

Suspensionsgestützte Pfähle in bindigem Boden, dargestellt an Pfählen in der Hamburger Allee im Frankfurter Ton

Dr.-Ing. Thomas Voigt

Prof. Dr.-Ing. Rolf Katzenbach

Dipl.-Ing. Ulrich Adamietz

1 Gründungspfähle im Frankfurter Ton

In den letzten Jahren wurden in Frankfurt am Main zunehmend Bauvorhaben realisiert, bei denen auf einer Teilfläche des Bauvorhabens Hochhausbebauungen zusammen mit großflächigen Tiefgaragen ausgeführt wurden. Bei einer fugenlosen Ausbildung des Kellerkastens als „Weiße Wanne“ werden die monolithische Fundamentplatte und Teile der aufgehenden Konstruktion dabei durch hohe Lasten im Hochhausbereich und vergleichsweise geringe Lasten im restlichen Kellerkasten beansprucht. Bei einem setzungsempfindlichen Baugrund wie dem Frankfurter Ton würde dies im Fall einer Flachgründung zu großen Setzungen im Hochhausbereich und geringen Setzungen im restlichen Kellerkasten führen. Im Übergangsbereich käme es somit zu einer unverträglichen Beanspruchung der Fundamentplatte durch den großen Setzungsunterschied. Daher ist es inzwischen Stand der Technik, die Fundamentsetzungen im Hochhausbereich und die Setzungsunterschiede im Übergangsbereich durch eine im Hochhausbereich angeordnete Kombinierte Pfahl-Plattengründung (KPP) zu minimieren und damit die Gebrauchstauglichkeit und die Standsicherheit des Hochhauses zu gewährleisten [5], [6]. Mit dem Anwachsen der Hochhauslasten und der Konzentration der Lasten im Zentrum des Kellerkastens bei zuneh-

mend höherer Bebauung wird auch der Einsatz von immer längeren Bohrpfählen erforderlich.

Bei den verfügbaren Werkstoffen und der verfügbaren Maschinenteknik werden die Grenzen der Ausführbarkeit verrohrt hergestellter, nicht teleskopierter Bohrpfähle im Frankfurter Baugrund größenordnungsmäßig bei Bohrtiefen von 40 m erreicht. Bei größeren Pfahllängen wächst das Risiko, dass die Verrohrung im Baugrund stecken bleibt oder sogar abreißt. Die bei größeren Bohrtiefen bisher ausgeführten teleskopiert verrohrten Bohrpfähle sind in der Herstellung sehr aufwendig. Mit dem Einsatz von bentonitgestützt hergestellten Bohrpfählen wird die vorgenannte Pfahllängenbegrenzung aufgehoben und eine wirtschaftliche Alternative zum verrohrt hergestellten Pfahl aufgezeigt.

Während in Asien und Amerika bevorzugt Bohrpfähle unverrohrt mit polymerer oder mineralischer Stützflüssigkeit hergestellt werden, hat sich in Europa und insbesondere in Deutschland die verrohrt hergestellte Bohrung durchgesetzt; dies u.a. wegen der weltweit führenden Verrohrungstechnik, der sicheren Herstellung und auch wegen der Entsorgungsproblematik der verbrauchten Stützflüssigkeit.

Der Einfluss der Stützflüssigkeit auf die Tragfähigkeit von Bohrpfählen wurde und wird kontrovers diskutiert bis zur Aussage, dass der Filterkuchen bei suspensionsgestützt hergestellten Pfählen die Pfahltragfähigkeit reduziere, [1]-[4]; [7]-[13]. Dies alles hat die Akzeptanz von suspensionsgestützt hergestellten Bohrpfählen hierzulande bisher eingeschränkt .

2 Vergleichende Probelastungen an verrohrt und an suspensionsgestützt hergestellten Bohrpfählen im Frankfurter Ton

Zum Nachweis der Gleichwertigkeit von suspensionsgestützt hergestellten Pfählen mit Pfählen, die im Frankfurter Ton mit Verrohrung und mit Wasserauflast hergestellt worden sind, wurden im Rahmen der Baumaßnahme Hamburger Allee in Frankfurt am Main von der Fa. Züblin Spezialtiefbau GmbH eigenständige vergleichende Grundsatzuntersuchun-

gen zur Beurteilung der Pfahltragfähigkeit bei den vorgenannten unterschiedlichen Herstellungsverfahren an insgesamt 4 Probepfählen durchgeführt.

2.1 Baugrund- und Grundwasserverhältnisse

Gemäß dem Baugrundgutachten und der im Rahmen der Pfahlversuche durchgeführten zusätzlichen 20 m tiefen Erkundungsbohrung BK1/02 stehen unter der bei ca. 93 mNN liegenden Geländeoberfläche des Voraushubniveaus am Teststandort in der Hamburger Allee die Schichten I - IV an:

Schicht I: Auffüllung aus gemischtkörnigen Mineralböden, Dicke rd. 2 m

Schicht II: sandiger, kiesiger und toniger Schluff steifer Konsistenz (diese Schicht wurde im direkten Bereich der Pfahlversuche nicht angetroffen)

Schicht III: Sande und Kiese mitteldichter Lagerung, Dicke rd. 2,5 m

Schicht IV: Frankfurter Ton von steifer bis halbfester Konsistenz, anstehend ab einem Niveau von 88,8 mNN bis zur Erkundungstiefe.

Stark schluffiger, schwach feinsandiger dunkelolivgrauer Ton, ausgeprägt plastisch und stratigraphisch den oberen Hydrobien zugeordnet. Im Bereich von 78,5 mNN bis 79,2 mNN wurde im Ton eine geschlossene Vertikalkluft bzw. Harnischfläche vorgefunden, im Niveau von 85,85 mNN bis 85,65 mNN eine 0,2 m dicke Kalksteinbank angetroffen.

Die bei der Bestimmung der Atterberg'schen Grenzen nach DIN 18122 an vier Einzelproben der Schicht IV ermittelten Konsistenzzahlen liegen zwischen $I_c = 0,65$ und $I_c = 0,83$; die einaxialen Druckfestigkeiten nach DIN 18136 zwischen $q_u = 106 \text{ kN/m}^2$ und $q_u = 393 \text{ kN/m}^2$.

Versuche mit dem Taschenpenetrometer ergaben korrelierend undrainierte Scherfestigkeiten von $c_u = 75 \text{ kN/m}^2$ bis $c_u = 225 \text{ kN/m}^2$ bei einem Mittelwert von ca. $c_u = 165 \text{ kN/m}^2$. Die bodenmechanischen Kennwerte wurden zu $\gamma / \gamma' = 20 / 10 \text{ kN/m}^3$ bei einem Reibungswinkel von $\varphi' = 20^\circ$ und einer Kohäsion von $c' = 20 \text{ kN/m}^3$ festgelegt. Das Grundwasser stand während der Versuche bei 91,6 mNN. Bei diesem Wasserstand lag der gesamte

Pfahlversuchskörper während der Herstellung und der Durchführung der Versuche ständig unter Wasser.

2.2 Versuchsaufbau

Die Planung und Durchführung der 4 Pfahlprobelastungen wurde in Anlehnung an DIN 4014, DIN 1054 und die Empfehlungen des Arbeitskreises 5 der DGGT „Statische axiale Probelastungen von Pfählen“ (AK 5) vorgenommen. Überprüft werden sollte die Vergleichbarkeit der Mantelreibung, so dass die Pfahlprobelastungen als Zugversuche durchgeführt werden konnten. Der Versuchsaufbau ist in den Bildern 1 –3 dargestellt.



Bild 1: Versuchsaufbau in situ • Vergleichende Pfahlprobelastungen im Frankfurter Ton in der Hamburger Allee in Frankfurt am Main

Die Lasteinleitung der Zugkräfte erfolgte über vier GEWI-Stäbe Durchmesser 50 mm über den Pfahlfuß, wo die GEWI-Stäbe durch eine Fußkreuzkonstruktion verbunden waren. Die GEWI-Stäbe wurden in Leerrohren geführt, so dass eine definierte Lasteinleitung am Pfahlfuß gewährleistet und eine Lasteinleitung im Bereich des Pfahlschaftes sicher vermieden werden konnte. Die Belastung der Pfähle erfolgte also wie bei einem Druckrohranker.

Zur Erzielung einer definierten Lasteinleitungshöhe am Pfahl wurde oberhalb des Pfahlkopfes eine mehrlagige Membran aus Kunststofffolien mit eingelegtem Drainagematte am konstruktiv erforderlichen Bewehrungskorb angebracht. Mit dieser Membran kann die Mantelreibung auch bei einer ggf. zu hoch erfolgten Betonage am Pfahlkopf ausgeschaltet werden. Über dem planmäßigen Pfahlbeton wurde das Bohrloch bei allen Pfählen nach der Betonage mit einer Zementsuspension verfüllt.

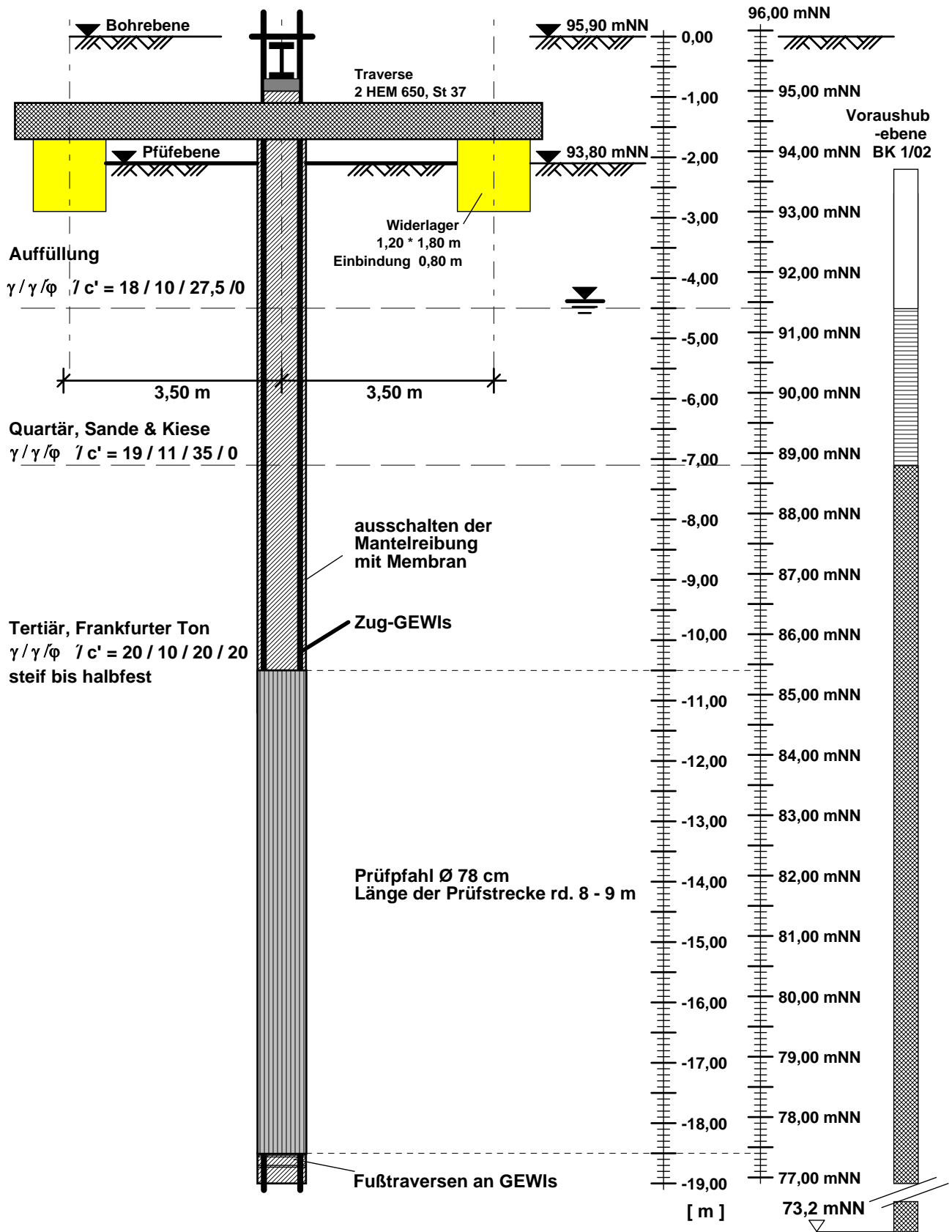


Bild 2: Skizze des Versuchsaufbaus

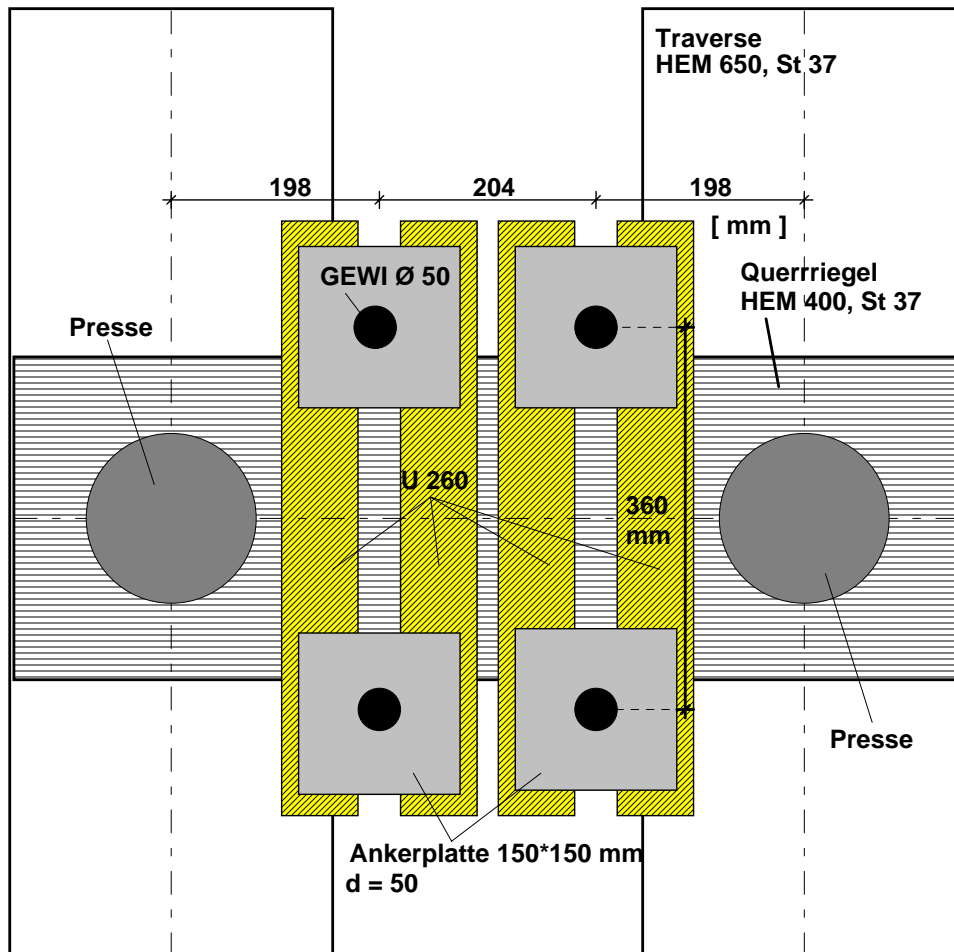


Bild 3: Draufsicht auf die Kopfausbildung der Lasteinleitung

Zur Ausführung gelangten Pfähle mit einem Durchmesser von $D = 0,78$ m. Die Pfähle Nummer 1 und 2 wurden konventionell im Schutz einer Verrohrung mit Wasserauflast unter Verwendung einer Bohrschnecke hergestellt.

Die Pfähle 3 und 4 wurden unterhalb eines Ansatzrohres im Bereich des Frankfurter Tons mit einem Bohreimer abgeteuft und die Bohrlöcher mit einer Bentonitsuspension gestützt. Die Bentonitsuspension wurde anschließend durch das Einbringen des Betons im Kontraktorverfahren sukzessive nach oben in den Bereich der Leerbohrstrecke verdrängt.



Bild 4: Pfahlkorb vor dem Einbau mit Membran im „Leerbohrbereich“

Zur Dimensionierung der Versuchseinrichtung wurde die Pfahlgrenztragfähigkeit auf der Grundlage einer Grenzmantelreibung von 100 kN/m^2 prognostiziert. Dieser Wert liegt an der Obergrenze der im Frankfurter Ton in der vorliegenden Tiefe zu erwartenden Grenz-mantelreibungen, die nach den bisherigen Erfahrungen normalerweise mit Werten zwischen $\tau_{mf} = 60 \text{ kN/m}^2$ bis $\tau_{mf} = 80 \text{ kN/m}^2$ angenommen werden.

Als rechnerische theoretische Grenzlast für die Festlegung der Laststufen wurde $P_{\text{grenz}} = 1.650 \text{ kN}$ gewählt.

In der folgenden Tabelle sind die auf der Grundlage des eingebauten Volumens des Pfahlbetons ermittelten und bei der Auswertung verwendeten Pfahllängen und Pfahlmantelflächen zusammengestellt.

Pfahlnummer	Pfahllänge [m]	Pfahlmantelfläche [m ²]
Pfahl 1 (verrohrt)	9,06	22,20
Pfahl 1 (verrohrt)	8,05	19,73
Pfahl 3 (Suspension)	9,05	22,18
Pfahl 4 (Suspension)	9,05	22,18

Tabelle 1: Hergestellte Pfahllängen und ermittelte Pfahlmantelflächen

2.3 Versuchsdurchführung und Versuchsergebnisse

Ausgehend von einer Vorlast von 100 kN wurden die Laststufen gemäß den Empfehlungen des AK 5 der DGGT sukzessive in den Laststufen 200 kN, 400 kN, 650 kN, 850 kN, 1.050 kN, 1.450 kN bis zur angesetzten Grenzlast von 1.650 kN aufgebracht. Nach dem Erreichen der 1,5-fachen theoretischen Gebrauchslast bei 1.250 kN und der theoretischen Grenzlast wurde jeweils eine Entlastung des Pfahles in Zwischenstufen bis auf die Vorlast vorgenommen. Die Lastaufbringung erfolgte über zwei hydraulische Pressen die gemeinsam von einem Hydraulikaggregat gesteuert wurden. Die aufgebrachten Pressenkräfte wurden über zwei kalibrierte Kraftmessdosen überprüft.

Zur Messung der vertikalen Pfahlhebungen wurden zwei Stangenpegel mit Hüllrohr eingebaut, die am Pfahlfuß und am planmäßigen Pfahlkopf befestigt waren. Die Messung erfolgte über Feinmessuhren mit 1/100 mm Skalenteilung, die über ein Messgerüst unabhängig von den Pfahl- und Widerlagerverformungen gelagert waren.

Folgende Messgrößen wurden während der Versuche aufgezeichnet:

1. Pfahlkraft über die Kraftmessdosen
2. Pressenhub durch Ablesung mittels Nivellement
3. Setzungen der Widerlager durch Nivellement
4. Lageänderung der Traverse durch Nivellement
5. Pfahlhebung über die Stangenpegel durch Messuhren

Bei der Auswertung der Versuchsergebnisse wurden nur die mantelreibungserzeugenden Lasten (ohne Eigengewicht des Pfahles) betrachtet.

Die Versuchsergebnisse sind in der nachfolgenden Tabelle wiedergegeben.

	Grenzmantelreibung [kN/m ²]
Pfahl 1 (verrohrt)	73,3
Pfahl 1 (verrohrt)	70,2
Pfahl 3 (Suspension)	84,2*
Pfahl 4 (Suspension)	69,2

Grenzmantelreibung *) aus max. Prüflast ermittelt;
Grenzzustand nicht erreicht

Tabelle 2: Gemessene Grenzmantelreibungen

Die gemessenen Kraft-Verschiebungsdiagramme sind in Bild 5 dargestellt; bei Pfahl 3 hat sich bei der maximal aufgetragenen Prüflast noch kein eindeutiges Versagen des Pfahlmantels gezeigt (Bild 5).

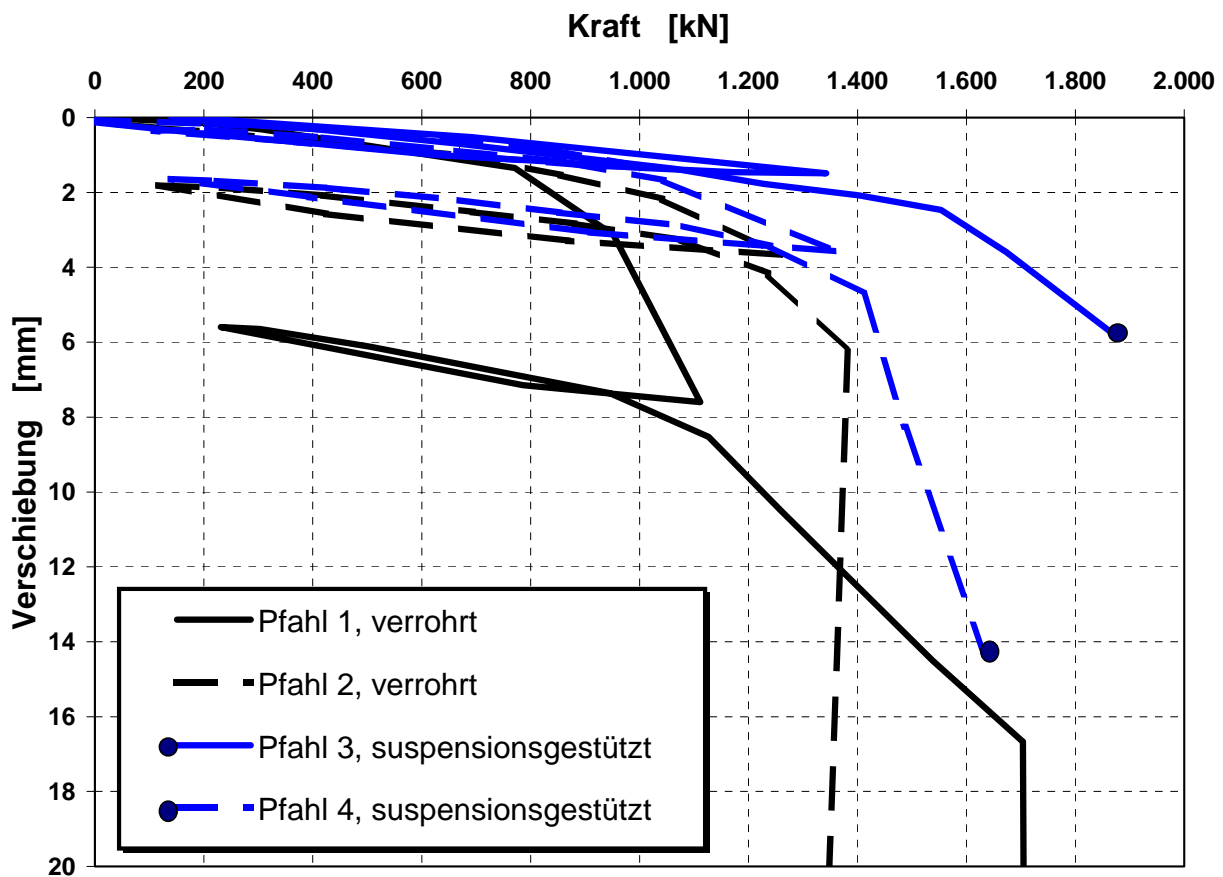


Bild 5: Gemessene Kraft-Verschiebungsdiagramme der Probepfähle

Die Versuchsergebnisse zeigen, dass bei den Pfählen 1 und 2 ein deutliches Versagen beim Erreichen der Grenzmannelreibung eingetreten ist. Bei den Pfählen 3 und 4 wurde ein Versagen nicht vollständig erreicht. Die Steigungsänderung der Kurve für den Pfahl 4 lässt bei den letzten Laststufen jedoch ein typisches Verhalten im Grenzbereich der Bruchlast erkennen.

Hilfswise wurde für die Beurteilung der Pfähle 3 und 4 bei den letzten Laststufen das Kriterium für das Kriechverhalten nach der DIN 4125 herangezogen. Das maximale Kriechmaß bei Pfahl 3 lag bei der maximalen Laststufe von $Q = 1.867 \text{ kN}$ bei $k_s = 1,15 \text{ mm}$ in einer gemäß DIN 4125 zulässigen Größenordnung. Bei Pfahl 4 lag das Kriechmaß bei der maximalen Laststufe von $Q = 1.631 \text{ kN}$ mit $k_s = 2,3 \text{ mm}$ oberhalb des nach DIN 4125 zulässigen Wertes von 2 mm . Die für das Kriechmaß von $k_s = 2,0 \text{ mm}$ ermittelte Last beträgt $Q = 1.536 \text{ kN}$ und entspricht einer Grenzmannelreibung von $\tau_{mf} = 69,2 \text{ kN/m}^2$.

2.4 Bewertung der Versuchsergebnisse

Mit den vergleichenden Pfahlversuchen wurde gezeigt, dass mit suspensionsgestützt hergestellten Pfählen im Frankfurter Ton in jedem Fall die gleiche Manteltragfähigkeit wie mit verrohrt und mit Wasserauflast hergestellten Pfählen erzielt wird.

Die mittlere gemessene Grenzmantelreibung der suspensionsgestützt hergestellten Pfähle liegt in dem hier vorgestellten Fall mit $\tau_{mf} = 77 \text{ kN/m}^2$ geringfügig, und zwar um 7 % über einer mittleren Grenzmantelreibung der verrohrt hergestellten Pfähle von $\tau_{mf} = 72 \text{ kN/m}^2$.

3. Schlussbemerkung

Im Frankfurter Ton lagen bisher keine vergleichenden Untersuchungen zur Tragfähigkeit für suspensionsgestützt bzw. verrohrt hergestellte Bohrpfähle vor. Bei den im Jahr 2002 in der Hamburger Allee in Frankfurt am Main ausgeführten, vergleichenden Pfahlprobelastungen mit 2 verrohrt und 2 suspensionsgestützt hergestellten Bohrpfählen im Frankfurter Ton wurde gezeigt, dass die Grenzmantelreibung der geprüften Bohrpfähle im Frankfurter Ton unabhängig davon ist, ob die Pfähle verrohrt mit Wasserauflast oder unverrohrt mit Suspensionsstützung hergestellt werden. Die mit den Probelastungen ermittelte Grenzmantelreibung beträgt im vorliegenden Fall bei den suspensionsgestützten Pfählen 77 kN/m^2 und ist geringfügig größer als die der verrohrt hergestellten Pfähle ($\tau_{mf, \text{mittel}} = 72 \text{ kN/m}^2$).

Bei suspensionsgestützt hergestellten Pfählen entsteht ein unregelmäßigerer Schaft, der bei rolligen Böden deutlicher ausgeprägt ist als bei bindigen Böden. Der Filterkuchen ist bei rolligen Böden ebenfalls stärker ausgeprägt und wirkt im Korngerüst verfestigend. Bei bindigen Böden wird ein Eindringen der Stützflüssigkeit in das Korngerüst durch die geringe Durchlässigkeit weitestgehend verhindert. Der bei Laborversuchen und freigelegten Probelastungspfählen festgestellte Scherbruch lag bei rolligen Böden außerhalb des Filterkuchens. Bei bindigen Böden existiert keine die Pfahltragfähigkeit ungünstig beeinflussende Filterkuchenschicht.

Bei sorgfältiger, qualitätsgesicherter und entsprechend überwachter Herstellung von suspensionsgestützten Pfahlbohrungen, anschließender Säuberung der Bohrlochsohle und bei zügigem Betonieren des Pfahles treten tragfähigkeitsmindernde Einflüsse der Bentonitsuspension weder bei rolligen noch bei bindigen Böden auf. Eine Abminderung der Mantelreibung kann allerdings durch eine große Standzeit der Suspension im Bohrloch auftreten, was durch qualitätssichernde Maßnahmen und Kontrollen verhindert werden muss.

LITERATUR

- [1] Degebo (1983): *Einfluß der Lagerungsdichte des Bodens und der Herstellungsart von Großbohrpfählen auf deren Tragfähigkeit*
Abschlussbericht Degebo, 1983
- [2] Fleming W. P. K. et al., *Piling Engineering*, 2nd Edition 1992, Blackie&Son Ltd, Glasgow and London
- [3] Fleming, W. K., Sliwinski, Z. J. (1977): *The Use and Influence of Bentonite Bored Pile Construction*
CIRIA, London, 1977
- [4] Fleming, W.G.K., Weltman, A. J., Randolph, M. F. & Elson, W.K. (1992): *Piling Engineering*
John Willy & Sons
- [5] Hanisch, J., Katzenbach, R., König, G.: *Kombinierte Pfahl-Plattengründungen*
Ernst & Sohn, Berlin
- [6] Katzenbach, R.: Zur technisch-wirtschaftlichen Bedeutung der Kombinierten Pfahl-Plattengründung *Bautechnik* 70, 1993, H.3, 161-170
- [7] Kempfert, H. G. (1982): Vergleichende Auswertung von Probelastungen der DB an Großbohrpfählen in nichtbindigem Untergrund
Geotechnik 1, 1982, DGGT, Essen 1982, S. 23-32
- [8] Lange, S. (1984): *Überprüfung des möglichen Herstellungseinflusses von Großbohrpfählen auf deren Tragfähigkeit*
Baugrundtagung 1984 in Düsseldorf, DGGT, Essen 1984, S. 562 - 567

- [9] O'Neill, M. W., Reese, L. C. (1970): *Behaviour of Axially Loaded Drilled Shafts in Beaumont Clay*
Research Report 89-8, Center for Highway Research, The University of Texas at Austin, Austin, TX, 792 pp.
- [10] O'Neill, M. W., Reese, L. C. (1972): *Behaviour of Axially Loaded Drilled Shafts in Beaumont Clay*
Journal of the soil mechanics and foundation division, Vol. 89, No. SM 2, February 1972, Proc. ASCE, 1972, pp. 195 ff
- [11] Reese, L. C., O'Neill, M. W., Touma, F. T. (1973): *Bored Piles Installed by Slurry Displacement*
Proc. 8th ICSMFE, Moskau 1973, pp. 203 - 209
- [12] Stocker, M. (1979): *Der Einfluß von Bentonitsuspension auf die Tragfähigkeit unverrohrs hergestellter Bohrpfähle*
Symposium: Stand von Normung, Bemessung und Ausführung von Pfählen und Pfahlwänden - München 1977, DGGT, Essen 1979
- [13] Stocker, M. (1980): *Vergleich der Tragfähigkeit unterschiedlich hergestellter Pfähle*
Baugrundtagung 1980 in Mainz, DGGT, Essen 1980, S. 565 ff.

AUTOREN

Dr.-Ing. Thomas Voigt, Ed. Züblin AG, Technisches Büro Tiefbau (TBT) , Albstadtweg 3,
70567 Stuttgart (Tel.: 07 11 / 78 459)

Prof. Dr.-Ing. Rolf Katzenbach, Direktor des Institutes und der Versuchsanstalt für Geo-
technik der Technischen Universität Darmstadt, Petersenstraße 13, 64287 Darmstadt
(Tel.: 0 61 51 / 16 21 49)

Dipl.-Ing. Ulrich Adamietz, Ingenieursozietät Professor Dr.-Ing. Katzenbach GmbH,
Pfaffenwiese 14A, 65931 Frankfurt am Main (Tel.: 0 69 / 9 36 22 30)