

Die Kombinierte Pfahl-Plattengründung (KPP) – eine innovative, kostenoptimierte Gründungstechnologie

Prof. Dr.-Ing. Rolf Katzenbach

Direktor des Institutes und der Versuchsanstalt für Geotechnik · TU Darmstadt

Dipl.-Ing. Steffen Leppla, Dipl.-Ing. Hendrik Ramm

Institut und der Versuchsanstalt für Geotechnik · TU Darmstadt

Prof. Dr.-Ing. Rolf Katzenbach
Technische Universität Darmstadt
Institut und Versuchsanstalt für Geotechnik
Petersenstraße 13
D-64287 Darmstadt

Telefon: 0 61 51 – 16 21 49
Telefax: 0 61 51 – 16 66 83
E-Mail: katzenbach@geotechnik.tu-darmstadt.de
Web: www.geotechnik.tu-darmstadt.de

1

Gliederung

Einführung

Einführung

Theoretische Grundlagen der KPP

Grundlagen

Sicherheitskonzept

Sicherheitskonzept

Beispiele aus der Ingenieurpraxis

Ingenieurpraxis

Zusammenfassung

Zusammenfassung

Gliederung

Einführung

Einführung

Theoretische Grundlagen der KPP

Grundlagen

Sicherheitskonzept

Sicherheitskonzept

Beispiele aus der Ingenieurpraxis

Ingenieurpraxis

Zusammenfassung

Zusammenfassung

Einführung

Grundlagen

Sicherheitskonzept

Ingenieurpraxis

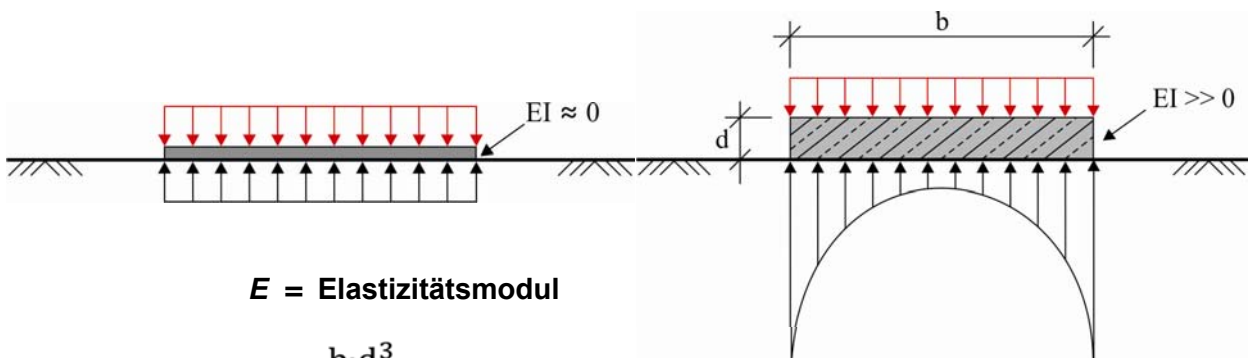
Zusammenfassung

3

Baugrund-Tragwerk-Interaktion

schlaffes Fundament

steifes Fundament



E = Elastizitätsmodul

$$I = \frac{b \cdot d^3}{12}$$

➔ Spannungsverteilung unter einem Fundament ist abhängig von der Steifigkeit der Konstruktion

Einführung

Grundlagen

Sicherheitskonzept

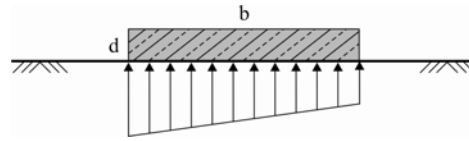
Ingenieurpraxis

Zusammenfassung

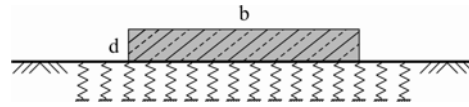
4

Modellierung der Baugrund-Tragwerk-Interaktion

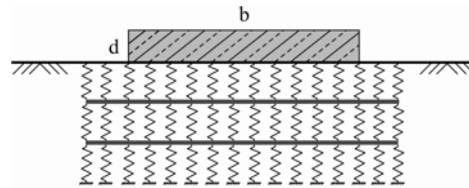
Spannungstrapezverfahren



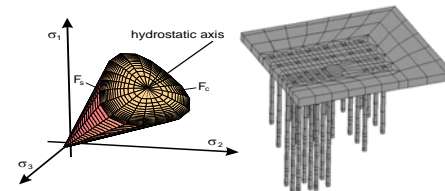
Bettungsmodulverfahren



Steifemodulverfahren



Numerische Verfahren

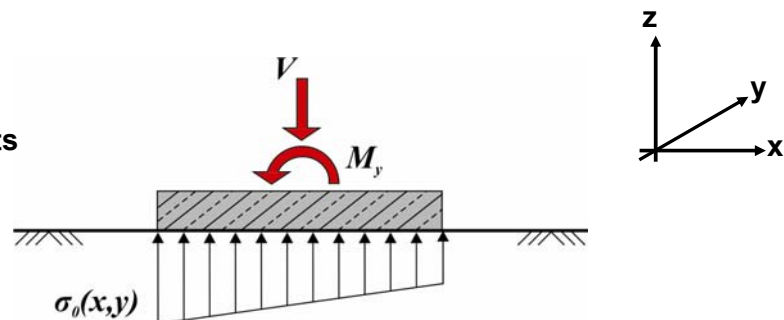


Verbesserung der Modellierung

Modellierung der Baugrund-Tragwerk-Interaktion

Spannungstrapezverfahren

- Geometrie des Fundaments



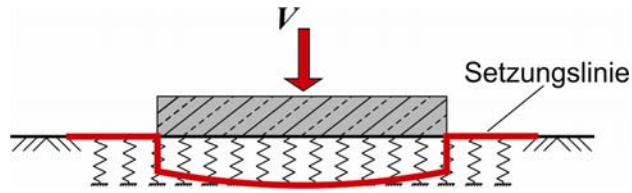
$$\sigma_0(x, y) = \frac{V}{A} + \frac{M_y}{I_y} \cdot x + \frac{M_x}{I_x} \cdot y$$

➔ Reaktion des Baugrunds (= Spannung σ_0) unter dem Fundament

Modellierung der Baugrund-Tragwerk-Interaktion

Bettungsmodulverfahren

- Geometrie des Fundaments
- Steifigkeit des Baugrunds unter dem Fundament



$$k_s(s) = \frac{\sigma_0}{s} = \frac{\sigma_0}{f \cdot \frac{b \cdot \sigma_0}{E_s}} = \frac{E_s}{f \cdot b}$$

Setzungskoeffizient

$$f = \int_{\frac{z_0}{b}}^{\frac{z}{b}} \frac{\sigma'_z}{\sigma_0} \cdot \frac{dz}{b}$$

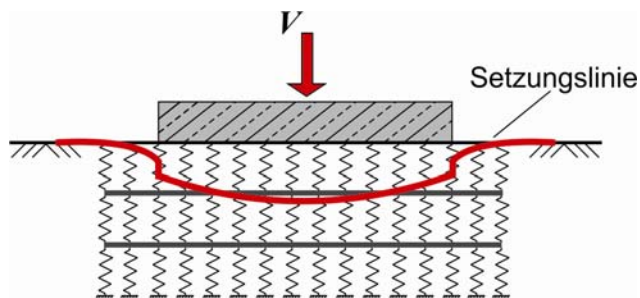
$$f \approx 0,5 \text{ bis } 0,9$$

➔ Federsteifigkeit k_s des Fundamentes

Modellierung der Baugrund-Tragwerk-Interaktion

Steifemodulverfahren

- Geometrie des Fundaments
- Steifigkeit des beeinflussten Baugrunds



$$y_n = (\sigma_{n-1} \cdot q_1 + \sigma_{n-2} \cdot q_2 + \dots + \sigma_0 \cdot q_n) \cdot \frac{a}{E_s}$$

σ_0 = Setzung im Bereich a_0

$\sigma_{1\dots n}$ = Setzung im Bereich $a_{1\dots n}$

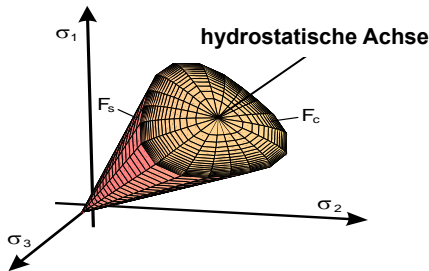
➔ Bestimmung der komplexen Interaktion zwischen den Federn:
Rechenmethoden erforderlich

Modellierung der Baugrund-Tragwerk-Interaktion

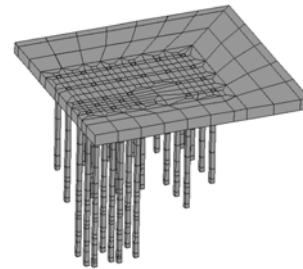
Numerische Verfahren

- Finite-Element-Methode (FEM)
- Finite-Differenzen-Methode (FDM)
- Rand-Element-Methode (REM)
- Gemischte (hybride) Methoden

Materialgesetze
(nicht linear und spannungsabhängig)

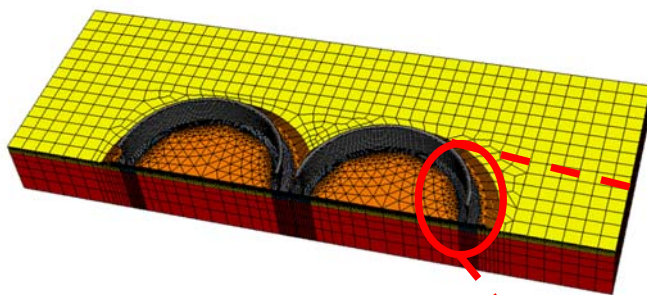


Geometrie
(3-dimensionales Model)



- Leistungssimulation der Gründung
- Numerische Optimierung der Gründung

Modellierung der Baugrund-Tragwerk-Interaktion

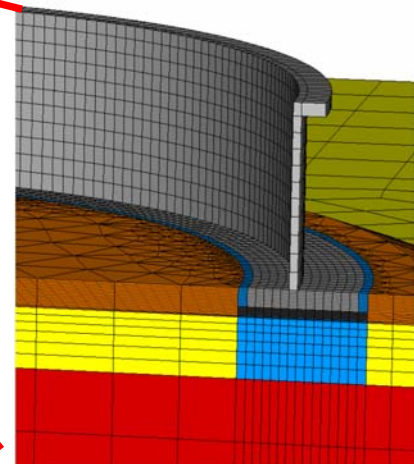


$$\sigma = [\sigma_{ij}] = \begin{bmatrix} \sigma_{11} & \sigma_{12} & \sigma_{13} \\ \sigma_{21} & \sigma_{22} & \sigma_{23} \\ \sigma_{31} & \sigma_{32} & \sigma_{33} \end{bmatrix}$$

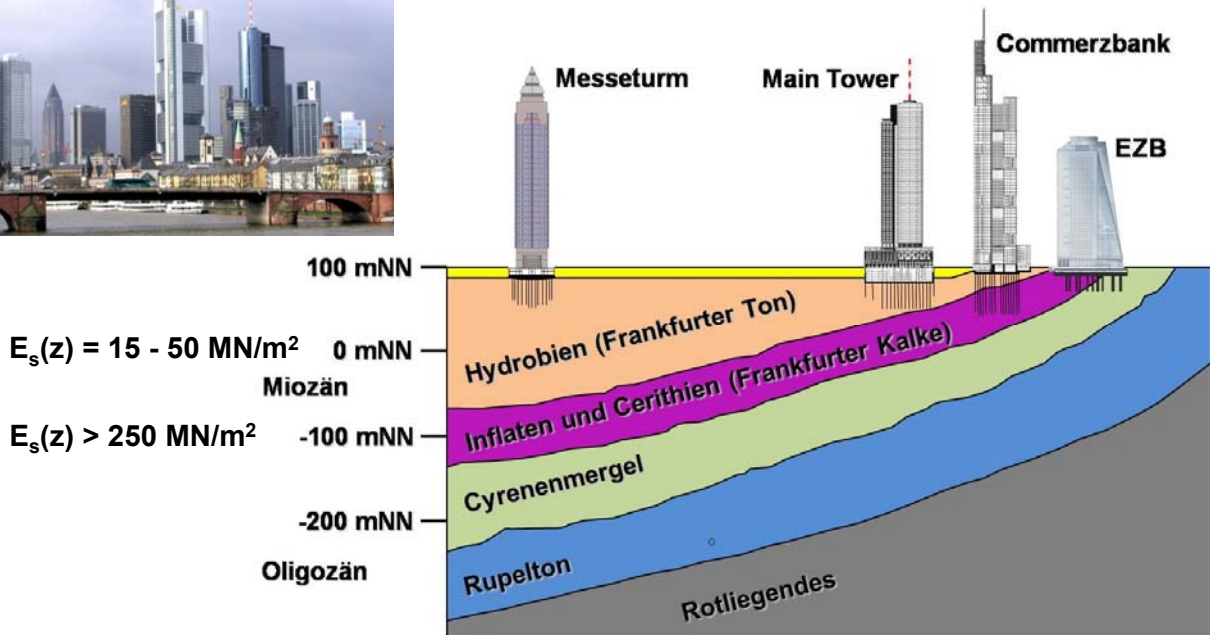
Finite-Element-Methode (FEM)

- Gründungsgeometrie
- Steifigkeit des beeinflussten Baugrunds
- Steifigkeit der aufgehenden Konstruktion
- Nichtlineares Materialverhalten

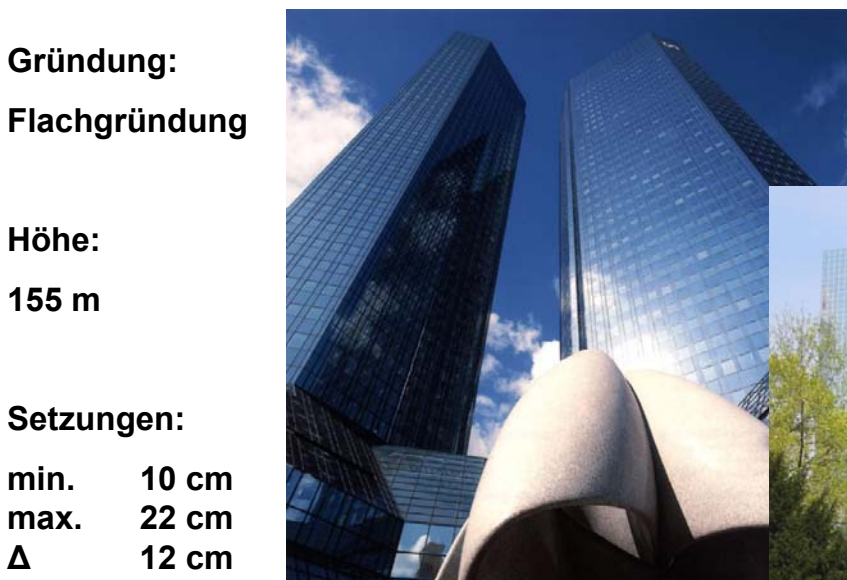
➔ Baugrund-Tragwerk-Interaktion



Baugrund in Frankfurt am Main



Deutsche Bank, Frankfurt am Main



Gründung:
Flachgründung

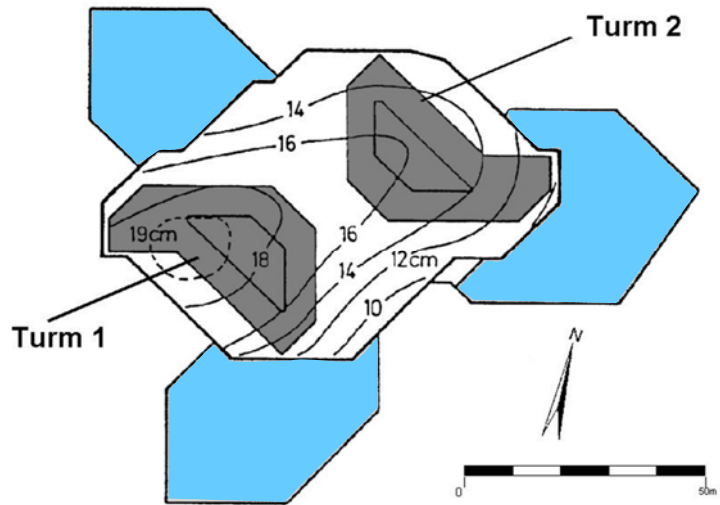
Höhe:
155 m

Setzungen:
min. 10 cm
max. 22 cm
 Δ 12 cm



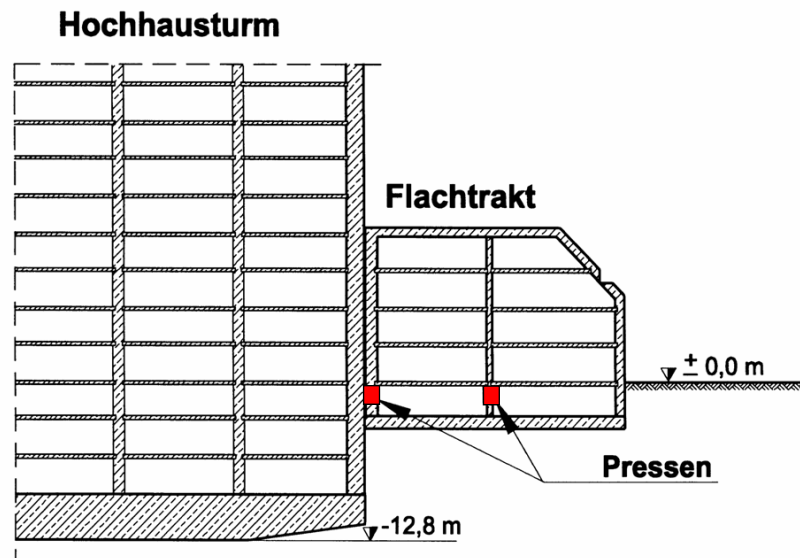
Deutsche Bank, Frankfurt am Main

Setzungsisolinelinien



Deutsche Bank, Frankfurt am Main

Ausgleichssystem an der Fuge zwischen Hochhaus und Flachtrakt



Deutsche Bank, Frankfurt am Main

Bautechnische Reaktion auf die Verkippung:

⇒ Bauen über dem Lotpunkt mit Lasernivellement

Hochhausform = „Bananenform“
Auslenkung ~ 6 cm bei den Doppeltürmen der Deutschen Bank

$$u_{\max} = \left(\frac{1}{2} + \frac{1}{n} \right) \cdot H \cdot \frac{\Delta s}{b}$$

mit n: Geschossanzahl
H: Gebäudehöhe [m]
Δs: Setzungsdifferenz [m]
b: Fundamentbreite [m]

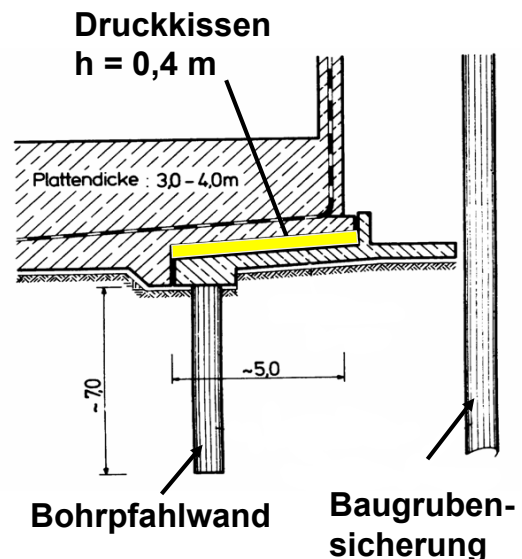


Altes Dresdner Bank Hochhaus, Frankfurt a. M.

Bauzeit: 1975-1978

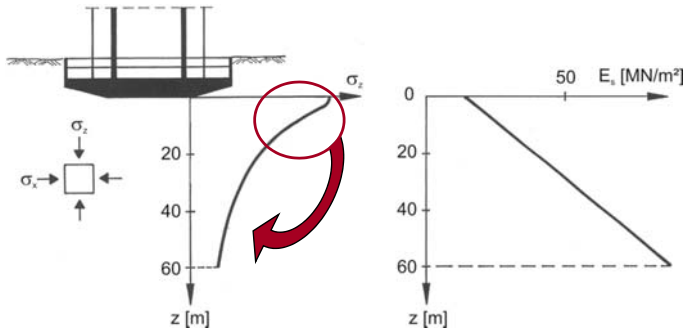
Gründung:
Flachgründung mit Druckkissen

Setzungen:
15 – 20 cm

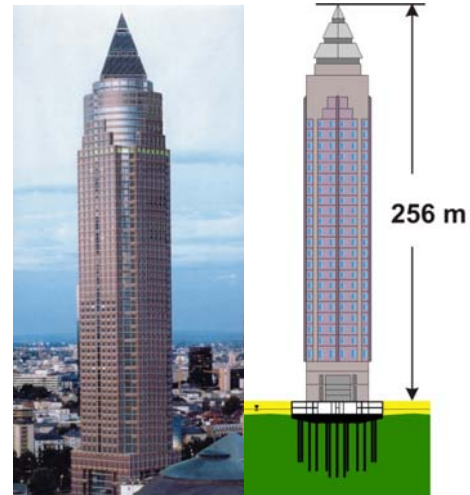


Messturm, Frankfurt am Main

Prognostizierte Setzung für Flachgründung :
 $s > 40 \text{ cm}$
 $z = 0 - 20 \text{ m} \Rightarrow 75 - 80 \%$



Setzungen:
$$s = \int_0^z \frac{\sigma(z)}{E_s(z)} dz$$



⇒ Kombinierte Pfahl-Plattengründung (KPP)

Gliederung

Einführung

Einführung

Theoretische Grundlagen der KPP

Grundlagen

Sicherheitskonzept

Sicherheitskonzept

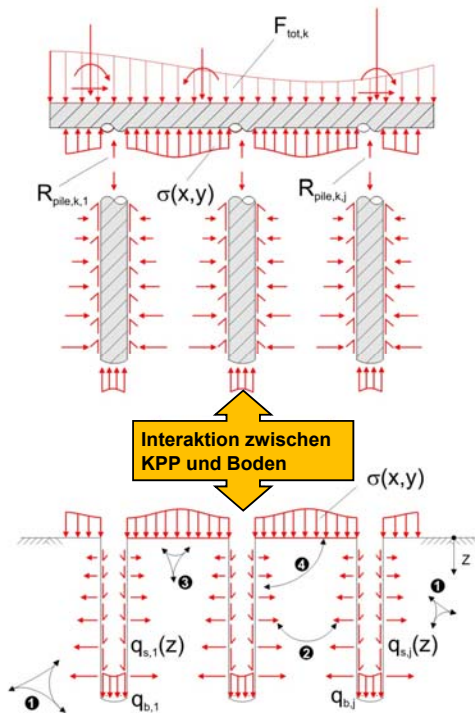
Beispiele aus der Ingenieurpraxis

Ingenieurpraxis

Zusammenfassung

Zusammenfassung

Tragfähigkeitskonzept einer KPP



Gesamtwiderstand der KPP:

$$R_{tot,k}(s) = \sum_{j=1}^m R_{pile,k,j}(s) + R_{raft,k}(s)$$

Widerstand Gründungspfahl:

$$R_{pile,k,j}(s) = R_{b,k,j}(s) + R_{s,k,j}(s)$$

Widerstand Fundamentplatte:

$$R_{raft,k}(s) = \iint \sigma(s, x, y) dx dy$$

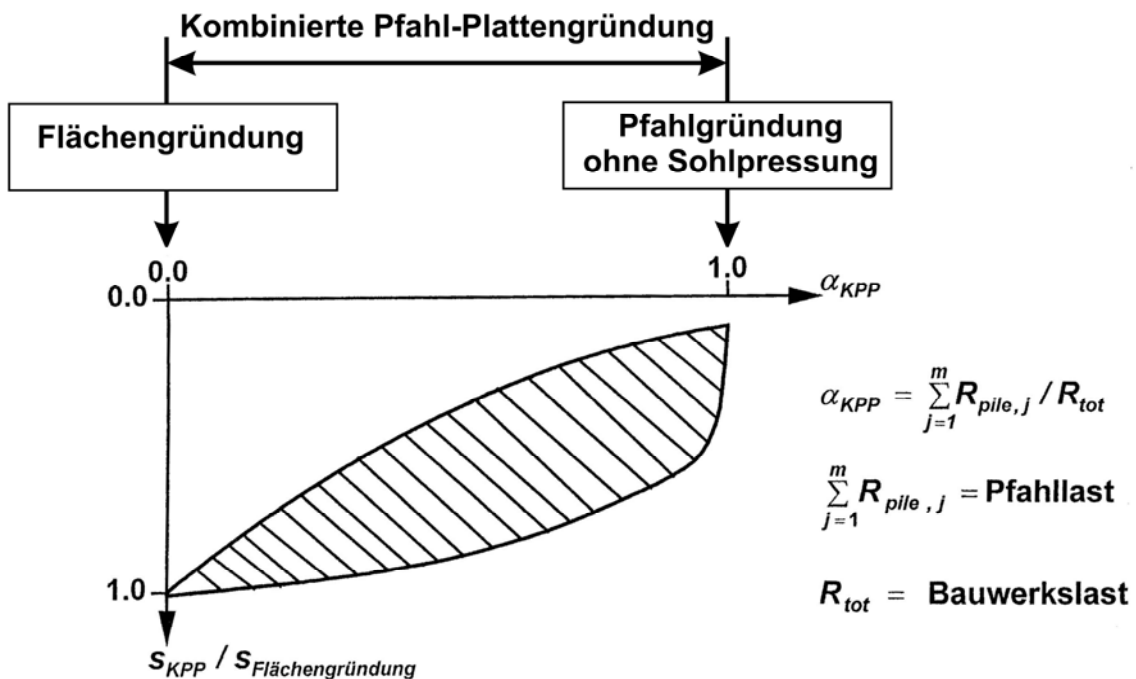
Interaktionen:

- ❶ Pfahl-Boden-Interaktion
- ❷ Pfahl-Pfahl-Interaktion
- ❸ Platte-Boden-Interaktion
- ❹ Pfahl-Platte-Interaktion

Pfahl-Plattenkoeffizient:

$$\alpha_{KPP} = \frac{\sum_{j=1}^m R_{pile,k,j}(s)}{R_{tot,k}(s)}$$

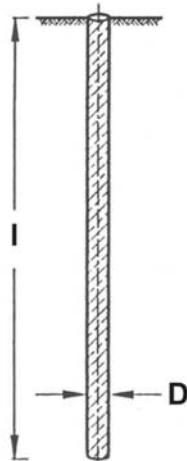
Tragfähigkeitskonzept einer KPP



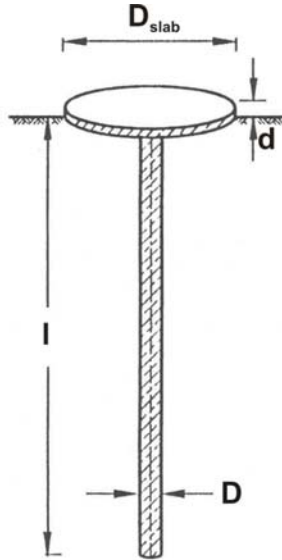
Numerische Grundsatzstudie zur KPP

2 Gründungsvarianten werden untersucht:

Einzelpfahl



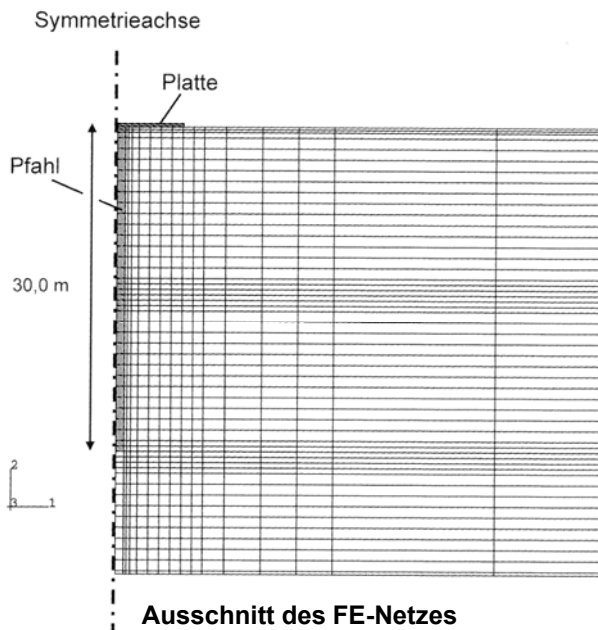
“1-Pfahl-KPP”



- $l = 30,0 \text{ m}$
- $D = 1,5 \text{ m}$
- $D_{\text{slab}} = 12,0 \text{ m}$
- $d = 1,0 \text{ m}$

Numerische Grundsatzstudie zur KPP

Numerische Diskretisierung der 1-Pfahl-KPP



Frankfurter Ton

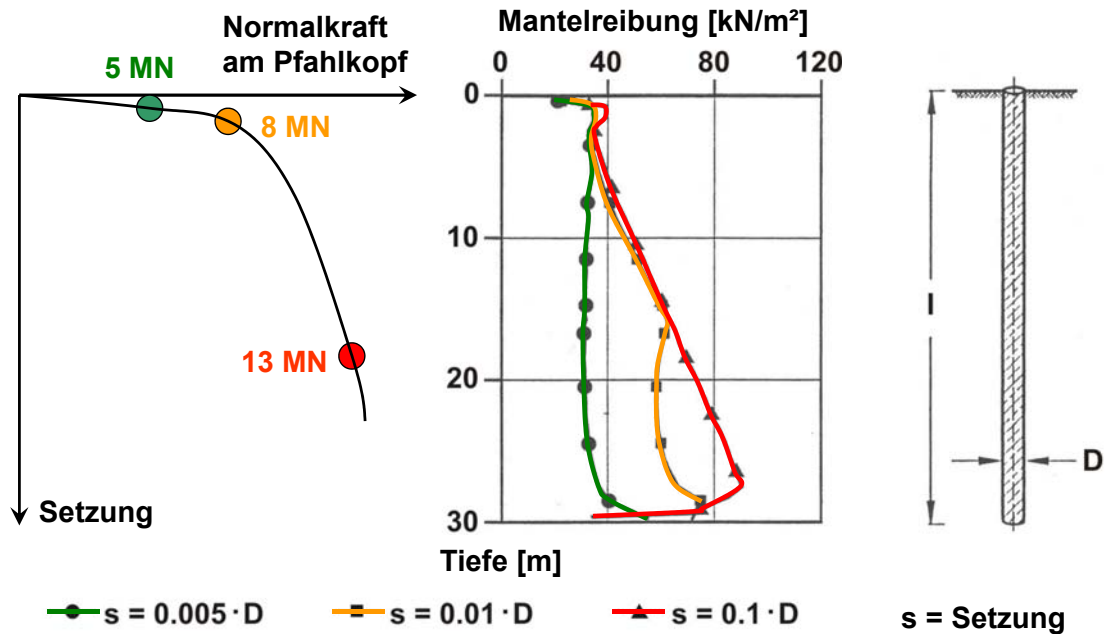
$$\varphi' = 20^\circ$$

$$c' = 20 \text{ kN/m}^2$$

$$E = 50.000 \text{ kN/m}^2$$

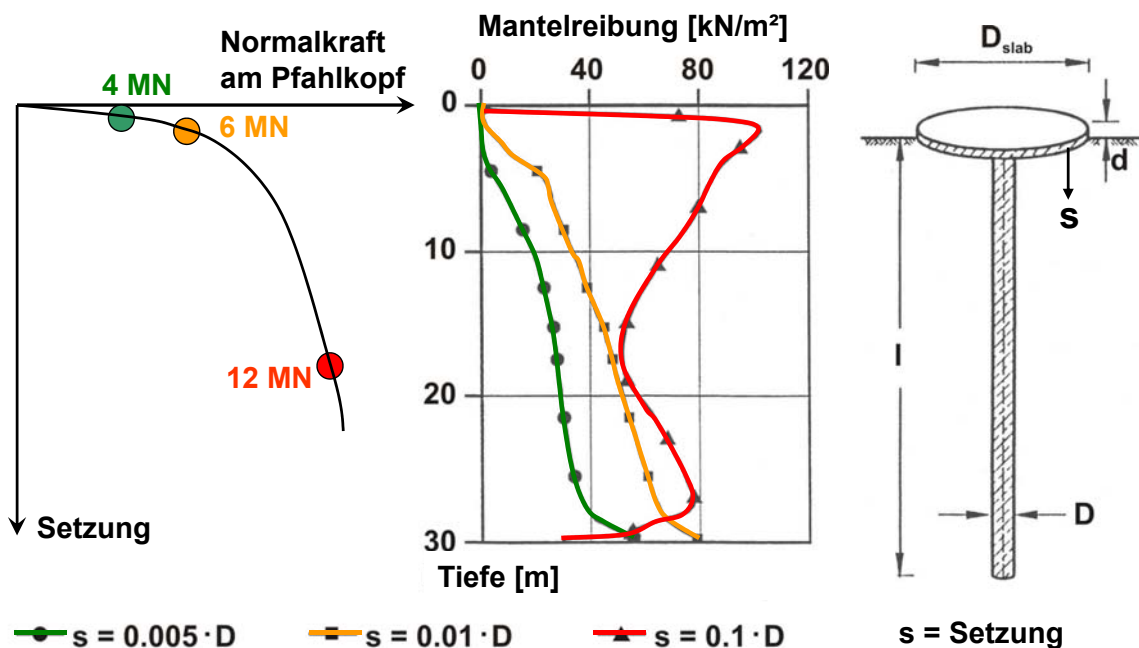
Numerische Grundsatzstudie zur KPP

Ergebnisse Einzelpfahl

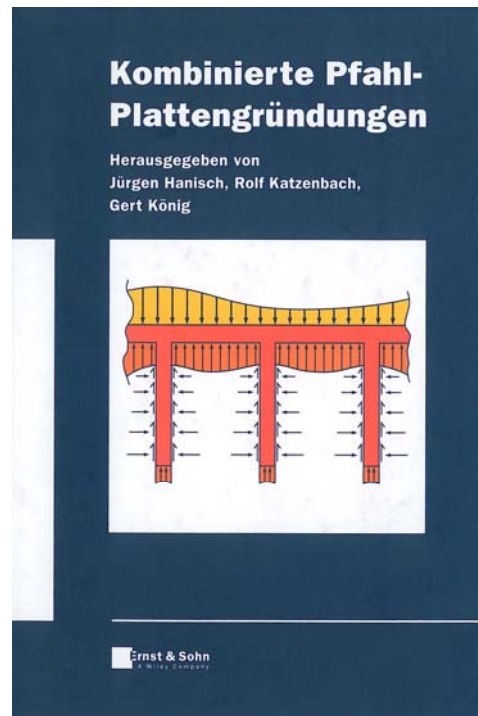


Numerische Grundsatzstudie zur KPP

Ergebnisse 1-Pfahl-KPP



KPP Richtlinie



Einführung

Grundlagen

Sicherheitskonzept

Ingenieurpraxis

Zusammenfassung

25

Gliederung

Einführung

Einführung

Theoretische Grundlagen der KPP

Grundlagen

Sicherheitskonzept

Sicherheitskonzept

Beispiele aus der Ingenieurpraxis

Ingenieurpraxis

Zusammenfassung

Zusammenfassung

Einführung

Grundlagen

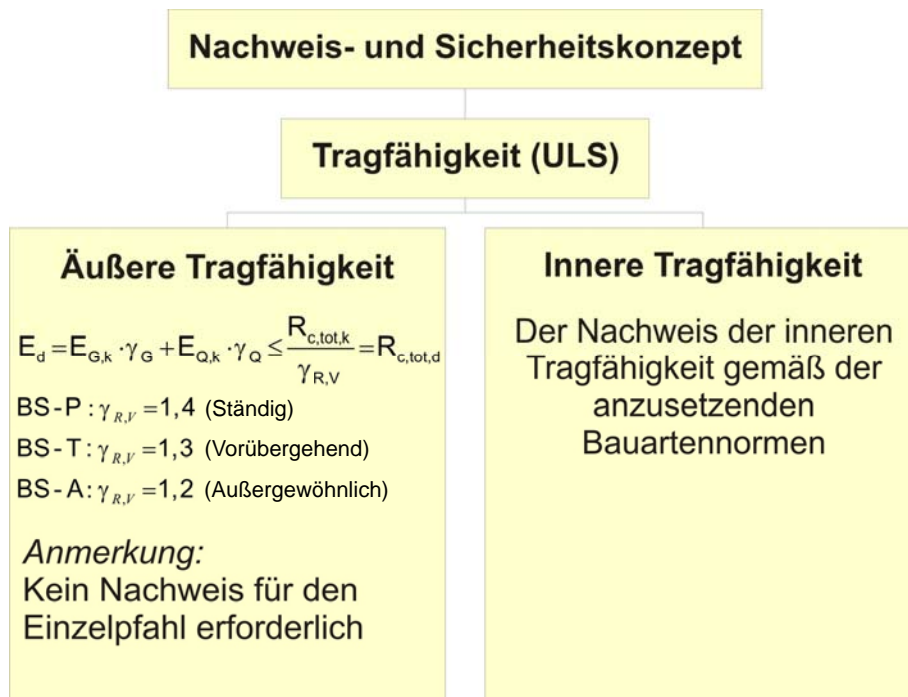
Sicherheitskonzept

Ingenieurpraxis

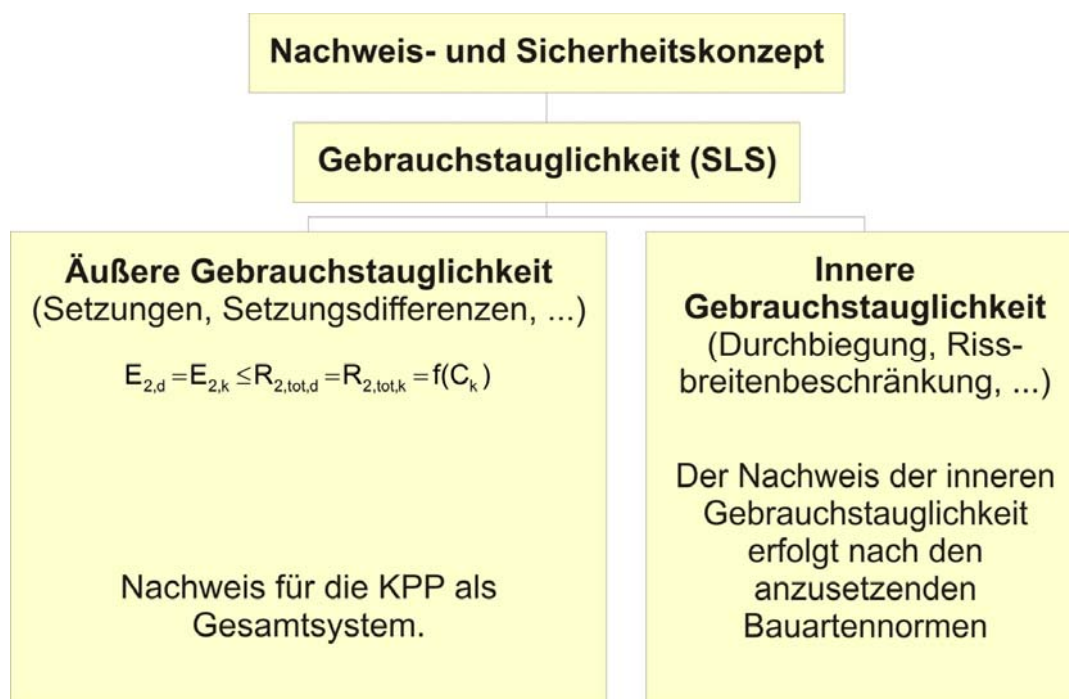
Zusammenfassung

26

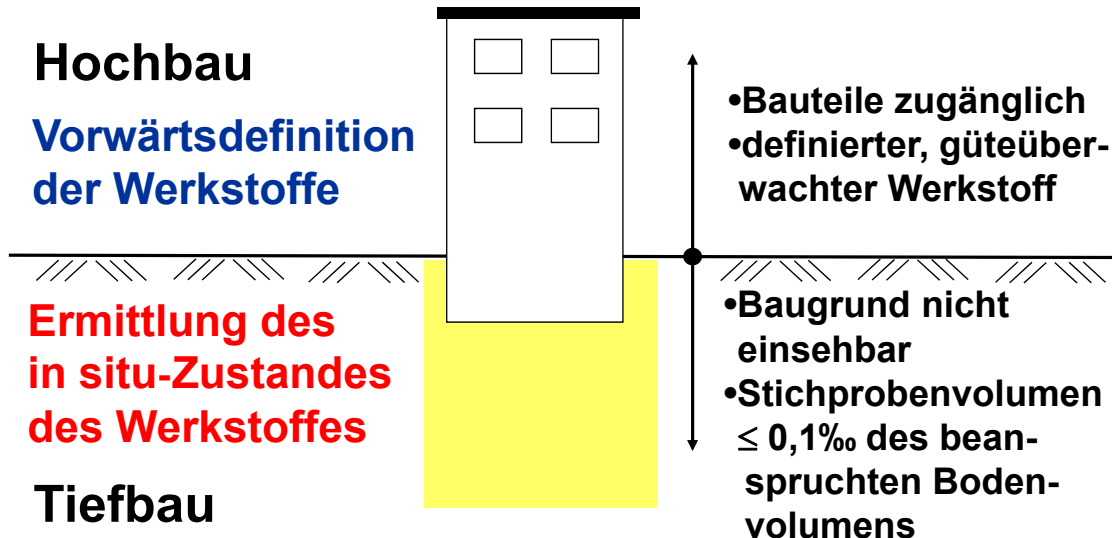
Nachweis der Tragfähigkeit • ULS



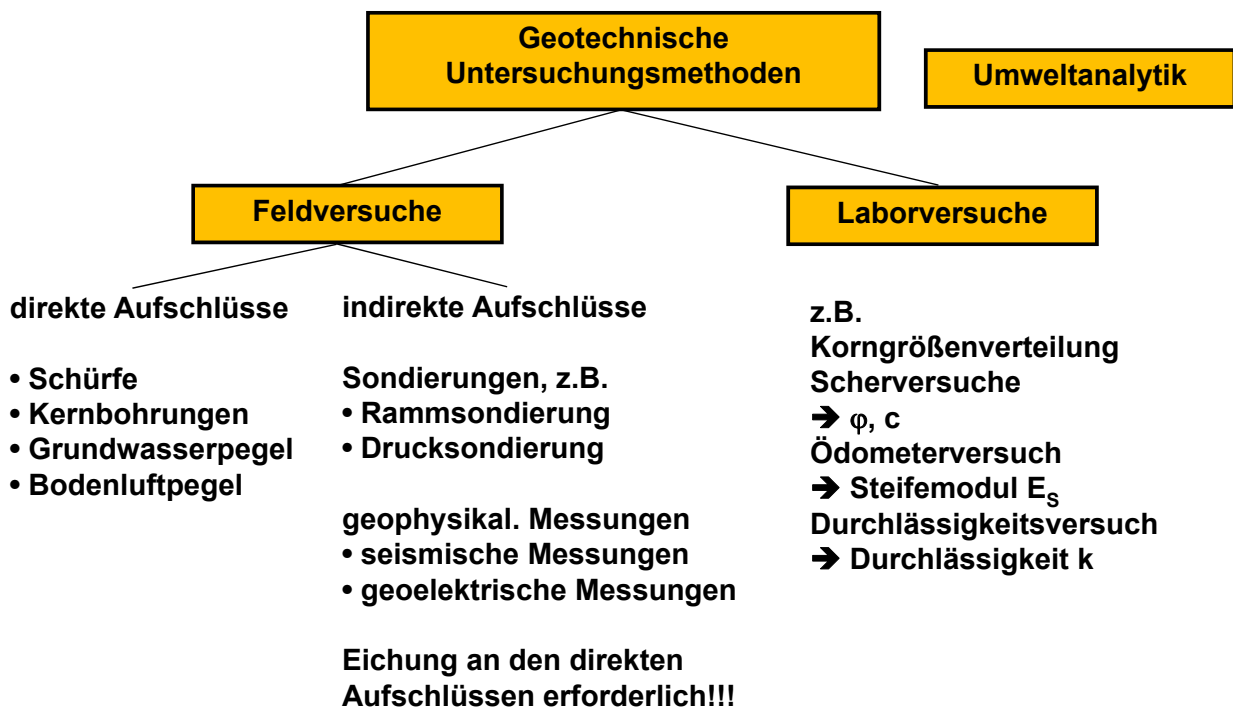
Nachweis der Gebrauchstauglichkeit • SLS



Baugrunderkundung



Erkundungsverfahren



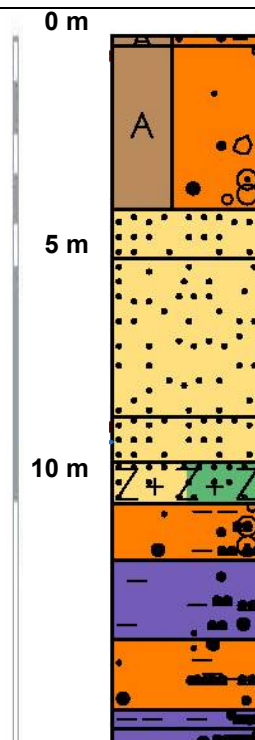
Erkundungsverfahren: Bohrung



Kernbohrung



Erkundungsverfahren: Bohrung



Abstände der Aufschlüsse

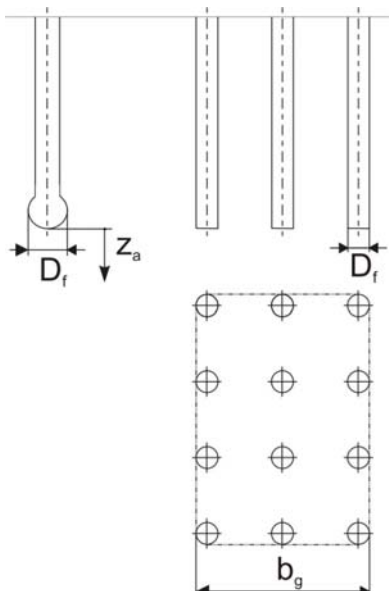
Bauwerkstyp	Abstände bzw. Anordnungen
Hoch- und Industriebauten	Rasterabstand von 20 m bis 40 m
Großflächige Bauwerke (z.B. Deponien)	Rasterabstand nicht mehr als 60 m
Linienbauwerke (z.B. Verkehrswege)	Abstand von 50 m bis 200 m
Sonderbauwerke (z.B. Brücken, Schornsteine)	2 bis 4 Aufschlüsse je Fundament
Lang gestreckte Stau Mauern, Staudämme, Wehre	Abstände von 25 m bis 75 m
Lang gestreckte Schlitz- und Dichtwände	Abstände von 25 m bis 50 m

Allgemein:

- **Schwierige Baugrundverhältnisse = geringe Abstände**
- **Gleichförmige Baugrundverhältnisse = größere Abstände**

Erkundungstiefe

Aufschlusstiefe z_a für Pfähle und Pfahlgruppen



$$z_a \geq 4,0 \text{ m}$$

$$z_a \geq 3 \cdot D_f$$

⇒ entspricht dem vom Pfahl beeinflussten Bereich

Gruppenwirkung:

$$z_a \geq 1,5 \cdot b_g$$

⇒ analog Plattengründung

Pfahlwiderstände

Bestimmung der axialen Pfahlwiderstände:

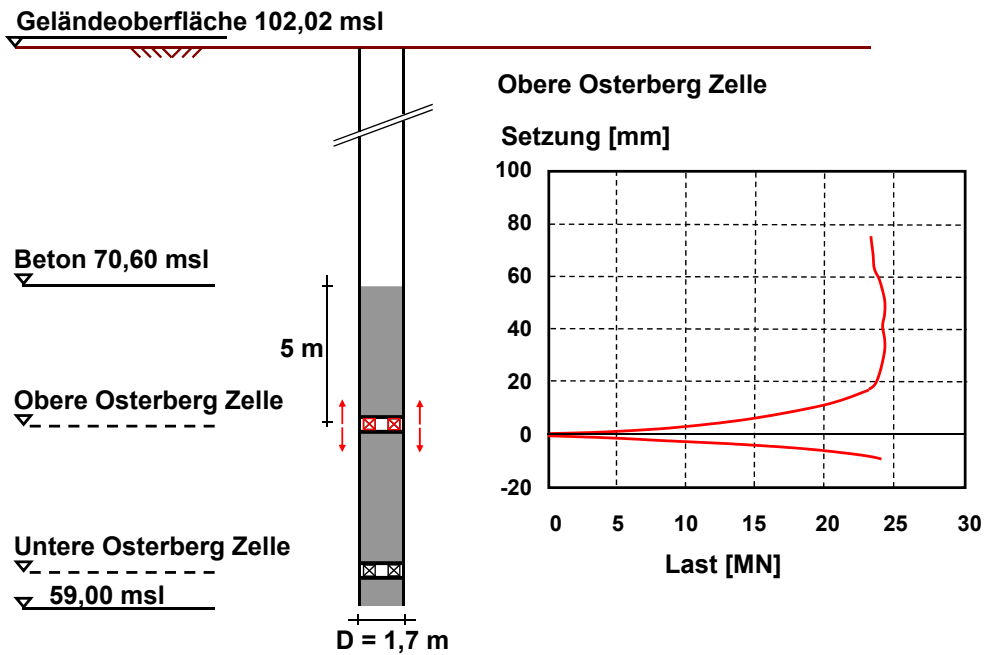
- statische Probelastungen
- dynamische Probelastungen
- Erfahrungswerte



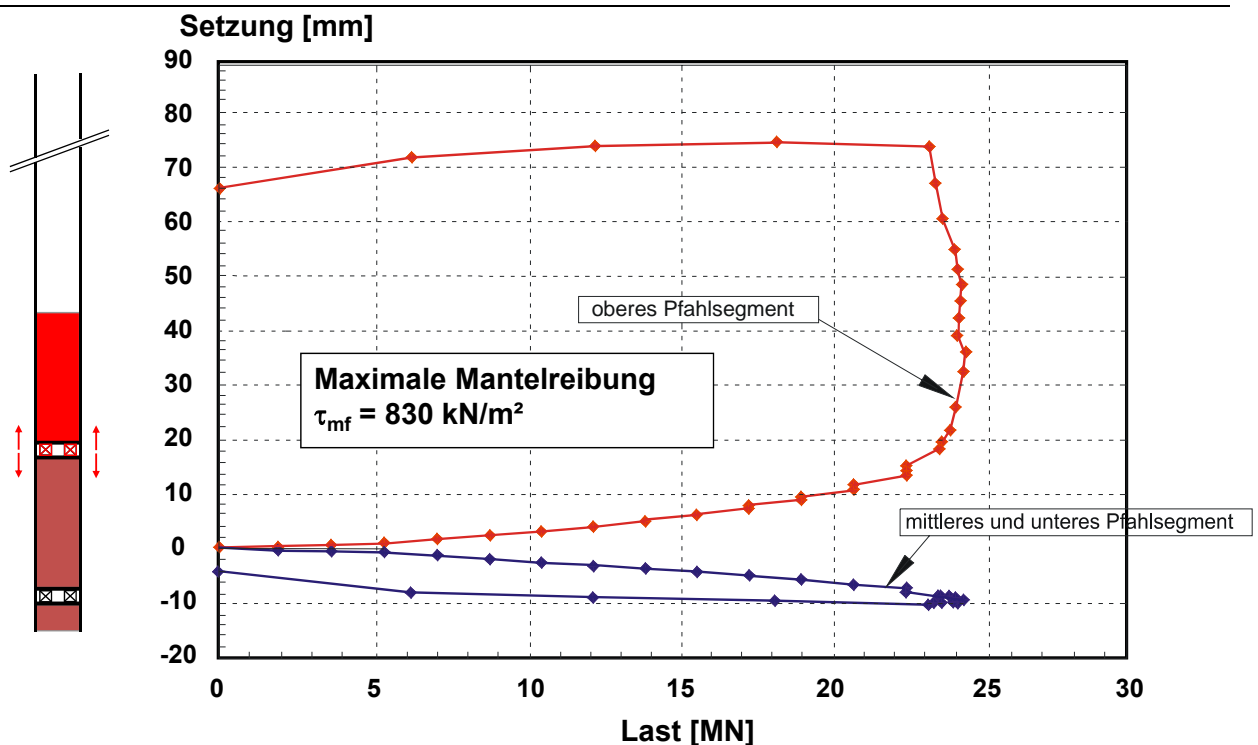
Pfahlprobelastung mit Osterberg Zellen



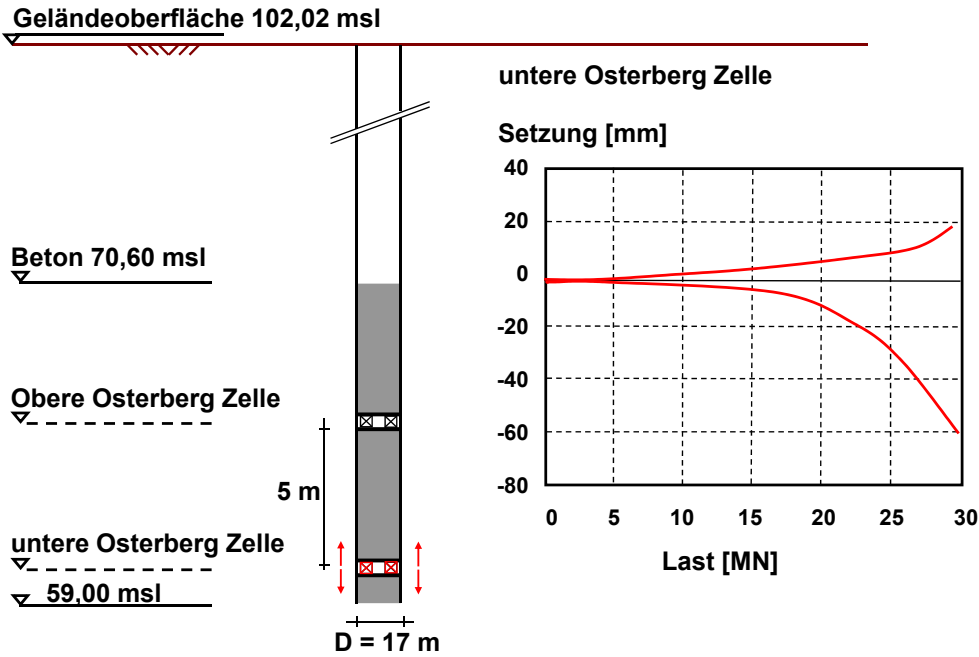
Pfahlprobelastung mit Osterberg Zellen



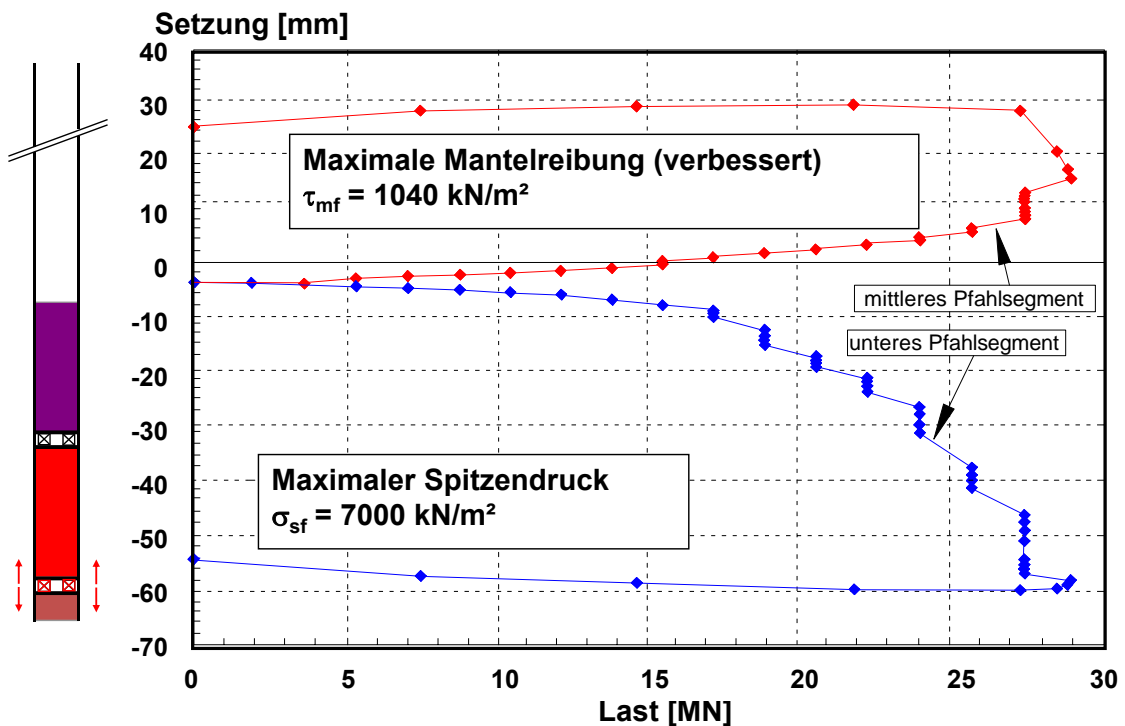
Pfahlprobelastung mit Osterberg Zellen



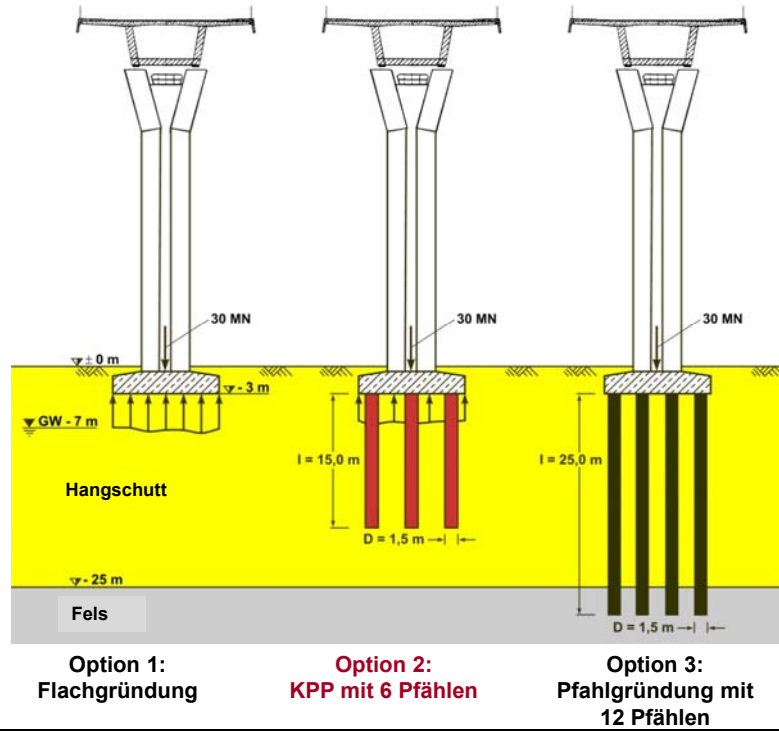
Pfahlprobelastung mit Osterberg Zellen



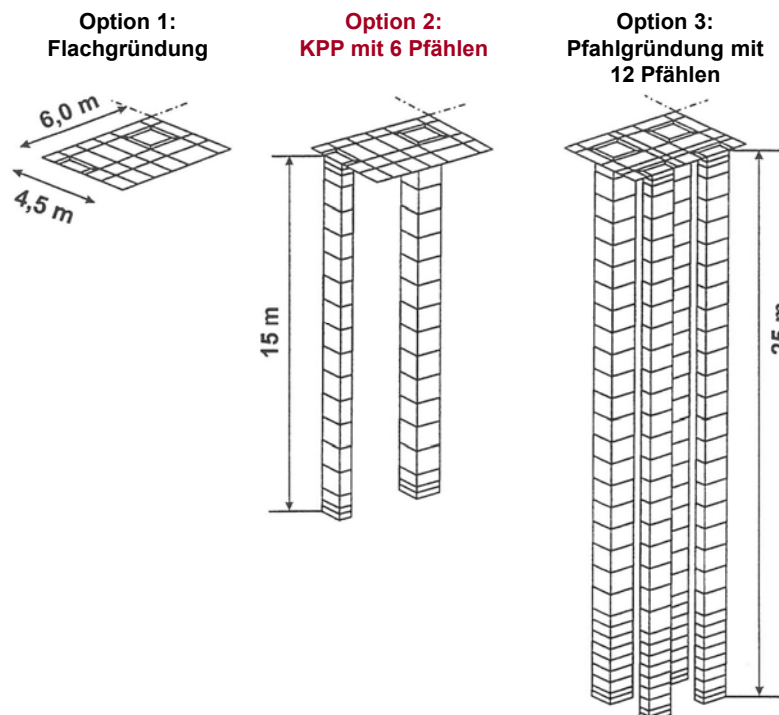
Pfahlprobelastung mit Osterberg Zellen



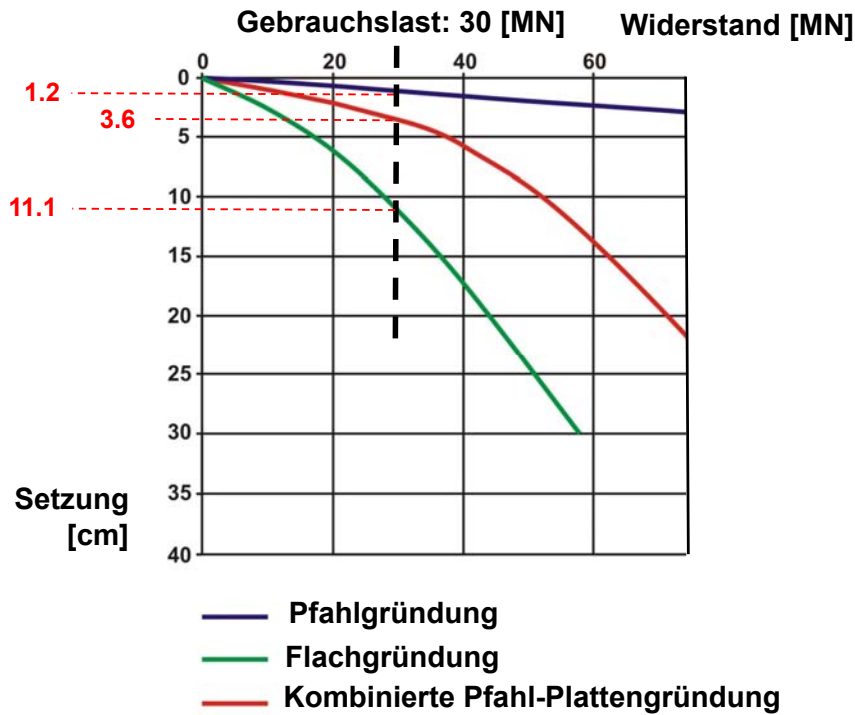
Varianten einer Brückengründung



Varianten einer Brückengründung



Varianten einer Brückengründung



Varianten einer Brückengründung

	Setzung	Kosten für Pfahlherstellung (Annahme: 400 EUR pro Meter)
Flachgründung	11,1 cm	-
KPP (6 Pfähle)	3,6 cm	36.000 EUR
Pfahlgründung (12 Pfähle)	1,2 cm	120.000 EUR

Gliederung

Einführung

Einführung

Theoretische Grundlagen der KPP

Grundlagen

Sicherheitskonzept

Sicherheitskonzept

Beispiele aus der Ingenieurpraxis

Ingenieurpraxis

Zusammenfassung

Zusammenfassung

Einführung

Grundlagen

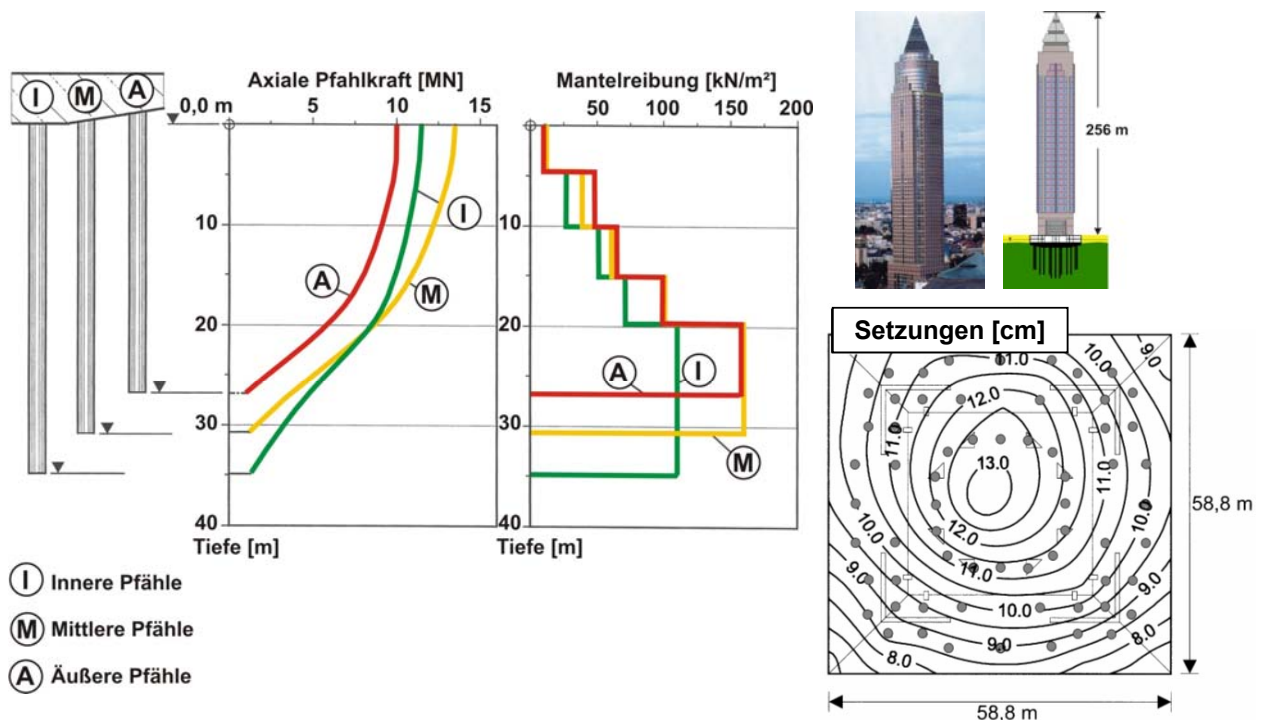
Sicherheitskonzept

Ingenieurpraxis

Zusammenfassung

45

Messturm, Frankfurt am Main



Einführung

Grundlagen

Sicherheitskonzept

Ingenieurpraxis

Zusammenfassung

46

Messturm, Frankfurt am Main

Kostenvergleich Pfahlherstellung

Geplant: Pfahlgründung mit 316 Pfählen ($I_{\text{Mittel}} = 30 \text{ m}$)

Kosten der Pfahlherstellung:
316 Pfähle, $l = 30 \text{ m}$ mit 600 EUR/m $\approx 5,7 \text{ Mio. EUR}$

Ausgeführt: KPP mit 64 Pfählen ($I_{\text{Mittel}} = 30 \text{ m}$)

Kosten der Pfahlherstellung:
64 Pfähle, $l = 30 \text{ m}$ mit 600 EUR/m $\approx 1,2 \text{ Mio. EUR}$

Kostenersparnis Pfahlherstellung: $4,5 \text{ Mio. EUR}$

➡ CO₂-Einsparung: 2.500 t



Europäische Zentralbank, Frankfurt am Main



Europäische Zentralbank, Frankfurt am Main



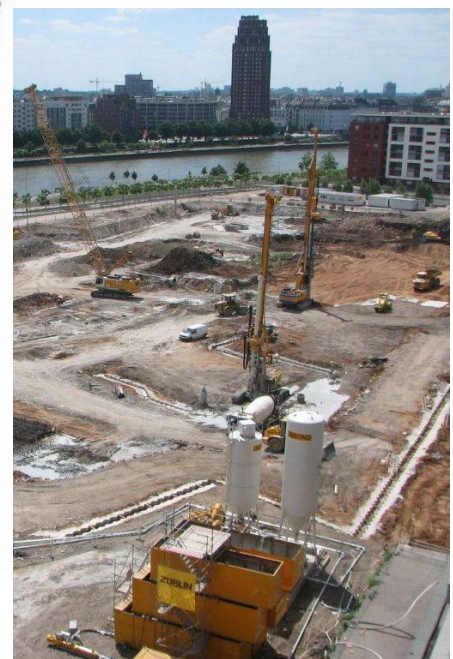
- Doppeltürme 165 m / 185 m Höhe
- Kombinierte Pfahl-Plattengründung
- 97 Pfähle mit max. 37 m Länge
- Ausführung als Energiepfähle zur statischen und geothermischen Nutzung



Europäische Zentralbank, Frankfurt am Main



CPRF - Pile layout plan



Europäische Zentralbank, Frankfurt am Main

Kostenvergleich Pfahlherstellung

KPP mit 97 Pfählen ($l_{\text{Mittel}} = 30 \text{ m}$)

Kosten der Pfahlherstellung:
97 Pfähle, $l = 30 \text{ m}$ mit 600 EUR/m $\approx 1,7 \text{ Mio. EUR}$

Reine Pfahlgründung: 490 Pfähle ($l_{\text{Mittel}} = 30 \text{ m}$)

Kosten der Pfahlherstellung:
490 Pfähle, $l = 30 \text{ m}$ mit 600 EUR/m $\approx 8,8 \text{ Mio. EUR}$

Kostenersparnis Pfahlherstellung $7,1 \text{ Mio. EUR}$

➔ CO₂-Einsparung: 3.300 t



Maintower, Frankfurt am Main

Kostenvergleich Pfahlherstellung

Pfahlgründung mit 277 Pfähle ($l = 30 \text{ m}$)

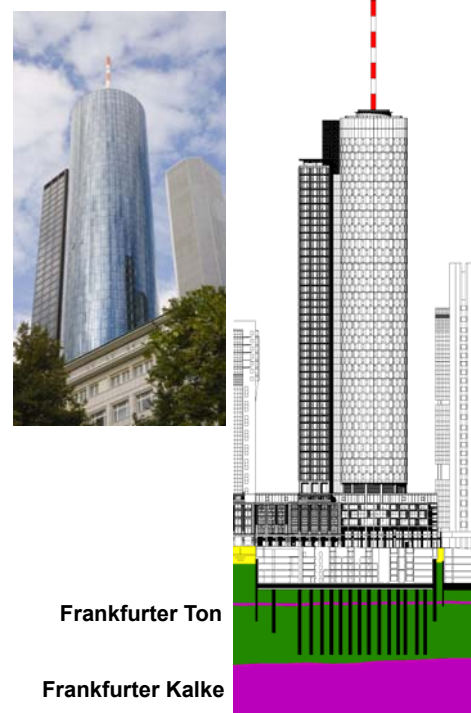
Kosten der Pfahlherstellung:
277 Pfähle, $l = 30 \text{ m}$ mit 600 EUR/m $\approx 5,0 \text{ Mio. EUR}$

Ausgeführt: KPP mit 112 Pfählen ($l_{\text{Mittel}} = 30 \text{ m}$)

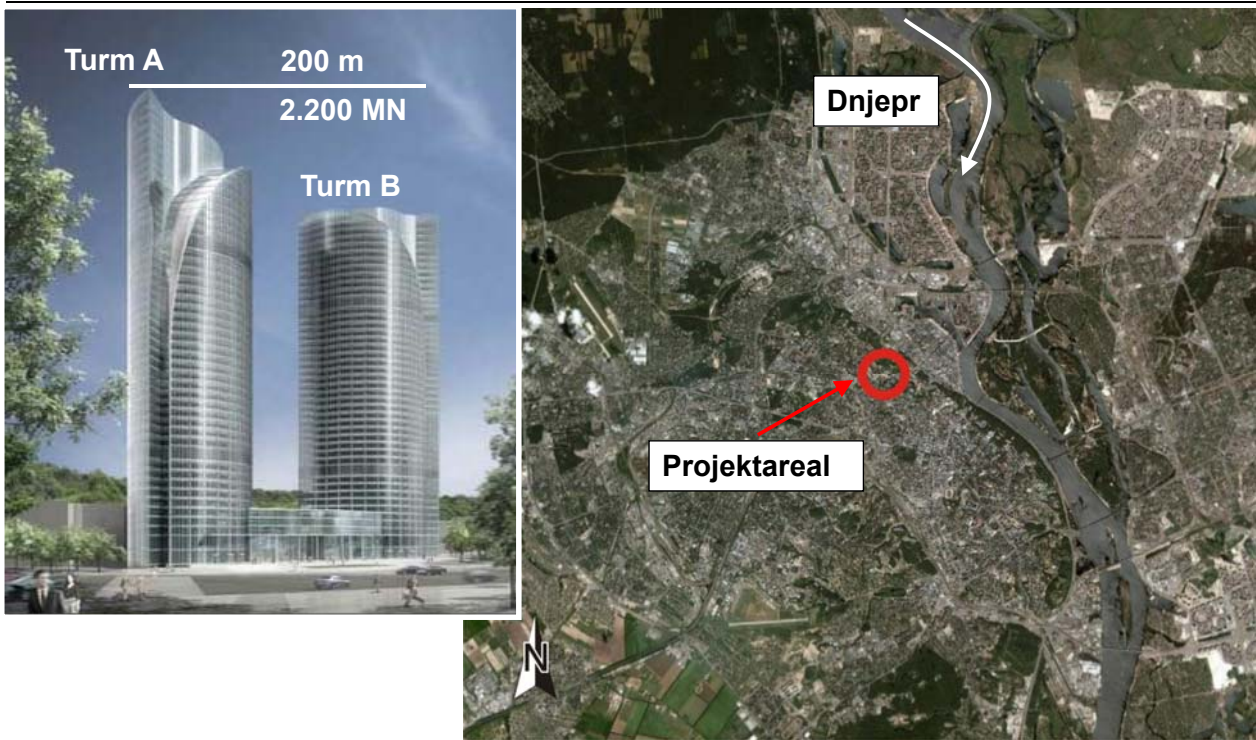
Kosten der Pfahlherstellung:
112 Pfähle, $l = 30 \text{ m}$ mit 600 EUR/m $\approx 2,0 \text{ Mio. EUR}$

Kostenersparnis Pfahlproduktion: $3,0 \text{ Mio. EUR}$

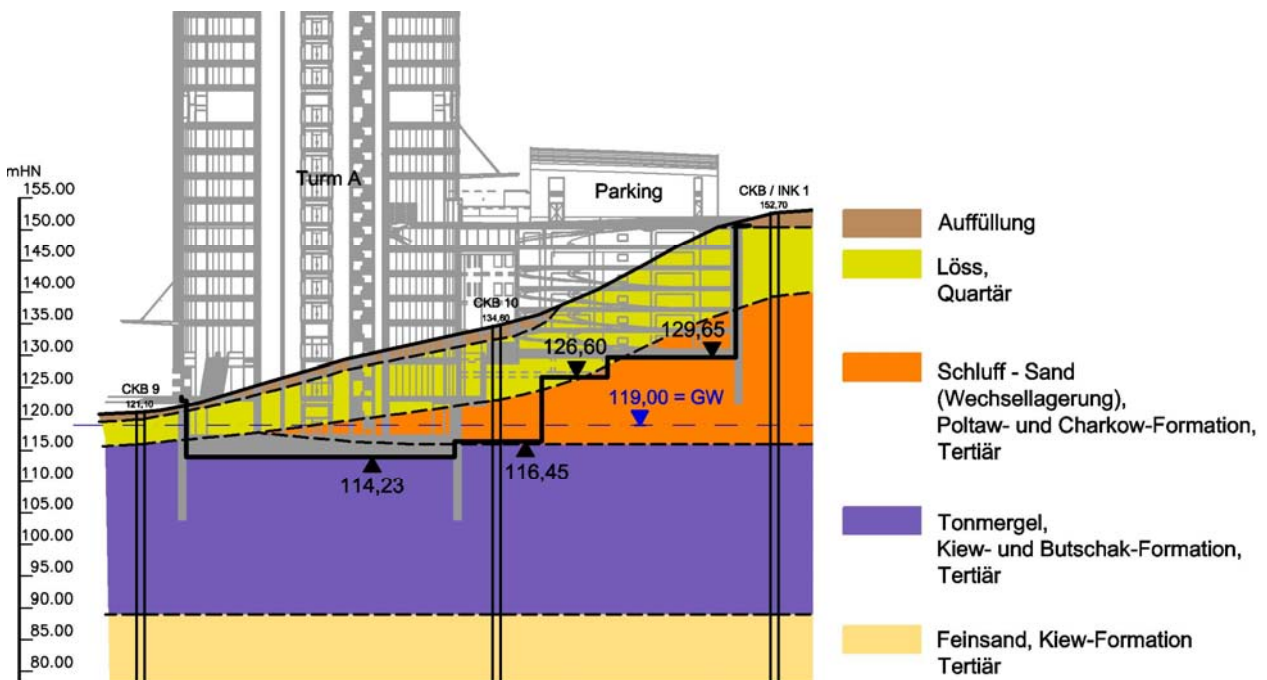
CO₂-Einsparung: 2.200 t



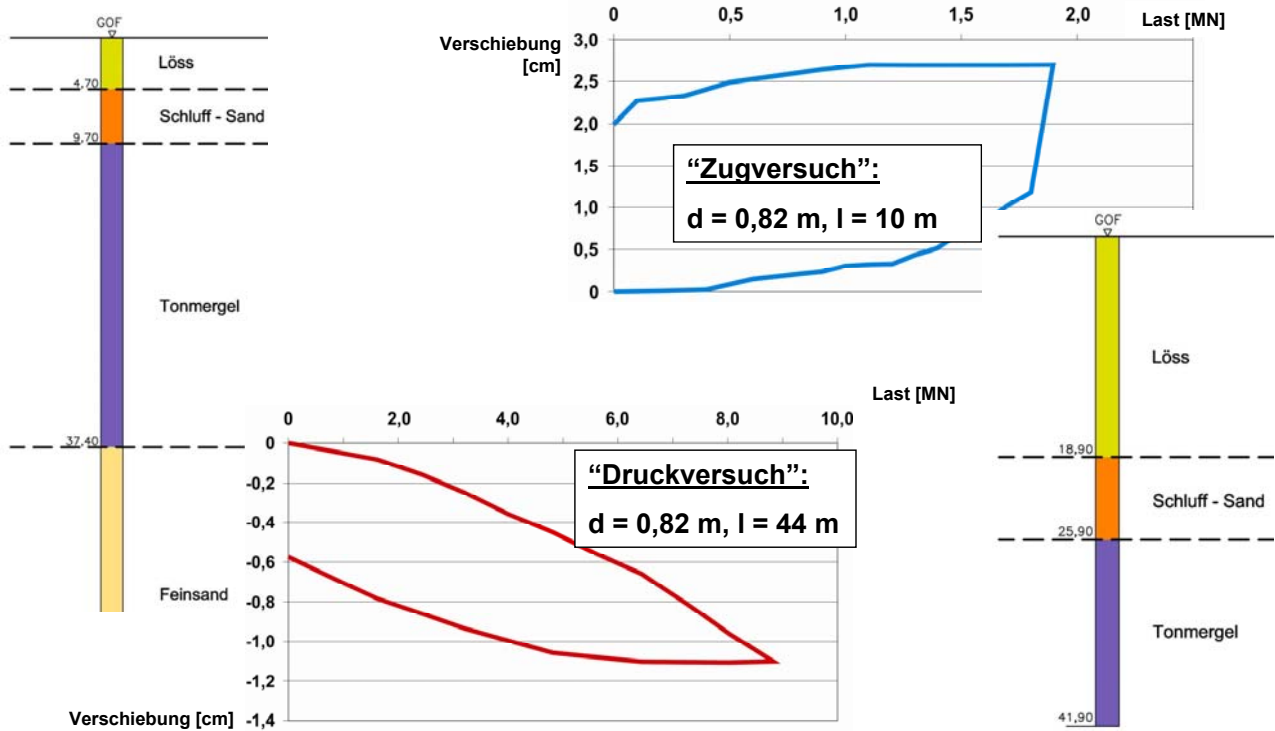
Mirax Plaza Turm A, Kiew (Ukraine)



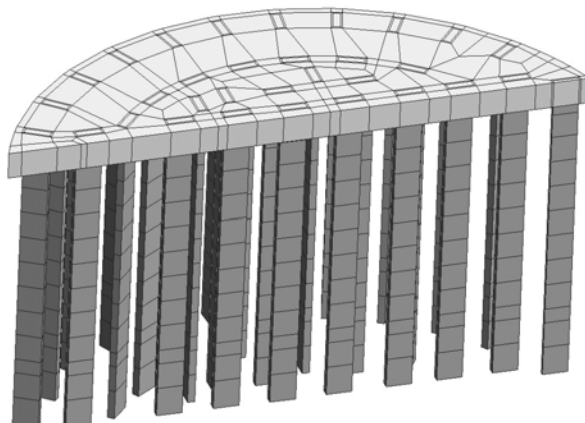
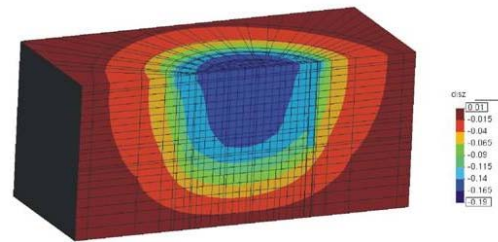
Mirax Plaza Turm A, Kiew (Ukraine)



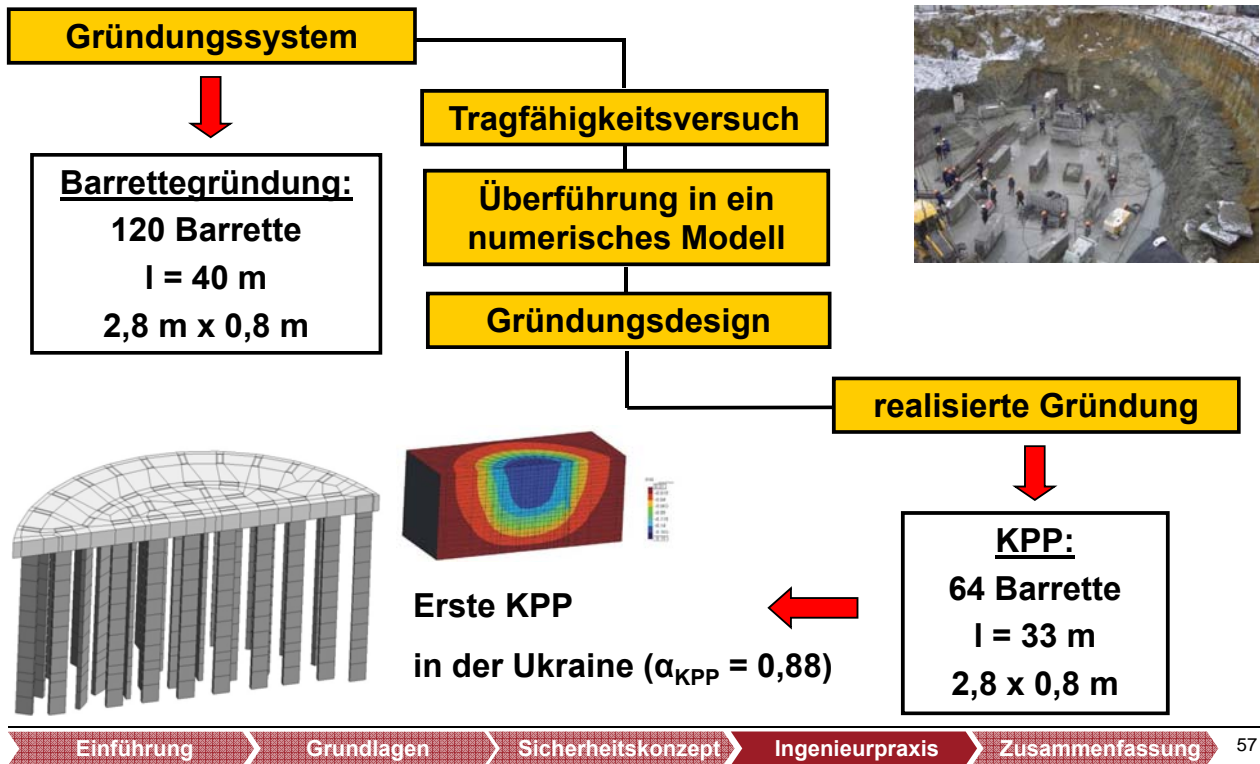
Mirax Plaza Turm A, Kiew (Ukraine)



Mirax Plaza Turm A, Kiew (Ukraine)



Mirax Plaza Turm A, Kiew (Ukraine)



Mirax Plaza Turm A, Kiew (Ukraine)

Kostenvergleich Barretteherstellung

Geplant: Barrettegründung mit 120 Barretten (l = 40 m)

Kosten der Barretteherstellung:
120 Barretten, l = 40 m mit 880 EUR/m ≈ 4,2 Mio. EUR

Ausgeführt: KPP mit 62 Barretten (l = 33 m)

Kosten der Barrettenherstellung:
64 Barretten, l = 33 m mit 880 EUR/m ≈ 1,9 Mio. EUR

Kostenersparnis Barretteherstellung: 2,3 Mio. EUR

CO₂-Einsparung: 1.500 t



Beispiel einer Kosten-Nutzen-Rechnung

Pfahlgründung

$$n_{PF} = \frac{F_{c;k} \cdot \gamma_F}{R_{c;k} / \gamma_R} = \frac{F_{c;k} \cdot \gamma_F \gamma_R}{R_{c;k}} \approx \frac{F_{c;k} \cdot 2}{R_{c;k}}$$

Gesamtlast: $F_{c;k} = 2.000 \text{ MN}$

Axialer Pfahlwiderstand: $R_{c;k} = 10 \text{ MN}$

$$n_{PF} = \frac{2.000 \text{ MN} \cdot 2}{10} = 400$$

KPP

$$n_{CPRF} = \frac{\alpha_{KPP} \cdot F_{c;k}}{R_{c;k}}$$

gewählt: $\alpha_{KPP} = 0,5$

$$n_{CPRF} = \frac{0,5 \cdot F_{c;k}}{R_{c;k}} = \frac{0,5 \cdot 2.000 \text{ MN}}{10} = 100$$

Ausnutzungsrate: $\eta_{CPRF} = \frac{n_{CPRF}}{n_{PF}} = \frac{\alpha_{CPRF}}{\gamma_F \gamma_R} = 0,25$

Kosten: $C_{CPRF} = \eta_{CPRF} \cdot C_{PF}$

Einführung

Grundlagen

Sicherheitskonzept

Ingenieurpraxis

Zusammenfassung

59

Gliederung

Einführung

Einführung

Theoretische Grundlagen der KPP

Grundlagen

Sicherheitskonzept

Sicherheitskonzept

Beispiele aus der Ingenieurpraxis

Ingenieurpraxis

Zusammenfassung

Zusammenfassung

Einführung

Grundlagen

Sicherheitskonzept

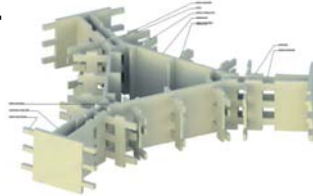
Ingenieurpraxis

Zusammenfassung

60

Zusammenfassung

- Dimensionierung auf Basis hochwertiger Simulationen unter Berücksichtigung der Baugrund-Tragwerk-Interaktion
- Sicherheitskonzept und Qualitätssicherung:
 - extensive Baugrunderkundung
 - Labor- und Feldversuche
 - in-situ Belastungsversuche
 - Beobachtungsmethode
 - 4-Augen-Prinzip während der Planungs- und Ausführungsphase



➔ **Einsparung von Geld, Zeit und Materialressourcen!**

➔ **Nachhaltigkeit!**

Einführung

Grundlagen

Sicherheitskonzept

Ingenieurpraxis

Zusammenfassung

61

20. Darmstädter Geotechnik-Kolloquium - Jubiläumskolloquium -

Darmstadt, 21. März 2013

Themen:

- Erneuerbare Energien – Erde, Wind und Wasser
- Forschung, Entwicklung und Innovationen
- Nationale und internationale Projekte
- Sicherheit und Rechtsfragen in der Geotechnik



➔ **Sie sind herzlich willkommen an der Technischen Universität Darmstadt!**

