

# DYNAMISCHE PRÜFUNG VON GROSSBOHRPFÄHLEN FALLMASSE, FALLHÖHE UND NACHWEISBARE TRAGLAST

Oswald Klingmüller

## Zusammenfassung

Für die Auslegung einer Belastungseinrichtung für die dynamische Probebelastung von Großbohrpfählen gelten als Faustformeln : Die Fallmasse sollte 10% der Pfahlmasse betragen und 1% der nachzuweisenden Prüflast. Aufgrund der Erfahrung mit der Prüfung von über 90 Großbohrpfählen ( $\varnothing 900$  mm bis  $\varnothing 2000$  mm) werden die Zusammenhänge zwischen dem aktivierten statischen Bodenwiderstand und der eingeleiteten Energie untersucht. Zur Vorbereitung einer dynamischen Belastungsprobe wird vorgeschlagen, die Auslegung der Belastungseinrichtung anhand der Simulationsberechnung mit dem Wellengleichungsprogramm WEAP zu überprüfen.

## Abstract

The loading system for the dynamic testing of large bored piles can be designed according to the rules of thumb : the drop weight should be 10% of the weight of the pile and 1% of the expected proof load. From the experience of testing of more than 90 large bored piles ( $\varnothing 900$  mm bis  $\varnothing 2000$  mm) the relationship of activated static soil resistance and available potential and effective energy are investigated. It is recommended to use Wave Equation Analysis WEAP to simulate the dynamic loading and to support the preparation of the testing and improve the layout of the test equipment especially the with respect to the stiffness of the necessary pile cushion.

1. Einleitung
2. Praktische Erfahrungen mit der Prüfung von Großbohrpfählen
3. Parameteruntersuchung mit dem Wellengleichungsprogramm
4. Schlußfolgerung

## 1. Einleitung

Seit Beginn der Anwendung der dynamischen Prüfung von Großbohrpfählen 1981 wurde bei jedem Einsatz die Frage nach den Möglichkeiten, durch den Stoßversuch die Grenzlast der Pfähle zu bestimmen, gestellt. Abgesehen davon, daß nicht immer auf die eindeutige Definition der einschlägigen Vorschriften (DIN 1054, 4014 oder auch Eurocode 7) Bezug genommen wurde, war in diesen Diskussionen auch häufig kein Bezug zu den Ergebnissen der statischen Probelastungen und ihr Verhältnis zu Grenzlasten genommen worden.

Mit einer durchschnittlichen Mantelreibung von z.B. 100 kPa, bei einer Einbindung von 10 m und einem Spitzendruck von 2 MPa ergibt sich für einen Pfahl  $\varnothing$  120 cm eine Tragfähigkeit von 6 MN. Eine Prüfung sollte bei zweifacher Sicherheit also mindestens 12 MN nachweisen können.

Für die Durchführung einer statischen Probelastung wird nun eine Pressenleistung von 12 MN installiert. Werden bei einer Laststufe unterhalb 12 MN die durch den Aufbau vorgegebenen möglichen Setzungen überschritten, so gilt die Grenzlast als erreicht. Ist bei voller Pressenkraft die Setzung begrenzt, ist eine mindestens zweifache Sicherheit nachgewiesen. Die tatsächliche Grenzlast des Pfahls bleibt unbestimmt.

Bei der Durchführung einer dynamischen Probelastung muß der Aufbau so gewählt werden, daß ebenfalls 12 MN nachweisbar sind. Da der tatsächlich aktivierte Bodenwiderstand sich erst aus der CAPWAP-Analyse ergibt, muß das Belastungssystem auf jeden Fall ausreichend gewählt werden, um auch bei hohen dynamischen Widerständen noch die verlangte statische Prüflast zu erreichen.

Aus den Erfahrungen von Rammspfählen war bekannt, daß es bei Stoßprüfungen einen Zusammenhang zwischen der eingeleiteten Energie und der nachweisbaren Tragfähigkeit von Pfählen gibt. Dieser Zusammenhang wurde auch in der ersten Veröffentlichung über die Erfahrungen bei der Prüfung von Großbohrpfählen (SEITZ/KLINGMÜLLER, 1984) herausgearbeitet. Allerdings zeigte die Erfahrung von noch wenigen Pfählen noch nicht die bestimmenden Parameter und die Probleme auf, die bei der Planung dynamischer Prüfungen von Großbohrpfählen berücksichtigt werden müssen.

Die 18jährigen Erfahrung bei der Prüfung von über 88 Großbohrpfählen mit Durchmessern von 900 mm bis 2000 mm wird im folgenden ausgewertet, um auf Probleme der Prüfung von Großbohrpfählen hinzuweisen und mögliche Zusammenhänge zwischen der Auslegung der Belastungseinrichtung und der nachweisbaren statischen Tragfähigkeit aufzuzeigen.

## 2. Erfahrungen mit der Prüfung von Großbohrpfählen

Aus der Faustformel, daß die Fallmasse 1/10 der Pfahlmasse betragen soll, wurde im Forschungsprojekt „Modifiz-/Optimierung der dynamischen Probelastung für die Prüfung von Großbohrpfählen“ zuerst eine Belastungseinrichtung mit einer Fallmasse von 5 t gebaut. Diese Fallmasse wäre somit ausreichend für die Prüfung von bis zu 45 m langen Pfählen mit Durchmesser 1200 mm oder 16 m langen Pfählen mit Durchmesser 2000 mm.

Beim Einsatz bei Pfählen mit Durchmesser 2000 mm und 14 m Länge zeigte sich aber, daß auch eine Fallhöhe von 4 m und somit eine Fallenergie von 200 kNm nicht ausreichte, um den Pfahl zu bewegen und den planmäßigen Spitzendruck zu aktivieren.

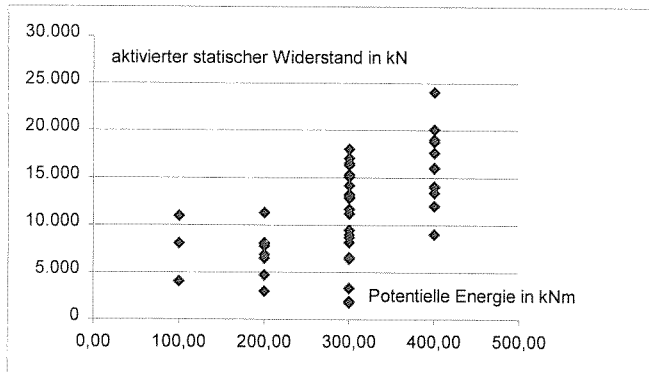


Bild 1 : Aktivierter Widerstand (Prüflast) und potentielle Energie

Aufgrund dieser Erfahrungen wurde eine größere Belastungseinrichtung mit einer Fallmasse von 10 t gebaut. Die Belastungseinrichtung läßt Fallhöhen bis über 3 m zu.

Für die Prüfung von Großbohrpfählen  $\varnothing 1600$  mm mit bis zu 60 m Länge wurde eine freireitende Belastungseinrichtung mit einer Fallmasse von 20 t gebaut.

In der Regel werden bei dynamischen Probelastungen mehrere Stoßversuche mit steigender Fallhöhe durchgeführt, wobei meist nur die mit der größten Fallhöhe ausgewertet werden.

In Bild 1 sind die Ergebnisse von 56 Prüfungen an Pfählen  $\varnothing 900$  mm bis 1600 mm zusammengestellt. Die Probelastungen mit der 10 t Fallmasse wurden meist für die Fallhöhe 3 m (potentielle Energie 300 kNm) ausgewertet, einige für die Fallhöhe 2 m und wenige für die Fallhöhe 1 m. Zusätzlich wurden in Bild 1 Ergebnisse aus den Probelastungen mit der 20 t Fallmasse bei 2 m Fallhöhe (potentielle Energie 400 kNm) eingetragen.

Obwohl die aktivierten Bodenwiderstände bzw. Prüflasten sehr stark variieren, zeigt sich doch, daß bei höheren potentiellen Energien auch höhere Bodenwiderstände aktiviert werden können.

Die tatsächlich aktivierbare Prüflast hängt von verschiedenen Faktoren ab :

- Eingeleitete effektive Energie,
- Dämpfung,
- Mantelreibung,
- tatsächliche Grenzlast.

### **Eingeleitete oder effektive Energie**

Obwohl der freie Fall der Masse nicht behindert war, zeigt Bild 2 daß die effektive Energie einen Streubereich von 45% bis 75% der verfügbaren potentiellen Energie aufweist. Bild 2 zeigt aber auch, daß die effektive Energie meist zwischen 50 und 60% der potentiellen Energie liegt. Die effektive Energie ist abhängig von den Eigenschaften des Rammfutters sowie auch von den elastischen Eigenschaften und dem Verhalten des Pfahles.

Bei den Probelastungen mit der 10 t Fallmasse wurde zur Reduzierung der Spannungen im Pfahl ein mehrschichtiges Rammfutter mit Wechsellagen aus Sperrholz und Filz verwendet. Da mit der Abnutzung dieses Rammfutters gerechnet werden muß, wird es für jeden Pfahl neu zusammengestellt. Trotzdem muß eine ungleichmäßige Abnutzung angenommen werden, so daß die Streuung in der effektiven Energie teilweise auf die Eigenschaften des Rammfutters zurückzuführen ist.

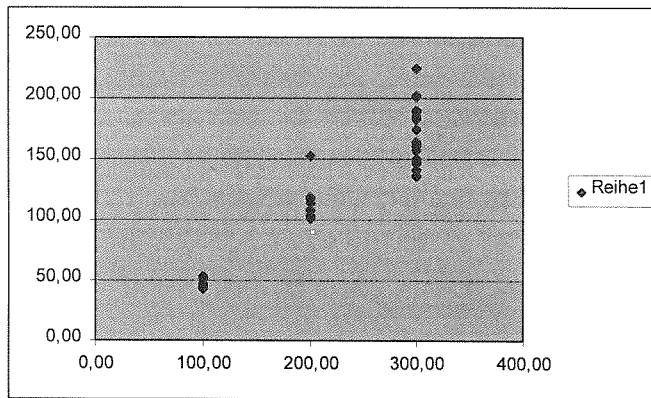


Bild 2 : Potentielle Energie und effektive Energie

Einen größeren Einfluß auf die Übertragung der potentiellen Energie in den Pfahl hat das Verhalten des Pfahls selbst, die Pfahl- und die Bodensteifigkeit.

### Dämpfung

Die Auswertung mit dem CAPWAP-Verfahren zeigte, daß bei Großbohrpfählen meist von einem sehr viel höheren dynamischen Widerstand (Dämpfung) ausgegangen werden muß, als bei Rammpfählen. Zusätzlich zur Bodendämpfung ergibt sich eine hohe Abstrahlungsdämpfung, d.h. die in den Pfahl eingeleitete Energie führt zu Bewegungen des benachbarten Bodens.

### **Mantelreibung**

Für den Sicherheitsnachweis wird die Mantelreibung seitens der Baugrund-sachverständigen und der Statiker häufig nach unten abgeschätzt, in vielen Fällen gar nicht angesetzt. Der Sicherheitsnachweis stützt sich dann im wesentlichen auf den Spitzendruck. Im Versuch kann ein nennenswerter Spitzendruck nur aktiviert werden, wenn die Mantelreibung vollständig überwunden ist. Die tatsächliche Mantelreibung liegt deswegen meist sehr viel höher, damit auch die Dämpfung am Mantel und die erreichten Setzungen am Pfahlfuß sind gering, so daß nur wenig Spitzendruck aktiviert werden kann.

### **Tatsächliche Grenzlast**

Wenn der aktivierte statische Widerstand auch bei einer potentiellen Energie von 300 kNm unter 10 MN liegt, kann angenommen werden, daß der tatsächliche statische Widerstand ebenfalls nicht größer ist.

Da vor einer Belastung die Größe der einzelnen Einflüsse auf die Grenzlast und insbesondere der Dämpfungsanteil nicht bekannt ist, ist es vorteilhaft, soviel potentielle Energie wie möglich zur Verfügung zu haben. Bei gegebener Fallmasse sollte also eine möglichst große freie Fallhöhe zur Verfügung stehen.

## **3. Parameteruntersuchung mit dem Wellengleichungsprogramm**

Zur Arbeitsvorbereitung und Überprüfung, ob bei einer dynamischen Probelastung eine vorgesehene statische Prüflast auch erreicht werden kann, können Berechnungen mit dem Wellengleichungsprogramm WEAP<sup>®</sup> mit angenommenen Werten für die Dämpfung durchgeführt werden. Eine solche Berechnung ermöglicht auch die Untersuchung verschiedener möglicher Rammfuttervarianten.

Als Beispiel wird ein Bohrpfahl  $\varnothing$  1200 mm mit 10 m Länge gewählt. Die Mantelreibung ist für die unteren 8 m als konstant angenommen. Mantelreibung und Spitzendruck sind zu jeweils der Hälfte an der Gesamttragfähigkeit beteiligt. Für die elastische Grenzverschiebung am Mantel wird  $q_s = 1$  mm angenommen, für die elastische

Grenzverschiebung an der Spitze  $q_t = 5 \text{ mm}$ . Die Dämpfung wurde für Mantel und Spitze zu  $J_s = J_t = 0,5$  angenommen.

Als Rammfutter wird ein Paket aus 150 mm Holzmaterial mit E-Modul 1.000 MPa gewählt.

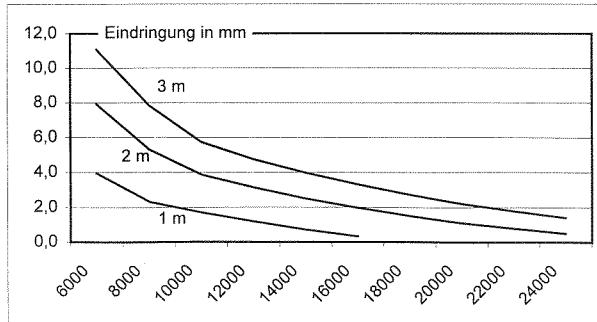


Bild 3 : Bleibende Eindringung und statischer Bodenwiderstand [kN]

Bild 3 zeigt, daß es bei den gewählten Parametern auch bei einer Fallhöhe von 1 m noch möglich ist, einen Bodenwiderstand von 16 MN zu aktivieren.

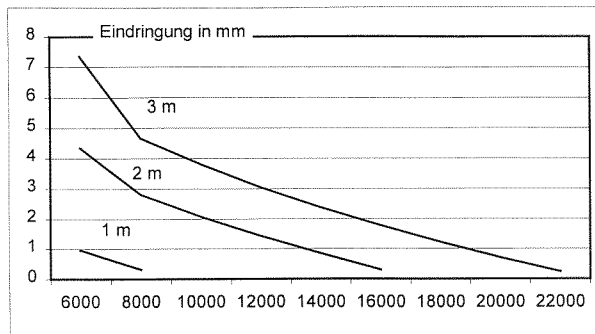


Bild 4 : Bleibende Eindringung und Bodenwiderstand

Bei einem 20 m langen Pfahl mit höheren elastischen Grenzdehnungen  $q_s = 2 \text{ mm}$  und  $q_t = 10 \text{ mm}$  ist es mit Fallhöhe 1 m nur möglich, einen statischen Bodenwiderstand von 8 MN zu aktivieren, bei 2 m Fallhöhe immerhin noch 16 MN.

In Bild 5 sind die für das Beispiel zu erwartenden Spannungen angegeben. Es ergeben sich nicht nur verhältnismäßig hohe Druckspannungen bis an 30 Mpa, sondern

auch Zugspannungen, die zumindest bei den geringen Bodenwiderständen als kritisch angesehen werden können, wenn die Prüfungen an Bauwerkspfählen vorgenommen werden.

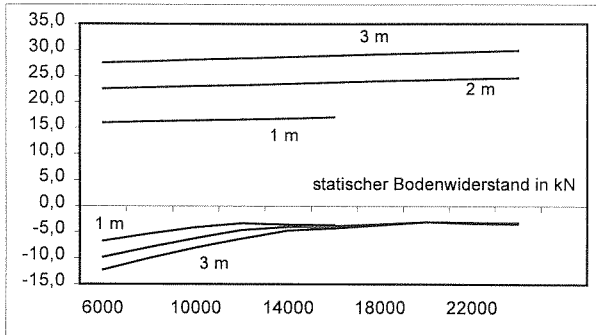


Bild 5 : Spannungen bei dynamischen Probebelastungen

Eine Reduzierung der Spannungen durch die Einführung von Filzlagen in das Rammfutter, so daß der gemeinsame E-Modul des Rammfutterpaketes 100 Mpa beträgt, führt dann wiederum zu einem geringeren Energieeintrag und nur mit 3 m Fallhöhe ist noch ein statischer Bodenwiderstand von 16 MN zu aktivieren.

#### 4. Schlußfolgerung

Mit einer Belastungseinrichtung, die größere Fallhöhen nicht zuläßt, kann also lediglich eine auf der sicheren Seite liegende untere Schranke der Grenzlast bestimmt werden.

Die Simulationsberechnung bestätigt damit die Erfahrungen, daß es nämlich bei der dynamischen Probebelastung erforderlich ist, nicht nur eine ausreichend große Fallmasse in der Größenordnung von 1% der nachzuweisenden Prüflast zur Verfügung zu haben, sondern daß zur Anpassung an besondere Bodenverhältnisse mit hoher Dämpfung und größeren Setzungen auch eine ausreichende Fallhöhe möglich sein muß.



Durch die Simulationsberechnung kann vor allem auch der Aufbau der Belastungseinrichtung bestimmt werden, so daß die Spannungen unter der Stoßbelastung innerhalb der zulässigen Grenzen bleiben.

### **Literaturhinweis**

SEITZ, J.M., KLINGMÜLLER, O. : Dynamische Tragfähigkeitsprüfungen bei Bohrpfählen, Baugrundtagung 1984