

# Zusammenfassung und Bewertung des Forschungsvorhabens für die praktische Nutzung

Rita Müller

2. Februar 2007

↓  
KB

Ziel dieses Forschungsvorhabens ist die Bestimmung des Einflusses der freien Gestängelänge auf die Ergebnisse von Rammsondierungen. Untersuchungen in Berliner Baugruben haben gezeigt, dass gerade die Rammung mit großer freier Gestängelänge zu falscher Einschätzung der Lagerungsdichte des untersuchten Bodens führte. Daher wurde dieses Forschungsvorhaben ins Leben gerufen, das großmaßstäbliche Laborversuche beinhaltet, deren Ergebnisse durch eine analytische Lösung nach der eindimensionalen Wellentheorie im Gestänge unterlegt werden. Anhand dieser Lösung werden Korrekturfaktoren für die Gestängelänge für die leichte und schwere Rammsonde hergeleitet.

Das Forschungsvorhaben ist in fünf Schritte untergliedert.

Im ersten Schritt wird eine umfassende Literaturrecherche über die geräte- und bodenseitigen Einflüsse auf die Ergebnisse von Rammsondierungen durchgeführt. Diese beinhaltet auch die Entwicklungsgeschichte der DIN 4094 und das Aufstellen der Korrelationen zwischen Lagerungsdichte und Schlagzahl sowie die Untersuchungen, die für den Korrekturfaktor der freien Gestängelänge beim Standard Penetration Test (SPT) durchgeführt wurden. Die Literaturrecherche zeigt, dass der Einfluss der Gestängelänge bei Rammsondierungen bis jetzt nicht untersucht wurde und auf diesem Gebiet Forschungsbedarf besteht. In den frühen Ausgaben der DIN 4094 wurde zwar auf ein geändertes Schwingverhalten des freien Gestänges hingewiesen, jedoch wurde diese Bemerkung aus der späteren Normung zurückgenommen. Die Untersuchungen zur Gestängelänge in der Literatur beschränken sich auf die Formulierung der Anwendungsgrenzen bei Sonden. Die Anwendungsgrenzen werden über das Verhältnis der schlagenden zur geschlagenden Masse definiert.

Als Baustellenergebnisse von Rammsondierungen, bei denen mit einer freien Gestängelänge sondiert wurde, stehen unter anderem Messergebnisse aus Projekten der "Verkehrsanlagen im zentralen Bereich Berlins" (VZB) zur Verfügung. Hier werden Sondierergebnisse, die teilweise aus den 30er Jahren vom Bau der Großen Halle am Königplatz stammen, mit Ende der Neunziger gewonnenen Sondierergebnissen mit freier Gestängelänge vom Ponton aus verglichen. Die Sondierungen mit freier Gestängelänge weisen eine niedrigere Schlagzahl auf. Bei dem Vergleich dieser Ergebnisse ist zu berücksichtigen, dass sich u.U. wirklich die Lagerungsdichte durch Auflockerungen (Kriegsereignisse, Aushub der Baugrube u.ä.) geändert haben könnte. Auch hat sich der Überlagerungsdruck durch den Baugrubenaushub geändert. Die Ergebnisse einer zweiten Baustelle geben den Sachverhalt besser wieder, dass die (freie) Gestängelänge die Schlagzahlen mindert. Hier wurde mit dem Gestänge experimentiert: Neben dem Standardversuch der DPH wurden Vergleichssondierungen mit freier Gestängelänge durchgeführt und außerdem bei einer weiteren Sondierung das Gewicht des Freien Gestänges durch eine zusätzliche am Amboss angebrachte Masse ersetzt. Mit dem Totgewicht steigen die Schlagzahlen auffallend an, weil die geschlagene Masse zunimmt. Mit freiem Gestänge sind die Schlagzahlen am niedrigsten.

Im zweiten Schritt werden der Versuchsbehälter und die Sonde für die Modellversuche vorbereitet. Es werden Vorversuche durchgeführt, um zu klären, wie eine definierte Lagerungsdichte mit der Rieselvorrückung zu erreichen ist. Wie im Forschungsantrag vereinbart, werden die Versuche in trockenem Sand durchgeführt. Die Sondierergebnisse des trockenen Sandes können auf Ergebnisse unter Grundwasser mit Faktoren aus der DIN 4094 umgerechnet werden. In Vorversuchen zur Überprüfung der Einrieseltechnik wird trockener Sand in das Rieselsieb gefüllt und in Ausstechzylinder, deren Volumen bekannt ist und die sternförmig auf dem Boden aufgestellt sind, eingerieselt. Die Lagerungsdichte kann reproduzierbar hergestellt werden. Eine geringe Rieselhöhe führt dazu, dass auch sehr locker gelagerter Sand eingerieselt werden kann. Da die Lagerungsdichte bei diesem Rieselverfahren über den Radius des Rieselsiebes leicht variiert, werden die Sondierungen im Versuchsbehälter auf einem Radius liegend durchgeführt, um vergleichbare Schlagzahlen zu erhalten. Der Versuchsbehälter besteht aus Schachtringen, die nacheinander eingerieselt werden. Zur Bestimmung der Lagerungsdichte werden Ausstechzylinder über die Höhe des Behälters mit eingerieselt, mit denen nach Versuchsende die erreichte Lagerungsdichte gemessen werden kann. Eine Druckvorrichtung auf dem Versuchsbehälter zur Erhöhung des Überlagerungsdruckes wird nicht konstruiert, da diese den Verlauf der Scherfuge im Boden verändert und die Ergebnisse dann nicht auf Baustellenergebnisse übertragbar sind. Die Sonde wird mit Dehnungsmessstreifen instrumentiert. Mit ihnen wird die lon-

gitudinale Wellenausbreitung im Gestänge gemessen.

Im dritten Schritt werden die Versuche durchgeführt. Dazu wird der Versuchsbehälter, der aus Schachtringen besteht, mit Sand unter einer definierten Lagerungsdichte gefüllt. Es werden mit jeder Behälterfüllung vier Sondierversuche mit der leichten Rammsonde (DPL) unter Variation der Gestängelängen durchgeführt. Von diesen werden die Schlagzahlen und die Kraftverläufe ausgewertet. Das Ergebnis ist, dass die Schlagzahlen mit großer Gestängelänge niedriger sind. Es treten Abweichungen bei einer Gestängelänge von ca. 3 m auf, denn bei einigen Versuchen sind bei dieser Gestängelänge die Schlagzahlen vergleichsweise hoch. Das Aufstellen einer Korrelation zwischen Schlagzahl und Lagerungsdichte für jede freie Gestängelänge führt zu keinem zufrieden stellenden Ergebnis, da die Korrelationskoeffizienten durch die Streuung der Ergebnisse relativ gering sind. Anhand der Korrelationen können folglich keine Korrekturfaktoren formuliert werden. Daher werden die Ergebnisse der Kraftmessung ausgewertet. Um für den Vergleich mit der analytischen Lösung Kraftverläufe unter einfachen Randbedingungen zu gewinnen, werden die Sondierversuche auf dem Betonfußboden des Labors (festes Auflager) wiederholt.

Im vierten Schritt wird die analytische Lösung zur longitudinalen Wellenausbreitung im Gestänge mit den Messergebnissen der Rammsondierungen in Sand und auf festem Auflager verglichen und der Energieeintrag ausgewertet. Die Kraftverläufe können mit der analytischen Lösung von TIMOSHENKO und GOODIER erklärt werden. Diese Lösung berechnet für einen am unteren Ende fest aufgelagerten Stab den Kraftverlauf am Gestängekopf, der entsteht, wenn der Stab mit dem Impuls einer fallenden Masse beansprucht wird. Da die Masse wegen ihrer Trägheit auf dem Stab liegen bleibt, stellt sie für die am unteren Ende reflektierte Druckwelle ein festes Auflager dar und führt dazu, dass sich die am Gestänge entlang laufenden Druckwellen überlagern. Da bei den hier durchgeführten Versuchen der Dehnungsmessstreifen nicht direkt unter dem Hammer angebracht ist, wird die Lösung von TIMOSHENKO und GOODIER für eine beliebige Position des Kraftaufnehmers umgerechnet. Es ist festzustellen, dass bei kurzem Gestänge die Anzahl der Druckwellendurchläufe im Gestänge steigt und der Impuls, aufgetragen über die mit der Gestängelänge normierte Zeit, später abbricht. Die analytische Lösung wird mit den Messergebnissen verglichen und festgestellt, dass sie alle auftretenden Phänomene gut darstellt. Für Theorie und Messergebnisse wird die Energie bis zum Impulsabbruch berechnet. Wegen der häufigeren Wellenreflektion bei kurzen Gestängen mit festem Auflager sinkt theoretisch der Energieeintrag mit der Gestängelänge, weil keine Dämpfung in der Lösung berücksichtigt ist. Bei den Messergebnissen steigt der Energieeintrag mit der Gestängelänge. Da die theoretischen Werte um ein Zehnfaches höher liegen

als die gemessenen, werden alle vergleichenden Darstellungen auf den jeweiligen Maximalwert normiert.

Überträgt man die analytische Lösung auf die gemessenen Kraftverläufe der Rammsondierungen im Versuchscontainer, ist festzustellen, dass die Wellenüberlagerung vollständig weggedämpft wird. Der Impulsenergie wird bei Erreichen der Sondenspitze hauptsächlich in plastische Arbeit (Eindringung) umgewandelt und bei den Kraftverläufen ist ab diesem Zeitpunkt nur noch der Ausschwingvorgang festzustellen. Außerdem stellt sich bei den Rammsondierungen ein freies Ende an der Sondenspitze ein, der Impuls wird als Zugwelle reflektiert und hebt die einfallende Druckwelle auf.

Aus den gemessenen Kraftverläufen wird die eingetragene Energie berechnet. Das Ergebnis ist, dass für den Energieeintrag die gesamte Gestängelänge verantwortlich ist und nicht die freie Gestängelänge. Die Tiefe der Einbindung des Gestänges in den Boden wirkt lediglich als Dämpfung des Systems. Durch die gemessenen eingetragenen Energien wird eine Mittelwertkurve gelegt.

Der theoretische Energieeintrag für die Rammsondierversuche wird mit der Lösung von YOKEL verglichen. Dieser leitete auf Basis der Lösung von TIMOSHENKO den Energieeintrag für einen Wellendurchlauf am Gestänge her. Dabei wird auch die reflektierte Welle berücksichtigt, bis sie wieder am Hammer angekommen ist. Die so berechnete Energie wird mit der eingeleiteten kinetischen Energie normiert. Da bei den Rammsondierversuchen sich die Auflagerbedingungen geändert haben und die einfallende Welle an der Sondenspitze als Zugwelle reflektiert wird, muss die Lösung von YOKEL dahingehend korrigiert werden, dass nur der Energieeintrag bis zum Erreichen der Sondenspitze durch den Impuls berücksichtigt wird.

Im fünften Schritt werden aufgrund der modifizierten Lösung von YOKEL Korrekturfaktoren für die freie Gestängelänge für die leichte und schwere Rammsonde vorgeschlagen. Dafür wird die modifizierte Lösung nach YOKEL mit der Mittelwertkurve der Messergebnisse verglichen. Die Kurven stimmen gut überein. Aus diesem Zusammenhang können folgende Korrekturfaktoren (s. Tabelle 1) für die leichte und schwere Rammsonde hergeleitet werden. Die Korrekturfaktoren für die DPH können mit den Baustellenergebnissen verifiziert werden, müssen jedoch aufgrund der geringen Messwertanzahl in einer weiterführenden Arbeit mit weiteren Messergebnissen unterlegt werden. Bei den Baustellenergebnissen des VZB-Projektes sind die Gestängelängen der DPH mit und ohne freies Gestänge gleich und können daher nicht ausgewertet werden.

In weiterführenden Forschungsarbeiten sollten die hier gewonnenen Korrekturfaktoren für die schwere Rammsonde durch Messergebnisse unterlegt werden. Außerdem ist die Anomalie der erhöhten Schlagzahlen bei 3 m Gestän-

$L_{ges}$ [m]	2	3	4	5	6	7	8	9	10
YOKEL $\lambda_{DPL}$	0,7	0,8	0,9	0,95	1,0	1,0	1,0	-	-
Messergebnisse DPL	0,45	0,70	0,83	1,0	1,0	-	-	-	-
YOKEL $\lambda_{DPH}$	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,8	0,9	0,9	1,0
Baustellen- ergebnisse DPL	0,57	0,42	0,6	0,7	0,81	1,0	1,15	-	-

Tabelle 1: Korrekturfaktoren  $\lambda_{DPL}$  und  $\lambda_{DPH}$  im Vergleich mit Messergebnissen aus Laborversuchen und von Baustellen

gelänge nicht abschließend untersucht. Ein Erklärung für die hohe Schlagzahl könnte das Zusammenspiel der Gestängelänge und der Länge des eingeleiteten Impulses sein, denn bei den Versuchen auf festem Untergrund tritt bei 3 m eine messbare Überlagerung der Impulsmaxima auf. Wenn an der Sondenspitze ein freies Auflager vorhanden ist, müssten sich die Maxima der einfallenden Druckwelle und reflektierten Zugwelle so überlagern, dass der Energieanteil, der für die Eindringung vorhanden ist, geringer ist als bei den anderen Gestängelängen. Es sollte außerdem überprüft werden, ob solch eine Anomalie für die schwere Rammsonde besteht. Theoretisch ist das mit der hier verwendeten Lösung nicht möglich, weil die tatsächliche Impulsform (Halbsinus) und die Impulsform der Lösung (Exponentialfunktion) nicht übereinstimmen.

Der praktische Nutzen dieser Forschungsarbeit ist offensichtlich. Bei Sondierungen mit kurzem Gestänge muss berücksichtigt werden, dass trotz gleicher Lagerungsdichte höhere Schlagzahlen gemessen werden können und daher die Gefahr besteht die Lagerungsdichte zu überschätzen. Das könnte vor allem bei der schweren Rammsonde ein Problem sein, denn diese wird häufig auch dann für Baugrunduntersuchungen verwendet, wenn die maximal Untersuchungstiefe unter 10 m liegt. Die hier gewonnen Ergebnisse sollten noch durch weitere In-situ-Messungen unterlegt werden, könnten dann aber in die DIN 4094 und den Eurocode 7 einfließen. Das Forschungsvorhaben war veranlasst worden um zu klären, ob Sondierungen in tiefen gefluteten Baugruben vom Ponton aus zulässig sind. Die Ergebnisse zeigen, dass diese Sondierungen zulässig sind, weil nicht die freie Gestängelänge sondern die Gesamtgestängelänge den Energieeintrag beeinflusst. Bei großen freien Gestängelängen sind die Anwendungsgrenzen der Sonde (z.B. 25 m bei DPH) schnell erreicht und die Schlagzahlen steigen ab hier an. Diesem Zusammenhang muss mehr Bedeutung beigemessen werden, weil die Gefahr besteht, dass ab Überschreitung der Anwendungsgrenze bei Sondierungen mit freiem Gestänge hohe Schlagzahlen als hohe Lagerungsdichte interpretiert werden.