

20. Mindener Fachgespräch für den Tiefbau
„Spezialtiefbau – verbessern, sanieren, tiefgründen“

Baugrundverbesserung mit Stabilisierungssäulen

Design und Anwendungsgrenzen

Jan Zawadil M.Sc. | Bauingenieur
Technisches Büro
Niederlassung Hannover

0 Inhalt

Gliederung

- 1) Verfahren
- 2) Design
- 3) Anwendungsgrenzen
- 4) Zusammenfassung

A yellow arrow pointing to the right, positioned to the left of the section header.

1 Verfahren

Unterscheidung von Stabilisierungssäulen gemäß AK 2.8 (DGGT)

- Trockenmörtelsäulen (TMS)
- Nassmörtelsäulen (NMS)
- Hydraulisch gebundene Stopf-/Rüttelsäulen (HSS)
 - Vermörtelte Stopfsäulen
 - Fertigmörtelstopfsäulen
 - Betonstopfsäulen
- Bodenmischsäulen (BMS)
 - Nassmischverfahren
 - Trockenmischverfahren

▶ 1 Verfahren

Kennwerte Stabilisierungssäulen

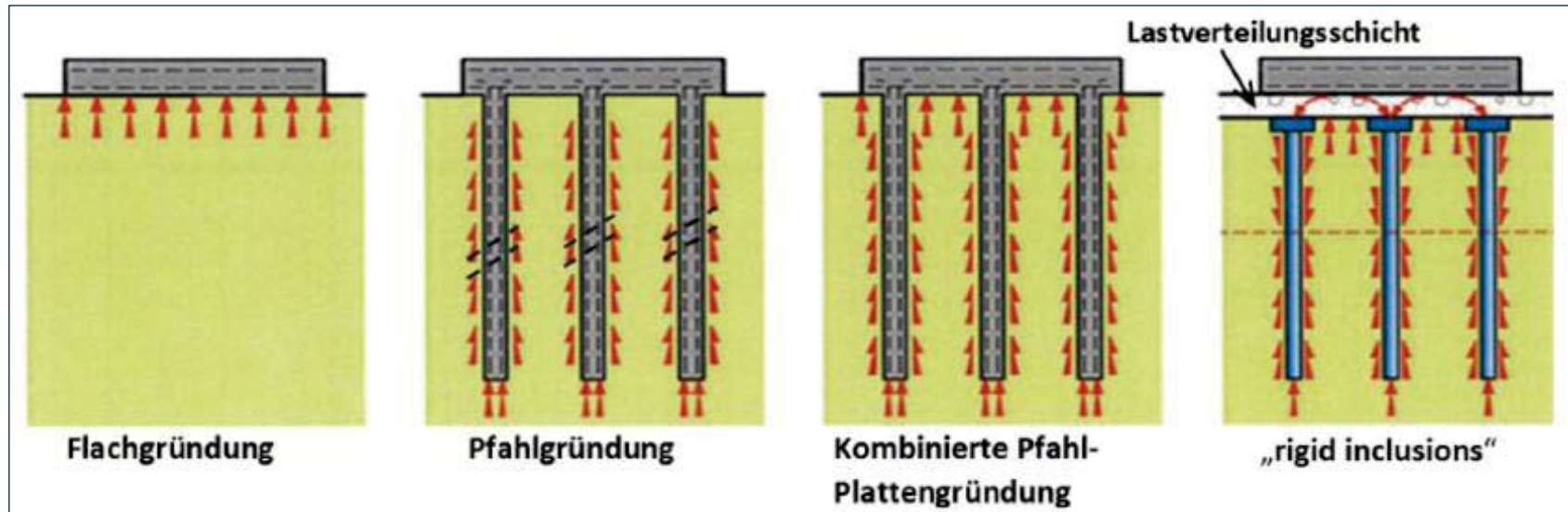
| Säulenart | D _s [cm] | F _{c,d} [MN/m ²] | E [MN/m ²] |
|---|------------------------|--|-----------------------------|
| Trockenmörtelsäulen (TMS) | 10 - 15 | 5 – 10 (8) | 1.000 – 10.000 (4.000) |
| Nassmörtelsäulen (NMS) | 10 - 50 | C12/15 – C30/37 (C20/25) | 10.000 – 30.000 (20.000) |
| Hydraulisch gebundene Stopf-Rüttelsäulen (HSS) | 30 - 70 | 5 - 20 | 20.000 – 40.000 (25.000) |
| Bodenmischsäulen (BMS) | 30 - 60 | 1 – 6 (4) | 2.000 – 20.000 (15.000) |

in Klammern „Mittelwerte“

Neidhart (2016)

1 Verfahren

Kombinierte Gründungssysteme

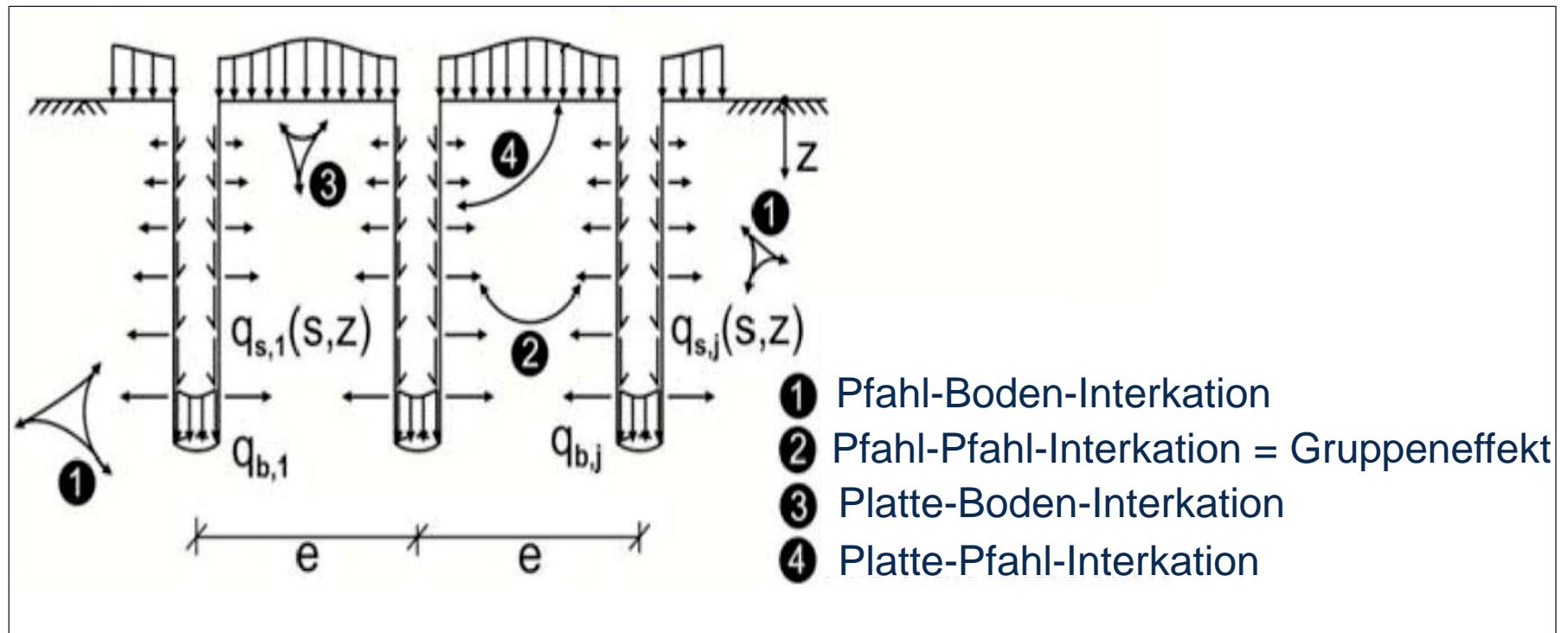


Bohn & Vogt (2018)

- Kombinierte Gründungssysteme mit Stabilisierungssäulen
- Bodenverbesserung mit starren, bewehrten und unbewehrten Säulen, mit relativ kleinen Durchmessern (Rigid Inclusions)
- Belastung der Säulen und des Boden zwischen den Säulen
 - mit oder ohne Lastverteilungsschicht (Lasttransferschicht) zwischen Bauwerk und Säulen

1 Verfahren

Interaktionen in KPP

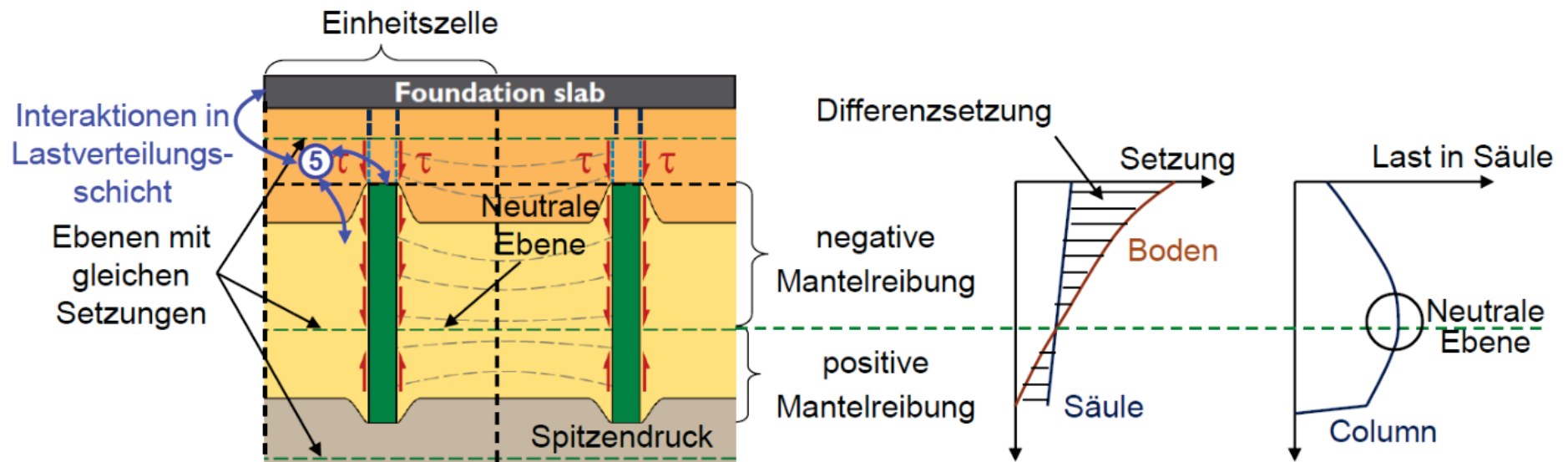


Katzenbach und Choudhury (2013)

1 Verfahren

Interaktionen in System mit Lastverteilungsschicht

zusätzliche Interaktionen aus lastverteilender Tragschicht bei entkoppelten pfahlartigen Elementen



▶ 1 Verfahren

Empfehlungen/Normen

- (KPP-Richtlinie (Deutschland, 2002))
- ASIRI (Frankreich, 2012)
- ASIRI+, Ergänzungen (Frankreich, 202X)
- „ASIRI Polen“ (Polen, bald)
- Neuer Eurocode 7, Teil 3 (Europa, voraussichtlich 202X)
- Empfehlungen AK 2.8 der DGGT (Deutschland, 202X)

→ Laut allen: Berechnung der Lastverteilung Boden/Säule erforderlich

2 Design

Bemessungskonzept ASIRI Empfehlungen (Frankreich)

übliche Berechnungsmethoden

Grundbruchnachweis
ohne Säulen

Nicht erfüllt

erfüllt

Säulen für die
Standicherheit erforderlich

Berechnung mit LTM oder FEM

- Setzung + Lastverteilung
 - Innere Tragfähigkeit nach Materialnorm
 - Äußere Tragfähigkeit
- 9 – Gesamtsystem und Einzelsäulen

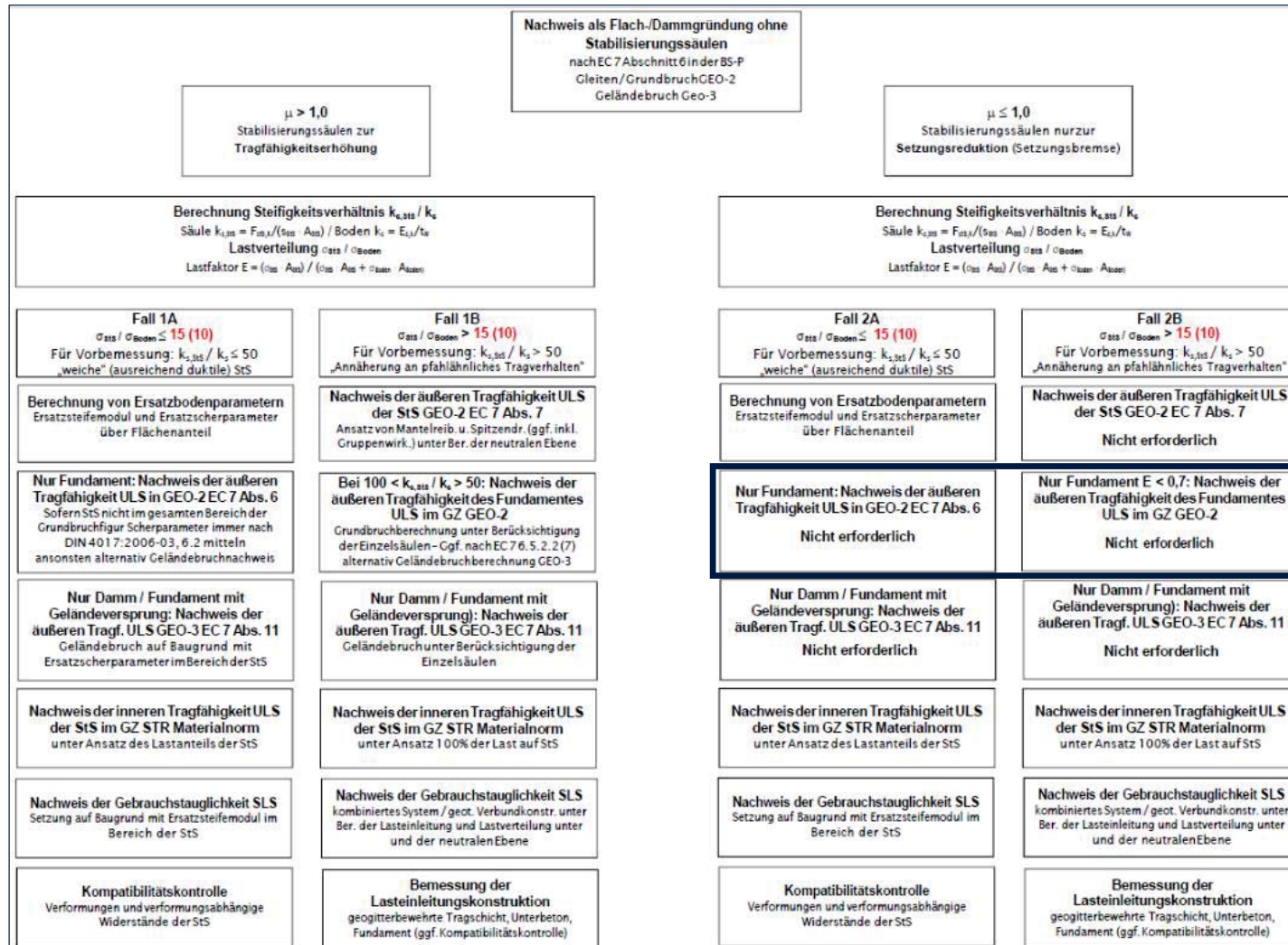
Säulen nur für die
Setzungen erforderlich

Berechnung mit LTM oder FEM

- Setzung + Lastverteilung
- Innere Tragfähigkeit nach Materialnorm

2 Design

Bemessungskonzept AK 2.8 DGGT Stabilisierungssäulen (Entwurf)

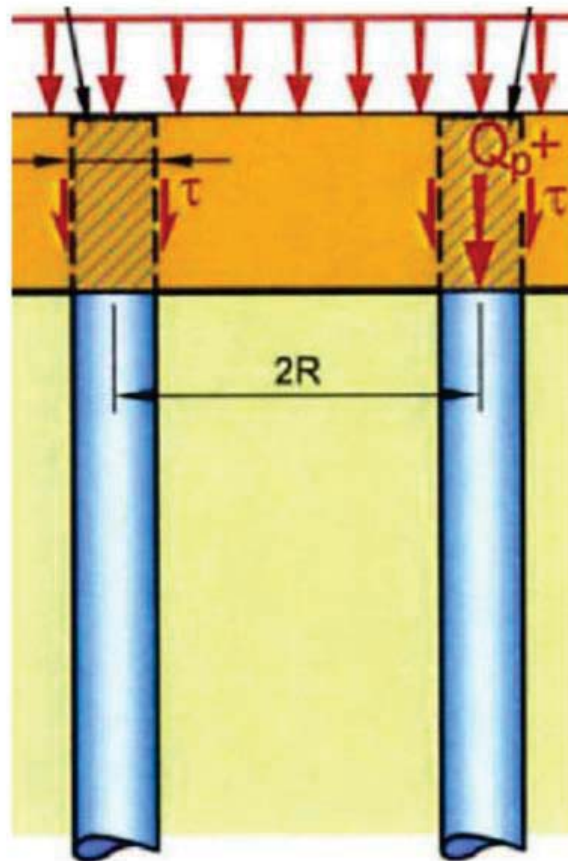


Ähnliches Konzept

2 Design

KID-LTM Prinzip: Lasttransfer in Lastverteilungsschicht

Fiktive Säulen (bestehend aus Boden)
mit negativer Mantelreibung



$\tau = q_s(s_s)$ an der fiktiven Säule

$$\tau_{\max} = q_{s,\text{ult}} = K \cdot \tan\phi \cdot \sigma_v$$

mit:

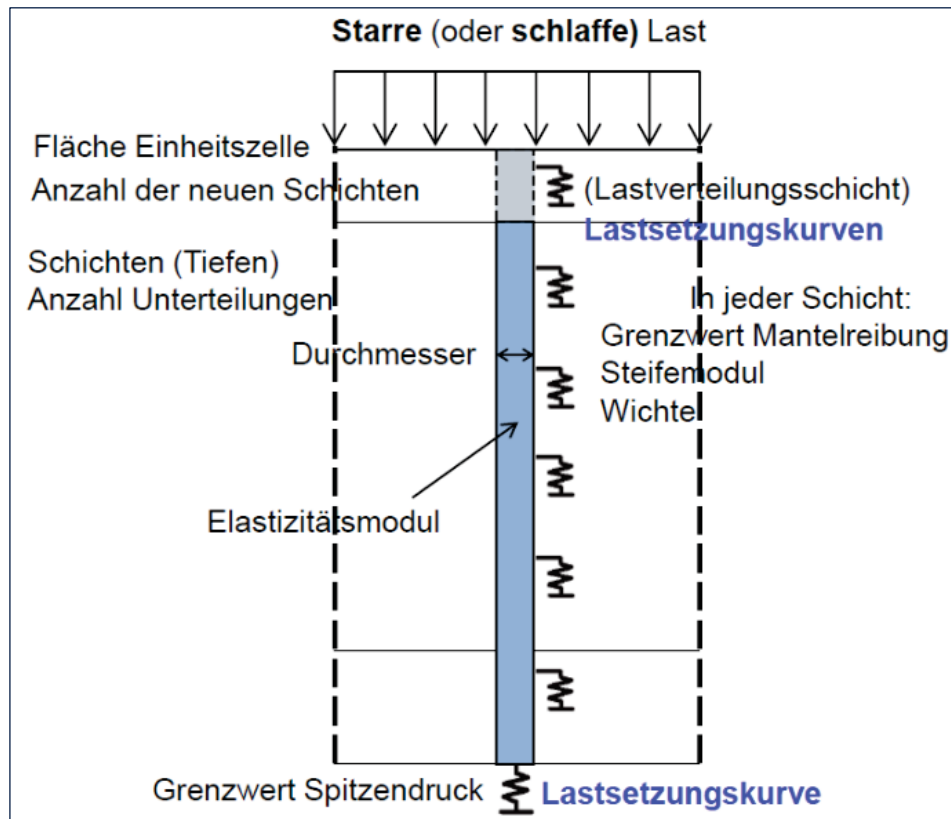
K: Erddruckkoeffizient

σ_v : Vertikalspannung in der
Lastverteilungsschicht

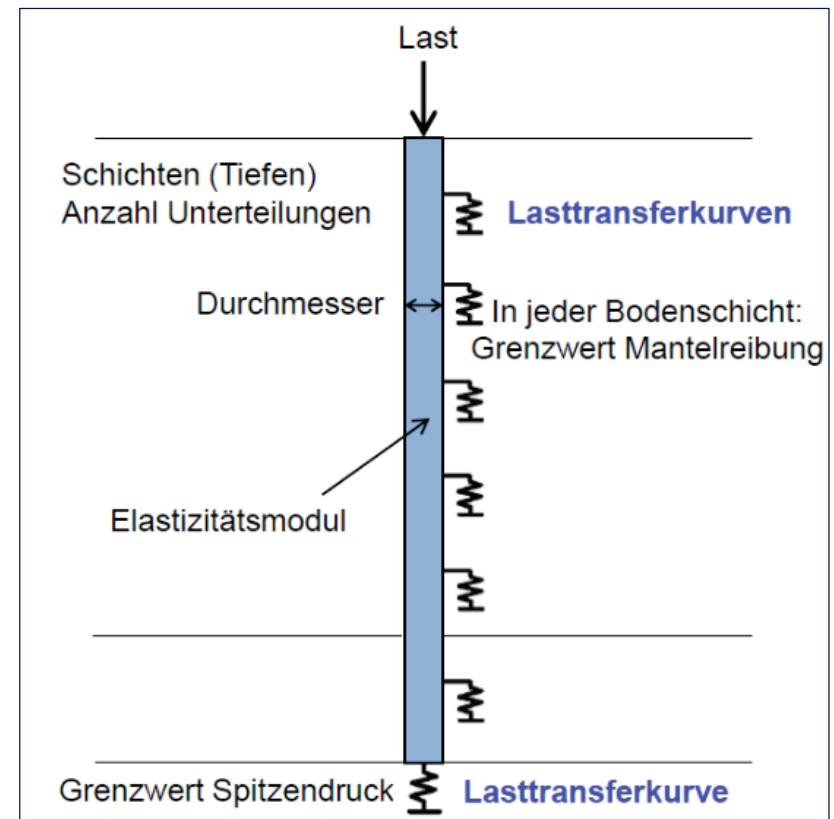
$K \cdot \tan\phi \approx 1$ für gut verdichteten Sand/Kies
(ASIRI, IREX, 2012)

2 Design

Einheitszellensystem (unendliches Raster)



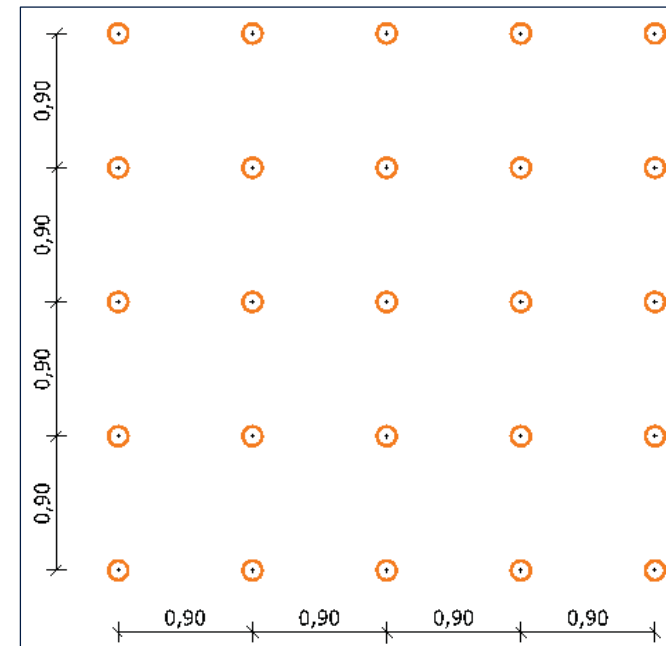
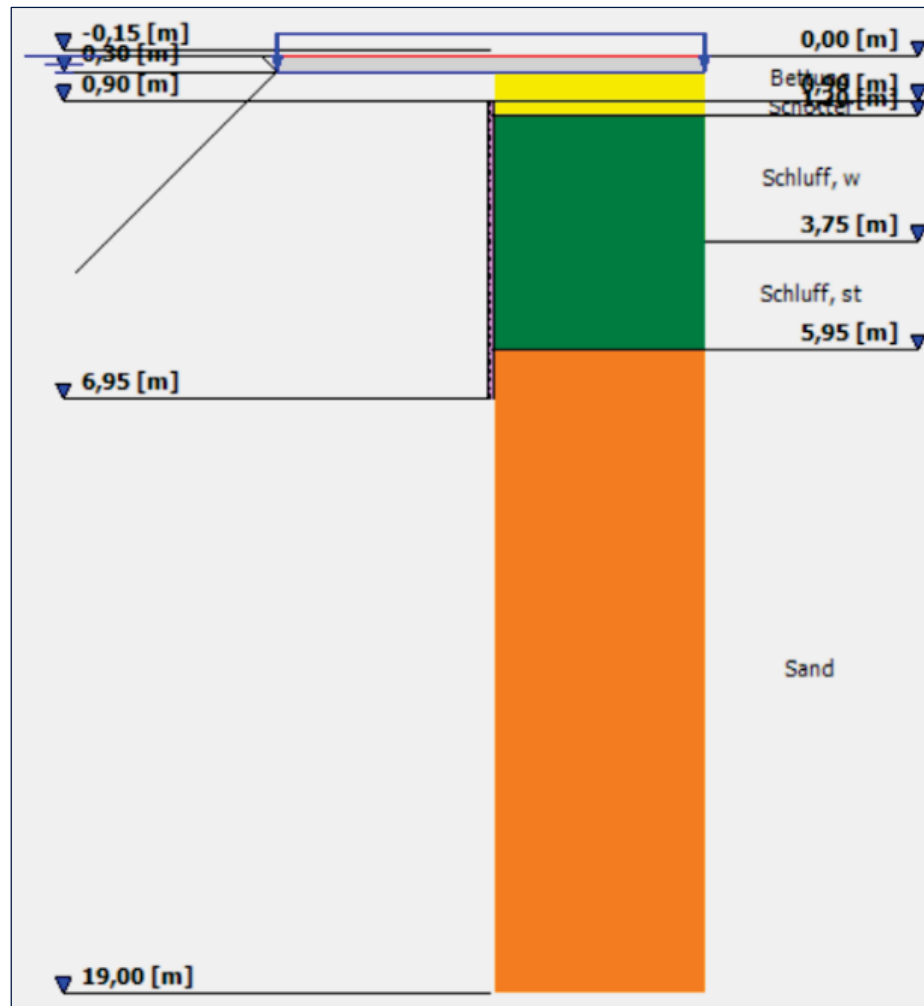
Einzelsäulensystem



- Mit oder ohne Lastverteilungsschicht
- Starre Säulen oder Hybridsäulen

2 Design

Berechnungsbeispiel - Design



- unendliches Raster
- Belastung = 45 kN/m²
- GW = -0,15 m v. GOK
- Säulenmaterial:
 - Füllbinder P4EK3
 - $f_{ck} = 25,6 \text{ N/mm}^2$
- Säulendurchmesser = 0,13 m

Berechnungsbeispiel

Berechnungsbeispiel – Eingabedaten (unendliches Raster)

Gründungsart: Stare Fundamentplatte

Mobilisierungskurve: Kubikwurzel, alle Säulen- und Bodenarten (Bohn 2015)

Querschnittsform Säule: Kreisförmig

Säulendurchmesser konstant:

Setzungen ohne Verbesserung einblenden

Vergleich der negativen Mantelreibung mit $K \tan(\delta)$

Projektdatei übernehmen

Fundament Unterkante: 0,3 [m]

Säulenunterkante: 6,95 [m]

Last: 45 [kN/m²]

Anzahl der neuen Schichten (als Last): 0

Fläche Einheitszelle: 0,81 [m²]

Abbr. bei Spannungsverhältnis: 20,0 [%]

LTM Berechnung optimieren | LTM Berechnung starten

Biegemomente Fundamentplatte anzeigen | Tabellarische Ergebnisse

Säule

| Säulendurchm [m] | γ Säule [kN/m ³] | Zus. Widerstand bei Durchmessererw. | Säule E (auch fiktiv) [kN/m ²] | Anzahl Unterteilungen |
|------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|--|-----------------------|
| 0,13 | 11 | 0 | 43870 | 100 |
| 0,13 | 25 | 0 | 31000000 | 100 |
| 0,13 | 25 | 0 | 31000000 | 100 |
| 0,13 | 25 | 0 | 31000000 | 100 |
| 0,13 | 25 | 0 | 31000000 | 100 |

Boden

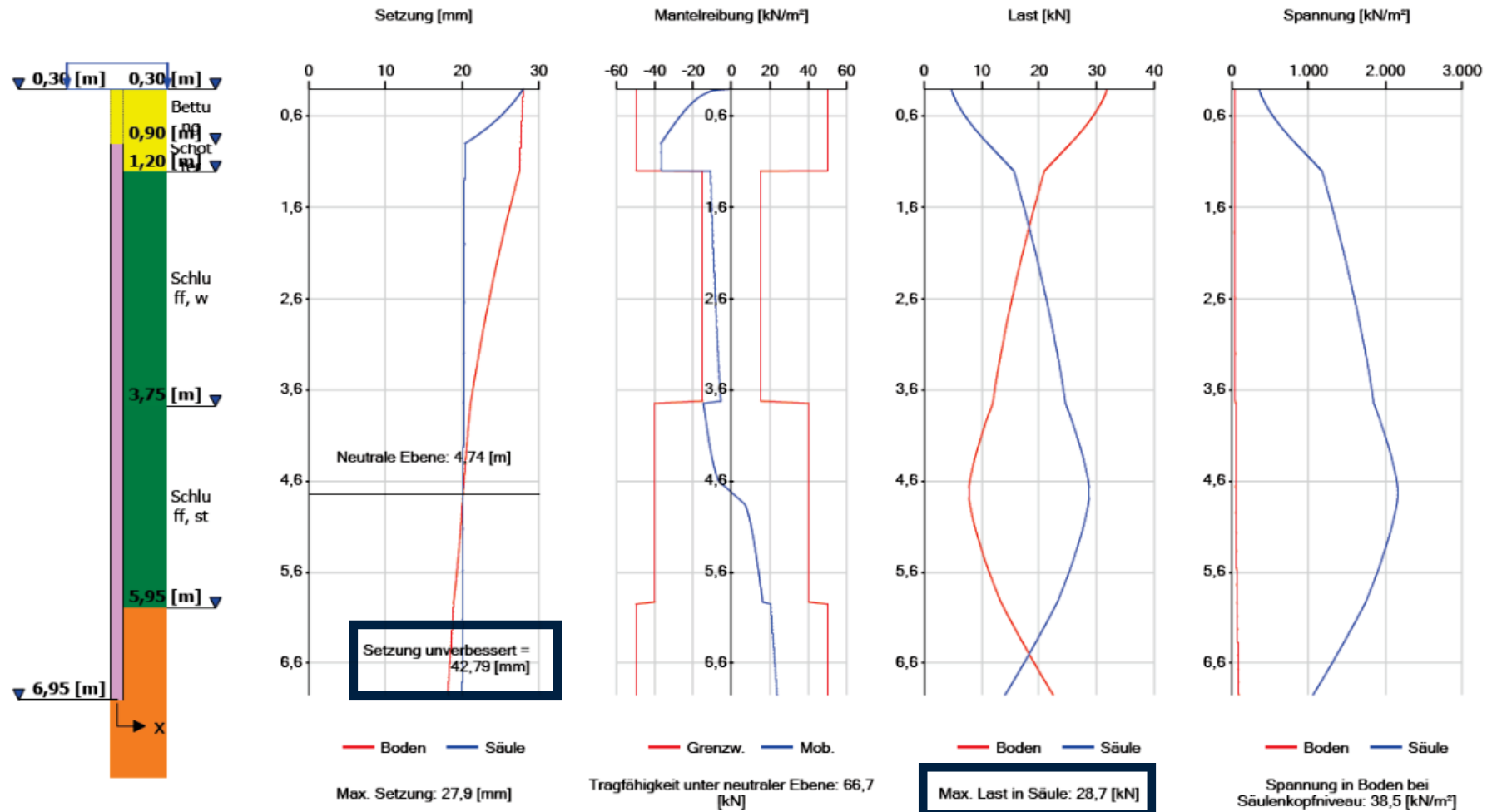
| OK [m] | Art | Es Modul [kN/m ²] | Grenzw. Mantelreibung [kN/m ²] | Grenzw. Spitzendruck [kN/m ²] | γ effektiv Boden [kN/m ³] |
|--------|-------------|-------------------------------|--|---|--|
| 0,3 | Bettung | 65000 | 50 | 0 | 11 |
| 0,9 | Schotter | 65000 | 50 | 0 | 11 |
| 1,2 | Schluff, w | 8000 | 15 | 0 | 9 |
| 3,75 | Schluff, st | 12000 | 40 | 0 | 9 |
| 5,95 | Sand | 30000 | 50 | 2000 | 10 |

Berechnungstiefe: 19 [m]

2 Design

Berechnungsbeispiel – Protokoll LTM Berechnung (unendliches Raster)

Protokoll LTM Berechnung



2 Design

Berechnungsbeispiel – Eingabedaten (Einzelsäule)

Gründungsart: Einzelsäule | Querschnittsform Säule: Kreisförmig

Mobilisierungskurve: Kubikwurzel, alle Säulen- und Bodenarten (Bohn 2015) | Säulendurchmesser konstant:

Projektdatei übernehmen:

Säulenunterkante: 6,95 [m]

Lastsetzungskurve:

Last: 36,45 [kN]

LTM Berechnung optimieren

Boden

| OK [m] | Art | | Grenzw. Mantelreibung [kN/m ²] | Grenzw. Spitzendruck [kN/m ²] |
|--------|-------------|--|--|---|
| 0,9 | Schotter | | 50 | 0 |
| 1,2 | Schluff, w | | 15 | 0 |
| 3,75 | Schluff, st | | 40 | 0 |
| 5,95 | Sand | | 50 | 2000 |

Berechnungstiefe: 19 [m]

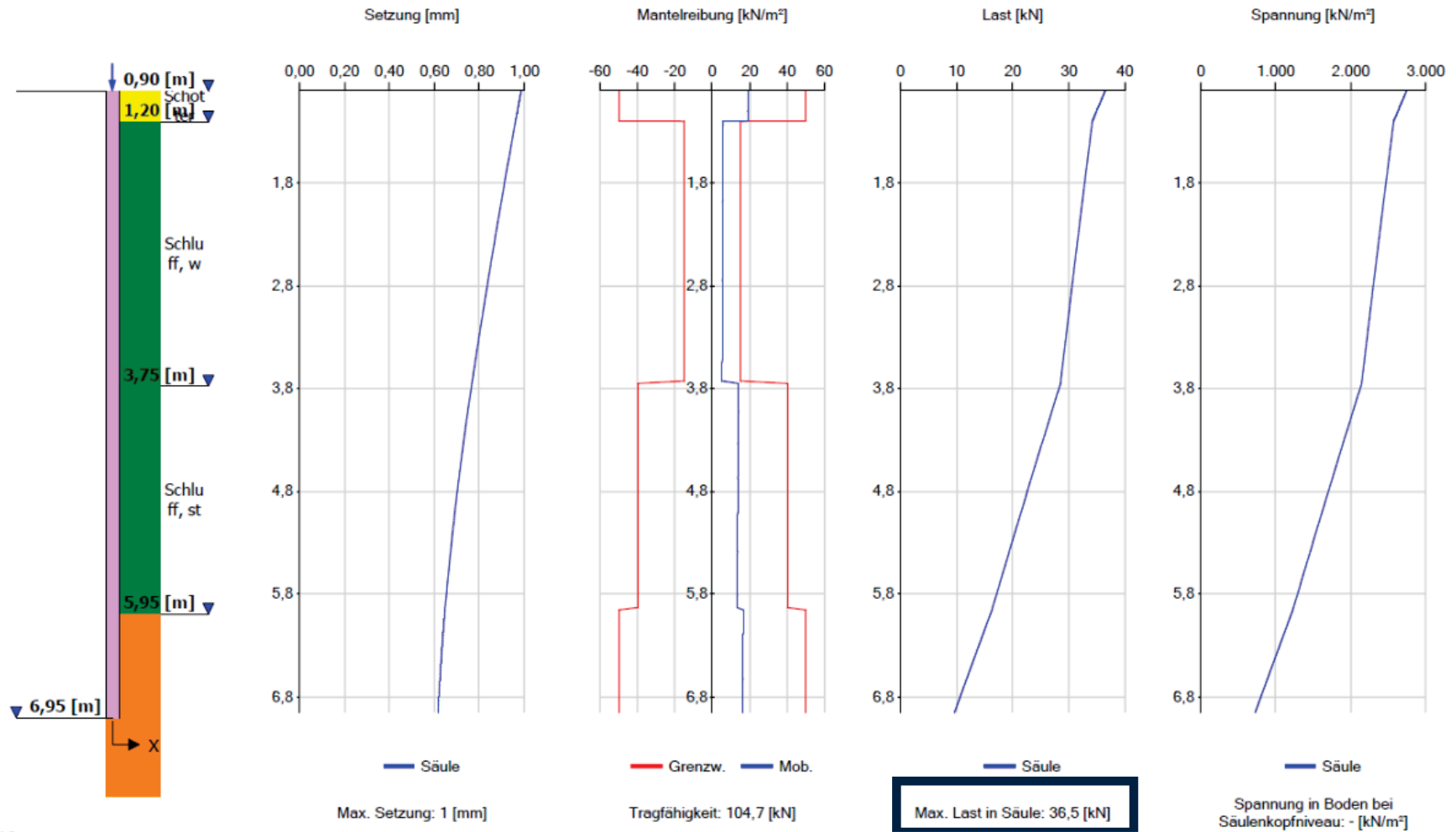
Säule

| Säulendurchmesser [m] | Zus. Widerstand bei Durchmesservariat [kN/m ²] | Säule E (auch fiktiv) [kN/m ²] | Anzahl Unterteilungen [-] |
|-----------------------|--|--|---------------------------|
| 0,13 | 0 | 31000000 | 100 |
| 0,13 | 0 | 31000000 | 100 |
| 0,13 | 0 | 31000000 | 100 |
| 0,13 | 0 | 31000000 | 100 |

2 Design

Berechnungsbeispiel – Protokoll LTM Berechnung (Einzelsäule)

Protokoll LTM Berechnung



2 Design

Berechnungsbeispiel – Innere Tragfähigkeit

Geometrie/Baustoffe:

| | |
|--------------------|------------------------|
| Säulendurchmesser: | 0,13 m |
| Säulenfußfläche: | 0,013 m ² |
| Füllbinder: | 25,6 N/mm ² |

Einwirkung:

| | |
|-------------------------|---|
| Maximale Last je Säule: | $N_{E,k} = 28,7 \text{ kN}$ (Max. Last in Säule) |
| Bemessungswert: | $N_{E,d} = 40,2 \text{ kN} = 28,7 \text{ kN} \cdot 1,4$ |

| | |
|-----------------|--|
| Tragwiderstand: | $R_d = f_{cd} = \alpha_{cc} \times f_{ck} / \gamma_c$ $R_d = 0,70 \times 25,6 / 1,5 = 11,95 \text{ MN/m}^2$ |
|-----------------|--|

| | |
|--------------------|--|
| Säulenquerschnitt: | $A_b = \pi \times d_b^2 / 4 = 0,013 \text{ m}^2$ mit $d_{b,\min} = 0,13 \text{ m}$ |
|--------------------|--|

| | |
|-----------|---|
| Nachweis: | $E_d = N_{E,d} / A_b$ $= 0,0287 / 0,013 = 2,21 \text{ MN/m}^2 < R_{cd} = 11,95 \text{ MN/m}^2$ |
|-----------|---|



2 Design

Berechnungsbeispiel – (Äußere Tragfähigkeit)

Spitzenwiderstand:

$$R_{b,d} = 0,013 \text{ m}^2 \cdot 2.000 \text{ kN/m}^2 / 1,40 = \mathbf{18,6 \text{ kN}}$$

Mantelreibungswiderstand:

$$\begin{aligned} R_{s,d} = & 0,408 \text{ m} \cdot (0,3 \text{ m} \cdot 50 \text{ kN/m}^2 \\ & + 2,55 \text{ m} \cdot 15 \text{ kN/m}^2 \\ & + 2,2 \text{ m} \cdot 40 \text{ kN/m}^2 \\ & + 1 \text{ m} \cdot 50 \text{ kN/m}^2) / 1,4 = \mathbf{55,7 \text{ kN}} \end{aligned}$$

$$R_d = 18,6 \text{ kN} + 55,7 \text{ kN} = \mathbf{74,3 \text{ kN}}$$

Nachweis:

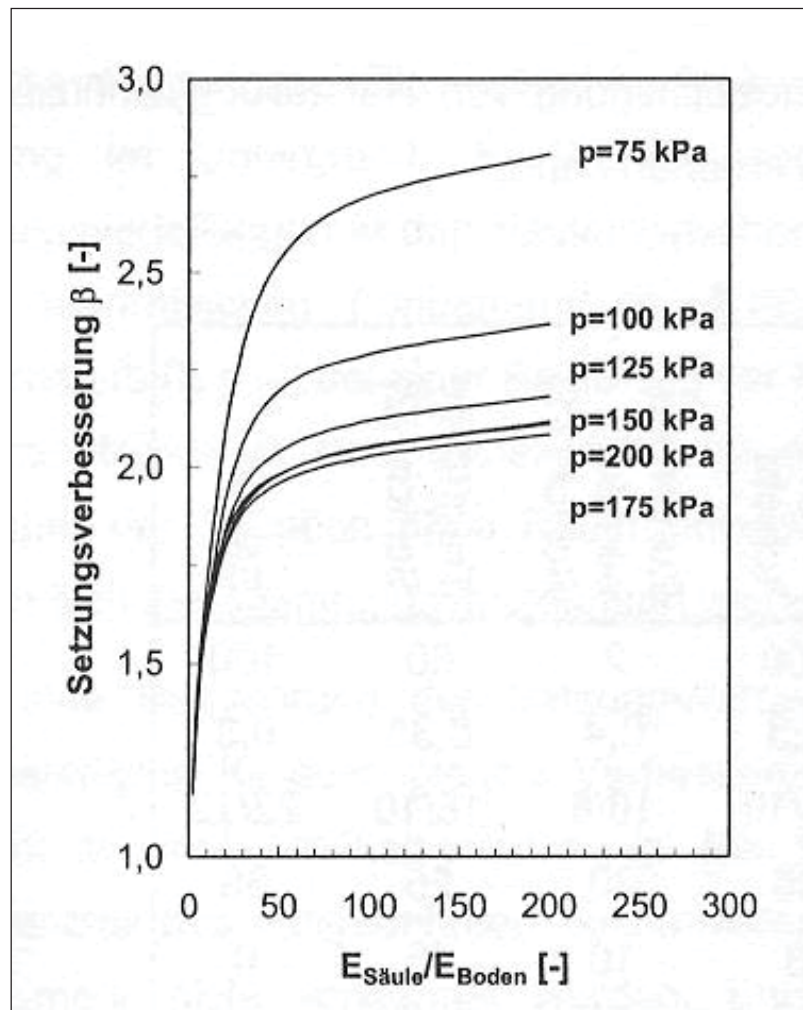
$$E_d/R_d = 40,2 \text{ kN} / 74,3 \text{ kN} = \mathbf{0,54 < 1,0} \quad \checkmark$$

3 Anwendungsgrenzen

| Kategorie | Verfahrensbeispiele | Kennzeichnung | Risiko |
|--|---|---|--|
| Kategorie A geringes Risiko | <ul style="list-style-type: none"> • Drains • Bodenaustausch • Tiefrüttelverfahren <ul style="list-style-type: none"> • Rütteldruckverfahren • Rüttelstopfverfahren | <ul style="list-style-type: none"> • selbstregulierendes Tragverhalten • keine Stützung des umgebenen Bodens • Duktilies Verhalten (kein schlagartiges Versagen) • robust gegenüber Verformungen • geringes Risiko bei Varianz von Lasten, Boden- und Säulenparametern • Tragfähigkeit bleibt auch bei Überlastung erhalten | <ul style="list-style-type: none"> • erhöhte Setzungen |
| Kategorie B mittleres Risiko | <ul style="list-style-type: none"> • Bodenvermörtelung im Nassverfahren • Fertigmörtelstopfsäulen als Baugrundverbesserung • Betonrüttelsäulen als Baugrundverbesserung | <ul style="list-style-type: none"> • Säulendurchmesser $D > 40$ cm • Steifigkeitsverhältnis wird durch größere Säulendurchmesser kompensiert | <ul style="list-style-type: none"> • erhöhte Setzungen • Verlust der Tragfähigkeit durch inneres Versagen der Säulen (Bruch unter Vertikallasten) • Verlust der Tragfähigkeit durch äußeres Versagen der Säulen |
| Kategorie C hohes Risiko | <ul style="list-style-type: none"> • Stabilisierungssäulen <ul style="list-style-type: none"> • TMS • NMS | <ul style="list-style-type: none"> • Positive und negative Mantelreibung entlang der Tragglieder • unbewehrte Säulen mit kleinem Durchmesser $D < 40$ cm • Vollverdrängersäulen • Einbau von Stahlbewehrungen (Stäben oder Profile) ab $D > 25$ cm möglich | <ul style="list-style-type: none"> • erhöhte Setzungen • fehlende Duktilität führt zum GZT (Bruch) • enges Säulenraster • schlagartiges Versagen der Säulen • Tragfähigkeitsverlust bei Streuung von Parametern |

3 Anwendungsgrenzen

Einfluss des Steifigkeitsverhältnisses bei z.B. einer Rüttelstopfverdichtung



- relevante Setzungsverbesserung ist bei einem Steifigkeitsverhältnis von ca. 40-50 zu erkennen
- weitere Steifigkeitszunahme bei einem Verhältnis > 50 für Bodenverbesserung nicht mehr effizient

Wehr & Sondermann (2011)

Setzungsverbesserung bei Variation des Steifigkeitsverhältnisses (Kirsch 2004)

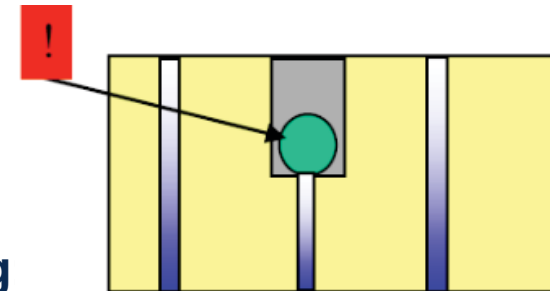
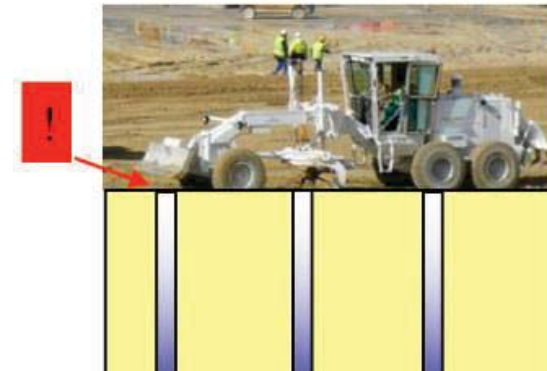
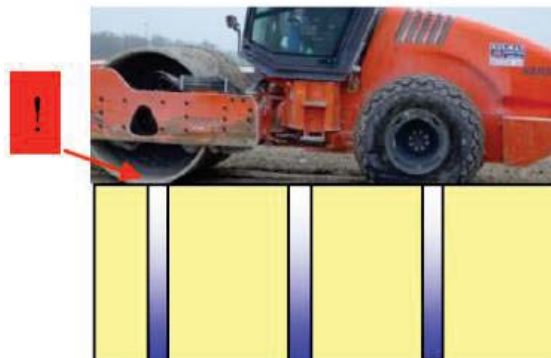
3 Anwendungsgrenzen

Hinweise bei der Ausführung

- Vermeidung von Baustellenverkehr und Verdichtung direkt auf den Köpfen der RI
- Vermeidung von Ausgrabungen nach der Installation von RI
- Vermeidung der Installation von Rohren in der Nähe von RI
- Vermeidung von Säulenabständen $< 4 D$

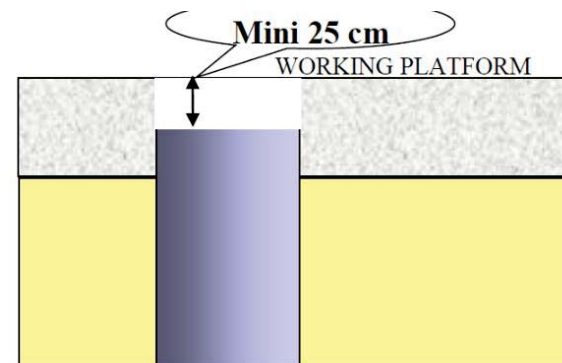
Problem:

Baustellenverkehr direkt auf dem RI-Kopf \rightarrow Abscheren



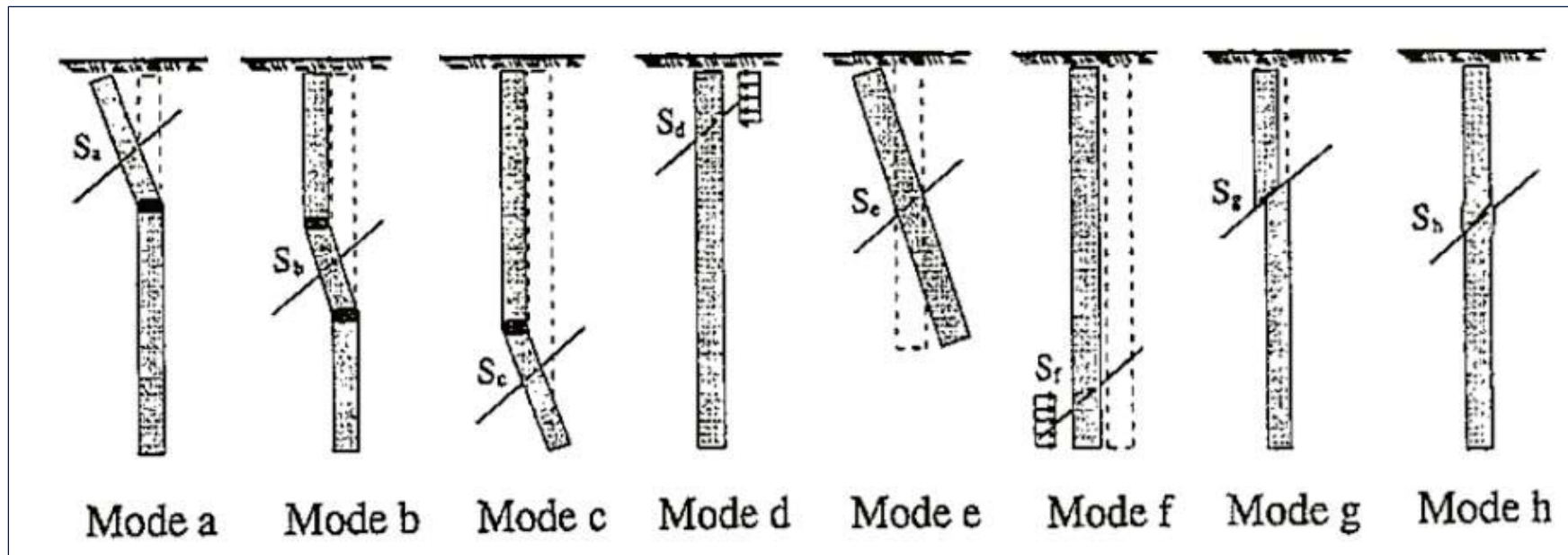
Lösung

Kopf im Frischbeton unter der Arbeitsebene kappen



3 Anwendungsgrenzen

Versagensmechanismen Geländebruch (aktive Zone)



Versagensmechanismen (nach Kivelö, 1998)

- | | |
|----------------------------------|--|
| a) Abknicken des Traggliedkopfes | e) Verdrehen des gesamten Traggliedes |
| b) Abknicken des Mittelteils | f) Umfließen des Fußes |
| c) Abknicken des Fußes | g) Abscheren |
| d) Umfließen des Traggliedkopfes | h) Druckversagen des Traggliedmaterial |

▶ 3 Anwendungsgrenzen

Husumer Buckelpiste



Foto: dpa

3 Anwendungsgrenzen

Autobahnteilstück der A20 Richtung Rostock



(Foto: picture alliance / Bernd Wüstnec)

4 Zusammenfassung

- zusätzliche Interaktionen aus lastverteilender Tragschicht bei entkoppelten pfahlartigen Elementen
- Umlagerung der Lasten vom Boden auf die wesentlichen steiferen Stabilisierungssäulen
- Säulen zur Tragfähigkeitserhöhung oder Setzungsreduktion (Setzungsbremse)
- teilweise keine Normen für Bemessung und Ausführung
- Risikopotential abhängig vom System
- Steifigkeitsverhältnis von ca. 40-50 zwischen Säule und Boden ist als obere Grenze für Baugrundverbesserungsverfahren (z.B. Rüttelstopfverdichtung nach Priebe (1995)) anzusehen (Wehr & Sondermann, 2011)
- Vermeidung von Baustellenverkehr und Verdichtung direkt auf den Köpfen der RI

**Vielen Dank für Ihre
Aufmerksamkeit!**