

## Vorwort

Pfähle gehören zu den wichtigsten Gründungsarten. Die Entwicklung vom Bohrpfahl zum Großbohrpfahl mit den Innovationen bei den Herstellungsverfahren und Geräten führte dazu, daß heute immer größere Pfahl-tiefen und -durchmesser erreicht werden können. Damit nimmt auch die Intensität der Baugrundnutzung zu. Die Bedeutung der Pfahlgründungen spiegelt sich auch in der Vielzahl von Pfahl-systemen auf dem Baumarkt wider.

Die Vielfalt und der Stellenwert von Pfahlgründungen – insbesondere mit Großbohrpfählen – für Hoch-, Industrie- und Tiefbau sowie für Verkehrs- und Wasserbauten sind bemerkenswert. Mit Hilfe von Pfählen werden Bauwerkslasten auf oder in tiefliegende Schichten abgetragen. Die modernen Großbauten stellen den Bauingenieur vor die Aufgabe, immer größere, konzentrierte Lasten ohne schädliche Setzungen auf/in den Baugrund abtragen zu müssen. Dazu sind stark mechanisierte Herstellungsverfahren entwickelt worden, die dieser Forderung Rechnung tragen.

Wirtschaftliche Überlegungen führen dazu, daß in zunehmendem Maße für konzentrierte Lasten Pfahlgründungen auch dort zur Anwendung kommen, wo früher eine Flachgründung gewählt wurde. Damit können Umspondungen und Wasserhaltungen vermieden, Beton für Fundamente gespart sowie Konstruktion und Bauablauf vereinfacht werden.

Pfähle und Pfahlgründungen zu entwerfen und herzustellen erfordert umfangreiche Kenntnisse. So ist die Auswahl des geeigneten Pfahltyps und der Methode für den Einbau bei dem vorhandenen Baugrund und der Art der Lastaufbringung von großer Bedeutung. Um das Verhalten des Pfahles vorherzusagen, sobald er in dem Untergrund „steht, hängt oder sitzt“ und belastet wird, ist Ingenieurwissen und viel Erfahrung gefragt. Das Tragverhalten ist vorrangig beeinflusst durch die Methode der Herstellung und kann nicht alleine aus den physikalischen Eigenschaften des Pfahles und des ungestörten Bodens vorhergesagt werden. Die Kenntnis von dem Pfahltyp und seiner Herstellart ist ausschlaggebend für ein gründliches Verstehen seiner Wechselwirkung mit dem Baugrund; nur so können realistische Theorien über sein Tragverhalten aufgestellt werden.

Das Buch enthält eine Zusammenstellung der wichtigsten – fast aller – Gesichtspunkte, die für diese Thematik und deren Beurteilung erforderlich sind.

Die Autoren schätzen sich in der glücklichen Lage, über einen langen Zeitraum die Pfahlentwicklung begleitet und auch teilweise an der Entstehungsgeschichte der Großbohrpfähle mitgewirkt zu haben. Dazu hat ihre Tätigkeit im Hause der Firma Bilfinger+Berger Bauaktiengesellschaft, Mannheim, wesentlich beigetragen. Auch gilt hier der Dank den zahlreichen Kollegen, mit denen die Autoren über viele Jahre hinweg zusammengearbeitet haben.

Von der Fa. Bilfinger+Berger sind im Laufe der vergangenen Jahrzehnte herausragende Pfahlgründungen hergestellt worden. In den geschichtlichen Dokumenten des Unternehmens finden wir einen Bericht aus dem Jahr 1933 über die Entwicklung eines eigenen Systems zur Herstellung von Ortbetonpfählen, durch das „die Nachlässigkeit und Unachtsamkeit der Arbeiter in höchstmöglichem Maße ausgeschaltet und die bei anderen Systemen so gefährlichen Einbrüche von Schlamm ausgeschlossen“ werden sollen. Ihre bisherige Krönung fand diese Entwicklung dann im Jahr 1998 mit den Gründungsarbeiten der My Thuan Bridge über den Mekongfluß in Vietnam: mit Bohrtiefen von ca. 100 m und Durchmessern bis zu 2,50 m wurde eine neue Dimension aufgezeigt. Dazu gehört natürlich eine erfahrene und verlässliche Truppe – bis hin zum „letzten Mann“.

Bohrpfähle sind als eigenständiges Thema bisher nicht umfassend in der deutschen Literatur behandelt worden. So war es der Wunsch der Autoren, den derzeitigen Stand der Theorie und Praxis zusammen mit den eigenen Erfahrungen festzuschreiben.

Dieses Buch ist sowohl als Hilfe für den Entwurf wie auch für die Ausführung gedacht. Es soll Ingenieurbüros, Behörden, Studenten und auch den Praktikern dazu dienen, ihr Wissen abzurunden.

Aus der weltweiten Tätigkeit der großen Fachfirmen im Spezialtiefbau, der Zusammenarbeit der Pfahlspezialisten im Rahmen der europäischen Normung und den eigenen Erfahrungen – vor allem bei den Gründungsarbeiten der weltweit größten Schrägkabelbrücke Pont de Normandie – kamen Anregungen für dieses Werk. In anderen Sprachen gibt es wenig Vergleichbares, und wenn es so etwas gibt, dann sind die beiden Teile der Theorie und Praxis ungleich behandelt.

Die zahlreichen Veröffentlichungen weltweit zeigen, daß die Berechnung, Bemessung und Herstellung von Pfählen und die daraus folgenden Gründungen mit der Bewertung des Baugrundes, der Gerätetechnik und der Interpretation von Versuchsergebnissen auf landestypischen Philosophien beruhen. Dieses Buch berücksichtigt diese Besonderheiten, faßt auch internationale Erfahrungen zusammen.

Der handwerklichen Herstellung von Pfählen wird immer weniger Beachtung geschenkt. Vieles ist bei diesen Arbeiten zur Selbstverständlichkeit geworden. Dieses Buch enthält umfangreiche Details hierzu und erläutert auch die speziellen Besonderheiten. Die Entwicklung auf dem Gebiet der Werkzeug- und Gerätetechnik geht weiter; grundlegend neue Entwicklungen sind zur Zeit nicht in Sicht.

Die Grund- bzw. Spezialtiefbauer oder auch Geotechniker leiden darunter, daß das Ergebnis ihrer Arbeit oft in dem Bauwerk oder Baugrund verschwindet, zugleich bleibt aber die Pfahlgründung ein lebenslanger Bestandteil des Bauwerkes. Sie sind die heimlichen Architekten des Untergrundes und wichtige Garanten der Sicherheit des Bauwerks und seiner Nutzer.

Einen besonderen Dank für die Mitarbeit an Herrn Dipl.-Ing. Heinrich Borsy, Weinheim, der in mühevoller Kleinarbeit über viele Jahre hinweg viele der Details erarbeitet und so dem Handbuch auch seinen Stempel aufgedrückt hat.

Mannheim, im Januar 2000

Jörn M. Seitz  
Heinz-Günter Schmidt

# Inhaltsverzeichnis

<b>Vorwort</b> .....	V
<b>Inhaltsverzeichnis</b> .....	VII
<b>1 Vom Ramppfahl zum Großbohrpfahl</b> .....	1
1.1 Warum Pfahlgründungen? .....	1
1.2 Ramppfähle .....	1
1.3 Historischer Bohrfahl .....	5
1.4 Beispiele der Neuzeit .....	7
<b>2 Pfahltypen</b> .....	11
2.1 Verwendungshäufigkeit verschiedener Pfahltypen .....	11
2.2 Vorgefertigter Ramppfahl .....	14
2.3 Ortbeton-Ramppfahl .....	14
2.4 Verpreßpfahl .....	15
2.5 Schraubbohrpfahl .....	17
2.6 Großbohrpfähle .....	18
2.7 Bohrpfähle herkömmlicher Bauart .....	23
2.8 Verpreßpfähle mit kleinem Durchmesser .....	24
2.9 Sonderpfähle .....	27
2.10 Vor- und Nachteile bei der Herstellung von Bohrpfählen und Verdrängungspfählen .....	28
<b>3 Was kann der Großbohrpfahl?</b> .....	31
3.1 Verwendung von Bohrpfählen .....	31
3.2 Einzelpfähle .....	31
3.3 Pfahlgruppen .....	41
3.4 Stützkonstruktionen .....	49
3.5 Sonderfälle .....	56
<b>4 Planungs- und Ausführungsunterlagen für Bohrfahlgründungen</b> .....	65
4.1 Grundsätze der Ausschreibung .....	65
4.2 Anforderungen .....	66
4.3 Baugrunderkundung und Machbarkeit .....	67
4.4 Örtlichkeiten .....	69
4.5 Pfahlanordnung .....	70
4.6 Anhaltswerte für die Tragfähigkeit .....	71
4.7 Probelastungen .....	72
4.8 Anhaltswerte zu den Kosten von Bohrpfählen .....	72
4.9 Arbeitsvorbereitung .....	73
4.10 Baustelleneinrichtung .....	74
4.11 Baulärm .....	76
<b>5 Berechnungen von Bohrfahlgründungen</b> .....	77
5.1 Äußere Tragfähigkeit unter axialer Belastung .....	77
5.2 Äußere Tragfähigkeit bei einer Belastung quer zur Pfahlachse .....	102
5.3 Gruppenwirkung .....	115
5.4 Belastung der Pfähle durch den Baugrund .....	124
5.5 Innere Tragfähigkeit, Bemessung .....	131

<b>6</b>	<b>Herstellen des Bohrloches für Großbohrpfähle</b> .....	133
6.1	Grundlagen .....	133
6.2	Die Grundprinzipien des Bohrens .....	135
6.3	Bohrverfahren .....	141
6.4	Die Bohranlage .....	190
6.5	Bohrwerkzeuge und Geräte .....	215
6.6	Zubehör .....	254
6.7	Hinweise für die Ausführung .....	259
<b>7</b>	<b>Verwendung des Bohrloches</b> .....	295
7.1	Bewehrung für den Stahlbetonpfahl .....	295
7.2	Beton für Großbohrpfähle .....	316
7.3	Betonieren .....	335
7.4	Einbau von Stahlträgern .....	351
7.5	Einbau von Fertigteilen .....	353
<b>8</b>	<b>Verbesserung der Tragfähigkeit</b> .....	357
8.1	Verbesserung des Baugrundes vor der Pfahlherstellung .....	357
8.2	Maßnahmen während der Pfahlherstellung .....	361
8.3	Verbesserung der Lastübertragung nach der Herstellung des Pfahles .....	369
<b>9</b>	<b>Prüfungen</b> .....	381
9.1	Allgemeines .....	381
9.2	Prüfen der Tragfähigkeit .....	381
9.3	Prüfen des Pfahlschaftes (Integritätsprüfung) .....	405
<b>10</b>	<b>Schadensfälle an Pfählen</b> .....	419
10.1	Schadensursachen .....	419
10.2	Fehlerquellen .....	419
10.3	Fehler an Pfählen .....	422
10.4	Fehler ist nicht gleich Fehler .....	425
10.5	Vermeiden von Fehlern .....	426
10.6	Sanieren .....	427
10.7	Beispiele von Schadensfällen .....	432
<b>11</b>	<b>Sonderfälle der Anwendung</b> .....	449
11.1	Allgemeines .....	449
11.2	Die Essener Dichtlamelle .....	449
11.3	Baufeldfreimachung am Reichstag in Berlin .....	451
11.4	Hochhausgründungen .....	453
11.5	Dichtungswand aus Bohrpfählen .....	455
11.6	Ungewöhnlicher Großversuch .....	457
11.7	Gründung der My Thuan Brücke .....	458
<b>12</b>	<b>Entwicklung und Forschung</b> .....	461
12.1	Allgemeine Feststellung .....	461
12.2	Arbeiten an Hochschulinstituten .....	461
12.3	Tagungen speziell über Pfähle .....	462
<b>13</b>	<b>Der Beruf des Pfahlbauers</b> .....	463
13.1	Die Bohrmannschaft .....	463
13.2	Der Bauleiter .....	464

13.3	Der Polier	466
13.4	Der Geräteführer	466
13.5	Der Bohrhelfer	467
<b>14</b>	<b>Maßgebliche Normen</b>	<b>469</b>
14.1	Nationale Normen	469
14.2	Neue Entwicklungen	469
14.3	Zukünftige Pfahlnormen	470
<b>15</b>	<b>Literatur</b>	<b>471</b>
15.1	Geltende Vorschriften	471
15.2	Zitierte Literatur	471
15.3	Weitere Literatur	475
15.4	Sonstiges	481
<b>Register</b>		<b>483</b>

Hierin bedeuten:

$E \cdot J$	Biegesteifigkeit des Bohrpfahls
$n_{hE}$	Bettungsmodul des Einzelpfahls in der Tiefe $z = D$
$n_{hi}$	Bettungsmodul des Bohrpfahls in der Gruppe in der Tiefe $z = D$
$l$	Länge des Bohrpfahls

b) Bei über die Tiefe konstantem Bettungsmodul (als obere Grenze für Pfähle in überkonsolidierten bindigen Bodenarten)

$$k_s(z) = k_s = \text{const}$$

gilt mit der elastischen Länge  $L$  des Einzelpfahls und dem Bettungsmodul des Einzelpfahls  $k_{sE}$

$$L = (E \cdot J / k_{sE} \cdot D)^{0,25} \quad (5-28)$$

$$\text{für } l/L \geq 4: k_{si} = \alpha_i^{1,33} \cdot k_{sE} \quad (5-29)$$

$$l/L \leq 2: k_{si} = \alpha_i \cdot k_{sE} \quad (5-30)$$

Für Werte  $4 > l/L > 2$  darf linear interpoliert werden.

Die Gleichungen Gl. (5-24) bis (5-30) gelten für gelenkig an eine Pfahlkopfplatte angeschlossene Pfähle und für teilweise oder voll in eine Pfahlkopfplatte eingespannte Pfähle.

## 5.4 Belastung der Pfähle durch den Baugrund

### 5.4.0 Einführung

Normalerweise bewegen sich die Pfähle infolge einer Bauwerkslast gegenüber dem umgebenden Baugrund und mobilisieren dadurch stützende Bodenreaktionen. Es gibt aber Fälle, in denen sich der umgebende Boden stärker verschiebt als der eingebettete Pfahl, so daß dieser durch den Boden zusätzlich belastet wird, statt gestützt zu werden.

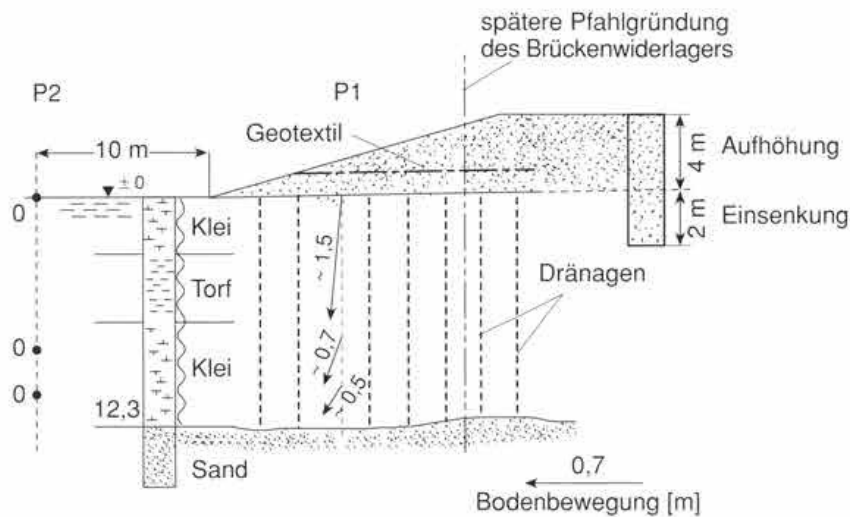
#### 5.4.1 Negative Mantelreibung

Negative, d. h. den Pfahl nicht stützende, sondern belastende Mantelreibung tritt dort auf, wo der Boden sich stärker nach unten bewegt als der Pfahl. Das kommt beispielsweise vor bei:

- weichen, bindigen Böden, die unter ihrem eigenen Gewicht noch nicht konsolidiert sind
- organischen Böden wie Torf, die durch Zersetzung zusammensacken
- lockeren, nichtbindigen Böden, die sich infolge von Erschütterungen verdichten und dabei setzen
- stärker zusammendrückbaren Böden, die einer zusätzlichen Belastung ausgesetzt werden, beispielsweise durch eine Grundwasserabsenkung oder durch eine Auflast

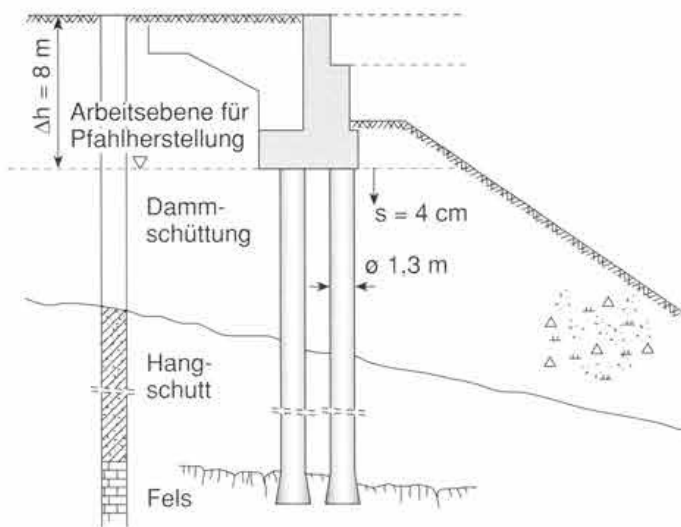
Bild 5.4-1 zeigt die Setzungen unter dem Anschlußdamm für ein Brückenwiderlager. In solchen Fällen wird man versuchen, durch eine Vorschüttung mit ausreichender Liegezeit die Setzungen vorwegzunehmen, bevor die Pfähle hergestellt werden.

In zusammendrückbaren Schichten ist auch die Mantelreibung gering und wird meist mit 10 bis 20 kN/m<sup>2</sup> angesetzt. Besonders ungünstig ist der Fall, daß tragfähige Schichten mit großer Mantelreibung über Weichschichten liegen und mit ihnen nach unten sacken. Durch den Einbau einer Folie, die den Bewehrungskorb umschließt und für den Pfahlbeton als Schalung wirkt [15], kann in solchen Schichten die negative Mantelreibung reduziert werden (siehe auch Abschnitt 3.2.4).



**Bild 5.4-1**  
Setzung eines Dammuntergrundes aus Klei und Torf nach [50]

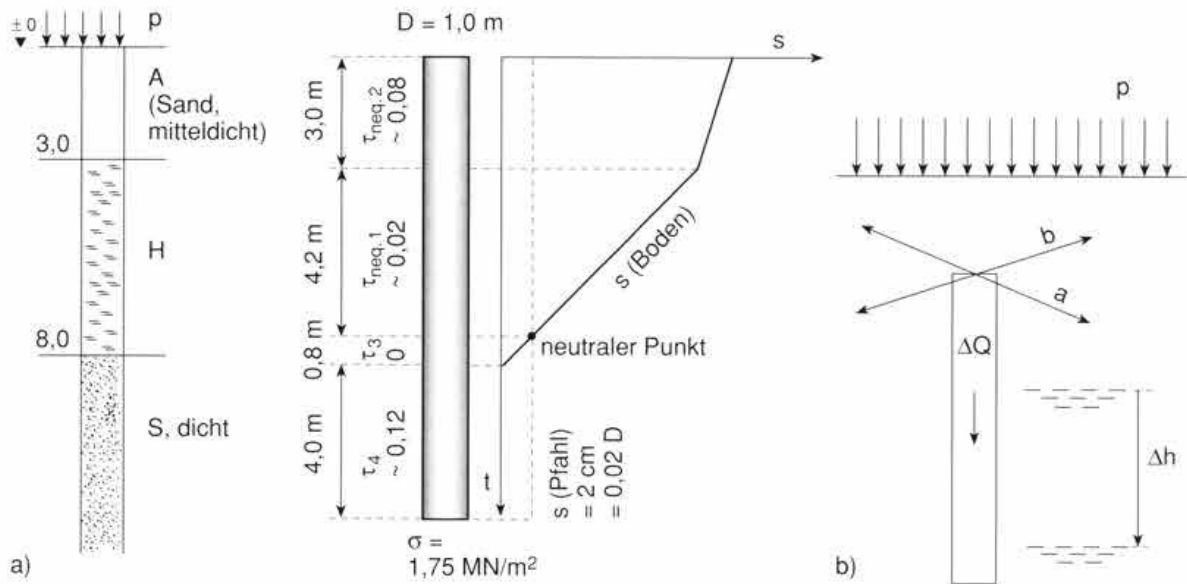
Auch aus gutem Material geschüttete und verdichtete Dämme können sich nach der Pfahlherstellung noch erheblich setzen, wenn das Widerlager und die nachträgliche Aufschüttung relativ hoch sind (siehe Bild 5.4-2) [51].



**Bild 5.4-2**  
Setzung einer Dammschüttung aus Sand, Steinen und Schluff [51]

Negative Mantelreibung wirkt bis zu der Tiefe, wo die Setzung des Pfahles und die des angrenzenden Bodens gleich groß sind. Dieser „neutrale Punkt“ muß durch Abschätzung der Setzungen ermittelt werden (Bild 5.4-3a).

Bei einer ausgedehnten Pfahlgruppe kann die Zusatzlast eines Pfahles aus negativer Mantelreibung nicht größer werden als die Auflast, welche die Zusammendrückung des nachgiebigen Bodens auslöst (Bild 5.4-3b).



GZ2

$$R = 4 \cdot 3,14 \cdot 0,12 + 0,79 \cdot 1,75 = 1,51 + 1,38 = 2,89 \text{ MN}$$

$$S_1 (\tau_{\text{neg}}) = 3,14 \cdot (3 \cdot 0,08 + 4,2 \cdot 0,02) = 0,75 + 0,26 = 1,01 \text{ MN}$$

Für das Bauwerk nutzbare Pfahllast

$$S_2 (\text{Bauwerk}) = R - S_1 = 1,88 \text{ MN}$$

Pfahlabstände a, b

a) Grundwasserabsenkung  $\Delta h$ 

$$\Delta Q \leq a \cdot b \cdot \Delta h (\gamma - \gamma') \quad (5-31)$$

b) Auflast p

$$\Delta Q \leq a \cdot b \cdot p \quad (5-32)$$

**Bild 5.4-3**

Berücksichtigung von negativer Mantelreibung

a) Ermittlung der nutzbaren Pfahlbelastung

b) obere Grenzwerte für die Zusatzlast bei Grundwasserabsenkung bzw. Auflast

### 5.4.2 Seitendruck

Bei Pfählen unter horizontaler Belastung wird unterschieden in:

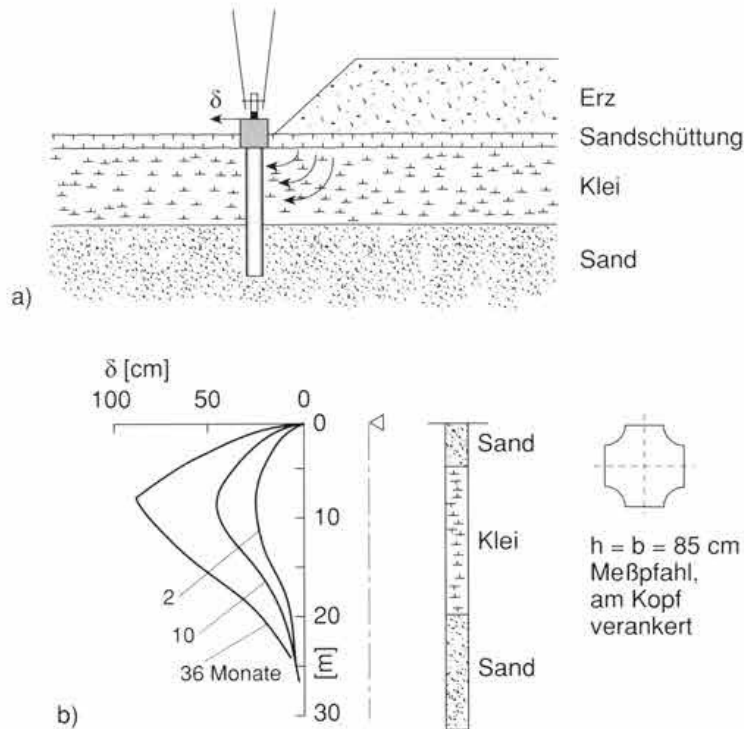
- aktive Pfähle, die planmäßig Horizontallasten aus dem Bauwerk auf den Baugrund übertragen (siehe Abschnitt 5.2) und in
- passive Pfähle, die durch die Bewegung weicher bindiger Böden, beispielsweise unter einseitiger Auflast, mehr oder weniger unplanmäßig belastet werden

Ein Beispiel zeigt Bild 5.4-4a. An der Kranbahn eines Erzlagers waren große Verschiebungen aufgetreten. Zur Erkundung der Vorgänge wurde ein instrumentierter Stahlpfahl gerammt und beobachtet (Bild 5.4-4b). Nach drei Jahren war der Pfahl unter der Wirkung des Seitendrucks durchgebrochen [52]. Eine ähnliche Ausgangssituation liegt vor bei Brückenwiderlagern auf Pfahlgründungen mit Anschlußdämmen auf weichen bindigen Böden (vgl. Abschnitt 5.4.1, Bild 5.4-1).

Die Gefahr, daß weiche bindige Böden unter einer Auflast zu fließen beginnen, besteht immer dann, wenn:

- der Boden eine breiige Konsistenz hat mit  $I_c = 0,25$
- der Boden stark organisch ist mit einem Glühverlust  $V_{gl} > 15\%$ , dazu einen großen natürlichen Wassergehalt hat mit  $w \geq 75\%$ , und außerdem die Geländebruchsicherheit weniger als  $\eta = 1,8$  beträgt
- ein anorganischer bindiger Boden eine Standsicherheit  $\eta < 1,5$  aufweist





**Bild 5.4-4**  
Langzeitversuch. Wirkung des Seitendruckes auf einen Stahlpfahl [52]  
a) Situation, b) Meßergebnisse

Bei unzureichender Standfestigkeit des bindigen Bodens sind 2 Fälle möglich [53]:

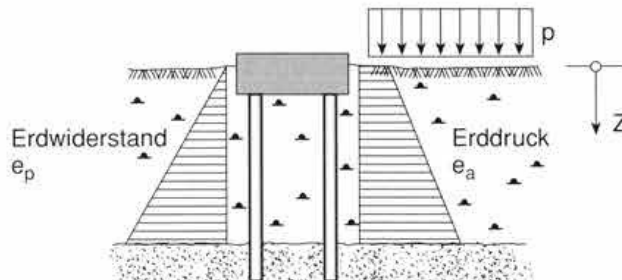
1. Der weiche Boden umfließt die Pfähle. Dabei baut sich ein Staudruck  $p_f$  auf, der der Scherfestigkeit des undränierten Bodens  $c_u$  proportional ist:

$$p_f \approx 10 \cdot c_u \cdot b \quad b = \text{Pfahlbreite} \quad (5-33)$$

2. Die Pfähle stabilisieren den weichen bindigen Boden durch ihre Biegesteifigkeit. Die dafür erforderliche Kraft wird durch einen Vergleich der treibenden und widerstehenden Kräfte im bindigen Boden ermittelt (siehe Bild 5.4–5):

$$\Delta e \approx e_a - e_p = \gamma \cdot z + \Delta p - 2c_u - \gamma \cdot z = \Delta p - 2c_u \quad (5-34)$$

Der **kleinere** dieser Seitendrucke ist maßgeblich!



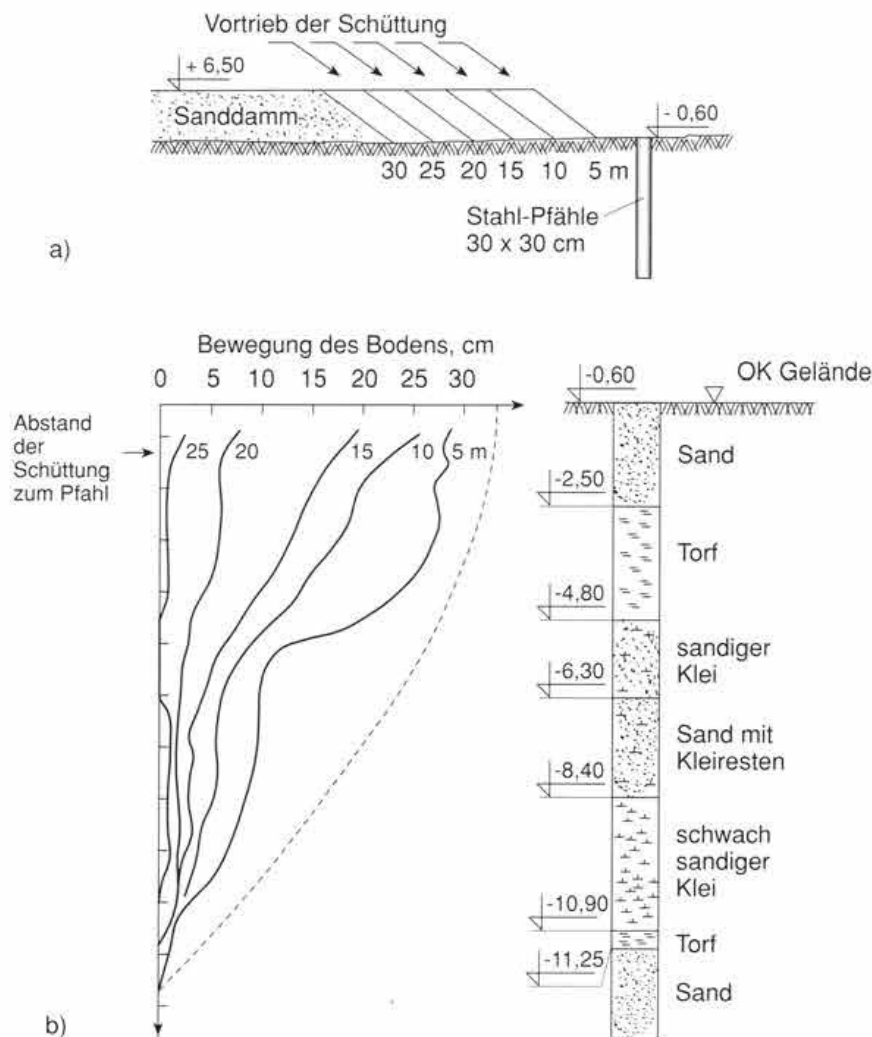
**Bild 5.4-5**  
Treibende und widerstehende Erddruckkräfte in weichem, bindigem Boden nach [53]

Auch für die Einflußbreite eines einzelnen Pfahles hinsichtlich des Seitendrucks gibt es verschiedene obere Grenzwerte, von denen jeweils der **kleinste** maßgeblich ist, beispielsweise:

- dreifache Pfahlbreite
- Achsabstand quer zur Krafrichtung
- Dicke der weichen Schicht

Es gibt noch keine allgemein anerkannte Richtlinie, wie der Abstand zwischen einer Auflast und einer Pfahlgründung zu berücksichtigen ist. Beobachtungen an Meßpfählen während des Vortriebs eines Dammes, der „vor Kopf“ geschüttet wurde zeigen, daß dieser Faktor erhebliche Auswirkungen hat, und daß die Verschiebungen des Bodens mit Annäherung an eine feste, unterlagernde Schicht abnehmen (siehe Bild 5.4-6) [54].

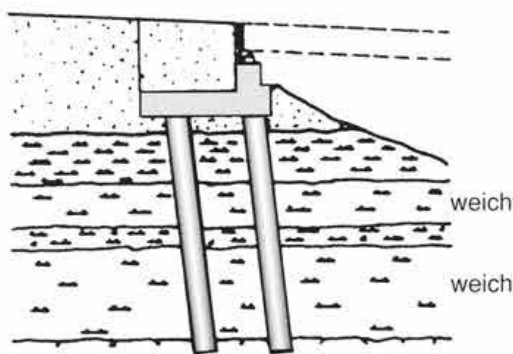
Die vergleichsweise schnelle Konsolidierung von Auelehmen macht bei solchem Untergrund eine lagenweise Schüttung der Anschlußdämme mit Zwischenkonsolidierung möglich. Bei einer



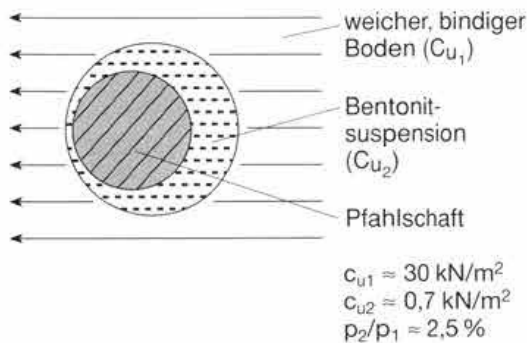
**Bild 5.4-6**

Verformung eines Stahlpfahles in weichem, bindigem Boden, infolge der Annäherung einer Dammschüttung [54]

a) Situation, b) Meßwerte



**Bild 5.4-7**  
Pfahlgründung für ein Brückenwiderlager in weichem Auelehm



**Bild 5.4-8**  
Knopflochgründung nach [55]

Brücke in Neckarsulm (Bild 5.4-7) wurde der Damm in 3 Etappen geschüttet und dadurch der rechnerische Seitendruck auf ein Drittel reduziert. Die Wartezeiten nach jeder Schüttlage betragen etwa zwei Wochen.

Bei der sogenannten Knopflochgründung wird versucht, den Fließdruck auf die Pfähle dadurch zu begrenzen, daß man die Schäfte mit einer Bentonitsuspension umgibt. Die kann den Bodenbewegungen folgen, ohne großen Druck auf die Pfähle auszuüben. Allerdings sind den Fließwegen Grenzen gesetzt (siehe Bild 5.4-8).

*Beispiel:* Höhe des Anschlußdammes  $h = 4 \text{ m}$ , Auflast  $\Delta p = 4 \cdot 18 = 72 \text{ kN/m}^2$

### 1. Strömungskraft

a) auf (hintere) Einzelpfähle

$$p_f = 10 \cdot c_u \cdot b \\ = 10 \cdot 20 \cdot 1,50 = 300 \text{ kN/m}$$

b) auf einen (vorderen) Pfahl in der Reihe

$$\text{Verbauwirkung: } b/a = 1,50/2,80 = 0,54 \\ p_f \approx 2 \cdot 300 = 600 \text{ kN/m}$$

c) Fließdruck auf die Pfahlgruppe

$$\Sigma P_f \approx 10 \cdot (2 \cdot 300 + 5 \cdot 600) = \\ = 36000 \text{ kN} = 36 \text{ MN}$$

### 2. Erddruckvergleich (siehe dazu Bild 5.4-5)

Maßgeblich für die Belastungsbreite ist die gesamte Breite der Pfahlgruppe. Die Grenze wird im Abstand von  $3D/2$  zu den Achsen der Randpfähle angesetzt.

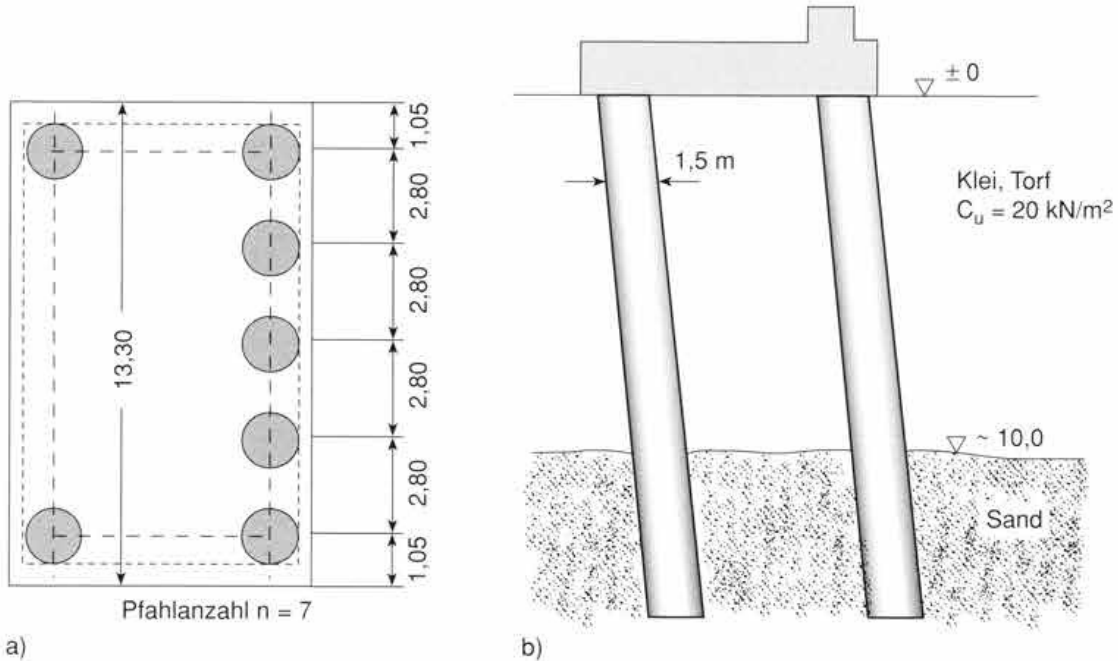
$$\text{rechn. } B = 4 \cdot 2,80 + 2 \cdot 1,5 \cdot 1,50 = 15,70 \text{ m}$$

$$\text{Erddruckdifferenz } \Delta E = (\text{cal } E_a - \text{cal } E_p) \cdot \text{rechn. } B$$

$$\text{cal } e_a = \gamma \cdot z + \Delta p - 2c_u \quad (5-35)$$

$$\text{cal } e_p = \gamma \cdot z \quad (5-36)$$

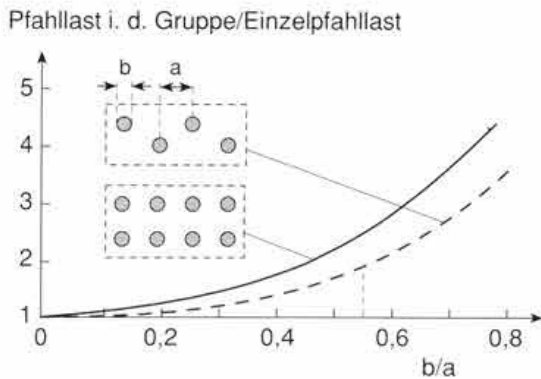
$$\Delta E = (\Delta p - 2c_u) \cdot z \cdot \text{rechn. } B \\ = (72 - 2 \cdot 20) \cdot 10 \cdot 15,70 = \\ = 5024 \text{ kN} = 5 \text{ MN}$$



**Bild 5.4-9**  
 Beispiel für den Seitendruck auf die Pfahlgründung eines Brückenwiderlagers  
 a) Grundriß  
 b) Schnitt

Das bedeutet, die Pfähle stabilisieren die weiche Schicht, ein Fließen tritt nicht ein, da  $\Delta E < \Sigma P_f$   
 Belastung der Pfahlschäfte im Bereich der weichen Schicht  
 $q \approx \Delta E/n \cdot z = 5024/7 \cdot 10 = 72 \text{ kN/m}$

Durch Einbau von lotrechten Dräns zur Beschleunigung der Entwässerung und Schüttung des Dammes in beispielsweise 3 Teilhöhen, wobei jeweils die Konsolidierung des Bodens abgewartet wird, kann die vom unkonsolidierten Boden aufzunehmende Last  $\Delta p$  und damit die Pfahlbelastung  $q$  auf ein Drittel reduziert werden. Besser ist die Schüttung des Dammes vorab und Herstellung der Pfähle erst nach der Konsolidierung der Weichschichten.



**Bild 5.4-10**  
 Anwachsen der Einzelfahllast (um den auf der Ordinate angegebenen Faktor) durch die Verbauwirkung einer Pfahlgruppe nach [56]

## 5.5 Innere Tragfähigkeit, Bemessung

Die „innere Tragfähigkeit“ eines Pfahles ist durch die Bruchlast seines Schaftes gegeben. Je nach der planmäßigen Belastung müssen die Pfähle als Druckglieder, Zugglieder oder auf Biegung mit Längskraft bemessen werden.

Bei vollständig im Boden eingebetteten Pfählen braucht nach DIN V1054 Teil 100 im allgemeinen kein Knicknachweis geführt zu werden. Ausgenommen sind Pfähle in weichen bindigen Böden mit  $c_u \leq 15 \text{ kN/m}^2$ . Zu beachten ist, daß die Knicksicherheit von Stützen, die auf Einzelpfählen gegründet sind, durch eine seitliche Verschiebung und eine Verdrehung des Pfahlkopfes infolge von Querkraften herabgesetzt wird.

Zusätzlich zu den planmäßigen Lasten müssen bei Pfählen häufig mögliche außerplanmäßige Belastungen in Betracht gezogen werden. Für Bohrpfähle muß beispielsweise nach DIN 4014 grundsätzlich berücksichtigt werden, daß die Pfahlachse im Bohransatzpunkt um 5% des Pfahldurchmessers, mindestens aber um 5 cm von der Sollage abweichen kann, und die Pfahlneigung um 1,5% von der Sollrichtung. Nach E DIN 4014-500 betragen die zu berücksichtigenden Herstellungstoleranzen für die Lage mindestens 10% des Durchmessers, mindestens aber 10 cm, und der Neigung 2 cm/m bei lotrechten und steil gestellten Pfählen, 4 cm/m bei Neigungen von 15:1 bis 4:1.

Durch seitlich aufgebrachte, zusätzliche Auflasten, durch die spätere Herstellung einer Baugrube mit nachgiebigem Verbau in unmittelbarer Nähe der Pfähle, oder durch Bewegungen weicher, bindiger Böden können die Pfähle auf Biegung beansprucht werden. Dasselbe gilt für Schrägpfähle, wenn Setzungen des umgebenden Bodens eintreten können, beispielsweise bei Lagerhallen, bei denen nur die Stützen des Bauwerks, nicht aber die Hallenfußböden auf Pfählen gegründet werden.

Pfähle werden im Regelfall zentralsymmetrisch bewehrt. Die erforderliche Längsbewehrung kann mit Hilfe von Interaktionsdiagrammen oder von elektronischen Rechenprogrammen ermittelt werden. In DIN 1045 wird eine Mindestbewehrung von 0,8% des statisch erforderlichen Querschnitts verlangt. Für Großbohrpfähle enthält die ZTV-K 80 im Abschnitt 6.3.43 weitergehende Forderungen.

Wenn bei Großbohrpfählen wegen aggressiven Grundwassers die Rissebeschränkung nachgewiesen werden muß, kann sich die Bewehrung erheblich vergrößern, weil die Stabdurchmesser aus konstruktiven Gründen relativ groß sind. Bei horizontaler Belastung müssen diese Pfähle auch auf Schub bemessen werden.

### 6.7.5 Arbeiten mit dem Freifallmeißel

Der Freifallmeißel ist ein Bohrwerkzeug zum Durchörtern von Bohrhindernissen wie z. B. Mauerwerk, Findlingen, Felsschichten o. ä. Mit dem Freifallmeißel wird auch die Pfahleinbindung in Felsschichten hergestellt. Er hängt am Seil des Trägergerätes. Der Geräteführer läßt ihn auf die Bohrlochsohle fallen, wobei er mehr oder weniger tief in den Untergrund eindringt.

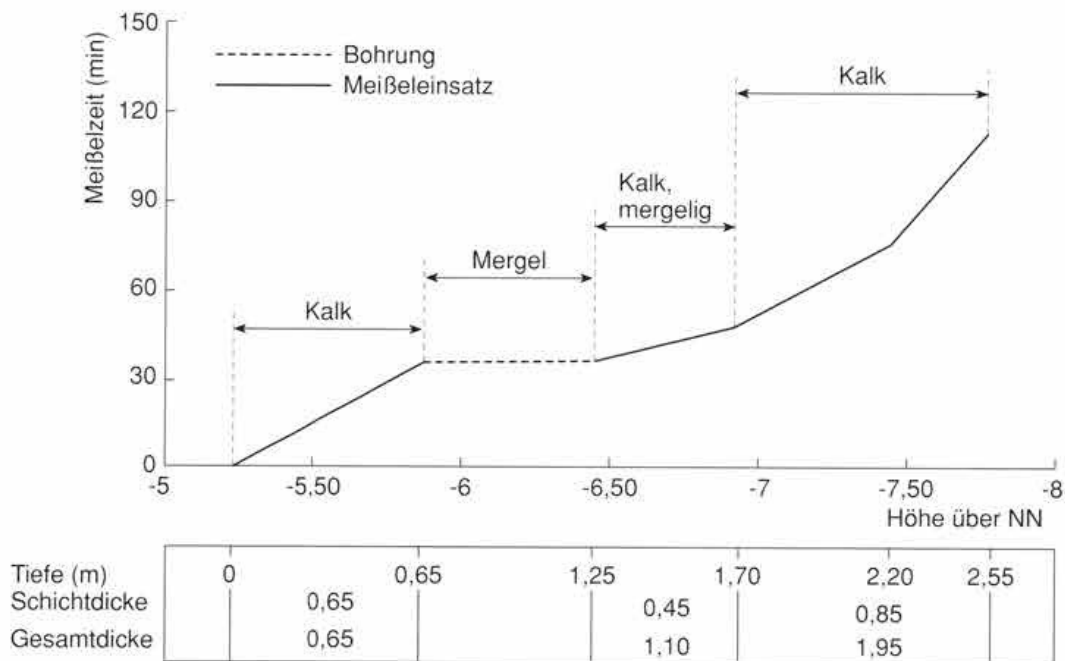
Die Meißelarbeit beruht auf dem Prinzip, daß die Lageenergie ( $G \cdot h$ ), die in dem um die Fallhöhe  $h$  angehobenen Meißel mit dem Gewicht  $G$  steckt, beim Fallen in Bewegungsenergie ( $1/2 m v^2$ ) und auf der Bohrlochsohle in Kerb- bzw. Zertrümmerungsarbeit umgesetzt wird. Die Einzelschlagarbeit muß so groß sein, daß eine örtliche Zerstörung erzeugt, d. h. das anstehende Hindernis zum Zerplatzen gebracht bzw. zertrümmert wird.

Bei trockenen Bohrlöchern wird die Meißelleistung durch geringe Wasserzugabe ins Bohrloch verbessert. Auch das Meißelgut läßt sich mit Hilfe von Wasser leichter aus dem Bohrloch entfernen. Das Wasser bildet mit dem Bohrklein meist einen dickflüssigen Brei, der dann mit der Schlammbüchse oder der Kiespumpe gefördert werden kann. Außerdem wird durch Wasser im Bohrloch die Meißelschneide laufend gekühlt, wodurch ihre Standzeit wesentlich erhöht wird.

Durch die Zugabe von etwas Bentonit kann der Meißelschneidenabrieb verringert werden. Für die jeweiligen Einsätze stehen verschiedene Meißelformen zur Verfügung.

Damit kein unnötiger Verschleiß an Bohrergerät und Bohrwerkzeug auftritt, sollten beim Meißeln im trockenen Bohrloch folgende Fallhöhen nicht überschritten werden:

- Weichgestein: maximal  $H = 3,0$  m
- Hartgestein: maximal  $H = 4,0$  m



**Bild 6.7-9**

Beispiel eines Meißeldiagrammes, das die Einbindung eines Pfahles in felsigen Untergrund darstellt [13]

Bei Meißelarbeiten unter Wasser kann jeweils ungefähr mit der doppelten Fallhöhe wie im trockenen Bohrloch gearbeitet werden. Größere Fallhöhen bei Wasser bringen nicht viel mehr Wirkung, da ein erheblicher Teil der Fallenergie beim Aufschlag auf das Wasser verloren geht.

Weich gebettete Einzelsteine oder Findlinge dämpfen den Meißelaufschlag stark, deshalb kann mit einer etwas größeren Fallhöhe als der bei Massivgestein eher eine Zertrümmerung des Steines erreicht werden. Meißelarbeiten sind oft nur mit Zustimmung der Bauaufsicht durchführbar. Es ist zweckmäßig, die Vergütung nach Metern und nicht nach Zeit vorzunehmen. Ein Einheitspreis dafür muß im Leistungsverzeichnis vorgesehen sein.

Da die Notwendigkeit eines Meißeleinsatzes oft strittig ist und die Kosten dafür hoch sind, empfiehlt es sich, die Meißelarbeiten mit extremer Genauigkeit zu überprüfen und zu verzeichnen.

### 6.7.6 Arbeiten mit Bohrgreifern

Der Greifer wird hauptsächlich dort eingesetzt, wo Bodenarten wie Auffüllung, Ton, Schluff, Sand, Lehm, Kies, etc. im Trockenen ausgehoben werden.

Beim Arbeiten unter Wasser eignet sich der Greifer in der Regel nur in Auffüllung, Ton und Lehm, weniger hingegen in Sanden und Kiesen, da diese meistens beim Greiferrückzug aus den Schaufeln geschwemmt werden. Mit Ausnahme der eingesicherten Greifer ist der Bohrgreifer ein Freifall-Stechwerkzeug. Die Fallhöhe der Greifer muß dem zu lösenden Boden angepaßt werden. Übergroße Fallhöhen bringen keine Leistungssteigerung, sondern führen zu kostspieligen Gewaltschäden.

Dazu einige Anhaltswerte für trockene Bohrlöcher:

- steifplastische, bindige Böden                    ~ 6 m
  - halbfeste bzw. mitteldicht gelagerte  
  bis dicht gelagerte Böden                    ~ 4 m
  - rollige Böden                                        0,5–1 m
- (in dieser Bodenart soll nur  
„gegraben“ werden)

Wasser im Bohrloch bedeutet Leistungsabfall wegen der Bremswirkung auf den Greifer und durch Ausspülungen des Feinmaterials im Fördergut, besonders bei rolligen Böden. Die Fallhöhen bei Arbeiten unter Wasser regulieren sich gegenüber den Fallhöhen im trockenen Bohrloch von alleine.

### 6.7.7 Arbeiten mit der Sand- und Kiespumpe

Für Bohrungen bei hoher Wassersäule sind die HW-Sand- und Kiespumpen wegen ihres großen Fassungsvermögens (bis 2000 l pro Hub) äußerst leistungsfähig. Sie eignen sich ganz besonders gut zum Fördern von Kiesen und Sanden, Schlamm, Meißelklein usw., aber auch z. B. zum Einfangen von Gesteinsbrocken.

Die HW-Sand- und Kiespumpe steigert erheblich die Leistung der Felsmeißel bei Arbeiten im Grundwasser, weil die Bohrsohle nach jeder Meißelphase völlig vom Meißelklein gereinigt werden kann.

Beim Reinigen der Gründungssohle im Grundwasser mit manchen Bohrgreifern kann die Aufstandsfläche wegen der Form der Greiferschaufeln oft nur unzureichend von gelöstem, aufgelockertem und abgelagertem Material gesäubert werden.

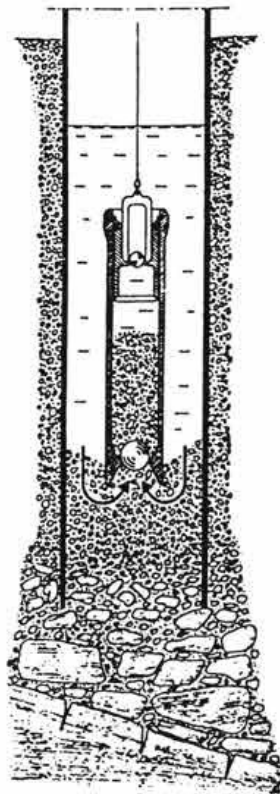
Beim Fördern z. B. von Feinsanden oder Schlamm durch eine hohe Wassersäule werden bekanntlich ständig Feinstoffe aus den Greiferschaufeln ausgespült, die als Schwebstoffe die Bohrtrübe bilden und sich vor dem Betonieren auf der Gründungssohle ablagern.

Mit der HW-Sand- und Kiespumpe ist es möglich, die Gründungssohle unmittelbar vor dem Betonieren bestens zu reinigen. Das untere Kugelventil ermöglicht es, die ganze Pfahlaufstandsfläche praktisch vollkommen zu säubern. Die Qualität der Pfahlgründung kann damit in vielen Fällen erheblich verbessert werden.

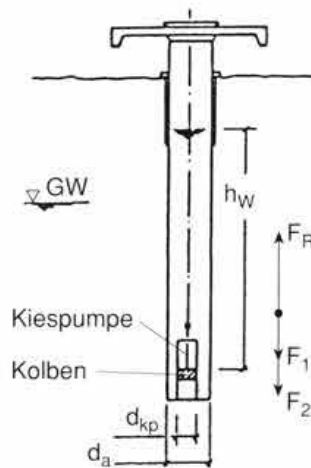
Sowohl in der DIN 4014 (1990) 6.2.1 als auch in der zukünftigen Euronorm für Bohrpfähle DIN EN 1536 wird auf die Kolbenwirkung bei Arbeiten mit der Kiespumpe hingewiesen. Die Angaben sind jedoch sehr allgemein gehalten. Sie besagen lediglich, daß bei Bohrungen, die mit Flüssigkeitsdruck gestützt werden, darauf zu achten ist, daß der Überdruck durch die Kolbenwirkung beim Ziehen des Bohrwerkzeuges nicht beeinträchtigt werden darf.

In der alten DIN 4014 (1977) Teil 2, Erläuterung zu 6.2.1, wurde folgendes verlangt:

„Um die Kolbenwirkung beim Ziehen der Kiespumpen, besonders in feinen, gleichkörnigen Böden ohne Kohäsion, einzuschränken, darf das Durchmesser Verhältnis von Kiespumpe  $D_2$  zur Bohrung  $D_1$  nicht größer als 0,5 sein ( $D_2/D_1 \leq 0,5$ ),“ siehe dazu Tabelle 6.5-4 im Abschnitt 6.5.9. Starker Aufschlag auf die Wasserfläche führt oft zur Zerstörung, nicht zu einer Leistungssteigerung. Bei Fein- und Mittelsanden ist nicht zu oft zu pumpen; das Wasser-Sandgemisch führt zu Kolbenverklemmungen.



**Bild 6.7-10**  
HW-Sand- und Kiespumpe



**Bild 6.7-11**  
Krafteinwirkung auf die Kiespumpe