

Auswirkungen von Grundwasserhaltungen auf bestehende Kombinierte Pfahl-Plattengründungen (KPP) in Frankfurt a. M.

Frederic Manche (B. Eng.), Maximilian Kies (M. Eng.), Prof. Dr.-Ing. Simon Meißner
Prof. Quick und Kollegen – Ingenieure & Geologen GmbH

Prof. Dr.-Ing. Jürgen Schmitt
Hochschule Darmstadt

Zusammenfassung

In Frankfurt am Main werden aufgrund der hohen projektspezifischen Anforderungen und der komplexen hydrogeologischen Bedingungen tiefe Baugruben meist im Schutz von grundwasserschonenden Trogbaugruben hergestellt. Hinsichtlich statischer Randbedingungen ist es jedoch nicht immer möglich, eine wasserundurchlässige Trogbaugrube anzulegen. Der Einsatz von teilwasserundurchlässigen Baugruben führt infolge von Grundwasserentspannungen zu Spannungsänderungen im Baugrund und somit zur Beeinflussung von Gründungssystemen benachbarter Bauwerke. Die Bewertung der Einflussnahme von Grundwasserhaltungsmaßnahmen auf die Gebrauchstauglichkeit angrenzender baulicher Anlagen stellt eine anspruchsvolle ingenieurtechnische Aufgabe dar. Im Zuge der Neuerschließung des Europaviertels wird aktuell das städtische U-Bahnnetz erweitert. Infolgedessen entsteht neben dem fertiggestellten Gebäudekomplex Güterplatz mit den Hochhäusern Eden Tower und The Spin sowie dem Grand Tower eine der tiefsten Baugruben Frankfurts. Diese Baugrube wird als teilwasserundurchlässige Baugrube hergestellt. Im Rahmen dieser Veröffentlichung werden die Ergebnisse einer numerischen Untersuchung zu den Auswirkungen der laufenden Grundwasserhaltung am Beispiel der Baugrube Station Güterplatz aufgezeigt. Dabei werden die Auswirkungen der Grundwasserentspannung auf die Setzungen, die Gesamtpfahlwiderstände und das Tragverhalten der Kombinierten Pfahl-Plattengründung (KPP-Gründung) dargestellt.

1. Projekt

Im Zuge der Neuerschließung des Europaviertels, vom ehemaligen Hauptgüterbahnhof Frankfurt am Main zu einem modernen gemischten Wohn- und Gewerbegebiet, wird das städtische U-Bahnnetz erweitert. Mit dem Projekt Station Güterplatz entsteht neben dem fertiggestellten Gebäudekomplex Güterplatz mit seinen Hochhäusern Eden Tower (98 m, Wohnturm) und The Spin (128 m, Hotel­turm) mit angrenzender Blockbebauung eine der tiefsten Baugruben Frankfurts (Abb. 1 und Abb. 2).

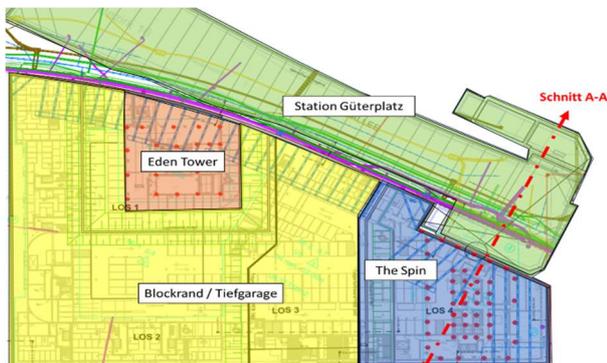


Abb. 1: Lageplan Gebäudekomplex Güterplatz

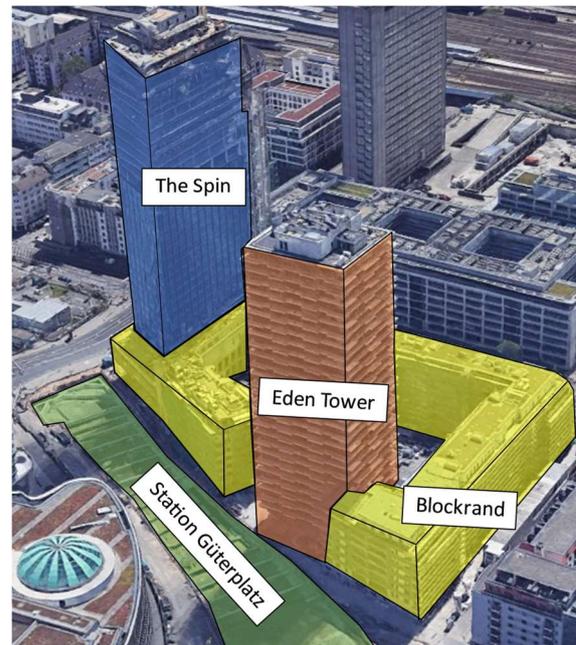


Abb. 2: Gebäudekomplex und Station Güterplatz

Die ca. 24 m tiefe Baugrube der Station Güterplatz wird in offener Bauweise mit einer durch drei Aussteifungslagen gestützten Schlitzwand mit hydraulischen Fenstern als teilwasserundurchlässige Baugrube hergestellt. Die Grundwasserentspannung erfolgt innerhalb der Baugrube durch

Entspannungsbrunnen. Eine Absenkung des quartären Grundwassers erfolgt nicht.

Die Baugrubensohle der Baugrube Station Güterplatz liegt bei ca. 73,20 mNHN. Die lichte Baugrubenbreite beträgt bis zu 30 m. Der Abstand der Baugrube bis zum Gebäudekomplex Güterplatz beträgt im Bereich der Blockrandbebauung minimal 2 m. Die hydrostatischen Einwirkungen auf den Baugrubenverbau werden durch Entspannungsplanzen und hydraulische Fenster reduziert. Die in Abb. 1 skizzierte Schnittachse ist in der folgenden Abb. 3 dargestellt. Hier wird schematisch die KPP-Gründung von The Spin im Frankfurter Baugrund sowie die Station Güterplatz, mit den Steifenlagen, der wasserundurchlässigen Verbauwand mit den hydraulischen Fenstern sowie die U-Bahn-Zugänge veranschaulicht.

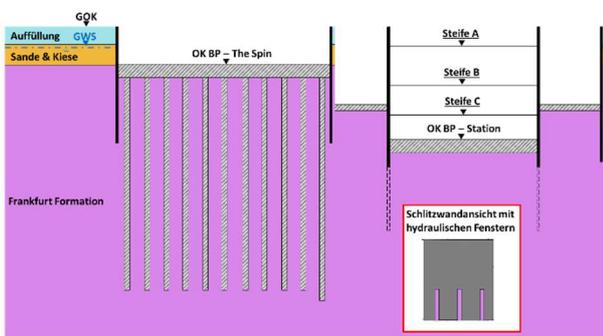


Abb. 3: The Spin – Station Güterplatz

2. Baugrund- und Grundwasserverhältnisse

Im betrachteten Projektgebiet folgen unter quartären Auffüllungen, weitere Schichten des Quartär (fluviatile Sande, Kiese, Schluffe) mit unterschiedlichen Mächtigkeiten. Diese werden von den ca. 100 m mächtigen tertiären Schichten, der Frankfurt- und der Wiesbaden-Formation, unterlagert. Die tertiären Schichten bestehen aus einer unregelmäßigen Abfolge von Tonen, Kalksteinbänken, Algenriffen und Hydrobiensandlagen. Innerhalb der pliozänen Schichten des Tertiär kommt es in Teilbereichen des Projektgebiets zu geologischen Anomalien. Bei der bis zu 8 m mächtigen pliozänen Rinne handelt es sich um eine grabenartige Struktur des Tertiär, die mit limnisch-fluviatilen Sedimenten wie Sanden, Kiesen, Schluffen, und stark feinsandigen Tonen gefüllt ist.

Der mittlere freie Grundwasserspiegel liegt im Projektgebiet bei ca. 91,50 mNHN. Das freie Grundwasser fließt innerhalb der Schichten der quartären bzw. pliozänen Sande und Kiese. Die tertiären Grundwasserleiter führen zudem gespanntes Grundwasser, welches in den Klüften der Kalksteinbänke sowie in den Kalk- und

Hydrobiensanden zirkuliert. Sie stehen mit den quartären Grundwasserleitern meist unmittelbar in Verbindung, sodass die Druckhöhe der tertiären Grundwasserleiter häufig dem freien quartären Grundwasserspiegel entspricht. Die grundwasserführenden Hydrobiensande und Kalksteinbänke stellen eine Besonderheit der Frankfurt Formation des Tertiär dar, bei der sich sehr gering durchlässige Tone mit stark durchlässigen, gespannten Grundwasserleitern wie Kalksand und Kalksteinbänken kleinräumig abwechseln.

3. Wasserhaltung für tiefe Baugruben in Frankfurt

Das Errichten tiefer Baugruben in Frankfurt erfordert zusätzlich zur Absenkung des freien quartären Grundwassers aufgrund des heterogenen Baugrunds (Frankfurt Formation) eine Grundwasserentspannung. Bei Ausführung eines wasserundurchlässigen Verbaus erfolgt diese Entspannung ausschließlich innerhalb der Baugrubenumschließung (Abb. 4).

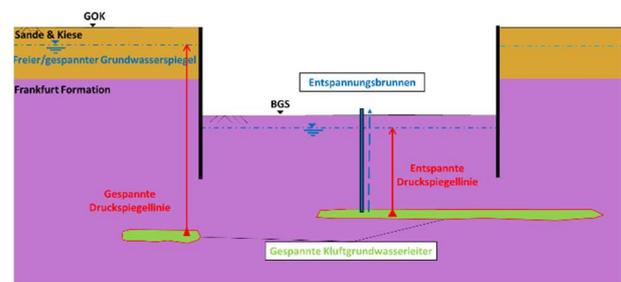


Abb. 4: Darstellung einer Grundwasserentspannung innerhalb einer wasserundurchlässigen Baugrubenumschließung

Durch den Baugrubenaushub findet der natürliche Potentialabbau des Porenwasserüberdrucks in den überdeckenden Bodenschichten nicht mehr statt. Dabei besteht die Gefahr eines hydraulischen Grundbruchs bzw. des Aufschwimmens der gering durchlässigen tonigen Schichten. Durch die Grundwasserentspannung wird die Potentialhöhe des gespannten Grundwassers verringert und die Auftriebssicherheit gewährleistet.

Bis in die 90er Jahre des letzten Jahrhunderts wurde der überwiegende Teil der in Frankfurt hergestellten Baugruben im Schutze einer Grundwasserabsenkung des freien quartären Grundwassers und einer Entspannung des gespannten tertiären Grundwassers realisiert. Dies erfolgte vornehmlich mit wasserundurchlässigen Verbauarten (Trägerbohlverbau) [1]. Die Auswirkungen einer Grundwasserhaltung von tiefen Baugruben wurden mit 2,0 mm bis 4,0 mm Setzungen an der Geländeoberfläche pro Meter

Grundwasserabsenkung angegeben [3], [4]. Bei der Wiederholung einer Grundwasserabsenkung konnte von einem Setzungsmaß von 1,0 mm bis 2,0 mm ausgegangen werden [5].

Seit den 90er Jahren mussten die Auswirkungen auf angrenzende Nachbarbebauungen und der Eingriff in die natürlichen hydrogeologischen Verhältnisse behördlich reduziert werden. Somit wurden insbesondere für tiefe Baugruben wasserundurchlässige bzw. teilwasserundurchlässige Verbauwände in Kombination mit einer tertiären Grundwasserentspannung gewählt (Abb. 4). Sofern es aus geotechnischer Sicht möglich ist, eine wasserundurchlässige Baugrube herzustellen, wird dies mit langen, wasserundurchlässigen Verbauwänden umgesetzt. So werden der Einfluss auf Dritte geringgehalten sowie die Kosten der Grundwasserhaltung und der Beweissicherung reduziert. Sofern dies bei sehr tiefen Baugruben technisch nicht umsetzbar ist, wie zum Beispiel bei den Baugruben Four, Central Business Tower und Station Güterplatz in Frankfurt, wird der Porenwasserdruck mittels hydraulischer Fenster unterhalb der Baugrubensohle auf den Verbau verringert (Abb. 3) [6]. Der Baugrubenverbau wird somit teilwasserundurchlässig ausgeführt. Bei dieser Art der Ausführung ist die Bestimmung der Wassermenge infolge der Grundwasserentspannung komplex und hängt besonders von der heterogenen Anordnung der wasserführenden Schichten ab, wie sie im tertiären Frankfurter Baugrund zu finden ist. Die bei der Grundwasserhaltung anfallenden Grundwassermengen und die daraus resultierenden Auswirkungen auf Dritte sind schwer zu prognostizieren [1].

4. Numerische Untersuchung

Die numerische Modellierung der Grundwasserentspannung der Baugrube Station Güterplatz beinhaltet die Abbildung der im Nahbereich stehenden Hochhäuser Eden Tower und The Spin. Die numerischen Berechnungen wurden mittels dreidimensionaler Finite-Elemente-Berechnungen (3D-FEM) mit dem Programmsystem Plaxis® 3D durchgeführt. Die geometrischen Randbedingungen zur Modellierung des Baugrunds wurden entsprechend der Empfehlungen des DGGT-Arbeitskreises Numerik in der Geotechnik so gewählt, dass die Auswirkungen auf die KPP-Gründungen und den Baugrund vollständig erfasst werden (Abb. 5) [2].

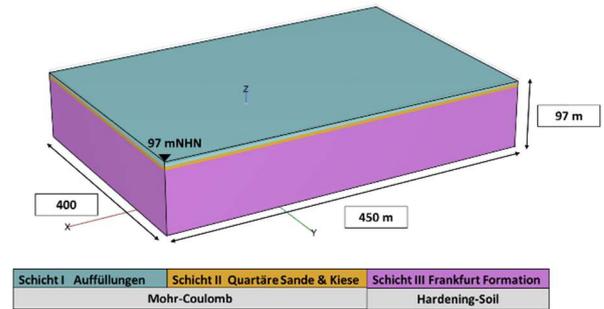


Abb. 5: Baugrundmodell Projektgebiet Güterplatz

Zur Modellierung der nichtbindigen Bodenschichten wurde das linearelastische-idealplastische „*Mohr-Coulomb-Modell*“ berücksichtigt. Zur realitätsnahen Erfassung der Verformungen und Spannungen des Tons (Frankfurt Formation) wurde das elastoplastische Stoffgesetz „*Hardening Soil*“ mit dem Bruchkriterium nach Mohr-Coulomb gewählt. Für die konstruktiven Bauteile wurde ein linearelastisches Spannungsdehnungsverhalten zugrunde gelegt.

Die Gründungen der Hochhäuser The Spin und Eden Tower wurden als KPP mit insgesamt 69 Gründungspfählen und Pfahlängen von bis zu 42 m abgebildet. Die an die Hochhäuser angrenzende Blockrandbebauung wurde flachgegründet und im Nahbereich zur U-Bahn-Station teilweise durch Gründungspfähle verstärkt. Für den Gebäudekomplex Güterplatz wurden im dreidimensionalen Berechnungsmodell die folgenden konstruktiven Elemente abgebildet (Abb. 6):

- Bodenplatte der Hochhäuser und der Blockrandbebauung (Volume-Element)
- Gründungspfähle der Hochhäuser sowie der Blockrandbebauung (Kontinuumselemente).
- Baugrubenverbau des Gebäudekomplexes (Plate-Elemente)

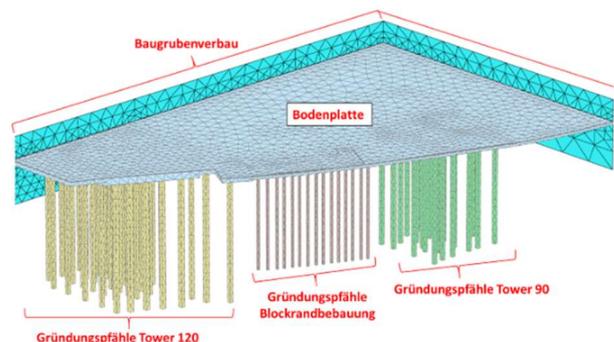


Abb. 6: Modellierung der konstruktiven Elemente – Gebäudekomplex Güterplatz

Für die Baugrube der Station Güterplatz wurden im dreidimensionalen Berechnungsmodell die folgenden konstruktiven Elemente abgebildet (Abb. 7):

- Bodenplatte der Station Güterplatz (Volume-Element)
- Steifenlagen der Baugrube (Beam-Element)
- Baugrubenverbau (Plate-Element)

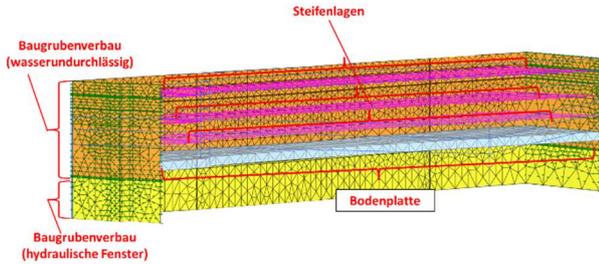


Abb. 7: Modellierung der konstruktiven Elemente – Station Güterplatz

Die ständigen und veränderlichen Lasteinwirkungen des Gebäudekomplexes Güterplatz wurden, entsprechend der Tragwerksplanung als Punkt-, Linien- oder Flächenlasten modelliert (Abb. 8).

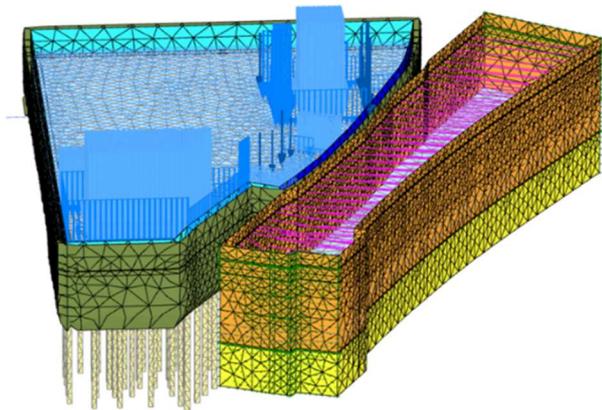


Abb. 8: Lastenwirkungen – Gebäudekomplex Güterplatz

Zur Abbildung der Auswirkungen der Grundwasserhaltung auf die KPP-Gründungen der Hochhäuser Eden Tower und The Spin wurden die Druckpotentiale der Grundwasserentspannung der jeweiligen Bauzustände schichtbezogen mit der Bedingung „phreatic“ vorgegeben. Somit bleibt das Druckpotential in der Berechnungsphase zeitlich konstant. Es erfolgte keine zeitabhängige Strömungsberechnung.

Der Bau des Gebäudekomplexes sowie der Station Güterplatz wurde in insgesamt 25 Berechnungsphasen modelliert (Tab. 1).

Tab. 1: Numerische Berechnungsphasen

Bez.		Berechnungsphasen Güterplatz
	0	Initial Phase
Gebäudekomplex	1	Herstellung Verbau, Gründungspfähle
	2	Beginn GWH Baugrube
	3	Aushub Baugrube
	4	Herstellung Bodenplatte
	5	Belastung (G)
	7	Ende GWH Baugrube
	8	Belastung (G+Q/3 - A)
	Baugrube Station	9
10		Beginn GWH Baugrube
11 bis 22		Sukzessive Herstellung der Baugrube (Aushub, Grundwasserentspannung, Einbau der Steifen)
23		Herstellung Bodenplatte
24		Belastung (G)
25		Ende GWH Baugrube

Im Berechnungsmodell wurde das gespannte, tertiäre Grundwasser innerhalb der Baugrube sowie außerhalb im Höhenbereich der Entspannungsbrunnen ab Unterkante des wasserundurchlässigen Baugrubenverbau im gesamten Baugrundmodell entspannt (Abb. 9).

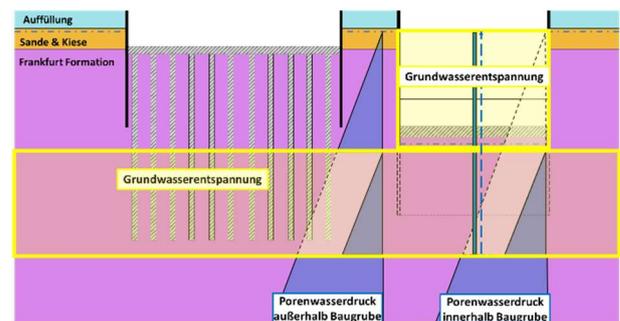


Abb. 9: Porenwasserdruckverteilung infolge der Grundwasserentspannung

Somit resultieren Spannungsänderungen des Baugrunds innerhalb des Schichtpakets ab Unterkante des wasserundurchlässigen Baugrubenverbau bis zur Unterkante der Tiefenbrunnen. Hierbei werden sowohl der Pfahlmantel als auch der Pfahlfuß der KPP-Gründungen beeinflusst. Systembedingt ändert sich der Porenwasserdruck nicht direkt unterhalb der Bodenplatte.

5. Auswertung der numerischen Untersuchung

Im Rahmen der Auswertung wurden vom Gebäudekomplex Güterplatz u. a. die vertikalen Verschiebungen der Bodenplatte u_z , die resultierenden Gesamtpfahlwiderstände R_{Pile} sowie die Änderungen der Pfahl-Platten-Koeffizienten α_{KPP} , infolge der Grundwasserhaltung betrachtet. Der Pfahl-Platten-Koeffizient α_{KPP} ist ein Verhältniswert zwischen dem Gesamtwiderstand der Pfahlkräfte und den auf die KPP-Gründung einwirkenden Gesamtlasten. Er beschreibt somit den Lastanteil, der über die Gründungspfähle abgetragen wird.

Die Änderungen der KPP-Gründungen von The Spin und Eden Tower werden in den Abb. 10 bis Abb. 12 dargestellt. Die maßgeblichen bauphasenspezifischen Grundwasserstände der Grundwasserentspannung der Baugrube Station Güterplatz werden in den Abbildungen ergänzend aufgeführt.

In der Auswertung wurden ausschließlich die Änderungen der zu untersuchenden Kenngrößen seit Beginn der Grundwasserhaltung betrachtet. Die hierbei zu erwartenden maximalen Auswirkungen der Grundwasserhaltung stellen sich beim Erreichen des Absenkeziels knapp unterhalb der Baugrubensohle für eine Grundwasserentspannung von ca. $\Delta h = 19$ m ein.

Zum Zeitpunkt der maximalen Grundwasserentspannung von ca. $\Delta h = 19$ m beträgt der Setzungszuwachs der Hochhäuser Eden Tower und The Spin ca. 2,5 cm (Abb. 10). Dies entspricht einem Setzungsmaß von etwa 1,3 mm pro Meter Grundwasserentspannung. Im Vergleich zu den Gesamtpfahlwiderständen der Hochhäuser vor Beginn der Grundwasserhaltung steigen die Gesamtpfahlwiderstände um ungefähr 5 % an (Abb. 11). Der Pfahl-Platten-Koeffizient α_{KPP} erhöht sich demnach ebenfalls um etwa 5 % (Abb. 12).

Mit Beendigung der Grundwasserhaltung liegen die vertikalen Verschiebungen der beiden Hochhäuser bei ca. 1,4 cm infolge der Grundwasserentspannung der Baugrube Station Güterplatz (Abb. 10). Die Gesamtpfahlwiderstände und die α_{KPP} -Werte zeigen nach der Grundwasserhaltung Werte in der Größenordnung vor der Grundwasserhaltung.

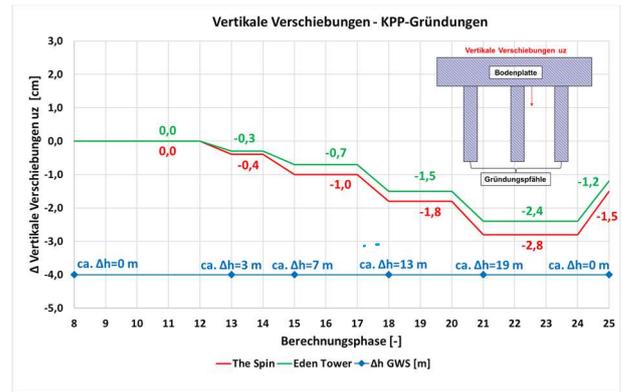


Abb. 10: Veränderungen der vertikalen Verschiebungen der Hochhäuser infolge der Grundwasserentspannung

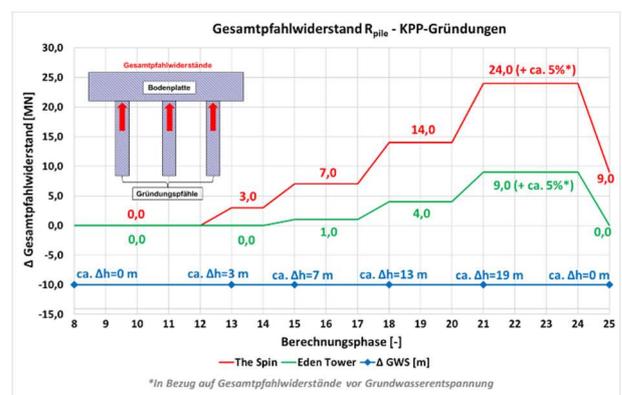


Abb. 11: Veränderungen der Gesamtpfahlwiderstände der Hochhäuser infolge der Grundwasserentspannung

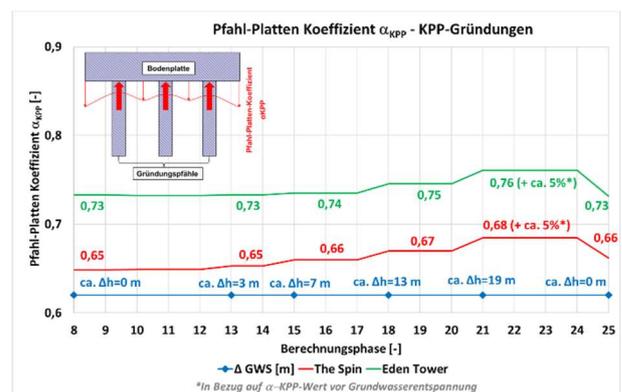


Abb. 12: Veränderungen Pfahl-Platten-Koeffizient α_{KPP} infolge der Grundwasserentspannung

6. Abgleich mit in-situ Messergebnissen

Im Rahmen der Mess- und Beweissicherung des Gebäudekomplexes Güterplatz wurde bei den geodätischen Messungen bislang eine maximale Setzungszunahme von ca. 1,5 cm beobachtet (Abb. 13). Innerhalb der Baugrube Station Güterplatz wurde das Grundwasser zu diesem Zeitpunkt um $\Delta h = \text{ca. } 11 \text{ m}$ entspannt. Dies entspricht einem in-situ Setzungsmaß von etwa 1,4 mm pro Meter Grundwasserentspannung.

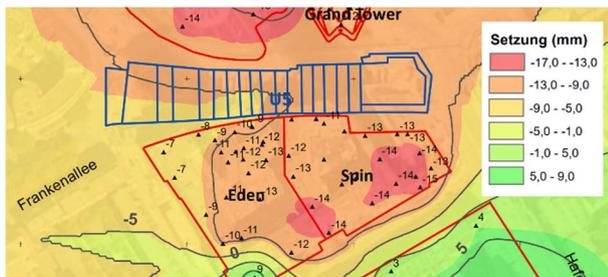


Abb. 13: Setzungen infolge tertiärer Grundwasserentspannung für eine Entspannung von $\Delta h = \text{ca. } 11 \text{ m}$ (Bauzwischenstand)

7. Schlussfolgerungen

Im Rahmen dieser Veröffentlichung wurden die Auswirkungen von Grundwasserhaltungen auf Kombinierte Pfahl-Plattengründungen anhand einer numerischen Untersuchung des Projektgebiets Güterplatz in Frankfurt a. M. betrachtet. Die rechnerische Erfassung der Auswirkungen bedarf einer umfassenden Berücksichtigung aller Randbedingungen, wie z. B. der maßgebenden Grenztiefe. Dabei kann es sein, dass die Empfehlungen zur Modellgröße [2] nicht ausreichend sind, um alle setzungsrelevanten Bodenschichten abzubilden.

Im numerischen Berechnungsmodell kann infolge der Grundwasserhaltung ein verändertes Tragverhalten der KPP-Gründungen beobachtet werden. Bei beiden KPP-Gründungen werden zum Zeitpunkt der maximalen Grundwasserentspannung von ca. $\Delta h = 19 \text{ m}$ der Gesamtpfahlwiderstand und somit auch der Pfahl-Platten-Koeffizient α_{KPP} erhöht. Ebenfalls erfahren die Hochhäuser The Spin und Eden Tower zusätzliche vertikale Verschiebungen. Auch nach Beendigung der Grundwasserhaltung sind die Auswirkungen eben dieser durch ein verändertes Tragverhalten der KPP-Gründungen in den numerischen Ergebnissen zu erkennen. Auffallend ist der Anstieg der Setzungen der KPP-Gründungen, welcher auch nach Abschluss der Grundwasserhaltung fortbesteht.

Das numerisch ermittelte Setzungsmaß stimmt mit dem bisher in-situ beobachteten Setzungsmaß überein. Diese beiden Werte zeigen erwartungsgemäß einen kleineren Wert als die in der Literatur angegebenen. (Tab. 2).

Anhand von Erfahrungswerten (Tab. 2) zeigt sich, dass mit dem Einsatz von teilwasserundurchlässigen Verbauarten tatsächlich die Setzungen infolge einer Grundwasserhaltung reduziert werden können.

Tab. 2: Setzungsmaß Grundwasserhaltung

Quelle / Beobachtung	GW-Haltung / Verbauart	Setzungsmaß pro [m] GW-Haltung
[3,4]	Absenkung + Entspannung / wasserdurchlässiger Verbau	2 bis 4 mm (erstmalig)
[5]	Absenkung + Entspannung / wasserundurchlässiger Verbau	1 bis 2 mm (wiederholt)
Messung Güterplatz	Entspannung / teilwasserundurchlässiger Verbau	ca. 1,5 mm
Berechnung Güterplatz	Entspannung / teilwasserundurchlässiger Verbau	ca. 1,5 mm

Es gilt projektspezifisch einzuschätzen, inwieweit der Umfang einer Grundwasserentspannung in Bezug auf benachbarte bauliche Anlagen möglich ist. Mit Beendigung der Baumaßnahme der Station Güterplatz und der Erfassung der endgültigen Mitnahmesetzungen des Gebäudekomplexes Güterplatz empfiehlt es sich, das Berechnungsmodell weiter fortzuschreiben und zu kalibrieren. Somit können zukünftig die Auswirkungen auf Bestandsbauwerke infolge von Grundwasserhaltungen im Frankfurter-Baugrund besser eingeschätzt werden.

Literatur

- [1] Moormann, C.: „Trag und Verformungsverhalten tiefer Baugruben in bindigen Böden unter besonderer Berücksichtigung der Baugrund-Tragwerk- und der Baugrund-Grundwasser-Interaktion“, Mitteilung des Instituts u. der Versuchsanstalt für Geotechnik, Technische Universität Darmstadt, Heft 59., 2002
- [2] Deutsche Gesellschaft für Geotechnik e.V.: „Empfehlungen des Arbeitskreises Numerik in der Geotechnik (EANG)“ Ernst und Sohn Verlag, 2014
- [3] Chambosse, G.: „Das Verformungsverhalten des Frankfurter Tons beim Tunnelvortrieb.“, Mitteilungen der Versuchsanstalt für Bodenmechanik und Grundbau der Technischen Hochschule Darmstadt, Heft 10, 1972
- [4] Sommer, H.; Hoffmann, H.: „Beherrschung des Grundwassers im innerstädtischen Tiefbau.“ Beiträge zum 9. Christian Veder Kolloquium „Bauen im Grundwasser - Geotechnische Probleme im innerstädtischen Bereich“, Mitteilungen des Instituts für Bodenmechanik und Grundbau, TU Graz, Heft 11, 1994
- [5] Katzenbach, R.; Quick, H.: „Grundwassermanagement bei temporären Baumaßnahmen.“ Bauingenieur 71, 297-304, 1994
- [6] Meißner, S.; Quick, H.; Katzenbach, R.; Werner, A.: „An innovative dewatering system to reduce the environmental impact“, Proceedings of the XVII ECSMGE-2019, Geotechnical Engineering foundation on the future, 2019