

Zum Ansatz von Verbundspannungen bei Verpressmörtelpfählen

H.-G. Kempfert, J. Lüking, B. Mardfeldt

Zusammenfassung Der Beitrag beschäftigt sich mit der Verbundspannung in der Fuge Pfahlschaft/Verpressmörtel bei Rammverpress- und Rüttelinjektionspfählen. Die E DIN 18538 nennt für diese Fuge Bemessungswerte, die deutlich unter denen in der Praxis gemachten Erfahrungswerten liegen. Mit experimentellen, numerischen und statistischen Methoden wurde das Tragverhalten der Fuge untersucht. Dabei zeigen die Ergebnisse, dass die Pfahlgeometrie und ein Quellmittel im Verpressmörtel einen entscheidenden Einfluss auf die Größe der Verbundspannung haben. So treten Verspannungseffekte zwischen gegenüberliegenden Flächen (z. B. Innenflanschen) auf, die die Verbundspannung erhöhen. Ebenfalls zeigt sich ein Einfluss der Verpressmörteldicke auf die Größe der wirkenden Verbundspannung. Abschließend werden neue Bemessungswerte abgeleitet, die zeigen, dass die Werte der E DIN 18538 hohe Sicherheitsreserven aufweisen.

Investigations of the bond stress of driven piles with grouted skin

Abstract The paper focuses on the bond stress in the joint between pile shaft and grouting mortar of driven piles with grouted skin and driven grouted piles. The prestandard E DIN 18538 specifies design values for this joint, which are lower than the experiences of the construction site. This results in uncertainties in the execution phase. The load bearing behaviour of the joint was investigated by experimental, numerical and statistical methods. The results show that the magnitude of the bond stress depends on the profile geometry, use of an expanding agent and the thickness of the grouting mortar. A restraint effect occurs between opposite sides of the profile (i. e. between the inner flange). Concluding new design values are proposed which depends on profile geometry and the use of an expanding agent.

Prof. (em.) Dr.-Ing. Hans-Georg Kempfert

Universität Kassel, Fachgebiet Geotechnik
Mönchebergstr. 7, 34125 Kassel
geotech@uni-kassel.de

Dr.-Ing. Jan Lüking

HOCHTIEF Solutions AG
Lübeckertordamm 1, 20099 Hamburg
Jan.Lueking@hochtief.de
ehemals Universität Kassel, Fachgebiet Geotechnik

Dr.-Ing. Björn Mardfeldt

Hamburg Port Authority (HPA)
Neuer Wandrahm 4, 20457 Hamburg
Bjoern.Mardfeldt@hpa.hamburg.de

1 Einleitung

Ein Verpressmörtelpfahl (VM-Pfahl) ist ein Verdrängungspfahl nach DIN EN 12699 [1], dessen Pfahlschaft aus unterschiedlichen Stahlprofilen wie z. B. Rundstahl, H-Profil, Doppel-U-Profil, rechteckige oder quadratische Hohlprofile bestehen kann. Der Pfahlschuh weist eine rechteckige oder quadratische Pfahlspitze auf, die an den Pfahlschaft angeschweißt ist. Beim Einbringen des Pfahles entsteht ein Hohlraum, der rambbegleitend mit Zementsuspension (Verpressmörtel) verpresst wird.

Zur Bemessung der Fuge Pfahlschaft/Verpressmörtel nennt die E DIN 18538 [2] Verbundspannungen, die allerdings deutlich unter denen im Vergleich zu ähnlich konstruierten Bauteilen liegen, wodurch sich Unsicherheiten bei der Anwendung ergeben. Dieses wurde zum Anlass genommen experimentelle und numerische Untersuchungen durchzuführen, um die Tragfähigkeit der Fuge Pfahlschaft/Verpressmörtel eingehend zu untersuchen und Tragfähigkeitswerte abzuleiten.

Im Folgenden werden zunächst die Pfahlssysteme, die von der angesprochenen Problematik betroffen sind, kurz vorgestellt und die derzeitigen Regelungen nach E DIN 18538 [2] erläutert, bevor ausführlich auf die durchgeführten Modellversuche eingegangen wird. Mit Hilfe dieser Versuche wurde der Einfluss unterschiedlicher Randbedingungen untersucht. Anschließend erfolgte eine numerische Simulation, die an den Modellversuchen validiert wurde. Beispielrechnungen und eine Bewertung schließen diesen Beitrag ab. Eine Dokumentation sämtlicher Versuchsergebnisse ist in [3] und [4] gegeben.

2 Übersicht zu verpressten Verdrängungspfahl-Systemen

2.1 Allgemeines

Die DIN EN 12699 [1] versteht unter einem verpressten Verdrängungspfahl einen Fertigpfahl, der mit einem aufgeweiteten Pfahlfuß versehen ist. Dieser soll entlang des gesamten Pfahlumfangs oder eines Teils davon einen Hohlraum bilden, der während des Einbringens mit Mörtel (Verpresszement, feinkörniger Beton) verfüllt wird. Nach der EA-Pfähle [5] können verpresste Verdrängungspfähle u. a. in die Unterkategorien Verpressmörtelpfähle und Rüttelinjektionspfähle unterteilt werden. Im Folgenden ist zu diesen Pfahlssystemen eine kurze Beschreibung gegeben, die im wesentlichen [6] entnommen ist. Anschließend werden die Grundlagen zum Lastabtrag in der Fuge Pfahlschaft/Verpressmörtel kurz zusammengefasst.

2.2 Verpressmörtelpfahl (VM-Pfahl)

Ein Verpressmörtelpfahl (VM-Pfahl) ist ein Verdrängungspfahl, der auch unter dem Namen Mantelverpresspfahl (MV-Pfahl), nach seinem Erfinder Müller-Verpresspfahl (MV-Pfahl) oder als Rammverpresspfahl (RV-Pfahl) bekannt ist.

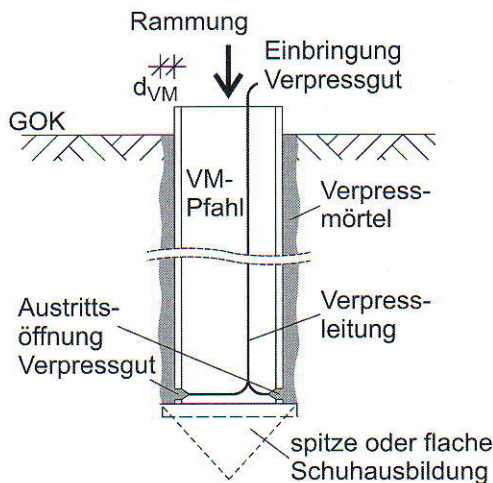


Bild 1. Schematischer Rammvorgang eines RV-Pfahls
Fig. 1. Piling of a driven pile with grouted skin

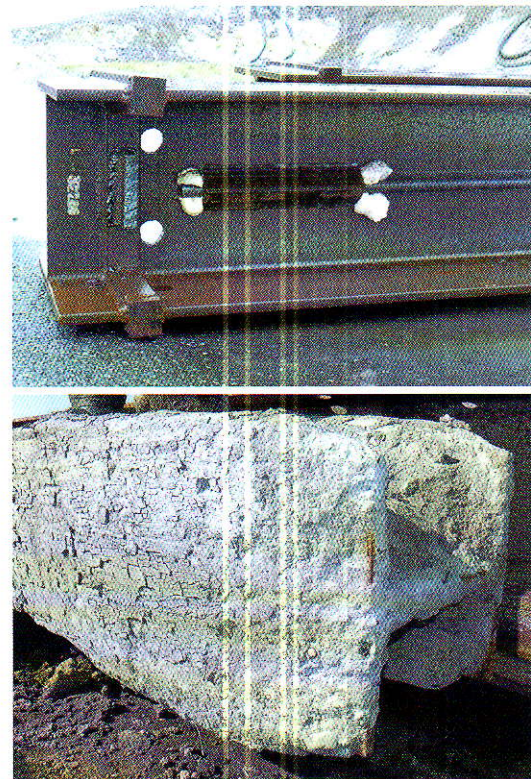


Bild 2. oben: RI-Pfahl mit Aufdoppelung, Bohrungen und Leitung zur Einbringung der Zementsuspension; unten: ausgebauter RI-Pfahl mit erhärteter Zementsuspension, aus [6]
Fig. 2. top: Driven grouted pile with panels and grouting mortar pipes; below: Reconstructed driven grouted piles, after [6]

Neben den in Abschnitt 1 genannten Profilformen ist die Pfahlschuhausbildung für das Tragverhalten von Bedeutung. Der Pfahlschuh ist im Vergleich zum Pfahlschaft vergrößert und hinterlässt beim Einrammen einen Hohlraum, der rambbegleitend mit einem Verpressmörtel verpresst oder verfüllt wird. Die Verpressschläuche werden im Profil nach unten geführt und treten erst an der Verbindung zwischen Pfahlschuh und Pfahlschaft aus. Der ausgehärtete Verpressmörtel wirkt als Verbindungsmedium zwischen Pfahlschaft und anstehendem Boden. In Bild 1 ist eine schematische Skizze des Einbauprozesses dargestellt.

RV-Pfähle werden häufig als Zugpfähle, wechselbelastete Pfähle und als Druckpfähle im Hafen- und Offshorebereich sowie bei Mastgründungen oder als Auftriebssicherung bei Bauwerken im Grundwasser eingesetzt. Sie können bis zu einer Neigung von 1:1 eingebaut werden. Im Folgenden wird dieser Pfahltyp in Abhängigkeit von der Profilform als RV-Pfahl (Trägerprofil) oder als RV-Pfahl (Rohrprofil) bezeichnet. In diesem Bericht werden Rammverpresspfähle mit Walzprofilen und Rohrprofilen untersucht. Rohrverpresspfähle im Sinne von DIN EN 14199 [7] werden nicht behandelt.

Neben der Fuge Verpressmörtel/Boden in Form der Pfahlmantelreibung ist ergänzend auch die Fuge Pfahlschaft/Verpressmörtel über Verbundspannungen nachzuweisen.

2.3 Rüttelinjektionspfahl (RI-Pfahl)

Der Rüttelinjektionspfahl (RI-Pfahl) ist ein abgewandelter RV-Pfahl, bei dem das Tragglied aus einem Peiner-, HEB- oder HEA-Profil besteht. Im Vergleich zum RV-Pfahl wird am Pfahlfuß kein großvolumiger Verdrängungskörper angeordnet, sondern lediglich eine Aufdoppelung durch aufgeschweißte Bleche auf dem Steg und den Flanschen. Der durch den Einbringvorgang geringere Hohlraum wird ebenfalls kontinuierlich mit einer Zementsuspension verfüllt. Dazu verläuft eine außen am Pfahlschaft angebrachte Leitung Richtung Pfahlspitze bis zur Aufdoppelung. Durch Bohrungen im Steg und den Flanschen wird die Zementsuspension gleichmäßig verteilt. In Bild 2 ist ein RI-Pfahl vor Einbringung und ausgegraben im erhärteten Zustand dargestellt.

Der Eindringwiderstand ist durch die Aufdoppelung im Pfahlfußbereich im Vergleich zum RV-Pfahl deutlich geringer und der Pfahl kann im Vibrations- oder Rüttelverfahren

eingebaut werden. Der Anwendungsbereich eines RI-Pfahls deckt sich mit den Einsatzmöglichkeiten eines RV-Pfahls. Die Auswahlkriterien richten sich nach dem anstehenden Boden, den Schall- und Schwingungsemissionen und der erforderlichen Tragfähigkeit, die im Vergleich zu einem RV-Pfahl bei einem RI-Pfahl geringer zu erwarten ist.

2.4 Aktuelle Regelungen für das Pfahlverbundverhalten

Im Normentwurf E DIN 18538 [2] sind relativ konservative Werte für die Verbundspannung enthalten. Nach den Einspruchsverhandlungen sind nunmehr folgende Regelungen voraussichtlich zu erwarten:

A 7.8.1.1 Bemessung von verpressten Verdrängungspfählen
Als Bemessungswert der Verbundspannung τ_{Rd1} bzw. τ_{Rd2} ist anzusetzen:

$$a) \quad \tau_{Rd1} = 0,2 \text{ N/mm}^2 \text{ für Verpressmörtel- (VM-), Rammverpress- (RV-) und Rüttelinjektions- (RI-) pfähle mit I-Profilen}$$

$$b) \quad \tau_{Rd2} = \frac{e_0 \cdot \mu}{1,1} \text{ (für alle übrigen Profile)}$$

Dabei ist

e_0 der Erdruchdruck in der jeweils betrachteten Tiefe,
 μ der Reibungsbeiwert mit $\mu = 0,5$ für walzraue Stahlprofile.

Voraussetzungen für die angegebenen Verbundspannungen sind eine Würfeldruckfestigkeit von $f_{c,cube} \geq 25 \text{ N/mm}^2$ für den verwendeten Verpressmörtel und eine Mindestdicke des Verpressmörtels von 25 mm.

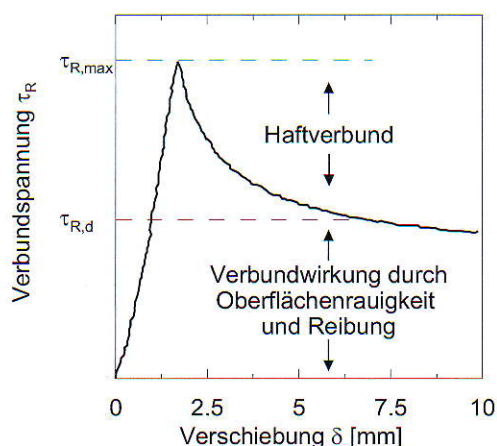


Bild 3. Entwicklung der Verbundspannung τ_R in Abhängigkeit der Verschiebung δ , aus [8]
 Fig. 3. Development of the bond stress τ_R depending on the deformation δ , after [8]

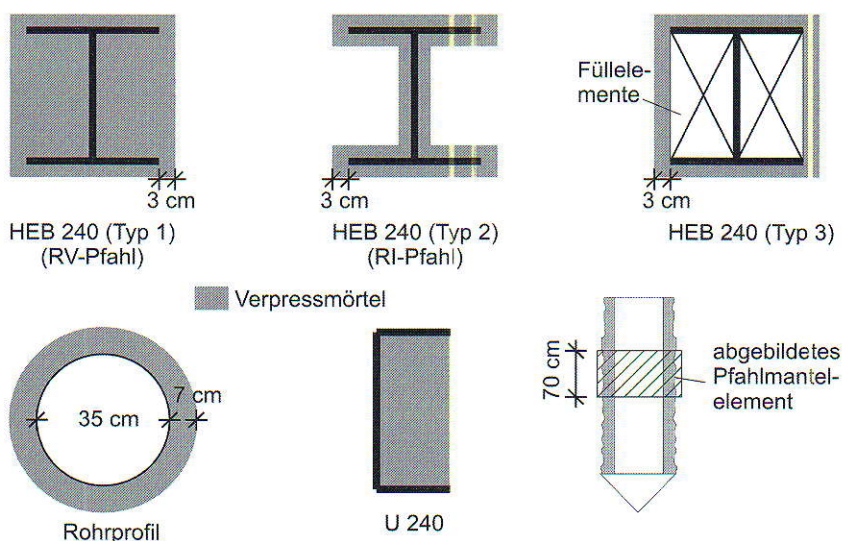


Bild 4. Untersuchte Profilformen am herausgeschnittenen Pfahlmantel-element
 Fig. 4. Investigated profile geometries

2.5 Grundlagen zum Verbundfugentragverhalten

Der Lastabtrag zwischen Stahlglied und Verpressmörtel kann in Haftverbund und Reibungsverbund unterschieden werden. Der Haftverbund beruht auf einer Klebwirkung, die auf Adhäsion oder Kapillarkräfte zurückzuführen ist, vgl. [8]. Bei einer sehr geringen Verschiebung δ fällt der Haftverbund nach Erreichen von $\tau_{R,max}$ allerdings sehr schnell ab, siehe Bild 3. Bei zunehmender Verschiebung δ wirkt nur noch die Verbundwirkung durch die Oberflächenrauigkeit und Reibung.

Nach [9] ist bei der Verbundwirkung eine hohe Streubreite vorhanden, die stark von der Oberflächenrauigkeit, der Betondeckung und der Geometrie des Stahlgliedes abhängt. Die Betonfestigkeitsklasse hat jedoch keinen Einfluss auf die Verbundwirkung.

In Analogie zum Hochbau sind in DIN 18800 [10] Bemessungswerte $\tau_{R,d,0}$ für die Verbundfestigkeit angegeben, die in Abhängigkeit der Geometrieform bestimmt werden. Weitere Ansätze beruhen auf dem Reibungsgesetz oder auf unterschiedlichen Erhöhungen der in DIN 18800 [10] gegebenen Bemessungswerte, siehe z. B. [11] oder [12].

3 Experimentelle Untersuchungen

3.1 Allgemeines

Ziel der durchgeführten Modellversuche war es, den Einfluss unterschiedlicher Profilgeometrien, eines Überdrucks, der einen Erddruck simuliert, und die Verwendung eines Quellmittels im Verpressmörtel auf die Tragfähigkeit der Fuge Pfahlschaft/Verpressmörtel zu untersuchen. Dazu wur-

den sechs Vorversuche und 26 Hauptversuche unter variierenden Randbedingungen durchgeführt, deren Ergebnisse nachfolgend zusammengefasst sind.

3.2 Versuchsdurchführung und Randbedingungen

Um Maßstabeffekte zu vermeiden, wurde ein ca. 70 cm hohes Pfahlmantel-element im Maßstab 1:1 versuchstechnisch nachgebildet. Die HEB 240 Profile Typ 1 und Typ 2 nach Bild 4 modellierten einen Rammverpresspfahl (RV-Pfahl) bzw. einen Rüttelinjektionspfahl (RI-Pfahl).

Bei dem untersuchten Profil HEB 240 (Typ 3) wurde durch in das Profil eingestellte Füllelemente (Styroporblöcke) die Verbundspannung an den Innenflanschen und am Steg ausgeschaltet, um zu prüfen, ob bei diesen Profilformen eine Ringzugspannung auftreten kann. Das U-Profil simuliert den Teilbereich eines RV-Pfahls zwischen den Innenflanschen zur Untersuchung eines möglichen Verspannungseffektes. Die Betonierhöhe für ein Pfahlmantel-element betrug mit Ausnahme der Versuche 2 und 7 jeweils $h = 70$ cm. Bei jenen lag die Betonierhöhe lediglich bei $h = 35$ cm. Die verwendeten Profilformen zeigt Bild 4.

Die Mörtelzusammensetzung enthält Tabelle 1. Bei der Herstellung der Pfahlschaftselemente wurde zunächst der Zement, der Zusatzstoff und der Zuschlag für ca. eine halbe Minute vermischt. Nach Hinzugabe des Wassers wurde ca. eine Minute gemischt, bis das Zusatzmittel hinzugefügt worden ist. Abschließend wurde erneut rund eine Minute gemischt und der Mörtel danach direkt eingebaut. Der Versuchsbehälter bestand aus einem 1 m langen Stahlrohr mit einem Durchmesser von 1,2 m, welcher mit einer Ronde druckdicht verschlossen werden konnte. In diesen Behälter wurde die zu untersuchende Profilform gestellt und mit einer Schalung umgeben. Die Verpressmörteldicke betrug bei den HEB Profilen (RV- und RI-Pfahl) 3 cm und beim Rohrprofil 7,5 cm. In Bild 5 sind eine Prinzipskizze des Versuchsaufbaus sowie eine Dokumentation des Betoniervorgangs dargestellt.

Tabelle 1. Mörtelzusammensetzung für eine Charge von 48 l (Mischerfüllung)
 Table 1. Mixture of the grouting mortar

Stoff	Art	Menge je Charge
Zement	CEM II/BS	25 kg
Zusatzstoff	Flugasche	15 kg
Zuschlag	Sand (Körnung 0 ÷ 2 mm)	50 kg
Zusatzmittel (Quellmittel)	Tricosal® MV Pulver	0,2 kg
Wasser		15,5 l

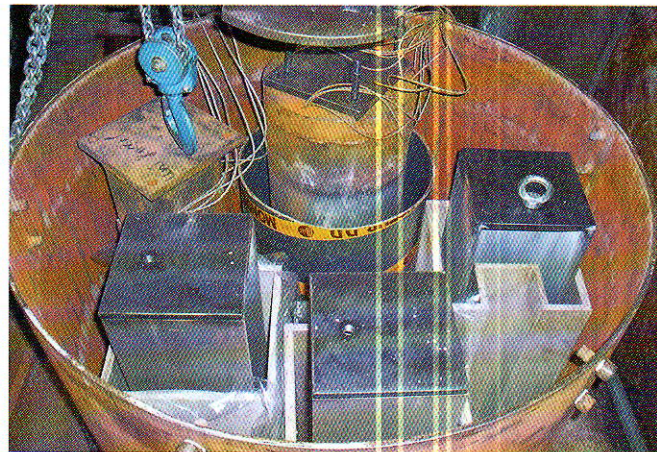
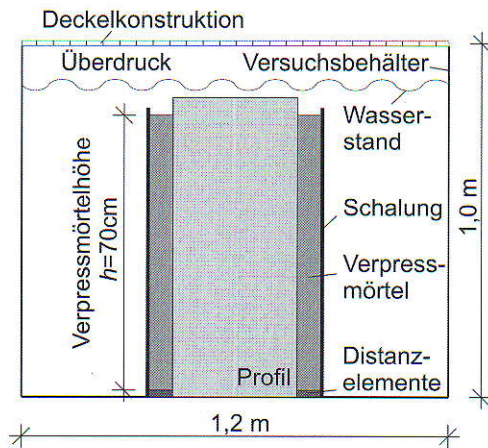


Bild 5. links: Prinzipskizze der Versuchseinrichtung (Betoniervorgang); rechts: eingestellte Profile
 Fig. 5. left: Schematic diagram of the test box; right: Test box with the profiles

Der Einbau des Mörtels erfolgte kontinuierlich. Der Mörtel wurde zusätzlich mit einer Rüttelflasche während des Betoniervorgangs verdichtet. Die Stahlprofile wurden mit Ausnahme von Versuch 2 und 7 vor jedem Betoniervorgang nach DIN EN ISO 12944 [13] mit einem Reinheitsgrad von $Sa = 2,5$

gesandstrahlt, sodass bei jedem Versuch von identischen Randbedingungen auszugehen ist. Nach dem Betoniervorgang wurde die Versuchskonstruktion schonend mit Wasser geflutet und der Verpressmörtel konnte in dieser Unterwasserlagerung 28 Tage aushärten. Optional konnte durch einen Überdruck auf das Wasser bei geschlossener Versuchseinrichtung eine Erddruckspannung in-situ simuliert werden.

Tabelle 2. Versuchsergebnisse

Table 2. Results of the experimental investigations

Profil	$F_{Versuch}$ [kN]	$\tau_{R,Versuch}$ [N/mm ²]	$f_{c,cube}$ [N/mm ²]	Versuch	Quellmittel	Überdruck
RV-Pfahl (HEB 240 Typ 1)	1116,4	1,12	40,7	3	ja	-
	459,1	0,46	31,0	9 ^{a)}	ja	3,5 bar
	861,5	0,87	39,6	13	nein	-
	982,7	0,99	43,1	17	ja	-
	812,7	0,82	35,2	22	nein	-
	662,3	0,67	37,8	23	nein	-
RI-Pfahl (HEB 240 Typ 2)	378,2	0,38	46,3	4 ^{a)}	ja	-
	575,9	0,58	31,5	10	ja	3,5 bar
	637,9	0,64	41,3	14	nein	-
	900,7	0,91	39,5	18	ja	-
	891,4	0,90	43,1	19	ja	-
	499,5	0,50	37,0	24	nein	-
HEB 240 Typ 3	116,1	0,30	45,6	5	ja	-
	-	-	-	11 ^{b)}	ja	3,5 bar
	154,2	0,4	38,8	15	nein	-
RV-Pfahl (Rohrprofil ø 35 cm)	495,1	0,63	47,9	1	ja	-
	600,2	1,56	39,2	2	ja	-
	≈ 235	0,30	30,0	8	ja	3,5 bar
	252,6	0,32	41,8	12	nein	-
	497	0,65	45,5	20	ja	-
	514	0,67	45,1	25	nein	-
U-Profil	220,4	0,88	50,1	6	ja	-
	145,2	1,15	40,8	7	ja	-
	159,2	0,63	40,4	16	nein	-
	187,2	0,74	43,1	21	ja	-
	117,9	0,47	40,4	26	nein	-

^{a)} wahrscheinlich Versuchsstörungen; ^{b)} Bei Versuch 11 sind aufgrund des Überdrucks die zwischen die Flansche gestellten Füllelemente zusammengedrückt worden, wodurch kein Probekörper hergestellt werden konnte.

Anschließend wurden die Probekörper diesem Versuchsbehälter entnommen und die Schalung entfernt. Danach wurden diese unter eine Presseneinrichtung gestellt, sodass eine statische Probelastung auf Druck durchgeführt werden konnte. Bei dieser Probelastung wurde die Druckkraft am Kopf des Stahlprofils eingeleitet. Das Widerlager befand sich am Fuß des Verpressmörtels, sodass der Kraftfluss vollständig durch die Fuge Pfahlschaft/Verpressmörtel erfolgte. Die Belastung für die Probekörper wurden in Anlehnung an die EA-Pfähle [5] gewählt und die Belastungsstufen zwischen 25 und 100 kN variiert. Die Belastungsgeschwindigkeit betrug $v_b = 40$ kN/Min. Eine Übersicht der durchgeführten Versuche mit den entsprechenden Versuchsergebnissen enthält Abschnitt 3.3.

Aus versuchstechnischen Gründen wurde der Versagenszustand der Fuge Pfahlschaft/Verpressmörtel durch eine Druckbelastung hervorgerufen, siehe [3] und [4].

3.3 Versuchsergebnisse

In Tabelle 2 sind die mit den variierenden Randbedingungen durchgeführten Modellversuche und die Ergebnisse zur maximalen Pressenkraft $F_{Versuch}$, die daraus resultierende, über den Umfang gemittelte Verbundspannung $\tau_{R,Versuch}$ sowie die aus den Laborversuchen ermittelte Würfeldruckfestigkeit $f_{c,cube}$ für alle Versuche zusammengestellt.

Die Versuchsergebnisse zeigen, dass das Versagen anfangs in der Fuge Pfahlschaft/Verpressmörtel auftrat, welches dann ein Versagen des Verpresskörpers induzierte. Ein Versagen des Verpresskörpers vor Versagen der Fuge Pfahlschaft/Verpressmörtel konnte bei keinem Versuch während der Versuchsdurchführung festgestellt werden. Der Verpressmörtel versagte in jedem Versuch schlagartig. Der Verpressmörtelkörper ist dabei i. d. R. der Länge nach komplett aufgebrochen, siehe **Bild 6**. Nachfolgend sind besondere Versuchsvarianten dokumentiert.

a) Einfluss eines Überdrucks auf die Verbundspannung

Der Einfluss einer Erddruckspannung in-situ auf das Pfahlsystem wurde durch einen Überdruck beim Aushärteprozess des Betons bei den drei Profilformen Rohrprofil, HEB 240 Typ 1 (RV-Pfahl (Trägerprofil)) und HEB 240 Typ 2 (RI-Pfahl) modelliert. Die Verpressmörtelproben zur labormäßigen Ermittlung der Würfeldruckfestigkeit wurden nicht mit dem Überdruck beaufschlagt.

Aufgrund der hohen Streubreite konnte jedoch kein signifikanter Unterschied abgesichert festgestellt werden. Weitere Informationen dazu sind in [3] und [4] enthalten.

b) Einfluss des Quellmittels bei der Verpressmörtelrezeptur

Quellmittel bewirkt beim Aushärteprozess eine Volumenzunahme des Verpresskörpers. Somit können theoretisch Verspannungseffekte zwischen sich gegenüberliegenden Flächen (z. B. Innenflanschen) auftreten. **Bild 7** zeigt dazu die Versuchsergebnisse. Bei dem Profil mit gegenüberliegenden Innenflanschen (RV-Pfahl (Trägerprofil), HEB 240 Typ 1) ergab sich eine deutliche Zunahme der Verbundspannung unter Verwendung von Quellmittel. Der RV-Pfahl (Rohrprofil) zeigt ebenfalls eine Zunahme der Verbundspannung, wobei sich vermutlich ein verstärkter radialer Gewölbering im Verpresskörper ausbildet. Ein direkter Zusammenhang zwischen der Würfeldruckfestigkeit $f_{c,cube}$ und der Verbundspannung $\tau_{R, Versuch}$ konnte aber nicht festgestellt werden.

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass durch die Verwendung von Quellmittel bei vergleichbarer Würfeldruckfestigkeit ein Verspannungseffekt zwischen gegenüberliegenden Seiten auftreten kann, der die Verbundspannung erhöht. Weitere Untersuchungen zu dieser Thematik finden sich in Abschnitt 4.3.

4 Numerische Vergleichsberechnungen

4.1 Zielsetzung und Modellierung

Zur weiteren Analyse der Versuchsergebnisse sowie der ergänzenden Variationen von Parametern und Randbedingungen wurden Berechnungen nach der Methode der Finiten Elemente (FEM) durchgeführt. Dabei wurde

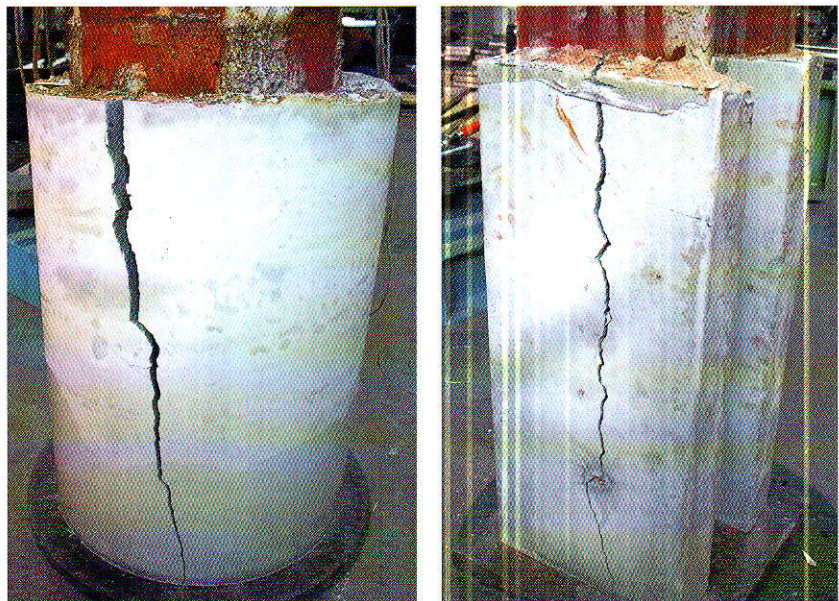


Bild 6. Versagensformen nach Erreichen des Bruchzustandes; links: Versuch 8 RV-Pfahl (Rohrprofil); rechts: Versuch 14 (HEB 240 Typ 2, RI-Pfahl)

Fig. 6. Profiles after reaching the failure state; left: Test no. 8 (driven pile with grouted skin); right: Test no. 14 (driven grouted pile)

der RV-Pfahl (Rohrprofil) rotationssymmetrisch und der RV-Pfahl (Trägerprofil) sowie der RI-Pfahl quasi räumlich mit dem Programmsystem PLAXIS abgebildet, siehe [14] und [15].

Das rotationssymmetrische Modell für den RV-Pfahl (Rohrprofil) zeigt **Bild 8**. In **Bild 9** ist die Modelldiskretisierung für den RV-Pfahl (Trägerprofil) und den RI-Pfahl beispielhaft gezeigt. Die Lagerung erfolgte mit Festlagern lediglich in der Aufstandsfläche des Verpressmörtels. Zur Nachbildung der Scherfuge wurde um den Pfahlschaft ein 0,5 cm breiter Streifen

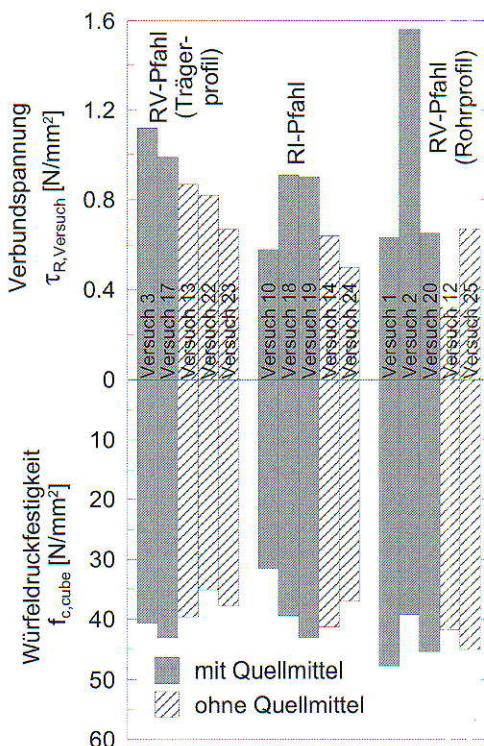


Bild 7. Versuchsergebnisse zum Einfluss des Quellmittels
Fig. 7. Influence of an expanding agent

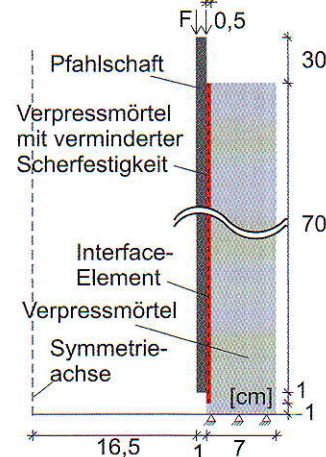


Bild 8. Prinzipskizze zur Modellerstellung des RV-Pfahls (Rohrprofil) als rotationssymmetrisches Modell
Fig. 8. Schematic diagram for the numerical simulation of the driven pile with grouted skin (tube pile)

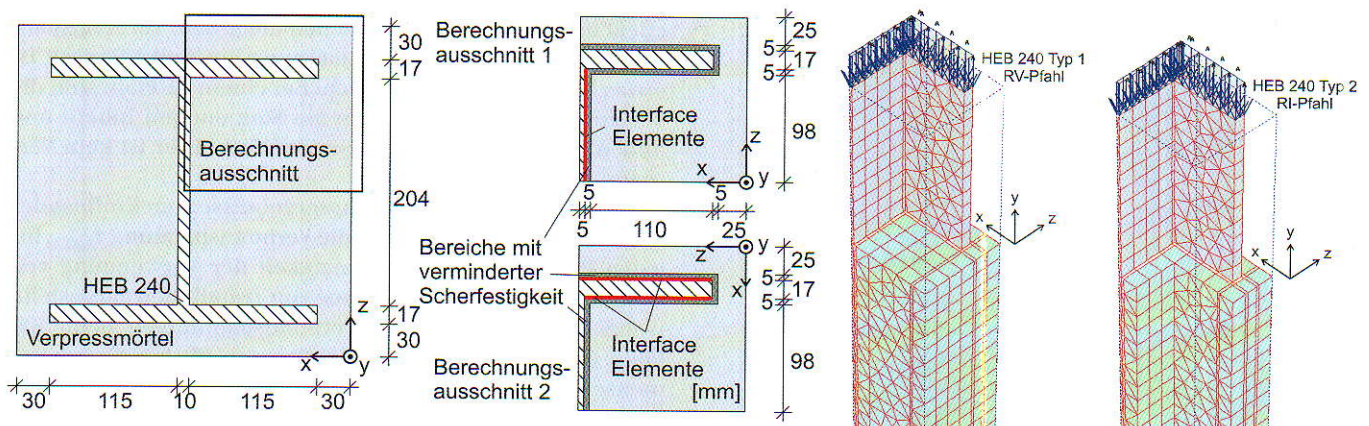


Bild 9. FEM-Modell zur 3D-Berechnung; links: Berechnungsausschnitte; rechts: Diskretisiertes Modell (Berechnungsausschnitt 1) für den RV-Pfahl (Trägerprofil) und den RI-Pfahl

Fig. 9. Numerical model for the 3D-calculations; left: Calculation sections; right: Calculation section 1 for the driven pile with grouted skin and driven grouted pile

fen gelegt, dem abgeminderte Scherfestigkeiten zugeordnet wurden. Zusätzlich sind in der Fuge Pfahlschaft/Verpressmörtel Interface-Elemente angeordnet worden, denen das gleiche Stoffgesetz wie in dem bereits angesprochenen Streifen zugewiesen worden ist. Die Interface-Elemente dienen nur einer besseren Auswertemöglichkeit der Verbundspannungen in der Fuge.

Der Pfahlschaft wurde linear-elastisch und der Verpressmörtel mit dem Stoffgesetz nach Mohr-Coulomb (MC) modelliert, welches nach [16] erweitert worden ist. Die Scherparameter ϕ und c werden in Abhängigkeit der Mörteldruckfestigkeit f_{ck} und der Zugfestigkeit f_{ctm} nach Gleichung (1) bzw. (2) für die Verpresskörperbereiche außerhalb des 0,5 cm Streifens ermittelt. Eine Zugspannungsbegrenzung wurde über Gleichung (3) berücksichtigt.

$$\sin\phi = \frac{f_{ck} - \frac{5}{3} \cdot f_{ctm}}{f_{ck} + \frac{5}{3} \cdot f_{ctm}} \quad (1)$$

$$c = \frac{1}{2} \cdot f_{ck} \cdot \left(\frac{1 - \sin\phi}{\sqrt{1 - \sin^2\phi}} \right) \quad (2)$$

$$\sigma_{1,2,3} \leq f_{ctm} \quad (3)$$

Die Modellversuche haben gezeigt, dass der Versagensmechanismus von der Scherfuge ausgeht, die in dem 0,5 cm breiten Streifen um den Pfahlschaft mit abgeminderten Scherparametern $c_{Verbund}$ und $\phi_{Verbund}$ über den Wert $R_{Verbund}$

berücksichtigt worden ist, siehe Gleichung (4) und (5). Der Wert $R_{Verbund}$ hat einen deutlichen Einfluss auf die Berechnungsergebnisse. Die Ableitung dieses Faktors ist in [3] und [4] dargestellt.

$$c_{Verbund} = R_{Verbund} \cdot c_{Mörtel} \quad (4)$$

$$\tan\phi_{Verbund} = R_{Verbund} \cdot \tan\phi_{Mörtel} \quad (5)$$

Die Bestimmung des E-Moduls erfolgte mit den analytischen Beziehungen in Abhängigkeit der Würfeldruckfestigkeit $f_{c,cube}$ nach DIN 1045-1 [17]. Eine mögliche Volumenzunahme durch das Quellungsmittel wurde durch den Dilatanzwinkel ψ berücksichtigt. Die Validierung der Versuche enthält Abschnitt 4.2. In Tabelle 3 sind beispielhaft die für die Nachrechnung des Versuches 3 verwendeten numerischen und bodenmechanischen Kenngrößen zusammengestellt. Eine Dokumentation der Kenngrößen aller Versuche sowie deren Ermittlung und weiterführende Informationen zur Erstellung des FE-Modells sind in [3] und [4] enthalten.

4.2 Rechnerische Validierung der Versuche

Die Berechnungskalibrierung erfolgte mit der Zielsetzung der weitgehenden rechnerischen und versuchsmäßigen Übereinstimmung von Presskraft und damit der Verbundspannung. In Bild 10 ist ein Vergleich für die nachgerechneten Versuche dargestellt, bei denen die Verbundspannung aus den experimentellen Versuchen $\tau_{Versuch}$ und den Berechnungen nach der FEM τ_{FEM} gegenübergestellt sind. Daraus folgt eine gute Übereinstimmung.

4.3 Ergänzende Ergebnisse aus der Nachrechnung der Versuche

Bild 11 zeigt einen Vergleich der einzelnen Anteile der Verbundspannung $\tau_{R,FEM}$ für einen RV-Pfahl (Trägerprofil) und einen RI-Pfahl unter Variation der Würfeldruckfestigkeit $f_{c,cube}$ und der Verwendung von Quellungsmittel. Dabei ergibt die Verwendung von Quellungsmittel erwartungsgemäß einen tragfähigkeitssteigernden Einfluss, der besonders bei gegenüberliegenden Flächen deutlich größer ausfällt. Bei einem RV-Pfahl (Trägerprofil) tritt an den Innenflanschen ein Verspannungs-

Tabelle 3. Verwendete Parameter von Versuch 3 (HEB 240, Typ 1 (RV-Pfahl (Trägerprofil)))
Table 3. Parameter for the numerical calculation used for the test no. 3

Versuch 3	Berechnungsausschnitt 1	Berechnungsausschnitt 2
E [MN/m ²]	29.044	29.044
ν [-]	0,33	0,33
$\phi_{Mörtel}$ [°]	46,8	46,8
$c_{Mörtel}$ [kN/m ²]	6.401,2	6.401,2
ψ [°]	0,2	0,2
$\phi_{Verbund}$ [°]	7,9	9,1
$c_{Verbund}$ [kN/m ²]	832,2	960,2
$\approx R_{Verbund}$	0,13	0,15

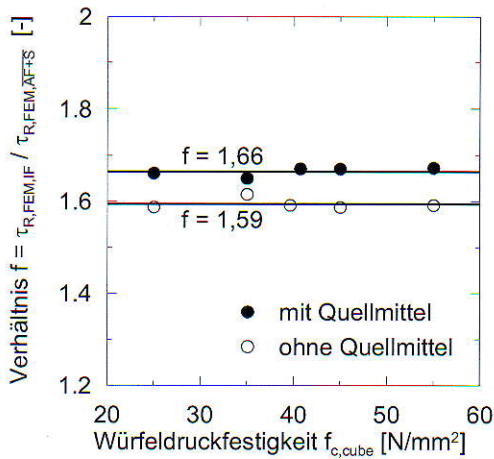


Bild 13. Aufteilungsverhältnis f zwischen der Verbundspannung am Innenflansch $\tau_{R,FEM,IF}$ und dem Mittelwert der Verbundspannung aus Außenflansch und Steg aus den Ergebnissen der FEM

Fig. 13. Ratio f of the bond stress from the numerical calculations between the inner flange $\tau_{R,FEM,IF}$ and the mean value of outer flange and bar

- mit:
- $\tau_{R,FEM}$
aus der FEM ermittelte Verbundspannung
 - $\tau_{R,FEM,S}$
aus der FEM ermittelte Verbundspannung am Steg
 - $\tau_{R,FEM,AF}$
aus der FEM ermittelte Verbundspannung am Außenflansch
 - $\tau_{R,FEM,IF}$
aus der FEM ermittelte Verbundspannung am Innenflansch

Die Verbundspannung beim RI-Pfahl und RV-Pfahl (Rohrprofil) wurde nach Gleichung (8) bzw. direkt aus den Berechnungsergebnissen ermittelt. Die Differenz der einzelnen Verbundspannungsanteile $\tau_{R,FEM,S}$, $\tau_{R,FEM,AF}$ und $\tau_{R,FEM,IF}$ untereinander waren beim RI-Pfahl sehr gering. Tendenziell zeigen die rechnerischen Analysen der Versuchsergebnisse, dass die Verbundspannungen $\tau_{R,FEM}$ mit zunehmender Verpressmörteldicke d_{VM} einem Grenzwert entgegenstreben. Der Einfluss der Verpressmörteldicke beim RV-Pfahl (Trägerprofil) und RI-Pfahl ist deutlich größer als beim RV-Pfahl (Rohrprofil).

5 Ableitung von Bemessungswerten

5.1 Vorgehensweise

An den Ergebnissen der Modellversuche und ergänzenden Berechnungen mit der FEM wurde die charakteristische Verbundspannung $\tau_{R,k}$ in der Fuge Pfahlschaft/Verpressmörtel für den Bruchzustand in Abhängigkeit der Profilform und der Verwendung von Quellmittel statistisch abgeleitet. Die Werte von τ_r wurden dabei auf das 5 % Quantil nach dem statistisch determinierten Sicherheitskonzept nach DIN 1055-100 [18] bezogen. Ein möglicher tiefenabhängiger Einfluss z. B. infolge Erddruckspannung wurde dabei vernachlässigt. Vorausgesetzt wurde eine Mindestwürfeldruckfestigkeit von $f_{c,cube} = 25 \text{ N/mm}^2$.

Um eine profilunabhängige Auswertung zu erhalten, wurden die Versuchsergebnisse nach folgendem Kriterium aufgeteilt. Alle Profile, bei denen kein Verspannungseffekt bei

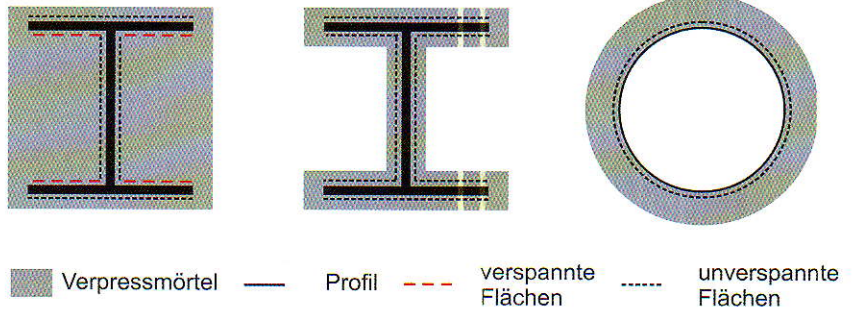


Bild 14. Definition der Begriffe verspannte Flächen und unverspannte Flächen
Fig. 14. Definition of braced areas and unbraced areas

gegenüberliegenden Flächen auftreten kann (RI-Pfahl und RV-Pfahl (Rohrprofil)) wurden zusammen statistisch ausgewertet. Beim RV-Pfahl (Trägerprofil) wurden die Versuchsergebnisse $\tau_{R,Versuch}$ in Abhängigkeit des Aufteilungsverhältnisses f zwischen der Verbundspannung am Innenflansch $\tau_{R,FEM,IF}$ bei dem ein Verspannungseffekt auftritt, und dem Mittelwert der Verbundspannung aus Außenflansch und Steg $\tau_{R,FEM,AF+S}$, bei dem kein Verspannungseffekt auftritt, aus den Ergebnissen der FEM nach Bild 13 und den Gleichungen (9) und (10) berücksichtigt.

$$f = \frac{\tau_{R,FEM,IF}}{\tau_{R,FEM,AF+S}} = \frac{\tau_{R,Versuch,IF}}{\tau_{R,Versuch,AF+S}} \quad (9)$$

$$\tau_{R,Versuch} = \tau_{R,Versuch,IF} \cdot \frac{2 \cdot b}{U} + \tau_{R,Versuch,AF+S} \cdot \frac{(2 \cdot b + 2 \cdot h)}{U} \quad (10)$$

- mit:
- b Breite des Stahlprofils
 - h Höhe des Stahlprofils
 - U Umfang des Stahlprofils

Zur Definition und Beschreibung der Flächen werden folgende Begriffe eingeführt, siehe Bild 14.

Verspannte Flächen: Unter verspannten Flächen werden die Flächen verstanden, die sich bei einem Profil gegenüberliegen (parallel oder auch gegeneinander verdreht) und deren Zwischenraum vollständig mit Verpressmörtel gefüllt ist, z. B. Innenflansche von Trägerprofilen.

Unverspannte Flächen: Unter unverspannten Flächen werden alle Flächen verstanden, die nicht als verspannte Flächen definiert sind.

5.2 Ergebnisse

Die Ergebnisse der statistischen Auswertung sind als charakteristische Verbundspannungen $\tau_{R,k}$ für die in Abschnitt 5.1 getroffenen Flächendefinitionen in Bild 15 für unverspannte und in Bild 16 für verspannte Flächen dargestellt. Die in den Bildern 15 und 16 angegebenen charakteristischen Verbundspannungen $\tau_{R,k}$ wurden nach Gleichung (11) in Bemessungswerte $\tau_{R,d}$ umgewandelt. Dabei wurde der Teilsicherheitsbeiwert für Verbundmittel γ_v nach DIN 18800 [10] verwendet.

Zu beachten ist, dass bei der Ableitung der charakteristischen Verbundspannung $\tau_{R,k}$ in den Bildern 15 und 16 eine Verpressmörteldicke von $d_{VM} = 3 \text{ cm}$ verwendet worden ist. Da jedoch bei einem RI-Pfahl i.d.R. eine Verpressmörteldicke von $d_{VM} = 2,5 \text{ cm}$ verwendet wird, wurden die in den Bildern 15 und 16 abgeleiteten Werte pauschal um 10 % reduziert. Die Ergebnisse zeigt Tabelle 4.

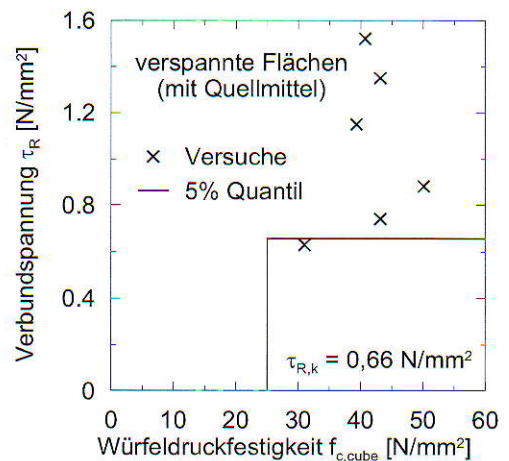
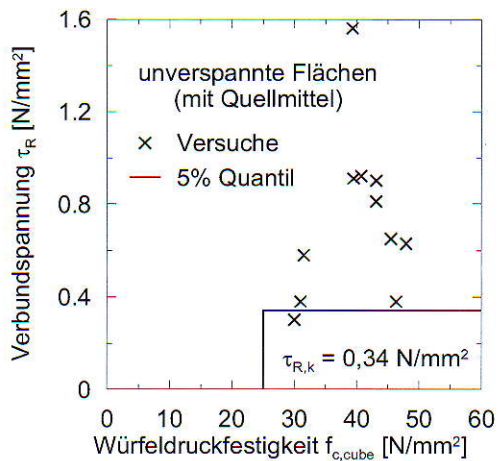
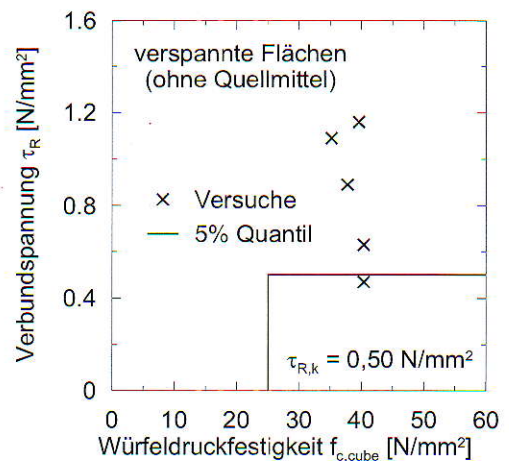
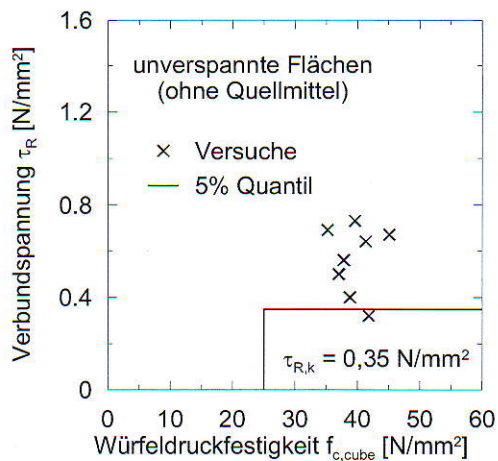


Bild 15. Ableitung der charakteristischen Verbundspannung $\tau_{R,k}$ (5% Quantil) in der Fuge Pfahlschaft/Verpressmörtel für unverspannte Flächen (z. B. Stege und Außenflansche); oben: ohne Quellmittel; unten: mit Quellmittel
 Fig. 15. Characteristic bond stress of the joint $\tau_{R,k}$ (5% quantile) for unbraced areas (i. e. bars and outer flanges); top: without expanding agent; below: with expanding agent

Bild 16. Ableitung der charakteristischen Verbundspannung $\tau_{R,k}$ (5% Quantil) in der Fuge Pfahlschaft/Verpressmörtel für verspannte Flächen (z. B. Innenflansche); oben: ohne Quellmittel; unten: mit Quellmittel
 Fig. 16. Characteristic bond stress of the joint $\tau_{R,k}$ (5% quantile) for braced areas (i. e. inner flanges); top: without expanding agent; below: with expanding agent

$$\tau_{R,d} = \frac{\tau_{R,k}}{\gamma_V} \quad (11)$$

mit: $\tau_{R,k}$
 Charakteristischer Wert der Verbundspannung
 $\tau_{R,d}$
 Bemessungswert der Verbundspannung
 γ_V
 Teilsicherheitsbeiwert für Verbundmittel nach DIN 18800 [10]
 ($\gamma_V = 1,25$ für ständige und vorübergehende Bemessungssituationen)

Die Vergleichsberechnungen erfolgten beispielhaft an Pfählen in nichtbindigen Böden für eine Tiefe von $z = 10$ m mit einer Wichte des Bodens unter dem GW-Spiegel von $\gamma' = 10$ kN/m³ und einem Reibungswinkel von $\phi' = 37,5^\circ$, woraus ein horizontaler Erdruchdruck am Pfahlfuß von $e_0 = 39,1$ kN/m² resultiert. Der Reibungsbeiwert wurde zu $m = 0,5$ angenommen.

Für die Berechnungen nach DIN 18800 [10] wurden für den RV- und den RI-Pfahl die Bemessungswerte der Verbundtragfähigkeit für ein vollständig einbetoniertes Stahlprofil angesetzt. Es ist zu beachten, dass dieser Übertrag der Ver-

5.3 Vergleichsberechnungen und Bewertung der Ergebnisse

Im Folgenden werden Vergleichsberechnungen mit den in Abschnitt 5.2 abgeleiteten charakteristischen Verbundspannungen $\tau_{R,k}$ und den Verfahren der E DIN 18538 [2], der DIN 18800 [10] sowie der Verfahren nach [9] und [12] für jeden Profiltyp vorgestellt. Die formelmäßige Zusammenstellung der einzelnen Verfahren sind in [3] und [4] enthalten.

Tabelle 4. Umwandlung der charakteristischen Werte $\tau_{R,k}$ in Bemessungswerte $\tau_{R,d}$
 Table 4. Transformation of the characteristic values $\tau_{R,k}$ into design values $\tau_{R,d}$

Typ	Quellmittel	$\tau_{R,k}$ [N/mm ²]	$\tau_{R,d}$ [N/mm ²]
unverspannte Flächen	mit Quellmittel	0,30	0,24
	ohne Quellmittel		
verspannte Flächen	mit Quellmittel	0,60	0,48
	ohne Quellmittel	0,45	0,36

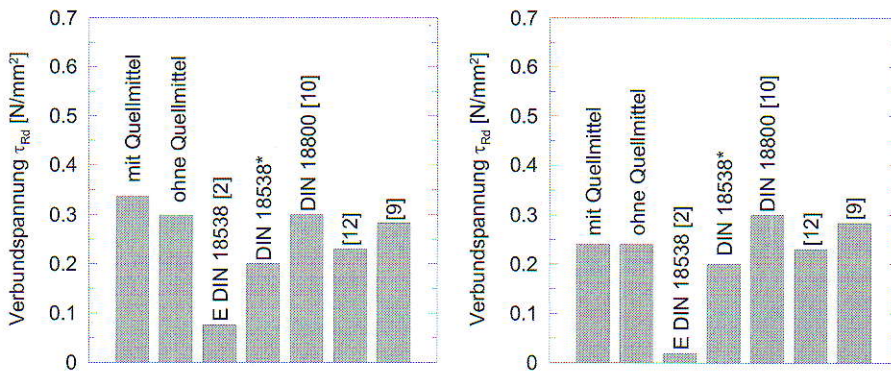


Bild 17. Bemessungswerte $\tau_{R,d}$ der mittleren Verbundspannungen aus Vergleichsberechnungen mit den neu abgeleiteten Bemessungswerten jeweils mit und ohne dem Einfluss von Quellmittel; links: RV-Pfahl (Trägerprofil); rechts: RI-Pfahl und RV-Pfahl (Rohrprofil); ANMERKUNG: Die mit * gekennzeichnete Stelle berücksichtigt die Regelung nach Abschnitt 2.4 für einen RI-Pfahl

Fig. 17. Design values of the bond stress $\tau_{R,d}$ with and without the influence of expanding agent; left: Driven pile with grouted skin; right: Driven grouted pile and driven pile with grouted skin (tube pile); REMARK: The point marked with * already considered the arrangement in chapter 2.4 for a driven grouted pile

bundwirkung aus dem Hochbau nur näherungsweise gilt. Für das Verfahren nach [9] sind keine Angaben zur Erfassung der Rauigkeit gegeben. Dieser Wert wurde näherungsweise zu $\kappa_R = 0,75$ angenommen.

Die Ergebnisse sind als Bemessungswerte $\tau_{R,d}$ in Bild 17 dargestellt. Da es sich in Bild 17b bei dem RI-Pfahl und dem RV-Pfahl (Rohrprofil) jeweils um unverspannte Flächen handelt, ergeben sich rechnerisch die identischen Verbundspannungen $\tau_{R,d}$.

Eine Aufteilung der Verbundspannungen auf die verspannten und unverspannten Flächen für die Berechnung nach Bild 17a ist in Bild 18 vergleichend dargestellt.

Die Ergebnisse zeigen, dass das zunächst vorgesehene Verfahren nach E DIN 18538 [2] die insgesamt geringsten Verbundspannungen $\tau_{R,d}$ liefert. Die abgeleiteten Werte und die Verfahren nach DIN 18800 [10], [9] und [12] liegen zusammenfassend in einer vergleichbaren Größenordnung. Die nunmehr in DIN 18538 zu erwartenden Regelungen mit $\tau_{R,d} = 0,2 \text{ N/mm}^2$ auf alle I-Profile nach Abschnitt 2.4 sind etwas geringer.

Gegenüber dem zu erwartenden Wert in DIN 18538 werden die in den Bildern 15 und 16 bzw. Tabelle 4 genannten Verbundspannungen zunächst als neuere Erkenntnisse im informativen Anhang der EA-Pfähle (2. Auflage) aufgenommen und zur Diskussion gestellt.

6 Zusammenfassung

Mit Hilfe von experimentellen, numerischen und statistischen Methoden wurden neue Bemessungswerte für die Fuge Pfahlschaft/Verpressmörtel an RV-Pfählen (Trägerprofile und Rohrprofile) und RI-Pfählen abgeleitet.

Die Ergebnisse zeigen erwartungsgemäß, dass die Profilgeometrie einen deutlichen Einfluss auf die Verbundspannung ausübt. Bei Profilformen mit gegenüberliegenden Flächen (RV-Pfahl (Trägerprofil)) stellt sich ein Verspannungseffekt ein, der die Verbundspannung erhöht. Dieser Effekt wird durch die Verwendung eines Quellmittels noch verstärkt.

Mit Hilfe der FEM konnten die Modellversuche nachgerechnet und weitergehend analysiert werden. Dazu wurden rotationssymmetrische und 3D-Modelle verwendet. Die Ergebnisse zeigen, dass die Verbundspannung $\tau_{R,FEM}$ bei den unterschiedlichen Profilformen nicht gleichmäßig verteilt ist. So weist der RV-Pfahl (Trägerprofil) an den gegenüberliegen-

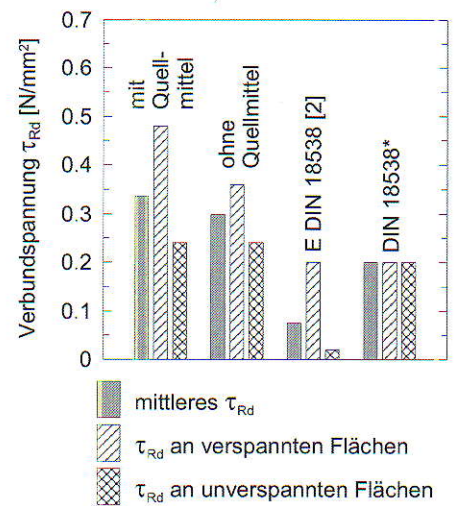


Bild 18. Aufteilung der Verbundspannung $\tau_{R,d}$ an verspannten und unverspannten Flächen für die neu abgeleiteten Bemessungswerte im Vergleich zu den Ergebnissen nach E DIN 18538 [2] für die Berechnung nach Bild 18a (RV-Pfahl (Trägerprofil)); ANMERKUNG: Die mit * gekennzeichnete Stelle berücksichtigt bereits die Regelung nach Abschnitt 2.4

Fig. 18. Ratio of the bond stress $\tau_{R,d}$ at braced and unbraced areas in comparison to the prestandard E DIN 18538 [2] after the calculation in figure 18a (driven grouted pile); REMARK: The point marked with * already considered the arrangement in chapter 2.4

den Flächen (Innenflanschen) eine deutlich höhere Verbundspannung auf als am Außenflansch oder am Innensteg. Mit dem an den Versuchen validierten FE-Modell wurde eine Parameterstudie in Abhängigkeit der Würfeldruckfestigkeit $f_{c,cube}$ der Verwendung von Quellmittel und der Profilform durchgeführt.

Aus den gesamten versuchstechnisch und rechnerisch ermittelten Ergebnissen wurden charakteristische Verbundspannungen $\tau_{R,k}$ unter Berücksichtigung des 5 % Quantils abgeleitet. Vergleichsberechnungen mit den maßgebenden Verbundspannungsangaben ergeben, dass die in der Vornorm E DIN 18538 [2] zunächst festgelegten Angaben rechnerisch zu einer deutlichen Unterschätzung der Tragfähigkeit der Fuge Pfahlschaft/Verpressmörtel führen und damit erhebliche Sicherheitsreserven aufweisen. Die nunmehr zu erwartenden Regelungen in DIN 18538 liegen jedoch in einer vergleichbaren Größenordnung mit den weiteren vorgestellten Berechnungsverfahren. Die neueren Erkenntnisse aus dem hier dargestellten Forschungsvorhaben werden darüber hinaus in einen informativen Anhang der 2. Auflage der EA-Pfähle aufgenommen.

Literatur

- [1] DIN EN 12699:2001-05: Verdrängungspfähle – Ausführung spezieller geotechnischer Arbeiten (Spezialtiefbau)
- [2] E DIN 18538:2010-06: Anwendungsdokument zu DIN EN 12699: Verdrängungspfähle – Ausführung spezieller geotechnischer Arbeiten (Spezialtiefbau)
- [3] Kempfert, H.-G.; Lüking, J. (2010): Untersuchungen zur Ableitung von Verbundspannungen bei Verpressmörtelpfählen; Abschlussbericht zum F+E Projekt im Auftrag der Hamburg Port Authority – Teil 1 –, Universität Kassel, Fachgebiet Geotechnik, unveröffentlicht

- [4] *Kempfert, H.-G.; Lüking, J.* (2010): Untersuchungen zur Ableitung von Verbundspannungen bei Verpressmörtelpfählen; Abschlussbericht zum F+E Projekt im Auftrag der Hamburg Port Authority – Teil 2 –, Universität Kassel, Fachgebiet Geotechnik, unveröffentlicht
- [5] EA-Pfähle (2007): Empfehlungen des Arbeitskreises „Pfähle“; Deutsche Gesellschaft für Geotechnik e.V., 1. Auflage, Ernst & Sohn, Berlin
- [6] *Kempfert, H.-G.* (2009): Pfahlgründungen; Abschnitt 3.2 in: Grundbau-Taschenbuch, 7. Auflage, Teil 3, Verlag Ernst & Sohn, Berlin, S. 73–277
- [7] DIN EN 14199:2005–05: Pfähle mit kleinen Durchmessern (Mikropfähle) – Ausführung spezieller geotechnischer Arbeiten (Spezialtiefbau); Deutsche Fassung EN 14199:2005
- [8] *Leonhardt, F.; Mönning, E.* (1984): Vorlesungen über Massivbau, Teil 1: Grundlagen zur Bemessung im Stahlbetonbau; 3. Auflage, Springer-Verlag, Berlin
- [9] *Hanswille, G.* (2007): Vortrag im Arbeitsausschuss NA 005–05–07 AA „Baugrund, Pfähle“ zur Problematik der Verbundspannung bei RV-Pfählen, Bergische Universität Wuppertal, Fachgebiet Stahlbau und Verbundkonstruktionen, unveröffentlicht
- [10] DIN 18800–5:2007–03: Stahlbauten – Teil 5: Verbundtragwerke aus Stahl und Beton – Bemessung und Konstruktion
- [11] *Roik, K.; Bürkner, K.-E.* (1978): Reibwert zwischen Stahlgurten und aufgespannten Betonfertigteilen; Bauingenieur 53, S. 37–41
- [12] *Hanswille, G.* (1996): Gutachterliche Stellungnahme zur Frage der übertragbaren Verbundspannung zwischen Stahlprofil und Verpressmörtel bei RI-Pfählen, Bauvorhaben SONY-CENTER, Berlin, Potsdamer Platz; im Auftrag der Ed. Züblin AG, Bergische Universität Gh-Wuppertal, Lehrstuhl für Stahlbau und Verbundkonstruktionen, unveröffentlicht
- [13] DIN EN ISO 12944–4:1998–07: Beschichtungsstoffe – Korrosionsschutz von Stahlbauten durch Beschichtungssysteme – Teil 4: Arten von Oberflächen und Oberflächenvorbereitung
- [14] *Brinkgreve, R. B. J.; Broere, W.; Waterman, D.* (Eds., 2008): PLAXIS 2D – Version 9.0; Manual Handbook, Delft University of Technology & PLAXIS b.v., Netherlands
- [15] *Brinkgreve, R. B. J.; Broere, W.* (2004): PLAXIS 3D Tunnel – Version 2; Manual Handbook, Delft University of Technology & PLAXIS b.v., Netherlands
- [16] *von Wolffersdorff, P. A.; Koletzko, A.; Marx, S.; Rosner, S.* (2009): Scherkondetalbrücke – Untersuchungen zum Interaktionsverhalten zwischen Brückenwiderlager und Anschlussdamm; Vorträge zum Ohde-Kolloquium 2009, Mitteilungen des Institutes für Geotechnik der Technischen Universität Dresden, Heft 16, S. 179–200
- [17] DIN 1045–1:2008–08: Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton – Teil 1: Bemessung und Konstruktion
- [18] DIN 1055–100:2001–03: Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 100: Grundlagen der Tragwerksplanung, Sicherheitskonzept und Bemessungsregeln

Produkte und Projekte

Toleranzen bei Bohrpfählen und Schlitzwänden

Die Anwendungsgebiete von Bohrpfählen und Schlitzwänden sind vielfältig. Beim maschinellen U-Bahnbau werden zum Beispiel wasserdichte Start- und Zielbaugruben, Haltestellenbaugruben sowie Notausstiege mittels überschnittener Bohrpfähle und Schlitzwände hergestellt. Auch für die Herstellung von Dichtblöcken für die Ein- und Ausfahrt der Tunnelvortriebsmaschinen werden sie eingesetzt. Von großer Bedeutung sind dabei die in der Praxis zu erreichenden Maßabweichungen in Lage und Tiefe. Schließlich reichen die Verbautiefen beider Verfahren bis zu 40 Meter.

Herstellungsbedingte Abweichungen sind per DIN-Norm geregelt; bei Bohrpfählen erlaubt DIN EN 1536 in Abhängigkeit von der Neigung zwei bis vier Prozent, bei Schlitzwänden DIN EN 1538 ein Prozent. Die Einhaltung der Normen hat wesentliche Auswirkungen auf die Baukosten. So müssen beispielsweise bei wasserdichten Verbauwänden mit großen Tiefen Konstruktionsdicken beachtet werden, die

häufig über den statisch erforderlichen Dicken liegen. Bei Bauteilabmessungen sind Zuschläge erforderlich, damit die erforderlichen Maße der endgültigen Baugrubenwände eingehalten werden. Bei Toleranzüberschreitungen fallen aufwändige Verfüllarbeiten an. Dank maschinentechnischer Weiterentwicklungen sowohl bei den Spezialtiefbauunternehmen als auch bei Kontroll- und Messverfahren stellen die Normen der Herstelltoleranzen in der Praxis mittlerweile die Obergrenze dar. Das Forschungsvorhaben der FH Münster soll nun konkrete Aussagen zu möglichen Bandbreiten der Herstellgenauigkeit in Abhängigkeit diverser Randeinflüsse liefern. Mit Unterstützung durch die Beratern Ingenieure von Spiekermann werden umfangreiche Recherchen und Datenerhebungen auf unterschiedlichen Baustellen im In- und Ausland durchgeführt und anschließend aufbereitet und statistisch ausgewertet.

www.spiekermann.de