

DYNAMISCHE PFAHLPRÜFUNGEN IM DRITTEN JAHRTAUSEND

Frank Rausche und Carl-John Grävare

1 EINLEITUNG

Auf tausenden von Baustellen und an zehntausenden von Pfählen werden jährlich in der ganzen Welt dynamische Integritäts- und Tragfähigkeitsprüfungen durchgeführt. Diese sehr wirtschaftlichen Qualitätstests und Probelastungen unterscheiden sich von anderen Arten der Materialprüfung darin, dass sie erstens auf der Baustelle und zweitens oft während des Rammens oder kurz nach dem Einbringen des Pfahles durchgeführt werden müssen. Diese Prüfungen erfordern auch, dass ein erfahrener Ingenieur mit guter Ausbildung schnell und zuverlässig die Messungen auswertet. Eine klarer, schnell vorgelegter Bericht dieses Ingenieurs ist nicht nur für die Qualitätssicherung der Pfähle, sondern auch für den reibungslosen Ablauf der Baustelle äusserst wichtig. Verzögerungen bei Messung oder Berichterstattung können leicht zu Arbeitsunterbrechungen auf der Baustelle bzw. zu zusätzlichen Kosten führen.

Wegen des Zeitdruckes unter dem die Baustelle und damit auch der Messingenieur steht, kommt es manchmal bei dynamischen Pfahlprüfungen zu unnötigen Kosten durch Reise- und Wartezeiten. Z. B. kann es sein, dass der relativ teure Messingenieur auf der Baustelle warten muss bis die Prüfpfähle zugänglich werden, oder die Baustelle muss warten bis der Ingenieur zum Büro zurückgekehrt ist und seinen Prüfbericht fertiggestellt hat.

Um die Wirtschaftlichkeit der dynamischen Pfahlprüfungen weiter zu verbessern und ihre Auswertung beschleunigen, wurde jetzt ein Gerät entwickelt, das eine direkte Verbindung zwischen einem auswertenden Ingenieur im Büro - irgendwo auf der Welt - und der Baustelle schafft. Die notwendigen Sensoren werden vom Baustellenpersonal am Pfahl angebracht. Diese Geber wurden so konzipiert, dass Verwechslungen beim Anbringen am Pfahl unmöglich werden. Der Ingenieur kann also die Datenaufnahme mit minimaler Verzögerung am PC Bildschirm im Büro verfolgen und sofort mit direkten Eingaben Einfluss auf den Test nehmen

oder Entscheidungen über den Fortgang der Messungen treffen.

2 BESCHREIBUNG DER DYNAMISCHEN PFAHLPRÜFUNGEN

Die Deutsche Gesellschaft für Geotechnik hat "Empfehlungen für statische und dynamische Pfahlprüfungen" im September 1997 herausgegeben¹. Diese Empfehlungen beschreiben theoretischen Grundlagen, wesentliche Anforderungen an Testgeräte und Auswertungsmethoden für dynamischen Pfahlprüfungen.

Für den Ramppfahl sind die dynamischen Pfahlprüfungen wahrscheinlich ebenso alt wie das Pfahlrammen selbst. Während des Einbringens des Pfahles können Messungen gemacht werden, die nicht nur Aufschluss über die Qualität des Pfahlguts, sondern auch über die Tragfähigkeit des fertiggestellten Pfahles geben. Die einfachsten, traditionellen Messungen, nämlich Eindringung des Pfahles und Fallhöhe des Bäres, werden heute durch elektronische Messungen ersetzt. Dadurch können während des Rammens für jeden Hammerschlag die Tragfähigkeit und Integrität des Pfahles, die Verteilung der Bodenwiderstände, die Spannungen im Rammgut und die in den Pfahl übertragene Energie berechnet werden. Besonders wegen der immer höheren Ausnutzung des Pfahlmaterials und der damit verbundenen härteren Rammungen, werden diese Messungen sehr geschätzt.

Die elektronischen Messungen am Ramppfahl werden sowohl rambbegleitend als auch nach dem Rammen durchgeführt. Während der Rammung wird hauptsächlich festgestellt, dass der Pfahl nicht überbeansprucht wird und dass der Hammer den technischen Anforderungen genügt. Nachrammungstests dienen dagegen in erster Linie der Bestimmung der Pfahltragfähigkeit. Diese dynamischen Probelastungen werden auch häufig an Bohrpfählen durchgeführt und können wesentlich teurere statische Probelastungen ersetzen, unter Umständen nach einer Eichung für eine bestimmte Bodenart, für die noch keine dynamischen Erfahrungen vorliegen. Häufig dient die dynamische Probelastung auch als eine schnelle und wirtschaftliche

¹Die Empfehlungen können über das Institut für Grundbau und Bodenmechanik an der Technischen Universität Braunschweig, Gausstrasse 2, D-38106 Braunschweig bezogen werden.

Qualitätsprüfung, die sowohl die Integrität als auch eine Mindesttragfähigkeit des Pfahls überprüft. (Die Grenztragfähigkeit zu bestimmen erfordert manchmal grössere und damit teurere, dynamische Belastungseinrichtungen als eine Gebrauchslast multipliziert mit einem mindest erforderlichen Sicherheitsfaktor.)

Rammbegleitende Tests und dynamische Pfahlprüfungen werden auch "High Strain Tests" genannt, weil die dynamische Belastung relativ hohe Dehnungen im Pfahlmaterial verursachen. Sogenannte "Low Strain Tests" werden dagegen mit einem kleinen Hammer zur Bestimmung der Pfahlintegrität durchgeführt. Hierbei wird meistens nur die Bewegung des Pfahlkopfs mittels eines Beschleunigungsgebers gemessen. Die Pfahlkopfgeschwindigkeit wird dann über die Zeit ausgedrückt und vom erfahrenen Messingenieur interpretiert. Klare Pfahlfussreflexionen genügen im allgemeinen als ausreichender Qualitätsnachweis für den Pfahl. Wenn es keine klare Reflektion vom Pfahlfuss gibt oder wenn eine zusätzliche Reflektion die Qualität des Pfahls in Frage stellt, dann muss die Baustelle schnellstmöglich über diese Sachlage unterrichtet werden.



Abb 1: Einfache dynamische Pfahlprüfung an einem Bohrpfahl

3 GERÄTE

Bei High Strain Tests bedient man sich entweder eines Fallgewichtes (Abb. 1) oder Rammhammers zur dynamischen Belastung. Beim Low Strain Integritätstest genügt ein kleiner Handhammer zur Erzeugung einer Stosswelle im Pfahl. Beim High Strain Verfahren misst man dann die Kräfte und Geschwindigkeiten am Pfahlkopf mit Hilfe von Dehnungs- und Beschleunigungsgebern, die am Pfahl angeschraubt werden (Abb 2) Ein Pile Driving Analyzer® (PDA), (Model

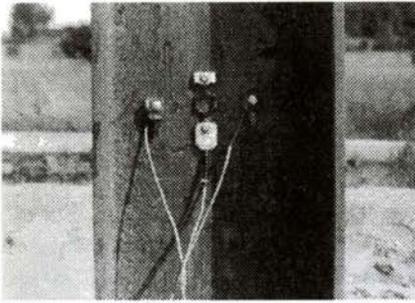


Abb. 2: Beschleunigungs- und Dehnungsgeber and einem Stahlpfahl



Abb 3: Pile Driving Analyzer, Model PAL

PAL in Abb 3), sorgt für die Aufbereitung der Signale, wandelt sie ins Digitale um, speichert sie, stellt sie auf dem Bildschirm dar und führt die notwendigen Rechnungen durch. So werden für jeden Hammerschlag Bodenwiderstände, Spannungshöchstwerte im Pfahl, maximale Eindringungen, Energien im Pfahl und viele andere Werte



Abb 4 Pfahlintegritätsmessung

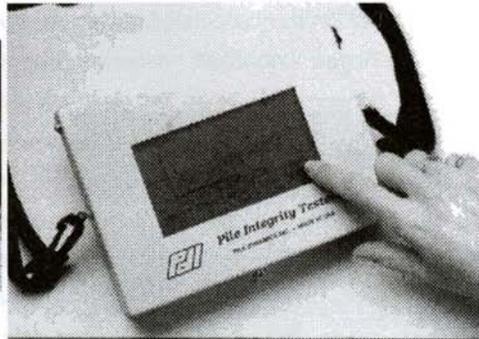


Abb 5 PIT-Gerät

berechnet, angezeigt oder ausgedruckt, bevor der nächste Schlag erfolgt.

Beim Low Strain Test werden Pfahlkopfbewegungen, die durch leichtes Abklopfen des Pfahlkopfs (Abb 4) verursacht wurden, mit Hilfe eines Beschleunigungsgebers gemessen und z. B. in einem sogenannten Pile Integrity Tester™ (PIT, Abb 5) dargestellt und gespeichert.

4 DURCHFÜHRUNG DER DYNAMISCHEN TESTS

4.1 High-Strain - Rammbegleitend

Es gibt zwei Möglichkeiten:

- (A) Auf Baustellen oder in Böden, wo noch keine vergleichbaren Gründungen durchgeführt wurden, werden oft Probepfähle, manchmal verschiedener Art, gerammt. Um diese Vorprüfung durchzuführen, ruft der Unternehmer den Messingenieur zur Baustelle, sowie das Rammgerät zur Verfügung steht. Rammbegleitende Messungen werden dann sofort ausgewertet, um damit die kostengünstigste Gründungsart zu finden. Diese Prüfungen nehmen oft einige Tage in Anspruch hauptsächlich dann, wenn das Umsetzen des Rammgeräts schwierig ist. Der Messingenieur bringt einen grossen Teil seiner Zeit damit zu, darauf zu warten, dass er seine Dehnungs- und Beschleunigungsgeber am Pfahl anbringen kann. Er montiert die Geber dann am Pfahlkopf, verbindet sie über ein Kabel mit dem PDA und nimmt die Daten im PDA während der Rammung auf. Während des Rammens ist es dann wichtig, dass die Messungen für jeden Schlag sofort ausgewertet werden. Z. B. kann man dann bei Betonpfählen vermeiden, dass es zu Zugrissen oder zu hohen Druckbeanspruchungen kommt. Sollte es trotzdem zu Schäden am Pfahl kommen, so kann das dann meistens noch festgestellt werden bevor der Schaden den Pfahl untauglich macht. Nachdem der Messingenieur zum Büro zurückgekommen ist, wertet er die Messungen aus und schreibt seinen Bericht, der Empfehlungen über die wirtschaftlichste Pfahlart, Pfahllänge, optimalen Rammvorgang und notwendiges Rammkriterium (z.B. weniger als x mm Eindringung für 10 Schläge am Ende des Rammens).
- (B) Während des Ausrammens der Pfahlgründung werden die Messungen als Qualitätsnachweis sowohl des eingebrachten Rammguts als auch des Rammvorganges selbst, stichprobenartig durchgeführt. Nachdem eine bestimmte Anzahl von Pfählen gerammt wurde oder nachdem eine bestimmte Zeit vergangen ist, bestellt der Rammunternehmer den Messingenieur, der dann innerhalb kurzer Zeit zur Baustelle fliegen oder fahren muss, damit der Baustellenablauf ohne Unterbrechung weitergehen kann. Während des

Baustellenbesuchs werden dann an einem oder mehreren Pfählen die Dehnungs- und Beschleunigungsgeber angebracht. Während der Pfahl gerammt wird, werden die Messungen wieder mit dem PDA vorgenommen. Sollte es dabei notwendig werden den Rammvorgang oder das Pfahlkriterium zu ändern, dann muss das dem Unternehmer sofort mitgeteilt werden. Der Messingenieur kehrt dann zu seinem Büro zurück und schreibt für seinen Auftraggeber einen Messbericht.

4.2 Dynamische Probelastung

Ein Pfahl oder mehrere Pfähle werden für die dynamische Probelastung ausgesucht. Oft werden solche Pfähle ausgewählt, bei denen Unregelmässigkeiten während des Einbaus auftraten. Für Bohrpfähle wird ein einfaches Fallgewicht mit Führungsgerüst zur Baustelle gebracht. Nachdem der Unternehmer das dynamische Belastungsgerät aufgebaut hat, kommt der Messingenieur zur Baustelle. Es darf dabei keine Verzögerung geben, damit nicht weitere Kosten oder verlängerte Bauzeiten entstehen. Auf jeden Prüfpfahl werden dann 5 oder 10 Schläge aufgebracht. Die Daten werden wieder im PDA sofort ausgewertet, damit es nicht zu Überbeanspruchungen des Pfahlmaterials kommt und damit auch festgestellt wird, ob die erforderliche Tragfähigkeit erreicht wurde. Durch Variation von Futterdicke, Hammerfallhöhe und möglicherweise auch Hammergewicht können dann verbesserte Testergebnisse erzielt werden. Die gespeicherten Daten werden meistens zu Hause entgültig ausgewertet. Hierbei ist die Berechnung nach CAPWAP® besonders wichtig, weil dieses Programm, unabhängig von Annahmen über das dynamische Bodenverhalten Aufschluss über das statische und dynamische Bodenverhalten liefert.

4 3 Low Strain Integritätsmessung

Low Strain Messungen, z.B. mit dem PIT System, werden entweder als geplante Massnahme der Qualitätsüberwachung auf der Baustelle vorgenommen oder ausnahmsweise, wenn auf der Baustelle plötzlich Fragen über die Pfahlqualität auftauchen. Im ersten Fall werden dann in regelmässigen Zeitabständen Pfähle geprüft, im letzteren Fall wird ein Messingenieur ohne Vorwarnung auf die Baustelle gerufen. In beiden Fällen können daher Zeitverluste entweder für den Messingenieur oder die Baustelle auftreten.

5 NEUENTWICKLUNGEN

Es gibt zwei, voneinander unabhängige, technische Entwicklungen, die dabei helfen können die Wirtschaftlichkeit der dynamischen Pfahlprüfungen zu verbessern

- Mit den oben erwähnten Geräten, werden Messungen zur Zeit sofort vom Analogen ins Digitale verwandelt, digital dargestellt, gespeichert und ausgewertet.
- Auf der ganzen Welt gibt es drahtlose Telefone. Bald kann man mit dem gleichen Telefon über eine Satellitenverbindung von jedem Punkt auf der Erde mit seinem Büro in Verbindung stehen.

Es bietet sich also an, dass man den PDA oder das PIT Gerät mit einem Telefon verbindet. Mit besonderen Geben und Anweisungen kann das Anbringen der Geber leicht vom Baustellenpersonal durchgeführt werden. Auch das Abklopfen mit dem Hammerchen bei der Low-Strain Methode muss nicht unbedingt durch einen hochqualifizierten Messingenieur vorgenommen werden. Der Messingenieur muss dann also nicht unbedingt in der letzten Minute auf die Baustelle fahren, sondern verbindet lediglich sein Telefon mit der Baustelle, wenn geprüft werden muss. Der Messingenieur oder Gutachter kann im Büro die Messkurven, sowie sie durch die Schläge verursacht wurden, auf seinem Bildschirm verfolgen und verschiedene Berechnungs- und Darstellungsarten zur Dateninterpretation wählen. Er kann also sofort Anweisungen für Verbesserungen im Testvorgang geben, damit fehlerlos gerammt, geklopft und gemessen werden kann.

Für den neuen Prüfvorgang müssen die folgenden Geräte zur Verfügung stehen:

- Auf der Baustelle ein PDA ("Remote PAL") oder ein PIT-Gerät ("Remote PIT") mit den notwendigen Gebern und Telefonverbindung zum Büro. Diese Geräte müssen alle Signale vollständig und unverändert und ohne Verzögerung in digitaler Form in das Büro übertragen. Z. B. ist es notwendig, dass für die High-Strain Prüfung die Dehnungs- und Beschleunigungsmessungen von beiden Pfahlseiten übertragen werden, sodass der Messingenieur im Büro sowohl die Signalqualität beurteilen als auch die Biegespannungen abschätzen kann.
- Im Büro des Messingenieurs ein am Telefon angeschlossener PC mit vollständiger PDA Datenverarbeitung, von dem Befehle an den Baustellen-PDA gesendet werden können und der die Daten vom PDA sofort erhält und auswertet.
- Auf der Baustelle, zwei Telefone: das erste zur Datenübertragung, das zweite zur Kommunikation zwischen Messingenieur und Baustellenpersonal. Die zwei Telefone können die Übertragung auch über das Internet vornehmen. Zur einfacheren Kommunikation wird das zweite Telefon in der Zukunft durch Video ersetzt werden.
- "Intelligente Geber", deren Eichwerte zusammen mit den dynamischen Daten elektronisch an den PDA übertragen werden. (Abb. 2 zeigt einen Stahlpfahl mit angeschraubten Gebern.) Es kommt dann nicht zu Fehlern durch falsche Kabelverbindungen, unbekannte oder falsche Gebereichwerte.
- Zur Erweiterung des Messverfahrens ein lokales (LPS) oder ein globales (GPS) Vermessungssystem, damit auch die Pfahlkopfkoordinaten sofort genau festgestellt und automatisch im Ramm- oder Prüfbericht aufgenommen werden können.
- Eine genau formulierte Betriebsanleitung für den Remote-PAL oder den Remote-PIT, damit das Baustellenpersonal alle notwendigen Schritte wie sie für den jeweiligen Pfahltyp vorgenommen werden müssen (Bohren der Ankerlöcher, Anbringen der Geber, Aufhängen der Kabel, etc.) fehlerlos durchführen kann.

Der Remote PAL und des PDA Empfangsgerätes im Büro müssen die folgenden Funktionen für jeden Testschlag erfüllen:

Remote-PAL:

- Aufbereitung von 2 Dehnungs- und 2 Beschleunigungsmessungen
- Digitalisierung von 4 Messkurven
- Speicherung von 4 Messkurven
- Senden von 4 Messkurven
- Empfang von Befehlen vom PDA
- Annahmen von Baustellendaten
 - Pfahlnummer
 - Pfahllaenge
 - Pfahltyp/Querschnittsfläche
 - Pfahlkoordinaten
 - Pfahlneigung

Büro-PDA:

- Empfang der 4 Messkurven
- Empfang zusätzlicher Baustellendaten
- Übertragung von Befehlen zum Remote-PAL
- Darstellung der Messkurven
- Berechnung von Ergebnissen
- Speicherung der Daten
- Ausdrucken von Kurven und Ergebnissen

6 VOR- UND NACHTEILE DER NEUEN TESTMETHODE

Natürlich hat die neue dynamische Pfahlprüfmethode, bei der der Messingenieur vom Büro aus die Pfahlprüfung vornehmen kann, deutliche wirtschaftliche Vorteile gegenüber dem gegenwärtigen Vorgehen. Der Messingenieur muss nicht mehr zur Baustelle reisen, wodurch es weniger Verzögerungen im Baustellenablauf geben wird. Die Messpersonalkosten können also gesenkt werden, da in den meisten Ländern der

Messingenieur pro Tag auf der Baustelle, also nicht pro Messtunde oder pro Pfahl bezahlt wird. Dabei sind aber die Zeitersparnisse wahrscheinlich wichtiger für die Baustelle als die Einsparungen bei Reisegeld und Ingenieurshonorar. Die CAPWAP Berechnung oder das Ausdrucken der Messkurven kann sofort geschehen. Sollte es sich dabei ergeben, dass eine Messung wiederholt werden muss, z. B. weil bei der Auswertung der Integritätsmessung eine schlechte Betonqualität im Pfahlkopfbereich festgestellt wurde. Das Abspitzen des schlechten Materials und die Wiederholung der Messung kann also beinahe sofort geschehen. Für den Unternehmer ist es auch manchmal wichtig einige wenige Pfähle sofort zu prüfen, anstatt zu warten bis es sich "lohnt", den Messingenieur zur Baustelle zu rufen.

Im Fall von Rammpfählen braucht man manchmal nur unter bestimmten Umständen zu prüfen, z. B. wenn der Pfahl unerwartet nicht bis zur vorgesehenen Tiefe eindringt. Auf solchen Baustellen, z. B. Offshore, können Geber und Remote-PAL zur Verfügung stehen. Wenn sie sich als notwendig ergeben, können die Messungen dann zu beliebiger Zeit durchgeführt werden. Der Messingenieur kann über den Stand der Pfahlinstallation informiert werden und die Messungen können genau dann - und müssen nur dann - vorgenommen werden, wenn sie tatsächlich notwendig sind.

Natürlich gibt es auch Nachteile, die besonders dadurch auftreten, dass der Messingenieur seine direkte Beziehung zur Baustelle verliert. Besonders bei Vorversuchen müssen nicht nur Messungen durchgeführt werden, sondern auch wesentliche Beobachtungen über Rammvorgang und Rammgeräteverhalten vom Messingenieur gemacht werden. Diese Beobachtungen können später in Empfehlungen für einen erfolgreichen Pfahleinbau übersetzt werden. Es wird in solchen Fällen auch in der Zukunft noch wichtig sein, dass der Messingenieur persönlich auf der Baustelle anwesend ist.

Bei dynamischen Probelastungen von Bohrpfählen oder Rammpfählen mit grösseren Durchmessern ist die Instrumentierung der Pfähle oft komplizierter als bei kleineren Pfahldurchmessern oder bei Rammpfählen. Für grosse Bohrpfähle müssen auch vier (nicht nur zwei) Dehnungsgeber am Pfahl angeschraubt werden. Für

Probebelastungen von Bohrpfählen ist meistens der Versuchsablauf nicht so zeitkritisch wie bei der Qualitätsüberwachung und es ist dann oft vorteilhaft, dass der Messingenieur die Pfahlprüfung persönlich durchführt.

7 VORRAUSSETZUNGEN FÜR ERFOLGREICHE TESTS

Personal und Geräte müssen gewisse Bedingungen erfüllen damit die neue Arbeitsweise zu den erhofften Vorteilen führt.

Ein Messingenieur muss dann im Büro (oder zu Hause) bereitsein die Daten auszuwerten, wenn es die Baustelle verlangt. Das kann zu den unmöglichsten Zeiten vorkommen, und möglicherweise verlangt eine zweite Baustelle seine Dienste zur selben Zeit. Der Messingenieur muss dann die wichtigsten Prüfziele in seiner Ferndiagnostik ansprechen und sofort die Baustelle über die Ergebnisse unterrichten. Das bedeutet, dass der Messingenieur Erfahrung mit dem Baustellenablauf hat. Diese Erfahrungen können i. A. nicht über Telephon oder durch den Computer gesammelt werden; das heisst also dass der Messingenieur immer noch auf der Baustelle lernen muss.

Die Baustellengeräte müssen die herben Arbeitsmethoden der Baustelle aushalten. Natürlich ist es besonders wichtig einen guten Telefonanschluss zu haben. Eine Variante ist die Übertragung der Daten über eine kurze Distanz auf Radiofrequenzen zu einem verdrahteten Telefon und von dort, über herkömmliche Telefonleitungen zum Messingenieur.

8 WEITERE ENTWICKLUNGEN IM DRITTEN JAHRTAUSEND

Die hier beschriebenen Entwicklungen werden in ähnlicher Weise bereits in der Medizin und auf anderen wissenschaftlichen Gebieten angewendet. Es ist also zu erwarten, dass sich auch im Bauingenieurwesen die Interpretierung entfernt aufgenommener Daten durchsetzen wird. So arbeiten wir z. B. an Geräten und Programmen, die die Daten von vertikalen und horizontalen statischen

Probelastungen, Bodenaufschlussbohrungen oder -rammungen ins Büro übertragen.

Die Vorteile der automatischen Datenfernaufnahme können bei dem sogenannten PIR (Pile Installation Recorder) sogar noch besser zum Zuge kommen. Eine von mehreren Varianten dieses Geräts nimmt bei Rammpfählen die Schlagzahl, Pfahleindringung, Bärfallhöhe und Pfahlrückfederung auf und speichert diese Daten auf einer Flash-Memory Karte, die dann im Büro als Rammprotokoll ausgedruckt werden kann. Natürlich können diese Daten jetzt auch sehr leicht telefonisch ins Büro übertragen werden, zur sofortigen, zentralen Beurteilung des Standes der Pfahlproduktion. Ein ähnliches Gerät gibt es auch für Schneckenbohrpfähle, mit dem mindestens Betonverpressdruck und -volumen über die Bohrtiefe gemessen werden.