

Messtechnisch überwachte Großversuche beim Bau von Verkehrswegen als Grundlage für Optimierungen in der Planung und Ausführung

Georg Breitsprecher, CDM Smith Consult GmbH, Berlin
Thomas Hecht, DEGES Deutsche Einheit Fernstraßenplanungs- und -bau GmbH, Berlin

Die DEGES plant und realisiert aktuell im Hamburger Stadtteil Wilhelmsburg die Verlegung der Bundesstraße B4/75 in Bereiche ehemaliger, nicht mehr benötigter Bahnanlagen. Der Untergrund ist geprägt von organischen Weichschichten, einem oberflächennahen Grund-/Stauwasserstand und bahntypischen Verunreinigungen. Für den Bau der Straße und der Ingenieurbauwerke werden Baugrundverbesserungen und Tiefgründungen erforderlich. Zur Optimierung von Planung und Ausführung wurden mehrere Versuche im Baufeld ausgeführt, messtechnisch überwacht und ausgewertet: Dammschüttung zur Konsolidierung der Weichschicht, Dammschüttung über Kies-Sand-Säulen, dynamische und statische Pfahlprobelastung, Schwingungsmessungen Bahnbetrieb.

1. Einleitung

Als Projektmanagementgesellschaft des Bundes und zahlreicher Bundesländer sind es die vorrangigen Aufgaben der DEGES (Deutsche Einheit Fernstraßenplanungs- und -bau GmbH), große Straßenbau- und Infrastrukturprojekte wirtschaftlich zu planen, kostengerecht zu steuern, qualitätsgerecht umzusetzen und termingetreu zu übergeben. Vor diesem Hintergrund und insbesondere auch aufgrund ihrer Gesellschafterstruktur und ihres Tätigkeitsfeldes ist es eine besondere Aufgabe der DEGES, Erfahrungen und Kenntnisse aus laufenden und abgeschlossenen Projekten zu sammeln, auszuwerten und für weitere Projekte nutzbar zu machen.

Aktuell realisiert die DEGES im Rahmen eines städtebaulichen Entwicklungsprojektes im Hamburger Stadtteil Wilhelmsburg die Verlegung der Bundesstraße B4/75 (Wilhelmsburger Reichsstraße) in Bereiche ehemaliger Bahnanlagen. Auf einer Streckenlänge von rund vier Kilometern soll durch die Bündelung der Straßen- und der Bahntrasse in Verbindung mit Lärmschutzmaßnahmen der Verkehrslärm eingedämmt,

sowie wertvoller städtebaulicher Entwicklungsraum im Bereich der alten Straßentrasse neu gewonnen werden.

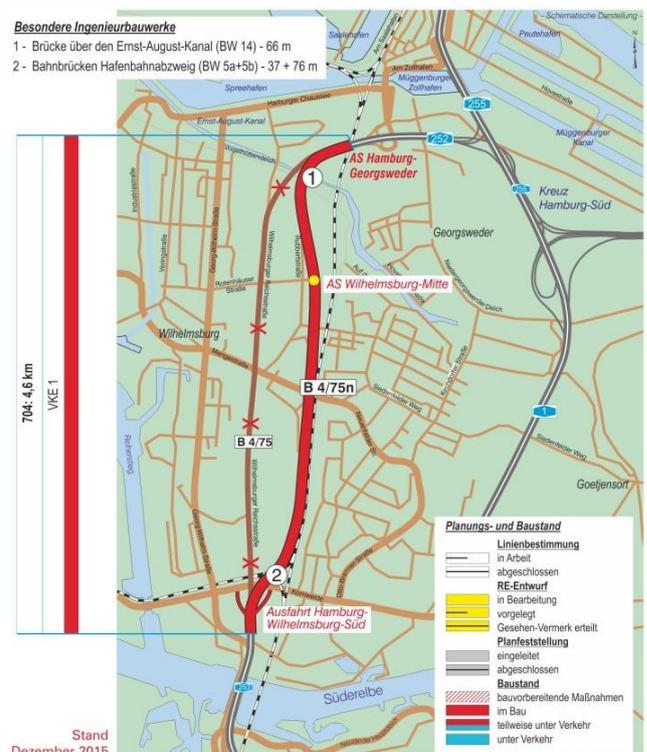


Bild 1: Übersichtsplan zum Projekt „Verlegung B4/75“, DEGES (2016)

Die neue Straßentrasse verläuft im Wesentlichen über ehemaliges Bahngelände, dessen Untergrund in weiten Abschnitten durch Schadstoffe belastet ist. Unterhalb einer Auffüllung stehen - typisch für die Elbeniederungen - eine Weichschicht wechselnder Mächtigkeit aus Klei und Torf und darunter im Liegenden locker bis mitteldicht gelagerte Sande an. Die Weichschicht bildet einen wirkungsvollen Grundwasserstauer zwischen der darüber liegenden, durch Schadstoffe belasteten Stauwasserzone und dem darunter liegenden, unbelasteten Grundwasserleiter.

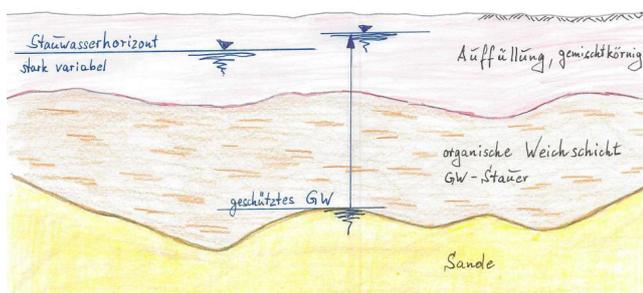


Bild 2: Schematischer Baugrundschnitt

Das Setzungspotenzial der Weichschicht macht für den Bau der neuen Verkehrsanlagen und Ingenieurbauwerke umfangreiche Maßnahmen zur Baugrundverbesserung und Tiefgründung erforderlich, wobei die wasserstauende bzw. schadstoffrückhaltende Wirkung der Weichschicht bei Planung und Ausführung aller Maßnahmen berücksichtigt werden muss (Umweltbehörde Hamburg, 1998)

Um die Verlegung der B4/75 zu ermöglichen, müssen zahlreiche Gleisanlagen zurückgebaut sowie einige angepasst bzw. gänzlich neu gebaut werden. Die Achsen der neuen Gleisanlagen entsprechen vielfach nicht exakt denen früherer Anlagen. Somit mussten große Abschnitte der neuen Gleisanlagen als „Neubau“ definiert werden, nur wenige konnten als „Ertüchtigung“ behandelt werden. In Verbindung mit der Schwingungs- und Setzungsempfindlichkeit des Baugrundes machte dies rechnerische Nachweise der Tragfähigkeit, der statischen und der dynamischen Gebrauchstauglichkeit erforderlich.

Im Sinne von Eignungsprüfungen sowie als Grundlage möglicher Optimierungen wurden im Projekt „Verlegung der B4/75“ mehrere Großversuche ausgeführt, messtechnisch überwacht und ausgewertet. Im Folgenden wird über die Ausführung und Auswertung dieser Großversuche sowie über den Transfer der Ergebnisse und Erfahrungen von und zu weiteren Projekten der DEGES berichtet.

2. Großversuche im Projekt B4/75

2.1 Aufbau eines Dammes auf einem mit Kies-Sand-Säulen verbesserten Baugrund

In weiten Abschnitten der neuen B4/75-Trasse (insbesondere bei großen Dammhöhen) werden umfangreiche Maßnahmen zur Untergrundverbesserung notwendig.

Zur Verifizierung der Planung der Baugrundverbesserung wurde ein Abschnitt des Verkehrsdammes im Bereich der künftigen Anschlussstelle HH-Wilhelmsburg-Süd als Probefeld ausgeführt und instrumentiert. Der aufgeschüttete Belastungskörper ist Teil des Dammes für die künftige östliche Rampe des Anschlusses an die bestehende Straße „Kornweide“.

Der Planung entsprechend erfolgte zunächst eine Baugrundverbesserung durch Herstellung von Kies-Sand-Säulen im Rüttelstopfverfahren, anschließend die Installation der folgenden Messtechnik im Boden und auf der Gründungsebene:

- 1 Horizontalinklinometer (quer zur Dammachse auf der Gründungsebene)
- 4 Porenwasserdruckgeber (in der Weichschicht)
- 2 Setzungspegel (abgesetzt auf der Gründungsebene)
- 2 vertikale Mehrfach-Extensometer (Verankerungen in der Weichschicht und in den Sanden)
- 3 vertikale Inklinometer am Dammfuß

Unter ständiger Beobachtung der Verformungen und des Porenwasserdruckes folgte die Herstellung des rund 1,10 m mächtigen, geogitterbewehrten Gründungspolsters und der lagenweise Aufbau des rund 6,00 m hohen Dammes.



Bild 3: Belastungskörper zur Kontrolle des Setzungs- und Konsolidierungsverhaltens

Die im Versuch ermittelte Gesamtsetzung des Dammes betrug in der Mitte seines Querschnittes rund 0,30 m. Etwa 50 % der Setzung traten unmittelbar während der Aufschüttung des Dammes ein, weitere 50 % als zeitlich verzögerte Rest- bzw. Konsolidierungssetzungen. Der Abbau des Porenwasserdruckes benötigte einen Zeitraum von rund 1,5 Monaten.

Anhand der Ergebnisse der Extensometer konnte eine Zuordnung von Setzungsanteilen zu den einzelnen Bodenschichten erfolgen. Demnach betrug der Anteil an Sofort- und Restsetzungen aus den wechselnd locker bis mitteldicht gelagerten Sanden unterhalb der Weichschicht lediglich 2 cm bzw. 1 cm.

Der Gesamtsetzungsbetrag lag deutlich unter, die Konsolidierungsdauer hingegen über den Prognosen. Da der Versuch in einem gesonderten Baulos mit ausreichend zeitlichem Vorlauf ausgeführt wurde, war nach Auswertung der Ergebnisse eine Überprüfung der Planung möglich, wenngleich die Ergebnisse selbst in diesem Fall keinen Spielraum für wesentliche Optimierungen boten.

2.2 Statische Pfahlprobelastungen an Großbohrpfählen

Die neue Trasse der B4/75 kreuzt im nördlichen Projektabschnitt den sog. Ernst-August-Kanal. Hierfür wird eine neue Brücke errichtet, die auf Bohrpfählen zu gründen ist. Zur Kontrolle der in der Entwurfsplanung zugrunde gelegten Pfahltragfähigkeit wurden statische Probelastungen an zwei separat hergestellten Bohrpfählen durchgeführt. Die Belastung erfolgte über zwei Zyklen bis zu einer Prüflast von 8.000 kN bei vollständiger messtechnischer Überwachung.



Bild 4: Belastungseinrichtung für statische Probelastung von Bohrpfählen

Die Entwurfs-/Genehmigungsplanung war Sache des Auftraggebers, die Ausführungsplanung Sache des Auftragnehmers. Da seitens des Auftraggebers für die vorliegenden Baugrundverhältnisse keine repräsentativen Vergleichsdaten zur Verfügung gestellt werden konnten, waren die Probelastungen zwingend notwendig, um von Seiten des Auftragnehmers zutreffend und wirtschaftlich bemessen zu können.

2.3 Dynamische Pfahlprobelastung an Fertigteilrammpfählen

Für die neue Trasse der B4/75 ist nördlich und südlich der Brücke über den Ernst-August-Kanal eine Baugrundverbesserung durch Überschüttung zur Vorkonsolidierung geplant. Im unmittelbaren Anschlussbereich an die Widerlager der Brücke erreichen die Straßendämme eine Höhe von bis zu 8,10 m. Um zwischen den tief (starr) gegründeten Widerlagern und dem auf vorkonsolidierten Boden (weich) gegründeten Straßendamm einen verträglichen Übergang zu

schaffen werden die Dämme im unmittelbaren Anschluss an die Widerlager bzw. Hinterfüllungsbereiche auf geogitterbewehrten Gründungspolstern über pfahlartigen Traggliedern (in Form von Fertigrampfpfählen, Kantenlänge 30 cm, Raster 1,90 m x 1,90 m bzw. 2,00 m x 2,00 m) gegründet.

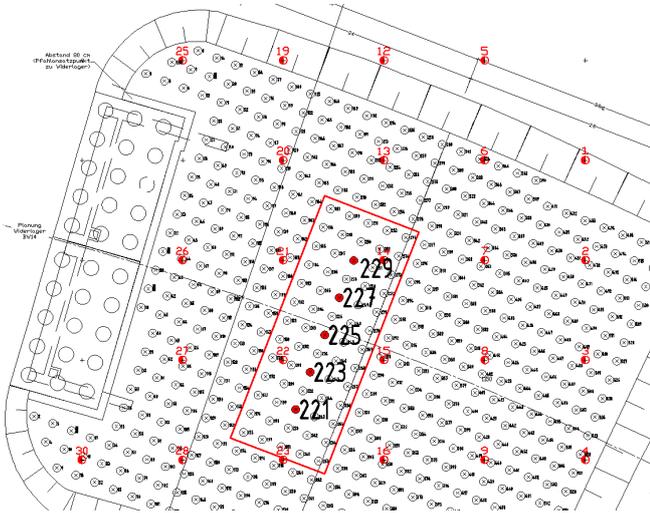


Bild 5: Auszug Plan „Anschluss Widerlager“: Verteilung Fertigrampfpfähle mit Darstellung des Probefeldes, 5 Prüfpfählen und Drucksondierpunkten.

Zum Nachweis der äußeren, axialen Tragsicherheit wurden Probelastungen erforderlich. Hierfür wurden zunächst 5 x 13 Fertigteiltrampfpfähle im Sinne eines Probefeldes gerammt und über einen Zeitraum von 30 Tagen „in Ruhe gelassen“. Anschließend wurden an 5 Fertigteiltrampfpfählen dynamische Pfahlprobelastungen nach der CAPWAP-Methode durchgeführt und ausgewertet.

Die im Versuchskonzept vorgegebene Prüflast von 1730 kN konnte bei vier der fünf Pfähle nachgewiesen werden. Der Pfahlkopf eines Probepfahls wurde beim zweiten Testschlag zerstört. Die beim ersten Testschlag erhaltenen Messergebnisse ließen jedoch bereits auf eine ausreichende Tragfähigkeit schließen, weshalb für die Ermittlung der Streufaktoren von fünf beprobten Pfählen ausgegangen werden konnte.

2.4 Aufbau eines Probelastungskörpers im Bereich neuer Bahnanlagen zur Prognose zu erwartender Setzungen infolge der Belastung durch Schienenfahrzeuge

Verformungsberechnungen für die neu zu bauenden Gleisanlagen führten zu dem Ergebnis, dass für die geplanten Erdkörper zwar die zulässige Gesamtsetzung innerhalb des vorgesehenen Instandhaltungsintervalls eingehalten würde, bei einer Variation der Steifigkeiten des Torfs und des Kleis (Weichschicht) nicht jedoch die die zulässige Differenzsetzung. Da bei allen bestehenden, benachbarten Gleisanlagen Instandhaltungen innerhalb eines Intervalls notwendig sind, das deutlich kürzer ist als in Richtlinie Ril 836 (DB Netz AG, 2014) vorgesehen, und da alle diese Gleisanlagen auf einem nicht durch Spezialtiefbaumaßnahmen verbesserten Baugrund liegen, sollte auch für die neuen Gleisanlagen auf eine Baugrundverbesserung mittels Rüttelstopfsäulen o. ä. verzichtet werden. Tiefreichende Bodenaustauschmaßnahmen oder Überschüttungen zur Vorkonsolidierung mussten wegen der Gefahr von Mitnahmesetzungen an den bestehenden Gleisanlagen sowie aus bahnbetrieblichen Gründen ausgeschlossen werden.



Bild 6: Dynamische Pfahlprobelastung

Mit dem vom Eisenbahn-Bundesamt (EBA) anerkannten Gutachter für Geotechnik wurde im Planungsprozess daher abgestimmt, dass zum Nachweis der Gebrauchstauglichkeit auch eine Probelastung durchzuführen sein, bei der die Belastung des Baugrundes durch den Bahnverkehr mittels einer Totlast simuliert und das Zeit-Setzungsverhalten messtechnisch beobachtet werden sollte. Im rechnerischen Nachweis der statischen Gebrauchstauglichkeit wurde angenommen, dass 50 % der veränderlichen Einwirkungen aus Bahnverkehr setzungsrelevant sind. Im Rahmen der Probelastung wurden zur Sicherheit 100 % der veränderlichen Einwirkungen nach Ril 836 (DB Netz AG, 2014) angesetzt. Der Belastungskörper wurde daraufhin wie folgt aufgebaut:

- Länge: 6,50 m
- Breite: 2,60 m
- Höhe: 2,40 m
- 40 Betonquader mit Abmessungen von 1,30 m x 1,30 m x 0,60 m
- Sohlspannung: 57,6 kN/m² bei einer Wichte des Betons von 24 kN/m³



Bild 7: Belastungskörper zum Nachweis der statischen Gebrauchstauglichkeit des Erdkörpers der neuen Bahnanlagen

Die Belastung wurde innerhalb eines Tages aufgebracht und über eine Konsolidierungszeit von drei Monaten konstant gehalten. Die Messung der vertikalen Verschiebungen (Setzungen) erfolgte geodätisch über Messbolzen an der unteren Reihe des Belastungskörpers sowie geotechnisch über Vertikal-Extensometer. Horizontale Verschiebungen im Boden wurden mittels Vertikal-

Inklinometer erfasst, die Porenwasserdruckentwicklung unter dem Belastungskörper über Porenwasserdruckgeber in der Weichschicht. Die messtechnisch erfassten Setzungen betragen am Tag des Aufbaus rund 66 %, nach 90 Tagen weniger als 40 % der prognostizierten.

Zeitpunkt	Prognose	Messergebnis
Tag des Aufbaus	22 mm	14 mm
Nach 8 Tagen	27 mm	i. M. 12 mm
Nach 90 Tagen	39 mm	i. M. 15 mm

Auf Grundlage dieser Ergebnisse konnten die Variation der Steifigkeiten verändert und die statische Gebrauchstauglichkeit des für die Gleisanlagen geplanten Erdkörpers in situ nachgewiesen werden.

2.5 Schwingungs- und Crosshole-Messungen bei laufendem Bahnverkehr für die Prognose der dynamischen Gebrauchstauglichkeit neuer Bahnanlagen

Für die gemäß Ril 836 (DB Netz AG, 2014) erforderliche Beurteilung der dynamischen Gebrauchstauglichkeit des Unterbaus bzw. Untergrundes wurde ein ergänzendes Erkundungs- und Versuchsprogramm ausgeführt. Dieses umfasste neben Bohrungen und Sondierungen insbesondere die Ermittlung bodenmechanischer (insb. dynamischer) Kennwerte anhand gewonnener Bodenproben einschließlich sog. Resonant-Column-Tests (RC-Versuche), Schwingungsmessungen im Gleisbereich bei repräsentativen Zugüberfahrten sowie seismische Messungen (Crosshole-Messungen).

Die Crosshole-Messungen dienten der Erfassung bodendynamischer Kennwerte (Kompressions- und Scherwellengeschwindigkeit, Poissonzahl, dynamischer Schermodul). Die Messungen wurden in vier Messquerschnitten ausgeführt, wobei in zwei Messquerschnitten von einer Vorbelastung des Baugrundes durch frühere, bereits zurückgebaute Gleisanlagen auszugehen war.

Das Ziel der Schwingungsmessungen bestand darin, die effektiven Schwinggeschwindigkeiten bei Zugverkehr zu ermitteln. Die Messungen wurden in zwei Messquerschnitten ausgeführt.

Zunächst erfolgte eine Abschätzung dynamischen Gebrauchstauglichkeit durch Ermittlung der zulässigen Scherdehnungen nach Vucetic (1994). Bei diesem Verfahren ist die dynamische Scherdehnung in Abhängigkeit von der Plastizität des Bodens anzugeben. Für letztere lag aus dem ergänzenden Erkundungsprogramm ein gesichertes Spektrum an Kennwerten vor.

Weiterhin erfolgte zur Absicherung der vorherigen Abschätzung ein rechnerischer Nachweis der dynamischen Gebrauchstauglichkeit entsprechend der Planungshilfe „Eisenbahnstrecken mit Schotteroberbau auf Weichschichten (DB Netz AG, 2013)“. Zur Bestimmung des dynamischen Schubmoduls und dessen Abhängigkeit vom Spannungs- und Verformungsniveau waren hierzu im Labor RC-Versuche auszuführen. Über die RC-Versuche werden funktionale Zusammenhänge des Schubmoduls mit der Scherdehnung ermittelt, die für einen rechnerischen Nachweis benötigt werden.

Erst mit dem ausgeführten Erkundungs- und Versuchsprogramm und den darauf aufbauenden Abschätzungen und Berechnungen zur dynamischen Gebrauchstauglichkeit konnte nachgewiesen werden, dass für den Bau neuer Gleisanlagen im gesamten Projektbereich keine tiefreichende Baugrundverbesserung im Zusammenhang mit der dynamischen Stabilität erforderlich werden wird. Gleichzeitig wurde offensichtlich, dass in einigen Teilabschnitten der sog. „abgesicherte Tragbereich“ entgegen der bis dahin vorliegenden Planung von 1,50 m auf 1,60 m unter Schienen-Oberkante vergrößert werden muss und in diesen Bereichen ein Geogitter in die PSS einzubauen ist.

3. Möglichkeiten der Optimierung bei Planung und Ausführung

Dass Großversuche im Verkehrswegebau für die erforderlichen Erdbau-, Gründungs- und Baugrundverbesserungsmaßnahmen ein sehr nützliches Mittel sind, um Daten aus der Baugrunderkundung bzw. Annahmen aus der Planung zu verifizieren und gegebenenfalls hinsichtlich Sicherheit und Wirtschaftlichkeit zu optimieren, wurde zuvor an ein-

zelnen Beispielen aus dem Projekt „Verlegung B4/75“ geschildert.

Der Großversuch „Aufbau eines Dammes auf einem mittels Kies-Sand-Säulen verbesserten Baugrund“ führte im Projekt zu einem gegenüber den Planungsannahmen veränderten Verständnis über das Zeit-Setzungsverhalten. Die aufgezeichneten Gesamtsetzungen lagen unter den prognostizierten, d. h. der verbesserte Baugrund hatte insgesamt ein günstigeres Tragverhalten als in der Planung angenommen. Der Zeitraum, über den Restsetzungen aufgezeichnet wurden war jedoch deutlich länger, bzw. die Konsolidierung verlief langsamer als prognostiziert, d. h. die Durchlässigkeit des Bodens bzw. Dränwirkung der Kies-Sand-Säulen war geringer als in der Planung zunächst angenommen. Aus dieser Kenntnis konnten Konsequenzen für den Erd- und Straßenbau abgeleitet werden, dass Nachprofilierungen erforderlich werden und dass zwischen Aufbau des Dammes und Herstellung des Straßenoberbaus ein längerer Zeitraum liegen muss.

Mit den dynamischen Pfahlprobelastungen an Fertigteilrammpfählen konnten die im Rahmen der Planung optimistisch gewählten Pfahltragfähigkeiten (obere Werte nach EA Pfähle) weitgehend bestätigt werden, doch bereichsweise Anpassungen hinsichtlich der erforderlichen Einbindelänge der Pfähle wurden im Ergebnis der Probelastungen erforderlich. So konnte zwar auf Grundlage der Ergebnisse aus dem Großversuch zwar eine technisch einwandfreie und optimierte Lösung gefunden werden, da der Großversuch jedoch mit einem nur geringen zeitlichen Vorlauf zu den eigentlichen Pfahlrammarbeiten und vom Auftragnehmer für die Pfahlrammarbeiten ausgeführt wurde, waren die Möglichkeiten der planerischen Optimierung aufgrund terminlicher und vertraglicher Randbedingungen eher begrenzt.

Die Großversuche im Bahnbereich (Belastungsversuch, Schwingungs- und Crosshole-Messungen) waren im Projekt „Verlegung B4/75“ ein entscheidender Faktor, die neuen Bahnanlagen mit dem geringstmöglichen Aufwand zur Erlangung der statischen und dynamischen Gebrauchstauglichkeit zu planen und auszuführen. Erst durch diese Ver-

suche war und in enger Abstimmung mit dem vom EBA anerkannten Sachverständigen für Geotechnik eine weitreichende Optimierung der Planung möglich.

4. Transfer der Erfahrungen von und zu weiteren Projekten der DEGES

Als Projektmanagementgesellschaft des Bundes und zahlreicher Bundesländer bietet sich für die DEGES in einzelnen Projekten die Möglichkeit an, Erfahrungen aus anderen zurückliegenden und/oder parallel laufenden Projekten zu übertragen bzw. mitzuverwenden. So konnten im Projekt „Verlegung B4/75“ für zwei Brückenbauwerke am Bahndamm Hohe Schaar Ergebnisse aus Pfahlprobebelastungen im DEGES-Projekt „Tunnel HH-Stellingen“ (Krings et. al. 2013) verwendet werden und somit an dieser Stelle auf projektspezifische Versuche verzichtet werden.

5. Fazit

Pfahlprobebelastungen an Pfählen für Brückenbauwerke sind vorrangig als Eignungsnachweise geeignet um die Planungsansätze zu bestätigen. Regional verfügbare Ergebnisse aus Projekten mit vergleichbaren Randbedingungen können in dieser Hinsicht einen wertvollen Beitrag leisten.

Belastungsversuche, die bereits im Vorfeld der eigentlichen Bautätigkeit ausgeführt werden, bieten insbesondere bei Baugrundverbesserungen und Gründungen mit einer großen Anzahl von Gründungselementen ein hervorragendes Mittel um die Planung und Ausführung der Maßnahmen zu optimieren.

Ist die Ausführung von Großversuchen in den Vertrag desjenigen Bauunternehmers integriert, der später die im Versuch untersuchten Baugrundverbesserungs- und Gründungsarbeiten durchführen wird, sind technisch mögliche und sinnvolle Optimierungen häufig aufgrund vertraglicher und terminlicher Zwänge eingeschränkt.

6. Literatur

DEGES [2016]: Webseite
<http://www.deges.de/Projekte/Bundesfern->

und-Landesstrassenprojekte/in-Hamburg/B-4/B-75-Wilhelmsburger-Reichsstrasse/B-4/B-75-Wilhelmsburger-Reichsstrasse-in-Hamburg-K230.htm (01.02.2016)

Umweltbehörde Hamburg, Amt für Umweltschutz - Gewässer- und Bodenschutz - W22- [1998]: „Merkblatt zu den Anforderungen an Pfahlgründungen auf kontaminierten Standorten in Hamburger Marschgebieten aus der Sicht des Gewässerschutzes“, (nicht mehr gültig/verfügbar)

Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen [2010]: „Merkblatt über Straßenbau auf wenig tragfähigem Untergrund“, FGSV-Nr. 542, FGSV Verlag, Köln

DB Netz AG [2014]: „Richtlinie 836 – Erdbauwerke und sonstige geotechnische Bauwerke planen, bauen und instand halten“, Fassung vom 20.12.1999a mit 3. Aktualisierung, gültig ab 01.03.2014, Ril 836, DB Kommunikationstechnik GmbH, Karlsruhe

Breitsprecher, G., Hecht, T. [2016]: „Neubau der B4/75 in Hamburg-Wilhelmsburg - Tiefbauarbeiten auf wenig tragfähigem Untergrund unter Berücksichtigung von Bahnbetrieb und Umweltbelangen“, in: Erd- und Grundbautagung 2016, Vorträge der Tagung der Arbeitsgruppe „Erd- und Grundbau“, FGSV e. V., Köln

Kirsch, F., Krings, M., Hecht, T., Marezki, S. [2013]: „Einzel- und Gruppenprobebelastungen an Ortbetonpfählen“, in: „Pfahl-Symposium 2013, Fachseminar am 21./22.02.13 in Braunschweig“, Mitteilung des Instituts für Grundbau und Bodenmechanik, Technische Universität Braunschweig, Heft 96

Vucetic, M. [1994]: „Cyclic threshold shear strains in soils“, Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 120, No. 12, pp. 2008-2227

DB Netz AG [2013]: „Planungshilfe ‚Eisenbahnstrecken mit Schotteroberbau auf Weichschichten‘, Teil 2: ‚Rechnerisches Verfahren der dynamischen Stabilität des Eisenbahnfahrwegs bei Zugüberfahrt‘“, Stand 20.08.2013 Ingenieurgesellschaft GEPRO, Prof. Lieberenz, Prof. Neidhart