

Beurteilung des Last-Setzungsverhaltens einer Kombinierten Pfahl-Plattengründung unter Berücksichtigung verschiedener numerischer Modellierungsansätze

Dr.-Ing. Simon Meißner
Prof. Quick und Kollegen, Groß-Gerauer-Weg 1, 64295 Darmstadt

Maximilian Kies (B. Eng.)
Prof. Quick und Kollegen, Groß-Gerauer-Weg 1, 64295 Darmstadt

Prof. Dr.-Ing. Jürgen Schmitt
University of Applied Sciences of Darmstadt, Haardtring 100, 64295 Darmstadt

Zusammenfassung

Die Gründung von Bauwerken mittels einer Kombinierten Pfahl-Plattengründung (KPP) ist in der heutigen Zeit zu einer gängigen Methode geworden, um auf setzungsempfindlichem Baugrund Bauwerke zu errichten. Am Beispiel des 155 m hohen Marienturms in Frankfurt am Main wurden umfangreiche numerische Simulationen mit Plaxis 3D durchgeführt. Dieses Programmsystem verfügt über verschiedene Eingabemethoden zur Modellierung von Gründungspfählen. Es besteht zum einen die Möglichkeit Pfähle als Kontinuumelemente und zum anderen als „Embedded Piles“ zu modellieren. Durch die verschiedenen Möglichkeiten der Modellierung treten unterschiedliche Ergebnisse bezüglich des Last-Setzungsverhaltens der KPP sowie der Gründungspfähle rechnerisch auf. Die Möglichkeiten und Grenzen der verschiedenen Modellierungen von Gründungspfählen werden am Beispiel Marienturm aufgezeigt.

1. Projekt

Das Projekthochhaus Marieninsel, bestehend aus dem Marienturm und dem Marienforum, soll in Frankfurt am Main realisiert werden. Das zu bebauende Gelände befindet sich direkt an der Taunusanlage und wird von der Mainzer Landstraße und der Marienstraße umschlossen.

Die zu bebauende Fläche beläuft sich auf insgesamt rund 5.500 m². Diese setzen sich aus der Grundfläche des Marienturms mit ca. 3.200 m² und der Grundfläche des Marienforums von ca. 2.300 m² zusammen. Das Hochhaus Marieninsel besteht aus insgesamt 39 Geschossen. Dadurch ergibt sich eine Bauwerkshöhe von ca. 155 m. Das Marienforum besitzt eine Bauteilhöhe von 28 m bis zu 43 m und misst insgesamt 10 Geschosse. Die Flächen für das Marienforum und den Marienturm sind vornehmlich als Büroflächen entworfen worden. Die beiden Gebäude verfügen über eine zusammenhängende Tiefgarage, die in bis zu vier Untergeschosse untergliedert ist.

In Bild 1 ist der geplante Marienturm in Frankfurt am Main dargestellt. Dieses zeigt den Turm sowie das Gebäude der Nachbarbebauung Taunusanlage 11.

Die Tiefe der Baugrube beträgt bis zu 15 m unterhalb der Geländeoberkante. Die Bodenplatte weist im Kernbereich eine Dicke von 3,3 m und im Außenbereich eine Dicke von 1,4 m auf. Die Gründung erfolgt mittels

einer Kombinierten Pfahl-Plattengründung und beinhaltet zusätzlich zu der Bodenplatte noch 50 ca. 48 m lange sowie 8 ca. 22 m lange und 3 ca. 14 m lange Pfähle mit einem Durchmesser von je 1,5 m.



Bild 1: Marienturm Frankfurt aus nordöstlicher Sicht

2. Baugrund- und Grundwasserverhältnisse

Die Zusammenstellung der Baugrundverhältnisse basieren auf den Ergebnissen mehrerer geotechnischer Erkundungsmaßnahmen. Für die Erstellung des Baugrundmodells wurden verschiedene repräsentativ erachtete Bohrungen auf dem Projektfeld ausgewertet.

Demnach reicht die Schicht der künstlichen Auffüllung bis in eine Tiefe von rund 95,5 mNN. Unterlagert wird diese Schicht von den quartären Hochflut- und Decklehmen. Darunter folgen die quartären Sande und Kiese mit einer rund 5,1 m mächtigen Schicht sowie die Frankfurt / Wiesbaden Formation mit einer Mächtigkeit von ca. 60 m. Diese Formation setzt sich aus Tonen, Kalk- bzw. Dolomitsandstein und Sanden zusammen. Für die Erstellung des Baugrundmodells wurden die o.g. Schichten zu einer repräsentativen Schicht zusammengefasst.

Unterlagert wird die Formation durch die Frankfurter Kalke. Die Schichtoberkante liegt bei ca. 32,6 mNN.

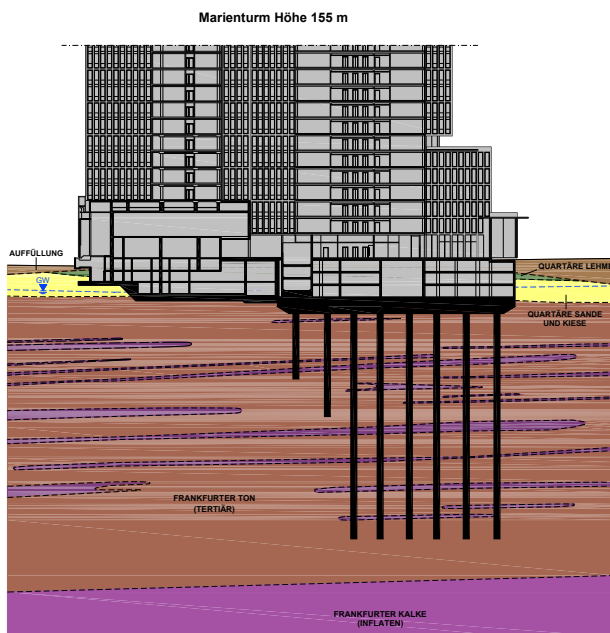


Bild 2: Baugrundverhältnisse Bereich Marieninsel

3. Numerische Vorstudie

3.1 Vergleich von numerischen Pfahltypen

Für diese Vorstudie wurden numerische Modelle mit unterschiedlichen Pfahltypen erstellt.

1. Modell Embedded Piles
2. Kontinuums-elemente mit rundem Querschnitt
3. Kontinuums-elemente mit quadratischem Querschnitt

Für eine realitätsnahe Simulation der numerischen Berechnung erfolgt für die Herstellung der Bodenplatte ein Baugrubenaushub. Dieser gilt der Aktivierung des

Ent- bzw. Wiederbelastungsmodul des Bodenkontinuums. Die Baugrube reicht bis in eine Tiefe von 6 m und wurde durch „surface displacements“ als Verbauwände im Modell realisiert. Anschließend erfolgt eine sukzessive Steigerung der Belastung von 100 kN/m² auf 700 kN/m². Die Belastung wurde als Flächenlast auf die Bodenplatte aufgebracht. In der Vorstudie wurde kein Grundwasser angesetzt.

Der Vergleich der Setzungsplots zeigt einen annähernd identischen Setzungsverlauf der Gründungsvarianten mit den runden oder quadratischen Kontinuums-elementen.

Im Gegensatz zu den sich ähnlich verhaltenden Pfählen aus Kontinuums-elementen, treten bei den Embedded Piles mit steigender Belastung größere Abweichungen auf. Für Belastungsstufen von 300 kN/m² ist die prozentuale Abweichung mit weniger als 5 % noch gering. Jedoch ergibt sich für eine Belastungsstufe mit 400 kN/m² eine prozentuale Abweichung von rund 17 %. In der Belastungsstufe von 700 kN/m² tritt der größte Unterschied der auftretenden Setzungen mit rund 40 % auf. Dieser Unterschied wird durch die Aktivierung der Grenzwerte für die Pfahlmantelreibung und den Spitzendruck hervorgerufen. Nach dem Erreichen der Grenztragfähigkeit der Embedded Piles erhöhen sich die systembedingten Setzungen im Modell und zeigen größere Setzungen im Vergleich zu den Modellen mit runden oder quadratischen Kontinuums-pfählen.

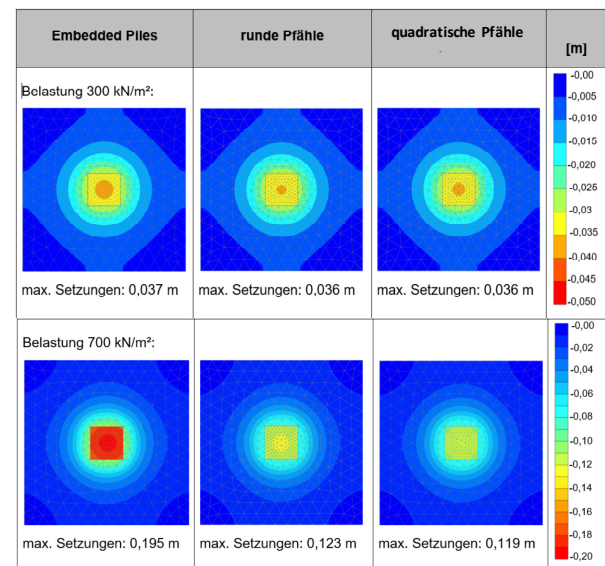


Bild 3: Vergleichende Zusammenstellung der Setzungsplots

Die Auswertung der Widerstand-Setzungslinie erfolgte durch die Berechnung des Gesamtwiderstandes $R_{tot,k}(s)$. Dieser setzt sich aus Gesamtwiderstand der Gründungspfähle $\sum_{j=1}^m R_{pile,k,j}(s)$, bestehend aus Pfahlspitzendruck und Mantelreibung sowie dem Sohlwiderstand $R_{raft,k}(s)$ der Bodenplatte zusammen.

In der Vorstudie wurden für die Auswertung der Widerstand-Setzungslinie die Belastungsstufen von 200 kN/m² bis 700 kN/m² herangezogen. Ferner wurde der Pfahlwiderstand in die beiden Komponenten des Pfahlspitzenwiderstands und der Pfahlmantelreibung aufgeteilt und ausgewertet. Durch diesen Vorgang können zusätzlich Aussagen über die Aktivierung des maximalen Spitzenwiderstands und der maximalen Mantelreibung getroffen werden.

Bild 4 beschreibt das Tragverhalten der Kombinierten Pfahl-Plattengründung (KPP) unter Anwendung der Embedded Piles. Um realistische Tragfähigkeiten zu erreichen, wurde unter Berücksichtigung der Baugrundverhältnisse ein Grenzwert für Mantelreibung von 80 kN/m² und für den Spitzenwiderstand von 1500 kN/m² vorgegeben. Im Bild 4 ist erkennbar, dass diese Grenzbedingung ab einem gewissen Pfahlwiderstand erreicht wird. Nach Erreichen der Grenzbedingung bleibt der Pfahlwiderstand auf einem konstanten Wert. Dies spiegelt das Tragverhalten eines Einzelpfahls wieder. Ab diesem Punkt werden die weiteren Belastungen ausschließlich über den Sohlwiderstand abgetragen. Der Sohlwiderstand wird in Bild 4 durch eine graue Linie veranschaulicht und verhält sich nach dem Erreichen der vorgenannten Grenzbedingung erwartungsgemäß nahezu linear.

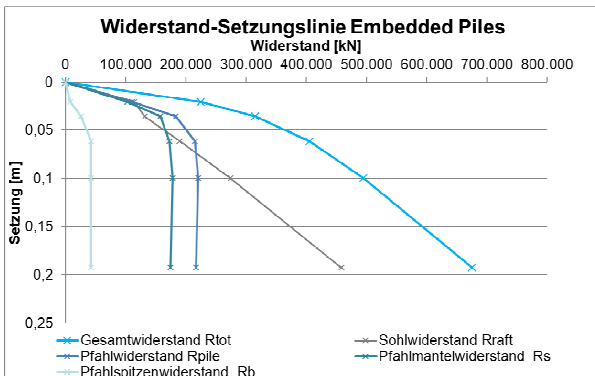


Bild 4: Widerstand-Setzungslinie embedded Piles

Die Widerstand-Setzungslinie der runden Kontinuumpfähle zeigt einen durchgehend ansteigenden Verlauf des Gesamtwiderstandes der Pfähle sowie der Mantelreibung und des Spitzenwiderstands (Bild 5). Ohne die Formulierung einer Grenzbedingung können bei den Kontinuumpfählen größere Widerstände für Spitzenwiderstand und Mantelreibung erreicht werden. Diese erhöhten Widerstände sind unter Berücksichtigung der Baugrund-Tragwerk-Interaktionen einer Kombinierten Pfahl-Plattengründung und den Erkenntnissen aus [4] bzw. [5] als realistisch zu bezeichnen.

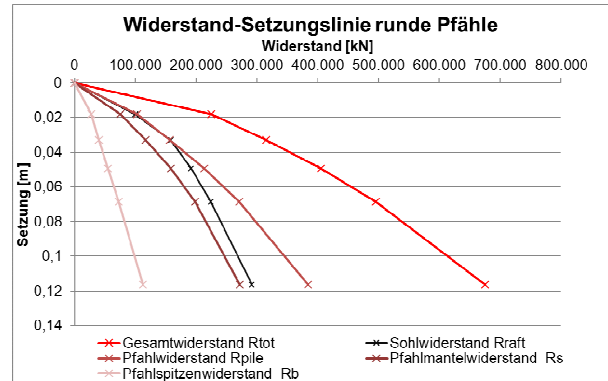


Bild 5: Widerstand-Setzungslinie runde Kontinuumpfähle

Bei den quadratischen Pfählen zeigen sich erwartungsgemäß ähnliche Widerstände wie bei den runden Pfählen (Bild 6).

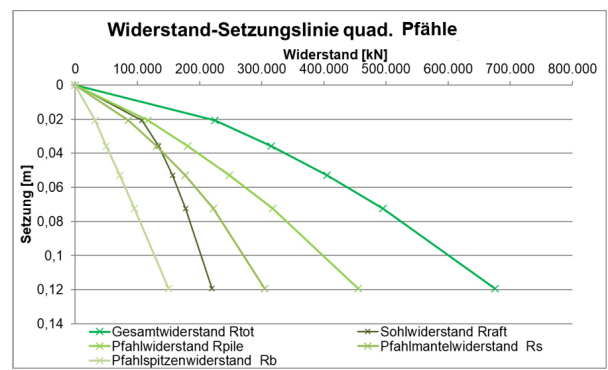


Bild 6: Widerstand-Setzungslinie quadratische Kontinuumpfähle

Der Pfahl-Platten-Koeffizient gibt an, welcher Anteil des Gesamtwiderstandes von den Gründungspfählen in den Baugrund abgeleitet wird. In Bild 7 wird der Pfahl-Platten-Koeffizient für die drei Gründungspfahlmodelle der Vorstudie in Abhängigkeit von der Belastungsstufe dargestellt.

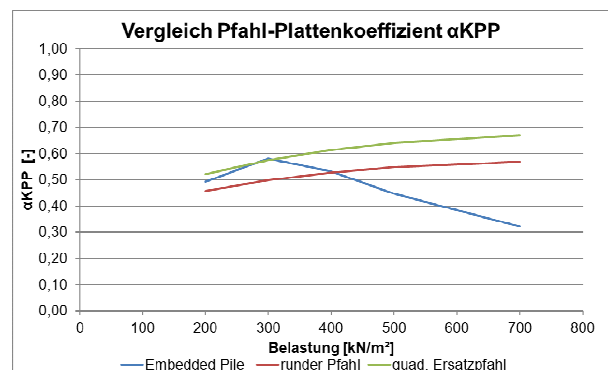


Bild 7: Vergleich Pfahl-Platten-Koeffizienten

Für die Kontinuumpfähle zeigen die Kurven einen ansteigenden Verlauf für den Pfahl-Platten-Koeffizienten. Der Verlauf der Kurve der Embedded Piles steigt im Vergleich zu den anderen Verläufen etwas steiler an, fällt aber nach dem Erreichen der Belastungsstufe von 300 kN/m² erwartungsgemäß wieder ab. An diesem Punkt wird die Grenztragfähigkeit erreicht. Der Pfahl-Platten-Koeffizienten der quad-

ratischen Kontinuumpfähle zeigt bis zu einer Belastungsstufe von 300 kN/m² ein ähnliches Verhalten. Für die runden Kontinuumpfähle ergibt sich eine Abweichung von rund 13 % zu einem Wert von 0,5 für die Belastungsstufe 300 kN/m².

3.2 Pfahlinteraktion der Embedded Piles

Im Rahmen dieser Vorstudie soll die Pfahl-Pfahl-Interaktion der Embedded Piles näher untersucht werden. Dies gilt unter anderem zur Verifizierung der realistischen Abbildung der Pfahl-Pfahl-Interaktion unter Berücksichtigung unterschiedlicher Pfahlabständen, wie Sie in [5] gefordert wird.

Für die Untersuchung der Pfahl-Pfahl-Interaktion wurden drei Modelle entwickelt. Das Modell 1 ist das für die Vorstudie der Embedded Piles verwendete numerische Modell mit 16 Gründungspfählen, einer 30 m auf 30 m großen Bodenplatte sowie einem einschichtigen Baugrundaufbau bestehend aus der Frankfurt Formation. Der Pfahlabstand entspricht in diesem Modell insgesamt dem fünffachen Pfahldurchmesser (5 x D). Die Parameter der Embedded Piles wurden in Anlehnung an die zuvor erstellten Modelle gewählt.

In den Modellen 4 und 5 wurden die Pfahlabstände auf 3 x D und 2 x D verringert (Bild 8).

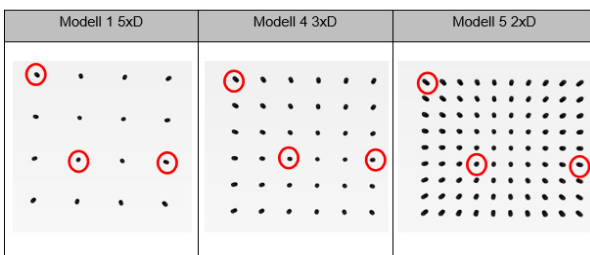


Bild 8: Numerische Modelle für die Pfahl-Pfahl-Interaktion

Die Belastung erfolgte in den zu vergleichenden Modellen über eine Flächenlast. Für das Grundmodell, Modell 1, erfolgte eine Belastung von 200 kN/m² bis 700 kN/m², in Modell 4 von 200 kN/m² bis 1.000 kN/m² und in Modell 5 von 200 kN/m² bis 2.000 kN/m².

In den Fokus der Beurteilung rückt bei dieser Untersuchung ausschließlich der Parameter des Pfahlwiderstandes. Die Pfahl-Pfahl-Interaktion hat den größten Einfluss auf Pfahlwiderstand, da mit zunehmender Pfahlzahl bei gleichzeitiger Verringerung des Pfahlabstandes die Beeinflussung der Gründungspfähle untereinander zunimmt.

Der Vergleich der Pfahl-Pfahl-Interaktion der Embedded Piles erfolgte mittels einer Auswertung des Pfahlwiderstandes am Beispiel eines Kern-, Rand- und Eckpfahls. Die zur Auswertung der Modelle 1, 4 und 5

ausgewählten Gründungspfähle sind in Bild 8 rot markiert.

In Bild 9 ist der Verlauf der Pfahlwiderstände anhand eines Kernpfahls dargestellt.

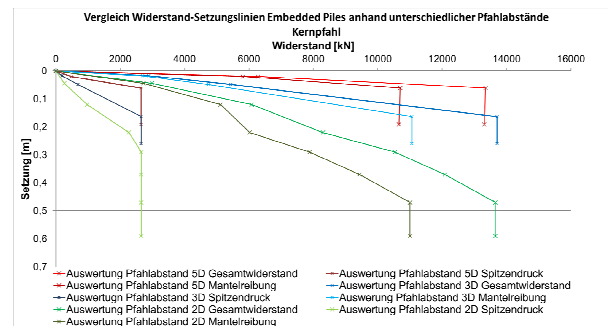


Bild 9: Pfahl-Pfahl-Interaktion Kernpfahl

Aus der Auswertung in Bild 9 wird ersichtlich, dass der Kernpfahl aus dem Modell 1 mit einem Abstand von 5 x D bei einer Setzung von ca. 0,06 m die Grenze seiner Tragfähigkeit erreicht. Gefolgt von dem Kernpfahl des Modells mit dem Abstand 3 x D, bei Setzungen von rund 0,15 m. Für das Modell mit dem Abstand von 2 x D tritt der Grenzwert des Mantelwiderstandes erst bei einer Setzung von ca. 0,48 m auf. Auffällig ist, dass für dieses Modell der Grenzwert des Spitzendrucks bereits früh, bei auftretenden Setzungen von ca. 0,3 m, erreicht wird im Vergleich zu den Modellen mit den Abständen von 5 x D und 3 x D, bei welchen der Grenzwert der Mantelreibung und des Spitzendrucks bei der gleichen Belastungsstufe aktiviert wird.

Für die Betrachtung der Widerstand-Setzungslinie des Kernpfahls gilt es festzuhalten, dass mit zunehmender Verkleinerung des Pfahlabstandes, Anpassung der Gründungspfahlzahl und steigender Belastung das Erreichen der Grenzwerte für die Pfahlwiderstände erst nach größeren Setzungen erfolgt. Somit ist eine Berücksichtigung einer gewissen Pfahl-Pfahl-Interaktionen bei den Kernpfählen modelliert als Embedded Piles gegeben. Ergänzend fällt jedoch auf, dass zwar eine Berücksichtigung der Pfahl-Pfahl-Interaktion erkennbar ist, das abrupte Abfallen des Pfahlwiderstandes für einen Abstand von 2 x D jedoch nicht realistisch erscheint. Die Grenze der Anwendbarkeit der Embedded Piles wird bei diesem Punkt erreicht, denn in der Realität sollte der Verlauf des Pfahlwiderstandes weiterhin ansteigend verlaufen [4, 5].

3.3 Zusammenfassung der Vorstudie

Die in der Vorstudie ermittelten Parameter geben einen Aufschluss über das Verhalten der Embedded Piles und der Kontinuumpfähle. Während sich das Verhalten der unterschiedlich modellierten Pfähle bei den Setzungsverformungen zumindest für die ersten Belastungsstufen kaum unterschied, gab es bei der Auswertung des Tragverhaltens und der Widerstände der Pfähle größere Abweichungen.

Insbesondere bei der Auswertung des Tragverhaltens kommt es bei den Spitzenwiderständen und der Pfahlmantelreibung in Abhängigkeit zur wirkenden Belastung zu größeren Differenzen. Während bei den Embedded Piles ein eher geringer Spitzenwiderstand im Vergleich zu den Pfählen aus Volumenelementen erreicht wird, entstehen bei den quadratischen Ersatzpfählen unrealistische hohe Mantelreibungen.

Durch die Betrachtung der Mantelreibung von speziellen Einzelpfählen, wie den Kern- und Eckpfählen, wird ersichtlich, dass sich die Verläufe für die Mantelreibung stark ähneln. Mit steigender Belastung kommt es aber auch hier zu größeren Abweichungen hinsichtlich der Größe der Mantelreibung.

4. Numerische Berechnungen Marieninsel

Die numerischen Berechnungen für das Gründungssystem Marieninsel wurde unter Berücksichtigung der Erkenntnisse der Vorstudie mit Embedded Piles und quadratischen Kontinuumpfählen durchgeführt.

Die Untersuchung der numerischen Berechnung der Gründung des Marienturms mit runden Kontinuumpfählen scheiterte aufgrund von Problemen bei der Netzdiskretisierung der runden Volumenelemente.

Das Gründungssystem bestehend aus der Flachgründung des Marienforums und der KPP des Marienturms ist in der nachfolgenden Darstellung abgebildet.

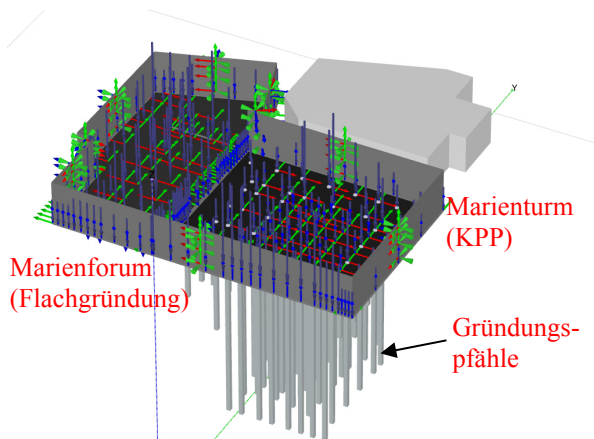


Bild 10: Gründungssystem Marienturm

Der Vergleich der Setzungsplots für die Lastkombinationen G und G+Q/3 zeigt nahezu identisch große maximale Setzungen für die Embedded Piles beziehungsweise für die quadratischen Kontinuumpfähle (vgl. Bild 11). Diese unterscheiden sich um weniger als 2 % für beide Modelle. Auffälliger ist das Setzungsbild bei der Betrachtung des Marienturms. Hier sind im Modell der Embedded Piles deutlich größere Setzungen zu erkennen als bei den quadratischen Kontinuumpfählen.

Für die Lastkombination der Gesamtlast G+Q ergeben sich die maximalen Setzungen zu 0,088 m im Modell der Embedded Piles und zu 0,083 m bei den quadratischen Kontinuumpfählen. Die prozentuale Abweichung beträgt hier rund 7 %. Im Modell der Embedded Piles treten die maximalen Setzungen jetzt im Bereich des Marienturms auf, bei den quadratischen Ersatzpfählen jedoch im Bereich des Marienforums. Auch hier sind die Setzungen der Embedded Piles für den Bereich des Marienturms deutlich größer, als bei den quadratischen Kontinuumpfählen.

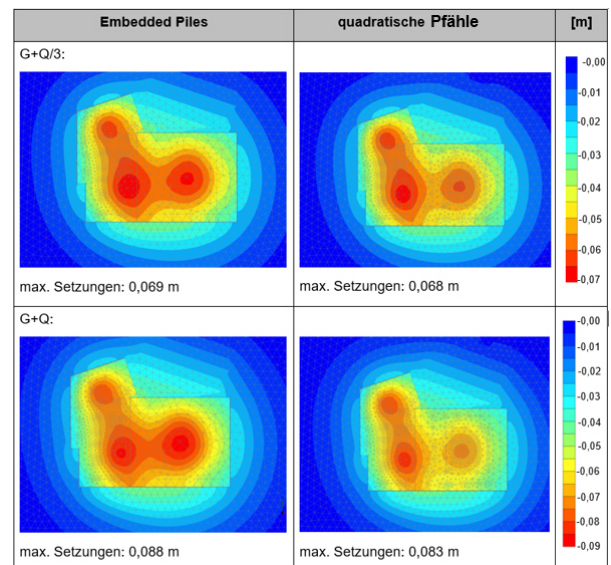


Bild 11: Setzungsplots Marienturm

Aus Bild 13 geht hervor, dass bis zur Lastkombination der Gesamtlast G+Q ein annähernd linearer Verlauf der Widerstand-Setzungslinie zu erkennen ist. Mit steigender Belastung ergeben sich zunehmend größere Setzungen. Der größte Anteil des Lastabtrages findet für die ersten drei Lastkombinationen über den Pfahlwiderstand R_{pile} statt. Dieser setzt sich aus dem Pfahlspitzenwiderstand R_b , welcher einen eher geringen Anteil des Lastabtrages ausmacht, und dem Pfahlmantelwiderstand R_s , der den größten Anteil des Pfahlwiderstandes ausmacht, zusammen. Die maximalen Setzungen betragen für die Lastkombination der Gesamtlast G+Q rund 9 cm.

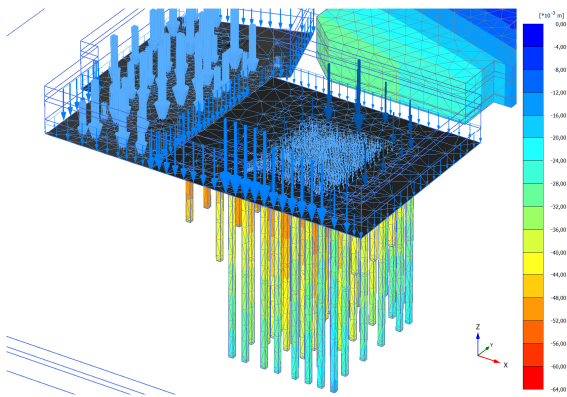


Bild 12: Gründungssystem Marienurm – 3D - Modell

Ab der Lastkombination der Gesamtlast $G+Q$ sind die vorgegebenen Grenzwerte der Embedded Piles für die Pfahlmantelreibung und den Pfahlspitzenruck für fast alle Gründungspfähle der KPP erreicht. Durch das Erreichen der Grenzbedingung wird die Traglast der Embedded Piles begrenzt. Somit kann der weitere Lastabtrag nur über den Sohlwiderstand erfolgen, was sich am Verlauf des steigenden Sohlwiderstandes R_{raft} erkennen lässt. Dieser übernimmt für die Lastkombination der doppelten Gesamtlast $2x(G+Q)$ den maßgebenden Teil des Lastabtrages.

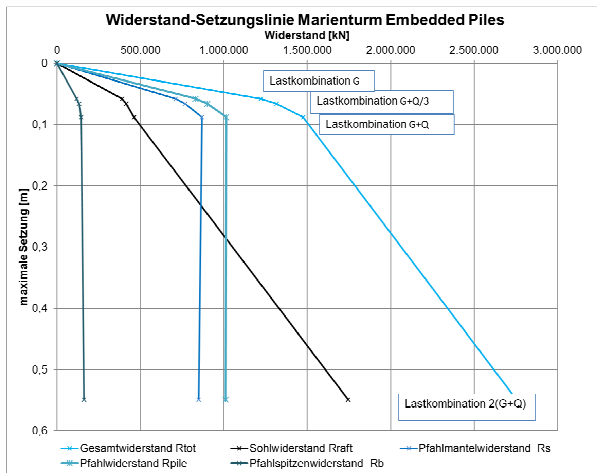


Bild 13: Widerstand-Setzungslinie Marienurm Embedded Piles

Die Widerstand-Setzungslinie des numerischen Modells der KPP des Marienurms mit quadratischen Kontinuumpfählen ist in Bild 14 dargestellt.

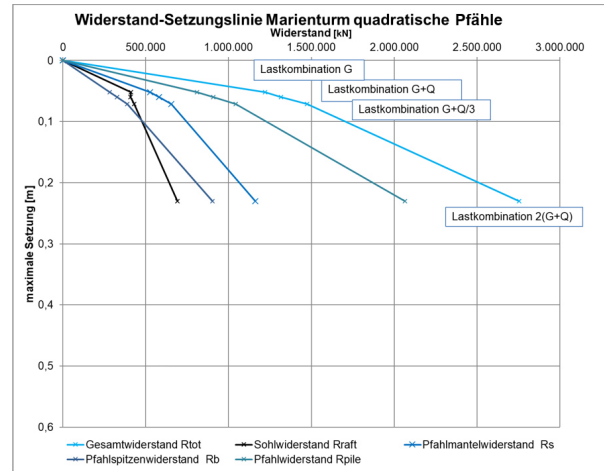


Bild 14: Widerstand-Setzungslinie Marienurm quadratische Ersatzpfähle

In Bild 14 ist zu erkennen, dass die quadratischen Kontinuumpfähle bis zur Lastkombination $G+Q$ für den Pfahlwiderstand R_{pile} , bestehend aus Pfahlspitzenruck und Pfahlmantelreibung, einen nahezu linearen Verlauf aufweisen. Der maßgebende Anteil des Lastabtrags der KPP mit quadratischen Kontinuumpfählen erfolgt für alle Lastkombinationen über den Pfahlwiderstand R_{pile} . Den größten Anteil des Pfahlwiderstandes übernimmt die Pfahlmantelreibung R_s . Bis zur Lastkombination $G+Q$ stellen sich ca. 8,3 cm Setzungen ein.

Für die Lastkombination der doppelten Gesamtlast ergeben sich Setzungen von ca. 23 cm. Auffallend ist neben einem etwas steiler abfallenden Verlaufes der Widerstand-Setzungslinie ab der Lastkombination $G+Q$, dass der Pfahlspitzenwiderstand R_b ab Setzungen von rund 10 cm größer wird als der Sohlwiderstand R_{raft} . Ursächlich hierfür ist die systembedingte Überschätzung des Spitzendrucks. Diese Überschätzung ist aufgrund des geringen Widerstandsanteils der Pfähle nicht maßgebend. Zur Vermeidung dieser Überschätzung könnte z. B. eine Verringerung der Steifigkeit des Baugrunds direkt unter dem Pfahl implementiert werden [7].

In Bild 15 werden die Widerstand-Setzungslinien beider Gesamtpfahlwiderstände R_{tot} und Pfahlwiderstände R_{pile} dargestellt. Die Betrachtung der Widerstand-Setzungslinien der Embedded Piles und der quadratischen Kontinuumpfähle ist bis zu den Lastkombinationen G und $G+Q/3$ vergleichbar. Die Abweichung der Setzungen und des Gesamt- bzw. Pfahlwiderstandes ist mit rund 2 % vernachlässigbar.

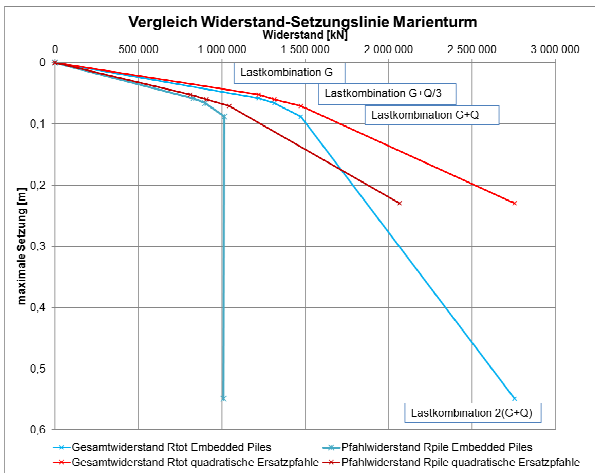


Bild 15: Vergleich Widerstand-Setzungslinien Marienurm

Im Vergleich zu den Embedded Piles treten bei den quadratischen Kontinuumpfählen geringere Setzungen bei gleichem Gesamt- bzw. Pfahlwiderstand auf. Die prozentualen Unterschiede der Widerstand-Setzungslinien liegen für diese Lastkombination bei ca. 7 %. Die Betrachtung der vergleichenden Widerstand-Setzungslinien bestätigen hierbei die Ergebnisse der Vorstudie.

Die größten Abweichungen der Widerstand-Setzungslinien treten bei der Lastkombination der doppelten Gesamtlast auf, wie bereits bei der Auswertung der maximalen Setzungen in der Vorstudie festgestellt wurde. Dies spiegelt sich vor allem in den Verläufen des Pfahlwiderstandes wieder. Der Pfahlwiderstand der quadratischen Kontinuumpfählen verläuft von der Lastkombination $G+Q$ bis $2*(G+Q)$ annähernd linear, während der Verlauf der Embedded Piles steil abfällt. Die Embedded Piles erreichen mit dem Aufbringen der Volllast die Grenzwerte der Mantelreibung und des Spitzendrucks. Nach dem Erreichen der Grenzwerte der Pfahltragfähigkeit erfolgt der weitere Lastabtrag über den Sohlwiderstand. Daraus resultiert letztendlich eine Erhöhung der Setzungen.

Eine genauere Betrachtung der Pfahlwiderstände führt zu dem Ergebnis, dass es auch hier Übereinstimmungen bis zur Lastkombination $G+Q$ gibt. Allerdings kommt es bei den Komponenten der Pfahlwiderstände zu stärkeren Abweichungen. Insbesondere die quadratischen Kontinuumpfähle erzielen hohe Werte für den Spitzendruck. So ergibt sich beispielsweise für die Lastkombination $G+Q$ für einen Kernpfahl ein Pfahlspitzenwiderstand R_b von rund 7 MN bei den quadratischen Kontinuumpfählen, während bei den Embedded Piles maximal 2,65 MN erreicht werden können. Generell erreichen die Berechnungsergebnisse der Spitzendrucke bei den Embedded Piles nicht die Spitzendrucke, welche bei den quadratischen Kontinuumpfählen ermittelt werden.

Die Pfahlmantelreibung R_s ist bei den quadratischen Kontinuumpfählen für die ersten Lastkombinationen

geringer als bei den Embedded Piles. Dieser Unterschied gleicht sich aber durch die Addition mit dem Spitzendruck für den Pfahlwiderstand R_{pile} aus.

Die Auswertung des Pfahl-Platten-Koeffizienten α_{KPP} erfolgte u.a. anhand der Auswertung der einzelnen Pfahlwiderstände der Gründungspfähle. Hierzu wurden die Einzelwiderstände der 61 Gründungspfähle ermittelt und aufsummiert. Für die Embedded Piles konnte das in Plaxis 3D implementierte Tool für die Auswertung der Normalkraft herangezogen werden. Der Pfahl-Platten-Koeffizient wurde für die maßgebenden Lastkombinationen berechnet und in Bild 16 über die Ordinate aufgetragen.

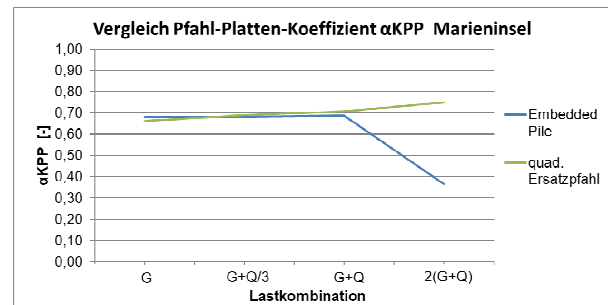


Bild 16: Vergleich Pfahl-Platten-Koeffizient Marieninsel

Die Auswertung des Pfahl-Platten-Koeffizienten der beiden Modelle zeigt einen ähnlichen Verlauf des Koeffizienten bis zur Lastkombination $G+Q$. Während sich der Pfahl-Platten-Koeffizient bei den Embedded Piles konstant auf 0,68 einpendelt, steigt der Koeffizient bei den quadratischen Kontinuumpfählen von 0,66 auf 0,71 an. Die prozentuale Abweichung beträgt für die ersten drei Lastkombinationen weniger als 3 %. Ab der Lastkombination $G+Q$ ist ein Versagen der Embedded Piles durch einen abfallenden Verlauf des Pfahl-Platten-Koeffizienten deutlich zu erkennen. Die quadratischen Ersatzpfähle hingegen nehmen konstant mehr Lasten auf, was zu einem steigenden Pfahl-Platten-Koeffizienten führt.

Der Pfahl-Platten-Koeffizient der Embedded Piles weicht in der Vorstudie bei einer geringeren Belastung leicht von den quadratischen Kontinuumpfählen ab. Bevor die Grenzbedingung der Embedded Piles erreicht wird, sind die Koeffizienten jedoch nahezu identisch. Der Zeitpunkt des Erreichens der Grenzwerte wird durch einen stark abfallenden Verlauf verdeutlicht (Bild 16).

Für die Auswertung der Pfahlfedersteifigkeit erfolgte eine Mittelwertbildung der 61 Gründungspfähle, welcher über die vier maßgebenden Lastkombinationen bestimmt wurde. Der Verlauf der Pfahlfedersteifigkeit ist in Bild 17 dargestellt.

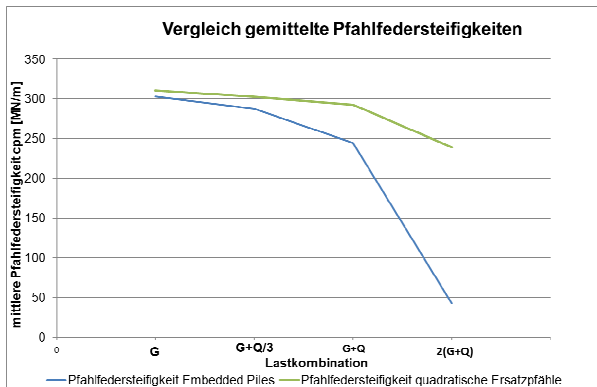


Bild 17: Vergleich gemittelte Pfahlfedersteifigkeiten

Bei einer vergleichenden Betrachtung der Verläufe gemittelten Pfahlfedersteifigkeiten der quadratischen Kontinuumpfähle und der Embedded Piles zeigt sich erwartungsgemäß eine Abnahme der Pfahlfedersteifigkeiten mit zunehmender Belastungsstufe. Der Verlauf der quadratischen Kontinuumpfähle verhält sich für die Lastkombination G bis G+Q linear, während bei den Embedded Piles für dieselben Lastkombinationen ein immer steiler abfallender Verlauf erkennbar wird.

5. Zusammenfassung

Die Embedded Piles zeichnen sich im Wesentlichen durch ihre schnelle und unkomplizierte Eingabe als Linienelement in das numerische Modell aus. Durch diese Art der Eingabe kann das Fehlerpotenzial merklich reduziert und Zeitverkürzungen bei der Netzgenerierung festgestellt werden. Ein weiterer Vorteil der Embedded Piles sind die in Plaxis 3D implementierten Tools zur Auswertung. Diese ermöglichen eine einfache und schnelle Betrachtung verschiedenster Pfahlparameter wie beispielsweise dem Normalkraftverlauf über die Tiefe des Gründungspfahls, dem Pfahlspitzenruck und die Setzungen.

Die Nachteile von Embedded Piles fielen erst bei der vergleichenden Ergebnisbetrachtung mit den runden und quadratischen Kontinuumpfählen auf und lassen sich auf die Eingabe der Grenzwerte für Pfahlmantelreibung und Spitzendruck zurückführen. Hierbei wird durch die Bedingung der Grenzwerte verhindert, dass in höheren Belastungssituationen erhöhte Mantelreibungen zustande kommen, was letztendlich zum Versagen der KPP führen. Zudem konnte in der Vorstudie bei der Untersuchung der engeren Pfahlanordnung zwar eine Berücksichtigung der Pfahl-Pfahl-Interaktion festgestellt werden, aber auch hier wird durch die Grenzwerteingabe die Abbildung einer höheren Mantelreibung verhindert. Eine Erhöhung der Mantelreibung und die damit verbundene Erhöhung des Pfahlwiderstandes wäre jedoch gemäß [4] möglich.

Vorteilhaft bei der Anwendung der Gründungspfähle aus Kontinuumelementen ist vor allem die realistische Abbildung des Tragverhaltens einer KPP, was in dieser

Studie über alle Lastkombinationen beziehungsweise Belastungsstufen erkennbar war. Die quadratischen Kontinuumpfählen weisen bei der Netzgenerierung eine größere Anzahl an Elementen (im Umfang des Pfahls) auf. Ein zusätzlicher Vorteil bei den runden Kontinuumpfählen ist die Auswertung, welche ähnlich wie bei den Embedded Piles über ein in Plaxis implementiertes Tool realisiert wird und eine schnelle Ergebnisbetrachtung ermöglicht.

Bei der Verwendung der quadratischen Kontinuumpfähle ergaben sich vor allem bei der Eingabe in das numerische Modell und bei der Auswertung die größten Nachteile. Für eine möglichst präzise Auswertung der Pfahlkräfte ist es bei den quadratischen Kontinuumpfählen nötig, mehrere ein Meter lange Elemente in die Geometrie jedes Gründungspfahls einzuarbeiten. Um hier unrealistische Werte für die Pfahlkopf- und Pfahlfußkraft zu verhindern, wurden jeweils an Pfahlkopf und Pfahlfuß zusätzlich ein 0,10 m langes Element ober- bzw. unterhalb des Volumenelementes eingefügt. Dies dient der Vermeidung von Spannungsspitzen in den ein Meter langen Elementen. Die Folge ist eine komplexe Eingabe in das Modell verbunden mit einem hohen Zeitaufwand. Bedingt durch diese Eingabe der quadratischen Kontinuumpfähle werden insgesamt mehr Knoten und Elemente im numerischen Modell generiert. Dies führt zu einem höheren Zeitaufwand bei der Erstellung des FE-Netzes. Zudem erhöht sich das Fehlerpotential durch die aufwendige Eingabe der Gründungspfähle.

Die Eingabe der Gründungspfähle als runde Kontinuumelementen hingegen ist mit einem geringen Aufwand verbunden und ähnelt der Eingabe der Embedded Piles. Die Pfähle werden durch einen runden Querschnitt mit dem gewünschten Pfahldurchmesser eingegeben und bis in die erforderliche Tiefe extrudiert. Somit entstehen für die Eingabe dieser Gründungspfahlvariante keine Nachteile. Allerdings fällt bei der Betrachtung des generierten Netzes der runden Pfähle ein eher unregelmäßiges Netz im angrenzenden Bereich des Pfahls auf. Diese Unregelmäßigkeiten könnten Auswirkungen auf die Entwicklung der Pfahlmantelreibung bei der Berechnung des Modells haben.

Die Ergebnisse der Vorstudie zeigten, dass die Gründungspfähle aus Kontinuumelementen zu einer Überschätzung des Pfahlspitzendrucks und der Pfahlmantelreibung führen. Vor allem bei den quadratischen Kontinuumpfählen kam es hierbei zu größeren Abweichungen, was sich durch die „vereinfachte“ Auswertungsmethode erklären lässt, da bei einer Betrachtung des Gesamtwiderstandes plausible Ergebnisse berechnet wurden.

Die Betrachtung der Berechnungsergebnisse der Vorstudie und der Studie zum Projektgebiet Marieninsel ergaben durchaus einige Gemeinsamkeiten bei der

Beurteilung des Last-Setzungsverhaltens der Kombinierten Pfahl-Plattengründung.

Auswertungen im Bereich des Setzungsverhaltens zeigten nur geringe Abweichung bei den Berechnungsergebnissen des numerischen Modells für die ersten Lastkombinationen und Belastungsstufen bei allen untersuchten Gründungspfahlvarianten. Auch Untersuchungen des Lastabtrages, welcher in den beiden Studien durch das Aufstellen einer Widerstands-Setzungslinie verglichen wurde, wiesen Gemeinsamkeiten für die besagten Lastkombinationen auf Seiten der Embedded Piles und der Pfähle aus Kontinuumelementen auf.

Durch die Ermittlung des Pfahl-Platten-Koeffizienten konnte eine annähernd gleiche Lastenverteilung für die quadratischen Ersatzpfähle und Embedded Piles für bestimmte Lastkombinationen nachgewiesen werden. Dennoch gilt es festzuhalten, dass mit steigender Lastaufbringung die untersuchten Berechnungsergebnisse der Embedded Piles und der Gründungspfähle aus Kontinuumelementen zunehmend stärker voneinander abweichen. Die Begründung hierfür findet sich in der Eingabe der Pfahleigenschaften der Embedded Piles. Das Festlegen der Grenzwerte für die Mantelreibung und des Spitzendrucks führt mit zunehmendem Lastaufkommen zu einer Aktivierung der Grenzwerte bei den Gründungspfählen und vermindert somit das Tragverhalten der KPP. Bei den Gründungspfählen aus Kontinuums Elementen ist ebenfalls ein leichter Abfall der Widerstand-Setzungslinie erkennbar, dieser verläuft jedoch annähernd linear und fällt nicht steil ab, wie es bei den Embedded Piles der Fall ist.

Zusammenfassend zur Beurteilung des Last-Setzungsverhaltens einer Kombinierten-Pfahl-Plattengründung mittels zweier unterschiedlicher Gründungspfahlvarianten ist festzustellen, dass für die Nachweisführung des Grenzzustandes der äußeren Gebrauchstauglichkeit GZ2 grundsätzlich sowohl Embedded Piles als auch Kontinuumpfähle als Gründungspfähle nach dieser Studie geeignet sind. Hierbei ergeben sich für die Lastkombination $G+Q/3$ für das Last-Setzungsverhalten annähernd gleiche Berechnungsergebnisse und es kommt nur zu Abweichungen in geringem Maße.

Für die Lastkombination der Volllast $G+Q$ ergeben sich zwar größere Abweichungen hinsichtlich des Last-Setzungsverhaltens, einer Verwendung beider Varianten zur Modellierung der Gründungspfähle spricht jedoch nichts entgegen, da maßgebende Berechnungsunterschiede in dieser Studie nicht erkennbar sind.

Hinsichtlich der Betrachtung der Lastkombination der doppelten Volllast $2x(G+Q)$, welche für die Nachweisführung des Grenzzustandes der äußeren Tragfähigkeit GZ1 von Bedeutung ist, zeigen sich gewisse Einschränkungen bei der Verwendung von Embedded Piles in Folge der Vorgabe von Grenzwerten. Es wird

zwar durch die Verwendung der Embedded Piles kein rechnerisches Versagen ermittelt, jedoch ist eine deutliche Verminderung beim Tragverhalten beziehungsweise Vergrößerungen der Verschiebungen erkennbar. Diese Beobachtung spiegelt nicht unbedingt das Tragverhalten von Pfählen einer KPP wieder.

Literaturverzeichnis

- [1] Arbeitskreis AK 1.6, "Numerik in der Geotechnik". 2014. Empfehlungen des Arbeitskreises Numerik in der Geotechnik. Berlin: Wilhelm Ernst & Sohn, Verlag für Architektur und technische Wissenschaften GmbH & Co.KG, 2014. ISBN 978-3-433-030806.
- [2] Arbeitskreis AK 2.1 "Pfähle", Deutschen Gesellschaft für Geotechnik e.V. 2012. Empfehlungen des Arbeitskreises Pfähle EA-Pfähle. Kassel: Ernst & Sohn, Verlag für Architektur und technische Wissenschaften GmbH, Berlin, 2012.
- [3] Brinkgreve, R.B.J., Kumaraswamy, S. und Swolfs, W.M. 2015. Plaxis 2015 Reference Manual. AN DELFT, Netherlands: s.n., 2015.
- [4] El-Mossallamy, Y. 1996. Ein Berechnungsmodell zum Tragverhalten der Kombinierten-Pfahl-Plattengründung. Darmstadt: Mitteilungen des Institutes und der Versuchsanstalt für Geotechnik der technischen Hochschule Darmstadt Heft 36, 1996.
- [5] Hanisch, J., Katzenbach, R. und König, G. 2002. Kombinierte Pfahl-Plattengründung. Berlin: Ernst & Sohn Verlag für Architektur und technische Wissenschaften GmbH, 2002. 3-433-01606-2.
- [6] Reul, O. 2000. In-situ-Messungen und numerische Studien zum Tragverhalten der Kombinierten Pfahl-Plattengründung. Darmstadt: Mitteilungen des Institutes und der Versuchsanstalt für Geotechnik der Technischen Universität Darmstadt, 2000.
- [7] Wehnert, M.; Vermeer, P.A. 2004. Numerische Simulation von Probelastungen an Großbohrpfählen. Universität Stuttgart.