

Ergebnisse einer Pfahlprobekbelastung in den Frankfurter Kalken mit 78 MN Grenzlast

Dr.-Ing. Matthias Vogler

Prof.-Dr.-Ing. Rolf Katzenbach

Einleitung

Im Zuge der Planung des Baugrubenverbaus und der Gründung des Projektes Frankfurt-HochVier in Frankfurt am Main wurde zur Ermittlung der Tragfähigkeit der insgesamt rd. 1000 Bohrpfähle eine Pfahlprobekbelastung durchgeführt. Aufgrund der projektspezifischen Randbedingungen wurde bei dieser Pfahlprobekbelastung das Osterbergverfahren mit im Probepfahl eingebauten O-Zellen angewendet, dass hierbei erstmalig in Deutschland eingesetzt wurde.

Bei Pfahlprobekbelastungen im Fels sind im Allgemeinen sehr hohe Prüflasten erforderlich, um die Bruchwerte der Mantelreibung und des Pfahlsitzenwiderstandes im Fels zu ermitteln. Am Projektstandort des Projektes FrankfurtHochVier werden die tragfähigen Felschichten der Frankfurter Kalke durch eine mehrere Dekameter dicke Schicht aus quartärem Lockergestein und dem Frankfurter Ton überlagert. Zur Ermittlung der Tragfähigkeit der Felsschichten muss die Übertragung der Mantelreibung der überlagernden Schichten versuchstechnisch ausgeschaltet werden. Die üblicherweise zur Verhinderung der Übertragung der Mantelreibung eingesetzten Hülsenkonstruktionen übertragen häufig eine nur schwer quantifizierbare Restmantelreibung. Aufgrund dieser Randbedingungen stoßen konventionelle statische Pfahlprobekbelastungen in felsigem Baugrund schnell an die Grenzen der Ausführbarkeit.

Beim Osterbergverfahren wird der Probepfahl als Pfahlsegment innerhalb der zu untersuchenden Boden- oder Felsschichten hergestellt und in den überlagernden Bodenschichten entweder das Bohrloch durch Wasser, Suspension oder einen Einkornkies gestützt bzw. bei ausreichender Standfestigkeit der Bohrlochwand auch ungestützt belassen. Bei der Probekbelastung wird dann im Allgemeinen der Pfahlmantel des Pfahlsegmentes gegen die Pfahlsitze mittels im Pfahl eingebauten Pressenzellen (O-Zellen) bis zum Bruch belastet.

Projekt FrankfurtHochVier

Das rd. 17.400 m² großen Baufeld soll mit einer Bruttogeschosfläche von rd. 180.000 m² (davon 60.000 m² unterirdisch) neu bebaut werden. Die bestehende Bebauung darunter auch das historische Thurn- und Taxis Palais wird zuvor konservatorisch rückgebaut. Hierbei wird u. a. das 1954 gebaute Fernmeldehochhaus, das auf einer Tiefgründung aus Frankpfählen, die am Pfahlkopf mit Verformungselementen versehen waren, also einer modifizierten Pfahl-Plattengründung gegründet wurde, vollständig rückgebaut. Die Fußebene der Gründungspfähle der modifizierten Pfahl-Plattengründung liegt hier rd. 7 m oberhalb der geplanten Baugrubensohle, sodass die gesamte Tiefgründung des Fernmeldehochhauses im Zuge der Aushubarbeiten freigelegt wird.

Nach dem Errichten der Untergeschosse wird das Thurn- und Taxis Palais (Bauteil A) inklusive der konservatorisch rückgebauten Sandsteinfassade in den historischen Abmessungen wieder aufgebaut. Die aktuelle und zukünftige Höhe des Bauteils A beträgt rd. 17,8 m. Das geplante Bürohochhaus (Bauteil B), mit rd. 127 m das höchste Gebäude der Baumaßnahme, besitzt 32 Obergeschosse mit einer Grundfläche von je rd. 1.340 m². Das Hotelhochhaus (Bauteil C) hat bei 25 Obergeschossen eine Höhe von rd. 97,0 m. Der Retailbereich (Bauteil D) erstreckt sich über die gesamte östliche Hälfte des Baufeldes und hat bei 8 Geschossen eine Höhe von rd. 34 m (ohne Glasdach).



Bild 1: Visualisierung des Projekts FrankfurtHochVier

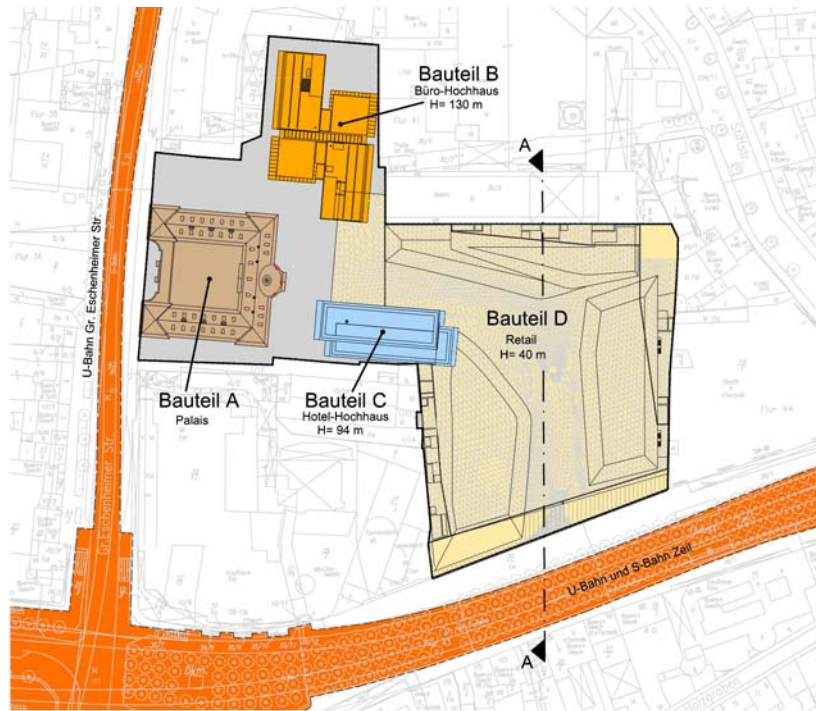


Bild 2: Lageplan Projekt FrankfurtHochVier

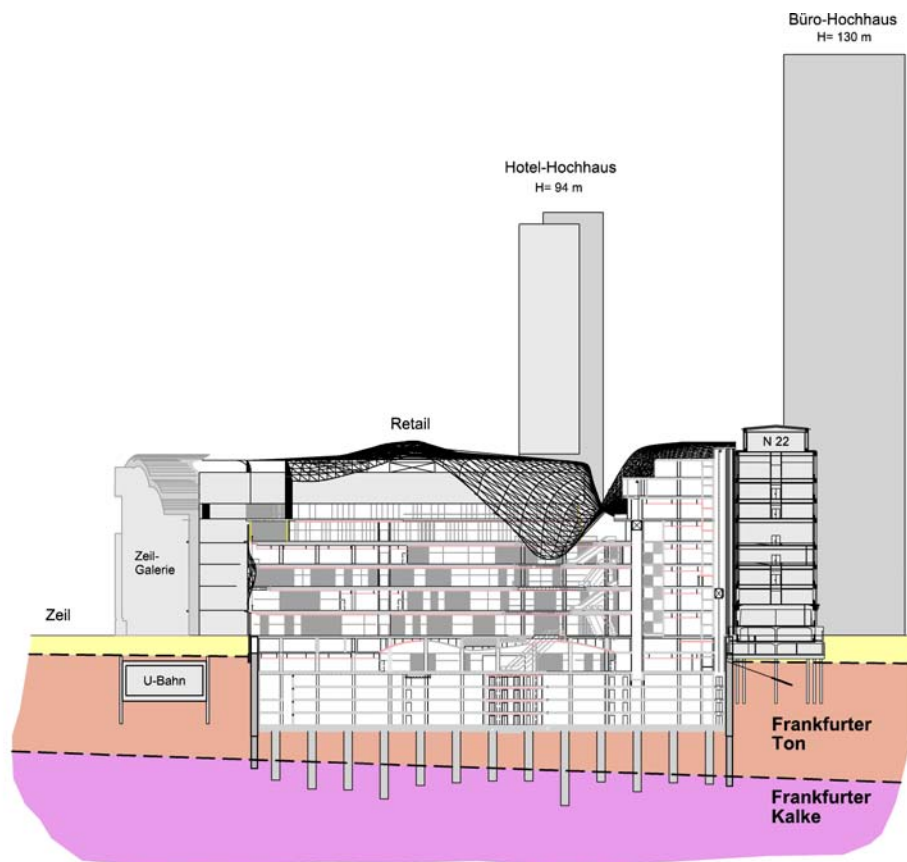


Bild 3: Baugrund- und Projektschnitt FrankfurtHochVier

Die fünfgeschossige Tiefgarage (Bauteil T) erstreckt sich über das gesamte Baufeld. Bei einem rd. 8,0 m hohen ersten Untergeschoss und 4 weiteren Tiefgeschossen ergibt sich eine Gründungstiefe von rd. 21,6 m unter dem Bauwerksnull, d. h. ein Niveau der Baugrubensohle von rd. 80,0 mNN.

Baugrund und Grundwasser

Das Baufeld befindet sich im Mainzer Becken am Nordrand der großtektonischen Grabenstruktur des Rheintalgrabens. Die tertiären Böden und das in mehreren 100 m Tiefe unter Gelände anstehende Grundgebirge sind tektonisch beansprucht.

Unter den künstlichen Auffüllungen stehen bis in eine Tiefe von rd. 2 – 5 m unter der Geländeoberfläche quartäre Sande, Kiese und Auelehme an, sofern das Quartär nicht durch künstliche Auffüllungen ersetzt wurde. Unter dem Quartär stehen die Schichtpakete des Frankfurter Tons und der felsigen Frankfurter Kalke an. Die Schichtpakete des Frankfurter Tons und der Frankfurter Kalke haben generell ein nach Nordwesten bis Nord-Nordwesten gerichtetes Schichteinfallen. Im Südosten des Baufeldes liegt die Schichtgrenze zwischen dem Frankfurter Ton und den Frankfurter Kalken nur rd. 4 m tief unter der Baugrubensohle, während sie im Nordwesten des Baufeldes, in dem Bereich in dem sich das Bürohochhaus befindet, rd. 12 m tief unter der Baugrubensohle liegt (Bild 3).

Das Grundwasser zirkuliert im Baufeld in zwei Grundwasserstockwerken, die mittelbar miteinander kommunizieren. Der obere, freie Grundwasserspiegel liegt innerhalb der quartären Sande und Kiese in rd. 8 m Tiefe unter der Geländeoberfläche. Das tertiäre Grundwasserstockwerk liegt im Frankfurter Ton bzw. in den Frankfurter Kalken.

Hier sind die eingelagerten Hydrobiensandschichten mäßig und die klüftigen Kalk- bzw. Dolomitsteinbänke stark wasserführend. In den einzelnen wasserführenden Schichten sind z. T. unterschiedliche Druckhorizonte mit gespanntem Grundwasser ausgebildet.

Aufgrund der Baugrundsituation mit der stark unterschiedlichen Schichtdicke des Frankfurter Tons unterhalb der Gründungsebene, der geometrischen Randbedingungen mit U- und S-Bahnbauwerken in der Zeil und der Großen Eschenheimer Straße, wo keine Rückverankerungen möglich sind, und der hohen Erd- und Wasserdrucklasten wurde als Gründungs- und Verbaukonzept die Herstellung der Baugrube in Deckelbauweise mit der Gründung der Primärstützen und der Bauwerkspfähle als Pfahlgründung nach DIN 4014 in den Frankfurter Kalken gewählt.

Bei den vorliegenden Grundwasserverhältnissen mit einem Bemessungswasserdruck von rd. 170 kN/m² auf die Unterfläche der Fundamentplatte ist in den Bereichen mit geringen Bauwerklasten der Nachweis der Auftriebssicherheit das für die Ermittlung der Pfahlängen entscheidende Kriterium. Im Bereich des Bürohochhauses sind über die Pfahlgründung maximale Stützenlasten von rd. 46 MN in den Baugrund abzuleiten. Im Hinblick auf die Anzahl von rd. 1.000 Bohrpfählen für die Gründung und Auftriebssicherung der Bauwerke, sowie für die Herstellung der Verbauwände erfolgte die Ermittlung des Pfahlspitzendruckes und der Pfahlmantelreibung innerhalb der Frankfurter Kalke auf der Grundlage der Ergebnisse einer Pfahlprobelastung.

Pfahlprobelastung in den Frankfurter Kalken beim Projekt FrankfurtHochVier mittels Osterbergzellen

Aufgrund der im Zuge der messtechnischen Überwachung beim Bau des neuen Commerzbank-Hochhauses gewonnenen Erfahrungen und den aus dem Baugrundaufbau am Projektstandort definierten Randbedingungen wurde für die Pfahlprobelastung beim Bauvorhaben FrankfurtHochVier eine Probelastung im Maßstab 1:1 geplant. Aufgrund der erwarteten hohen Pfahltragfähigkeit der Pfähle in den Frankfurter Kalken wurde eine Probelastung mit dem Osterberg-Verfahren ausgeführt. Die Pfahlprobelastung wurde als Multi-Level-Versuch ausgeführt, um den Einfluss einer Pfahlmantelverpressung auf die Grenztragfähigkeit der Frankfurter Kalke zu untersuchen.

Das suspensionsgestützt mit Teilverrohrung hergestellte Pfahlsegment an dem der Versuch durchgeführt wurde, bestand aus drei Abschnitten mit Durchmessern von je 1,68 m und war insgesamt rd. 12,9 m lang (Bild 4).

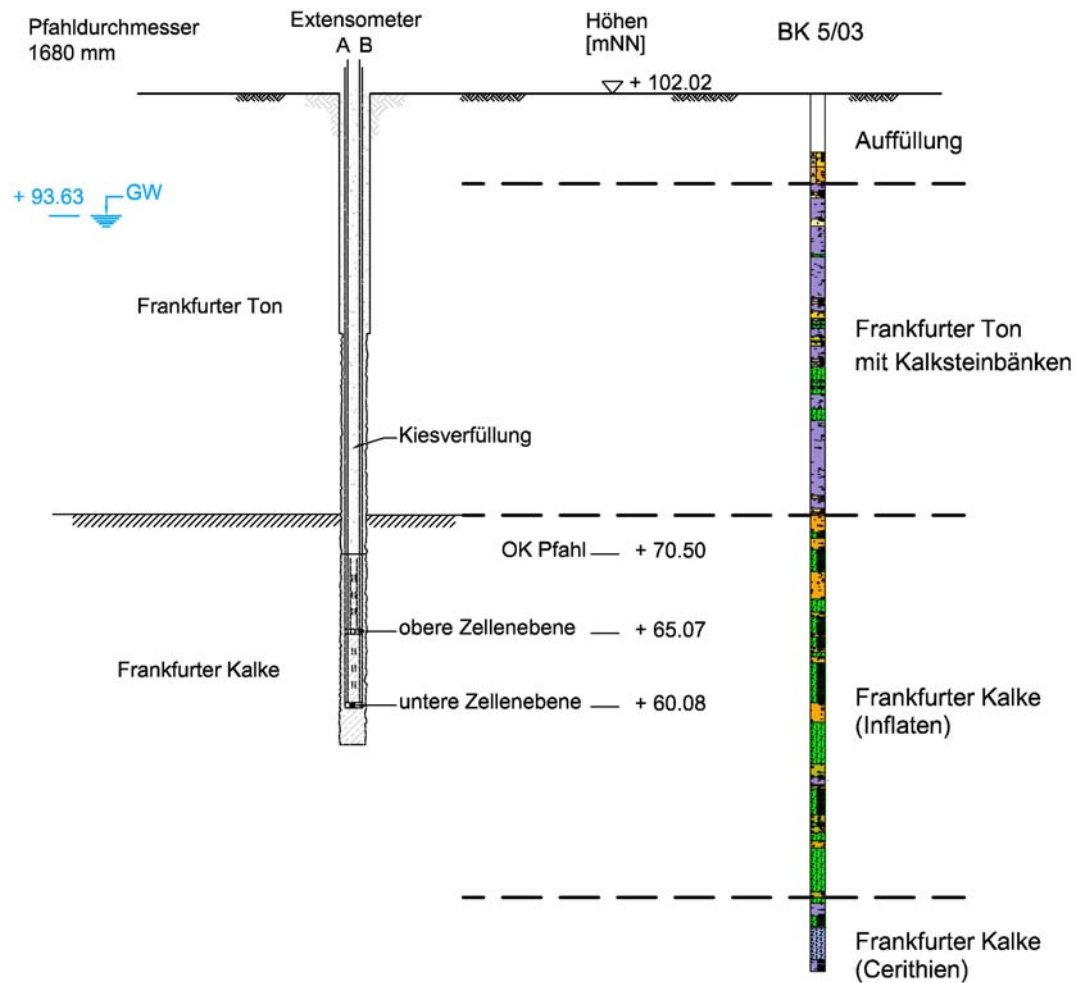


Bild 4: Prinzipdarstellung der Versuchseinrichtung

Die untere Pressenebene, die ebenso wie die obere Pressenebene aus drei Osterberg-Pressenzellen mit je 9 MN Maximaltragfähigkeit bestand, befand sich rd. 2,5 m oberhalb der Pfahlfußebene, die in rd. 44,4 m Tiefe unter der Geländeoberfläche lag. Die obere Pressenebene wurde 5 m oberhalb der unteren Pressenebene eingebaut, womit oberhalb des rd. 2,5 m langen Fußsegmentes zwei je rd. 5 – 5,4 m lange Pfahlsegmente entstanden, die unabhängig voneinander geprüft werden konnten.

Vor dem Einbau des Bewehrungskorbes wurde das Bohrloch gespült bis der verbleibende Sandanteil bei rd. 1,0 % lag. Die Vertikalität des Bohrlochs wurde mit dem Kodan Drilling Monitor gemessen (Bild 6). Die Messungen zeigten einen über die gesamte Länge des Bohrlochs konstanten Durchmesser ohne wesentliche Ausbrüche an der Bohrlochwand im suspensionsgestützten Bereich an. Die gemessene Lotabweichung betrug rd. 25 cm in der X-Richtung und rd. 20 cm in der Y-Richtung und lag somit bei rd. 0,6 %.

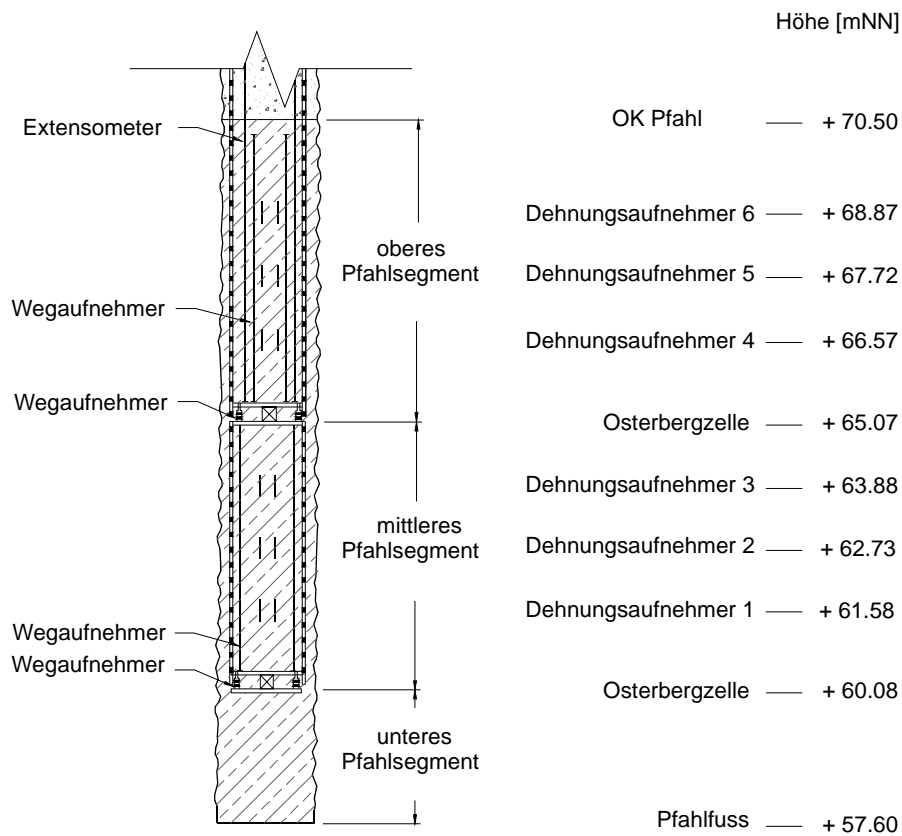


Bild 5: Pfahlsegment mit O-Zellen und Messtechnik

Der Bewehrungskorb bestand aus dem eigentlichen Bewehrungskorb mit den O-Zellen und der Messtechnik (Bild 7 und 9) und 2 Montagekörben die zur Führung des Korkes und zur Befestigung der Messkabel dienten. Nach dem Einbau des Bewehrungskorbes wurde der Pfahl im Kontraktorverfahren betoniert. Am Bewehrungskorb wurde eine Köcherkonstruktion befestigt um das Betonierrohr durch die Öffnungen zwischen den Pressenzellen bis zur Bohrlochsohle zu führen (Bild 8).

An dem mittleren Pfahlsegment wurde nach der Herstellung des Probepfahles eine Pfahlmantelverpressung ausgeführt und unterhalb des Pfahlfußes auf einer Länge von 5 m eine Gebirgsvergütung hergestellt. Der Bereich der Leerbohrung oberhalb des rd. 12,9 m langen Pfahlsegments wurde zur Stabilisierung der unverrohrt mit Suspensionsstützung hergestellten Bohrung mit Kies verfüllt. Der Bewehrungskorb mit der eingebaute Messtechnik ist im Bild 5 skizziert und in den Bildern 6 und 7 abgebildet.

Die einaxiale Druckfestigkeit wurde 16 Tage nach der Pfahlherstellung, d. h. am Tage der Probelastung zu $\beta_{w200} = 45 \text{ N/mm}^2$ ermittelt.



Bild 6: Vertikalitätsmessung mit dem Koden Drilling Monitoring

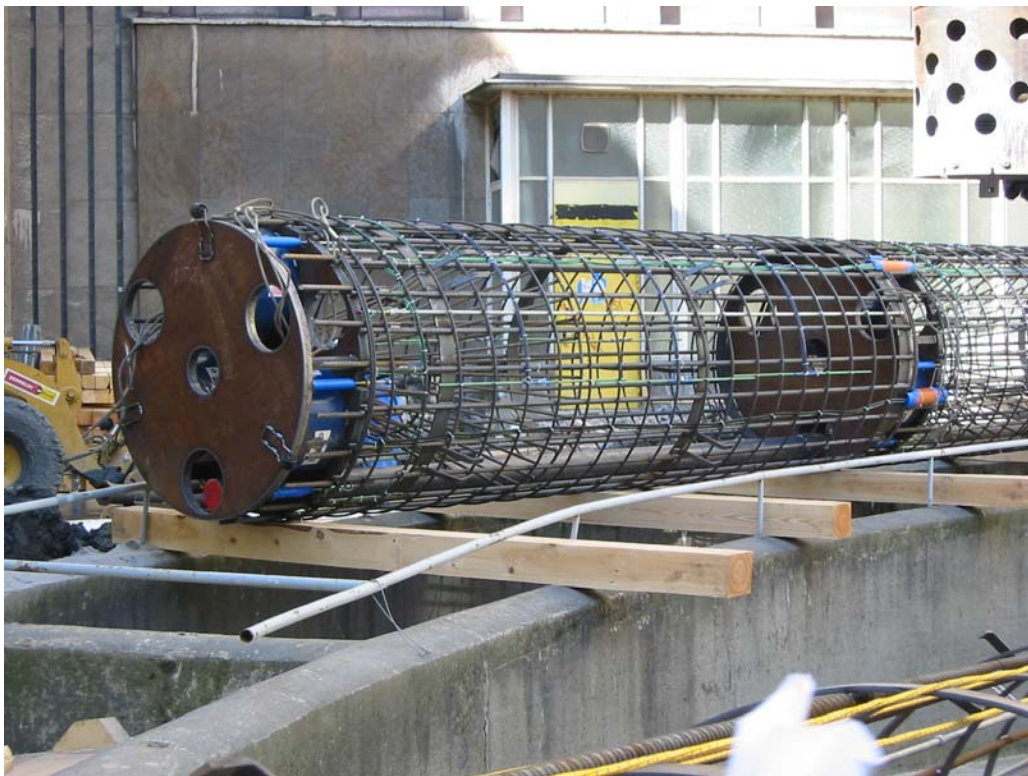


Bild 7: Foto des Bewehrungskorbes mit den zwei Pressenebenen vor dem Einbau



Bild 8: Foto der unteren Osterberg O-Zellenebene und des Köchers für das Betonierrohr



Bild 9: Versuchsaufbau der Pfahlprobelastung mittels Osterbergzellen beim Projekt FrankfurtHochVier

In der ersten Phase der Probelastung wurde das obere, nicht mantelverpresste Pfahlsegment mit den Osterbergzellen gegen das mittlere und untere Pfahlsegment belastet. In dieser Versuchsstufe wurde eine Grenzlast von rd. 24 MN erreicht. Bis zum Erreichen der Grenzlast hatte sich das obere Pfahlsegment um ca. 1,5 cm aus der Ursprungslage angehoben und das als Widerlager dienende mittlere und untere Pfahlsegment um ca. 1,0 cm gesetzt (Bild 11). Der aus den in je 3 Ebenen im oberen und mittleren Pfahlsegment durchgeführten Dehnungsmessungen ermittelte Normalkraftverlauf zeigt eine weitgehend gleichmäßige Abnahme der Normalkraft im oberen Pfahlsegment und somit eine weitgehend einheitliche Mantelreibung von rd. 830 kN/m² über die Pfahlänge an (Bild 12). Nach dem Erreichen der Grenzlast wurden die Pressen der oberen Ebene soweit auseinander gefahren, dass ein ausreichender Zwischenraum für die Versuchsdurchführung am mittleren Pfahlsegment entstand. Anschließend wurde der Druck aus der oberen Pressenebene abgelassen und somit das obere Pfahlsegment vom mittleren und unteren Pfahlsegment entkoppelt.



Bild 10: Versuchsaufbau der Pfahlprobelastung mittels Osterbergzellen beim Projekt FrankfurtHochVier

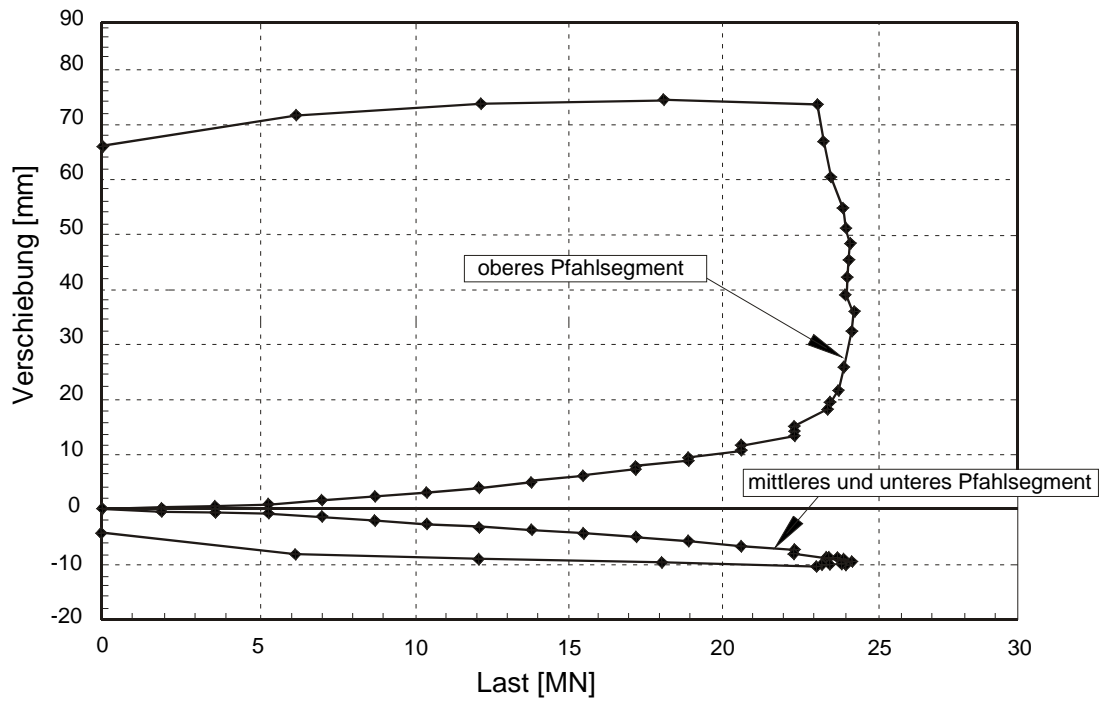


Bild 11: Last-Verschiebungsdiagramm der Versuchsphase 1 (obere Pressenebene)

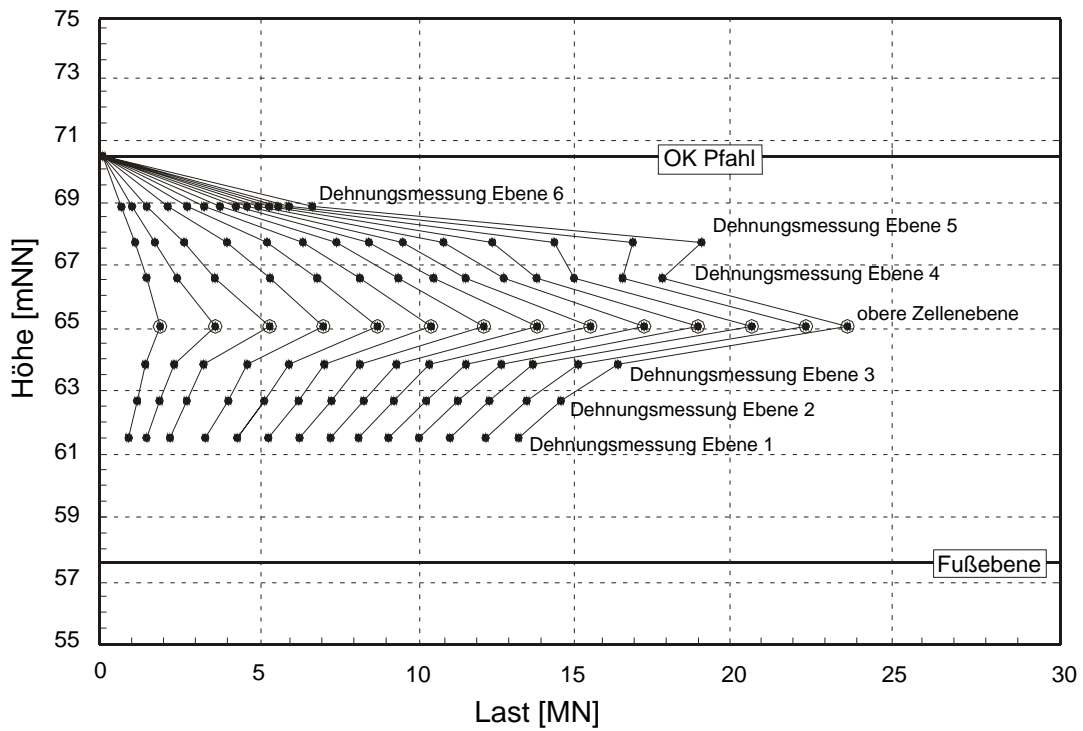


Bild 12: Normalkraftverlauf über die Pfahlänge während der Versuchsphase 1

In der zweiten Versuchsphase wurde das mittlere gegen das untere Pfahlsegment belastet. In dieser Versuchsstufe wurde die Grenzlast des mittleren, mantelverpressten Pfahlsegmentes bei rd. 27,5 MN erreicht. Während das mittlere Pfahlsegment, das die Last nur über die Mantelreibung abträgt, das typische lineare Verhalten bis zum Bruch aufweist, zeigt das untere Pfahlsegment das für den Spitzenwiderstand typische parabel-förmige Verformungsverhalten (Bild 13). Auch bei dieser Versuchsstufe zeigt der Normal-kraftverlauf eine relativ uniforme Mantelreibungsverteilung (Bild 14). Die Grenzmantelreibung des mantelverpressten mittleren Pfahlsegmentes ist mit rd. 1.040 kN/m² um ca. 24 % größer als die Grenzmantelreibung des nicht mantelverpressten oberen Pfahlsegments. Der Bruchwiderstand der Pfahlspitze des Probepfahles, an dem bis 5 m tief unter die Pfahlfußebene eine Gebirgsvergütung ausgeführt wurde, beträgt unter der Berücksichtigung der Mantelreibung des unverpresst hergestellten unteren Pfahlsegments rd. 7.000 kN/m².

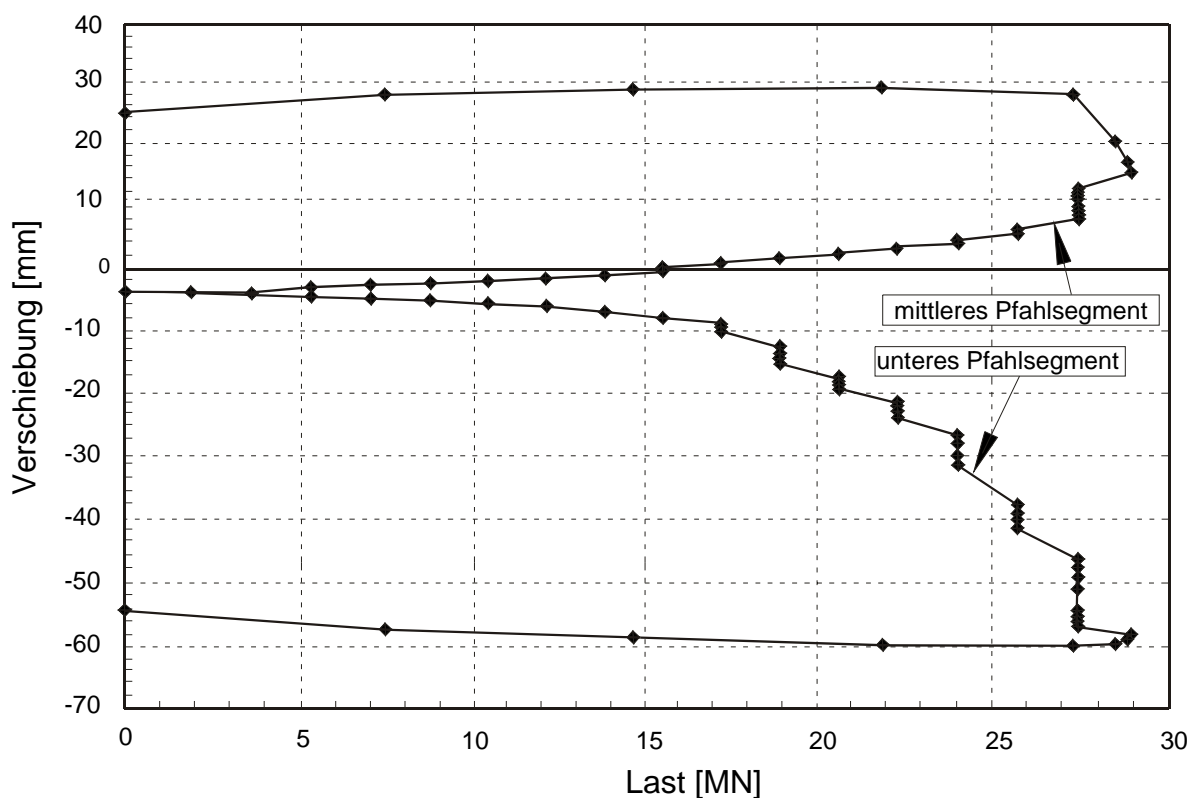


Bild 13: Last-Verschiebungsdiagramm der Versuchsphase 2 (untere Pressenebene)

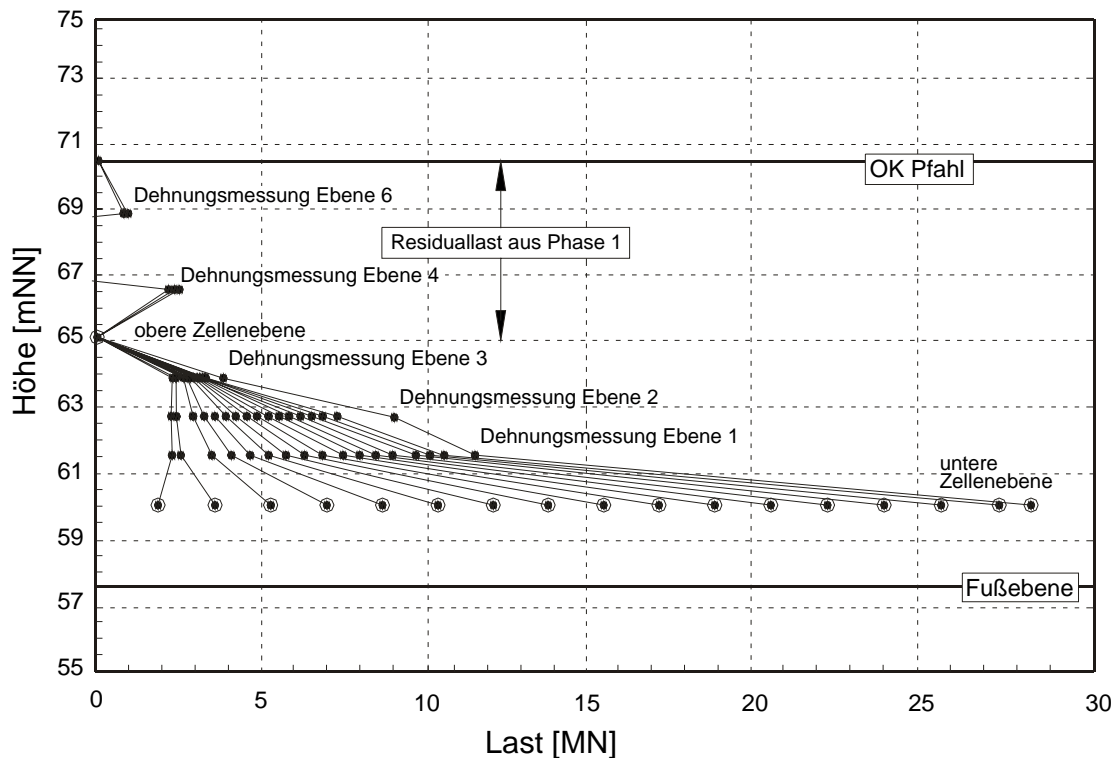


Bild 14: Normalkraftverlauf über die Pfahlänge während der Versuchsphase 2

Mit der Pfahlprobelastung wurde insgesamt eine Grenzlast des rd. 12,5 m langen Pfahlsegmentes von 78 MN erreicht. Auf der Basis der Ergebnisse der Probelastung konnten die hohen Tragfähigkeiten der Frankfurter Kalke im Baufeld bestätigt und der Entwurf der Bauwerksgründung und des Baugrubenverbaus optimiert werden.

Schlussbemerkungen

Neben den Probelastungen wurde an 76 aus den Frankfurter Kalken entnommenen Kernproben die einaxiale Druckfestigkeit untersucht. Die ermittelten einaxialen Druckfestigkeiten lagen zwischen 18 MN/m^2 und 200 MN/m^2 mit einem Mittelwert von rd. 84 MN/m^2 . Bei der Pfahlprobelastung beim Projekt FrankfurtHochVier wurden unter Berücksichtigung der versuchstechnisch ermittelten einaxialen Druckfestigkeiten um rd. 60-100 % über den Tabellenwerten der DIN 4014 liegende Bruchwerte der Mantelreibung gemessen. Der mittels der Pfahlprobelastung mit Osterbergzellen ermittelte Bruchwert des Pfahlspitzenwiderstandes liegt trotz der unterhalb des Pfahlfußes ausgeführten Gebirgsvergütung mit rd. 7 MN/m^2 unter dem Tabellenwert der DIN 4014 von 10 MN/m^2 . Ursächlich ist hier der heterogene Aufbau der Frankfurter Kalke mit den in den Kalksteinschichten vorhandenen Sand-, Mergel- und Tonlagen.

Literatur:

1. Seitz, J. M.; Schmidt, H.-G.: Bohrpfähle. Ernst & Sohn Verlag, Berlin, 2000
2. Katzenbach, R.; Arslan, A., Vogler M., Quick, H.: New experiences on deformation and strength behaviour of Frankfurt Limestone. Proceedings of the 1994 ISRM International Symposium, Santiago, Chile, May 10-14, 1994
3. Holzhäuser, J.: Experimentelle und numerische Untersuchungen zum Tragverhalten von Pfahlgründungen im Fels. Mitteilungen des Institutes und der Versuchsanstalt für Geotechnik der Technischen Universität Darmstadt, Heft 42, 1998.
4. LOADTEST: Frankfurt pile test breaks German record. European Foundations, Summer 2004, Ground Engineering, London

Dr.-Ing. Matthias Vogler

Vereidigter Sachverständiger für Grundbau, Boden- und Felsmechanik,
Geschäftsführender Gesellschafter der Ingenieursozietät Prof. Dr.-Ing. Katzenbach GmbH,
65931 Frankfurt am Main, Pfaffenwiese 14A

Prof. Dr.-Ing. Rolf Katzenbach

Direktor des Institutes und der Versuchsanstalt für Geotechnik
der Technischen Universität Darmstadt,
64287 Darmstadt, Petersenstraße 13