

Mitteilung des Instituts  
für Grundbau und Bodenmechanik  
Technische Universität

Heft Nr. 48



## Pfahl-Symposium '95

Fachseminar: 23./24. Februar 1995

Zusammengestellt von

U. Ernst  
B. Wienholz

Braunschweig 1995

---

Herausgegeben von Prof. Dr.-Ing. W. Rodatz

# OPTIMIERUNG VON PFAHLGRÜNDUNGEN UNTER BERÜCKSICHTIGUNG VON AUFWENDUNGEN FÜR PFAHLPRÜFUNGEN

O. Klingmüller, W.-I. Tittler

## Inhalt

1. Gebrauchslast, Prüflast und Kosten-Nutzen-Relation von Tragfähigkeitsprüfungen
2. Ein Optimierungsproblem
3. Untersuchung des Einzelpfahls
4. Beispiel
  - 4.1. Tragfähigkeitswerte
  - 4.2. Kosten
  - 4.3. Ergebnisse
5. Schlußfolgerungen

## ZUSAMMENFASSUNG

Das Problem der Optimierung einer Pfahlgründung aus Ort betonbohrpfählen mit Bezug auf die Parameter Pfahlänge, Pfahldurchmesser und Anzahl der erforderlichen Pfähle für eine gegebene Bauwerkslast wird formuliert und beispielhafte Lösungen für angenommene Werte der Material- und Bohrkosten, der Kosten für Pfahlprüfungen sowie der Bodenkennwerte diskutiert. Es zeigt sich, daß die Struktur des Problems einen strategischen Suchalgorithmus erfordert, da die Bohrkosten in Abhängigkeit von der Tiefe sowie die Pfahltragfähigkeit in Abhängigkeit der Kosten für die Qualitätssicherung (Pfahlprüfung) Sprünge aufweisen. Die Aufbereitung der Problemstellung über ein Tabellenkalkulationsprogramm mit Makroprogrammierung ermöglicht es aber auch Praktikern, bei komplexen Gründungsproblemen Varianten durchzuspielen. So können einerseits Planer Unterstützung für die Ausschreibung erhalten, andererseits wird es Anbietern möglich, gegebene Geräte optimal einzusetzen.

## 1. GEBRAUCHSLAST, PRÜFLAST UND KOSTEN-NUTZEN-RELATION VON TRAGFÄHIGKEITSPRÜFUNGEN

Zur Bestimmung der zulässigen Nutzlast (Gebrauchslast) ist die durch eine Tragfähigkeitsprüfung ermittelte Grenzlast gemäß DIN 1054 durch den Sicherheitsfaktor zu dividieren. Wenn nur eine Tragfähigkeitsprüfung durchgeführt wird, ist als Sicherheitsfaktor  $\eta = 2$  zu wählen, bei mehr als einer Tragfähigkeitsprüfung kann der Sicherheitsfaktor auf  $\eta = 1,75$  reduziert werden.

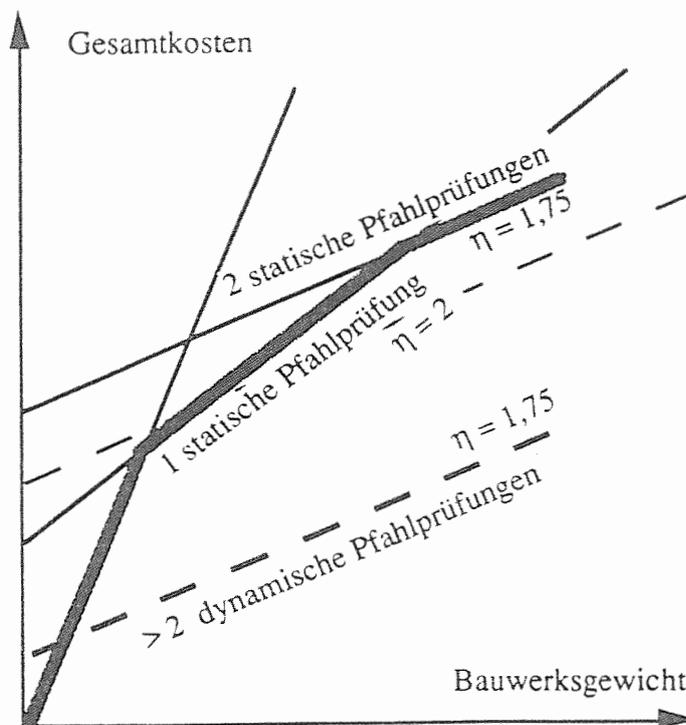


Bild 1 : Gesamtkosten einer Pfahlgründung einschließlich Kosten für Pfahlprüfungen

Bild 1 gibt eine Übersicht über die Entwicklung der Gesamtkosten einer Pfahlgründung unter Berücksichtigung der Einsparungen durch Pfahlprüfungen.

Ausgehend von einer sehr vereinfachten Situation, in der die Kosten einer Pfahlgründung linear mit dem Gewicht des Bauwerks zunehmen, kann die Wirkung einer Probebelastung auf die Kosten untersucht werden. Es wird angenommen, daß die Durchführung einer Probebelastung eine höhere Nutzlast gegenüber den Erfahrungswerten der DIN 4014 ermöglicht und damit zu Einsparungen führt.

Aufgrund der höheren möglichen Tragfähigkeit hat die zugehörige Kostenlinie für die Gesamtkosten mit einer Pfahlprüfung eine geringere Steigung als die ursprüngliche Linie, sie setzt aber höher an, da die Kosten für die Pfahlprüfung eingerechnet werden müssen. Bei der Durchführung einer zweiten Probelastung wird aufgrund des niedrigeren Sicherheitsfaktors  $\eta = 1,75$  die Kostenlinie noch etwas flacher, geht aber von den höheren Kosten für zwei Pfahlprüfungen aus.

Die Schnittpunkte mit der ursprünglichen Kostenlinie ohne Pfahlprüfungen zeigen, ab welcher Bauwerksgröße sich die Durchführung einer Probelastung lohnt. Die Vorschriften und Empfehlungen erlauben in der Regel, die Grenzlast aus der dynamischen Pfahlprüfung als Grenzlast des Pfahls unter statischer Belastung anzusehen, wenn eine Eichung durch eine statische Probelastung eines vergleichbaren "Pfahl/Boden-Systems" vorliegt.

Wenn für eine bestimmte Gründungssituation keinerlei Vergleichswerte aus statischen Probelastungen vorliegen, empfiehlt es sich, eine statische Probelastung durchzuführen und zur Reduzierung des Sicherheitsfaktors auf  $\eta = 1,75$  eine oder mehrere dynamische Tragfähigkeitsprüfungen anzuschließen.

Aus Bild 1 ist zu ersehen, daß durch das Ersetzen der zweiten statischen durch eine dynamische Pfahlprüfung eine Einsparung erzielt werden kann, die sich schon bei kleineren Gründungsmaßnahmen rentieren kann (dünne gestrichelte Linie). Die zugehörige Kostenlinie hat nämlich die gleiche Steigung wie die Kostenlinie für zwei statische Probelastungen, geht aber von einem niedrigeren Grundniveau aus. Eine weitere Kostenreduzierung für die Pfahlgründung kann erzielt werden, wenn ganz auf die statische Prüfung verzichtet werden kann. Dann folgt die Kostenlinie der mit Sicherheitsfaktor  $\eta = 1,75$ , geht aber von den viel niedrigeren Grundkosten für die dynamische Prüfung aus. Dieses Vorgehen wird sich damit auch bei kleineren Pfahlgründungen lohnen (dicke gestrichelte Linie).

Die vereinfachte Problemstellung kann natürlich nur einen Hinweis auf die Kosten-Nutzen-Situation geben. Für die Optimierung einer Pfahlgründung müßte einerseits die komplexere Zusammensetzung der Kosten sowie andererseits auch der kostenreduzierende Einfluß von höheren Tragfähigkeiten sowie der spezielle Boden untersucht werden. Entsprechende Lösungen erfordern den Einsatz nichtlinearer mathematischer Optimierung.

## 2. EIN OPTIMIERUNGSPROBLEM

In allgemeinen Worten wird ein Problem der Optimierung von Pfahlgründungen wie folgt formuliert :

Minimiere die Gesamtkosten, die abhängig sind von  
Materialkosten,  
Bohrkosten,  
Stückkosten (z.B. Umsetzen, Bohrschablone und  
Baustelleneinrichtung),  
Kosten für Pfahlprüfungen,  
Anzahl der Pfähle,  
Länge der Pfähle,

unter der Bedingung, daß  
die durch die Pfähle sicher aufnehmbare Belastung größer ist als  
die Bauwerkslast und die Pfähle auf der gegebenen Grundfläche  
bzw. auf gegebenen Rasterpunkten angeordnet werden können.

Anzahl und Länge der Pfähle sind hierbei die freien Parameter, die sich aus der Forderung, daß die Kosten minimiert werden, ergeben.

Die sicher aufzunehmende Belastung ergibt sich hierbei aus den zulässigen Werten für Mantelreibung und Spitzendruck. Bei Vorliegen von Bodenuntersuchungen (Bohrung und Ramm- oder Drucksondierung) kann ein Basiswert einer sicheren Pfahlbelastung aus der DIN 4014 entnommen werden. Bei Vorliegen von Ergebnissen aus Probelastungen können diese verwendet werden. Der Sicherheitsfaktor ist mit 2, bzw. 1,75 zu wählen, je nachdem, ob eine oder mehrere Probelastungen durchgeführt wurden.

Für ein sehr vereinfachtes Problem eines Bauwerks auf quadratischer Grundfläche ohne Vorgabe von Rasterpunkten, bzw. Pfahlpositionen (siehe Bild 2) mit homogenem Baugrund und gleichen Pfahllängen, kann eine mathematische Optimierungsaufgabe formuliert werden :

$$\text{Minimiere } K = N^2 \cdot K_P + N^2 \cdot L \cdot K_L + BE + K_{PP}$$

- mit
- N : Anzahl der Pfähle pro Kante des Quadrats,
  - $N^2$  : Gesamtzahl der Pfähle,
  - $K_P$  : Fixkosten pro Pfahl (Kosten für das Umsetzen des Bohrgerätes, Einmessen etc.),
  - L : Länge der Pfähle,
  - $K_L$  : Kosten pro lfm Pfahl (Materialkosten Beton und Stahl),
  - BE : Baustelleneinrichtung,
  - $K_{PP}$  : Kosten für Pfahlprüfungen.

Folgende Nebenbedingungen sind einzuhalten :

$N > 2$ , es sollen sinnvollerweise mindestens zwei Pfähle pro Kante des Quadrates vorhanden sein,

$N < \frac{b}{3 \cdot d}$ , die Pfähle sollen einen Mindestabstand einhalten,

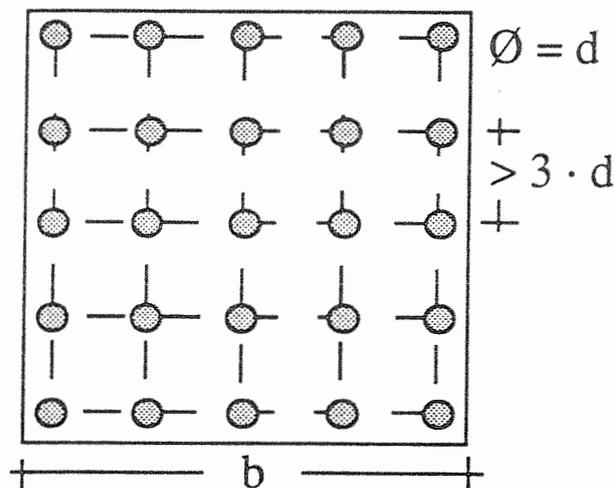


Bild 2 : Pfahlanordnung auf quadratischer Grundfläche

$N = \frac{L_G}{R_P}$ , die Anzahl der Pfähle ergibt sich aus der Gesamtlast des Bauwerks  $L_G$  dividiert durch die Traglast  $R_P$  des Einzelpfahls,

$$R_p = R_M + R_S$$

die Tragfähigkeit des Einzelpfahles ist gleich der Summe aus Mantelreibung und Spitzendruck,

$$R_M = \frac{1}{2} \cdot L \cdot p \cdot d \cdot \left( \frac{L}{10} \tau_0 \right)$$

die Mantelreibung ist abhängig von der Pfahllänge  $L$ , dem Umfang des Pfahles  $p \cdot d$  und der von der Tiefe abhängigen Mantelreibung

$$t(L) = \frac{L}{10} \tau_0,$$

die hier als linear veränderlich mit Bezug auf einen Wert  $\tau_0$  in 10-m-Tiefe angenommen wird (Bild 3),

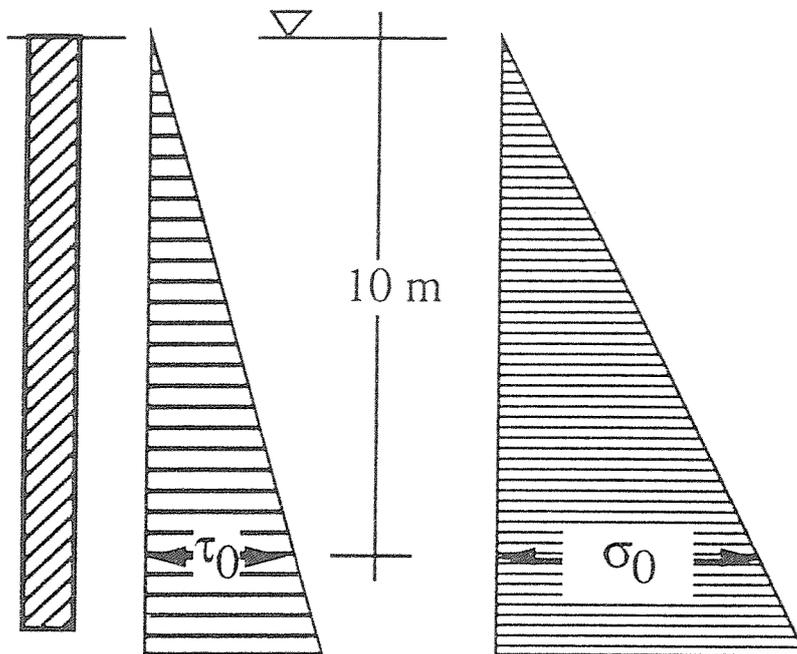


Bild 3 : Lineare Abhängigkeit der Mantelreibung und des Spitzendrucks

$$R_S = p \cdot d^2 \cdot \left( \frac{L}{10} \sigma_0 \right),$$

der Spitzendruck ist abhängig von der aufnehmbaren Bodenpressung

$$\sigma(L) = \frac{L}{10} \sigma_0,$$

die (wie die Mantelreibung) als linear abhängig von der Tiefe mit Bezug auf einen Wert  $\sigma_0$  in 10-m-Tiefe angenommen wird (siehe Bild 3).

Die Lösung dieser Optimierungsaufgabe ergibt für den optimalen Durchmesser und die Anzahl der Pfähle Werte, die sich natürlich in der Praxis nicht realisieren lassen. Durch die Annahme von Einheitswerten für Bodenkennwerte und Kosten kann aber eine Parameterstudie oder Sensitivitätsanalyse durchgeführt werden, aus der die für die Gesamtkosten maßgebenden Faktoren bestimmt werden.

### 3. UNTERSUCHUNG DES EINZELPFAHLS

Um einen Überblick über die Zusammenhänge von Kosten und Tragfähigkeit zu gewinnen, wurde die Entwicklung beider Größen über die Tiefe an einem Einzelpfahl  $\varnothing 90$  untersucht. Hierfür wurde von einer einfachen Zunahme der Tragfähigkeit mit der Tiefe entsprechend Bild 3 ausgegangen. Die Tragfähigkeit ergibt sich zu ungefähr gleichen Teilen aus Mantelreibung und Spitzendruck. Für die Bohrkosten wurde jeweils bei 10 m und bei 20 m ein Sprung angenommen, der durch das jeweils größere Bohrgerät begründet ist.

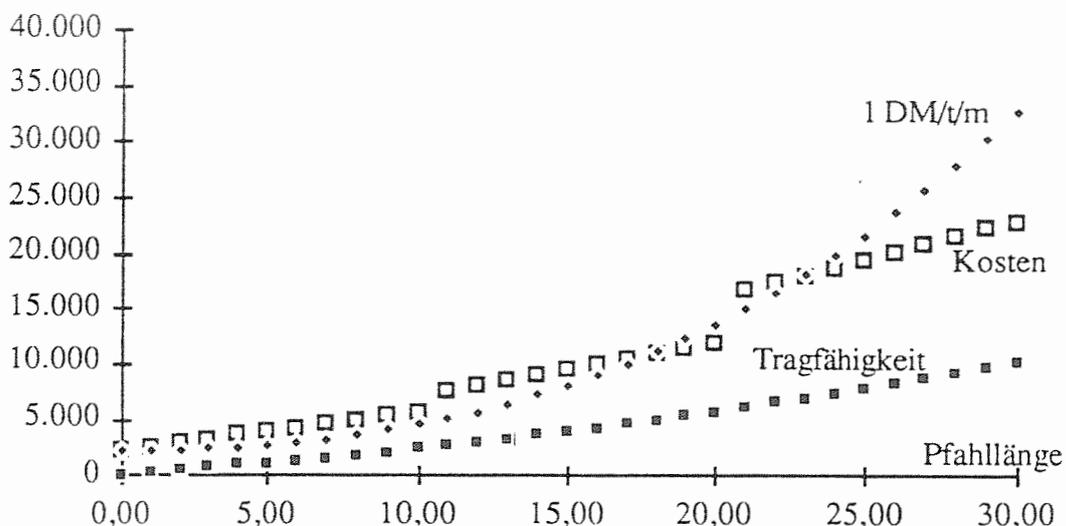


Bild 4 : Kosten und Tragfähigkeit bei einem Pfahl  $\varnothing 90$

Während die Tragfähigkeit stärker als linear zunimmt, sind die Kosten proportional der Pfahllänge, wobei vor allem die durch die Bohrkosten auftretenden Sprünge auffallen (Bild 4). Zum Vergleich sind auch die Kosten gemäß der bekannten Faustformel angegeben, die erst in größerer Tiefe von den explizit ermittelten Kosten abweichen.

Die spezifischen Kosten, also die durch die erreichte Tragfähigkeit dividierten Kosten, sinken mit der Pfahllänge, so daß es prinzipiell günstiger ist, längere Pfähle zu erstellen (Bild 5). Die Abnahme der Kosten ist für Reibungspfähle ausgeprägter als für Spitzendruckpfähle.

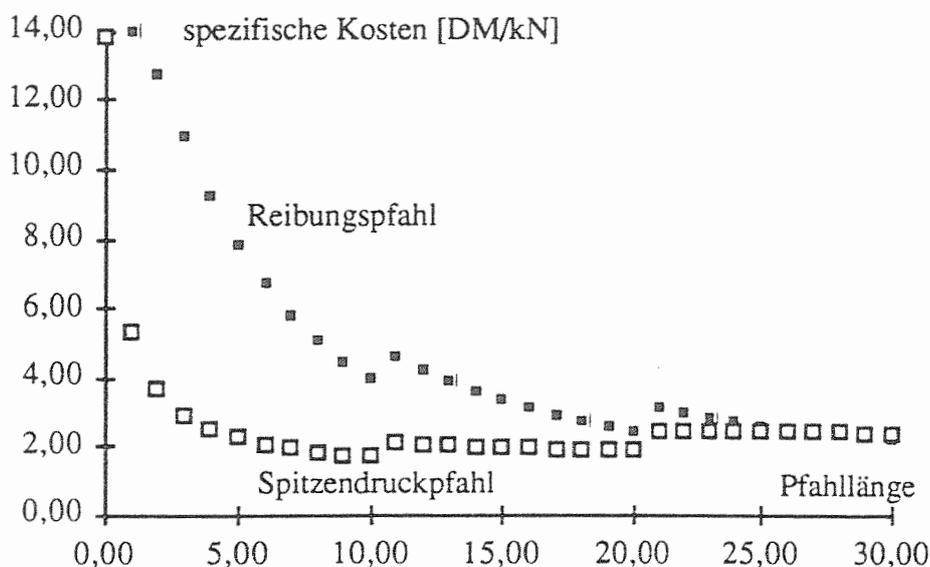


Bild 5 : Auf die Tragfähigkeit bezogene Kosten

Aus Bild 5 ist zu ersehen, daß lediglich durch die mit der Tiefe gestaffelten Bohrkosten Sprünge entstehen. Diese Sprünge bewirken nun, daß zwei verschiedenen Pfahllängen bei den Reibungspfählen jeweils gleiche spezifische Kosten zugeordnet sind. Es ist also möglich, eine festgelegte Bauwerkslast mit unterschiedlicher Gründungsauslegung bei gleichen Kosten abzutragen. Das Auffinden solcher Punkte bietet damit die Möglichkeit, einen Pfahlgründungsentwurf mit Bezug auf andere Parameter, z.B. Bauzeit, noch weiter zu optimieren.

Die Komplexität auch einer vereinfachten Optimierungsaufgabe wird im Folgenden für ein festgelegtes Szenario exemplarisch untersucht.

## 4. BEISPIEL

### 4.1. Tragfähigkeitswerte

Für die Bemessungswerte in 10 m Tiefe werden in Abhängigkeit von der Anzahl der Pfahlprüfungen die Werte der Tabelle 1 angesetzt. Die Werte nach DIN 4014 wurden für mittlere Bodenverhältnisse gewählt. Es wird angenommen, daß bei einer statischen Tragfähigkeitsprüfung ein um 80% höherer Wert bestimmt wird und dieser auch durch die zweite Tragfähigkeitsprüfung bestätigt wird. Die Abminderung des Sicherheitsfaktors von 2 auf 1,75 bewirkt dann eine entsprechende Erhöhung der aufnehmbaren Spannungen.

Statische Prüfungen	DIN 4014	1	2
Kosten	0	200 000	400 000
$s_0$ [MPa]	1	1,8	2,0
$t_0$ [MPa]	0,03	0,054	0,06

Tabelle 1 : Bemessungswerte für Mantelreibung und Spitzendruck in 10 m Tiefe

### 4.2. Kosten

Bei den Kosten für statische Belastungsprüfungen (Tabelle 1) wurde von einem vollständigen Versuch bis zur doppelten Gebrauchslast am instrumentierten Pfahl ausgegangen. Da lediglich der Transport der Belastungseinrichtung bei einem zweiten Versuch auf derselben Baustelle eingespart wird, wird eine Verdoppelung der Kosten bei zwei Prüfungen angenommen.

Stahl	1500	DM / t
Beton	150	DM / m <sup>3</sup>
Stahl / Beton	100	kg / m <sup>3</sup>

Tabelle 2 : Materialkosten

Da die tatsächlichen aktuellen Preise für das Material je nach Lieferanten und Lieferbedingungen sehr unterschiedlich ausfallen, wird in diesem Beispiel von Schätzwerten ausgegangen. Zur Vereinfachung wird von einem konstanten Bewehrungsgrad unabhängig von der Länge und dem Durchmesser der Pfähle ausgegangen.

Die Einzelkosten pro Pfahl für Baustelleneinrichtung, Bohrschablonen, Umsetz- und Rüstarbeiten betragen einheitlich DM 1000.

Neben den Materialkosten, die sich aus den Einheitswerten (siehe Tabelle 2) ergeben, sind auch die Bohrkosten bei den auf die Länge bezogenen Kosten zu berücksichtigen. Die Bohrkosten sind abhängig von dem gewählten Bohrgerät und dem Durchmesser der Pfähle. Für das Beispiel wurden Anhaltswerte angenommen, die die Tiefenabhängigkeit der Bohrkosten wiedergeben. Das erheblich größere Gerät, das für Bohrungen über 20 m Tiefe erforderlich ist, bewirkt einen Sprung in den Kosten auf ungefähr das zweieinhalbfache.

Ø	L < 20 m	L ≥ 20 m
0,7	150	360
0,9	165	400
1,2	175	440
1,5	220	560
1,8	350	900

Tabelle 3 : Bohrkosten in DM / m

Für die Pfahldurchmesser werden nur die üblichen Werte für Ortbetonpfähle zugelassen, da Zwischenwerte in der Praxis wenig verwendet werden (Tabelle 3, Spalte 1).

Die Pfahllänge soll in dem betrachteten Beispiel zwischen 10 m (Minimum) und 30 m (Maximum) liegen, da in diesem Bereich vergleichbare Verfahren der Herstellung konkurrieren können.

### 4.3. Ergebnisse

Zuerst wurde in einem Gesamtlauf versucht, die in Bild 1 sinnbildlich dargestellte Beziehung zwischen den Gesamtkosten und der Bauwerkslast unter Berücksichtigung der Ergebnisse einer Pfahlgründung exemplarisch nachzuvollziehen. Die Bauwerkslast wurde von 100 MN bis 1.200 MN gesteigert. Zur Veranschaulichung sei erwähnt, daß ein bekanntes Bürogebäude in Frankfurt mit 160 m Höhe ca. 600 MN wiegt.

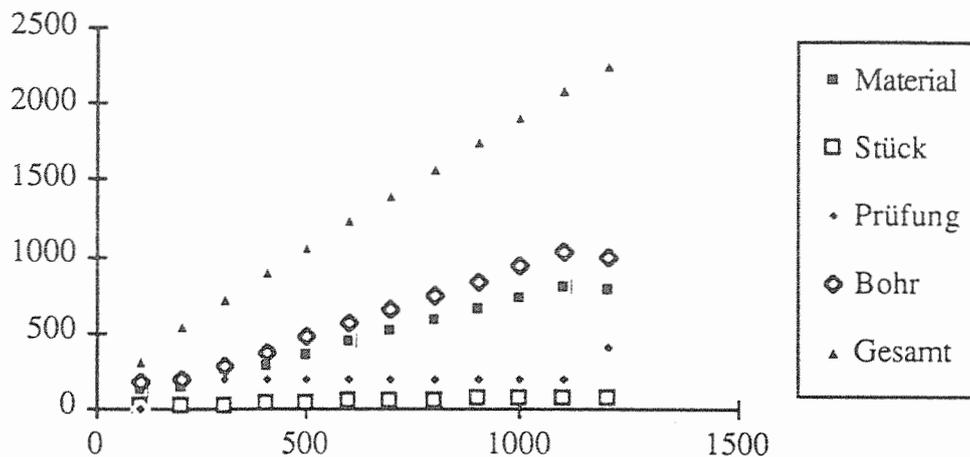


Bild 6 : Entwicklung der Kosten in Abhängigkeit von der Bauwerkslast

Bei der angenommenen Kostenstruktur ergibt schon sich für Bauwerkslasten im Bereich von 200 MN, daß die Durchführung einer statischen Probelastung soviel mehr an Tragfähigkeit bringt, daß die Kosten für die Probelastung durch die Material- und Bohrkosteneinsparungen mehr als ausgeglichen werden.

Die Durchführung einer zweiten Probelastung zur Reduktion des Sicherheitsfaktors von 2,0 auf 1,75 führt jedoch erst bei sehr großen Pfahlgründungen zu einer entsprechenden Material- und Bohrkosteneinsparung. In Bild 6 sind die optimalen Kosten in Abhängigkeit von der Bauwerkslast dargestellt.

Bei einer Betrachtung der Aufteilung der Kosten (Bild 7) zeigt sich, daß die Stückkosten, also die Umlage der Baustelleneinrichtung und die sonstigen Kosten für

das Geräteeinmessen etc. nur eine untergeordnete Rolle spielen. Wesentlich sind die Material und die Bohrkosten.

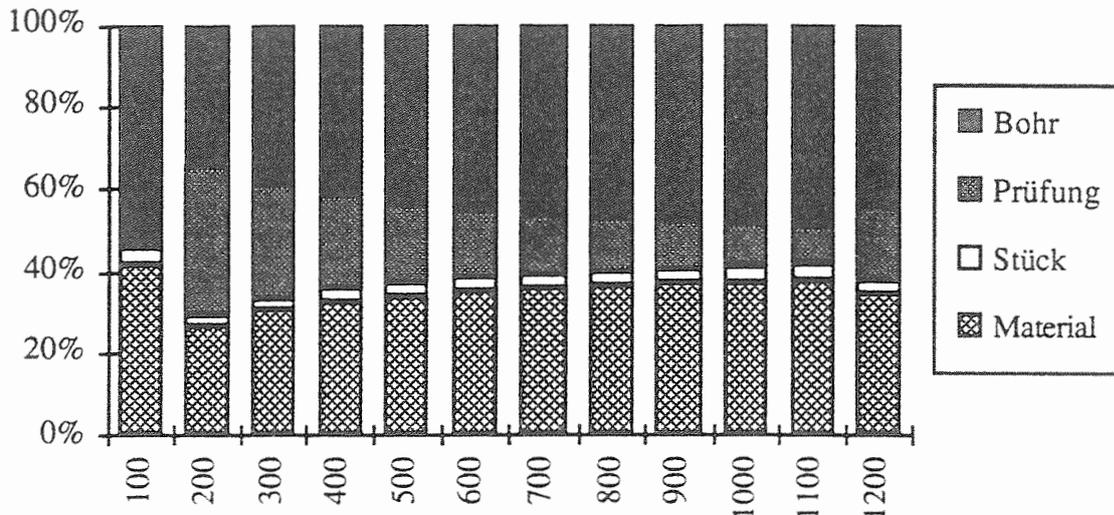


Bild 7 : Aufteilung der Kostenarten in Abhängigkeit von der Bauwerkslast

Für die Bauwerkslast 200 MN ergibt die Optimierung, daß sich eine Pfahlprüfung auszahlt, obwohl sie mehr als 30 % der Gesamtkosten ausmacht (Bild 7).

Demgegenüber ist ein Anteil von ca. 10% für die viel größere Bauwerkslast von 1100 MN eher verständlich.

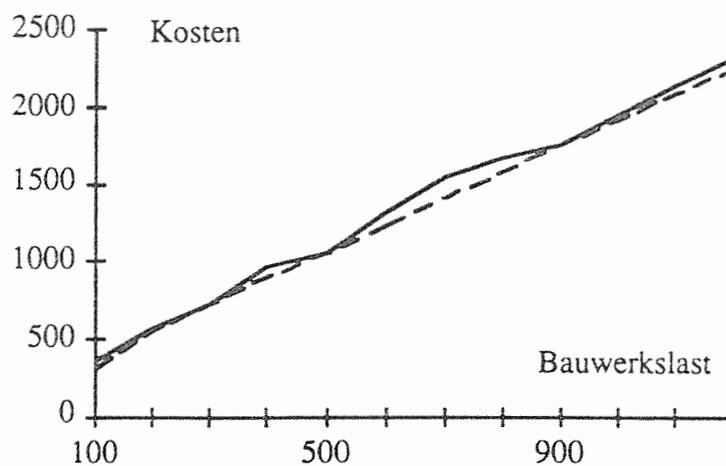


Bild 8 : Vergleich der Kostenentwicklung mit (durchgezogene Linie) und ohne (gestrichelt) Einhaltung einer Geometriebedingung

Im Gegensatz zu dem illustrierenden Beispiel (Bild 1) und der Kostenentwicklung nach Bild 6 verläuft die Kostenlinie bei Einhaltung einer Geometriebedingung nach Bild 2 ( d.h. die Pfähle müssen einen Mindestabstand einhalten und sind auf einer quadratischen Grundfläche anzuordnen ) nicht monoton ansteigend, sondern mit jeweils mehr oder weniger starken Abweichungen von einer geraden oder wenigstens gleichmäßig gekrümmten Linie (Bild 8). Dies hat seinen Grund darin, daß zu jeder vorgegebenen Bauwerkslast ein eigenes Kostenminimum mit Bezug auf die Parameter Pfahlanzahl, Pfahldurchmesser und Pfahllänge gehört.

Die geringe Erhöhung der zulässigen Belastung durch eine zweite Pfahlprüfung führt dazu, daß die entsprechende Kostenlinie nur eine geringfügig höhere Steigung aufweist als die für eine Pfahlprüfung. Dies führt zu einem schleifenden Schnittpunkt. Wegen der Unstetigkeit in den Kostenlinien für optimale Lösungen, kann in einem Bereich zwischen 700 und 1200 MN die optimale Lösung entweder für eine oder zwei Pfahlprüfungen auftreten (siehe Bild 9).

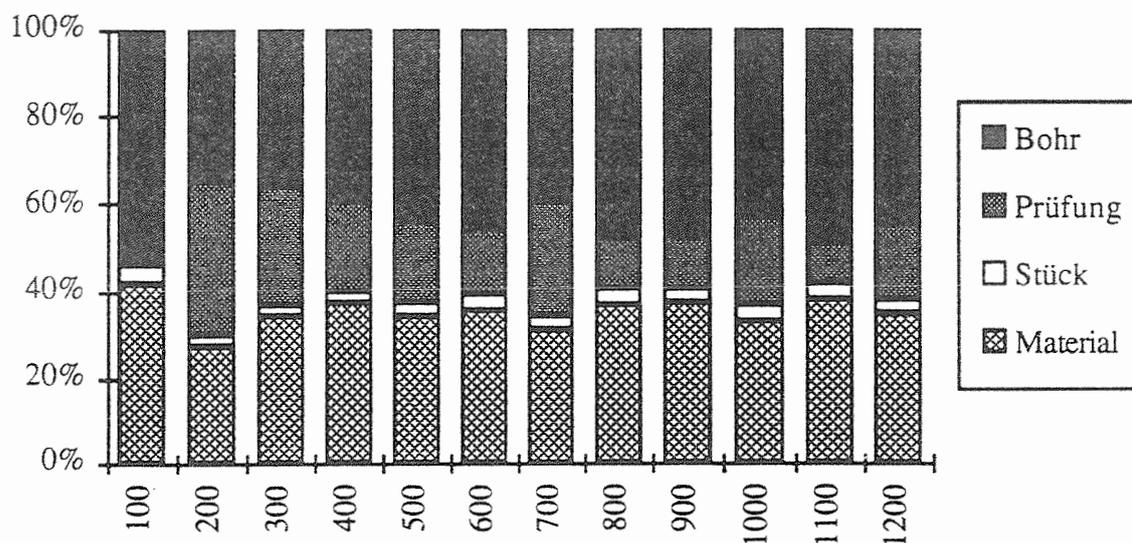


Bild 9 : Aufteilung der Kostenarten in Abhängigkeit von der Bauwerkslast bei Einhaltung einer Geometriebedingung

Bei einer Untersuchung der jeweiligen optimalen Durchmesser, die zu den Lösungen gehören, fällt auf, daß für den untersuchten Lösungsbereich und die gegebenen Ausgangsdaten der Durchmesser  $d = 1,2$  m meist optimal ist. Lediglich wenn die Einhaltung einer Geometriebedingung verlangt wird, erweist sich für die Bauwerkslasten 300 MN und 400 MN auch der Durchmesser  $d = 1,5$  m als optimal.

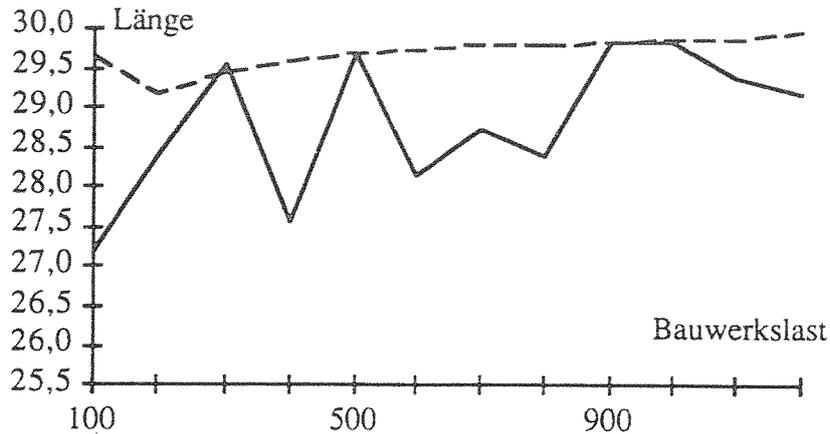


Bild 10 : Vergleich der optimalen Pfahllängen mit (durchgezogene Linie) und ohne (gestrichelt) Einhaltung einer Geometriebedingung

Die optimale Länge der Pfähle wird an der Grenze der maximal zulässigen Länge (hier 30 m) gewählt. Dies Ergebnis entspricht damit den Folgerungen aus der Untersuchung des Einzelpfahls, nämlich daß die Kosten bezogen auf die Tragfähigkeit mit der Länge abnehmen. Geringe Variationen in der Länge ergeben sich daraus, daß gegenüber den Parametern Durchmesser und Anzahl der Pfähle hier ein beliebiger reeller Wert gewählt werden kann und nicht Ganzzahligkeit oder vorgegebene Maße berücksichtigt werden müssen. Die Ausnutzung der Länge zur Kostenminimierung ist für das Beispiel, bei welchem die Einhaltung der Geometriebedingung gefordert wird, ausgeprägter als wenn keine solche Forderung gestellt wird (Bild 10).

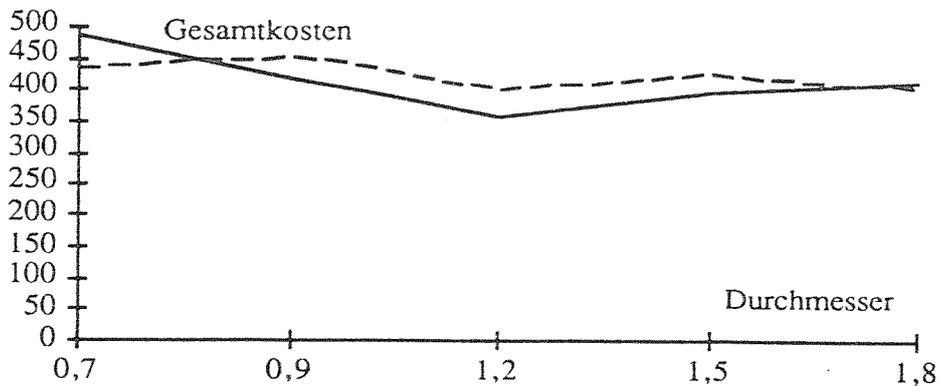


Bild 11 : optimale Lösungen für Bauwerkslast 100 MN  
durchgezogene Linie : ohne Prüfung  
gestrichelte Linie : mit Prüfung

Werden die zur Konkurrenz zugelassenen optimalen Lösungen für eine feste Bauwerkslast, z.B. 100 MN und das Problem mit der Forderung nach Einhaltung der Geometriebedingung betrachtet (Bild 11), so zeigt sich, daß die Gesamtkosten bei Durchführung einer Pfahlprüfung zwischen 454 und 398 schwanken, ohne Pfahlprüfung zwischen 486 und 355 (Minimum). Vor allem ist aus Bild 11 zu ersehen, daß die Lösung ohne Pfahlprüfung nicht für alle Durchmesser das Kostenminimum bringt.

Ein Vergleich der den Durchmessern zugeordneten Pfahllängen zeigt, daß für den Durchmesser  $d = 1,5$  m die geringere Länge unter 20 m optimal ist, während für alle anderen Durchmesser immer die maximal mögliche Pfahllänge etwas unter 30 m gewählt wird.

Diese Eigenschaft der optimalen Lösungen und ihre Empfindlichkeit gegenüber den Sprüngen in den Bohrkosten ergab sich schon aus der Untersuchung des Einzelpfahls. Optimale Pfahllängen liegen so nah wie möglich am vorgegebenen Kostensprung für Bohrkosten (20 m) oder an der Maximallänge (30 m). Da die jeweiligen Gesamtkosten für eine Lösung mit 20 m Pfahllänge oder eine Lösung mit 30 m Pfahllänge verhältnismäßig nah beieinander liegen, kommt es für die optimale Lösung zu den Sprüngen bezüglich der Parameter Pfahllänge, Anzahl und Durchmesser.

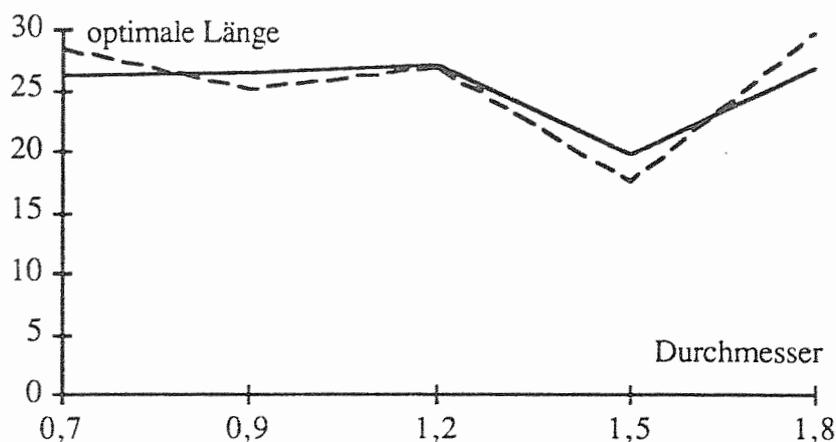


Bild 12: optimale Längen für Bauwerkslast 100 MN  
 durchgezogene Linie : ohne Prüfung  
 gestrichelte Linie : mit Prüfung

Ebenso ergibt sich aus dieser Tatsache, daß geringfügige Änderungen in den Ausgangsgrößen, also z. B. andere Bodenkennwerte oder andere Kostenstrukturen für die Bohrkosten zu einer vollständigen Änderung der Parameter der optimalen Lösung (Pfahl­länge, Anzahl und Durchmesser) führen können.

Dies erklärt auch, warum es trotz vorgegebenem LV und technischen Randbedingungen für verschiedene Anbieter immer möglich ist, ihren eigenen optimalen Preis anzugeben.

## 5. SCHLUBFOLGERUNGEN

Aus der Aufstellung und Lösung einer Optimierungsaufgabe für Pfahlgründungen zeigt sich, daß eine optimale Einstellung der Parameter Pfahl­länge und Pfahldurchmesser keine elementare Aufgabe ist. Obwohl ein sehr vereinfachtes Beispiel gewählt wurde, zeigt sich doch das sehr komplexe Zusammenwirken der einzelnen die Lösung beeinflussenden Parameter.

Für die Untersuchung wurden lediglich statische Tragfähigkeitsprüfungen betrachtet, die Ausnutzung der Möglichkeiten der dynamischen Prüfung würde die Kosten weiter verringern, wie in der Einleitung erläutert wurde.

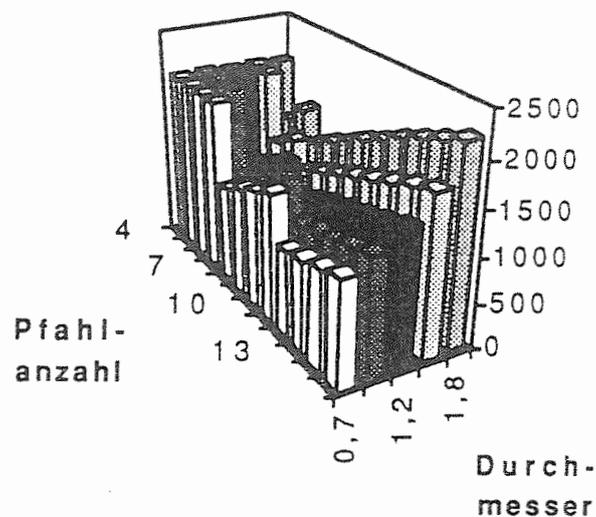


Bild 13 : Kostenfunktion