

# Einsatz von Fertigrammpfählen aus Stahlbeton bei Fahrwegtiefer Gründungen

Es werden wichtige Aspekte zur Wahl der Fahrwegtiefer Gründung mit Fertigbetonrammpfählen aus Stahlbeton am Beispiel eines Bauvorhabens mit Fester Fahrbahn vorgestellt.

LARS VAVRINA | PETER WARDINGHUS

**Aufgrund stetig wachsender Streckenbelastungen sind die Anforderungen an die Fahrwegertüchtigung und deren Gründungen hinsichtlich der Gebrauchstauglichkeit und dynamischen Stabilität gestiegen. Ein wichtiger Aspekt für die Gründung ist neben betrieblichen und ökologischen Aspekten auch die Risikobewertung. Hinsichtlich dieser Kriterien bieten Fertigrammpfähle sowohl wegen der werkseitigen Pfählerstellung als auch der direkten Dokumentation aller Ausführungsschritte während des Einbaus das ideale System, mit dem das Risiko für Störanfälligkeiten im Bauablauf sowie für Mengenerhöhungen oder Bauzeitenverlängerungen minimiert werden kann. Durch zusätzliche Wellengleichungsanalysen und Probelastungen können der Material- und Arbeitsaufwand begrenzt und die Wirtschaftlichkeit erhöht werden.**

## Kriterien zur Wahl einer Fahrwegtiefer Gründung

Mit zunehmendem technischem Fortschritt im Eisenbahnbau müssen bestehende Gleisanlagen ertüchtigt und ausgebaut werden, was eine Anpassung der Eisenbahnfahrwege

und der zugehörigen Erdbauwerken mit sich bringt. Bei der Erstellung früherer Streckenabschnitte auf Weichschichten war die Gründung in der Regel nicht problematisch, da die gefahrenen Geschwindigkeiten und Streckenbelastungen geringer waren und Setzungen durch Ausgleichsarbeiten im Schotteroberbau ausgeglichen werden konnten [1]. Bei heutigen Ertüchtigungsmaßnahmen wird besonderer Wert auf die Gebrauchstauglichkeit und die dynamische Stabilität der Erdbauwerke gelegt. Eine Beurteilung der dynamischen Stabilität und der bautechnisch notwendigen Ertüchtigungsmaßnahmen kann gemäß [1] durch ein rechnerisches Bewertungskonzept erfolgen. Bei Strecken, die durch problematische Untergrundverhältnisse verlaufen, werden tiefergründige Ertüchtigungen notwendig.

Tiefergründige Ertüchtigungen werden in Baugrundverbesserungsmaßnahmen und Tiefergründungen unterschieden. Während Baugrundverbesserungen z. B. einen Bodenaustausch oder eine Bodenverfestigung vorsehen, werden bei Tiefergründungen die Lasten über Einzelelemente in den tieferen Baugrund geleitet. Es gibt gemäß [2] wichtige Aspekte, die bei der Wahl einer Fahrwegtiefer Gründung zu beachten sind. Diese Auswahlkriterien sind die Einhaltung von betrieblichen, baubetrieblichen sowie ökologischen Randbedingungen. Betriebliche Randbedingungen sind Bauzeiten,

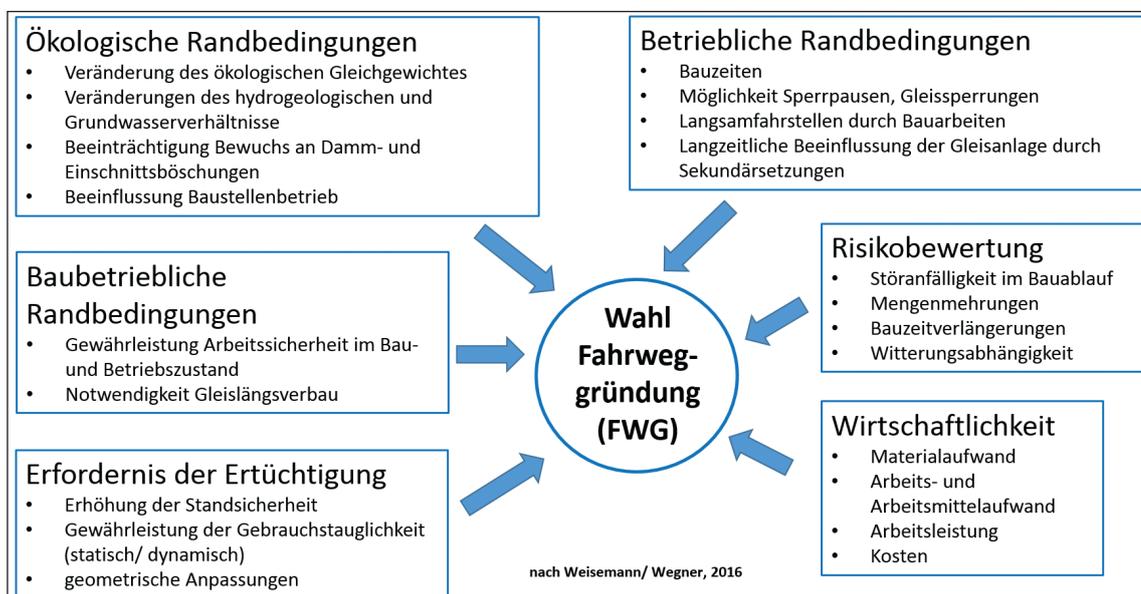
Sperrpausen oder Langsamfahrstellen. Unter ökologischen Randbedingungen sind Veränderungen des ökologischen Gleichgewichtes, Veränderungen der hydrogeologischen Verhältnisse, eine Beeinträchtigung des Geländes oder Bewuchs zu verstehen. Weitere Kriterien sind neben den Erfordernissen der Ertüchtigung außerdem eine Bewertung des Risikos hinsichtlich der Störanfälligkeit, Bauzeitverlängerungen und Witterungsabhängigkeit sowie der Wirtschaftlichkeit. Abb. 1 zeigt einen Überblick aller relevanten Aspekte.

Fahrwegtiefer Gründungen mit Fertigrammpfählen aus Stahlbeton wurden bereits als Dammgründung [3] oder mit Fester Fahrbahn [4] realisiert.

## Tiefergründungen mit Fertigrammpfählen aus Stahlbeton

Die gemäß DIN EN 12699 „Ausführung von Arbeiten im Spezialtiefbau – Verdrängungspfähle“ hergestellten Fertigrammpfähle aus Stahlbeton gehören zu den sogenannten Vollverdrängungspfählen. Die in Deutschland aktuell verwendeten Fertigrammpfähle aus Stahlbeton haben in der Regel quadratische Querschnitte und eine durchgehende Längs- und Wendelbewehrung.

Die Herstellung erfolgt im Werk vollautomatisch unter höchsten Qualitätsbedingungen und externen Herstellkontrollen zu einem



**Abb. 1:** Aspekte bei der Wahl der Fahrwegtiefer Gründung nach [2]

Homepageveröffentlichung unbefristet genehmigt für Aarsleff Grundbau GmbH / Rechte für einzelne Downloads und Ausdrücke für Besucher der Seiten genehmigt von DVV Media Group, 2018.

**Abb. 2:** Ausführung der Pfahlkopfplatten (links); Unterbeton mit freigelegter Pfahlbewehrung (rechts)



typengeprüften Pfahl. Die werkseitige Herstellung gewährleistet einheitliche Betonquerschnitte und -eigenschaften sowie eine planmäßig ausgeführte Bewehrungslage mit Toleranzen von +/-3 mm. Wichtige Systemvorteile liegen außerdem in den kurzen Einbauzeiten und der vollständigen Witterungsunabhängigkeit auf der Baustelle sowie der sofortigen Prüf- oder Überbaubarkeit.

In der nationalen Normung werden mehrere Verfahren zur Bemessung von Fertigrampfpfählen aufgeführt. Zur Ermittlung der jeweiligen Pfahlwiderstände können statische oder dynamische Probelastungen ausgeführt werden, wobei dynamische Probelastungen eine wirtschaftliche Variante bieten. Die rechnerische Bemessung kann nach den Empfehlungen des Arbeitskreises „Pfähle“ (EA Pfähle) mit Erfahrungswerten für den Mantelreibungs- und den Pfahlspitzenwiderstand von nicht bindigen Böden mithilfe des Spitzenwiderstandes der Drucksondierung abgeleitet werden. Bei bindigen Böden werden die Erfahrungswerte für den Pfahlfußwiderstand und die Pfahlmantelreibung aus der Scherfestigkeit der undrained Scherfestigkeit des Bodens abgeleitet. Auf dieser Grundlage kann sowohl für nicht bindige als auch für bindige Böden der Nachweis der Tragfähigkeit erbracht werden.

Neben dem Führen der statischen Nachweise beinhaltet die Planung einer Pfahlgründung auch die Sicherstellung des Kraftschlusses mit der darüber liegenden Konstruktion. Die Verbindung erfolgt bei Dammgründungen in der Regel mittels Pfahlkopfplatten (Abb. 2, links) oder bei der Festen Fahrbahn durch Freilegen und Integration der Bewehrung in die Betonplatte (Abb. 2, rechts).

Damit die gemäß Planung erforderlichen Materialeigenschaften sowie alle Produktionsdaten nachvollziehbar und wiederverwendbar dokumentiert werden, sind alle im Werk produzierten Pfähle neben der in der Planung vergebenen Pfahlnummer mit einer werkseitig definierten Artikelnummer gekennzeichnet (Abb. 3). So ist jeder einzelne Pfahl auf der Baustelle identifizierbar und damit ist sichergestellt, dass er den Anforderungen der Planung entspricht. Durch die Identifikation stehen

neben den geometrischen Angaben und dem Bewehrungsgrad beispielweise auch Angaben zum zeitabhängigen Verlauf der Betondruckfestigkeit zur Verfügung.

Gemäß DIN 18304 „Ramm-, Rüttel- und Pressarbeiten“ gilt der Einbau von Fertigrampfpfählen bei der Verwendung von Hydraulikhämmern als erschütterungsarm. Verfahrensbedingt sind Erschütterungen nie gänzlich auszuschließen, da durch die dynamische Einwirkung auf den Pfahl der Boden in Bewegung versetzt wird. Die daraus resultierenden Schwingungen können gemessen und mithilfe der Beurteilungskriterien nach DIN 4150 bewertet werden. In der Regel liegen die Schwinggeschwindigkeiten bei der Ausführung von Fertigrampfpfählen aus Stahlbeton in einem nicht kritischen Bereich (z.B. [5, 6]).

Mittels einer Wellengleichungsanalyse kann im Voraus eine Studie zur Einbringbarkeit erbracht werden. Bei dieser Methode kann der Zusammenhang zwischen dem gewählten Rammsystem, den Bodenkenngrößen und den Spannungen im Pfahl während der Rammung untersucht werden. Mithilfe der Ergebnisse kann das optimale Rammsystem (z.B.

Hammergewicht) festgelegt werden, da dadurch sowohl die Pfahlintegrität als auch die Wirtschaftlichkeit beeinflusst werden.

**Ertüchtigung einer Bahnstrecke auf einer Festen Fahrbahn**

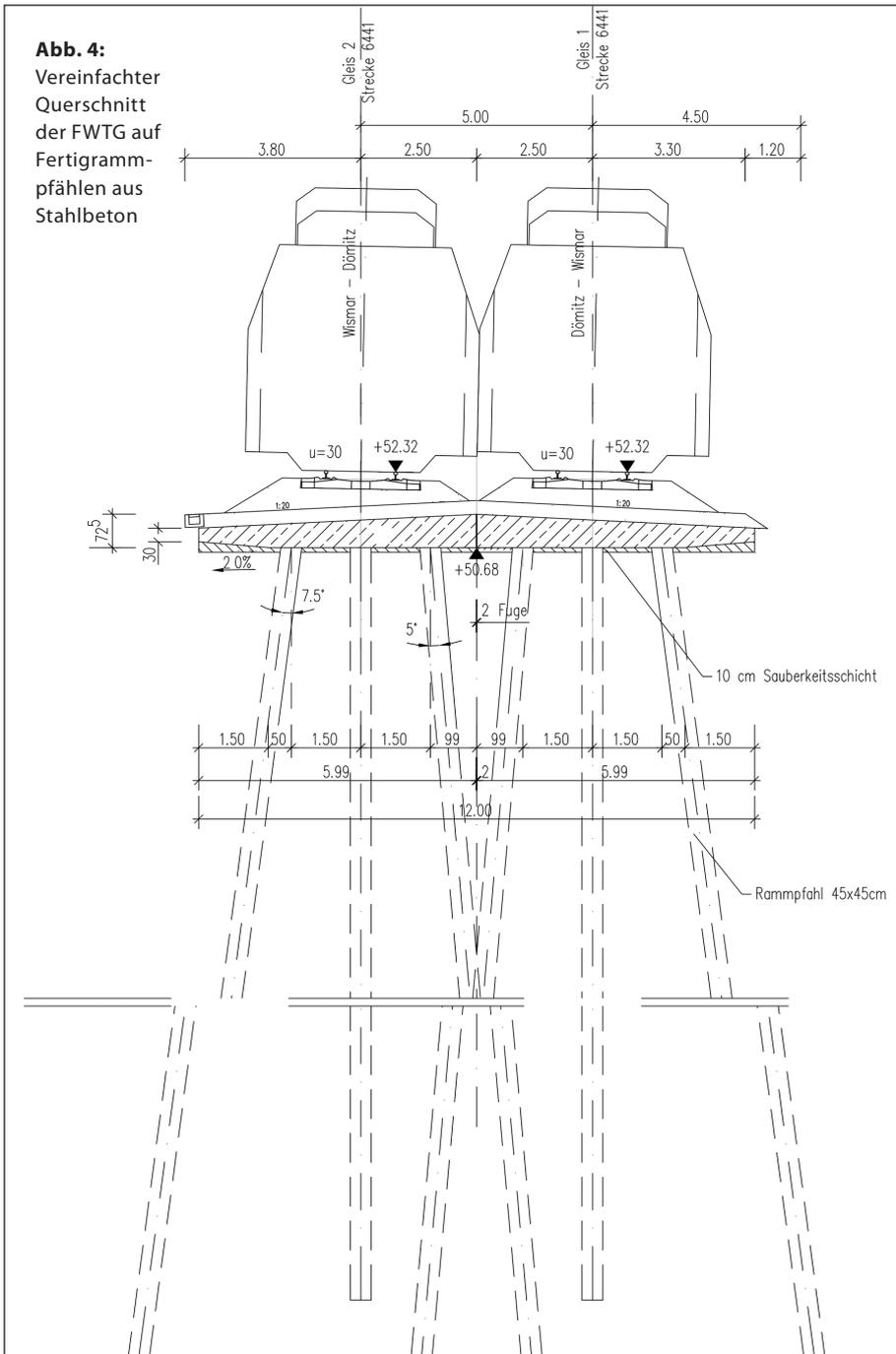
Im Winter 2017/18 wurde im Rahmen der Ertüchtigung der Bahnstrecke 6441 vom Bahnhof Schwerin zum Bahnhof Bad Kleinen im Abschnitt zwischen km 75,2 + 08,0 bis km 75,6 + 44,5 wegen der dort anstehenden, nicht tragfähigen Bodenschichten eine Fahrwegtiefergründung (FWTG) erforderlich.

Die ca. 440 m lange Strecke wurde für die Planung und spätere Ausführung der Rammarbeiten in 14 Blöcke (Block 0 bis 13) eingeteilt. Abgesehen von den Blöcken 1 und 13 hatten alle Blöcke eine Anzahl von 52 Pfählen. Die Blöcke 1 und 13 waren als Anfangs- bzw. Endblock mit jeweils 44 Pfählen geplant. Zur Ausführung des Übergangs zwischen dem flach- und tiefgegründeten Abschnitt wurde Block 0 nachträglich mit 36 Pfählen umgeplant. Abb. 4 zeigt einen schematischen Querschnitt der ausgeführten Fahrwegtiefergründung. Die trapezförmige Tragplatte aus Stahlbeton hat eine



**Abb. 3:** Werkseitige Plakette mit allen relevanten Pfahldaten

**Abb. 4:**  
Vereinfachter Querschnitt der FWTG auf Fertigrampfpfählen aus Stahlbeton



Breite von 12 m und eine Höhe außen von 42,5 cm und in der Mitte von 72,5 cm.

Bei den verwendeten Pfählen handelt es sich um Stahlbetonkupplungspfähle mit einem Querschnitt von 45 cm x 45 cm. Im Bereich der Blöcke 0 bis 9 wurden 26 m lange Pfähle geplant, die aus einem Oberpfahl mit einer Länge von 15 m und einem Unterpfahl mit einer Länge von 11 m gekuppelt wurden. Im Bereich der Blöcke 10 bis 11 werden 23 m lange Pfähle mit Einzellängen von 15 m (Oberpfahl) und 8 m Unterpfahl und in den Blöcken 12 bis 13 wurden 21 m lange Pfähle vorgesehen. Der Oberpfahl ist hier ebenfalls 15 m lang und der Unterpfahl hat eine Länge von 6 m. Die Pfähle sind mit einer durchgehenden Längsbewehrung von 20 Ø 12 mm im Oberpfahl und 16 Ø 12 mm im Unterpfahl sowie einer Wendelbewehrung bewehrt.

Während der Planungsphase wurden der Baugrund untersucht, zahlreiche Bohrungen sowie Drucksondierungen ausgeführt und durch zum Teil mehrere Sachverständige für Geotechnik ausgewertet.

Die generelle Baugrundsichtung stellt sich wie folgt dar:

- anthropogene Auffüllungen,
- Weichschichten (Torf und Mudde),
- Geschiebelehne und Geschiebemergel,
- Sande und Kiese.

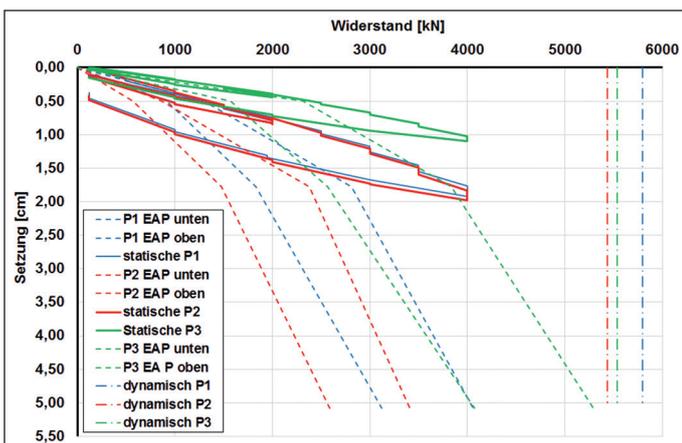
Aufgrund der Streckenlänge der Baumaßnahme und der punktuellen Erkundung war die Bodenschichtung als relativ ungleichmäßig einzustufen, sodass Abweichungen an der Oberkante der tragfähigen Sande und Kiese sowie deren Lagerungsdichte wahrscheinlich zu erwarten waren.

Vor Ausführung der Produktionspfähle wurden an drei Standorten Probefelder eingerichtet, wo an mehreren Pfählen statische Pfahlprobelastungen ausgeführt wurden. Vorgabe durch den Sachverständigen für Geotechnik war eine Prüflast von 4000 kN. Die Absetztiefen wurden mit einer Tiefe von NN -25 m (Probefeld 1+2) und NN -31 m ebenfalls bauseitig vorgegeben, sodass die Pfähle im Pfahlfußbereich in Sande und Kiese einbinden. Zum Zeitpunkt der statischen Probelastungen hatten die Pfähle eine Standzeit von 21 Tagen.

Die Prüflast von 4000 kN konnte bei allen Pfählen erreicht werden (Abb. 5). Die Setzung bei Erreichen der Prüflast lag etwa zwischen 1 cm und 2 cm. Nach Entlastung der Pfähle ging die Setzung wieder auf 0,2 bis 0,5 cm zurück. Insgesamt zeigten die Pfähle ein steifes und sehr setzungsarmes Tragverhalten (Abb. 5).

Zum Vergleich und zur weiteren Plausibilisierung wurden die gemessenen Pfahlwiderstände mit den Erfahrungswerten gemäß EA Pfähle mit den unteren und oberen Tabellenwerten nachgerechnet. Die Nachrechnung (Abb. 5) zeigt ein weiches Tragverhalten, sodass die Pfahlgründung tatsächlich geringere Setzungen als rechnerisch prognostiziert erreichte. Zudem waren die rechnerischen

**Abb. 5:** Ergebnisse aus Probelastungen inkl. Nachrechnung nach EA Pfähle



Homepageveröffentlichung unbefristet genehmigt für Aarsleff Grundbau GmbH / Rechte für einzelne Downloads und Ausdrucke für Besucher der Seiten genehmigt von DVV Media Group, 2018.

Pfahlwiderstände deutlich konservativer als die gemessenen Widerstände. Da bei den Probepfählen mit der Prüflast von 4000 kN der Pfahlwiderstand im Grenzzustand der Tragfähigkeit nicht erreicht wurde, wurden an den Probepfählen zusätzlich dynamische Probebelastungen ausgeführt. Mit den dynamischen Probebelastungen konnten Pfahlwiderstände von 5400 bis 5800 kN erreicht werden, was deutliche Reserven in der Tragfähigkeit aufzeigte und eine wirtschaftliche Optimierung der Pfahllängen bei geringem Risiko möglich machte.

Zur weiteren Planung wurden auf Grundlage der statischen Probebelastungen Rammanalysen nach dem Wellengleichungsverfahren durchgeführt. Mit dieser Berechnung kann schon im Vorfeld des Rammens das geeignete Rammgerät für die vorliegende Kombination aus Bodenwiderstand und Pfahl sowie den zu erwartenden Rammspannungen bestimmt werden. Bei dieser Berechnung wird der dynamische Vorgang der Stoßbelastung des Pfahls durch das Rammgerät und die Einwirkung der Stoßwelle auf den Pfahl nachvollzogen, wobei die Steifigkeit des Pfahls sowie die Steifigkeit des Bodens zusammen mit den Wirkungen des Rammgerätes mit Rammhaube und -futter erfasst werden. Somit kann auf Grundlage der Aufschlüsse und Probebelastungen ein optimaler Rammverlauf bei wirtschaftlichem Arbeitsmittel- und Materialaufwand geplant werden.

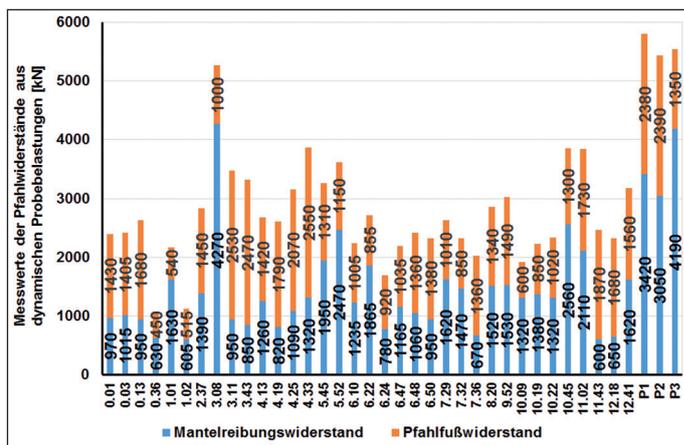
Im Verlauf der Rammarbeiten wurden weitere dynamische Probebelastungen durchgeführt, die nach dem Verfahren der vollständigen Modellbildung ausgewertet wurden, sodass die Mantel- und Pfahlfußwiderstände getrennt ermittelt werden konnten (Abb. 6). Ziel der weiteren Probebelastungen war die Überprüfung der Optimierung sowie eine Reduktion der Schlagenergie und eine damit einhergehende Materialschonung. Außerdem mussten Pfähle geprüft werden, bei denen die Rammkriterien nicht eingehalten wurden. Falls in diesen Fällen kein ausreichender Pfahlwiderstand erreicht werden konnte, wurden sofort Zusatzmaßnahmen veranlasst.

Während der Rammarbeiten erfolgten Schwingungsmessungen an benachbarten Gebäuden sowie an verschiedenen Baugrundmesspunkten auf Höhe der Geländeoberkante. Mit den Schwingungsmessungen und der Einhaltung der Beurteilungskriterien nach DIN 4150 Teil 3 konnte sichergestellt werden, dass weder eine direkte noch eine indirekte dynamische Beanspruchung zu Gebrauchsminderungen, wie z. B. Rissen in der benachbarten Gebäudesubstanz oder lokalen Setzungen, führt.

**Fazit**

Die Kriterien der Systemwahl hinsichtlich der Einhaltung betrieblicher, baubetrieblicher und ökologischer Randbedingungen sowie der Minimierung von Risiken bezüglich Störungen und Bauzeitverlängerungen konnten bestätigt werden. Die Ausführung selbst in gefrorenem Baugrund über den Winter 2017/18 konnten ohne Verzögerungen unter logistischen

**Abb. 6:** Ergebnisse aus dynamischen Probebelastungen



**Abb. 7:** Impression zum Bauablauf

Höchstleistungen mit zwei Rammen wirtschaftlich ausgeführt werden (Abb. 7). Der Bauablauf konnte mithilfe von Wellengleichungsanalysen und dynamischen Probebelastungen hinsichtlich des Material- und Arbeitsaufwandes sowie der Arbeitsleistung optimiert werden. Durch eine regelmäßige Überwachung konnte außerdem ein negativer Einfluss aus der dynamischen Einwirkung hinsichtlich Erschütterungen ausgeschlossen werden. Somit bieten Fertigteilrammpfähle aus Stahlbeton im Vergleich zu anderen tiefgründigen Ertüchtigungsmaßnahmen neben den üblichen Systemvorteilen auch eine wirtschaftliche, hochwertige und transparente Gründungsvariante.

**QUELLEN**

- [1] Vogel, W.; Lieberenz, K.: Gebrauchstauglichkeit von Bahnstrecken auf weichem Untergrund, EI 9/2008, S. 28 – 36
- [2] Weisemann, U.; Wegener, D.: Fahrweggründungen auf organischen Weichschichten – ein Erfahrungsbericht, El-Sonderheft Geotechnik 2016
- [3] Tost, S.; Adam, B.; Einnaat, G.: Von der Erkundung bis zur Inbetriebnahme eines anspruchsvollen Abschnittes der Bahnstrecke Rostock – Berlin, Baugrundtagung 2014
- [4] Kempfert, H.; Kirchner, A.; Rübsam, M.; Krist, O.: Tiefgründungen von Eisenbahnfahrwegen mit Stahlbetonplatten auf Pfählen, EI 9/2013, S. 42 – 47
- [5] Vavrina, L.; Windeln, D.: Beispiel einer erschütterungsarmen Tiefgründung mit Fertigteilrammpfählen aus Stahlbeton, Bautechnik (94), 9/2017
- [6] Vavrina L., Adam B., Wardinghus P.: Erschütterungsarme Ausführung von Fertigteilrammpfählen aus Stahlbeton, Beispiel eines innerstädtischen Bauvorhabens in Dresden, Konstruktiver Ingenieurbau 4/2017



**Dr.-Ing. Lars Vavrina**  
 Projektleiter Statik  
 Aarsleff Grundbau GmbH, Hamburg  
 vavrina@arsleff-grundbau.de



**Dipl.-Ing. Peter Wardinghus MBA**  
 Geschäftsführer  
 Aarsleff Grundbau GmbH, Hamburg  
 wardinghus@arsleff-grundbau.de