

# Einsatz von Kombinierten Pfahl-Plattengründungen im Eisenbahnwesen

Bei kombinierten Pfahl-Plattengründungen bestehen besondere Anforderungen bei der geotechnischen Bearbeitung und Planung sowie im Rahmen der bauaufsichtlichen Prüfung.

Hans-Georg Kempfert  
 Marc Raithel  
 Oliver Krist  
 Dietmar Placzek

Aufgrund der Verformungsempfindlichkeit von Eisenbahnfahrwegen stellen sich bei der konzentrierten Ableitung von Lasten in den Baugrund besondere Anforderungen. Die Kombinierte Pfahl-Plattengründung (KPP) ist eine vergleichsweise neue Variante einer Pfahlgründungskonstruktion. Gegenüber der herkömmlichen Pfahlgründung, bei der der Lastabtrag ausschließlich

über die Pfähle erfolgt, wird beim System der KPP die über Sohldruckbeanspruchung aktivierte mittragende Wirkung der Gründungsplatte genutzt [1]. Besonders geeignet ist die KPP bei Baugrundverhältnissen, deren Steifigkeit von oben zur Tiefe hin weitgehend kontinuierlich zunimmt. Die Abb. 1 zeigt die dabei wirkenden verschiedenen Interaktionseinflüsse zwischen den Gründungselementen.

Die Zielsetzung einer KPP liegt zum einen in der Gründungsoptimierung, welche zu wirtschaftlicheren Lösungen führen kann, zum anderen können durch eine KPP die Setzungen gegenüber einer Flächengrün-

dung reduziert werden. In diesem Zusammenhang wurde der Begriff „Setzungsbremse“ geprägt. Abb. 2 zeigt in Anlehnung an [2] eine exemplarische Gründung eines Eisenbahnbrückenpfeilers bei Gegenüberstellung der Setzungen und Kosten unter Annahme einer Pfahlgründung, Flachgründung und KPP.

Als mittragende Elemente sind die Pfähle, die Fundamentplatte und der Baugrund und deren gegenseitige Beeinflussung zu berücksichtigen. Diese treten in Wechselwirkung, so dass für die Bemessung des Gesamtsystems die Interaktionen dieser Elemente entscheidend sind. Das verwendete Berechnungsverfahren zur Ermittlung des Gesamtwiderstandes muss die Interaktion zwischen Baugrund, Sohlplatte und Pfählen in ausreichender Weise berücksichtigen. Die Berechnung einer KPP kann näherungsweise mit einfachen Abschätzverfahren zur Aufteilung der Belastung auf Sohlplatte und Pfähle z.B. auf der Grundlage der Elastizitätstheorie erfolgen. Da analytische Näherungsverfahren jedoch relativ gleichmäßige und homogene geometrische und geotechnische Randbedingungen voraussetzen, haben sich in jüngerer Zeit jedoch numerische Verfahren, z. B. die Methode der Finiten-Elemente bei der Bemessung durchgesetzt. Die Berechnungsgrundlagen und durchzuführende Nachweise mit weiteren Hinweisen und Literaturangaben finden sich z. B. in [1], [3], [4], [5] und [8].

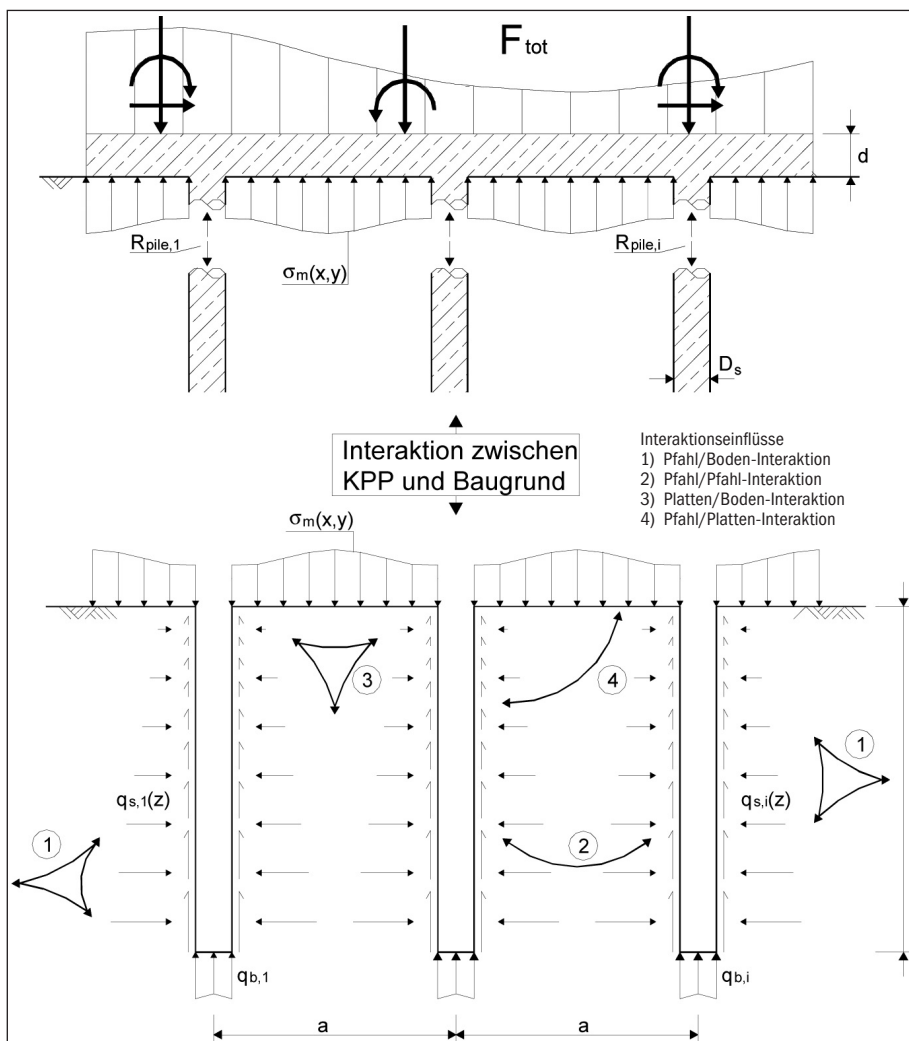


Abb. 1: Interaktionseinflüsse bei einer KPP, nach [1]

Im Hinblick auf den Entwurf und die Planung sind kombinierte Pfahl-Plattengründungen in die Geotechnische Kategorie 3 der DIN 1054:2005-01 bzw. dem Eurocode EC 7-1 einzustufen.

Unabhängig von den Betrachtungen im Rahmen der ZiE stellen sich aus geotechnischer Sicht aber immer besondere Anforderungen im Rahmen der geotechnischen Bearbeitung und Planung sowie im Rahmen der bauaufsichtlichen Prüfung, da für den Entwurf und die Berechnung von Kombinierten Pfahl-Plattengründungen bislang noch keine allgemein gültigen genormten bzw. allgemein anerkannten Entwurfs- und Nachweismethoden existieren.

### Geotechnische Vorgaben für die Bemessung einer KPP

Zur Berechnung des Gesamtbauwerks und der (Stahlbeton-)Bemessung der einzelnen Gründungselemente durch den Tragwerksplaner sind in der Regel Federkonstanten (Baugrundfedern) zur Abbildung des Tragverhaltens der Gründung erforderlich, wobei meist eine linear-elastische Berechnung des Bauwerkes und der einzelnen Interaktionen zwischen den Gründungselementen und dem Bauwerk und Baugrund erfolgt. Hierzu wird in der Regel die Ableitung bzw. Vorgabe der Federkonstanten durch den Geotechnik-Ingenieur erforderlich.

Im Zuge der fortschreitenden Entwicklung und Anwendbarkeit von dreidimensionalen FEM-Programmsystemen hat sich bewährt, dass durch den Geotechnik-Ingenieur ein Gesamtmodell der Gründung inkl. des umgebenden Baugrundes (Kontinuumsmodell) erstellt und berechnet wird sowie die einzelnen Steifigkeitsanteile der Gründungselemente aus den Berechnungsergebnissen im Kontinuumsmodell abgeleitet werden.

Bei der FEM-Berechnung einer KPP wird zunächst das horizontale und vertikale Tragverhalten des Einzelpfahles in FEM-Berechnungen unter Zugrundelegung von entsprechenden Pfahlprobebelastungen am Einzelpfahl kalibriert (Nachrechnung der Probebelastungsergebnisse bei Anpassung der Berechnungsparameter des Bodens/Fels). Das kalibrierte Modell ist dann auf die Abbildung der gesamten KPP zu erweitern. Dabei dürfen die Pfähle bei einer KPP über die üblichen Belastungen im Gebrauchszustand bis in die Nähe des Bruchzustandes ausgelastet werden. Die Gründungsmodellierungen der KPP sollten dabei grundsätzlich anhand dreidimensionaler Berechnungen durchgeführt werden. Zweidimensionale Berechnungen bzw. Berechnungen des Einzelpfahles erfassen die Interaktion zwischen den Einzelpfählen und der Gründungsplatte nicht vollständig. Für den Nachweis der Tragfähigkeit

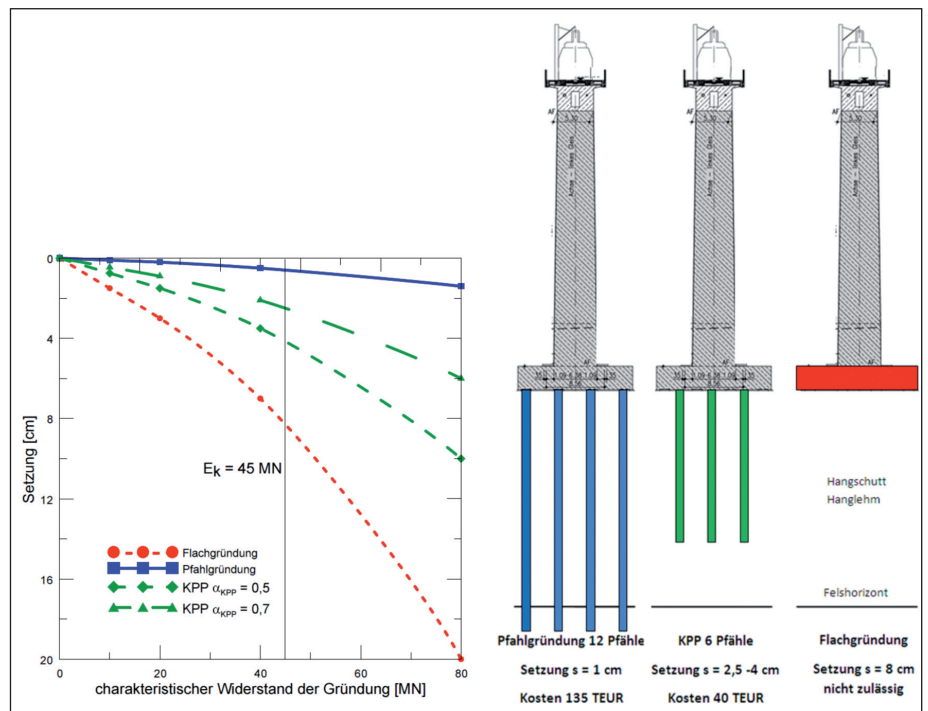


Abb. 2: Exemplarischer Vergleich zwischen Pfahlgründung, KPP und Flachgründung in Anlehnung an [2]

der KPP finden sich in [5] eine Nachweisgleichung für das Gesamtsystem aus Gründungsplatte und Pfählen. Für die Lastaufteilung zwischen Gründungsplatte und Pfählen (KPP-Faktor  $\alpha_{KPP}$ ) empfehlen sich Sensitivitätsanalysen bzw. Berechnungen mit oberen und unteren Grenzwerten der Baugrundparameter im FEM-Modell. Als Besonderheit bei Kombinierten Pfahl-Plattengründungen im Eisenbahnbau ist zudem noch zu berücksichtigen, dass

aufgrund der Eisenbahnverkehrslasten zyklische Einwirkungen auf die Gründung entstehen können. Zyklisch-dynamisch beanspruchte Pfähle infolge Schwell- oder Wechsellasten weisen im Vergleich zu statisch belasteten Pfählen in der Regel eine deutlich geringere Tragfähigkeit verbunden mit erhöhten Verformungen auf. Dies wird auch in [5] sowie in der EA-Pfähle [3] hervorgehoben. Im Kapitel 13 der EA-Pfähle in der aktuellen 2. Auflage sind erstmals

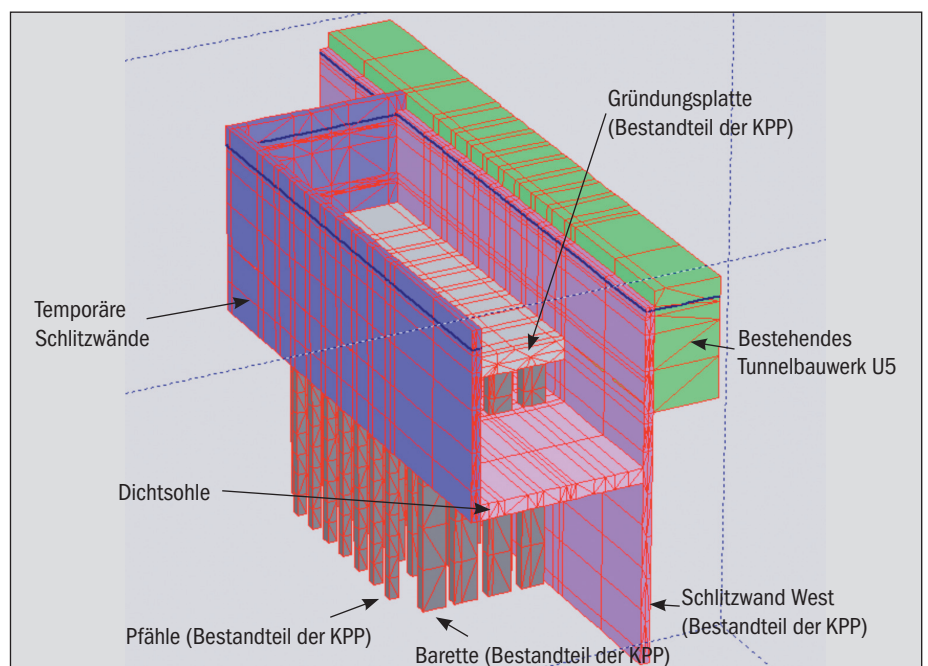


Abb. 3: Berechnungsmodell/Kontinuumsmodell einer KPP mit verschiedenen Gründungselementen (Boden ausgeblendet)

Quelle: Kempfert+ Partner Geotechnik



**Abb. 4:** Pfahlprobekbelastung zur Ermittlung des Last-Setzungs-Verhaltens der Pfähle einer KPP  
Quelle: Brückner Grundbau

Methoden und Berechnungsverfahren zur Prognose des Pfahltragverhaltens unter zyklisch-dynamischen Einwirkungen enthalten, siehe hierzu auch [6]. Die aus den erforderlichen geotechnischen Berechnungen abgeleiteten optimierten Pfahlanordnungen, Plattendicken und Steifigkeiten der Gründungselemente werden dann an den Tragwerksplaner übergeben, der unter Verwendung von Einzelfedern (für die Pfähle) und Flächenfedern bzw. Bettungsmoduln (für die Platte) ein Gesamtmodell des Bauwerks inkl. KPP erstellt.

**Anwendungen von KPP im Eisenbahnbau**  
**Gründung eines Hochhauses im Bereich eines S-Bahn-Tunnels**

Nördlich des Berliner Hauptbahnhofes unterquert ein S-Bahn-Tunnel der Linie S21 in einem Teilbereich ein geplantes ca. 150 m hohes Hochhaus. Da das Gebäude erst zu einem späteren Zeitpunkt realisiert werden soll, sind als Vorsorgemaßnahme bei der Herstellung des Tunnelbauwerkes der S-Bahn die Gründungselemente auch auf den Abtrag der Lasten aus dem Hochhaus zu erstellen. Der Lastabtrag soll über eine

KPP erfolgen, wobei als Besonderheit auch eine bestehende Schlitzwand zum benachbarten Tunnel der parallelverlaufenden U-Bahn mit einbezogen wird. Im Zuge der statischen Berechnung der KPP wurden die Federsteifigkeiten für die Tiefgründungselemente und die Plattenbettung der KPP unter Verwendung von zwei- und dreidimensionalen numerischen Kontinuumsmodellen unter Abbildung von Teilausschnitten der Gründung abgeleitet. Im Rahmen der Begutachtung bzw. Prüfung für die UiG und ZiE waren diese Federsteifigkeiten durch dreidimensionale Vergleichsberechnungen unter Abbildung der Gesamtgründung inkl. der bestehenden Schlitzwand zu überprüfen (Abb. 3). Die Größenordnung der bislang angesetzten Federsteifigkeiten konnte dabei bestätigt werden. Im Detail ergaben sich lokal Abweichungen bei einzelnen Gründungselementen, die nach Vorliegen von Pfahlprobekbelastungen und der Ergebnisse eines kalibrierten FEM-Gesamtmodells nochmals zu überprüfen sind.

**Gründung eines unterirdischen Bahnhofs**

Im Zuge des Ausbaus des Flughafens Berlin-Brandenburg International (BBI) wurde der Bau eines sechsgleisigen Tunnelbauwerkes als Flughafenbahnhof geplant, das durch den mittleren Teil des Terminalgebäudes überbaut werden sollte. Die Lasten des Bauwerkes und des Terminalgebäudes werden mittels einer Kombinierten Pfahl-Plattengründung (KPP) mit etwa 200 Bohrpfählen mit einem Durchmesser von  $D = 1,50$  m in den Baugrund eingeleitet. Auch hier wurden Ersatzsteifigkeiten auf Grundlage von numerischen Berechnungen der KPP für die unter den Stützen und Wänden angeordneten Pfähle (Pfahlfedersteifigkeiten) und für die Bettung der Bodenplatte (Bettungsmoduln) abgeleitet,

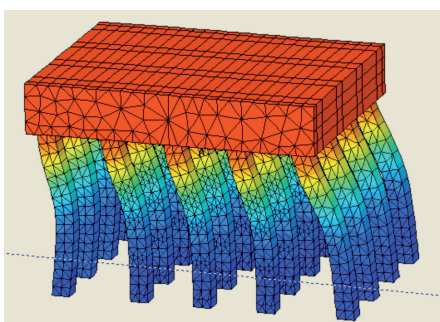
welche in der weiteren statischen Bemessung des Tragwerksplaners verwendet wurden. Weiterhin wurde die Einhaltung des Setzungskriteriums von  $s \leq 3$  cm rechnerisch nachgewiesen.

Bestandteil der Begutachtung im Rahmen der ZiE war in diesem Fall neben der Prüfung der Federsteifigkeiten aber insbesondere die Bewertung des Pfahlsystems sowie der Pfahlprobekbelastungen. Dies war darin begründet, dass im Zuge der Entwurfsplanung zur Durchführung von statischen und anschließenden dynamischen Probekbelastungen vier Probekpfähle hergestellt worden waren (Abb. 4), bei denen trotz vollständiger Verrohrung, einer Wasserauflast von ca. 1,5 m über dem Grundwasserstand und sorgfältiger Reinigung des im Bohrloch vorhandenen Wassers, lockere Sandablagerungen auf der Bohrlochsohle und Auflockerungen unterhalb der Pfahlsohle festgestellt wurden.

Entsprechende Probleme sind trotz normgerechter Pfahlherstellung hinsichtlich u. a. Verrohrung und Wasserauflast im Großraum Berlin bei vergleichbaren Baugrundbedingungen bereits verschiedentlich aufgetreten. Sie resultieren aus der beim Bohrvorgang entstehenden hohen Aufladung des im Bohrloch vorhandenen Wassers mit Feinsand, die unter Baustellenbedingungen bei der Reinigung nicht vollständig beseitigt werden können sowie durch Auflockerung der durch den Aushub entlasteten Pfahlsohle. Da eine Sandablagerung und eine Auflockerung unter der Pfahlsohle zu einer Reduzierung der Pfahltragfähigkeit bzw. einer Zunahme der Pfahlkopfsetzungen hätte führen können, wurde das geplante Herstellungsverfahren (verrohrte Bohrungen) auf unverrohrte, suspensionsgestützte Bohrpfähle umgestellt. Letztlich konnte durch eine suspensionsgestützte Herstellung nach Entsandung der Stützflüssigkeit das Risiko des „Ausregnens“ des verbleibenden Feinsandes und durch die Suspensionsauflast die Entspannung der Pfahlaufstandsfläche ausgeschlossen und das geplante Trag- und Verformungsverhalten der Pfähle sicher gewährleistet werden

**Gründung einer semi-integralen Großbrücke**

Die Filstalbrücke der Neubaustrecke Ulm – Wendlingen zeichnet sich u. a. durch eine semi-integrale Bauweise aus, d. h. dass neben einer konventionellen Lagerung des Überbaus auf die Widerlager bei den Pfeilern eine monolithische Verbindung zwischen den Pfeilern/Unterbau und dem Brückenüberbau zur Ausführung kommt. Bei semi-integralen Brücken entstehen besondere Anforderungen an die Verformungsbeschränkung der Gründung, da bei Verformungs- und Steifigkeitsdifferenzen in den Gründungen grundsätzlich Zwangs-



**Abb. 5:** Berechnete Gründungsverformungen einer Pfeilergründung im dreidimensionalen Kontinuumsmodell (Verformungen überhöht dargestellt)  
Quelle: Kempfert+Partner Geotechnik

beanspruchungen in die aufgehende Konstruktion eingeleitet werden, vgl. auch [7]. Dies erfordert die Gründung auf einer erheblichen Anzahl von engstehenden Pfählen, die einerseits eine Pfahlgruppenwirkung aufweisen. Andererseits werden massive und ausgedehnte Pfahlkopfpfplatten erforderlich, die ebenfalls zum Lastabtrag beitragen, so dass z. B. bei der Filstalbrücke auch eine Tragwirkung im Sinne einer KPP entsteht. Hierdurch wurde bei der Begutachtung im Rahmen der ZiE der semi-integralen Bauweise auch die Beurteilung der Tragwirkung einer KPP, u. a. bei den numerischen Vergleichsberechnungen mit einbezogen, vgl. Abb. 5. Man kann hierbei auch von einer horizontal belasteten KPP sprechen.

## LITERATUR

- [1] DIBt-DGGT-DAFStB: Richtlinie für den Entwurf, die Bemessung und den Bau von Kombi-nierten Pfahl-Plattengründungen (KPP-Richtlinie), Verlag Ernst & Sohn, Berlin, 2002.
- [2] Katzenbach, R.: Vortrag Hochhausgründungen. Vortragsfolien, unveröffentlicht.
- [3] EA-Pfähle: Empfehlungen des Arbeitskreises „Pfähle“, 2. Auflage, DGGT e.V., Verlag Ernst und Sohn, 2012.
- [4] Kempfert, H.-G.: „Pfahlgründungen“. In: Grundbautaschenbuch, 7. Auflage, Teil 3, Kapitel 3.2. Verlag Ernst & Sohn, 2009, S. 73 – 277.
- [5] Handbuch EC 7-1: Handbuch Eurocode 7 – Geotechnische Bemessung, Band 1, Allgemeine Regeln. 1. Auflage, Beuth Verlag, Berlin 2011.

[6] Kempfert, H.-G., Raithe, M., Krist, O.: „Die neue „EA-Pfähle“ und ihre Anwendung im Eisenbahnwesen“, EI, Heft 8/2012.

[7] Raithe, M., Krist, O.: „Geotechnische Anforderungen bei der Gründung von Semi-Integralen-Brücken“, EI, Heft 7/2012.

[8] Placzek, D., Thaher, M., Kowalow, M., Schluff, R.: „Europe Tower Sofia – Optimised Pile-Raft Foundation Design under Earthquake Impacts and High Static Loads“. Tagung GKK08 / Uni Karlsruhe am 24./25.07.2008



**Prof. Dr.-Ing. Hans-Georg Kempfert**

em. Professor für Geotechnik, Universität Kassel, Kempfert+Partner Geotechnik, Hamburg  
kempfert@kup-geotechnik.de



**Dipl.-Ing. Oliver Krist**

Geotechnischer Ingenieurbau, Zentrale des EBA (Ref. 21), Bonn (Büro München)  
kristo@eba.bund.de



**Dr.-Ing. Marc Raithe**

geschäftsführender Gesellschafter Kempfert+Partner Geotechnik, Würzburg  
m.raithe@kup-geotechnik.de



**Prof. Dr.-Ing. Dietmar Placzek**

geschäftsführender Gesellschafter, ELE Beratende Ingenieure GmbH, Erdbaulaboratorium Essen  
dietmar.placzek@ele-e.de

## Summary

**10b\_Üb\_Sum\_Text**

**10c\_Summary\_Text**