1) sind hier zu nennen:

- Spundwand
- Schlitzwand im Einphasen-Verfahren mit eingestellten Spundwandprofilen
- Schlitzwand im Zweiphasen-Verfahren mit eingestellten Spundwandprofilen
- Spundwand mit Bohrpfehlen im Schloßbereich.

Die Dichtigkeit eines Dichtwandsystems ergibt sich aus

den Durchlässigkeitseigenschaften der eingesetzten Materialien (Dichtwandmasse, Spundwand etc.) sowie insbesondere aus der konstruktiven Ausführung der Verbindungen und Arbeitsfugen. Die Einkapselung von Deponien und Altlasten stellt darüber hinaus zusätzliche Anforderungen hinsichtlich der Beständigkeit der eingesetzten Dichtmaterialien.

## 2. Spundwand

Die Spundwand wird dort eingesetzt, wo ein rammfähiger Baugrund vorliegt und eine rasche Baumaßnahme erforderlich ist. Durch den Einsatz neuer Beschichtungsmaterialien und Schloßdichtungen wird eine gegen die einzukapselnden Stoffe beständige Wand erstellt. Der Schadstoffaustritt bei der Deponie Penzberg, der durch einen hydraulischen Grundbruch bedingt war, wurde durch eine mit Beschichtungsmaterialien und Schloßdichtungen versehene Spundwand verhindert. In Bild 2 ist ein Beispiel zur Einkapselung von Industrieabfall mit einer Spundwand an einem alten Industriestandort dargestellt, der einer neuen Nutzung zugefügt wurde.

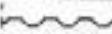
Überblick Dichtwandssysteme				 <b>JESSBERGER+PARTNER</b> <small>BAUWERKE PLANUNG VERBUNDENE ANWERTUNG</small>	
Prinzip	Dichtwandssystem	Grundriß	Böden	Tiefe [m]	Dicke [m]
a) Verringerung der Durchlässigkeit des Bodens	Injektionswand ①		begrenzt einseitig	> 100	variabel
	Betrierwand ②		keine Einschränkung	> 100	> 0,8 - 1,8
	Düsenstrahlwand ③		auch in sehr feinkörnigen	> 100	> 0,8
b) Verdrängung des anstehenden Bodens und Einbau eines Abdichtungsmaterials	Spundwand ④		rammfähige	15 - 20	0,01 - 0,02
	Schmalwand ⑤			ca. 20	0,05 - 0,20
	gerammte Schlitzwand ⑥			15 - 20	2 - 4
c) Aushub des anstehenden Bodens und Einbau eines Abdichtungsmaterials	Bohrpfehlwand ⑦		abhängig vom Bohrverfahren	ca. 20	0,5 - 1,5
	Schlitzwand Einphasen-Verfahren ⑧		begrenzt einseitig nur bei Tief-/Rundbohrern	ca. 30	0,4 - 1,0
	Schlitzwand Zweiphasen-Verfahren ⑨		keine Einschränkung	< 10 > 30	0,4 - 1,0 0,8 - 1,5
	Schlitzwand Kombinationsabdichtung ⑩ ⑪ ⑫		keine Einschränkung	nach ⑧ und ⑨	0,8 - 1,8
	Schlitzwand Geotextilien ⑬ ⑭		keine Einschränkung	ca. 10	0,4 - 1,8
	Wand in Wand-Verfahren ⑮		keine Einschränkung	ca. 30	0,8 - 1,5
Kombination aus b) und c)	Spundwand mit Bohrpfehlen im Schloßbereich ⑯		rammfähige	ca. 15	0,01 - 0,02 Bohrpfahl > 0,3

Bild 1: Dichtwandssysteme



Bild 2: Seitliche Abdichtung einer Industrieablagerung mit einer Spundwand als Bestandteil einer Einkapselung

### 3. Schlitzwand im Einphasen-Verfahren mit eingestellten Spundwandprofilen

Zur Sanierung der Zentraldeponie Emscherbruch und zum Schutz des Grundwassers wurde die Dichtungsschlitzwand im Einphasen-Verfahren abgeteuft. Die Dichtwand bindet 2 m in den verwitterten Emschermergel ein. Aufgrund andauernder bergbaulicher Beanspruchung wurden in die 0,6 m breiten und bis 20 m tiefen Schlitz mit erhärtender Suspension alternativ Kunststoffdichtungsbahnen oder Spundbohlen eingestellt. In alle 15 bis 20 m tiefen Schlitz wurden dabei die Spundbohlen eingehängt, da die auf Einbaurahmen aufgespannte Kunststoffdichtungsbahn nicht problemlos in die tieferen und bereits mit erstarrender Suspension gefüllten Schlitz eingestellt werden konnte (Bild 3 und 4).

### 4. Schlitzwand im Zweiphasen-Verfahren mit eingestellten Spundwandprofilen

Dichtwände werden häufig mit eingestellten Dichtelementen geplant. Größere Wandtiefen und der Einbau feststoffreicher Dichtwandmassen erfordern die Herstellung der Schlitzwand im Zweiphasen-Verfahren. Der Boden wird im Schutz einer Bentonitsuspension ausgehoben, und nach Erreichen der Tiefe wird diese gegen eine feststoffreichere Dichtwandmasse ausgetauscht.

Die Verwendung einer Stahlpundwand als Dichtelement weist gegenüber einer Kunststoffdichtungsbahn bautechnische Vorteile auf, die insbesondere die Handhabbarkeit während der Bauphase betreffen (Hilfskonstruktionen, Windanfälligkeit bei Aufspannen über Rahmen, Tiefe).



Bild 3: Einstellen von Spundbohlen in eine Schlitzwand



Bild 4: Schlitzwand mit eingestellten Spundbohlen

## 5. Spundwände mit Bohrpfehlen im Schloßbereich

Dichtwände werden im allgemeinen in Kombination mit einer Oberflächenabdichtung geplant. Bei der Einkapselung von Altlasten, insbesondere bei Altdeponien mit Bohrpfehlwänden und Schlitzwänden, fallen größere Aushubmengen von Boden und Suspension an. Liegt die Dichtwandtrasse auch innerhalb des Kontaminationsherds, so können die Böden und Suspensionen durch das Haftwasser am Korn verunreinigt sein. Die Entsorgung der Aushubmassen kann Probleme bereiten, da zusätzliche Ablagerungskassetten unterhalb der bestehenden oder noch aufzubringenden Oberflächenabdichtung anzulegen sind. Dies wiederum kann eine "Öffnung" der bereits abgedeckten Altdeponie erfordern.

Im Zuge der Planungsarbeiten für die Einkapselung einer Sonderabfalldeponie wurde ein Dichtwandssystem entwickelt, bei dessen Herstellung wenig Bodenaushub anfällt. Die Spundwand verdrängt den anstehenden Boden, und es wird ein hochwertiges Material eingebaut. Die Anzahl der Schloßverbindungen erhöht sich, und somit können mögliche Undichtigkeitsstellen auftreten. Das Dichtwandssystem "Spundwand mit kleinen Bohrpfehlen im Schloßbereich" berücksichtigt, daß in den Schloßern eine hochwertige resistente Dichtwandmasse zusätzlich eingebaut wird und im Vergleich zu den Schlitzwänden und Bohrpfehlwänden wenig Aushubmaterial anfällt (Bild 5 und 6).



Bild 5: Freigelegter Versuchsdichtwandkasten - Spundwand mit kleinen Bohrpfehlen im Schloßbereich

## 6. Untersuchung der Beständigkeit von Stahl

Das Korrosionsverhalten zahlreicher mit Stahlprofilen im Wasser stehender Bauwerke wird seit langem untersucht. Richtwerte über die Abrostungsrate von Stählen im Meerwasser finden sich in der Literatur.<sup>1,2,4,5</sup> Dagegen lagen bis Ende der achtziger Jahre keine Daten über das Korrosionsverhalten von Stählen in Sickerwässern aus Deponien und Altlasten vor. Da Deponie-Sickerwässer in ihrer Zusammensetzung starken Schwankungen je nach Inhaltsstoffen und Alter der Ablagerung sowie dem Lösungscharakter der durchsick-



Bild 6: Spundwand mit kleinen Bohrpfehlen im Schloßbereich: freigelegter Bohrpfehl aus Dywidag-Mineralgemisch

kernden Wasser unterliegen, war es notwendig, für die Untersuchung der Beständigkeit von Stahlpundwänden repräsentative Prüfflüssigkeiten auszuwählen.

Bei der Auswahl des Dichtungsmaterials waren Kenntnisse über die Korrosionsneigung der Stahlsorte in verschiedenen Prüfflüssigkeiten wichtig. Der Stahl St Sp 37 wurde auf seine chemische Beständigkeit durch 6 Monate dauernde Lagerung in Prüfflüssigkeiten und Sickerwässern geprüft (siehe Tabelle S. 34).

Die Prüfkörper wurden direkt in den hochkonzentrierten Prüfflüssigkeiten gelagert.<sup>6</sup> Die Medien werden bei der Beständigkeitsprüfung von Dichtungsbahnen verwendet. Daneben wurden ein Sickerwasser einer Hausmülldeponie, zwei Sickerwässer einer Altdeponie und zwei Prüfflüssigkeiten, entwickelt aus hochkonzentrierten Sickerwässern von Altdeponien (Sonderabfall), in diese Untersuchungsreihe mit einbezogen.<sup>6</sup> Diese Versuchsreihe bezieht sich auf die Prüfung in Medien mit hohen Salzfrachten und hoher organischer Belastung (Bild 7).



Bild 7: Korrosion von Stahl nach sechs Monaten Lagerung in Sickerwässern und in daraus entwickelter hochkonzentrierter Prüfflüssigkeit

In der folgenden Tabelle sind die Abrostungsraten der Stähle aufgelistet. Sie zeigt für organische Säuren die stärksten Korrosionen, während die Abrostung beim Sickerwasser nahezu identisch mit den Abrostungsraten bei Seewasser (maximale Korrosion) ist.

Sickerwasser / Wasser	Abrotungsrate			Quelle
	0,5 Jahr	1 Jahr	5,5 Jahre	
Süßwasser		0,012 mm 0,02 mm		EAU 1990
Salzwasser Seewasser Seehäfen		0,01 mm 0,14 mm 0,12 mm		EAU 1990 EAU 1990
Sickerwasser Altlast	0,13 mm <sup>1</sup>		0,21 mm	EAU 1990
organische Säure	0,16 mm <sup>2</sup>		0,39 mm	EAU 1990
Meerwasser max. Korrosion			0,33 mm	EAU 1990

Bild 8: Korrosion von Stahl in Wasser

Die Korrosion von im Erdboden befindlichem Stahl ist ein sehr komplexer Vorgang. Moorböden sind wegen ihres sauren Charakters besonders aggressiv.<sup>7</sup> Im geringeren Maße aggressiv sind Humusböden. Lehm Böden verursachen geringe Korrosionen. In sandreichen Böden und Böden mit hohem Kalkgehalt findet praktisch keine Korrosion statt (Bild 9).

Bodenart	Kennzeichnung	Stahlkorrosion
Moorböden	sauer niedriger pH-Wert	sehr stark aggressiv
Humusböden	niedriger pH-Wert	stark aggressiv
Lehm Böden		geringe Korrosion
Sandreiche Böden Böden mit hohem Kalkgehalt		praktisch keine Korrosion

Bild 9: Korrosion von Stahl im Boden

## 7. Untersuchung der Beständigkeit von Stahldichtungen

Die Kunststoffdichtungen wurden wie die Stahlproben durch 6 Monate dauernde Lagerung in Prüfmedien (siehe S. 34) untersucht (Bild 10 und 11).



Bild 10: Beständige Stahldichtungen nach sechs Monaten Lagerung



Bild 11: Nichtbeständige Stahldichtungen nach sechs Monaten Lagerung

Auf den Abbildungen sind deutlich die unterschiedlichen Reaktionen mit den Flüssigkeiten erkennbar. Die Prüfung der Dichtungsmaterialien mit den hochkonzentrierten Flüssigkeiten stellt eine extreme Belastung dar und ist mit einem betriebstechnischen Unfall auf Deponien bzw. mit einem direkten Kontakt stark aggressiver Sickerwasser einer Altlast oder Altdeponie vergleichbar, wenn die Spundwand direkt in den Altdeponiekörper gerammt wird. Im Regelbetrieb einer Deponie werden weit geringere Angriffe auf die Dichtungsmaterialien der Spundwand zu erwarten sein. Prinzipiell ist die Spundwand mit ihren Dichtungskomponenten in Vorversuchen unter Einbeziehung der anzutreffenden Bodenverhältnisse in Abhängigkeit vom Sickerwasser für jede Maßnahme gesondert festzulegen.

## 8. Korrosionsverhalten der Dichtungen bei einer Spundwand mit Schloßdichtung

Die im Deponiebau eingesetzte Spundwand besteht aus aneinandergereihten Stahlbohlenelementen, die in den Untergrund eingebracht werden. Die Schlösser müssen werkseitig mit Kunststoffdichtungen ausgerüstet sein, um eine möglichst geringe Systemdurchlässigkeit zu gewährleisten. Die Auswahl der eingesetzten Werkstoffe muß auf den Chemismus der angreifenden Schadstoffe abgestimmt sein.

Die hier als Beispiel genannte Schloßdichtung ist eine werkseitige Dichtung als injizierte Dichtung bei den verwendeten Doppel- und Dreifachbohlen. Die Baustellenabdichtung der Schlösser erfolgt über eine Lippendichtung K2D.

Im Regelbetrieb der Deponie und bei der Umspundung der Deponie sind weitaus geringere Angriffe auf dieses Dichtungsmaterial als in der Laboruntersuchung zu erwarten, zumal durch das Labyrinth des Spundwand-schlösses nur ein schmaler Streifen von 1 bis 4 mm Breite dem Sickerwasser ausgesetzt ist. Die Lippendichtung K2D erwies sich bei Lagerung in den vergleichbaren Sickerwässern der Hausmülldeponie und

Altlast als geeignet. In Bild 12 sind die Korrosionen der beiden Dichtungen in unterschiedlichen Medien dargestellt.

Alternativen	Materialien	Benzin und aromatische Kohlenwasserstoffe	Heiöl, Dieselkraftstoffe, Paraffine, Schmieröle	Prüfösigkeit M
Spundwand	St Sp 37	keine sichtbare Korrosion	keine sichtbare Korrosion	chemische Veränderung
Stahl		0,1 mm Abtrag pro 1/2 Jahr	0,11 mm Abtrag pro 1/2 Jahr	0,13 mm Abtrag pro 1/2 Jahr
mit Lippen-dichtung	K20 Polyurethan einschichtig	nicht geeignet	keine Korrosion	chemische Veränderung der Prüfösigkeit, keine Korrosion

Bild 12: Korrosionsneigungen von Stählen und Spundwand-dichtungen

### 9. Auswahlkriterien

Für die Sicherung von Altlasten zählen die Dichtungssysteme mit Spundbohlen aus Stahl in Kombination mit Kunststoffdichtungen in den Schlössern oder Kunststoffbeschichtungen auf der Stahlbohle zu den verfügbaren und bereits in situ erprobten Systemen.

Standortspezifische Kriterien wie Belastung der Sickerwässer, Rammfähigkeit des Bodens, hohe Grundwasserstände, Tiefe des Einbindehorizontes, geforderte Systemdurchlässigkeit und vorhandene Bebauung sind für die Auswahl des Dichtwandsystems von entscheidender Bedeutung. Je nach Anforderung können die in Tabelle 5 genannten Systeme unter Berücksichtigung der vorgenannten Korrosionen gewählt werden.

Dichtwandssystem	mögliche Einstechdringungen	Verbesserung / Alternative
Spundwand	Rammfähigkeit des Bodens	Schlitzwand
	Dichtheit	keine Sonnpante im Schließbereich Schloßdichtung
	Bebauung	Schlitzwand
Schlitzwand mit eingestellten Spundbohlen	Tiefe - Windanfälligkeit bei Einstellen der Spundbohlen - Erstarren der Dichtwandmasse zum Zeitpunkt des Einstellens	Schlitzwand im Zweiphasensystem
Spundwand mit kleinen Bohrpflöhen im Schließbereich	Rammfähigkeit des Bodens	

Bild 13: Auswahlkriterien von Dichtwandssystemen mit Spundwänden

### Literatur

- Rust, H.: Stahl im Wasserbau - ein Dauerthema im HTG-Ausschuß für Korrosionsfragen.
- EAU 1990: Empfehlungen des Arbeitsausschusses "Uferbefestigungen". Häfen und Wasserstraßen. (E 35 Korrosion bei Stahlpundwänden und Gegenmaßnahmen).
- Jessberger + Partner GmbH: Unveröffentlichte Prüfberichte. 1989.
- Hein, W.: Korrosion von Stahlpundwänden im Wasser. Hansa Nr. 3/4 und BAW Mitt. 67 (1990). 1989.
- Wionars, A.: Praktische Erfahrungen bei der Sicherung von Altlasten mit Stahlpundwänden. In H.L. Jessberger (Hrsg.): A.A. Balkema Verlag, Rotterdam. 1993.
- Jessberger + Partner GmbH: Prüfung von Spundwanddichtungen. Unveröffentlichter Abschlußbericht. 1991.
- Krenkler, K.: Chemie des Bauwesens, Band 1: Anorganische Chemie. Springer-Verlag. 1980.





## Die Dichtspundwand zur Sicherung von Altlasten am Beispiel der Deponie Penzberg

Professor Dr.-Ing. Armin Horn, Neubiberg

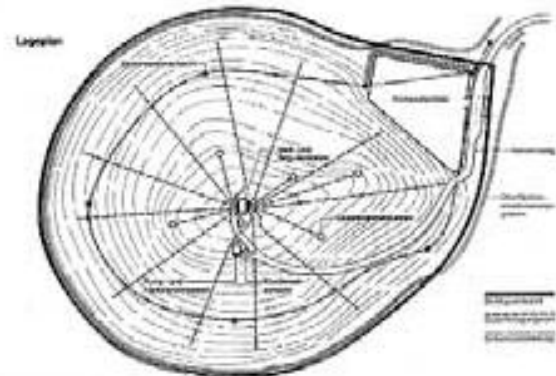
Nach TA Abfall (1991) und TA Siedlungsabfall (1993) gehört die Sicherung von Altlasten mit dem Ziel, die Gefährdung von Boden und Grundwasser zu minimieren, zu den vordringlichen Aufgaben. Während Altlastumlagerungen in neue Deponien sowie thermische und mikrobiologische Behandlungen etc. aus wirtschaftlichen und ökologischen Gründen nur beschränkt einsetzbar sind, nimmt die Einkapselung der Altlasten eine dominierende Stellung ein. Hierzu gehört in der Regel die Umschließung der Altlast mit einer Dichtwand im Zusammenhang mit hydraulischen Maßnahmen zur Absenkung des Wasserspiegels innerhalb der Dichtwand (durch freie Vorflut oder durch Abpumpen) und die Oberflächenabdeckung.

Für die Herstellung einer Dichtwand bietet die Bautechnik zahlreiche Möglichkeiten, wie Ein- und Zweiphasenschlitzwände, Bohrpfehlwände, Schmalwände, Injektionswände, Einphasendichtwände mit eingestellten Kunststoffdichtungsbahnen und die Stahlpundwand. Letztere kann in Einphasenwände eingesetzt, mit Bohrpfehlen kombiniert oder als Spundwand mit Schloßdichtung hergestellt werden. Das jeweils technisch und wirtschaftlich optimale Verfahren richtet sich vor allem nach den Baugrundverhältnissen, den Beanspruchungen durch die Deponie und den Infrastrukturverhältnissen im Deponiebereich.

### 1. System der Einkapselung der Deponie Penzberg

Die Deponie wurde um 1950 mit Aushubmaterialien aus der Vertiefung des Loischbettes angelegt und in der Folgezeit mit Hausmüll und Schlacken beschickt (Bild 1). Der Untergrund in der Peripherie der Deponie Penzberg besteht bis zu 8 m Tiefe aus unkonsolidierten Torfschichten und darunter aus Seeton.

Die ursprünglich geplante Dichtwandumschließung mit Hilfe einer Einphasenschlitzwand ließ sich bei diesem Projekt nicht verwirklichen, da die dazu notwendigen schweren Baugeräte bei den nicht tragfähigen Torfen und den durch die Gerästelasten verursachten hohen Erddrücken und Verformungen des Schlitzes ein solches Verfahren ausschlossen. Aufgrund dieser Schwierigkeiten wurden verschiedene Ausführungsvorschläge diskutiert, zum Beispiel die Herstellung einer Dichtungsschlitzwand im Schutze doppelter Spundwände (die aus Kostengründen ausschied) oder die Dichtungsspundwand.<sup>1</sup>



Schnitt durch die Deponie (schematische Darstellung)

Oberflächenabdichtung und Regenwasserablauf:  
 - Vegetationsdecke 120 cm  
 - Kiesdrainage 20 cm  
 - Ton-Dichtungsschicht  
 - 8 Lagen à 20 cm  $k_f = 1 \cdot 10^{-8}$   
 - Ausgleichsschicht 20 cm mit Schotter und Kies

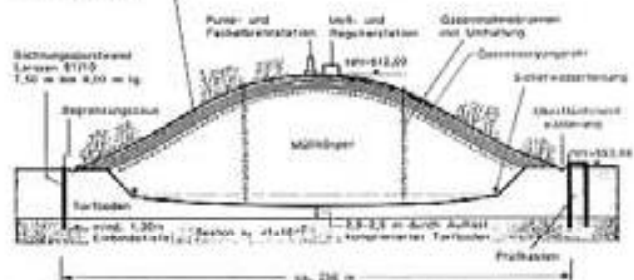


Bild 1: Lageplan und Querschnitt der Deponie Penzberg

Aufgrund der folgenden Kosten- und der technischen Vorteile wurde die Dichtspundwand für die Umschließung gewählt:

- die große Verformbarkeit der Spundwand in Längsrichtung durch den "Ziehharmonika-Effekt" ohne Einbuße der Dichtigkeit,
- die statische Beanspruchbarkeit im Hinblick auf mögliche spätere Bodenverformungen bei Aufhöhung der Deponie bei Erhalt der Dichtigkeit und
- die mögliche Sanierung undichter Bereiche der Dichtungsspundwand durch Umfassung mit einer Zusatzwand.

### 2. Anforderungen der Planfeststellung

#### 2.1 Wasserdurchlässigkeit

Die Anforderungen der Planfeststellung an die ursprünglich geplante Einphasendichtwand sah vor, daß die 60 cm dicke Wand bei mindestens 1 m Einbindetiefe in den Seeton mit einem Wasserdurchlässigkeitsbeiwert der Dichtungsschlitzwand von  $k = 10^{-8}$  m/s herzustellen war. Für die Dichtigkeit wurde daher vorgeschrieben, daß eine adäquate Dichtigkeit und Qualität

gemäß der obigen Anforderungen zu gewährleisten war.

Um die gestellten Anforderungen zu erfüllen, müssen die Schloßverbindungen der Spundbohlen auf jeden Fall so dicht sein, daß nicht mehr Wasser durch die Schösser hindurchdringen kann, als es bei der Dichtungsschlitzwand gefordert wurde.

Die Wasserdichtigkeit der Dichtspundwand muß sich also auf die Dichtigkeit der Schösser beziehen. Nach den Anforderungen der Planfeststellung kann die maximal zulässige Durchlässigkeit eines Schlosses bei Vorgabe von Doppel- und Dreifachbohlen errechnet werden. So ergibt sich bei werkseitig gedichteten Doppelbohlen bei Vorgabe von  $k = 10 \cdot 10^{-8} \text{ m/s}$  und einer Wandstärke von 60 cm für die ursprünglich geplante Schlitzwand eine Durchflußmenge von 135  $\text{cm}^3$  pro Stunde und pro Meter bauseitig hergestellter Schloßdichtung oder 110  $\text{cm}^3$  pro Stunde und  $\text{m}^2$  Wand. Dies sollte in zwei Versuchspundwandkästen (Bild 2) kontrolliert werden.

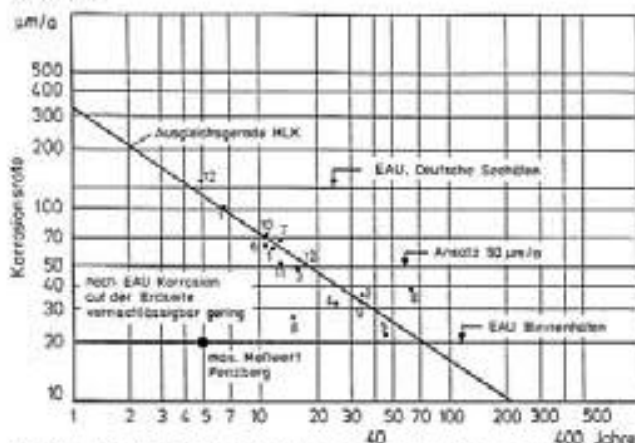


Bild 2: Maximale Korrosionsraten in Binnengewässern auf der Wasserseite, vergleiche mit EAU 1990, E 35 (Meßwerte nach Hein 1989)

Unter Beachtung des Bescheids der Planfeststellungsbehörde, nach dem eine Einbindetiefe von 1 m in den Seeton für die Dichtungsschlitzwand gefordert wurde, mußte die Spundwand, um mindestens dieselbe Durchsickerungsstrecke im Seeton zu erhalten (2,6 m), mindestens 1,3 m in den Seeton einbinden.

### 2.2 Statische Sicherheit

Da die Spundwand rechnerische Lasten ausschließlich in Längsrichtung aufzunehmen hatte, also als Schloßzugspannungen, die aufgrund der Bodenbewegungen zu erwarten waren, konnte als Spundwandprofil das Profil Larssen 61 aus St Sp 37 eingebaut werden. Mit Rücksicht auf die Langzeitbeständigkeit der Spundwand (siehe Kapitel 4.2) wurde festgestellt, daß die Normalprofildicke von 8 mm auf 10 mm erhöht werden mußte.

### 2.3 Lebensdauer

Zur Gewährleistung der Lebensdauer der Dichtungspundwand standen die mehrfache Polyurethanbeschichtung, die werkseitig herstellbar ist, oder die Verstärkung der Stahlstärke zur Diskussion. Aufgrund der Erfahrungen im Wasser- und im Seebau wurde letzterer der Vorzug gegeben.

Da die Spundwände seit etwa 100 Jahren im Wasserbau eingesetzt werden, liegen über ihre Beständigkeit umfangreiche Messungen vor. Diese beziehen sich auf Korrosionsraten unter dem Einfluß von Seewasser und Süßwasser, und zwar im Spritzwasserbereich (am meisten gefährdete Zone), im Bereich unter Wasser und in dem Bereich, der ins Erdreich eingebunden ist. Die mehr als 70jährigen Messungen der Korrosionsraten an Spundwänden (Hein 1989) sind in den Empfehlungen des Arbeitsausschusses Uferbefestigungen<sup>9</sup> im Hinblick auf die Abrostungsdaten bei den statischen Berechnungen festgehalten (EAU E 35).

Ohne auf die zahlreichen Literaturstellen einzugehen, kann festgestellt werden, daß die Schwächung der Spundwände auf der Erdseite im allgemeinen so gering ist, daß sie vernachlässigt werden kann (EAU E 35, Abschnitt 8.1.11.2). Im Süßwasser wird in Deutschland eine mittlere Schwächung von nur 0,02 mm pro Jahr auf der Wasserseite festgestellt. Im Seewasser, das hier für Vergleichszwecke nicht maßgebend ist, liegen die jährlichen Korrosionsraten um ein Sechsfaches höher. Die Korrosionsgeschwindigkeit - und dies ist ein wesentlicher Gesichtspunkt - nimmt mit der Zeit stark ab (Hein 1989 und Bild 2).

Im Genehmigungsverfahren wurde daher von meiner Seite eine Korrosionsrate von 0,05 mm pro Jahr als Ansatz empfohlen. Damit würde sich in 100 Jahren eine Abrostung von 5 mm ergeben. Bei dem verstärkten Profil von 10 mm bliebe dann nach 100 Jahren immer noch eine Dicke von 5 mm. Bei diesem Ansatz wurde nicht berücksichtigt, daß die Korrosionsraten mit der Zeit abnehmen. Die oben genannte Korrosionsrate wurde weit unterschritten (vgl. Kapitel 4.2).

Die Beständigkeit des Schloßdichtungsmaterials wurde von Jessberger geprüft. Er stellte fest, daß diese höher ist als die Lebensdauer des Stahls.

### 3. Bauausführung

Zur Vermeidung von zu vielen Baustellenschlössern in der Dichtspundwand wurden werkseitig Doppel- und Dreifachbohlen aus dem Profil Larssen 61/10 vorgefertigt. Für die Schloßdichtung wurde eine sicherwasserresistente Lippendichtung aus Polyurethan verwendet, die bereits werkseitig in die Schösser der Doppel- und Dreifachbohlen eingebracht wurde. Die Doppel- und Dreifachbohlen wurden planmäßig mit relativ geringer Rammenergie bis 1,5 m in den Seeton eingerammt. Die Doppelbohlen hatten ein Rammesloß ohne Dichtungs-

material, ein werksseitig hergestelltes Mittelschloß und ein Baustellenfädelschloß mit Lippendichtung. Während des Rammens wurde noch eine Kunstharzmasse auf diese Lippen aufgetragen. Bei Dreifachbohlen waren entsprechend zwei werksseitig gedichtete Mittelschlösser vorhanden.

Der Rammvorgang erfolgte so, daß das nichtgedichtete Rammschloß als freies Schloß voraussetzte, in welches das gedichtete Baustellenfädelschloß des nachfolgenden Elementes eingefädelt wurde. Bei dem Fädelschloß handelte es sich um eine endlos profilierte, maschinell eingebrachte Dichtung aus Polyurethan (System Hoesch), die so ausgebildet ist, daß beim Einrammen der Bohle Rückstellkräfte aktiviert werden, die den Schloßspalt abdichten.

#### 4. Prüfung der Dichtspundwand

Zur Überprüfung der Wasserdichtigkeit und der Lebensdauer wurden zwei Versuchskästen (Bild 3) hergestellt, die bis 4 m unter GOK ausgehoben wurden und eine direkte Kontrolle der Dichtigkeit der Schlösser und die Kontrolle der Abrostungsrate durch Ultraschallmessungen erlaubten.

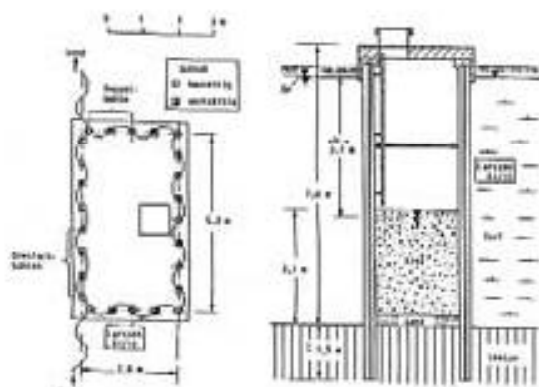


Bild 3: Dichtspundwand Penzberg, Versuchskästen

##### 4.1 Prüfung der Wasserdichtigkeit

Nach Herstellung der Versuchskästen wurden diese bis zum Seeton ausgehoben und teilweise mit Kies aufgefüllt, so daß eine lichte Höhe im Prüfkasten von 3,7 m vorhanden war. Der Wasserspiegel im Prüfkasten wurde bis 4 m Tiefe unter den Grundwasserspiegel abgesenkt, so daß ein entsprechender Wasserüberdruck auf die Schlösser (der bei der eigentlichen Spundwand nicht vorhanden sein wird) wirkt. Es wurde jede Schloßdichtung, sowohl die werksseitig hergestellte als auch die Lippendichtung, in beiden Versuchskästen in festgelegten Zeitintervallen kontrolliert. In jedem Versuchskasten standen 25 Schloßfugen zur Prüfung zur Verfügung.

Im Versuchskasten A wurde während der bisherigen vier Meßtermine über fünf Jahre kein Durchfluß festge-

stellt. Die Schlösser waren trocken und dicht. Im Versuchskasten B war eine werksseitig hergestellte Fuge geringfügig undicht. Die ausgetretene Wassermenge wurde mittels Auffangvorrichtung und Meßzylinder pro Zeiteinheit bestimmt. Sie betrug nach 6 Monaten nach jeweils mehreren Vergleichsmessungen maximal 750 cm<sup>3</sup> pro Stunde. Alle anderen Fugen waren auch hier dicht. Dies entspricht einer Durchflußmenge von 16 cm<sup>3</sup> pro Stunde und m<sup>2</sup>, wenn man die Menge auf die frei liegenden Quadratmeter des Versuchskastens B bezieht. Mit zunehmender Zeit nahm die Durchflußmenge ab: Nach neun Monaten wurden noch 7 cm<sup>3</sup>, nach vier Jahren nur noch 5 cm<sup>3</sup> pro Stunde und m<sup>2</sup> gemessen. Diese Mengen liegen weit unterhalb des nach Anforderung zulässigen Werts von 110 cm<sup>3</sup> pro Stunde und m<sup>2</sup>, das heißt etwa bei einem Zwanzigstel des zulässigen Werts.

##### 4.2 Beständigkeit / Korrosion

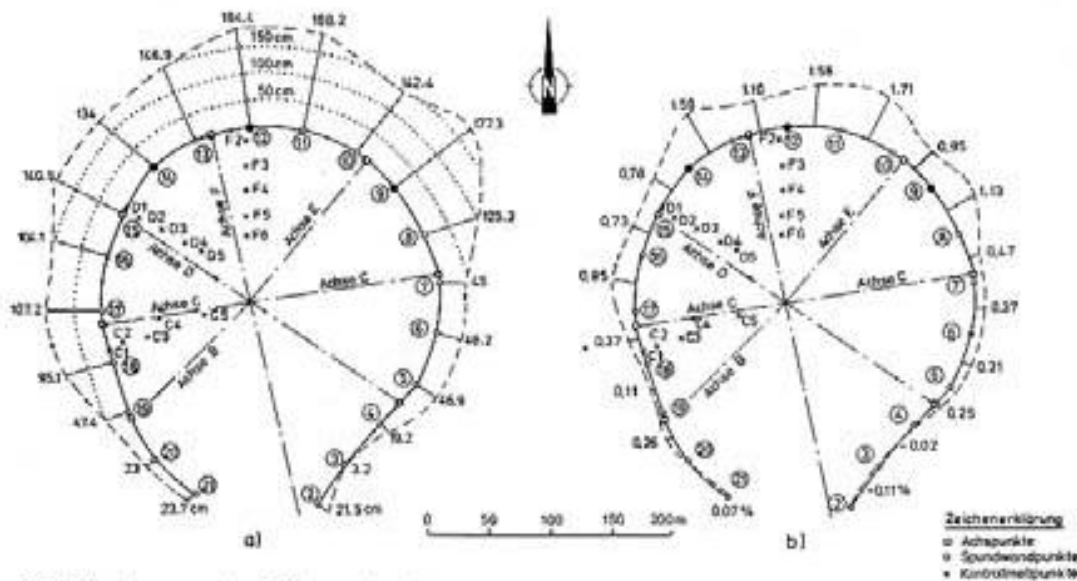
Zur Wanddickenmessung an Spundwänden wird das Ultraschallverfahren eingesetzt. Das Meßprinzip beruht auf dem Impuls-Echo-Verfahren. Dabei wird ein Schallimpuls in das Bauteil geleitet und an dessen Rückwand reflektiert. Die Zeit bis zur Messung des Rückwandechos ist ein Maß für die Wanddicke.<sup>6</sup>

Nach diesem Verfahren sind in der Zeit von 1988 bis 1993 Wanddickenmessungen vorgenommen worden. Die umfangreichen Wanddickenprüfungen an identischen Spundwandpunkten in den Prüfkästen zeigen, daß in 5 Jahren eine durchschnittliche Abrostungsrate von 0,03 mm, das sind 0,006 mm pro Jahr, vorhanden ist. Die maximalen Abrostungsraten an einzelnen Stellen betragen 0,02 mm pro Jahr. Beide Werte liegen deutlich unter den für die Zulassung des Dichtwandsystems empfohlenen Abrostungsraten-Ansatz von 0,05 mm pro Jahr (Bild 2).

Wenn man davon ausgeht, daß die maximale Abrostungsrate von 0,02 mm/a maßgebend ist, dann würde in 100 Jahren gerade die Zusatzwanddicke von 2 mm abgerostet sein und noch das Sollprofil von 8 mm weiterhin zur Verfügung stehen. Die Lebensdauer der Dichtspundwand wäre damit praktisch unbegrenzt, zumindest unter der Erkenntnis, daß die Abrostungsraten mit der Zeit deutlich geringer werden.

#### 5. Verformbarkeit der Wand

Während der Aufbringung der Oberflächenabdeckung der Deponie Penzberg wurden Verformungen der Dichtspundwand in horizontaler Richtung festgestellt. Daraufhin wurden seit Juni 1989 in regelmäßigen Zeitabständen Verformungsmessungen am Spundwandkopf durchgeführt. Die Verformungen in horizontalen Richtungen betragen dabei zwischen Februar 1988 und Oktober 1991 bis zu 1,8 m (Bild 4a). Aufgrund dieser Lageveränderungen der Spundwandköpfe wurde die mittlere Dehnung der Spundwand zwischen den



**Bild 4: Verformungen der Dichtspundwand**  
 a) Resultierende Verformung der Dichtspundwand der Deponie Penzberg zwischen Februar 1988 und dem 30.10.1991  
 b) Mittlere Dehnung in Prozent zwischen den Meßpunkten der Dichtspundwand der Deponie Penzberg

Meßpunkten bestimmt (Bild 4b). Diese betrug zwischen 0,1 % und maximal 1,7 %.

Wegen des "Ziehharmonika-Effekts" liegt bei diesen relativ geringen Verformungen keine kritische Beanspruchung in Längsrichtung der Spundwand vor. Die Verformungen erfolgen durch Aufweitung der U-Profile der Bohlen. Vorliegende Versuchsergebnisse an vergleichbaren Profilen zeigen, daß unter solchen Verformungen nur geringe Schloßzugkräfte auftreten.

Wesentlicher ist die Beurteilung der Wasserdichtigkeit der Schösser unter Verformung. Das werkseitig hergestellte gedichtete Schloß zwischen zwei Bohlen stellt eine dauerelastische Verbindung dar, die das Schloß ausfüllt. Hier sind wegen der Elastizität keine Undichtigkeiten zu befürchten. Außerdem wird durch die Zugbeanspruchung der Spundwand quer zur Schloßachse das Dichtungsmaterial innerhalb des Schlosses zusätzlich gepreßt.

Die Schloßdichtung der bauseitig eingefädeltten Bohlen besteht aus einer zweikomponentigen Kunststofflippe, die werkseitig in die Schösser eingebracht wird. Durch die Zugbeanspruchung in Längsrichtung der Wand, also quer zum Schloß, wurde die Lippendichtung weiter zusammengepreßt, so daß die Dichtigkeit des Schlosses durch die Zugbeanspruchung zunahm. Es ist daher auch bei den bauseitig gedichteten Schössern keine Verschlechterung der Wasserdichtigkeit durch Zugbeanspruchung zu erwarten gewesen. Dies hat sich bei der letzten Messung in den Probekästen nach Auftreten der Verformungen voll bestätigt.

## 6. Bewertung

Aus der Bau Erfahrung mit der Dichtspundwand in Penzberg und den umfangreichen Prüfungen und Messun-

gen kann gefolgert werden, daß unter den gegebenen oder ähnlichen Baugrund- und Grundwasserverhältnissen die Dichtspundwand den heutigen Anforderungen an Wasserdichtigkeit und Lebensdauer optimal entspricht. Besonders vorteilhaft ist der Einsatz von Dichtspundwänden dann, wenn statische Beanspruchungen gefahrlos aufgenommen werden können.

## Literatur

- Horn, A.: Gutachten zur Umschließung der Deponie Penzberg mit einer Dichtspundwand. 28.09.1987. (Unveröffentlicht)
- Horn, A.: Abnahmegutachten, Deponie Penzberg. 13.04.1988. (Unveröffentlicht)
- Horn, A.: Prüfberichte, Deponie Penzberg. Vom 18.10.1988, 27.07.1989 und 27.04.1993. (Unveröffentlicht)
- Horn, A.: Gutachtliche Stellungnahme zur Dichtigkeit der Dichtspundwand Penzberg nach erfolgter Verformung. 13.04.1992. (Unveröffentlicht)
- Wieners, A.: Praktische Erfahrungen bei der Sicherung von Altlasten mit Stahlpundwänden. In: Sicherung von Altlasten. Balkema-Verlag. Rotterdam. 1993. Seite 221.
- TÜV München: Wanddickenmessungen Deponie Penzberg. 06.06.1988 und 29.04.1993. (Unveröffentlicht)
- Philipp Holzmann/Held & Francke: Prospekt Deponie Penzberg.
- Hein, W.: Korrosion von Stahlpundwänden in Wasser. Hansa 126. 1981. Seite 250.
- EAU 1990: Empfehlungen des Arbeitsausschusses Ufereinfassungen. Verlag Ernst und Sohn Berlin. 1990. 8. Auflage.

## Neuartiger Einsatz gemischter Spundwand-Systeme

Dipl.-Ing. Christian Arndts, Hamburg

Besondere Anforderungen bei einzelnen Bauvorhaben - häufig ausgelöst durch Rücksicht auf bestehende Bebauung, dichte Besiedelung oder ökologische Belange - veranlassen Planer wie ausführende Firmen, gelegentlich neuartige Wege bei der Realisierung zu beschreiben. Gern wird hierfür jedoch auf bewährte Produkte oder bereits praktizierte Bauverfahren zurückgegriffen, um bei ohnehin risikobelasteten Schritten in "bautechnisches Neuland" das Wagnis insgesamt in Grenzen zu halten.

Wie unter diesen Aspekten bewährte Peiner Spundwandssysteme neuartige Anwendungen finden, soll anhand der Beschreibung zweier Baumaßnahmen erläutert werden.

### "Lückenschluß" beim Bau des Bremer Weserwehres

Bei Abdämmmaßnahmen in strömenden Gewässern gilt das Schließen der letzten Öffnung als besonders kritischer Vorgang; durch Einschnürung der Durchflußbreite entsteht ein schließender Abfluß der Wassermassen mit der Tendenz zur Kolkbildung, der die Standsicherheit bereits fertiggestellter Bauteile in der Nachbarschaft gefährden kann. Bei derartigen Abschottungen ist Schnelligkeit und absolut zuverlässige, störungsfreie Handhabung des Schließvorganges oberstes Gebot.

Diese Situation war auch beim Bau des Weserwehres zu meistern, als nach Fertigstellung von 3 Wehröffnungen im Frühjahr 91 die Baugrube für die letzten beiden Wehröffnungen hergestellt werden sollte.

Die oberstromseitige Spundwand dieser Baugrube hatte die Abschottung der bis dahin frei strömenden Weser

zu übernehmen und für einen Aufstau und die Umlenkung über die drei bereits fertiggestellten Wehrfelder zu sorgen.

### Systembeschreibung

In Anlehnung an die früher häufig gebauten Nadelwehre wurde eine gemischte Peiner Spundwand gewählt mit Einzelbohlen PSp 800 in Längen von 24 m, oberstromseitig verankert mit Peiner Rammverpreßpfählen PST 370/116 in Längen von 34,50 m. Als Zwischenbohlen wurden PZ 612 vorgesehen, zweigeteilt mit einem Überlappungsbereich von 6,50 m, ermöglicht durch doppelte Einfädelsmöglichkeit bei den Tragbohlen aufgrund der 4 Keulen je Bohle.

Die unteren Zwischenbohlen waren nach den Tragbohlen unter Wasser auf Tiefe zu rammen. Die oberen Zwischenbohlen waren als Schließelemente vorgesehen und sollten zunächst nur knapp eingefädelt und arretiert werden. Unter ihnen sollte der Weser zunächst die Möglichkeit geboten werden, zwischen den Tragbohlen hindurch abzufließen. Nach dem Abschottvorgang durch Herablassen der oberen Füllbohlen und nach deren Einrütteln auf Solltiefe sollte eine Betonplombe den Sickerweg im Überlappungsbereich zwischen oberer und unterer Füllbohle versperren.

### Werkskontrollen

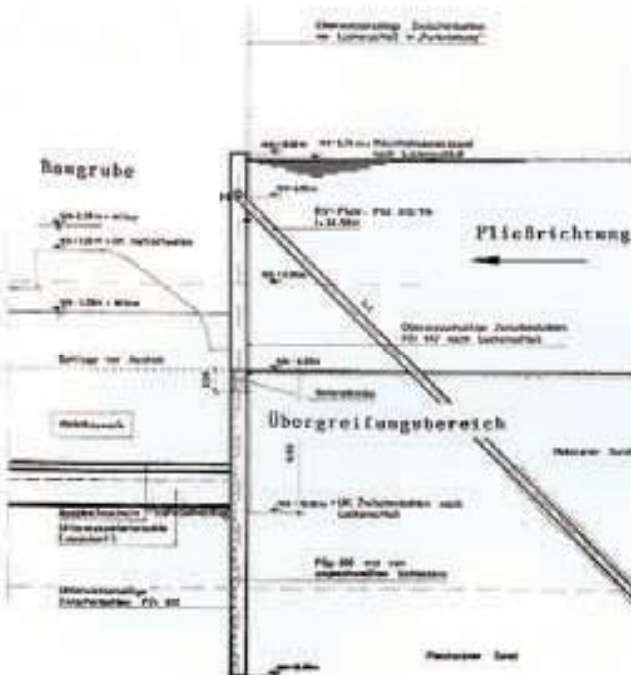
Um den zügigen Schließvorgang auf der Baustelle zu gewährleisten - anzustreben war ein möglichst schnelles, vollständiges Herabgleiten der oberen Füllbohlentafeln nach Lösen der Arretierung -, wurden vor Auslieferung des Spundwandmaterials sämtliche Keulen und Schösser auf Maßhaltigkeit und leichte Gängigkeit überprüft.



Bauphase I: Bau des 1. Wehrfeldes (1989)

Bauphase II: Bau des 2. und 3. Wehrfeldes (1990)

Bauphase III: Bau des 4. und 5. Wehrfeldes (1991)



### Bauausführung

Das Einbringen der oberstromigen Schrägpfahlverankerung, der Tragbohlen sowie der unteren Zwischenbohlen erfolgte von schwimmenden Geräten aus. Die Tragbohlen wurden soweit wie möglich mit einem Rüttelbären eingebracht und mußten danach nur noch teilweise nachgerammt werden.

Da ihre parallele Stellung und der Abstand im Sollmaß bekanntermaßen wichtige Faktoren für ein leichtes und zügiges Einbringen der Füllbohlen sind, wurde bei der Ausführung hierauf besonders geachtet.

Um diese Genauigkeiten zu erzielen, wurden während des Rammvorganges jeweils zwischen den Tragbohlen Führungskästen als Abstandhalter eingesetzt, die dem Systemmaß der einzubringenden Zwischenbohlen entsprachen.

Für den eigentlichen Lückenschluß am 24.04.91 war ein besonderer Ablauf konzipiert worden. Wie die vorab bei der Bundesanstalt für Wasserbau in Hamburg-Rissen ausgeführten Modellversuche gezeigt hatten, konnte das Niederbringen der oberen Zwischenbohlen ohne größeres Risiko sicher durchgeführt werden, indem für eine entsprechende Zeit der Abfluß der Weser gestaut wurde. Dies geschah durch gezielte Steuerung des alten Hemelinger Weserwehres sowie der nächsten zwei oberhalb liegenden Staustufen der Mittelweser. Hierdurch ergab sich für das Niederbringen der oberen Zwischenbohlen ein Zeitraum von gut zwei Stunden ohne nennenswerte Strömung an der Baustelle.

Diese Zeitspanne wurde für das Entriegeln und Herablassen der insgesamt 35 Zwischenbohlen nicht einmal voll ausgeschöpft. Somit hat sich dieses Konzept eines Lückenschlusses mit Hilfe einer gemischten Peiner



Spundwand (Tragbohlen und 2-geteilte, gestaffelte Füllbohlen) als brauchbare Methode erwiesen, die bei ähnlich gelagerten Problemen jederzeit als Lösung vorgeschlagen werden kann.

### Neubau 10. Liegeplatz am Burchardkai in Hamburg

Die bisher bei vielen Kaimauerbaustellen praktizierte Methode, gemischte Spundwände in zwei Arbeitsgängen (zunächst die Tragbohlen, dann die Füllbohlen) durch Rammen bzw. Rütteln einzubringen, war bei diesem Bauvorhaben ausgeschlossen worden.

Den Bewohnern des gegenüberliegenden, dicht besiedelten Elbhanges wollte man die Lärmbelastigung durch Rammvorgänge nicht zumuten. Mit Rütteln allein wären die schweren Tragbohlen nicht auf ihre Solltiefe zu bringen gewesen. Weit gravierender für die oben genannten Einschränkungen waren jedoch die schwierigen Baugrundverhältnisse. Eine im Untergrund verlaufende Geröllschicht, die sowohl von den längeren

Tragbohlen wie auch den kürzeren Füllbohlen zu durchdringen war, hätte bei den herkömmlichen Einbringverfahren zu Profilerstörungen und damit zu Schloßsprengungen geführt.

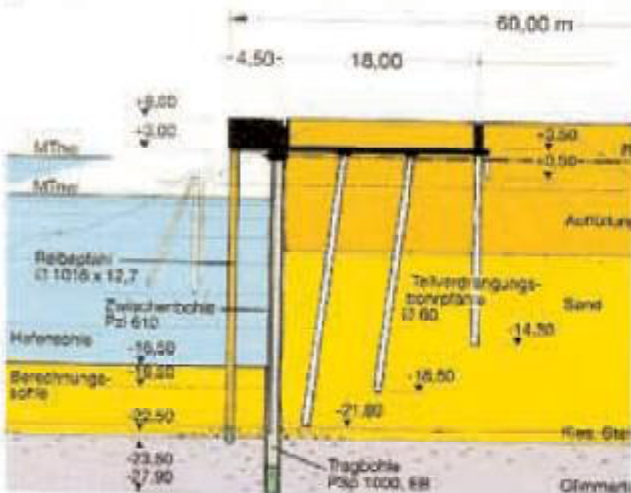
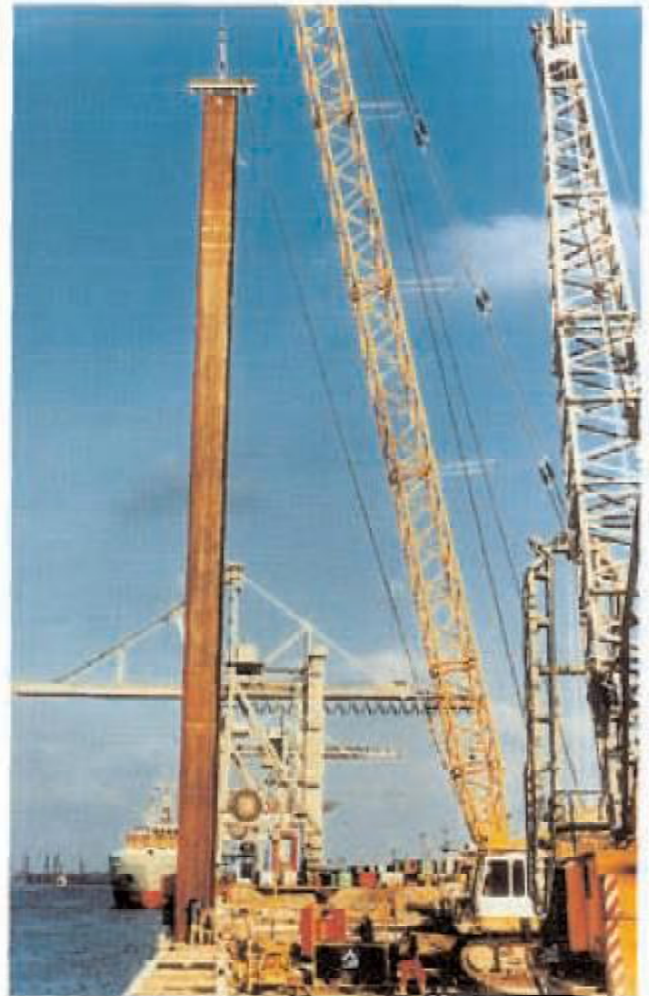
So entstand in einem Ideenwettbewerb das Konzept, in Anlehnung an die bewährte Schlitzwandbauweise einen bentonit-zement-gestützten Schlitz bis zur Unterkante der Tragbohlen auszuheben und hierbei die Hindernisse in diesem Graben in Höhe der Geröllschicht zu beseitigen. Anschließend sollten im steten Wechsel die Trag- und Füllbohlen eingefädelt und in dieser Stützflüssigkeit auf Solltiefe herabgelassen werden.

Der Auftrag auf der Basis dieses Vorschlages führte 1993 zur Realisierung des Bauverfahrens. Begünstigt wurde dies durch den Umstand, daß die vorgesehene Flucht der neuen Kaimauer im Bereich einer Böschungskante und damit zunächst noch "im Trockenen" verlief, was die Herstellung des Schlitzes erheblich erleichterte.

Ausgehend von einer zunächst herzustellenden Arbeitsebene und dem Bau der Leitwand wurde der Schlitz aufgeföhrt, Steine im Schlitz gemeißelt und geborgen und dann die Trag- und Füllbohlen eingebaut. Die Anreicherung der Suspension mit Zement und entsprechenden Verzögerern bewirkten nach einigen Tagen eine Verfestigung der Suspension mit den Festigkeiten des umgebenden Bodens.

Wie wichtig die Räumung der Trasse der Hauptwand von den in tieferen Lagen anstehenden Gestein- und Geröllschichten war, wurde von Anbeginn deutlich. Große Steine konnten erst nach Zertrümmerung mit Hilfe von Meißel- und Greifgeräten aus dem Schlitz geborgen werden. Hierdurch ergaben sich zum Teil erhebliche Standzeiten für den Schlitz, die durch Anpassung der Abbindezeiten der Suspension an diese widrigen Umstände erreicht werden mußten. In folgender Abbildung ist das Einstellen der rund 32 m langen Tragelemente in den Schlitz zu erkennen, wobei nach dem Ausrichten jeweils zwischen zwei Tragbohlen anschließend die entsprechende, ca. 25 m lange Füllbohle eingebaut wurde.

Bei den Füllbohlen mußte gelegentlich mit einem Rüttelgerät auf den letzten Metern nachgeholfen werden, weil das durch die Stützflüssigkeit reduzierte Eigengewicht





wicht nicht ausreichte, die Reibungskräfte in den Fädel-schlössern zu überwinden.

Die örtlichen Verhältnisse bei dieser Baumaßnahme, die eine **Horizontalverankerung** ohne Vertikalkomponente aus dem Verankerungsvorgang ermöglichten, begünstigten dieses Bauverfahren, weil damit insgesamt geringere Vertikallasten in den Untergrund abzutragen waren. So genügte es, zur Vertikallastabtragung im Fußbereich der eingestellten Tragbohlen unterhalb der Fußbohlen lediglich ein unbewehrtes **Betonstreifenfundament** im Kontraktörverfahren auszubilden.



Mit Blick auf die zahlreichen geborgenen Steine - teilweise in beachtlicher Größe - hat der befriedigende Bauablauf gezeigt, daß dieses Verfahren geeignet ist, schwierige Baugrundverhältnisse zu meistern, ohne auf bewährte Spundwände verzichten zu müssen.

## Zusammenfassung

Beide beschriebenen Baumaßnahmen haben bewiesen, daß die Einsatzmöglichkeiten von Spundwänden für die bisher allgemein üblichen Zwecke und deren Einbringen mit den traditionellen Methoden nicht ausgeschöpft sind. Der Phantasie des Ingenieurs ist es überlassen, dieses bewährte Produkt möglichst vielseitig und nutzbringend einzusetzen. Der in der Bauindustrie übliche Wettbewerb zur Erhöhung der Chancen bei der Akquisition bietet hierzu den entsprechenden Anreiz.



## Autorenverzeichnis

Dipl.-Ing. Christian Arndts  
Preussag Stahl AG, Spundwandabteilung  
Fachberatung Norddeutschland  
Postfach 50 07 03  
22707 Hamburg

Prof. Dr.-Ing. Rudolf Floss  
Technische Universität München  
Ordinarius für Grundbau, Boden- und Felsmechanik  
Arcisstr. 21  
80333 München

Dipl.-Math. Katrin Funk  
Universität Hannover  
Curt-Risch-Institut für Dynamik, Schall- und Meßtechnik  
Appelstr. 9A  
30167 Hannover

Dr.-Ing. Magret Geil  
Jessberger + Partner GmbH  
Beratende Ingenieure  
Geotechnik und Umwelttechnologie  
Am Umweltpark 5  
44793 Bochum

Dipl.-Ing. Wolf-J. Gerasch  
Universität Hannover  
Curt-Risch-Institut für Dynamik, Schall- und Meßtechnik  
Appelstr. 9A  
30167 Hannover

Dipl.-Ing. Norbert Gruber  
Technische Universität München  
Lehrstuhl und Prüfamts für Grundbau, Boden- und  
Felsmechanik  
Arcisstr. 21  
80333 München

Prof. Dr.-Ing. Armin Horn  
Bundeswehr-Universität  
Institut für Bodenmechanik und Grundbau  
Werner-Heisenberg-Weg 39  
85579 Neubiberg

Dipl.-Ing. Klaus Hudelmeier  
Techno Grundbau GmbH  
Fürstenrieder Str. 281  
81377 München

Dipl.-Ing. Roland Jörgler  
Billfinger + Berger  
Bauaktiengesellschaft  
Tiefbauabteilung  
Postfach 10 05 82  
68005 Mannheim

Dr.-Ing. Alex Schmitt  
ProfilARBED S.A. Esch-Belval  
ISPC  
L-4008 Luxembourg

Dipl.-Ing. Klaus Schwersenz  
Wasserstraßen-Neubauamt Aschaffenburg  
Postfach 8  
63701 Aschaffenburg

Dipl.-Ing. Andreas Wieners  
HSP Hoesch Spundwand und Profil GmbH  
Alte Radstr. 27  
44147 Dortmund



Stahl-Information-Zentrum · Postfach 10 48 42 · 40039 Düsseldorf