

Nichtlineare Berechnungen von Stahlverbundpfählen an den Schiffsabweiserbauwerken der Brücke Rosario-Victoria in Argentinien

Adelheid Bacher, Reiner Saul, Karl Humpf, Armin Patsch
Leonhardt, Andrä und Partner GmbH, Büro Stuttgart

ZUSAMMENFASSUNG

Für die jüngst fertiggestellte Schrägkabelbrücke über den Paraná-Fluss zwischen Rosario und Victoria in Argentinien wurden zum Schutz der Brückenpfeiler vor Schiffsanprall Schiffsabweiserplattformen entwickelt. Diese sind für vom Fahrwasser abgekommene Schiffe bis zu einer Größe von 100.000 Tonnen ausgelegt und bestehen aus Gruppen von großformatigen Stahlverbundpfählen, die über Stahlbetonkopflplatten miteinander verbunden sind. Bei einem Schiffsanprall sollen sich die Plattformen weit verschieben können und durch große plastische Verformungen der Pfähle Anprallenergie vernichten. Für diesen bis zur Zerstörung der Pfähle reichenden Lastfall mussten neuartige Bemessungsansätze formuliert werden, die in Laborversuchen überprüft wurden. Die Berechnung und Bemessung der Pfähle sowie Vergleichsrechnungen zu den Versuchen erfolgte mit dem Programmsystem SOFISTIK.

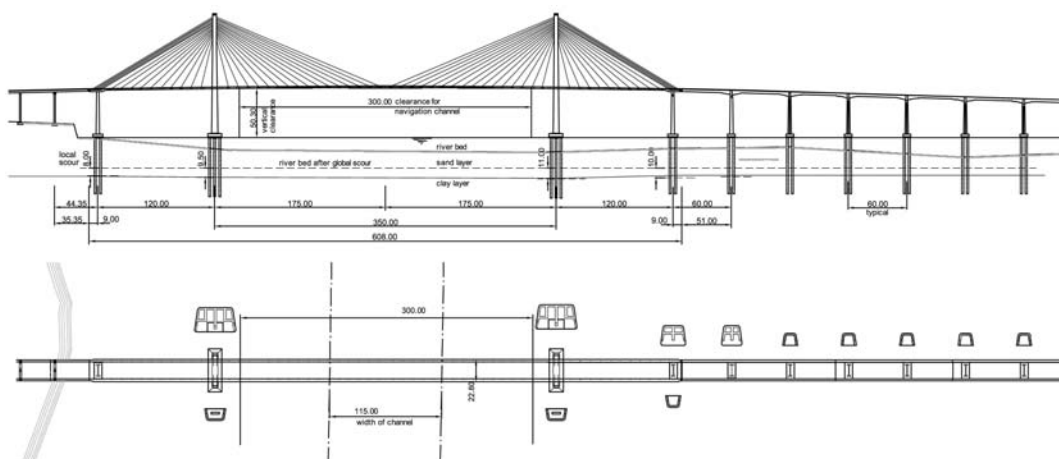


Abb. 1 Ansicht und Grundriss der Hauptbrücke, eines Teils der Vorlandbrücken und der Schiffsabweiserplattformen

EINFÜHRUNG

Das Hauptbauwerk der neuen Verbindung zwischen den beiden 55km entfernten Städten Rosario und Victoria ist eine Schrägkabelbrücke mit einem Hauptfeld von 350m Länge. Die Pylone und Pfeiler der Hauptbrücke sowie die Pfeiler einiger Vorlandbrücken sind dem Risiko des Schiffsanprall von aus dem Fahrwasser geratenen Schiffen ausgesetzt. Um die Gründung der Brückenpfeiler zu schützen, wurden Schiffsabweiserplattformen vorgelagert, die bei einem Anprall einen Teil der Anprallenergie aufnehmen und die Schiffe ablenken.

Aufgrund einer Wahrscheinlichkeitsanalyse ergab sich ein Bemessungsschiff mit 43.000 Tonnen Wasserverdrängung, was einer Schiffsgröße von 204 x 32 m entspricht, das mit einer Geschwindigkeit von 4,64 m/s flussabwärts fährt. Die damit anzusetzende kinetische Energie beträgt 453 MNm.

Für die Bemessung der Schiffsabweiserbauwerke wurde ein Kollisionskurs der Schiffe rechtwinklig zur Brückenachse angesetzt, wobei die Schiffsabweiserbauwerke zusätzlich die Hälfte der kinetischen Energie in Querrichtung aufzunehmen hatten.

KONSTRUKTION

Die Schiffsabweiserbauwerke sind Stahlbetonplattformen, die auf Pfählen mit einem Durchmesser von 2m gegründet sind. Die Plattformen haben einen lichten Abstand von 17,50 m zu den Gründungen der Brücke, so dass im Falle eines Anpralls große horizontale Verformungen möglich sind.

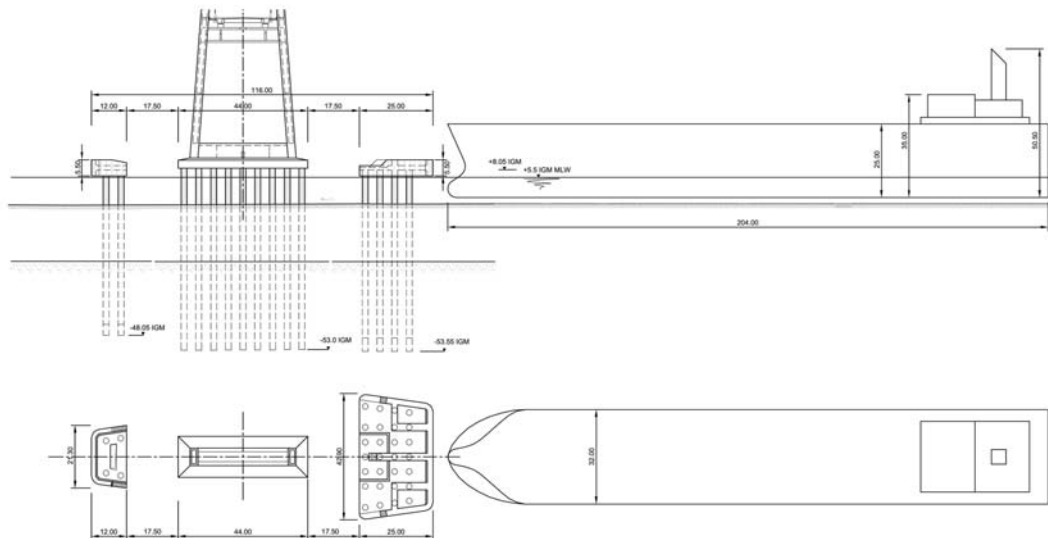


Abb. 2 Schiffsabweiserbauwerke der Pylone der Hauptbrücke mit Bemessungsschiff

Die Pfähle sind Verbundpfähle aus bewehrtem Beton mit außenliegendem Stahlmantel, der eine Streckgrenze von 690 N/mm^2 , eine Zugfestigkeit von mindestens 790 N/mm^2 und im Bereich des maximalen Momentes eine Wandstärke von 24 mm hat. Die Pfahllänge variiert von ca. 55 bis 60 m . Der minimale Pfahlabstand beträgt $5,0 \text{ m}$ ($2,5 \times$ Durchmesser) bei einer Mindestanzahl von vier Pfählen je Plattform. Der Anschluss der Pfähle an die Plattform wurde gelenkig ausgebildet. Die Plattform wurde sehr steif ausgelegt, um die Anprallkraft gleichmäßig auf alle Pfähle zu verteilen. Dadurch wird die aufnehmbare Energie alleine durch das Last-Verschiebungs-Verhalten der Pfähle bestimmt.

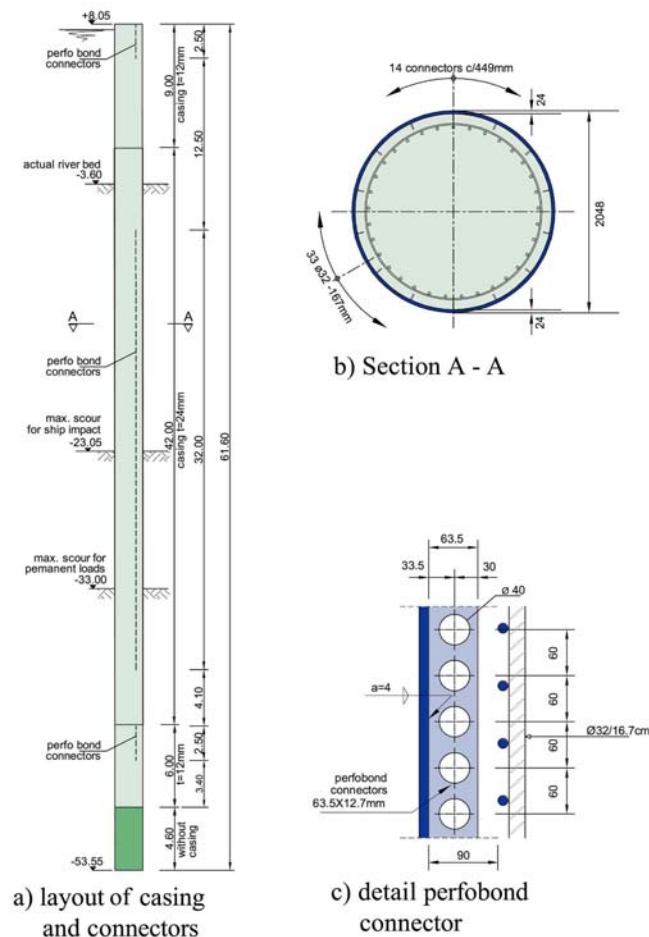


Abb. 3 Stahlverbundpfahl

BERECHNUNG UND BEMESSUNG

Das mechanische Verhalten der Pfähle unter Schiffsanprall ist ein sehr komplexes Problem, da für die erwarteten großen Verformungen sowohl der Pfahl als auch der einspannende Boden nichtlineares Verhalten aufweist.

Die Berechnung dieses nichtlinearen Pfahl-Boden-Systems wurde mit dem Programmsystem SOFISTIK durchgeführt.

Die Pfähle wurden als in den Boden eingespannte Stäbe modelliert, wobei verschiedene Kragarmlängen untersucht wurden. Die minimale Länge richtete sich nach der kleinsten vorhandene Wassertiefe. Die maximale Länge nach den größten zu erwartenden Auskolkungen, das sind durch die Strömung hervorgerufene Ausspülungen im Bereich der Pfähle.

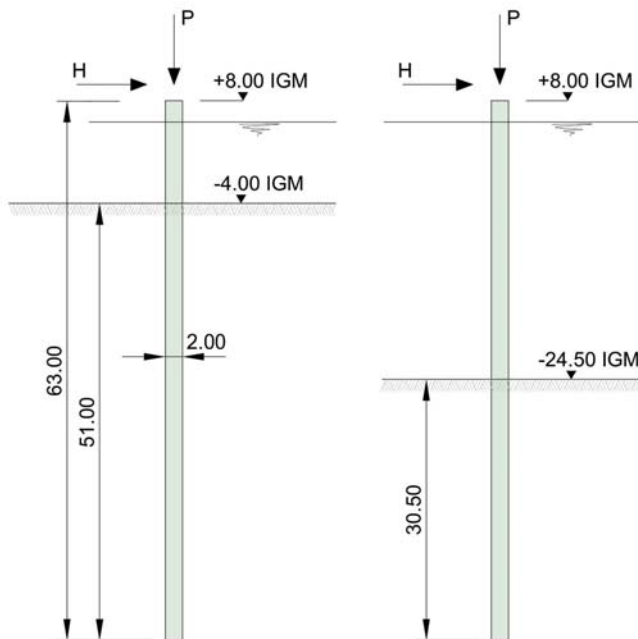


Abb. 4 Systemgeometrie für minimale und maximale Auskolkung

Die Einspannung im Boden wurde mit horizontalen Einzelfedern mit elastisch-plastischen Kennlinien modelliert.

Die angesetzte Federsteifigkeit und maximale Fließlast wurde aus ebenen FE-Berechnungen für verschiedene horizontale Schichten entnommen, die die Abhängigkeit des Bodens von den Bodenkennwerten bei großen Verformungen, der Einbindetiefe sowie von den Pfahlgruppeneffekten der eng beieinanderstehenden Pfähle berücksichtigt.

Für die Berechnung der erforderlichen großen plastischen Verformungen der Pfähle wurden bei der Arbeitslinie des hochfesten Stahls Dehnungen bis zu 8% zugelassen. Diese wurden im Programm AQUA mit einer bilinearen Arbeitslinie in Anlehnung an die Spannungs-Dehnungs-Linie aus Zugversuchen modelliert.

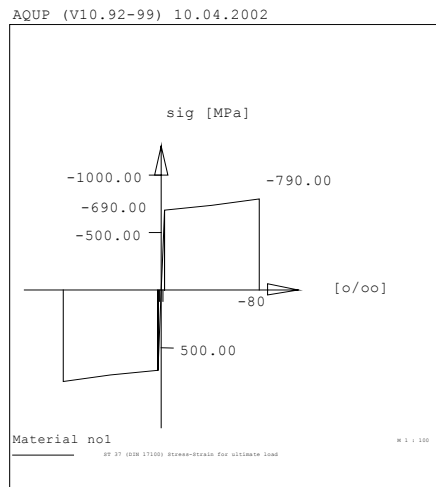


Abb. 5a Arbeitslinie des Mantelstahls

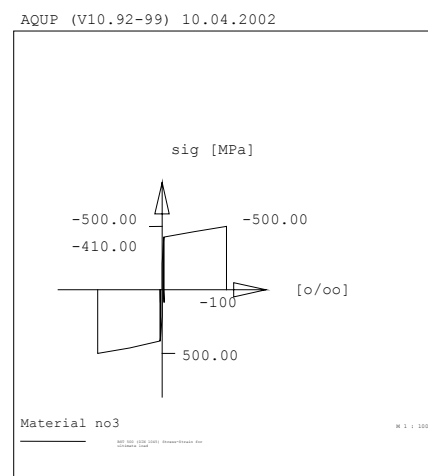


Abb. 5b Arbeitslinie des Bewehrungsstahls

Die Berechnung des Pfahls erfolgte mit dem Programm STAR nach Theorie 2. Ordnung. Für die ständigen Lasten und den Schiffsanprall wurde ein einheitlicher Sicherheitsfaktor von $\gamma = 1,0$ angesetzt.

Um die aufnehmbare Energie eines Anpralls zu ermitteln, wurde die Last-Verschiebungskurve der Horizontallast und zugehöriger Pfahlkopfverschiebung berechnet. Diese ist für maximale und minimale Auskolkung in Abb. 6 exemplarisch dargestellt. Die Lastverschiebungskurve zeigt nach einem Lastmaximum einen deutlichen Abfall der aufnehmbaren Horizontallast. Dies ist der Einfluss nach Theorie 2. Ordnung der vertikalen Auflast der Plattform bei großen Auslenkungen.

Um im Bereich des Lastmaximums und im absteigenden Ast der Last-Verformungskurve Ergebnisse zu erhalten, wurde mit Verformungslastfällen gerechnet.

In teilweise über 500 Iterationen wurde zu jedem Verformungslastfall die zugehörige Belastung und der zugehörige Spannungs- und Dehnungszustand in dem sich bildenden Fließgelenk ermittelt, bis die maximale Grenzdehnung im Stahlmantel erreicht wurde.

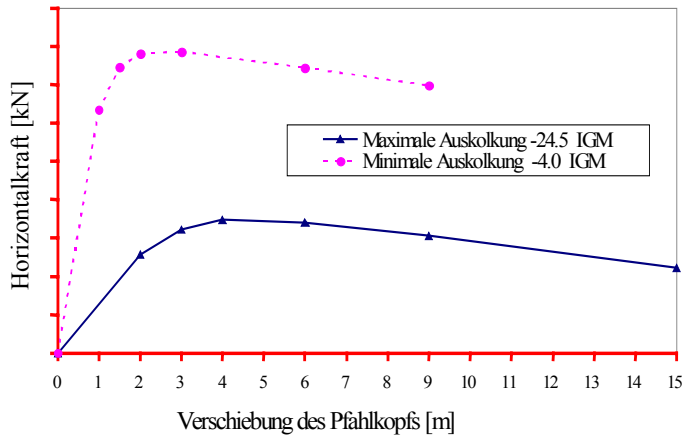


Abb.6 Last-Verformungskurve eines Pfahles für minimale und maximale Auskolkung

Infolge der großen zulässigen Dehnungen des Stahls entwickelt sich an der Stelle des maximalen Momentes ein plastisches Gelenk im Verbundquerschnitt.

Bei Erreichen der maximal zugelassenen Randdehnung von 8% des Stahlmantels treten im plastischen Gelenk Drehwinkel von bis zu 20° auf. Die maximalen Horizontalverschiebungen des Pfahlkopfes ergeben sich bei geringer Auskolkung zu bis zu 9m und bei großer Auskolkung bis zu 15m.

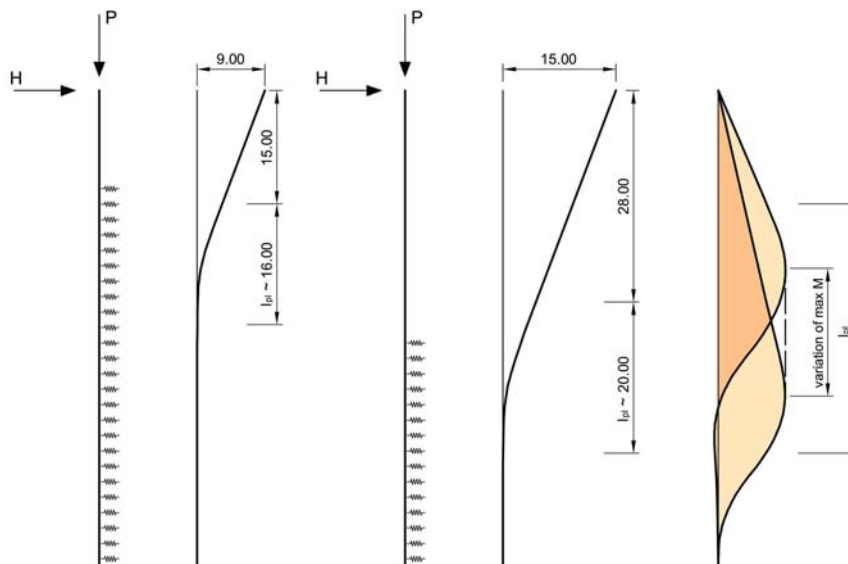


Abb. 7 Federlagerung, maximale Kopfverschiebung und Biegemomentenverläufe für minimale und maximale Auskolkung
 l_{pl} : Bereich plastischer Dehnungen

Die Berechnungen ergaben, dass über eine Länge von ungefähr 16 bis 20 m, d.h. ca. 1/3 der Pfahlänge plastische Verformungen auftreten, Abb. 7. Dies bestimmt weitgehend die Dimensionierung und die Materialverteilung des Verbundpfahls.

Die Größe des Bereichs mit plastischen Verformungen hängt wie die Höhe des plastischen Gelenkes zum einen von der Bodensteifigkeit zum anderen von der freien Pfahlänge bzw. Auskolkung ab.

Für die verschiedenen Randbedingungen bezüglich Auskolkung, statischer Auflast aus der Plattform, und Bodenkennwerten wurde eine Vielzahl von Berechnungen durchgeführt. Mit möglichst minimaler Stahlmanteldicke und Bewehrung sollte bei Erreichen des Fließgelenkes die für die hohe aufnehmbare Energie erforderliche hohe Belastung und Verformung erreicht werden. Dafür musste die Einbindelänge in den Boden so groß gewählt werden, dass eine ausreichende Einspannung in den Boden wirksam wurde und ein Durchpflügen des Bodens durch den Pfahlfuß verhinderte.

PARAMETERSTUDIEN

Um die Auswirkungen möglicher Abweichungen von den Bemessungsannahmen abschätzen zu können, wurden verschiedene Bemessungsparameter variiert.

Einige Ergebnisse sind in Abb. 8 dargestellt.

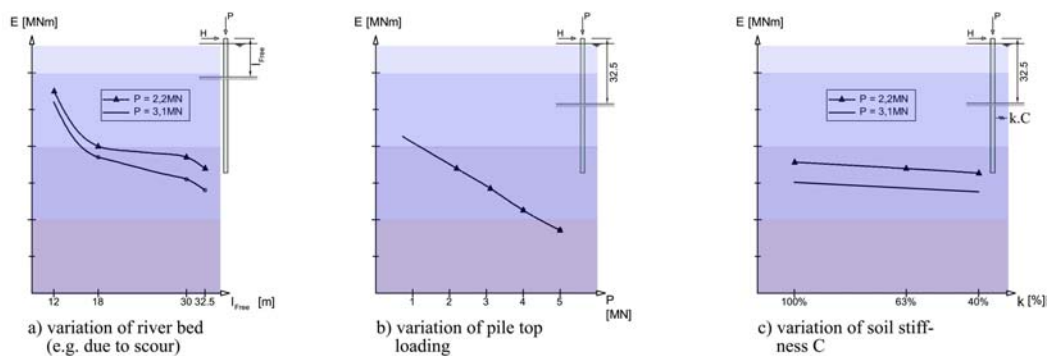


Abb. 8 Aufnehmbare Energie in Abhängigkeit von
a) der freien Pfahlänge, b) der Vertikallast und c) der Bodensteifigkeit

Die Zunahme der freien Pfahlänge bei a) und der vertikalen Auflast bei b) bewirken infolge der Effekte der Theorie 2. Ordnung eine Zunahme des Moments ohne Steigerung der Horizontallast. Dadurch reduziert sich die bei maximalem Moment aufnehmbare Energie.

Die Änderung der Bodensteifigkeit bei c), die zum Beispiel von Pfahlgruppeneffekten herrühren kann, zeigt nur geringen Einfluss auf die aufnehmbare Energie des Pfahles. Um jedoch bei geringer Bodensteifigkeit ein Durchpflügen des Pfahlfußes zu vermeiden, muss die Einbindelänge des Pfahls genügend groß gewählt werden.

VERSUCHE

Von der Universität Cordoba in Argentinien wurden Biege-Versuche an einem 2,10 m langen Verbundstab mit einem Durchmesser von 136 mm durchgeführt. Die betongefüllte Röhre zeigte eine stetige Laststeigerung bis zum Bruch. Dieser erfolgte durch Zugversagen des Stahls im höchstbelasteten Querschnitt in Feldmitte, als der Mantelstahl seine maximale axiale Zugspannung erreichte.

Um das angesetzte Rechenmodell zu überprüfen, wurde zu den Versuchen eine Vergleichsrechnung mit SOFISTIK durchgeführt.

Die Spannungs-Dehnungslinie des Stahls war einmal etwas gröber durch eine bilineare Arbeitslinie und einmal etwas genauer durch eine trilineare Arbeitslinie abgebildet. Die Berechnung mit der genaueren Abbildung der Arbeitslinie kommt den Versuchsergebnissen sehr nahe. Die großzügigere Abbildung ergibt etwas geringere Lasten, die jedoch auf der sicheren Seite liegen.

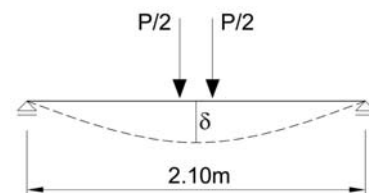
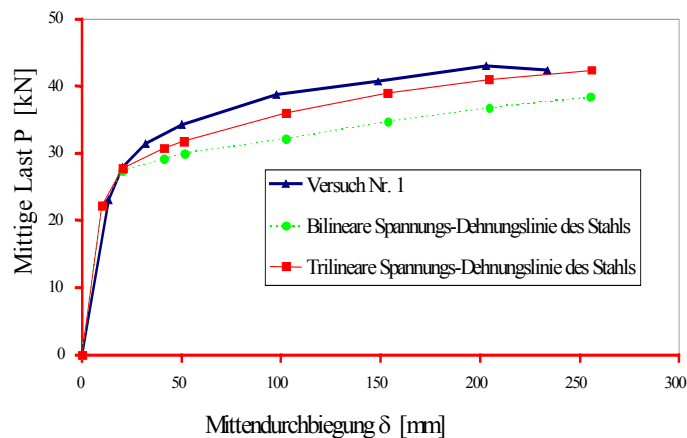


Abb. 9a Last-Verschiebungs-Kurve des Versuchs im Vergleich mit dem numerischen Modell Abb. 9b Versuchsanordnung

SCHLUSSBEMERKUNG

Die Verwendung von Stahlverbundpfählen für ein Schiffsabweiserbauwerk erwies sich als sehr günstig, da das sehr duktile Verhalten der Stahlverbundpfähle die für eine große Energievernichtung erforderlichen großen Deformationen mit großen Verdrehungen im plastischen Gelenk möglich macht.

Die gute Übereinstimmung der Versuchsergebnisse mit der Vergleichsrechnung bestätigte die Gültigkeit des angenommenen numerischen Modells für das mechanische Verhalten eines solchen Verbundpfahles.