# Vergleich der Tragfähigkeit unterschiedlicher Pfahlsysteme

*Dipl.-Ing. Werner Brieke,*

*FRANKI Grundbau GmbH*

Vortrag anläßlich des Pfahlsymposiums 1993 in Braunschweig

Überreicht durch

**FRANKI Grundbau GmbH**
Hittfelder Kirchweg 24 – 28
21220 Seevetal

# Vergleich der Tragfähigkeit unterschiedlicher Pfahlsysteme

Dipl.- Ing. W. Brieke

FRANKI Grundbau GmbH

**Zusammenfassung**

Die Herstellungsverfahren und möglichen Maßnahmen zur Traglaststeigerung für die Pfahlsysteme *FRANKIPFAHL*, Atlaspfahl und VB-Pfahl werden beschrieben. An einigen Beispielen ausgeführter Probebelastungen werden die erreichten Tragfähigkeiten erläutert und verglichen.

## Herstellungsverfahren

### *FRANKIPFAHL* (Ortbetonrammpfahl mit Fuß)

Das Herstellungsverfahren ist in *Bild 1* dargestellt. In Abhängigkeit von den verschiedensten Randbedingungen können folgende Varianten bezüglich des Pfahlfußes und -schaftes ausgeführt werden:

*Pfahlfuß:*

- ausgerammter Pfropfen als normaler Fuß
- ausgestampfter großer bis übergroßer Fuß
- Baugrundverdichtung im Fußbereich durch zusätzliches Ausstampfen von Kies oder Schotter

*Pfahlschaft:*

- Herstellung aus weichem Beton der Konsistenz KR
- Herstellung durch Ausstampfen von erdfeuchtem Beton
- mit Stahlhülse ummantelt
- aus vorgefertigtem Stahlbetonelement
- Einbringung eines Dichtungskörpers um den Pfahlschaft bei Gründungen in kontaminierten Böden
- Baugrundverdichtung im Schaftbereich durch zusätzliches Ausstampfen von Kies oder Schotter

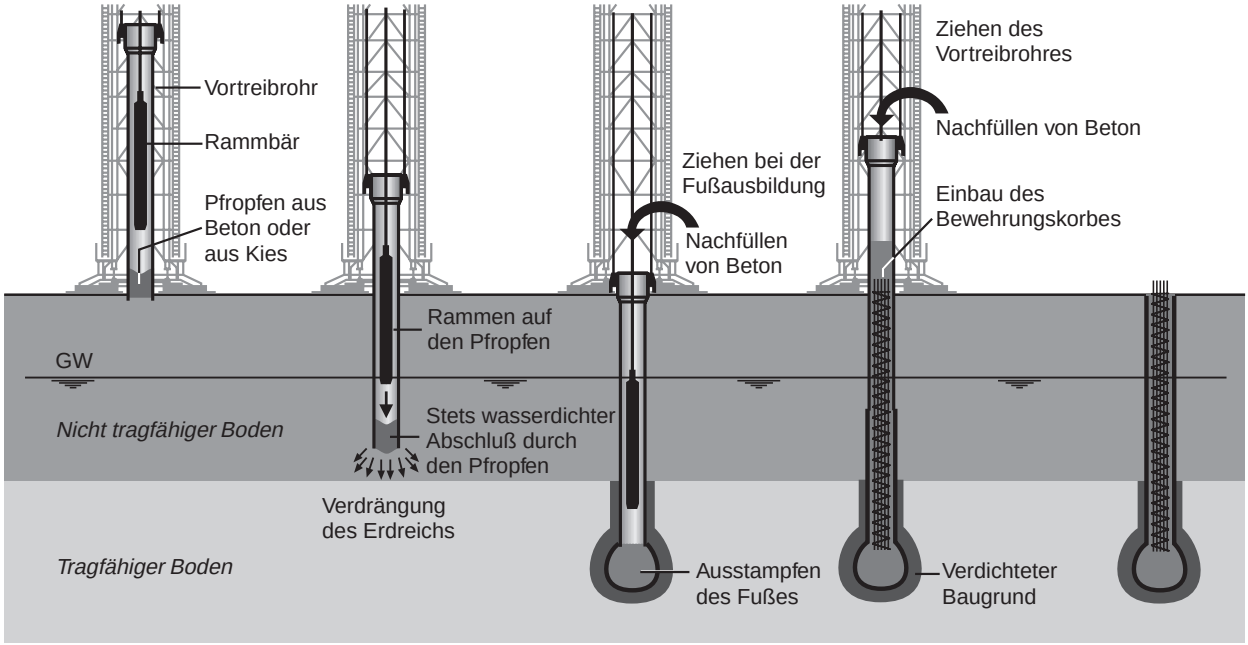



*Bild 1: Herstellungsverfahren des FRANKIPFAHLS*

Durch Kombination einzelner Varianten ist eine optimale Anpassung des Pfahles an den Baugrund, die Umweltbedingungen und an die erforderliche Tragkraft möglich.

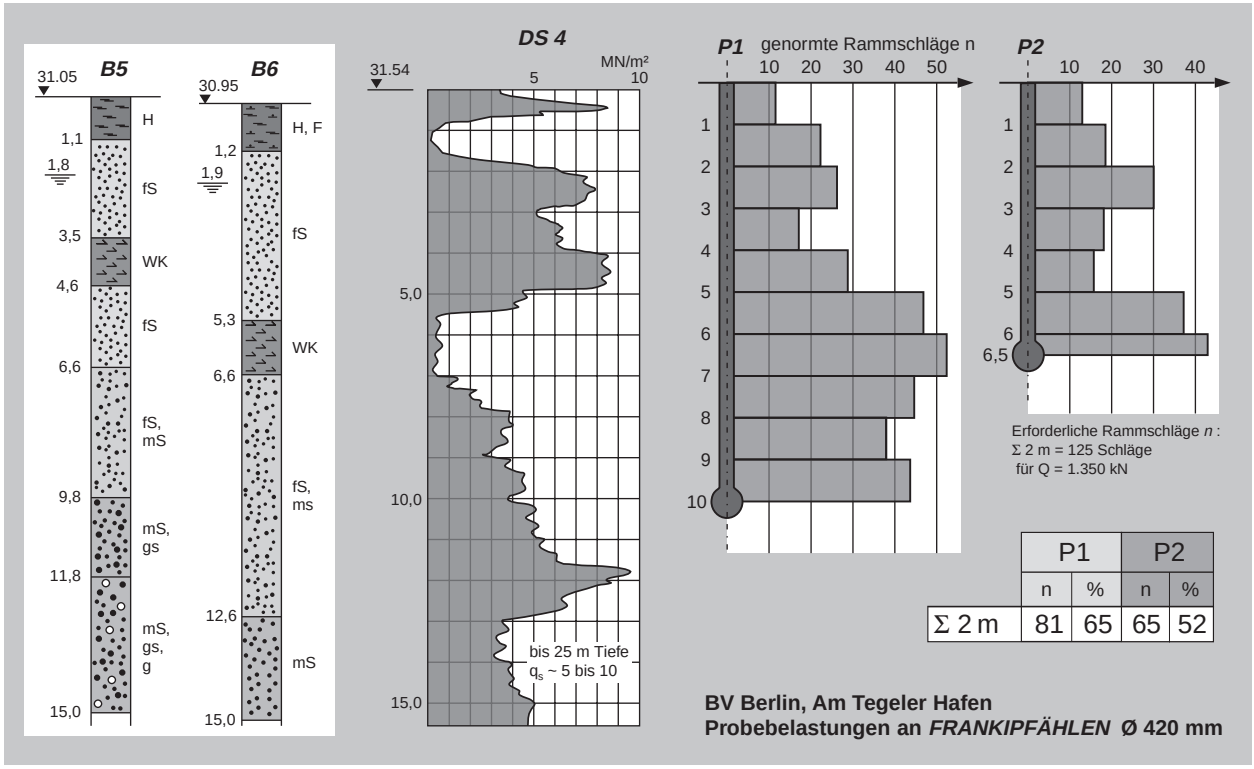
Mit Hilfe der zusätzlichen Baugrundverdichtung bzw. einer größeren Fußausbildung ist es möglich, die Tragfähigkeit eines Pfahles deutlich zu steigern, wobei gleichzeitig der Pfahl in geringerer Tiefe und damit meistens auch in weniger tragfähigen Böden abgesetzt werden kann. Daraus ergibt sich in vielen Fällen ein deutlicher wirtschaftlicher Vorteil.

Am Beispiel einer Probebelastung auf einer Baustelle in Berlin soll die Traglaststeigerung der beiden Varianten verdeutlicht werden (*Bilder 2* und *3*).

Zur Bemessung der Tragfähigkeit von *FRANKIPFÄHLEN* wird üblicherweise die geleistete Rammarbeit auf den letzten 2 bzw. 4 Rammetern zugrundegelegt (*Bild 4*). Die Pfähle P 1 und P 2 (Durchm. 420 mm) wurden bewußt schon in einer Tiefe abgesetzt, wo erst ein Bruchteil der erforderlichen Normarbeit erzielt worden war. Bezogen auf das 2 m - Rammkriterium betrug der Anteil beim Pfahl P 1 nur 65 % und beim Pfahl P 2 nur 52 % der für eine Gebrauchlast von Q = 1,35 MN erforderlichen Normrammarbeit.

Die zugehörigen Probebelastungsergebnisse bestätigen die nach dem Rammkriterium zu erwartende zulässige Pfahltragfähigkeit in Höhe von 700 kN für P1 und 600 kN für P 2.

Die Pfähle P 5 und P 6 (Durchm. 500 mm) wurden in unmittelbarer Nachbarschaft von P 1 und P 2 mit ähnlichen Absetztiefen hergestellt. Der Anteil der Normrammarbeit lag mit 61 % für P 5 und mit sogar nur 47 % für P 6 auf sehr niedrigem Niveau. Diese Werte bestätigen die lockere Lagerung der anstehenden Feinsande im Fußbereich. Um nun eine deutliche Traglaststeigerung der Pfähle zu erreichen, wurde beim Pfahl P 5 im Tiefenbereich zwischen 8 m und 11 m eine zusätzliche Baugrundverbesserung in Form einer Kiesvorverdichtung ausgeführt. Dabei wurde nach Erreichen der Endrammtiefe der Pfropfen aus dem Rohr geschlagen, das Rohr anschließend um 3 m gezogen und dabei gleich-




| | P1 | | P2 | |
|---|---|---|---|---|
| | n | % | n | % |
| Σ 2 m | 81 | 65 | 65 | 52 |

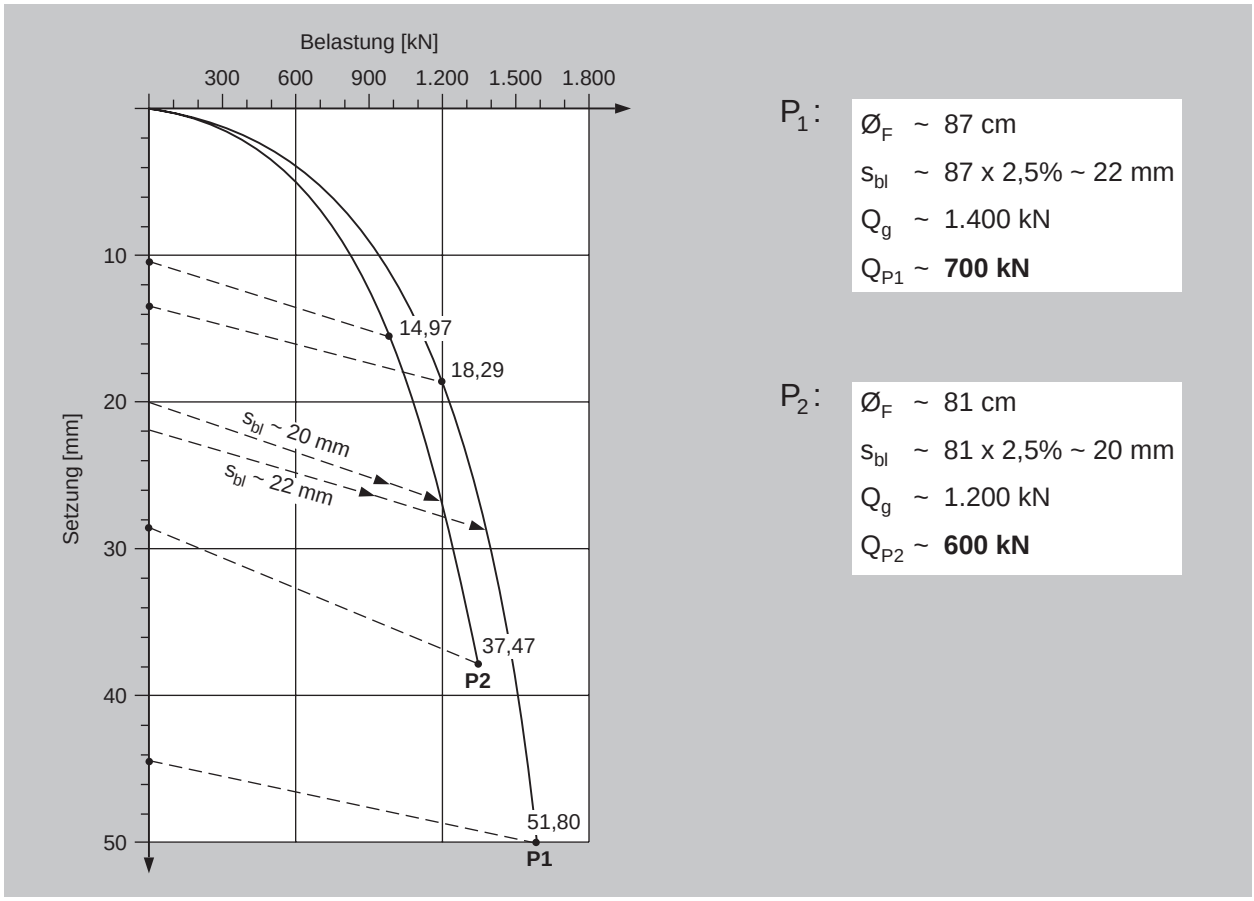
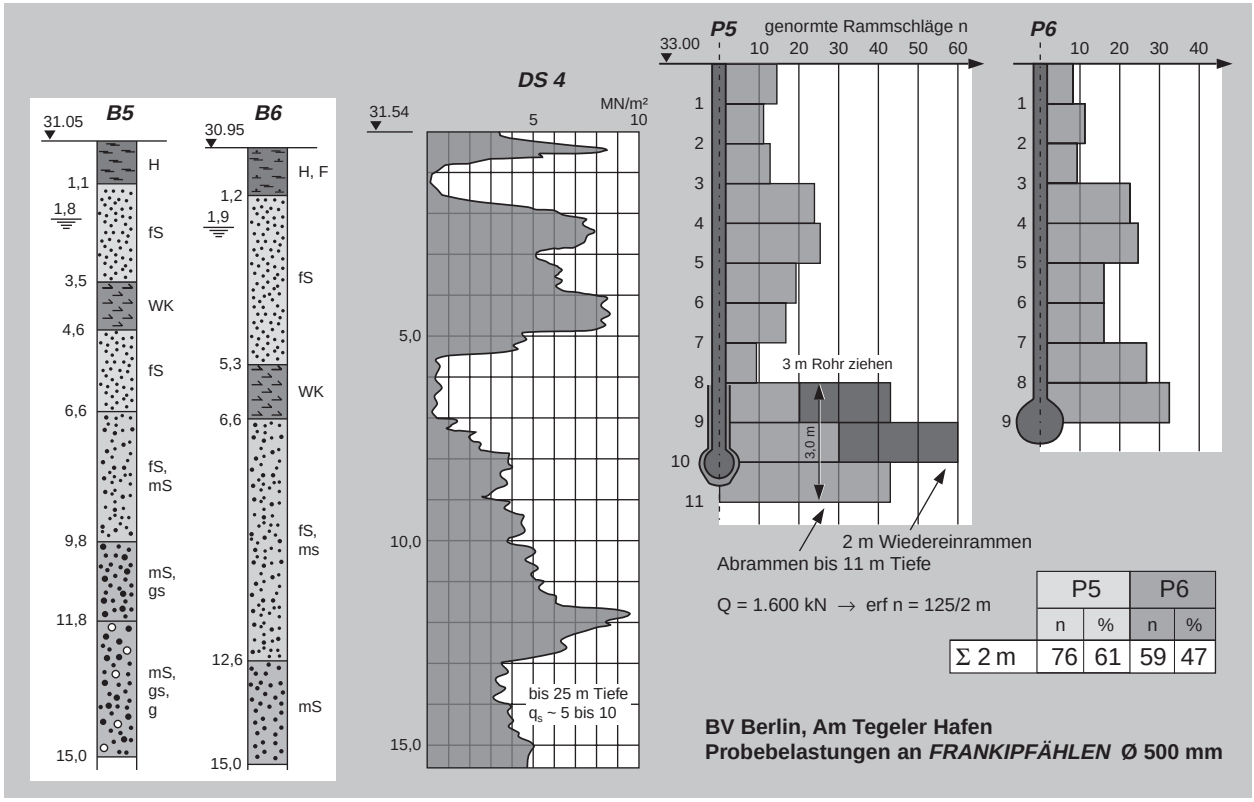



*Bild 2: Probebelastungsergebnisse zweier FRANKIPFÄHLE bei deutlicher Unterschreitung des Rammkriteriums und ohne zusätzliche Maßnahmen zur Traglaststeigerung*

zeitig Kiesmaterial am Rohrfuß ausgestampft. Danach wurde das Rammrohr wieder um 2 m in den mit Kies vorverdichteten Bereich hinunter gerammt, wobei jetzt etwa eine Verdopplung der Rammarbeit gegenüber der ersten Niederrammung zu beobachten war. Die anschließende Fußausbildung erfolgte mit dem Pfropfenbeton (V = 0,25 cbm) als normaler Fuß.




| | P5 | | P6 | |
|---|---|---|---|---|
| | n | % | n | % |
| Σ 2 m | 76 | 61 | 59 | 47 |

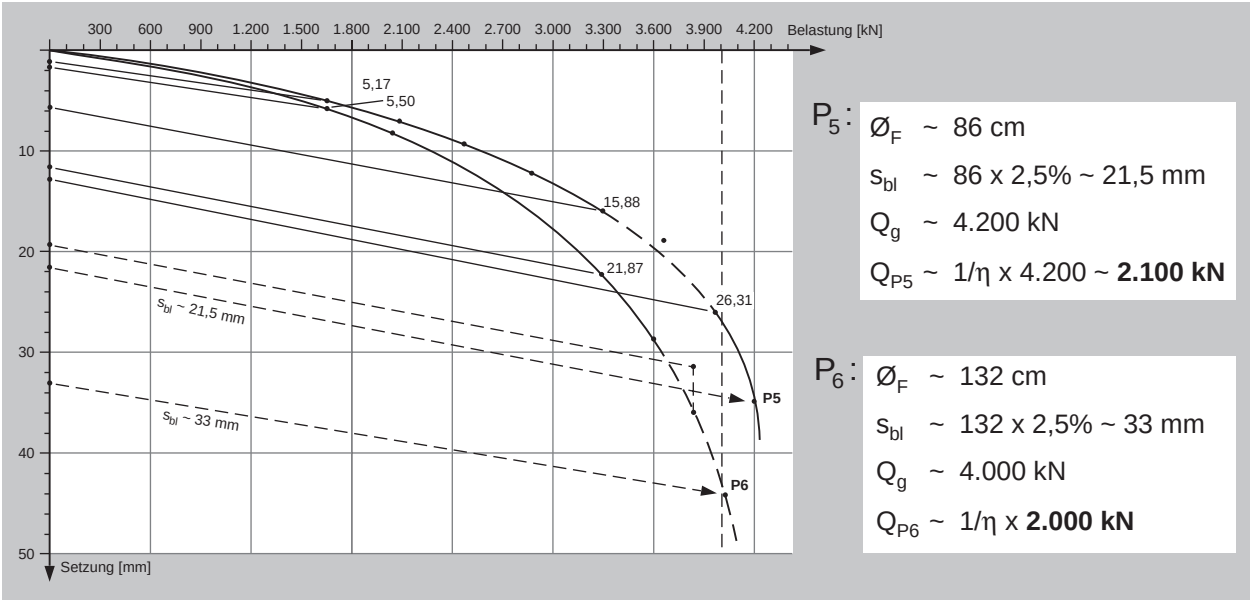



*Bild 3: Probebelastungsergebnisse eines FRANKIPFAHLS mit übergroßem Fuß und eines FRANKIPFAHLS mit zusätzlicher Baugrundverbesserung durch Kiesvorverdichtung*

| Außen Ø Vortreibrohr [mm] | Norm-Bärgewicht [t] | Druckpfähle: Pfahl-druckkraft [kN] | Druckpfähle: Anzahl der Rammschläge bei 6,5 m Normfallhöhe für die letzten Rammeter 2 m | Druckpfähle: Anzahl der Rammschläge bei 6,5 m Normfallhöhe für die letzten Rammeter 4 m | Zugpfähle: Pfahl-zugkraft [kN] | Zugpfähle: Anzahl d. Rammschläge bei 6,5 m Normfallhöhe in tragfähigen Böden |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 420 | 2,20 | 900<br>1200<br>1350 | 75<br>100<br>125 | -<br>150<br>190 | 240<br>320<br>400 | 150<br>200<br>250 |
| 500 | 3,00 | 1000<br>1350<br>1600 | 75<br>100<br>125 | -<br>150<br>190 | 300<br>400<br>500 | 150<br>200<br>250 |
| 560 | 3,75 | 1250<br>1700<br>2000 | 75<br>100<br>125 | -<br>150<br>190 | 380<br>500<br>630 | 150<br>200<br>250 |
| 610 | 4,50 | 1400<br>1850<br>2250 | 75<br>100<br>125 | -<br>150<br>190 | 430<br>570<br>710 | 150<br>200<br>250 |

*Bild 4: Zulässige Pfahllasten und zugehörige Rammschläge (Rammarbeit)*

Im Vergleich hierzu erhielt der Pfahl P 6 als traglaststeigernde Variante einen übergroßen Fuß, d.h. es wurden insgesamt 1,2 cbm Beton für den Pfahlfuß ausgestampft.

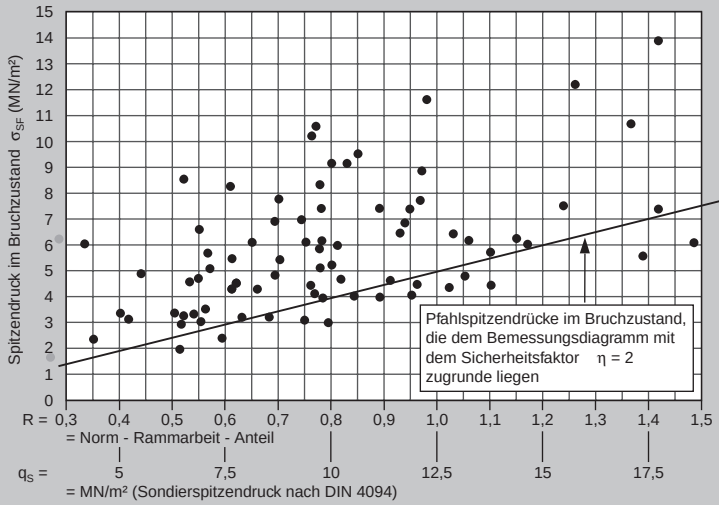
Die Probebelastungen dieser Pfähle lieferten Gebrauchslasten von Q = 2,1 MN für P 5 und Q = 2,0 MN für P 6. Sie bestätigen die deutliche Traglaststeigerung beider Varianten in einem Baugrund, der ohne diese Maßnahmen erheblich größere Pfahllängen bzw. eine starke Reduzierung der zulässigen Pfahllast erfordern würde.

Die Bemessung der Pfahlfußgrößen in Abhängigkeit von der Tragfähigkeit und der erreichten Rammarbeit erfolgt nach den *Bildern 5a* und *5b*.

Welche hohen Pfahltragfähigkeiten mit einer entsprechenden Fußausbildung erzielt werden können, wird am Beispiel der Pfahlgründung für ein PKW-Werk in Rastatt verdeutlicht. Alternativ zur ausgeschriebenen Bohrpfahlgründung mit Pfahllängen bis zu 20 m wurden *FRANKIPFÄHLE* mit einem großen Pfahlfuß ausgeführt bei Rammtiefen geringer als 10 m.

Die Ergebnisse der Probebelastung an einem *FRANKIPFAHL* (Durchm. 610 mm) mit einem vergrößerten Fußvolumen von 1,5 cbm und einer Rammtiefe von 8 m sowie die vorhandene Baugrundsituation zeigt *Bild 6*.

Bei der maximalen Versuchslast von fast 10 MN betrug die Pfahlkopfsetzung nur ca. 13 mm.
Um Aufschlüsse über die Lastabtragungsmechanismen Mantelreibung und Spitzendruck zu erhalten, wurde in den Probepfahl ein 5-fach Extensometer der *FMPA* Stuttgart eingebaut.



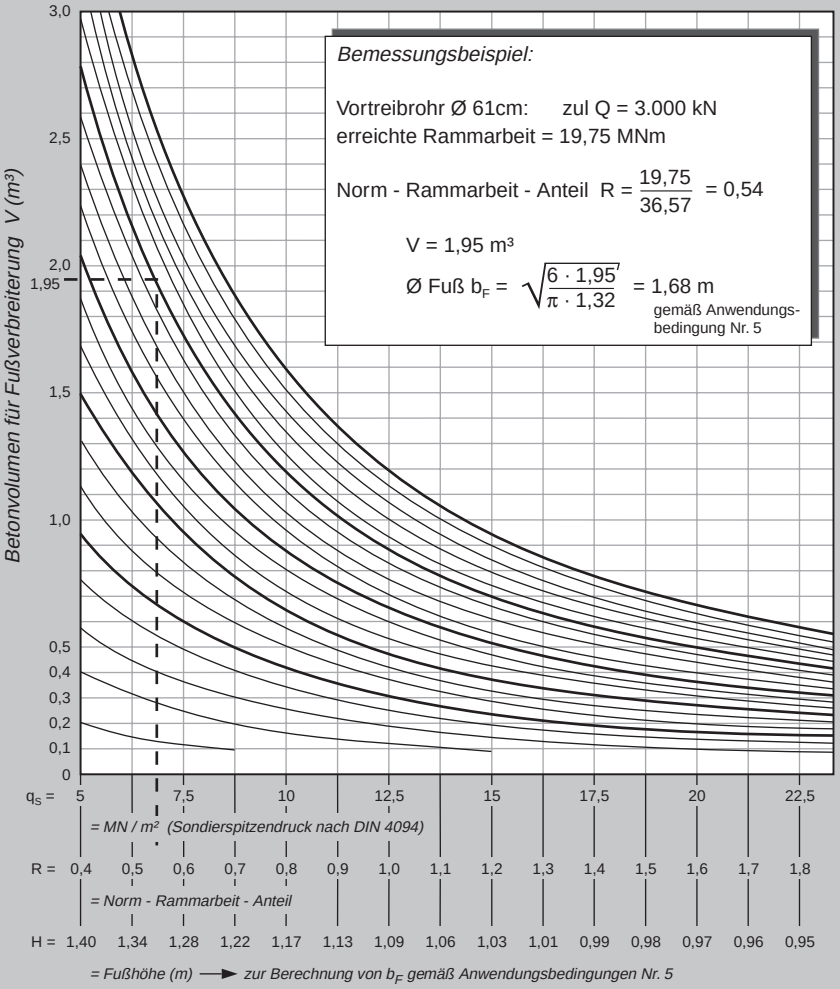

Spitzendruck im Bruchzustand aus 80 Probebelastungen als Grundlage für das Bemessungsdiagramm

zul $Q_S = \sigma_{SF}\,(b_F^2 \cdot \pi/4)/\eta$; $\eta = 2$

| Norm - Rammarbeit für Lotpfähle | | | |
|---|---|---|---|
| Rohr Ø [cm] | Bärgewicht [kN] | Pfahllast [kN] | Rammarbeit [MNm] |
| 42,0 | 22,0 | 1.350 | 17,88 |
| 50,0 | 30,0 | 1.600 | 24,38 |
| 56,0 | 37,5 | 2.000 | 30,47 |
| 61,0 | 45,0 | 2.400 | 36,57 |

*Bild 5 a: Empirische Grundlage für Bemessungsdiagramm in Bild 5 b*

**Bemessungsdiagramm für die Pfahlfußverbreiterung**




*Bemessungsbeispiel:*

Vortreibrohr Ø 61cm: zul Q = 3.000 kN
erreichte Rammarbeit = 19,75 MNm

Norm - Rammarbeit - Anteil $R = \frac{19{,}75}{36{,}57} = 0{,}54$

V = 1,95 m³

Ø Fuß $b_F = \sqrt{\frac{6 \cdot 1{,}95}{\pi \cdot 1{,}32}} = 1{,}68$ m
gemäß Anwendungsbedingung Nr. 5

**Anwendungsbedingungen für das Bemessungsdiagramm:**

1. Für die Einbindung in den tragfähigen Boden bis zu 2 m bleibt die Mantelreibung unberücksichtigt zul Q ≈ zul $Q_S$
2. Ermittelt für Rohrhub von 80 cm und einschließlich Pfropfenbeton
3. Der maßgebende mittlere Spitzendruck muß 1,0 m über und 1,5 m unter Rammtiefe vorhanden sein
4. Bei Einbindelängen $l_O$ > 2,0 m in den tragfähigen Sand kann positive Mantelreibung zu zul Q addiert werden: zul $Q_S = \tau_{mf} \cdot b \cdot \pi (l_O - 2)$

| R = | 0,4 | 0,5 | 0,6 | 0,7 | 0,8 | 0,9 | 1,0 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $\tau_{mf}$ = | 20 | 25 | 30 | 35 | 40 | 45 | 50 kN/m² |

5. Ø Fuß $b_F = \sqrt{\frac{6 \cdot V}{\pi \cdot H}}$

*Bild 5 b: Ermittlung des Fußvolumens für FRANKIPFÄHLE in Abhängigkeit von der Rammarbeit und der zulässigen Pfahllast in nichtbindigen Böden*

Die gemessenen Mantelreibungswerte und die Splittung der Lastanteile in Spitzendruck und Mantelreibung zeigt *Bild 7*.

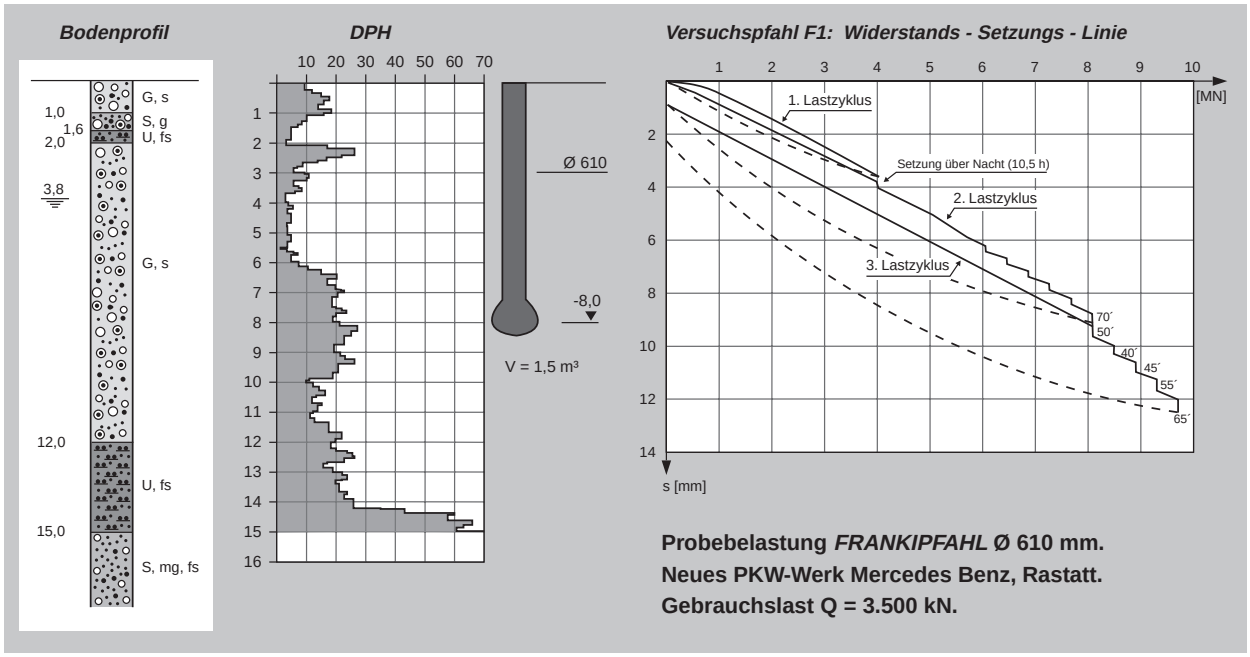
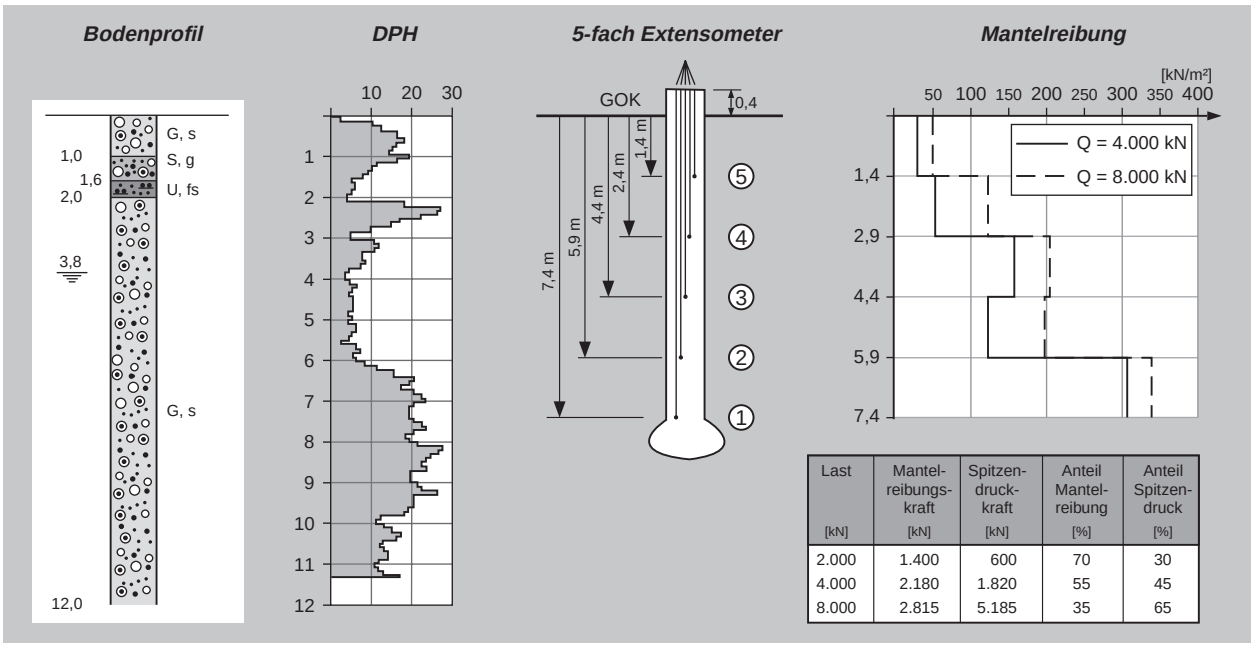



*Bild 6: Probebelastungsergebnisse an einem FRANKIPFAHL (Durchmesser 610 mm)*




| Last [kN] | Mantel-reibungs-kraft [kN] | Spitzen-druck-kraft [kN] | Anteil Mantel-reibung [%] | Anteil Spitzen-druck [%] |
|---|---|---|---|---|
| 2.000 | 1.400 | 600 | 70 | 30 |
| 4.000 | 2.180 | 1.820 | 55 | 45 |
| 8.000 | 2.815 | 5.185 | 35 | 65 |

*Bild 7: Verlauf der Mantelreibung entlang des Pfahlschaftes und Splittung der Lastanteile Spitzendruck und Mantelreibung*

## Atlaspfahl

Wie der *FRANKIPFAHL* gehört auch der Atlaspfahl zu den Vollverdrängungspfählen. Er wird deshalb der zur Zeit überarbeiteten DIN 4026 in der Untergruppe Schraubpfähle zugeordnet (zukünftig DIN V 4026 - 500).

Das Verfahren arbeitet erschütterungsfrei, so daß dieses Pfahlsystem auch unmittelbar neben bestehenden Bauwerken oder erschütterungsempfindlichen Anlagen eingesetzt werden kann.

Bei der Herstellung des Atlaspfahls (*Bild 8 a und 8 b*) wird ein Stahlrohr, das am unteren Ende einen Schneidkopf mit einem eingängigen Schraubenflügel besitzt, mit einem leistungsstarken Drehbohrantrieb bei gleichzeitigem vertikalen Anpreßdruck in den Boden gedreht. Der Schneidkopf ist unten durch eine verlorene Fußspitze wasserdicht verschlossen.

Das aufgebrachte Drehmoment und der Anpreßdruck können gemessen und mit den Baugrundaufschlüssen (Sondierungen) verglichen werden. Nach Erreichen der Solltiefe wird der Bewehrungskorb eingesetzt, das Rohr und der oben aufgesetzte Vorratsbehälter mit weichem Beton gefüllt. Durch rückwärtiges Drehen und Ziehen des Rohres löst sich die Fußspitze, und der austretende Beton füllt den vom Schneidkopf geformten Hohlraum. Bedingt durch den eingängigen Schraubenflügel am Schneidkopf erhält der fertige Pfahlschaft einen umlaufenden, wendelförmigen Betonwulst, so daß das Aussehen des fertigen Pfahles dem einer Holzschraube gleicht.

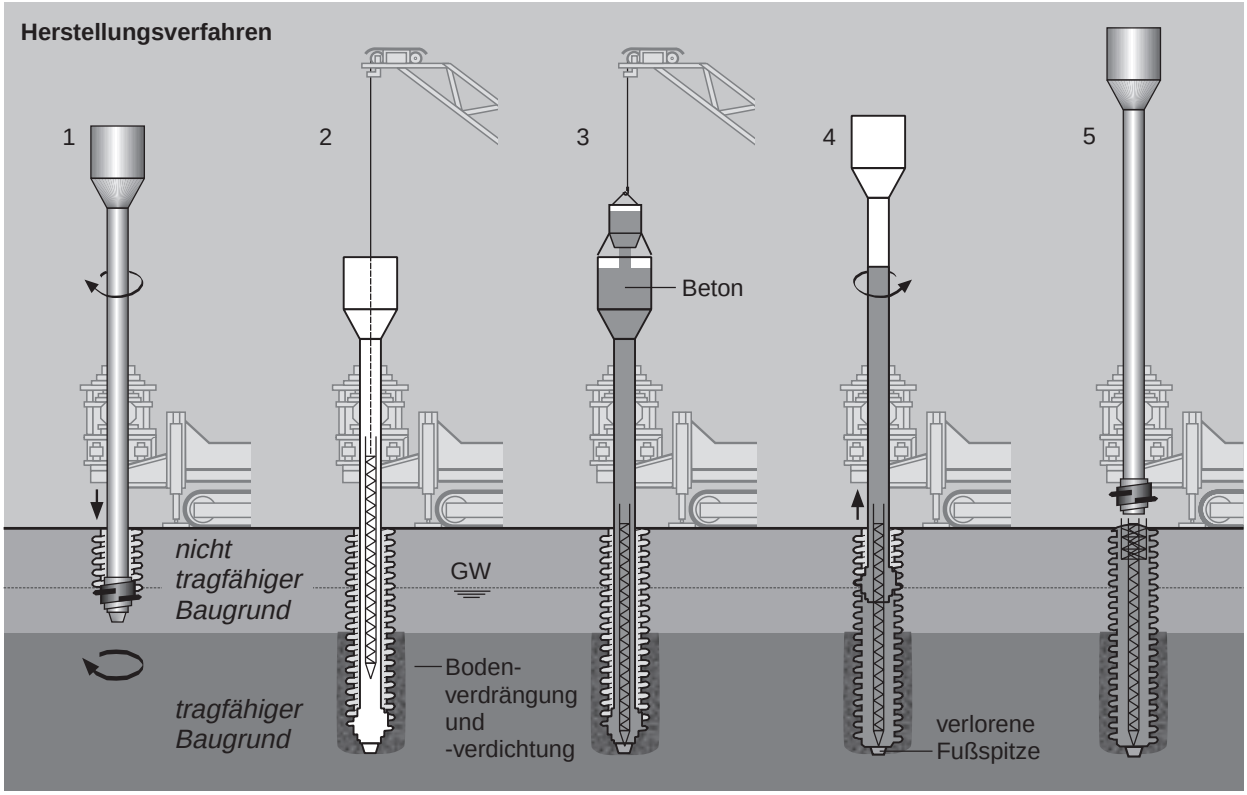
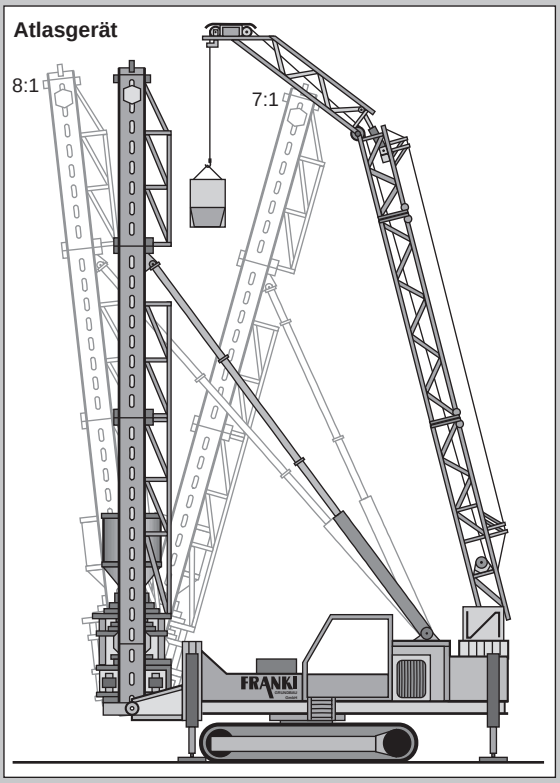
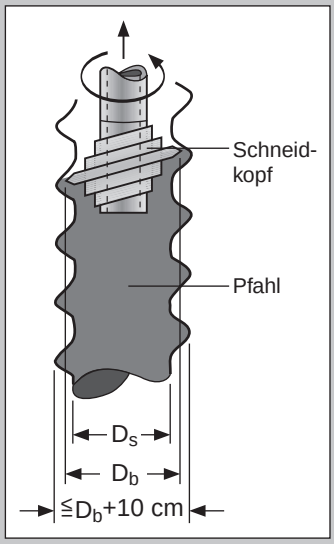



*Bild 8 a: Herstellungsverfahren beim Atlaspfahl*




Ausführungen bei begrenzter Bauhöhe sind mit Spezielgerät möglich.
Angaben dazu auf Anfrage



**Pfahlmessungen** **Ausgegrabener Atlaspfahl**

| Pfahl-Nenn-Ø in cm | 41 | 46 | 51 | 56 |
|---|---|---|---|---|
| $D_s$ in mm | 410 | 460 | 510 | 560 |
| $D_b$ in mm | 510 | 560 | 610 | 660 |
| zulässige Belastung in kN | 1.000 | 1.200 | 1.400 | 1.600 |

*Bild 8 b: Atlasgerät und freigelegter Pfahl*

Der Durchmesser des Pfahlschaftes ist abhängig von der Größe des austauschbaren Schneidkopfes. Nenndurchmesser und zugehörige übliche Pfahltragfähigkeiten sind in *Bild 8 b* dargestellt. Die äußere Form des Pfahls verdeutlicht, daß seine Tragwirkung im wesentlichen durch Mantelreibung gekennzeichnet ist.

Das Eindrehen des Schneidkopfes in den Boden erfordert wegen der damit verbundenen Verdrängung und Verdichtung des Bodenmaterials sehr große Drehmomente. Das Atlas-Gerät ist deshalb in der Lage, ein Drehmoment bis zu 400 kNm aufzubringen.

Um die Verdichtungswirkung des Herstellverfahrens im Boden der Pfahlumgebung aufzuzeigen, wurden auf einer Baustelle in Berlin Drucksondierungen vor und nach der Pfahlherstellung in verschiedenen Abständen zur Pfahlachse durchgeführt. Der Baugrund bestand unterhalb einer Auffüllung und Weichschicht ab ca. 4 m Tiefe aus mitteldicht gelagerten Sanden.

*Bild 9* zeigt die Ergebnisse der Drucksondierungen in Abständen von 0 bis 3 m vor der Pfahlachse. Die Sondierung bei 0 m repräsentiert die ursprüngliche Lagerungsdichte im Boden vor der Pfahlherstellung. Die Sondierungen in 0,5 m bis 3 m Abstand von der Pfahlachse verdeutlichen den Einflußbereich der Bodenverdichtung. Noch in 1 m Entfernung von der Pfahlachse wurde eine Erhöhung des Sondierspitzendruckes im Sand von ca. 70 % gemessen.

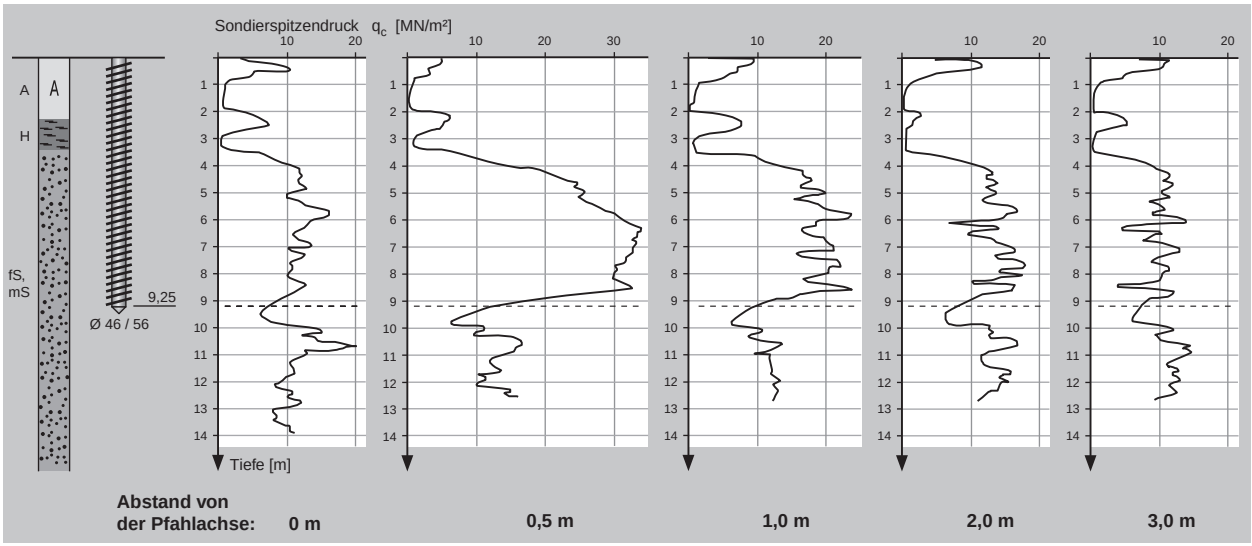



*Bild 9: Einflußbereich der Bodenverdichtung beim Atlaspfahl in sandigem Baugrund*

Das Ergebnis einer Probebelastung in diesem Baugrund enthält *Bild 10*.

Zum Vergleich ist auch die Widerstands-Setzungs-Linie dargestellt, die sich nach DIN 4014 für einen Bohrpfahl mit gleichem Außendurchmesser ergibt. Während der Bohrpfahl eine Grenzlast von ca. 2 MN aufweist bei einer zugehörigen Setzung von von 56 mm, zeigt der Atlaspfahl bei einer maximalen Versuchslast von 3,4 MN lediglich eine Setzung von 31 mm.

Auch dieser Vergleich verdeutlicht, wie sich Bodenförderung oder vollständige Bodenverdrängung bei der Pfahlherstellung auf die Tragfähigkeit des Pfahlsystems auswirken.

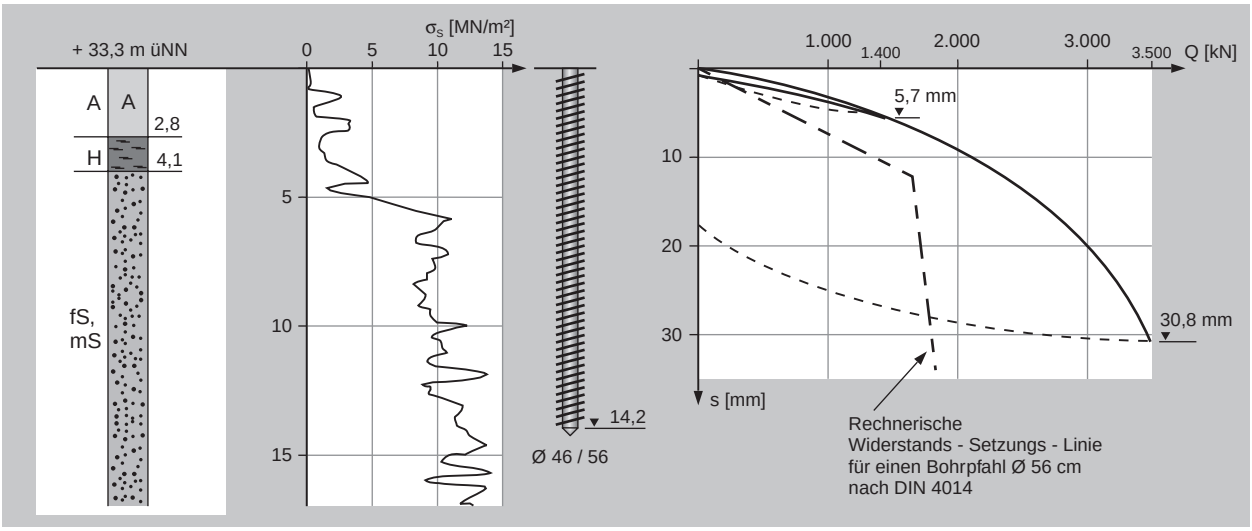



*Bild 10: Probebelastungsergebnis eines Atlaspfahls*

## VB-Pfahl

Der VB-Pfahl ist eine Betonpfahl nach DIN 4014, der mit einer durchgehenden Bohrschnecke mit großem Zentralrohr hergestellt wird. Der Herstellungsablauf ist in *Bild 11* dargestellt.

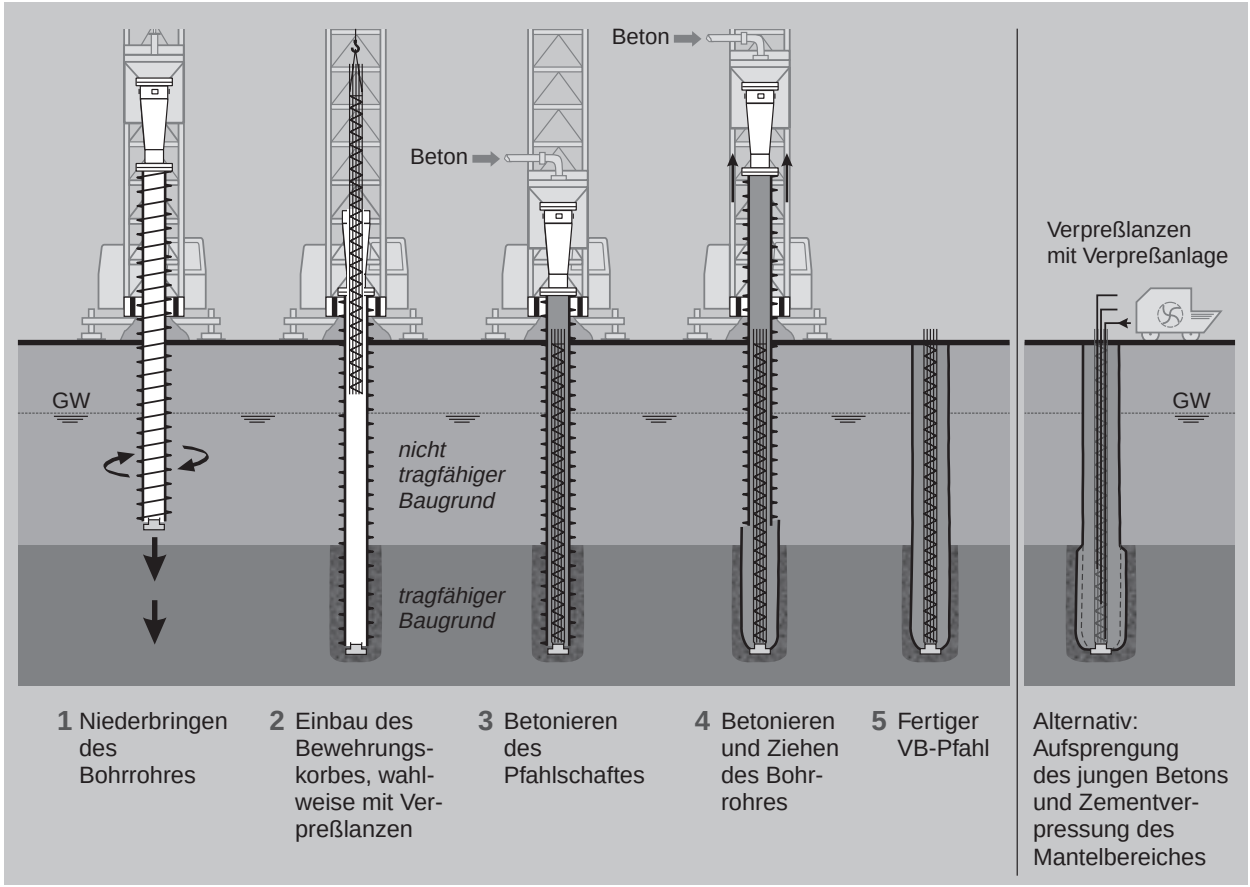



*Bild 11: Herstellungsverfahren eines VB-Pfahls*

Zur Steigerung der Tragfähigkeit kann dieses Pfahlsystem entweder einen zusätzlich ausgestampften Pfahlfuß nach dem FRANKI-Verfahren erhalten bzw. es kann eine Nachverpressung im Mantel- und/oder Fußbereich erfolgen.

Die typischen Regellasten für VB-Pfähle ohne zusätzliche Maßnahmen und solche mit Mantelverpressung zeigt *Bild 12*.

| Pfahldurchmesser [mm] | Regelbelastung [kN] | Regelbelastung mit Mantelverpressung |
|---|---|---|
| 420 | 800 | 1.000 |
| 520 | 1.100 | 1.400 |
| 560 | 1.400 | 1.900 |
| 640 | 1.600 | 2.300 |

Die angegebenen Lasten sind Anhaltswerte und im Einzelfall anhand des Baugrundes zu überprüfen

*Bild 12: Regelpfahllasten von VB-Pfählen und VB-Pfählen mit Mantelverpressung*

## Vergleichende Probebelastungsserie zwischen einem *FRANKIPFAHL*, VB-Pfahl, VB-Pfahl mit ausgestampftem Fuß und VB-Pfahl mit Mantelverpressung

Für die Gründung des Pressehauses am Baumwall von *Gruner & Jahr* in der Innenstadt von Hamburg wurde aufgrund der anstehenden Baugrundverhältnisse eine Pfahlgründung erforderlich.

Für die abzutragenden Pfahllasten von bis zu 1800 kN waren *FRANKIPFÄHLE* (Durchm. 420 mm) und VB-Pfähle (Durchm. 560 mm) vorgesehen. Letztere sollten in einen 15 m breiten Randbereich der Baumaßnahme ausgeführt werden, um Erschütterungseinflüsse auf die benachbarte Bausubstanz im zulässigen Rahmen zu halten. Sollten wider Erwarten Einsprüche der Nachbarn gegen die Rammpfahlgründung erhoben werden, waren dafür alternativ VB-Pfähle mit ausgestampftem Fuß oder VB-Pfähle mit Mantelverpressung vorgesehen.

Zur Klärung des Widerstands-Setzungs-Verhaltens der geplanten Pfahlsysteme wurden vor Beginn der Baumaßnahme Probebelastungen durchgeführt. Wegen des möglichen Einsatzes der verschiedenen Pfahlsysteme im selben Bauwerk war die Forderung einzuhalten, daß die Setzungsdifferenzen zwischen allen genannten Pfahlsystemen bei einer Gebrauchslast von 1.800 kN nicht mehr als 8 mm betragen durften.

Die Ergebnisse der Probebelastungen, die Pfahlgeometrien der verschiedenen Pfähle und die Baugrundverhältnisse zeigt *Bild 13*.

Die Forderung nach einer maximalen Setzungsdifferenz von $\Delta s = 8$ mm zwischen den verschiedenen Pfahlarten bei der Gebrauchslast von 1.800 kN wurde eingehalten.

Es wird aber auch deutlich, welche Unterschiede bezüglich Pfahllänge und Schaftdurchmesser erforderlich sind, um bei den verschiedenen Pfahllasten ein etwa gleichartiges Setzungsverhalten in den geforderten Grenzen zu erreichen.

Wegen der erheblichen wirtschaftlichen Vorteile einerseits und keiner Einsprüche aus der Nachbarschaft andererseits konnte die Gründung des Bauwerkes mit *FRANKIPFÄHLEN* in den geplanten Bereichen ausgeführt werden.

## Schlußbemerkung

Die beschriebenen Pfahlsysteme aus den Gruppen der Verdrängungspfähle und Bohrpfähle weisen systembedingte Unterschiede im Widerstands-Setzungs-Verhalten auf. Eine Erhöhung der Pfahltragfähigkeit und/oder eine Reduzierung der Pfahllänge kann durch verschiedene Zusatzmaßnahmen erreicht werden.

Dadurch ist es möglich, eine Pfahlgründung optimal an die Forderungen hinsichtlich Baugrundsituation, abzutragende Pfahllasten, Wirtschaftlichkeit und Umweltbedingungen anzupassen.

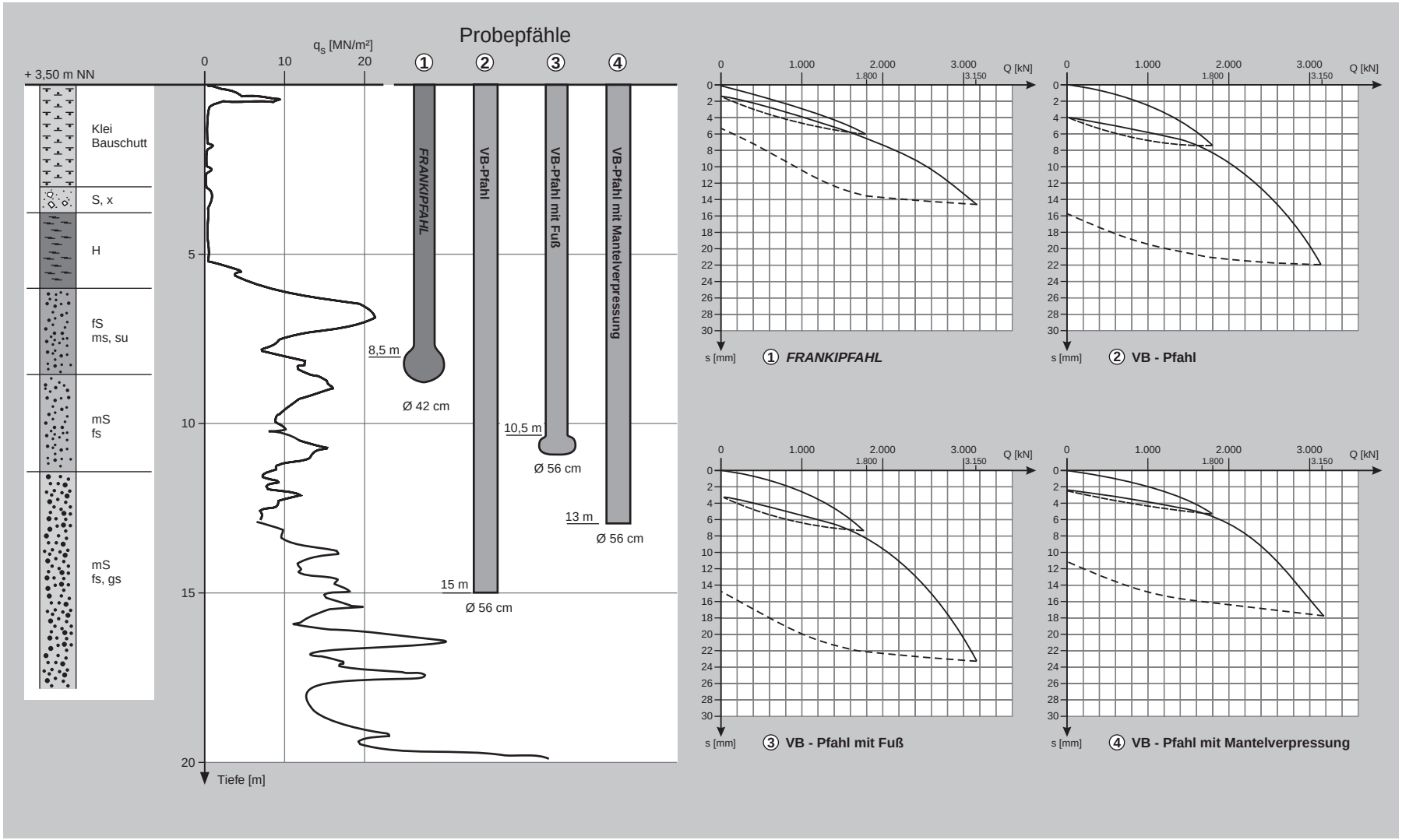



*Bild 13: Vergleich der Probebelastungsergebnisse verschiedener Pfahltypen auf der Baustelle Gruner & Jahr, Hamburg*