



Besondere geotechnische Problemstellungen bei
der Gründung von semi-integralen Großbrücken

Referent	Dr.-Ing. M. Raithel Kempfert + Partner Geotechnik Tel.: +49 931 790 39-0 Fax: +49 931 790 39-20
Tagungsort	Ramada Hotel Leipzig Schongauer Straße 29 04329 Leipzig Tel.: +49 341 2540
Termin	27. Februar 2015

1 Einführung

Integrale Bauwerke zeichnen sich dadurch aus, dass der Überbau durchlaufend fugenlos ausgeführt ist und die Pfeiler und Widerlager monolithisch mit dem Überbau verbunden sind. Als semi-integral wird die Bauweise bezeichnet, bei der neben der monolithischen Verbindung zwischen den Unterbauten und Überbauten eine konventionelle Lagerung des Überbaus auf Pfeiler bzw. Widerlagern zur Ausführung kommt, siehe Abb. 1. Zu den semi-integralen Bauwerken zählen auch Aneinanderreihungen von integralen Rahmenbauwerken.

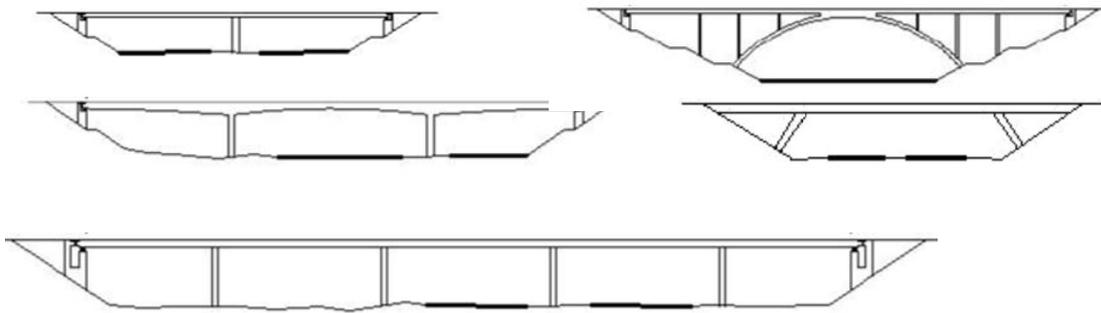


Abb. 1: Mögliche Brückengeometrien bei semi-integraler Bauweise schematisch aus [1]

Bei semi-integralen Brücken entsteht eine besondere Anforderung an der realitätsnahen Erfassung der Baugrund- und Gründungssteifigkeiten, da bei Verformungs- und Steifigkeitsdifferenzen in den Gründungen grundsätzlich Zwangsbeanspruchungen in die aufgehende Konstruktion eingeleitet werden, vgl. auch [5] und [6]. Des Weiteren können bei Verformungen im Überbau, Verschiebungen und Verdrehungen über die Pfeiler in die Gründung übertragen werden und damit auch zeitabhängig veränderliche Beanspruchungen auf die Gründung wirken. Diese Kräfte und Verformungen treten hierbei unter Umständen auch zyklisch, z.B. in Abhängigkeit der täglichen Temperaturschwankungen, auf.

Im Hinblick auf die Verformungsempfindlichkeit des Überbaus bei der integralen Bauweise sind größere semi-integrale Brückenbauwerke in der Regel in die Geotechnische Kategorie 3 einzustufen.

2 Erforderliche geotechnische Vorgaben für die Bemessung

Zur Berechnung des Gesamtsystems durch den Tragwerksplaner sind in der Regel Federkonstanten (Baugrundfedern) zur Abbildung des Tragverhaltens der Gründung erforderlich, wobei meist eine linear-elastische Berechnung des Bauwerkes und der Interaktion zwischen Bauwerk und Baugrund erfolgt.

Zur Ermittlung der Einwirkungen bzw. Beanspruchungen des aufgehenden integralen Brückenbauwerks infolge eines zu berücksichtigenden unterschiedlichen Tragverhaltens der einzelnen Gründungselemente stehen dabei grundsätzlich zwei Möglichkeiten zur Verfügung:

- a) Direkte Variation der Federkonstanten (Bettungsmodul und axiale Pfahlfedern) mit Vorgabe der wahrscheinlichen, d.h. i.d.R. mittleren Federkonstanten und der oberen und unteren Grenzwerte der Federkonstanten bzw. der möglichen Differenz der Federkonstanten zwischen den einzelnen Gründungselementen bzw. Stützpunkten.

b) Direkte Variation der Verformungen (Horizontalverschiebungen/Verdrehungen und Setzungen) bei Beibehaltung der mittleren Federkonstanten mit Vorgabe der wahrscheinlichen Verformungen sowie der oberen und unteren Grenzwerte der Verformungen bzw. der möglichen Differenz der Verformungen zwischen den einzelnen Gründungselementen bzw. Stützpunkten.

Unabhängig von den o.g. Möglichkeiten ist aber zunächst die Bandbreite der charakteristischen Einwirkungen auf die Gründung zu berücksichtigen. Die Angabe des zu erwartenden Gesamtausnutzungsgrades der Gründung bzw. der Bereiches der zu erwartenden charakteristischen Gesamtbelastungen (E_{min} und E_{max}) ist erforderlich, um aufgrund des in situ gegebenen nichtlinearen Tragverhaltens der Gründungselemente die Verformungs- bzw. Federgrößen durch eine angepasste Linearisierung (Sekantenmodul) im wirkenden Beanspruchungsbereich zu überprüfen und ggf. zu modifizieren, siehe Abb. 2.

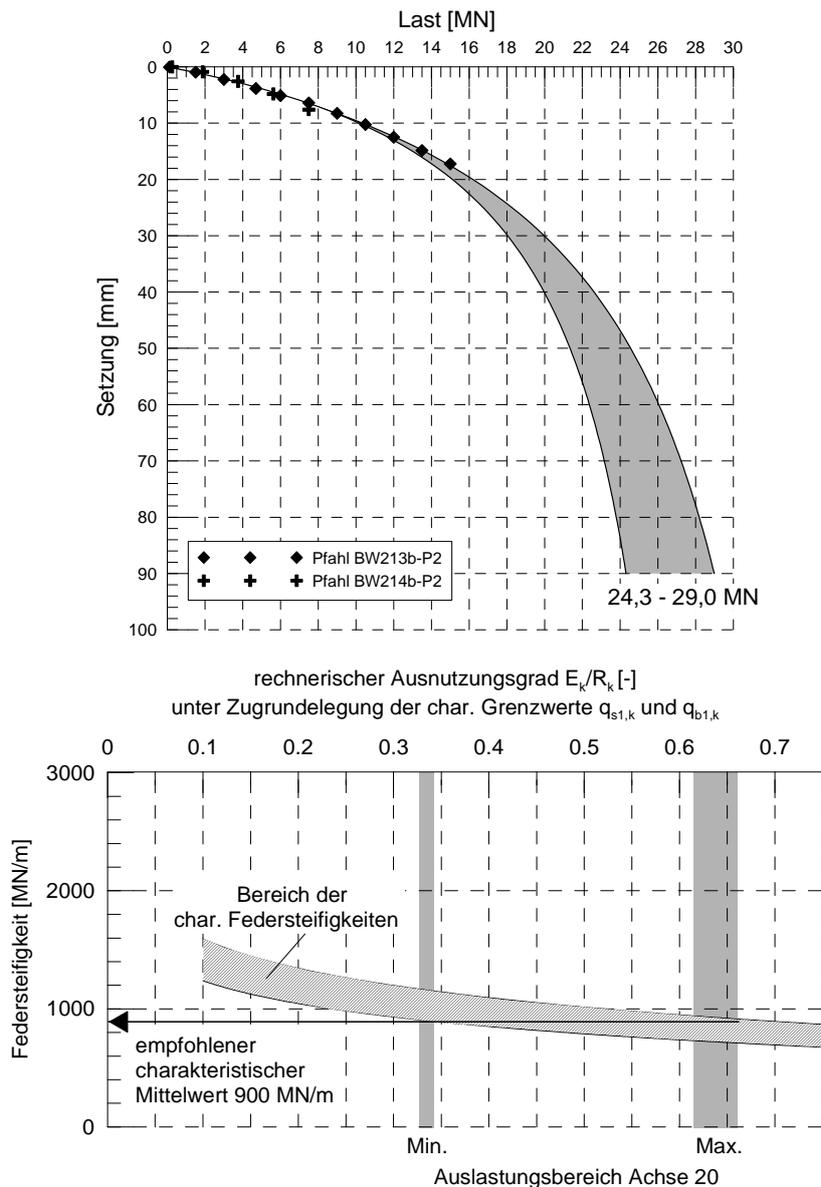


Abb. 2: Nichtlineares Lastverformungsverhalten (Beispiel Pfahlprobelastung) sowie Ableitung der charakteristischen Federkonstanten der Gründungspfähle bei einer semi-integralen Brücke, aus [2]

Da die Einwirkungen auf die einzelnen Gründungselemente zudem von der Verteilung der Federsteifigkeiten abhängen, ist eine nochmalige Überprüfung unter Berücksichtigung der Interaktion hinsichtlich der

Einwirkungsverteilung erforderlich. D.h. die Größe der zunächst vorgegebenen Federsteifigkeiten ist unter Berücksichtigung der danach berechneten Bandbreite der charakteristischen Einwirkungen auf die Gründung sowie der Änderungen der Einwirkungsverteilung bei Variation der Federsteifigkeiten nochmals zu überprüfen. Zusätzlich ist zu untersuchen, ob zyklische Einwirkungen (z.B. Temperaturveränderungen im Überbau) einen Einfluss auf die Größe der Federsteifigkeiten ausüben können.

Insofern ist eine interaktive Zusammenarbeit und kontinuierliche Abstimmung zwischen dem Geotechniker und dem Tragwerksplaner bei der Bemessung von (semi-)integralen Bauwerken zwingend erforderlich. Insbesondere sind dabei folgende Angaben zwischen dem Geotechniker und Tragwerksplaner abzustimmen.

- Die Bandbreite der charakteristischen Einwirkungen.
- Die bei der Berechnung des aufgehenden Bauwerks vorgesehene Modellierung des horizontalen und vertikalen Kraft-Verformungs-Verhalten der einzelnen Gründungselemente.
- Die Interaktion zwischen den einzelnen Gründungselementen (d.h. Verformung eines Gründungselementes bei Entstehen einer Zwangsverformung an einem Gründungselement).
- Die Lastwechselanzahl und ggf. Lastfrequenz von zyklischen Einwirkungen auf die Gründungselemente.

Bei der abschließenden Festlegung der Bandbreite der Federsteifigkeiten oder Verformungen (obere und untere Grenzwerte) ist die natürlichen Schwankungsbreite infolge der grundsätzlichen Prognoseunsicherheit (Baugrundinhomogenität) sowie der ggf. vorhandenen zeitlichen Veränderung der Steifigkeiten bei zyklisch/dynamischen Einwirkungen summarisch zu erfassen.

3 Erfassung von zyklischen Einflüssen auf das Gründungsverhalten

Aufgrund der temperaturabhängigen Verformungen des Überbaus können bei semi-integralen Brücken zyklische Einwirkungen auf die Gründung entstehen. Zyklisch-dynamisch beanspruchte Pfähle infolge Schwell- oder Wechsellasten weisen im Vergleich zu statisch belasteten Pfählen in der Regel eine deutlich geringere Tragfähigkeit verbunden mit erhöhten Verformungen auf. Dies wird auch in DIN EN 1997-1 bzw. DIN 1054:2010-12 sowie in der EA-Pfähle [3] deutlich hervorgehoben.

Sofern der axiale Anteil der zyklischen Pfahllasten (z.B. aus Temperatureinwirkung auf den Überbau und Übertragung der Überbaubeanspruchungen in die Gründung) unter 10 % des charakteristischen Pfahlwiderstandes im Grenzzustand der Tragfähigkeit ist, kann der verformungsvergrößernde Einfluss von zyklischen Lasten hinsichtlich des axialen Pfahltragverhaltens in der Regel vernachlässigt werden (vgl. EA-Pfähle). Zyklische Effekte hinsichtlich des horizontalen Pfahltragverhaltens können nur bei geringen zyklischen Lastanteilen i.d.R. näherungsweise vernachlässigt werden, wenn die Pfahlverschiebung klein bleibt und die Pfahlbiegeline durch eine rechnerische Vergrößerung der Pfahllänge nur unwesentlich beeinflusst wird. Ansonsten ist z.B. die zeitabhängige Veränderung der Pfahlbettung z.B. über P-Y-Kurven (vgl. EA-Pfähle) zu berücksichtigen.

Sofern erforderlich, sind zur Erfassung dieser Einflüsse zyklische Pfahlprobelastungen am Besten geeignet. Eine Simulation der tatsächlich bei semi-integralen Brücken zu erwartenden zyklischen Beanspruchungen infolge der Temperaturdifferenzen kann allerdings auch bei der Pfahlprobelastung nicht vollständig umgesetzt werden.

Im Kapitel 13 der EA-Pfähle (2. Auflage) sind Methoden und Berechnungsverfahren zur Prognose des Pfahltragverhaltens unter zyklisch-dynamischen Einwirkungen enthalten. Insbesondere das statische, zyklische und post-zyklische Pfahltragverhalten axial beanspruchter Pfähle kann z.B. mit dem Berechnungsmodell ZYKLAX (Thomas 2012) [4] zwischenzeitlich unter vielfältigen Randbedingungen (z. B. Belastungsart, Pfahlsystem, Bodenart und Bodenschichtung) rechnerisch ermittelt werden. Im Speziellen können sowohl die einzelnen Widerstandsanteile unter statischer Belastung als auch die Phänomene unter Schwell- und Wechsellasten nachgebildet werden, wie z. B. die Akkumulation der plastischen Verschiebung, die Entwicklung der elastischen Verschiebungen und die Änderung der Pfahltragfähigkeit, siehe Abb. 3.

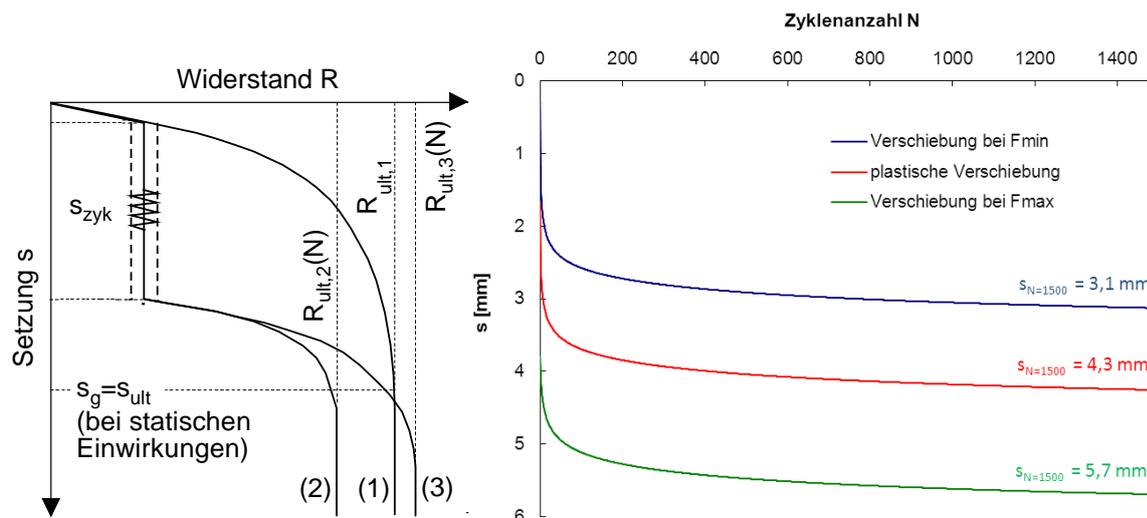


Abb. 3 Beispiele von Widerstand-Setzungs-Linien ohne zyklische Belastung (1) und nach zyklischer Belastung (post-zyklischer Belastung) (2) und (3) aus [3] sowie einer mit ZYKLAX berechneten zyklischen Verformungsakkumulation

Es sei aber ausdrücklich darauf hingewiesen, dass die Berechnungsergebnisse und Prognosen unmittelbar abhängig sind von der Qualität und Absicherung der Eingangsparameter, z.B. Ergebnisse von statischen und zyklischen Pfahlprobelastungen oder Laborversuchen, usw. und daher in Abhängigkeit von der zur Verfügung stehenden Datengrundlage entsprechende Unsicherheiten bei der Prognose bestehen. Diese sind daher durch entsprechende Faktoren bzw. durch eine Vergrößerung des Schwankungsbereiches der Federsteifigkeiten zu berücksichtigen.

4 Pfahlprobelastungen

Sofern semi-integrale Brückenbauwerke auf Pfählen gegründet werden, ist zu überprüfen, ob Pfahlprobelastungen erforderlich sind.

Nach dem Regelwerk sollen grundsätzlich möglichst Pfahlprobelastungen zur Ermittlung des tatsächlich vorhandenen Tragverhaltens durchgeführt werden. Hinsichtlich der Festlegung der Größe und Verteilung des Bettungsmoduls $k_{s,k}$ gilt allgemein, dass die Herleitung aus dem Steifemodul $E_{s,k}$ und dem Schaftdurchmesser D_S nach der Gleichung $k_{s,k} = E_{s,k}/D_S$ nur zur Ermittlung der Schnittgrößen und nicht der tatsächlichen Verformungen dienen darf, wenn die Verformungen der Pfahlgründungen für das Trag-

verhalten des Bauwerks von Bedeutung sind und keine Erfahrungen z.B. aus vergleichbaren Pfahlprobelastungen vorliegen, vgl. DIN EN 1997-1, DIN 1054:2010-12 und EA-Pfähle.

Sinngemäß können Pfahlprobelastungen bei semi-integralen Bauwerken somit nur dann entfallen, wenn auch entsprechend große Schwankungsbreiten der horizontalen Verformungen nachweisbar vom Gesamtsystem der Brücke schadfrei aufgenommen werden können und somit die Horizontalverformungen für das Bauwerk nicht mehr von Bedeutung sind oder wenn die Größe und Verteilung des Bettungsmoduls durch entsprechende Erfahrungswerte (aus Pfahlprobelastungen) hinreichend genau angegeben werden können.

Bei der Konzeption von Probelastungen empfiehlt es sich als Reaktionselemente ebenfalls Pfähle zu verwenden, da dann nach der vertikalen Probelastung eine horizontale Probelastung durch Auseinanderdrücken zweier Pfähle erfolgen kann. siehe Abb. 4.

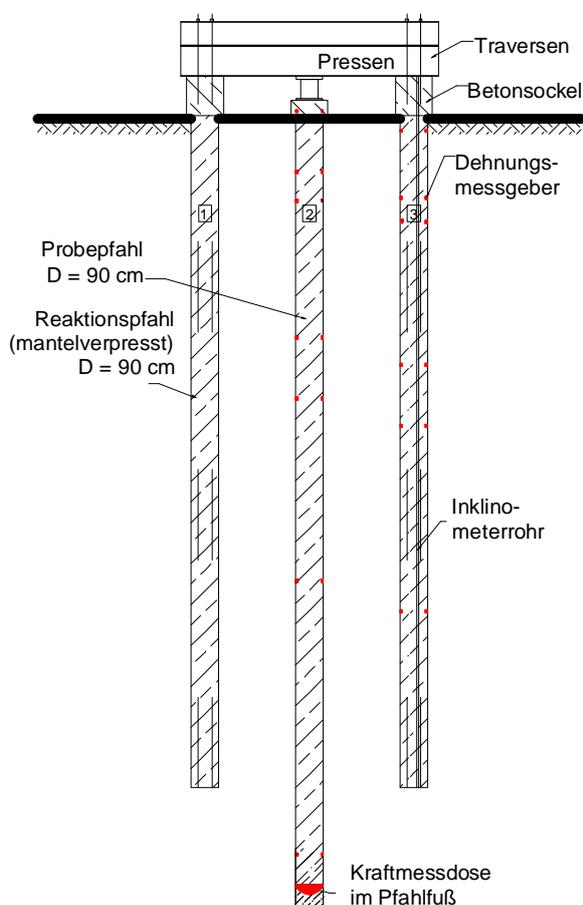


Abb. 4: Schematische Darstellung einer axialen Pfahlprobelastung und Bild einer horizontalen Pfahlprobelastung

Um dann eine Aussage der tatsächlich vorliegenden Bettungsmoduln vorzunehmen, wird die Biegelinie der Pfähle nach dem Bettungsmodulverfahren berechnet und die Bettung der Pfähle schrittweise so angepasst, dass eine möglichst gute Annäherung an die gemessenen Biegelinien erfolgt.

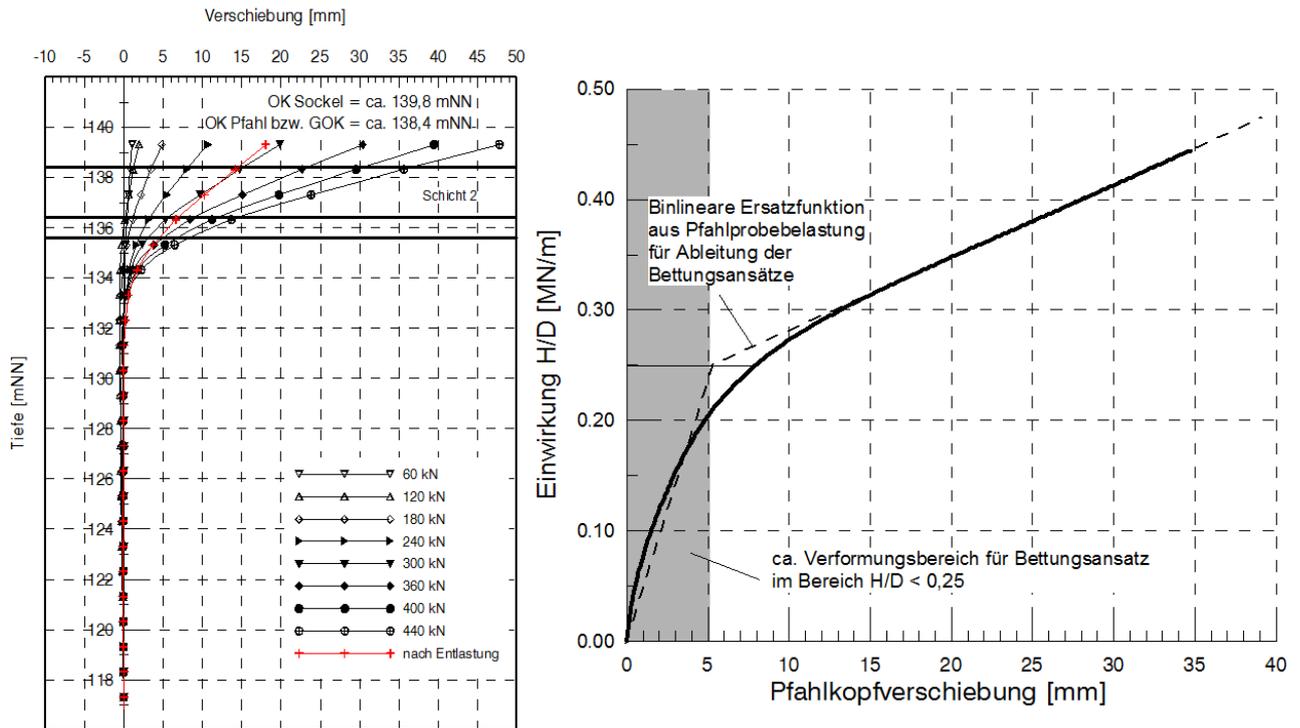


Abb. 5: Beispiel für die Auswertung einer horizontalen Pfahlprobebelastung

5 Anwendung von FEM-Berechnungen

Zur Ermittlung des Verformungsverhalten der Gesamtgründung können bei komplexen Gründungsverhältnisse zwei- und dreidimensionale numerische FEM-Kontinuumsmodelle angewendet werden, siehe Abb. 6.

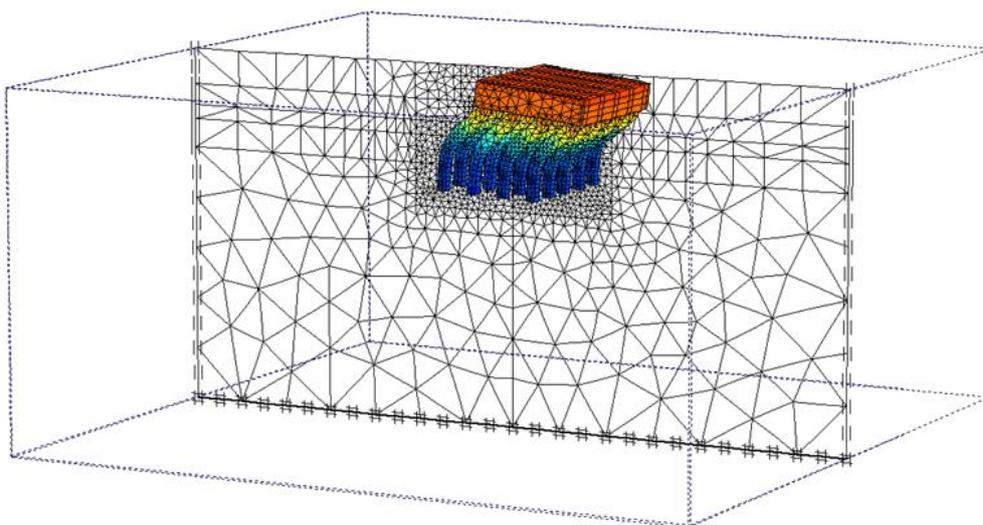


Abb. 6: Exemplarische Darstellung der berechneten Gründungsverformungen einer semi-integralen Brücke im dreidimensionalen Kontinuumsmodell (Verformungen überhöht dargestellt)

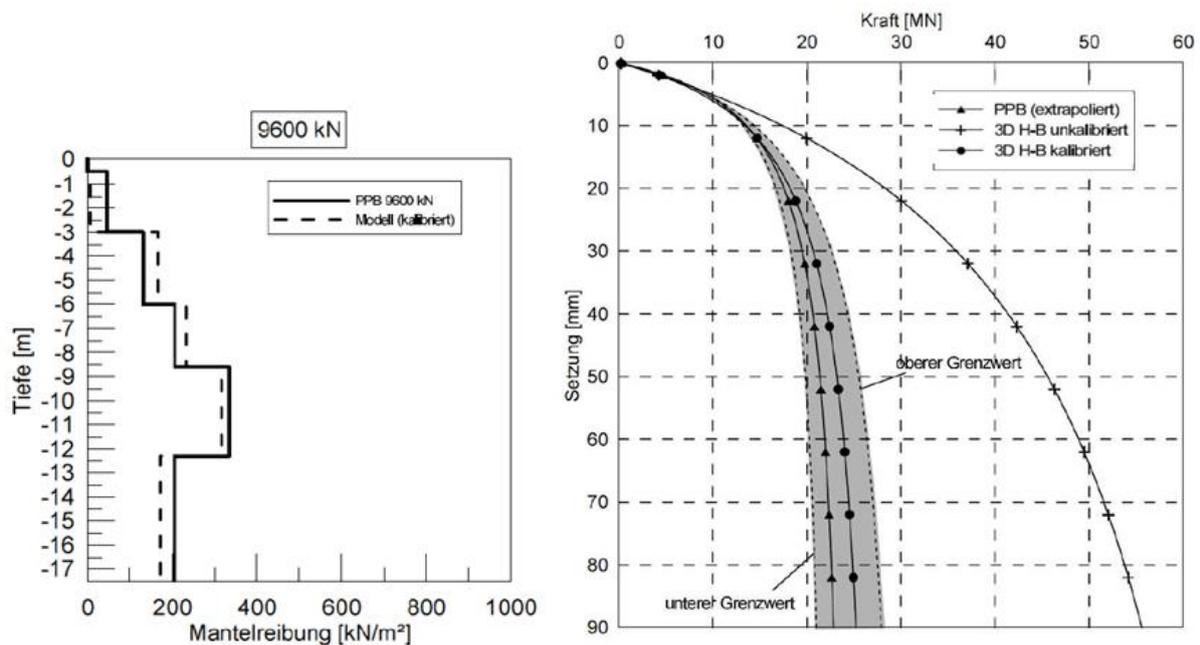


Abb. 7: Exemplarische Darstellung der Kalibrierung der FEM-Berechnung durch Vergleich von gemessener und berechneter Mantelreibung (links) und Widerstands-Setzungslinie (rechts) einer Pfahlprobelastung

Allerdings ist das tatsächliche Tragverhalten einer Pfahlgründung mit erdstatischen oder numerischen Berechnungsmethoden grundsätzlich nur begrenzt abschätzbar. In der EA-Pfähle wird explizit darauf hingewiesen, dass sich die wirklichkeitsnahe Modellierung mit der FEM als schwierig herausgestellt hat und dass FEM-Berechnungen nur für die Ermittlung des Trag- und Verformungsverhaltens von Pfählen eingesetzt werden sollen, sofern diese für die vorgesehene Anwendung an vergleichbaren Pfahlprobelastungsergebnissen kalibriert worden sind, vgl. Abb. 7.

Da bei Großbrücken in der Regel große Pfahlgruppen zur Gründung verwendet werden, ist sinnvollerweise zunächst das horizontale und vertikale Tragverhalten des Einzelpfahles in FEM-Berechnungen unter Zugrundelegung von entsprechenden Pfahlprobelastungen am Einzelpfahl zu kalibrieren (Nachrechnung der Probelastungsergebnisse bei Anpassung der Berechnungsparameter des Bodens/Fels). Das kalibrierte Modell ist dann auf die Abbildung der gesamten Pfahlgründung inkl. Pfahlkopfplatte zu erweitern. Die Federsteifigkeiten sollten dabei grundsätzlich anhand einer dreidimensionalen Modellierung der gesamten Pfahlgruppe einer Gründung abgeleitet bzw. überprüft werden. Zweidimensionale Berechnungen bzw. Berechnungen des Einzelpfahles erfassen die Interaktion zwischen den Einzelpfählen und mit der Pfahlkopfplatte nicht vollständig.

Es sind Sensitivitätsstudien bzw. Berechnungen mit oberen und unteren Grenzwerten der Bodenparameter im FEM-Modell erforderlich. Die oberen und unteren Grenzwerte sind dabei ausgehend von den kalibrierten Berechnungsparametern unter Berücksichtigung der möglichen Baugrundinhomogenitäten bzw. natürlichen Schwankungsbereiche der Steifigkeiten festzulegen. Anhand der Ergebnisse der Sensitivitätsstudie ist die Vorgabe des Schwankungsbereiches der Federsteifigkeiten zu überprüfen.

6 Schlussbemerkung

Vorgenannte Ausführungen zeigen auf, dass die Gründung von semi-integralen Bauwerken besondere Anforderungen bei der geotechnischen Bearbeitung, Planung und in der bauaufsichtlichen Prüfung erfordert. Insbesondere zur Erfassung und Festlegung der anzusetzenden Gründungssteifigkeiten unter Berücksichtigung der Boden-Bauwerk-Wechselwirkung ist hierbei ein kontinuierliches und interaktives Zusammenwirken zwischen dem Geotechnikingenieur und dem Tragwerksplaner sowohl auf der aufstellenden als auch auf der prüfenden Seite erforderlich.

7 Literatur

- [1] Fuchs, M.: Besonderheiten beim Entwurf (semi-) integraler Straßenbrücken. Massivbau-Kolloquium der Technischen Universität München 2010.
- [2] Raithel, M.; Kempfert, H.-G.; Leusink, E. : Geotechnische Problemstellungen bei der Ausführung von semi-integralen Brückenbauwerken am Beispiel der Fahrbachtal- und Glattbachtalbrücke. 7. Symposium Brückenbau 2007, Leipzig, S. 54 . 58. Vortragsband.
- [3] EA-Pfähle: Tragverhalten und Nachweise für Pfähle unter zyklischen, dynamischen und stoßartigen Einwirkungen. Kapitel 13, Empfehlungen des Arbeitskreises „Pfähle“ 2. Auflage, DGGT e.V., Verlag Ernst und Sohn, 2012.
- [4] Thomas, S.: Zum Pfahltragverhalten unter zyklisch axialer Belastung, Schriftenreihe Geotechnik, Universität Kassel, Heft 25, 2012.
- [5] Krist, O.; Raithel, M.: Geotechnische Anforderungen bei der Gründung von (semi-) integralen Brücken. EI-Eisenbahningenieur Heft 7/2012 (weitgehend übernommen).
- [6] Maurer, R; Raithel, M: Semi-integralen Brücken. 16. Jahresfachtagung der Eisenbahn-Sachverständigen, Fulda. Vortragsband, 2014.