

# Zur Bemessung horizontalbeanspruchter Pfahlgründungen von Eisenbahnbrücken

**Peter-Andreas von Wolffersdorff**

**BAUGRUND DRESDEN Ingenieurgesellschaft mbH**

## 1 Einführung

Die großen Talbrücken der Hochgeschwindigkeitseisenbahnstrecke VDE 8.2 Erfurt – Halle/Leipzig sind überwiegend als semi-integrale Bauwerke geplant und ausgeführt worden. Die Vorteile dieser Bauweise bestehen u. a. darin, dass einerseits ästhetische Konstruktionen erreicht werden können und andererseits die Anzahl der wartungsintensiven Gleitlager verringert werden kann oder sogar auf Gleitlager völlig verzichtet werden kann. Um die Anforderungen an Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit solcher semi-integralen Bauwerke erfüllen zu können, sind neben sorgfältigen und anspruchsvollen Planungen auch umfangreiche, baubegleitende Messüberwachungen zwingend erforderlich.



**Abb. 1:** Fertiggestellter Bogen der Unstruttalbrücke

Die Unstruttalbrücke ist mit einer Gesamtlänge von 2.668 m und einer Höhe von maximal 49 m die größte Talbrücke der Neubaustrecke (siehe Abb. 1). Das Bauwerk, das sich aus mehreren integralen Tragwerken zusammensetzt, stützt sich

auf 41 schlanke Pfeiler und auf 4 Bögen. Es ist auf Bohrpfählen, die in tragfähigen Felsuntergrund einbinden, gegründet (Rimane (2012)).

Die Bögen und die angrenzenden Pfeiler stehen auf einer gemeinsamen Fundamentplatte. Somit sind von den Tiefgründungen für Bogen und Pfeiler erhebliche Vertikal- und Horizontalbelastungen aufzunehmen.

Das in diesem Beitrag zugrunde gelegte Beispiel einer hoch horizontal beanspruchten Pfahlgründung orientiert sich an der Gründung für Bogen und Pfeiler der Achse 37 der Unstrutalbrücke.

## 2 Nachweise und Berechnungsverfahren für horizontalbeanspruchte Pfahlgruppen

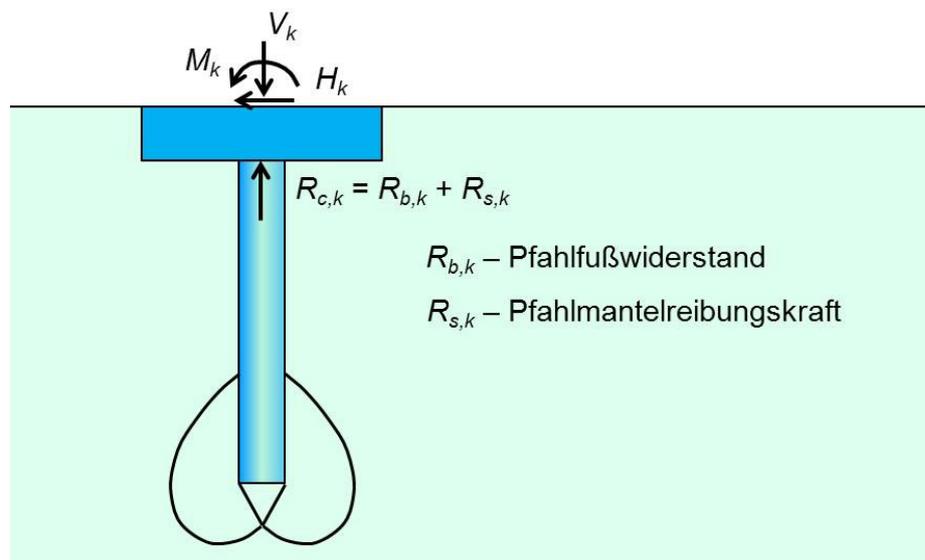
### 2.1 Nachweise der Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit

Die in diesem Beitrag betrachtete Pfahlgründung wird gemäß EA-Pfähle (2012) hinsichtlich ihres Tragverhaltens als Pfahlgruppe bezeichnet, weil sich die Pfähle gegenseitig beeinflussen. Diese sogenannte Gruppenwirkung bzw. Pfahl-Pfahl-Interaktion spielt insbesondere bei horizontalen Beanspruchungen eine nicht vernachlässigbare Rolle und ist daher zu berücksichtigen.

Da die Baugrund-Bauwerk-Wechselwirkung bei Gründungskonstruktionen mit bei quer zur Achse belasteten Pfahlgruppen dominiert, wird bei der Bemessung sowohl von Einzelpfählen als auch von Pfahlgruppen keine eindeutige Trennung zwischen dem Nachweis der Tragfähigkeit GEO-2 und dem Nachweis der Gebrauchstauglichkeit SLS vorgenommen. Bei den hierfür anerkannten Berechnungsverfahren gemäß dem Stand der Technik werden Bettungsmoduln zugrunde gelegt. Es können aber auch numerische Verfahren, wie z .B. die Finite-Elemente-Methode (FEM), angewendet werden. Im vorliegenden Beitrag werden zwei verschiedene Möglichkeiten dargestellt, wie Finite-Elemente-Berechnungen in die Bemessung eingebunden werden können.

Voraussetzung für die hier beschriebenen Berechnungsvarianten ist, dass die Berechnungen der Gründungssysteme ausschließlich mit charakteristischen Werten der ständigen Gründungslasten ( $V_{G,k}$ ,  $H_{G,k}$ ,  $M_{G,k}$ ) bzw. mit repräsentativen Werten der veränderlichen Gründungslasten ( $V_{Q,rep}$ ,  $H_{Q,rep}$ ,  $M_{Q,rep}$ ) sowie mit charakteristischen Werten der Baugrundwiderstände (Bettungsmoduln  $k_s$ , Scherparameter

$\tan \varphi_k, c_k$ ) ohne den Ansatz von Teilsicherheitsbeiwerten  $\gamma$  durchgeführt werden. In Bezug zur Anwendung des Eurocodes 7, Teil 1 ist das Nachweisverfahren 2 im Sinne der Handhabung in Deutschland, das auch anstatt als DA 2 (Design Approach 2) als DA 2\* bezeichnet wird, anzuwenden. Im Folgenden wird ein kurzer Überblick über die gemäß Handbuch EC 7-1 (2011) zu führenden Nachweise für einen Einzelpfahl gegeben. Sie gelten im Grundsatz auch für Pfahlgruppen.



**Abb. 2:** Versagensmechanismus für GEO-2 eines axial belasteten Pfahls mit charakteristischen Gründungslasten und Pfahlwiderständen

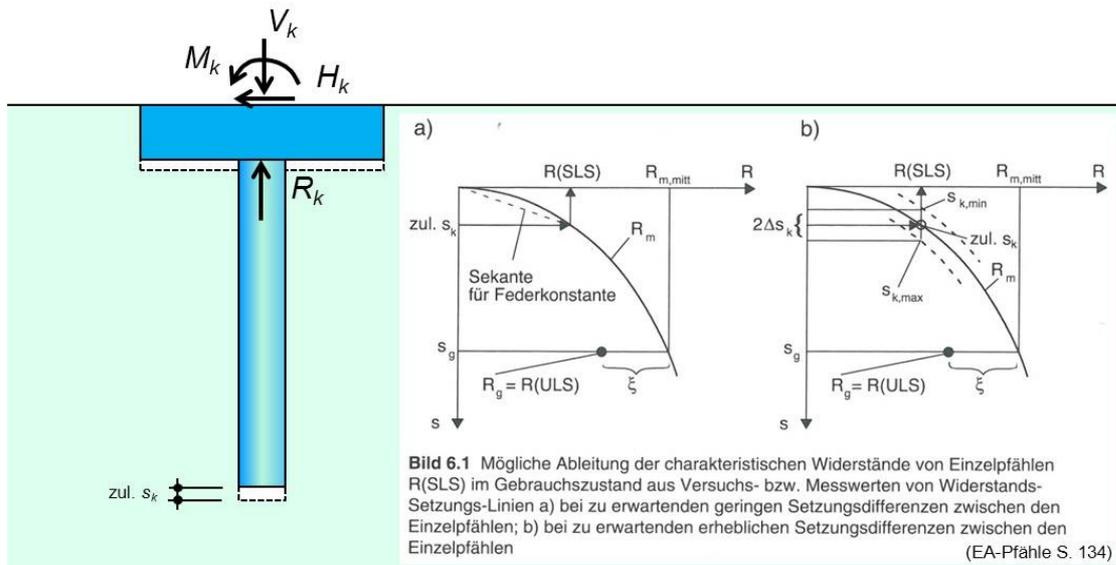
Abb. 2 zeigt einen axial belasteten Pfahl im Grenzzustand der Tragfähigkeit GEO 2 „Versagen oder sehr große Verformungen des Baugrundes bei Anwendung des Nachweisverfahrens 2“. Es gilt folgende Nachweisbedingung:

$$V_d \leq R_{c,d} \quad (1)$$

$$\gamma_G \cdot V_{G,k} + \gamma_Q \cdot V_{Q,rep} \leq \frac{1}{\gamma_t} \cdot R_{c,k} \quad (2)$$

(1) ist die Darstellung mit den Bemessungswerten  $V_d$  und  $R_{c,d}$ . Die Darstellung (2) verdeutlicht, wie die Teilsicherheiten gemäß EC 7 in der Nachweisführung berücksichtigt werden. Der Widerstand des Baugrundes für Druckpfahl  $R_{c,k}$  bzw. der Pfahlfußwiderstand  $R_{b,k}$  und die Pfahlmantelreibungskraft  $R_{s,k}$  wird bzw. werden aus

- statischen Probelastungen,
- dynamischen Probelastungen,
- oder anhand von Erfahrungswerten bestimmt.



**Abb. 3:** Gebrauchszustand eines axial belasteten Pfahls mit charakteristischen Gründungslasten, zulässigen Setzungen und Pfahlwiderständen

In Abb. 3 ist die Ableitung charakteristischer Pfahlwiderstände im Gebrauchszustand bei vorgegebener zulässiger Setzung  $zul. s_k$  dargestellt. Es gelten folgende Nachweisbedingungen:

$$V_k \leq R_k(SLS) \quad (3)$$

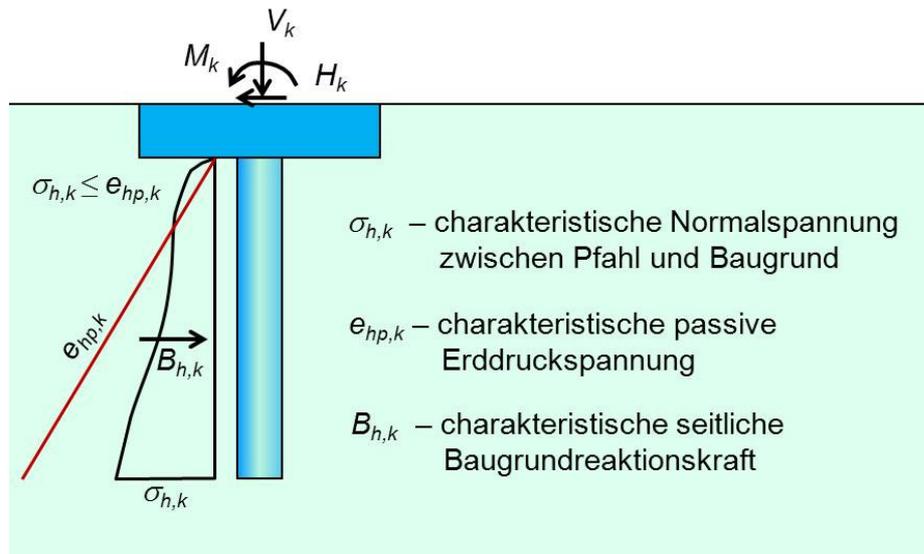
$$vorh. s_k \leq zul. s_k \quad (4)$$

Der Nachweis darf nach (3) oder nach (4) geführt werden. Der charakteristische Pfahlwiderstand im Gebrauchszustand  $R_k(SLS)$  impliziert, dass die dabei eintretenden Setzungen  $s_k$  mit dem Bauwerk verträglich sind.

Bei der Nachweisebedingung (4) ist die sich aus einer Widerstands-Setzungs-Linie ergebende vorhandene Setzung ( $vorh. s_k$ ) mit einer vorgegebenen zulässigen Setzung ( $zul. s_k$ ) zu vergleichen.

Bei vielen Pfahlgruppen, die Gründungslasten in steifen, tragfähigen Baugrund abtragen, kann von geringen Setzungen im Gebrauchszustand ausgegangen werden, so dass der o. g. Nachweis der Gebrauchstauglichkeit mit dem Nachweis der Tragfähigkeit abgedeckt wird.

Bei der hier dargestellten Gründung für einen Brückenbogen, die in Fels einbindet, sind die Nachweise der Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit der Pfähle in axialer Richtung ohnehin nicht bemessungsrelevant, so dass keine weiteren Betrachtung insbesondere zur Gruppenwirkung angestellt werden.



**Abb. 4:** Annahmen für GEO-2 eines quer zur Achse belasteten Pfahls mit charakteristischen Gründungslasten und seitlichen Widerständen

Abb. 4 zeigt einen quer zur Achse belasteten Pfahl mit den Annahmen für Grenzzustand der Tragfähigkeit GEO 2 „Versagen oder sehr große Verformungen des Baugrundes bei Anwendung des Nachweisverfahrens 2“. Es gilt zunächst folgende Bedingung:

$$\sigma_{h,k} \leq e_{hp,k} \tag{5}$$

Die Normalspannungen zwischen Pfahl und Baugrund  $\sigma_{h,k}$  sind Interaktionsgrößen und hängen von den Steifigkeiten des Baugrundes und des Pfahls ab. Sie dürfen die passiven Erddruckspannungen  $e_{hp,k}$  im ebenen Fall nicht überschreiten.

Die Spannungen  $\sigma_{h,k}$  werden entsprechend dem Stand der Technik auf der Grundlage von Bettungsansätzen ermittelt. Bettungsmoduln  $k_{s,k}$  können näherungsweise anhand der Steifmoduln  $E_{s,k}$  der jeweiligen Baugrundsichten und des Pfahldurchmessers  $D$  wie folgt ermittelt werden:

$$k_{s,k} = \frac{E_{s,k}}{D} \tag{6}$$

Bei der Verwendung von Bettungsansätzen oder der Finite-Elemente-Methode werden sowohl die Spannungen zwischen Pfahl und Baugrund als auch die seitlichen Verformungen des Pfahls ermittelt. Da in der Regel die seitlichen Pfahlverformungen für die innere Bemessung der Pfähle (Grenzzustand der Tragfähigkeit STR „Materialversagen“) relevant sind, ist die folgende Nachweisbedingung, die besagt, dass der Bemessungswert der seitlichen Baugrundreaktionskraft  $B_{h,d}$  kleiner als der Bemessungswert des räumlichen Erdwiderstandes  $E'_{ph,d}$  sein muss, in der Regel nicht maßgebend:

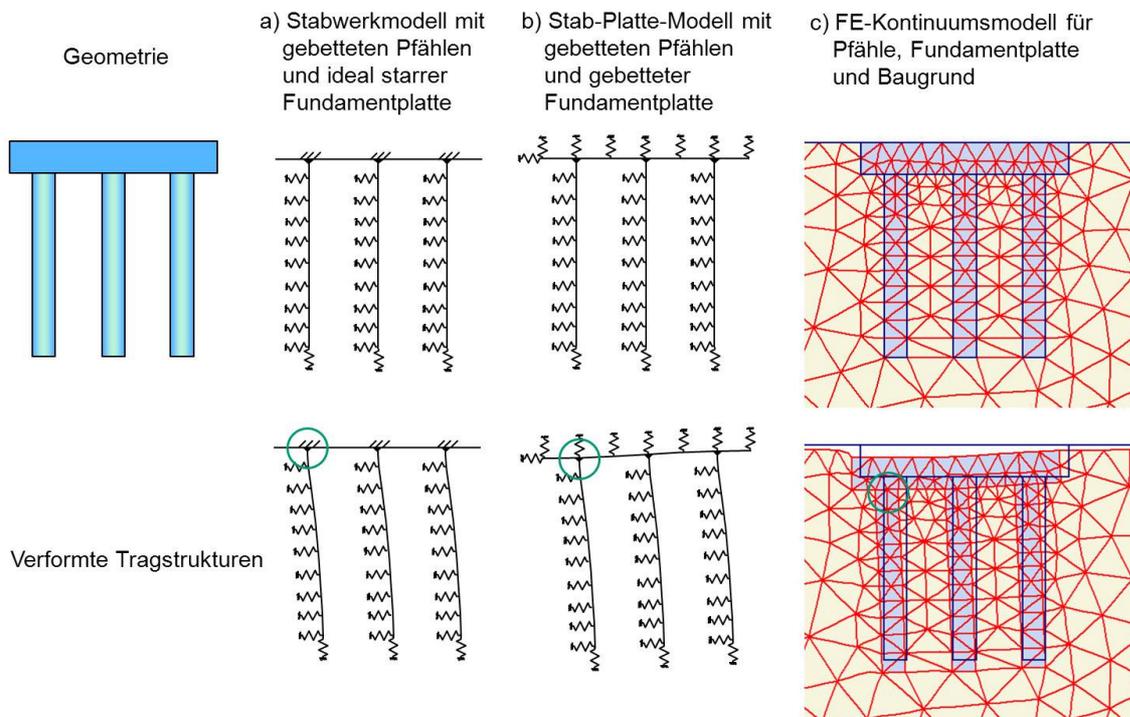
$$B_{h,d} \leq E'_{ph,d} \tag{7}$$

$$\gamma_G \cdot B_{hG,k} + \gamma_Q \cdot B_{hQ,rep} \leq \frac{1}{\gamma_{R,c}} \cdot E_{ph,k}^f \quad (8)$$

(7) ist die Darstellung mit Bemessungswerten. Die Darstellung (8) verdeutlicht, wie die Teilsicherheiten gemäß EC 7 in der Nachweisführung berücksichtigt werden.

## 2.2 Überblick über die Berechnungsverfahren

In Abb. 5 sind die gegenwärtig gebräuchlichen Berechnungsverfahren für Pfahlgruppensysteme vereinfacht in einem zweidimensionalen System dargestellt. Diese drei Berechnungsverfahren sind grundsätzlich auf dreidimensionale Systeme ausgelegt. Dementsprechend sind die Bettungen an die Pfähle in 2 Richtungen und an der Kopfplatte in 3 Richtungen vorzugeben. Pfahlgruppengründungen sollten möglichst auch dreidimensional modelliert werden.



**Abb. 5:** Berechnungsverfahren für Pfahlgruppengründungen

Bei dem „Stabwerkmodell mit gebetteten Pfählen und ideal starrer Fundamentplatte“ (Abb. 5 a)) wird nur das Interaktionsverhalten zwischen den Pfählen und des umgebenden Baugrundes durch Bettungen berücksichtigt. Der wesentliche Nachteil dieses Modells besteht darin, dass durch den in der Regel biegesteifen Anschluss an eine „ideal starre Platte“ oft an den Pfahlköpfen sehr große und somit bemessungsrelevante Biegemomente entstehen.

Bei dem „Stab-Platte-Modell mit gebetteten Pfählen und gebetteter Fundamentplatte“ (Abb. 5 b)) wird neben dem Interaktionsverhalten zwischen den Pfählen

und des umgebenden Baugrundes auch die Interaktion zwischen Fundamentplatte und Baugrund durch Bettungen berücksichtigt. Die Platte ist somit bei Beanspruchung biegsam und kann sich verschieben und verdrehen. Die Biegemomente an den Pfahlköpfen werden im Vergleich zu dem Modell a) kleiner.

Die maßgeblichen Defizite der Modelle mit Bettungen sind:

- Bettungsmoduln sind keine Baugrundkennwerte sondern Systemkenngrößen.
- Die Bestimmung von Bettungsmoduln ist daher nur anhand von semi-empirischen Ansätzen, wie z. B. (6) oder anhand vorab durchgeführter Spannungs-Verformungsberechnungen, wie z. B. mit FEM, möglich.
- Insbesondere kann die Pfahlgruppenwirkung, die bei horizontaler Beanspruchung zu einer Verminderung der seitlichen Bettung führt, nicht mit den Bettungsmoduln direkt berücksichtigt werden. Hierfür können entweder empirische Abminderungen vorgenommen werden (siehe 3.1) oder die Bettung anhand vorab durchgeführter Finite-Elemente-Berechnungen ermittelt werden (siehe 4.2).

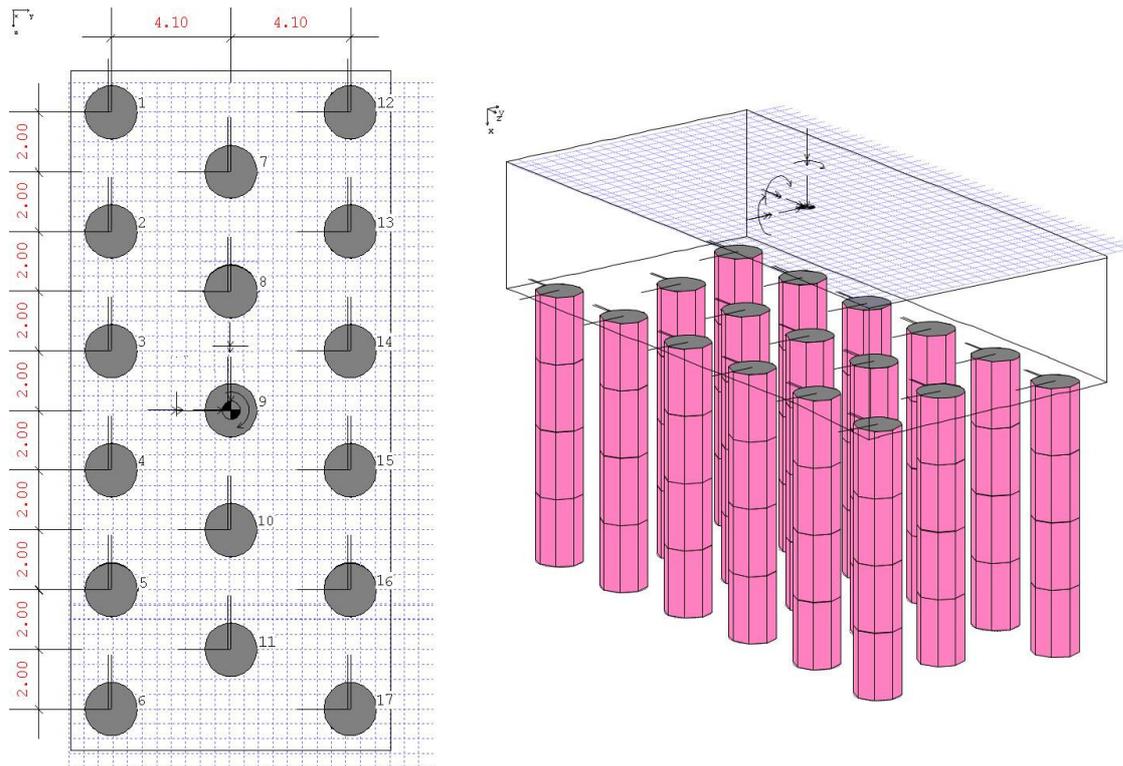
Das in Abb. 5c) dargestellte Finite-Elemente-Kontinuumsmodell ermöglicht grundsätzlich eine realitätsnähere Berücksichtigung der Bauwerk-Baugrund-Interaktion. Maßgeblich für eine realitätsnahe Berechnung der Gründung ist jedoch das verwendete, nichtlineare Stoffmodell für den Baugrund mit entsprechend zutreffend ermittelten und abgesicherten Stoffmodellparametern.

In den folgenden beiden Kapiteln wird die Anwendung der o.g. drei Berechnungsverfahren am Beispiel einer Pfahlgruppe mit 17 Bohrpfählen beschrieben.

## **3 Konventionelle Bemessung**

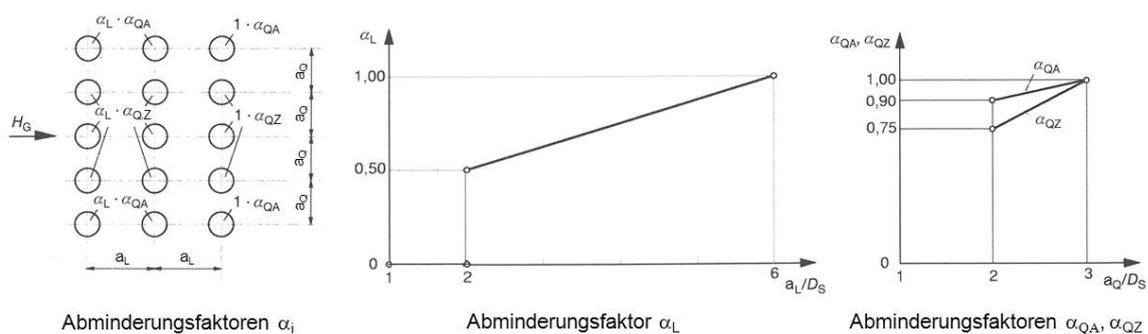
### **3.1 Stabwerkmodell mit gebetteten Pfählen und ideal starrer Fundamentplatte**

Die Abbn. 6 und 8 zeigen die Geometrie der Pfahlkopfplatte und der Pfähle mit den maßgeblichen Abmessungen. In dem Finite-Elemente-Modell der Abb. 8 sind zusätzlich die Bodenschichten und der Grundwasserstand dargestellt.



**Abb. 6:** Geometrie der Pfahlkopfplatte und der Pfähle

Für die Anwendung des „Stabwerkmodells mit gebetteten Pfählen und ideal starrer Fundamentplatte“ wurden zunächst die seitlichen Bettungen im Sinne von Einzelpfählen nach (6) bestimmt. Zur Berücksichtigung der Gruppenwirkung bei Belastung quer zur Achse kann die empirische Abminderung nach EA-Pfähle (2012) verwendet werden. Abb. 7 gibt einen Überblick über die Bestimmung der Abminderungsfaktoren in Abhängigkeit von der Pfahlanordnung und der Lage des jeweils betrachteten Pfahls innerhalb der Gruppe.



**Abb. 7:** Grafische Ermittlung der Abminderungsfaktoren nach EA-Pfähle

Die in der EA-Pfähle zugrunde gelegte Pfahlanordnung berücksichtigt keine versetzte Anordnung der Pfahlreihen quer zur hauptsächlichlichen Horizontalbeanspruchung. Für die hier betrachtete Pfahlgründung wurde eine solche Anordnung der mittleren Pfahlreihe „auf Lücke“ vorgenommen, um die Verminderung der seitlichen Stützung der im „Schatten“ der Frontreihe liegenden nachfolgenden Pfahlreihen zu minimieren. Deswegen führt die Anwendung der Abminderungsfaktoren

ren gemäß EA-Pfähle zu einer zu starken Abminderung der Bettung. Die nach EA-Pfähle ermittelten Abminderungsfaktoren sind in Abb. 13 links dargestellt.

Für die Bemessung der Pfahlgründung mit dem „Stabwerkmodell mit gebetteten Pfählen und ideal starrer Fundamentplatte“ wurde wie folgt vorgegangen:

1. Vorgabe von charakteristischen und repräsentativen Gründungslasten nach Tragwerksplanung für die maßgebenden Bemessungssituationen
2. Berücksichtigung des auf die Kopfplatte wirkenden Erdruhedrucks durch Abminderung der charakteristischen Horizontallasten
3. Bestimmung der Bettungsmoduln nach Baugrundgutachten und in Abhängigkeit von der Pfahlgeometrie
4. Abminderung der Bettung nach EA-Pfähle, Abschn. 8.2.3
5. Berechnung der Bemessungsschnittgrößen in den Pfählen
6. Stahlbetonbemessung für die Pfähle

### **3.2 Stab-Platte-Modell mit gebetteten Pfählen und gebetteter Fundamentplatte**

Das „Stab-Platte-Modell mit gebetteten Pfählen und gebetteter Fundamentplatte“ hat gegenüber dem in 3.1 erläuterten Modell den Vorteil, dass zusätzlich die Fundamentplatte horizontal und vertikal gebettet ist. Jedoch ist es schwierig, die Bettungsmoduln für die Kopfplatte im richtigen Verhältnis zur Pfahlbettung anzusetzen. Die auf die Kopfplatte wirkenden seitlichen Erddruckspannungen bzw. Erddruckkräfte sollten unter Last den Erdruhedruck nicht wesentlich überschreiten.

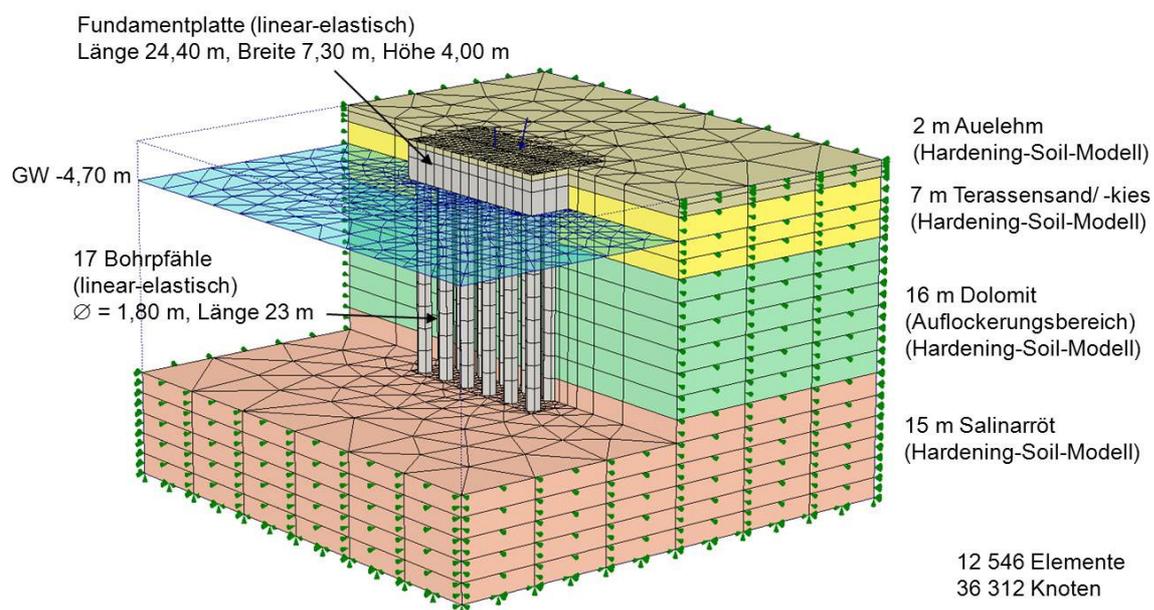
Für die Bemessung der Pfahlgründung mit dem „Stab-Platte-Modell mit gebetteten Pfählen und gebetteter Fundamentplatte“ wurde wie folgt vorgegangen:

1. Vorgabe von charakteristischen und repräsentativen Gründungslasten nach Tragwerksplanung für die maßgebenden Bemessungssituationen
2. Bestimmung der Bettungsmoduln für Pfähle und Pfahlkopfplatte nach Baugrundgutachten und in Abhängigkeit von der Pfahlgeometrie bzw. Pfahlplattengeometrie
3. Abminderung der Bettung nach EA-Pfähle, Abschn. 8.2.3
4. Berechnung der Bemessungsschnittgrößen in den Pfählen in der Pfahlkopfplatte
5. Stahlbetonbemessung für die Pfähle und Pfahlkopfplatte

## 4 Bemessung anhand dreidimensionaler Finite-Elemente-Berechnungen

### 4.1 Finite-Elemente-Modell, Berechnungsablauf und Ergebnisse

In Abb. 8 ist das 3D Finite-Elemente-Modell für die Pfahlgründung mit 17 Bohrpfählen dargestellt. Die Finite-Elemente-Berechnungen wurden mit dem Programm PLAXIS 3D Foundation, Version 2 durchgeführt.



**Abb. 8:** Finite-Elemente-Modell für die Pfahlgruppengründung mit Angaben zur Bauwerksgeometrie und zu den geotechnischen Verhältnissen

Zur möglichst realitätsnahen Erfassung des Spannungs-Verformungsverhaltens des Baugrunds wurde das elasto-plastische Hardening-Soil-Modell mit spannungsabhängiger und von der Belastungsrichtung abhängiger Steifigkeit verwendet (PLAXIS b.v. (2007)). Die Bestimmung der Parameter des Hardening-Soil-Modells stützte sich auf das Baugrundgutachten und auf vorhandene Erfahrungen.

Für die Stahlbetonbauteile wurde linear-elastisches Materialverhalten angenommen. Entlang der Pfahlmantelflächen und an den Seitenflächen der Kopfplatte wurden zur realitätsnahen Berücksichtigung des Interaktionsverhaltens Interface-Elemente angeordnet.

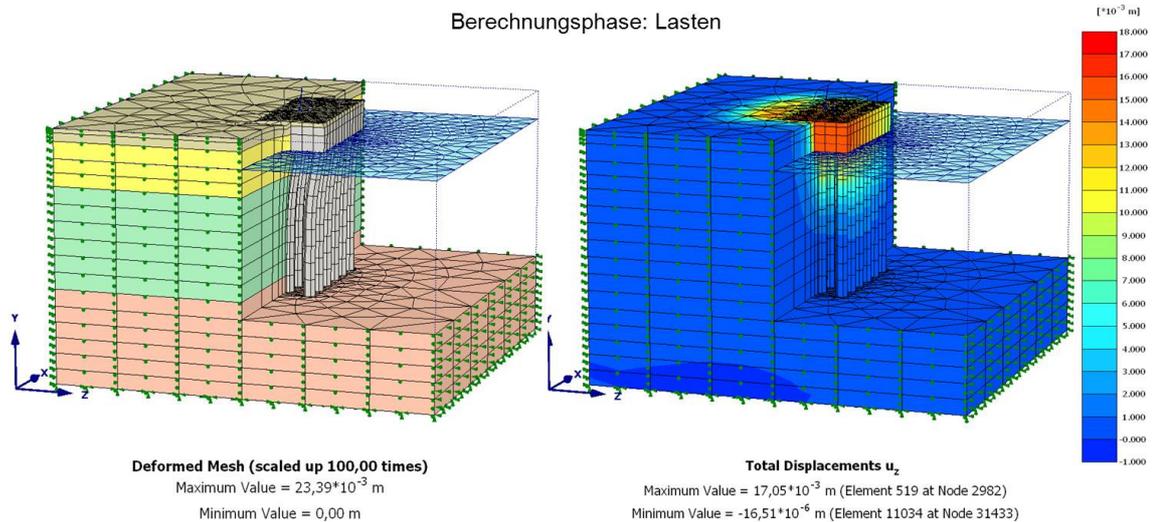
In Tabelle 1 sind die modellierten Berechnungsphasen und der Berechnungsablauf mit Anzahl der Berechnungsschritte dargestellt. Die Phasen „Aushub“ und

„Rückverfüllung“ wurden vereinfacht als vollflächiger Ab- und Auftrag anstatt Aushub und Verfüllung einer lokalen, geböschten Baugrube modelliert.

**Tab. 1:** Berechnungsphasen und Berechnungsablauf

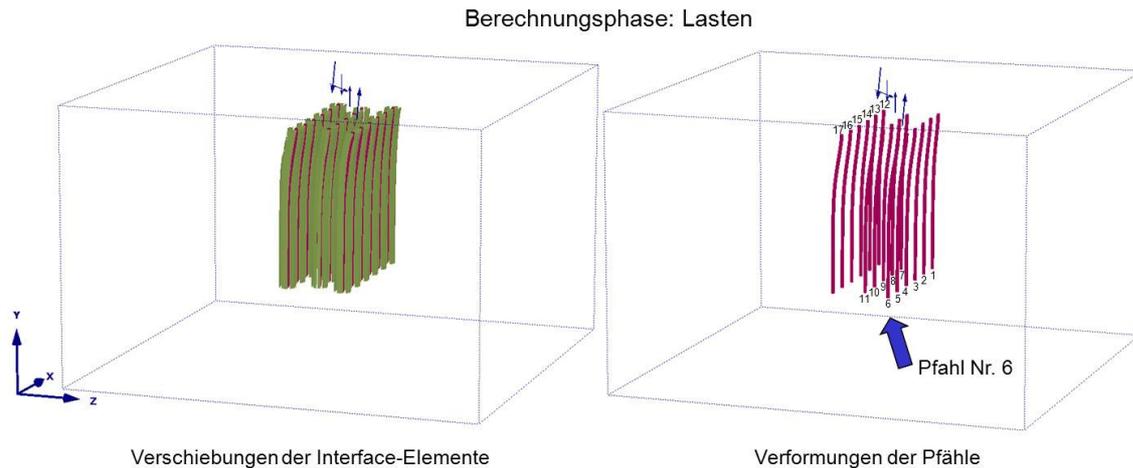
Identification	Phase No.	Start from	Calculation type	Loading input	First	Last
Initial Phase	0	N/A	Gravity loading	Stage construction	1	19
Aushub	1	0	Plastic	Stage construction	20	26
Einbau Pfähle	2	1	Plastic	Stage construction	27	27
Einbau Platte	3	2	Plastic	Stage construction	28	28
Rückverfüllung	4	3	Plastic	Stage construction	29	48
Lasten	5	4	Plastic	Stage construction	49	59

Als exemplarische Berechnungsergebnisse sind in Abb. 9 das verformte FE-Netz und die Horizontalverschiebungen infolge der Brückenlasten dargestellt. Die Verformungen im Kopfbereich der Pfähle liegen in der Größenordnung von ca. 2 cm und prägen die Schnittgrößen in den Pfählen und somit die innere Pfahlbemessungen maßgeblich.



**Abb. 9:** Verformtes FE-Netz und Horizontalverschiebungen infolge Lasten

In Ergänzung zu Abb. 9 werden in Abb. 10 die verformten Interface-Elemente und Pfahlachsen gezeigt. Anhand der Pfahlachsen können in PLAXIS 3D Foundation direkt die Schnittgrößen entnommen werden. Bei dem Berechnungsbeispiel haben sich im gekennzeichneten Pfahl Nr. 6 die maßgeblichen Schnittgrößen für die Stahlbetonbemessung ergeben.



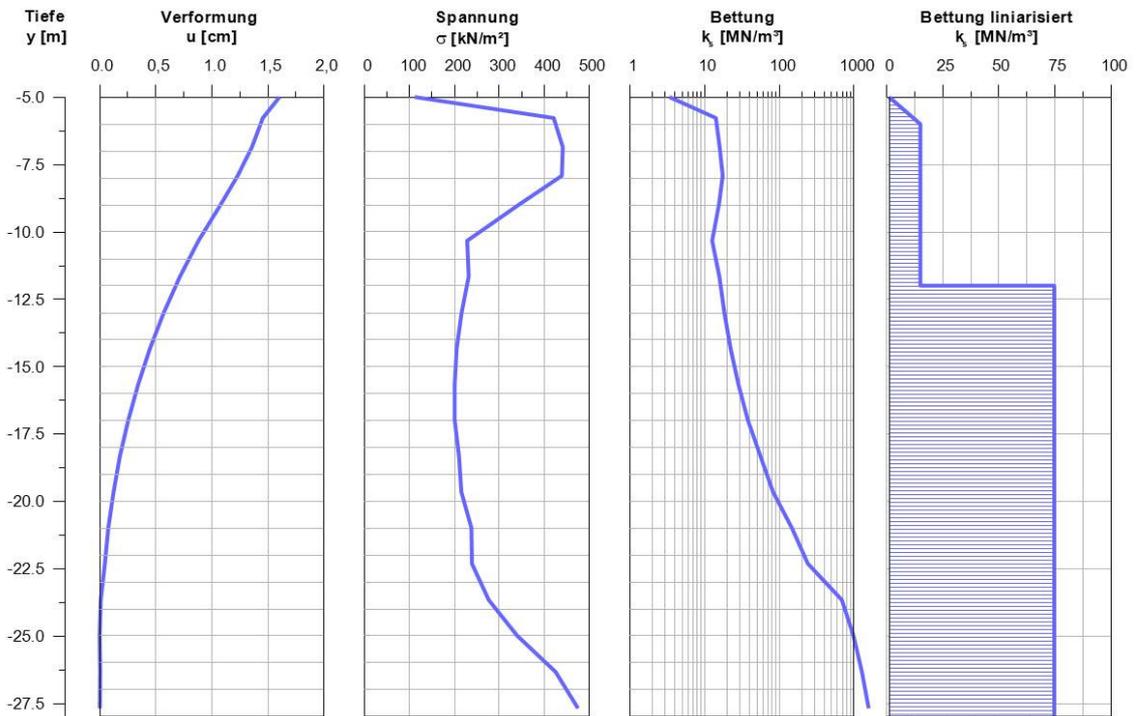
**Abb. 10:** Verformte Interface-Elemente und Pfahlachsen, Pfahl Nr. 6 mit den maßgeblichen Schnittgrößen

## 4.2 Ableitung von Bettungsmoduln

Ein effizienter Weg, realitätsnähere seitliche Bettungen als nach EA-Pfähle zu erhalten, besteht darin, die anhand der 3D-FE-Berechnung erhaltenen Verformungen eines Pfahls und die in gleicher Richtung wirkenden Interaktionsspannungen (Normalspannungen in den Interface-Elementen) zur Ableitung von Bettungsmoduln zu verwenden. In Abb. 11 ist diese Ableitung dargestellt. Es wird dabei in folgenden 3 Schritten vorgegangen:

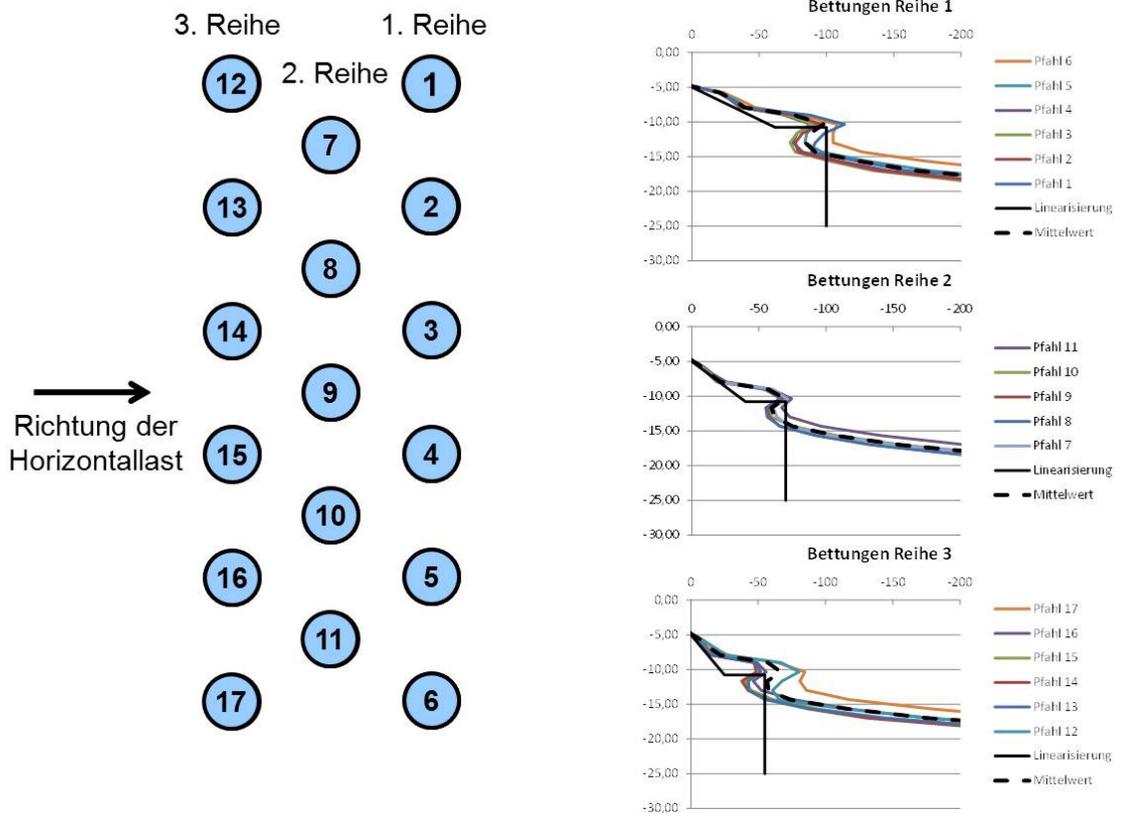
1. Übernahme der Horizontalverschiebungen der Pfahlachse und der in gleicher Richtung liegenden Interface-Normalspannungen infolge der Lasten einer maßgeblichen ständigen Bemessungssituation (BS-P) in eine separate Auswertungssoftware, wie z. B. Microsoft Excel
2. Berechnung der Bettung  $\sigma/u$  (Logarithmische Auftragung ist notwendig, da Bettungswerte infolge der sehr kleinen Pfahlverformungen im unteren Bereich sehr groß werden)
3. Linearisierung der Bettung im Sinne von konstanten oder linear mit der Tiefe zunehmenden Bettungsmoduln für eine Übernahme in Berechnungsmodelle mit Bettung (Bettungsmoduln  $k_{s,k} > 100 \text{ MN/m}^3$  nicht zweckmäßig)

Für jeden Pfahl der Gruppe lässt sich auf diese Weise ein individueller Bettungsverlauf ermitteln. In Abb. 12 sind diese Bettungen der Pfahlgruppe für charakteristische Lasten einer ausgewählten ständigen Bemessungssituation dargestellt. Die Bettungsverläufe aus der FE-Berechnung wurden den angegebenen 3 Pfahlreihen zugeordnet. In diesen Plots sind Bettungsverläufe sehr ähnlich und können ausreichend genau durch einen mittleren Bettungsverlauf repräsentiert werden. Es zeigt sich, dass die Bettungen umso kleiner werden je weiter hinten die Pfahlreihe liegt. Weiterhin zeigt Abb. 12, dass für jede Pfahlreihe eine gemeinsame Linearisierung ausreichend ist.



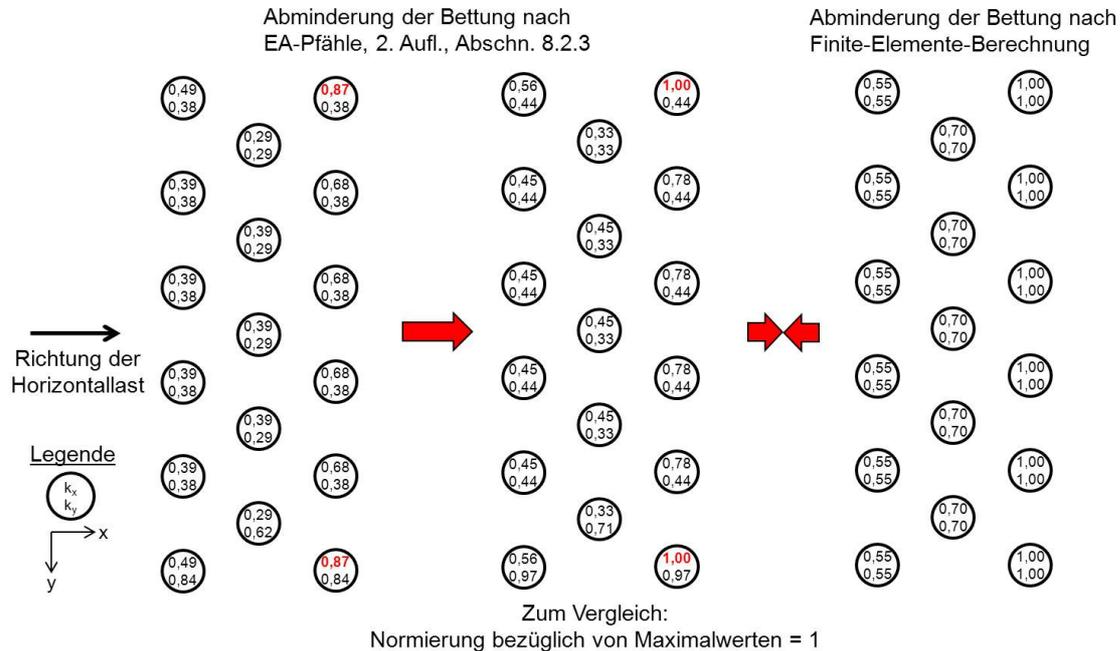
Ableitung der Bettung für Pfahl Nr. 6

**Abb. 11:** Berechnung der Bettung aus Ergebnissen der 3D FE-Berechnung und anschließende Linearisierung



**Abb. 12:** Zuordnung der Bettungsverläufe aus der FE-Berechnung für die 17 Pfähle in die 3 Pfahlreihen und Ableitung 3 linearisierter Bettungen

Wie Fallstudien ergeben haben, genügt es, eine maßgebende ständige Bemessungssituation (BS-P) auszuwerten.



**Abb. 13:** Vergleich der anhand der 3D FE-Berechnungen abgeleiteten Bettungen mit Bettungen nach EA-Pfählen als Abminderungsfaktoren

In Abb. 13 werden die anhand der 3D FE-Berechnungen abgeleiteten Bettungen mit den Bettungen nach EA-Pfählen im Sinne von Abminderungsfaktoren verglichen. Für den Vergleich ist es zweckmäßig, folgende Normierungen vorzunehmen:

- Bettung nach EA-Pfählen: Die Abminderungsfaktoren werden mit dem Faktor  $1/0,87$  multipliziert, so dass sich Größtwerte von 1,00 ergeben.
- Abgeleitete Bettung anhand der 3D FE-Berechnung: Die mittleren Bettungswerte der beiden hinteren Pfahlreihen (2. und 3. Reihe) werden durch die mittleren Bettungswerte der Frontreihe dividiert.

Der Vergleich zeigt, dass die Abminderung der Bettung, die anhand von der 3D FE-Berechnung abgeleitet wurde, geringer als die Abminderung nach dem empirischen Ansatz der EA-Pfählen ist.

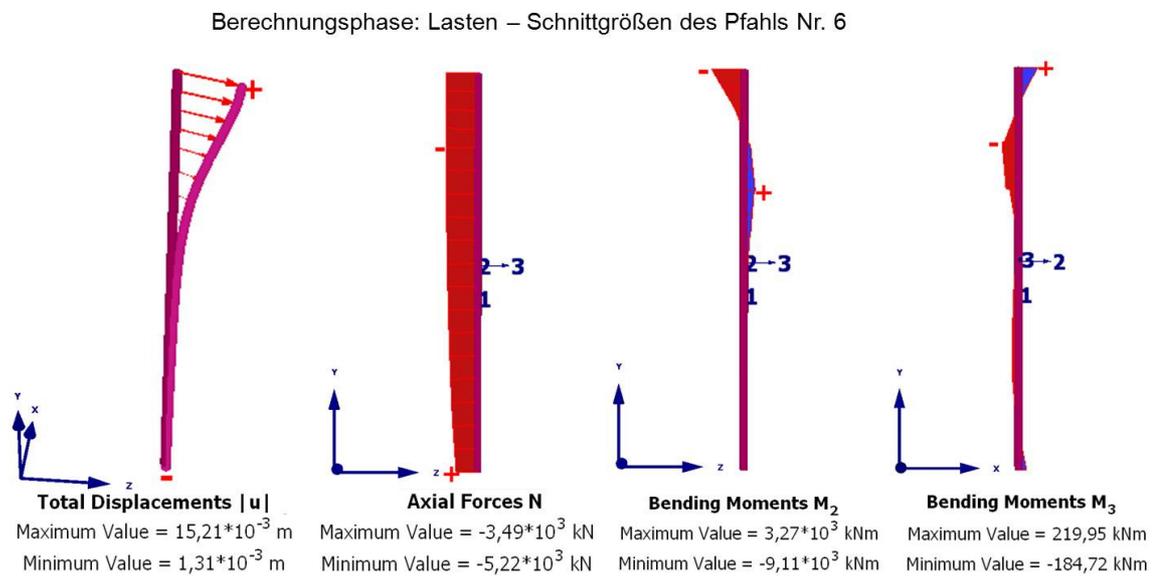
Für den Fall, dass Horizontalbeanspruchungen in beiden Richtungen angreifen, ist nach EA-Pfählen die Abminderung der Bettung in beide Richtungen vorzunehmen. Da bei dem vorliegenden Beispiel in y-Richtung 6 bzw. 7 Pfähle hintereinander liegen, ergeben sich in dieser Richtung kleinere Abminderungsfaktoren als in x-Richtung. Jedoch verhält sich in y-Richtung die Pfahlgründung wegen der 6 bzw. 7 hintereinander liegenden Pfahlreihen viel steifer als in x-Richtung. Die Abminderung der Bettung in y-Richtung ist nur dann sinnvoll, wenn die Bet-

tung in y-Richtung auch im Pfahlkopfbereich viel größer als in x-Richtung angesetzt wird. Hierfür gibt es jedoch keine Regelungen oder empirische Ansätze.

Anhand der 3D FE-Berechnung wurden in y-Richtung sehr kleine Pfahlverformungen und somit große Bettungen von  $k_{s,k} > 200 \text{ MN/m}^3$  ermittelt. Abminderungen so großer Bettungen sind nicht mehr bemessungsrelevant.

### 4.3 Verwendung der Schnittgrößen aus der Finite-Elemente-Berechnung für die Bemessung

Prinzipiell können für die Stahlbetonbemessung die Pfahlschnittgrößen unmittelbar aus 3D FE-Berechnungen übernommen werden (siehe Abb. 14).



**Abb. 14:** Verformungen und charakteristische Schnittgrößen des Pfahls Nr. 6

Dabei ist Folgendes zu beachten:

- Die FE-Berechnungen sind gemäß Handbuch EC 7-1 (2011) mit Gründungsbeanspruchungen, bestehend aus charakteristischen ständigen Anteil  $E_{G,k}$  und repräsentativen veränderlichen Anteil  $E_{Q,rep}$ , für die maßgeblichen Bemessungssituationen und für die Bemessungssituation „ständige Lasten“ durchzuführen.
- Es ist keine Superposition möglich, da die FE-Berechnungen nichtlinear sind.
- Zur Ermittlung der Bemessungswerte der Schnittgrößen  $V_d$ ,  $H_d$ , und  $M_d$  müssen die Schnittgrößen getrennt nach ständigen Anteil ( $V_{G,k}$ ,  $H_{G,k}$ ,  $M_{G,k}$ ) und veränderlichen Anteil ( $V_{Q,rep}$ ,  $H_{Q,rep}$ ,  $M_{Q,rep}$ ) vorliegen. Hierzu ist wie folgt vorzugehen:
 
$$V_{Q,rep} = V_{(Gk+Q,rep)} - V_{G,k}, \quad H_{Q,rep} = H_{(Gk+Q,rep)} - H_{G,k},$$

$$M_{Q,rep} = M_{(Gk+Q,rep)} - M_{G,k}.$$

Es ist weiterhin zu beachten, dass die Ermittlung der maßgebenden Bemessungsschnittgrößen sehr aufwendig werden kann, sofern die verwendete Software die Prozeduren für die Ermittlung der maßgeblichen Bemessungsschnittgrößen enthält.

Bei einer Übernahme von Schnittgrößen aus FE-Berechnungen ergeben sich in vielen Fällen kleine maßgebliche Bemessungsschnittgrößen und somit Einsparungen von Bewehrungsstahl. Das Übernahmeprinzip sollte jedoch nicht nur auf die Pfähle sondern auch auf die Kopfplatte angewendet werden.

## 5 Schlussbemerkungen

In dem Beitrag wurde ein Überblick über die Möglichkeiten gegeben, wie horizontalbeanspruchte Pfahlgruppengründungen einerseits nach dem gegenwärtigen Stand der Technik und andererseits unter Verwendung der FEM berechnet und bemessen werden können.

**Tab. 2:** Maximale Bemessungsschnittgrößen am Pfahlkopf

Berechnungsansätze und Vorgehensweise	Max. Schnittgrößen am Pfahlkopf		
	$V_d$ [kN]	$H_d$ [kN]	$M_d$ [kNm]
Bettungsabminderung nach EA-Pfähle Schnittgrößen aus Stabwerkmodell mit gebetteten Pfählen und ideal starrer Fundamentplatte	17.427	5.711	17.866
Bettungsabminderung nach 3D-FE-Berechnung Schnittgrößen aus Stabwerkmodell mit gebetteten Pfählen und ideal starrer Fundamentplatte	17.074	4.771	14.564
1,25-fache Schnittgrößen aus dreidimensionaler 3D-Finite-Elemente-Berechnung	15.068	4.429	9.052

In Tabelle 2 sind für das vorliegende Gründungsbeispiel die maximalen Bemessungsschnittgrößen am Pfahlkopf nach drei verschiedenen Vorgehensweisen zusammengestellt. Es zeigt sich, je mehr sich die Vorgehensweise auf die FEM stützt, umso geringer werden die Bemessungsschnittgrößen, insbesondere das bemessungsrelevante Biegemoment.

Die in Tabelle 2 angegebenen Schnittgrößen aus dreidimensionaler FE-Berechnung sind auf das 1,25-fache erhöhte Werte. Die Schnittgrößen wurden deswegen erhöht, um eventuelle Unsicherheiten bei der Ermittlung der Materialparameter für das Hardening-Soil-Modell zu berücksichtigen.

In dem Beitrag konnte für eine horizontalbeanspruchte Pfahlgründung gezeigt werden, dass durch den Einsatz moderner numerischer Berechnungsverfahren, wie z. B. die FEM, einerseits die Baugrund-Bauwerk-Interaktion realitätsnäher erfasst werden kann und andererseits wirtschaftlichere Gründungskonstruktionen erzielt werden können.

## 6 Literaturverzeichnis

EA-Pfähle (2012)

Empfehlungen des Arbeitskreises „Pfähle“, 2. Aufl., Herausg. Von der Deutschen Gesellschaft für Geotechnik e.V. Verlag Ernst & Sohn

Handbuch EC 7-1 (2011)

Handbuch Eurocode 7, Geotechnische Bemessung, Band 1: Allgemeine Regelungen, Vom DIN autorisierte konsolidierte Fassung, 1. Aufl., Beuth Verlag GmbH

PLAXIS b.v. (2007)

PLAXIS 3D Foundation Version 2, Manual, Balkema

Rimane, Thomas (2012)

Der Bau der Eisenbahnüberführung Unstruttalbrücke, Bauportal, Jahrgang 124, Heft 5, 2 – 7

Schenkel, Marcus (2010)

Verkehrsprojekt Deutsche Einheit (VDE 8.2): Eisenbahn-Neubaustrecke Erfurt - Leipzig/Halle - Herausragende aktuelle Baumaßnahmen, Bauingenieur, Jahrgang 85

**Autor:**

Vorname, Name: Peter-Andreas von Wolffersdorff

Titel: Prof. Dr.-Ing. habil

Firma, Abteilung: BAUGRUND DRESDEN Ingenieurgesellschaft mbH

Adresse: Kleiststraße 10 a, 01129 Dresden, Deutschland

Tel: +49 (0) 351 8 24 13 50

Fax: +49 (0) 351 8 03 07 86

mail: info@baugrund-dresden.de

internet: www.baugrund-dresden.de

**Nicht Zutreffendes bitte löschen:**

Teilnahme: ja

Vortragender: ja