

1 Vom Rammpfahl zum Großbohrpfahl

1.1 Warum Pfahlgründungen?

Auf schlechtem Baugrund sollten keine Bauwerke mit flachliegender Gründung errichtet werden. Bauwerke mit einer Flachgründung auf so einem Baugrund würden sich stark setzen, schief stellen, reißen oder im Boden versinken.

Schon im Altertum wurden daher bei schlechten Bodenverhältnissen Holzpfähle in den Boden gerammt, mit deren Hilfe Bauwerkslasten auf tieferliegende, tragfähige Schichten abgetragen wurden. Die Bauwerke hatten dann eine Tiefgründung.

In neuerer Zeit werden Holzpfähle nur noch sehr vereinzelt zur Gründung von Bauten für vorübergehende Zwecke wie Lehrgerüste, Baukranbahnen usw. gerammt, da die aufnehmbaren Pfahllasten gering sind und die Lebensdauer der Holzpfähle wegen Verrottungsgefahr begrenzt ist.

Die Gründung bleibender Bauwerke bei ungünstigen Untergrundverhältnissen kann mit gerammten oder eingerüttelten Fertigpfählen aus Stahl oder Stahlbeton erfolgen. Häufig werden auch an Ort und Stelle Ortbetonpfähle hergestellt. Dabei werden vorgebohrte Löcher mit Beton gefüllt. Weil die Herstellung dieser Ortbetonpfähle in Bohrlöchern erfolgt, nennt man sie Bohrpfähle. Bei Bedarf können diese Bohrpfähle bewehrt werden.

Im heutigen Tiefbau gewinnt die Tiefgründung durch Bohrpfähle mit großen Durchmessern von 50 cm bis über 200 cm immer mehr an Bedeutung, besonders dort, wo die oberflächennahen Bodenschichten keine hohen, konzentrierten Lasten aufnehmen können. Diese „dicken“ Bohrpfähle werden Großbohrpfähle genannt. Sie können mit ihrer großen Tragkraft jeweils mehrere Pfähle herkömmlicher Art ersetzen.

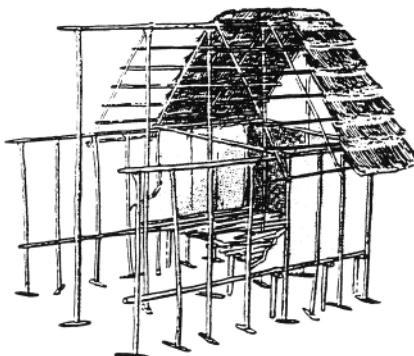
In den dicht bebauten Industriestaaten ergibt sich immer häufiger die Notwendigkeit, auch auf schlechtem Baugrund zu bauen. In der Regel ist die Standortfrage für Industrie- und Verkehrsbauten von größerer wirtschaftlicher Bedeutung als die durch schlechte Baugrundverhältnisse entstehenden Mehrkosten. Die durch diese Umstände bedingte Zunahme der Tiefgründungen hat die Entwicklung mechanisierter Gründungsverfahren sehr positiv beeinflußt.

1.2 Rammpfähle

1.2.1 Geschichte

Holzpfähle sind die älteste Pfahlart, die wir für die Gründung von Bauwerken kennen. Holz gehört zu den ersten Baustoffen, die für Bauten verwendet wurden. Es hatte den Vorzug, reichlich vorhanden zu sein, und den Vorteil, sich leicht bearbeiten zu lassen. Deswegen wurden Holzpfähle für Bauten im und über Wasser verwendet, wie z. B. für Pfahlbauten, Stege durch Sümpfe u. v. a. m.

Daß heute noch Spuren von jahrtausendealten Gründungen vorhanden sind, verdanken wir der Tatsache, daß Holz – ohne mit dem Luftsauerstoff in Berührung zu kommen – ständig unter dem Wasserspiegel, „unendlich“ lange haltbar ist. Die ersten Informationen über die Verwendung von Pfählen im mitteleuropäischen Raum stammen aus dem ersten Jahrhundert vor der Zeitrechnung (Bild 1.2-1). Die zahlreichen Funde von Pfahlbauresten aus der Jungsteinzeit (um 3000/2500 v. Chr.) im gesamten Alpengebiet und im alten China (Pagode von Longhua, 977 v. Chr.) beweisen, daß diese Technik eine lange Tradition hat.

**Bild 1.2-1**

Sicherung von Pfählen als Tragglieder eines Hauses gegen Einsinken mit Hilfe sog. Flecklinge oder Grundplatten (Grabung Hornstadt-Hörnle) [1]

Die großartigste Pfahlbau-Siedlung ist sicherlich die Lagunenstadt Venedig, die ihre Geschichte bis in das 6. Jahrhundert n. Chr. zurückführen kann. Die Stadt ist auf über hundert Inseln erbaut. Ihre ungefähr 20 000 Häuser sind auf Pfähle gegründet. Allein für die Kirche „Santa Maria della Salute“ wurden ca. 1 000 000 Pfähle verwendet (Bild 1.2-2).

**Bild 1.2-2**

Die Kirche „Santa Maria della Salute“ in Venedig ist auf Holzpfähle gegründet

1.2.2 Holzpfähle

Pfähle aus Holz werden verwendet, um Bauwerkslasten in tragfähige Schichten im Untergrund zu übertragen. Außerdem können sie dazu dienen, Bauwerke so hoch über die Erdoberfläche aufzustellen, daß sie vor Gefahren wie Hochwasser, Ungeziefer oder Gewalteinwirkungen geschützt sind.

Verwendet werden die Holzpfähle bis zu dem heutigen Tag für diese zwei Aufgaben. Daran hat sich in all den Jahrtausenden bis zur Gegenwart nichts geändert. Man lernte zwar, wenn auch recht spät, den Pfahlkopf und -fuß beim Einrammen durch Eisen zu verstärken, entwickelte auch eine Technik, um Holzpfähle zu verlängern und vor Fäulnis zu schützen, aber sonst änderte sich am „Bauteil Pfahl“ nicht viel.

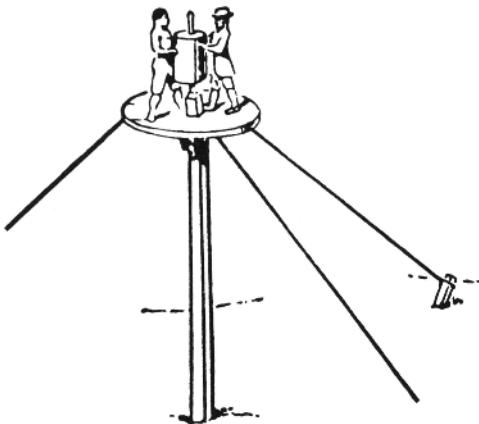


Bild 1.2-3
Rammpfahl mittels Handrammung abgeteuft
(16. Jahrhundert n. Chr.) [2]

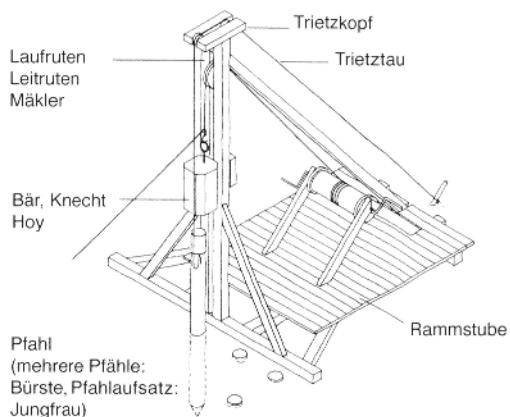


Bild 1.2-4
Schematische Zeichnung einer Kunstramme, wie sie wahrscheinlich unter den Römern, sicher aber seit dem späten Mittelalter gebräuchlich war [1]

Die einfachste, wenn auch mühsamste Methode, um einen Pfahl einzurammen, ist die Handrammung (Bild 1.2-3). Später wurde die Zugramme und schließlich die Kunstramme eingesetzt (Bild 1.2-4). Damit konnten sowohl senkrechte als auch geneigte Pfähle gerammt werden. Obwohl das Rammen umständlich und langwierig war, sind dies die einzigen „Maschinen“ gewesen, mit denen viele Pfähle für eine große Gründung geschlagen werden konnten.

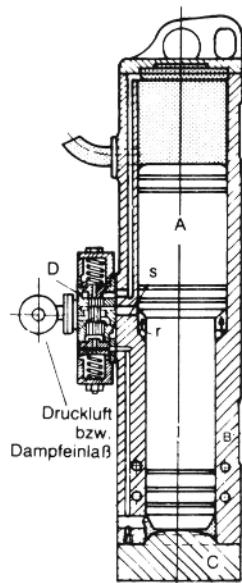
Das blieb über viele Jahrhunderte hinweg so. Die eigentliche Entwicklung vollzog sich in der Rammtechnik. Der Fortschritt in der Rammtechnik wurde durch die Verbesserung des schlagenden Elementes des Rammgerätes, des Rammbären, erzielt. Beginnend mit dem 19. Jahrhundert n. Chr. entwickelten sich aus dem Freifallbären nach und nach die folgenden Bauarten.

1.2.3 Einbringen der Pfähle mit Hilfe von Schlagbären [3]

Bei den Schlagbären wird das Rammgut mit Hilfe eines herabfallenden Gewichts, das beispielsweise mit Dampfkraft angehoben wird, in den Boden eingeschlagen. Entweder steht der Zylinder fest und der Kolben bewegt sich (Kolbenbären), oder der Kolben steht fest und der Zylinder bewegt sich (Zylinderbären). Die heutigen Schlagbären sind ausnahmslos als Kolbenbären konstruiert; Zylinderbären kommen nur in Sonderfällen zum Einsatz.

Zur Erzeugung der Rammenergie $W = G \cdot h$ muß das Gewicht (G) zunächst mit Hilfe von Druckluft, Dampf (selten), Hydraulikflüssigkeit oder Explosionsgasen auf die Höhe h gehoben werden. Bei Erreichen des oberen Totpunkts entweicht das zum Heben benutzte Medium, das Gewicht fällt herunter und gibt seine kinetische Energie $W = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2$ an das Rammgut ab, so daß dieses in den Boden eingetrieben wird. Die kinetische Energie kann noch erhöht werden, wenn das Gewicht beim Herabfallen durch ein von oben wirkendes Medium beschleunigt wird. Auch hierzu eignen sich Dampf, Druckluft, Hydraulikflüssigkeit oder Explosionsgase als Energieträger.

Durch das zweiseitige Beaufschlagen kann die Schlagzahl erheblich gesteigert werden, so daß diese Bären als Schnellschlagbären (Bild 1.2-5) oder – in leichterer Ausführung – als Schnellschlaghämmere bezeichnet werden. Vorzugsweise wird als Medium Hydraulikflüssigkeit einge-

**Bild 1.2-5**

Menck-Schnellschlagbär, Antrieb mit Druckluft oder Dampf, für schwere Rammarbeiten, Gewicht 1,5 bis 6 t [3]

- A Schlagkolben
- B Bärkörper (Zylinder)
- C Rammplatte
- D Steuerventil
- s Druckluftkanal
- r Ringraum

setzt, da bei der Verwendung von Hydraulikbaggern als Trägergerät hierfür die Gerätehydraulik zur Verfügung steht (Hydraulikhämmer). Es handelt sich damit um das gleiche Prinzip, das von den hydraulischen Meißelhämtern für Abbrucharbeiten bekannt ist. Die Schlagzahl kann bis zu 600/min betragen.

Mit Hilfe dieser leistungsfähigen Rammbären wurde es möglich, Pfähle auch aus anderen Baustoffen als Holz einzusetzen. Seit ungefähr einem Jahrhundert werden Pfähle auch aus Stahlbeton und Stahl verwendet.

1.2.4 Einbringen der Pfähle mit Hilfe von Vibrationsbären [3]

Vibrationsbären werden seit ca. 10 Jahren verstärkt eingesetzt, da sie die Nachteile des Schlagbären, nämlich Lärmbelästigung, Bodenerschütterung und – bei Dieselpfählen – die belästigenden Abgase, vermeiden. Sie wirken auf das Rammgut mit Schwingungen ein, die zur Umlagerung des Bodens führen und die Reibung zwischen Rammgut und Boden herabsetzen. Die Schwingungen werden durch zwei gegenläufige Unwuchten erzeugt, die so angeordnet sind, daß sich die Horizontalkomponenten F_H der Fliehkraft aufheben und die Vertikalkomponenten F_v addieren.

Vibrationsbären werden auch zum Ziehen eingesetzt und hierfür an einem Autokran oder einem Baggermäker geführt, die den notwendigen Zug auf das Rammgut ausüben können. Da die Schwingungen die Reibung zwischen Rammgut und Boden herabsetzen, kann es leichter aus dem Boden herausgezogen werden. Rammgut und Rammbär müssen durch eine Klemmzange zu einer Einheit verbunden werden, so daß sich die Schwingungen ohne Energieverlust auf das Rammgut übertragen.

Die für die Erzeugung der Schwingungen notwendige Energie wird von der Kraftstation (Bild 1.2-6) entweder durch elektrische Kabel oder Hydraulikschläuche übertragen. Hydraulisch angetriebene Vibrationsbären können auch an die Bordhydraulik des Trägergeräts angeschlossen wer-

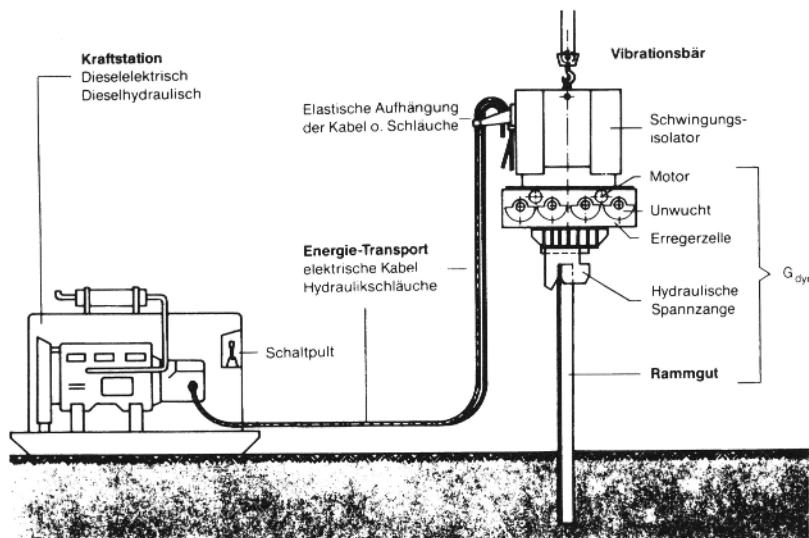


Bild 1.2-6
Vibrationsbär mit eigener Kraftstation (Müller) [3]

den. Sie sind stufenlos regelbar und können sich somit optimal an die Bodenverhältnisse anpassen, so daß ihnen der Vorzug zu geben ist. Sie können sowohl an einem Mäkler als auch frei auf dem Rammgut reitend an einem Kranhaken geführt werden (Bild 1.2-6).

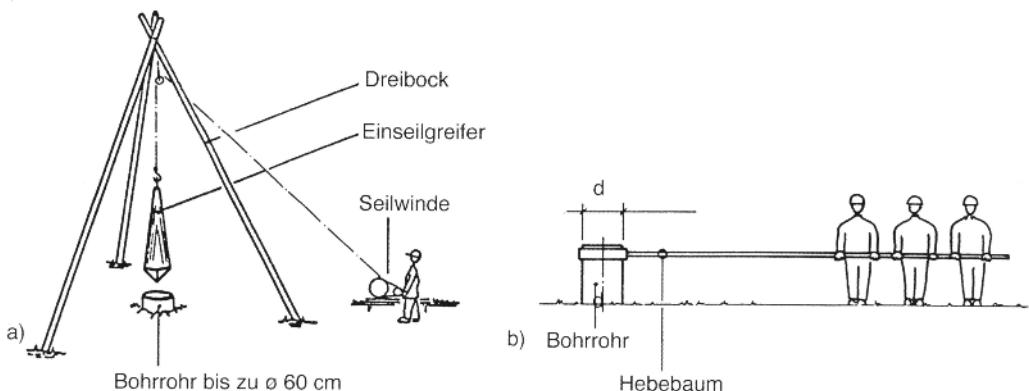
1.3 Historischer Bohrpahl

Anfang dieses Jahrhunderts war im Brunnenbau das Schlagbohren am Seil mit Schlagmeißel und Büchse das gebräuchlichste Verfahren. Spezielle Meißel oder auch andere Werkzeuge wurden in der Feldschmiede hergestellt, repariert oder abgeändert. Zunehmende Lohnkosten und die Forderung nach höheren Leistungen führten zur Entwicklung des drehenden Bohrens, als Ergänzung zu dem Schlagbohren.

Seit es mechanische Winden für den Baubetrieb gibt, werden Bohrungen im Boden mit Hilfe eines Einseilgreifers und eines Dreibocks ausgeführt. Auf diese Art und Weise werden gelegentlich auch heute noch Pfähle und Brunnen hergestellt.

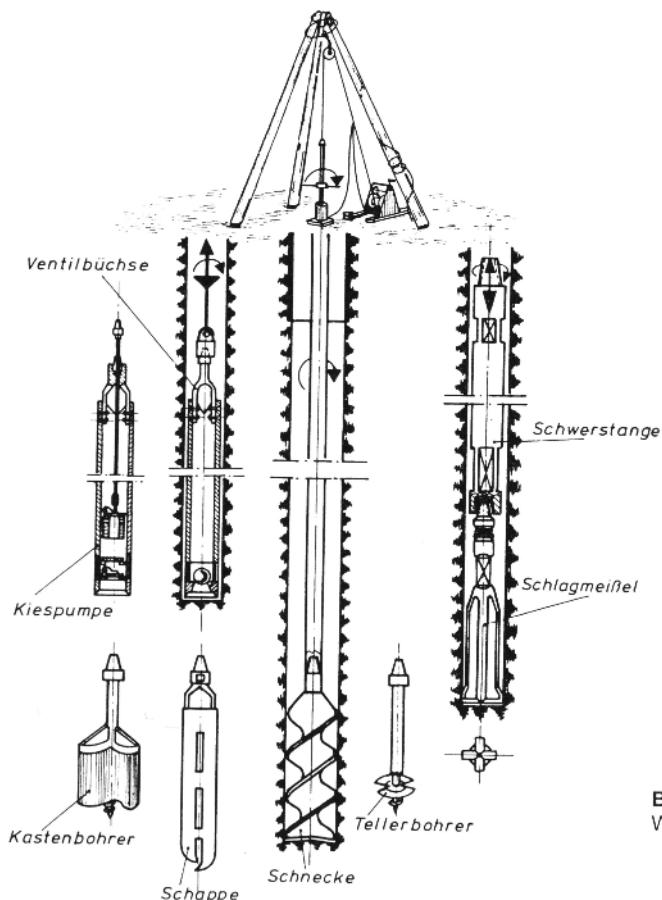
Beim Herstellvorgang ergibt sich folgender Ablauf: Nach dem Aufrichten des Dreibocks über dem Bohrpunkt erfolgt mit dem Greifer zunächst ein Voraushub. Dann wird mit dem Seil der Seilwinde über die im Dreibock aufgehängte Seilrolle der erste Rohrschuß aufgezogen und lagegerecht in das Voraushubloch gesetzt. Anschließend wird ein Hebebaum mit Hilfe einer Rohrschelle (Klemmschelle) am Rohr befestigt.

Beim Abteufen wird das Bohrrohr mit Hilfe des Hebebaumes hin- und herbewegt. Dadurch dringt es besser in den Boden ein. Gleichzeitig wird der Boden im Bohrrohr (Kernaushub) mit Geräten ausgehoben, die auf die jeweilige Bodenart abgestimmt sind. Die einwandigen Bohrrohre sind aus Stahl gefertigt. Sie haben eine Wandstärke von 6 bis 8 mm. Ist der erste Rohrschuß abgeteuft, wird ein weiterer aufgesetzt und durch Schweißen, Nieten oder Schrauben fest mit dem ersten verbunden. Die einzelnen Arbeitsgänge werden so lange wiederholt, bis die erforderliche Bohr-

**Bild 1.3-1**

Bohren von Hand

a) Seilwinde und Bock

b) Vermindern der Reibungskräfte
durch Hin- und Herbewegung des
Rohres mit Hilfe eines Hebebaumes**Bild 1.3-2**

Werkzeuge für das Bohren von Hand [4]

tiefe (Teufe) erreicht ist. Beim Durchörtern von felsartigen Böden und beim Einbinden in Fels bleibt die Verrohrung auf dem Felshorizont stehen, denn die Rohre lassen sich auch mit Ballastierung nur wenige Zentimeter in solche Schichten eintreiben. Wenn eine weitere Verrohrung erforderlich ist, so muß nach dem Durchfahren der Felsbank eine zweite Rohrtour mit kleinerem Durchmesser eingestellt werden.

Als Werkzeuge wurden Schneckenbohrer, Tellerbohrer, Kastenbohrer, Schappen u. a. m. verwendet.

1.4 Beispiele der Neuzeit

Im weiteren Verlauf der Entwicklung wurde die Herstellung von Pfählen weitgehend mechanisiert. Mit Hilfe der heutigen Bohranlagen lassen sich Bohrlöcher mit Durchmessern bis zu 300 cm und Teufen von mehr als 60 m herstellen. Die Bohrgeräte sind meist auf ein geländegängiges Fahrzeug, auch auf ein Schreitwerk oder auf hydraulische Raupenbagger montiert.

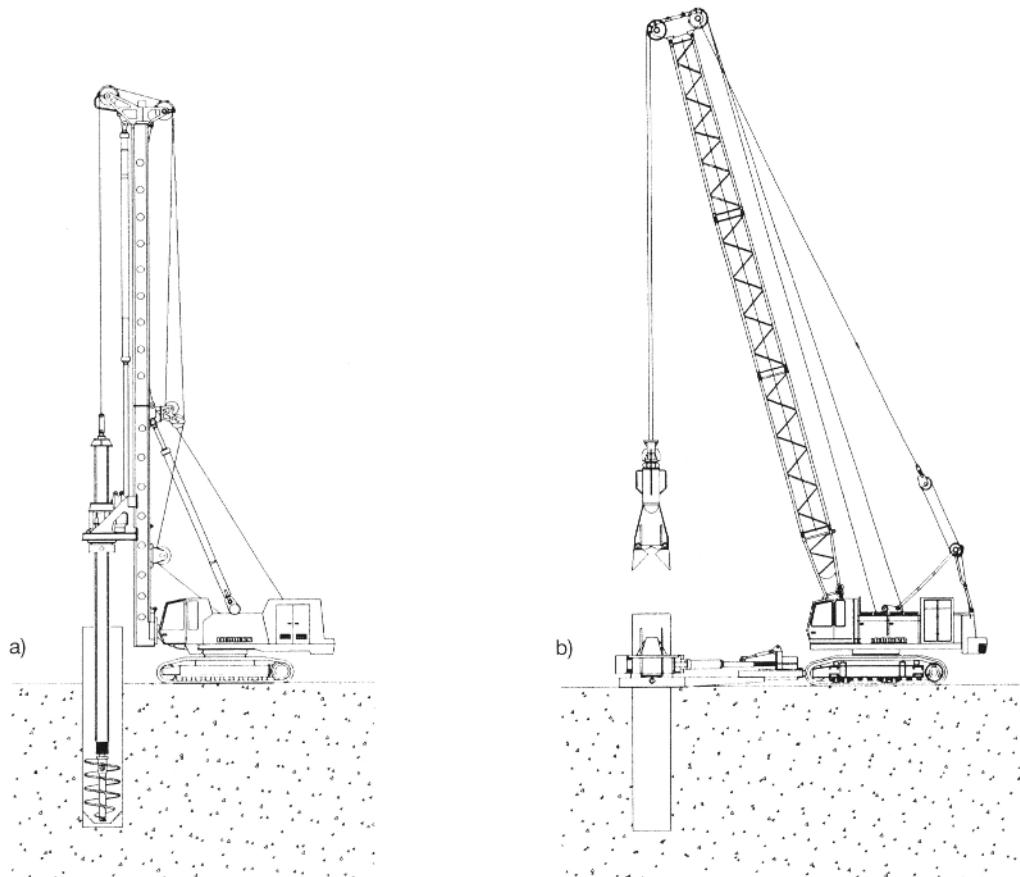


Bild 1.4-1

Die Kraftübertragung zum Bohrwerkzeug erfolgt mittels Gestänge (a) oder Seil (b)

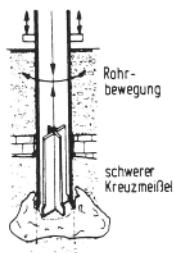


Bild 1.4-2

Lösen des Bodens mit Hilfe des Kreuzmeißels [5]

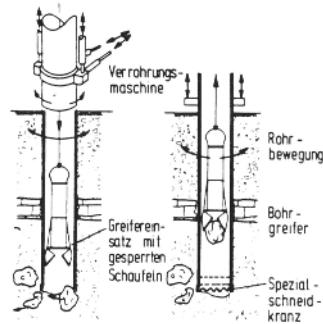


Bild 1.4-3

Entfernen des Bodens aus dem Rohrinnern mit Hilfe eines Greifers [5]

Die Werkzeuge zum Lösen des Bodens arbeiten als Schlag- oder Dreh-(Rotations-) Bohrer, z. B. Meißel, Schnecke, Kübel o. ä.

Das anfallende Bohrgut wird trocken entfernt (Greifer) oder mit einer Spülflüssigkeit (Saugbohranlage) herausgespült.

Die Bohrlochwand braucht im standfesten Boden nicht gestützt zu werden. Im nicht standfesten Boden wird die Wandung durch ein Mantelrohr gestützt. Es besteht aus einem Stahlrohr in der

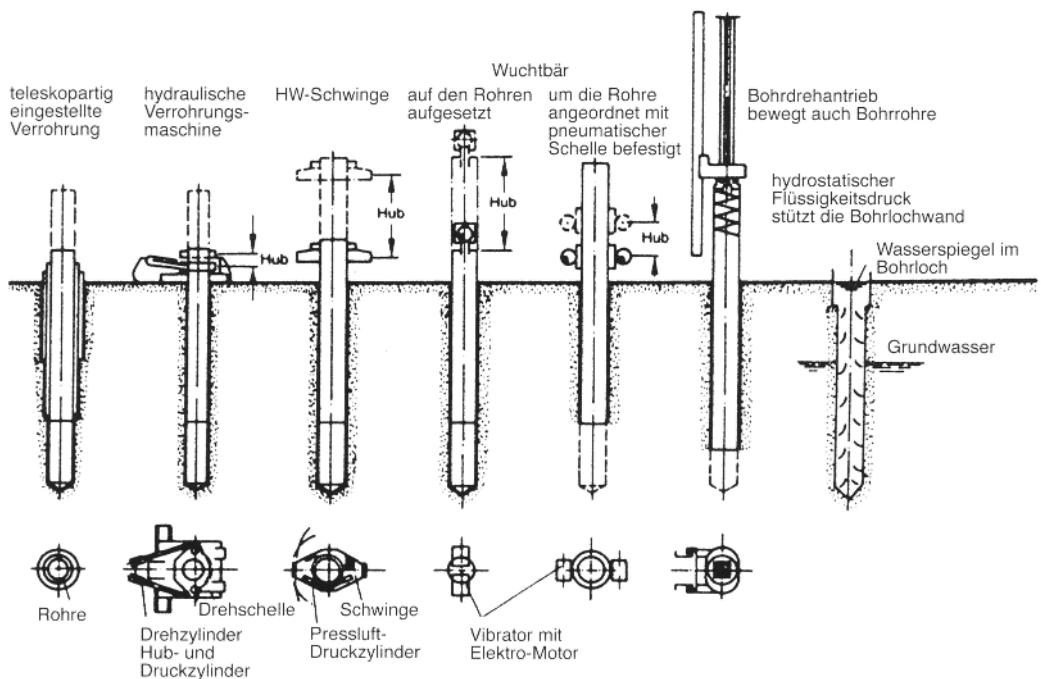


Bild 1.4-4

Methoden zur Sicherung der Bohrlochwand [6]

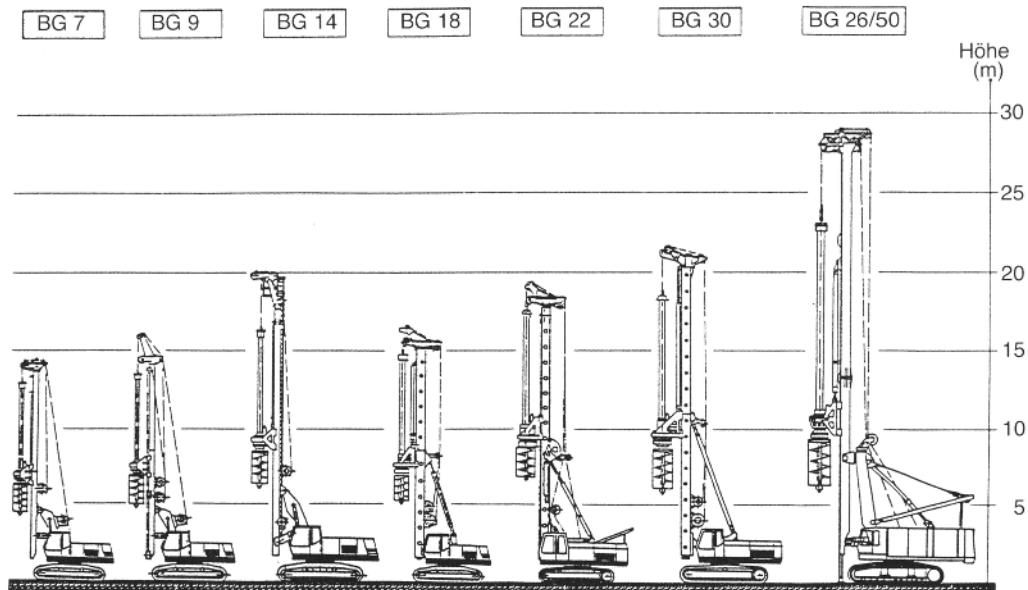


Bild 1.4-5
Entwicklung der Großdrehbohrgeräte [7]

Länge des Bohrloches (HW-Verfahren, siehe Abschnitt 6.3.4), oder es wird aus Stahlrohrschnüren abschnittsweise zusammengesetzt (Hydraulikverfahren, siehe Abschnitt 6.3.1). Wenn die Verhältnisse es gestatten, kann das Bohrloch auch mit einer Stützflüssigkeit gefüllt werden, z. B. aus Bentonitsuspension.

Für das Einbringen der Bohrrohre gibt es verschiedene Möglichkeiten:

- Eintreiben durch Schläge, z.B. Jumbo-Pfähle
- Hin- und Herdrehen, dadurch wird die Mantelreibung verringert und das Rohr sinkt in den Untergrund ein (Hydraulikverfahren)
- Drehbohren: durch einen Kraftdrehkopf abgeteuft (Drehbohrverfahren)
- Eintreiben mit einem Vibrationsbär
- Wird die Mantelreibung zu groß bzw. „ziehen“ die Rohre nicht mehr, kann eine kleinere, „verjüngte“ Rohrtour teleskopartig in das vorhandene Rohr eingesetzt werden

Die Geräteentwicklung hat in den vergangenen 10 Jahren einen gewaltigen Fortschritt erfahren. Bild 1.4-5 zeigt die Entwicklung der Drehbohrgeräte, die heute zum weltweiten Standard gehören.

Ein imposantes Beispiel aus allerjüngster Zeit ist die 1998 eröffnete Vasco-de-Gama-Brücke über den Tejo bei Lissabon, mit einer Gründung auf insgesamt 856 Pfählen, die bis zu 85 m tief unter den mittleren Wasserspiegel reichen. Neben gerammten Stahlpfählen wurden hauptsächlich Bohrpfähle mit einem Durchmesser von 2,20 m ausgeführt. Die Bohrpfähle für den Mittelabschnitt der Brücke müssen im Erdbebenfall eine Vertikallast von 60 MN sowie eine Horizontallast von 4 MN je Pfahl abtragen, wobei auch noch einzelne Sandschichten durch Verflüssigung (Liquefaction) gefährdet sind. Diese nicht alltägliche Tragfähigkeit wurde vorher durch Probebelastungen nachgewiesen.

Noch längere Pfähle, nämlich bis zu 100 m, wurden für die 1999 noch im Bau befindliche My Thuan Brücke über den Mekong in Vietnam hergestellt. Einzelheiten werden in Abschnitt 11.7 beschrieben.