



Infra-Webinar Strassen- und Tiefbau vom 20. November 2020

Mit der Zentrifuge geotechnischen Fragestellungen auf der Spur

Institut für Bauingenieurwesen IBI, Forschungsgruppe Geotechnik & Wasserbau

Prof. Dr. André Arnold

Dozent

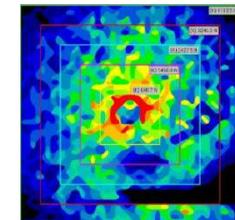
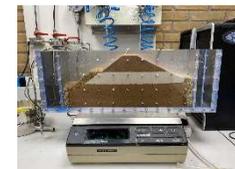
andre.arnold@hslu.ch

Horw / «zoom», 20.11.2020

Lucerne University of
Applied Sciences and Arts

**HOCHSCHULE
LUZERN**

Technik & Architektur



FH Zentralschweiz

Inhalt

- Weshalb und wozu eine Zentrifuge?
- Geotechnischen Fragestellungen auf der Spur..
 - Teil 1: äusserer Tragwiderstand eines Schraubpfahls
 - Teil 1: Durchströmung eine Dammes bei Hochwasser
 - Teil 1: Sohldruckverteilung unter einer Fundation
- Schlussfolgerung



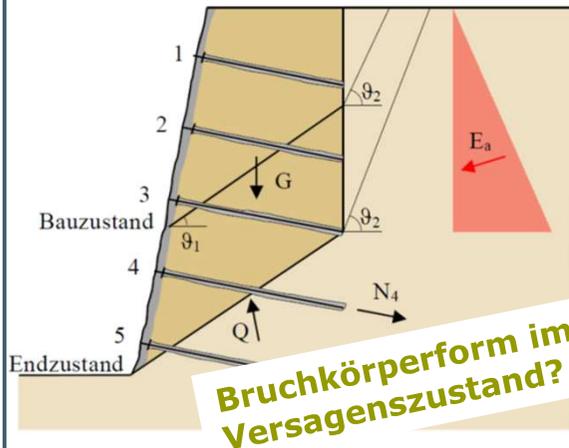
Weshalb und wozu eine Zentrifuge?



3, 20.11.2020

Weshalb und wozu eine Zentrifuge?

Verhalten eines Tragwerks unklar?

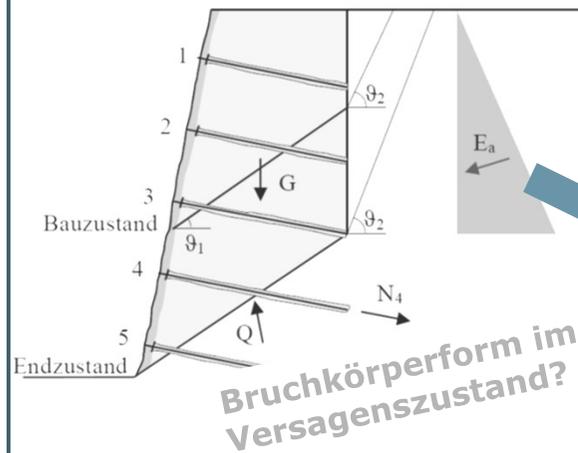


**Bruchkörperform im
Versagenszustand?**

Bemessungsmodell einer Vernagelung.
Bild: Vorlesung «Geotechnik 3» HSLU, A. Arnold

Weshalb und wozu eine Zentrifuge?

Verhalten eines Tragwerks unklar?



Bemessungsmodell einer Vernagelung.
Bild: Vorlesung «Geotechnik 3» HSLU, A. Arnold

Grossmassstäbliche Versuche...

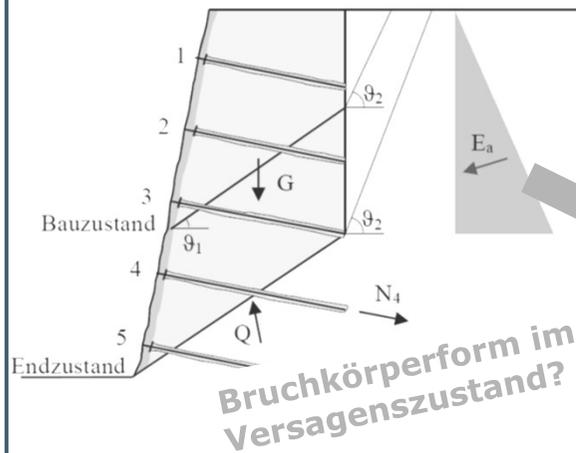


Bild 10. Versuchsaufbau für die Probelastung eines quadratischen Fundaments mit 0,5 m Einbindetiefe und 1 m² Grundfläche
Bild: Geotechnik Schweiz, Heft 22 (1958), Beitrag von Heinz Muhs



Weshalb und wozu eine Zentrifuge?

Verhalten eines Tragwerks unklar?



Bemessungsmodell einer Vernagelung.
Bild: Vorlesung «Geotechnik 3» HSLU, A. Arnold

**Bruchkörperform im
Versagenszustand?**

Grossmassstäbliche Versuche...



...teuer und aufwändig...

Bild 10. Versuchsaufbau für die Probelastung eines quadratischen Fundaments mit 0,5 m Einbindetiefe und 1 m² Grundfläche
Bild: Geotechnik Schweiz, Heft 22 (1958), Beitrag von Heinz Muhs

Modellversuche?



Wasserstand zu Beginn

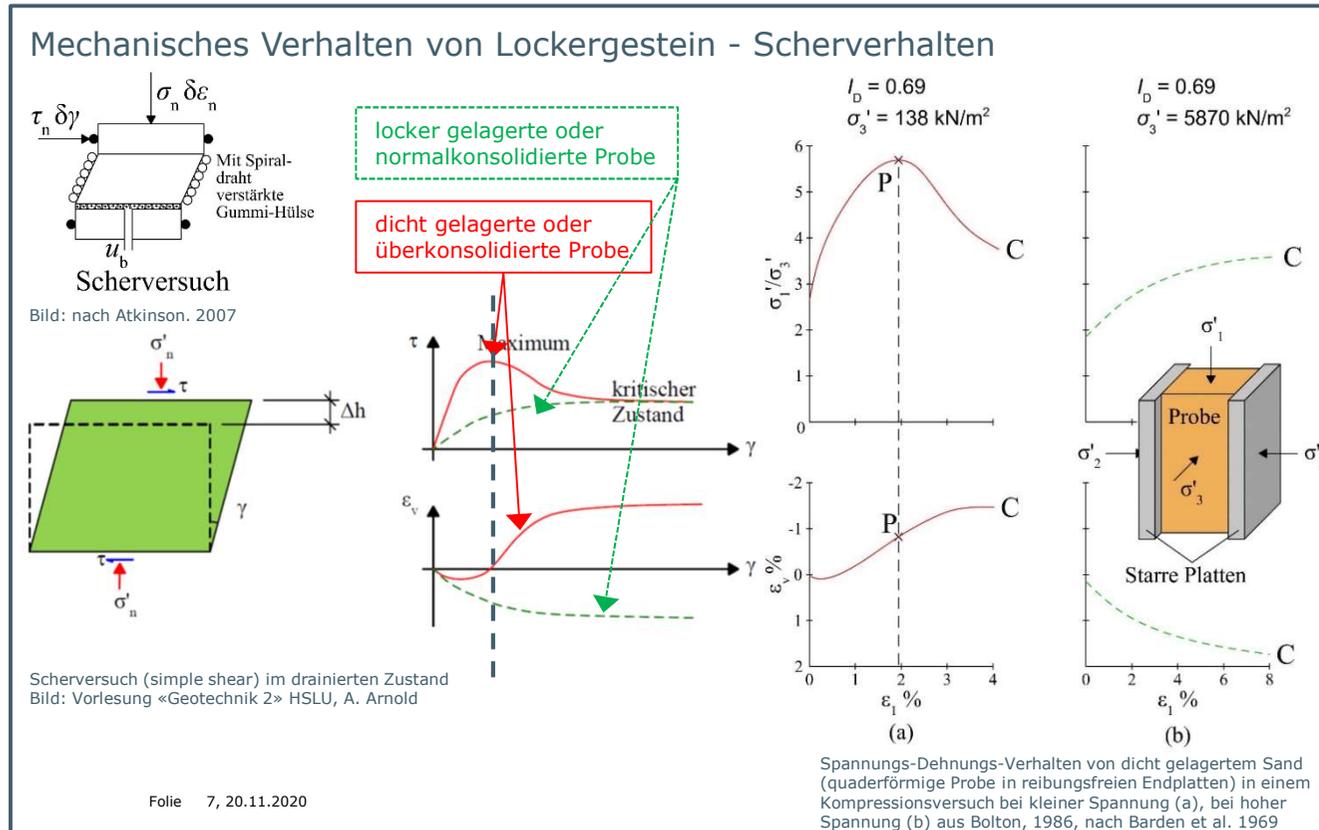
**...einfache Durchführung!
Aussagekraft?**

Demonstration des hydr. Grundbruchs in einem einfachen Modell
Bild: Laborpraktikum «Geotechnik 2» HSLU, A. Arnold



Bild: A. Arnold; Pfähelbelastungsversuch Bilten; 2020

Aussagekraft von Modellversuchen? ...kleiner Exkurs in die Bodenmechanik!



Fazit:

→ Festigkeit des Lockergesteins abhängig von: Lagerungsdichte; Normalspannung

→ Normalspannung entspricht Überlagerungsdruck!

→ bei kleinem Überlagerungsdruck wird Festigkeit des Lockergesteins überschätzt (bei kleineren Verformungen)

...deshalb Zentrifugenmodellversuche!

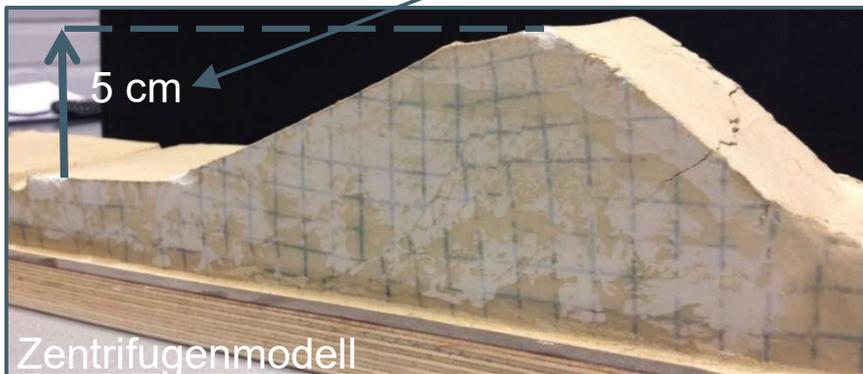
Realitätsnahe Modellierung des Überlagerungsdruckes...

Überlagerungsdruck σ_v im **Modell**:

$$\sigma_{v,Modell} = Dichte_{Modell} \cdot g \cdot N \cdot Tiefe_{Modell} = \rho \cdot g \cdot N \cdot \frac{t_{Prototyp}}{N}$$

$$\sigma_{v,Modell} = 18 \frac{kN}{m^3} \cdot 100 \cdot \frac{500 \text{ cm}}{100} = 90 \frac{kN}{m^2}$$

Modellgrösse (**N**)



Bilder: TU Delft



...deshalb Zentrifugenmodellversuche!

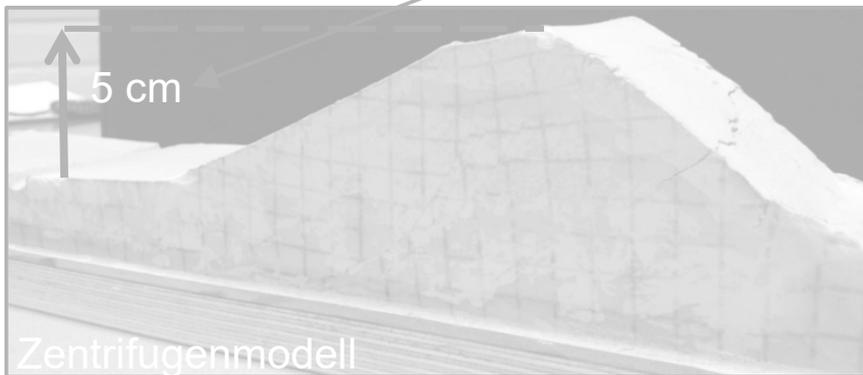
Realitätsnahe Modellierung des Überlagerungsdruckes...

Überlagerungsdruck σ_v im **Modell**:

$$\sigma_{v,Modell} = Dichte_{Modell} \cdot g \cdot N \cdot Tiefe_{Modell} = \rho \cdot g \cdot N \cdot \frac{t_{Prototyp}}{N}$$

$$\sigma_{v,Modell} = 18 \frac{kN}{m^3} \cdot 100 \cdot \frac{500 \text{ cm}}{100} = 90 \frac{kN}{m^2}$$

Modellgrösse (**N**)



Bilder: TU Delft

Überlagerungsdruck σ_v im **Prototyp**:

$$\sigma_{v,Prototyp} = Dichte_{Prototyp} \cdot g \cdot Tiefe_{Prototyp} = \rho \cdot g \cdot t$$

$$\sigma_{v,Prototyp} = 18 \frac{kN}{m^3} \cdot 5m = 90 \frac{kN}{m^2}$$



...deshalb Zentrifugenmodellversuche!

Realitätsnahe Modellierung des Überlagerungsdruckes...

Überlagerungsdruck σ_v im **Modell**:

$$\sigma_{v,Modell} = Dichte_{Modell} \cdot g \cdot N \cdot Tiefe_{Modell} = \rho \cdot g \cdot N \cdot \frac{t_{Prototyp}}{N}$$

$$\sigma_{v,Modell} = 18 \frac{kN}{m^3} \cdot 100 \cdot \frac{500 \text{ cm}}{100} = 90 \frac{kN}{m^2}$$

Überlagerungsdruck σ_v im **Prototyp**:

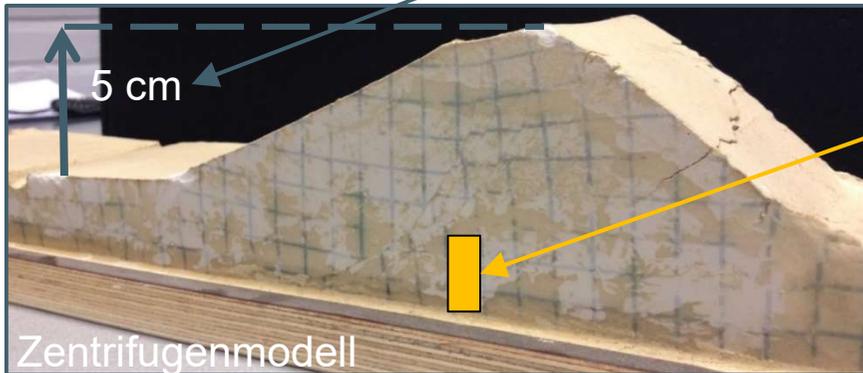
$$\sigma_{v,Prototyp} = Dichte_{Prototyp} \cdot g \cdot Tiefe_{Prototyp} = \rho \cdot g \cdot t$$

$$\sigma_{v,Prototyp} = 18 \frac{kN}{m^3} \cdot 5 \text{ m} = 90 \frac{kN}{m^2}$$

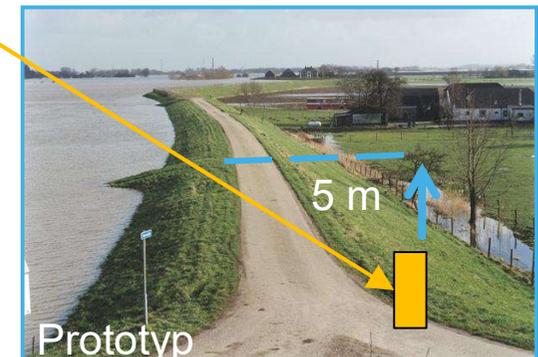
Modellgrösse (N)

Der Überlagerungsdruck σ_v ist gleich gross!

→ **spannungstreues Modell**



Bilder: TU Delft



Wie sieht eine typische Zentrifuge aus?

Armzentrifuge (z.B. TU Delft)

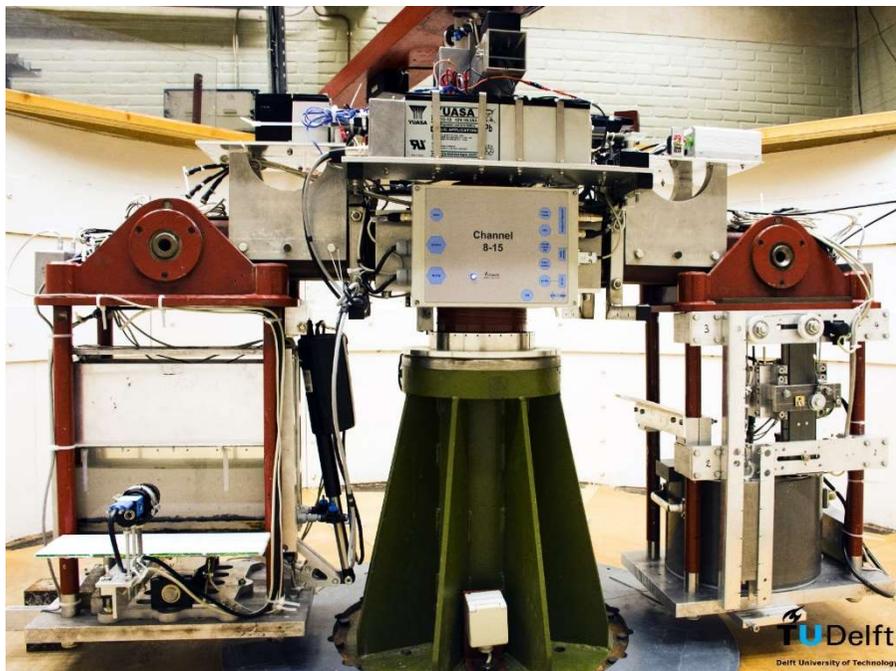


Bild: TU Delft
Folie 11, 20.11.2020

Trommelzentrifuge (z.B. ETH Zürich)

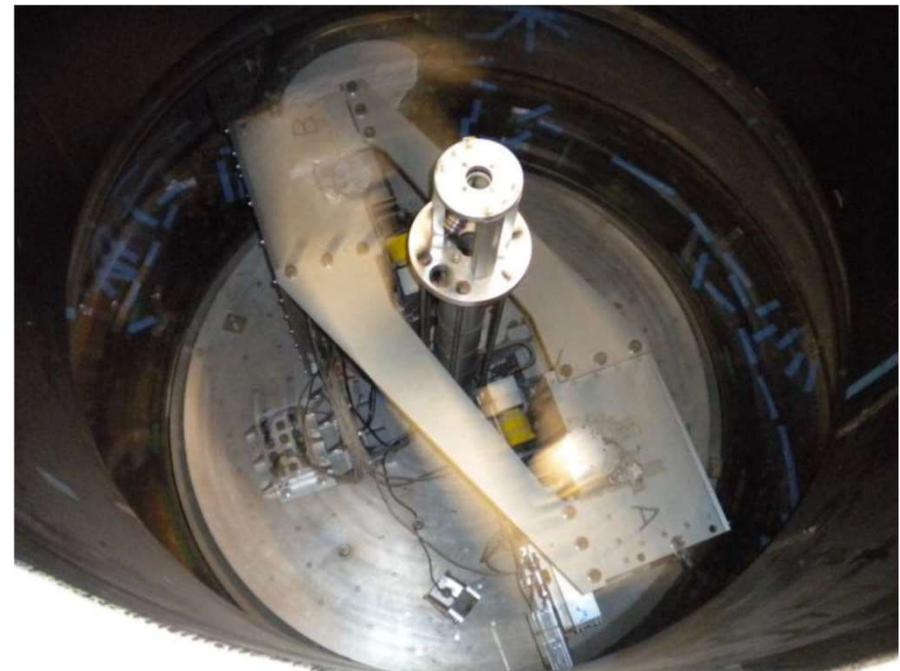


Bild: Arnold, 2011
(ETH Research Collection)

Wie sieht eine **typische Zentrifuge** aus?

Armzentrifuge «in action»

Video

Geotechnischen Fragestellungen auf der Spur...



13, 20.11.2020



Bilder: HSLU 2019; TU Delft & HSLU 2020

Geotechnischen Fragestellungen auf der Spur... Teil 1

Wie gross ist der äussere Tragwiderstand eines Schraubpfahls?

Möglichkeiten der Untersuchung:

- Statische Belastungsversuche (aufwändig)
- FE-Modellierung (Validierung der Resultate?)
- Modellierung in der Zentrifuge

- Vorteile der Modellierung in der Zentrifuge:
 - Direkter Vergleich zwischen Schraubpfahl und Pfahl mit glattem Schaft möglich
 - Durchführung einiger Versuche in kurzer Zeitdauer

- Nachteile der Modellierung in der Zentrifuge:
 - Kleine Modelle (des Pfahls) aufwändig zu produzieren
 - Wahl/Herstellung Bodenmaterial in Modell: Aufwand vs. Wiederholbarkeit

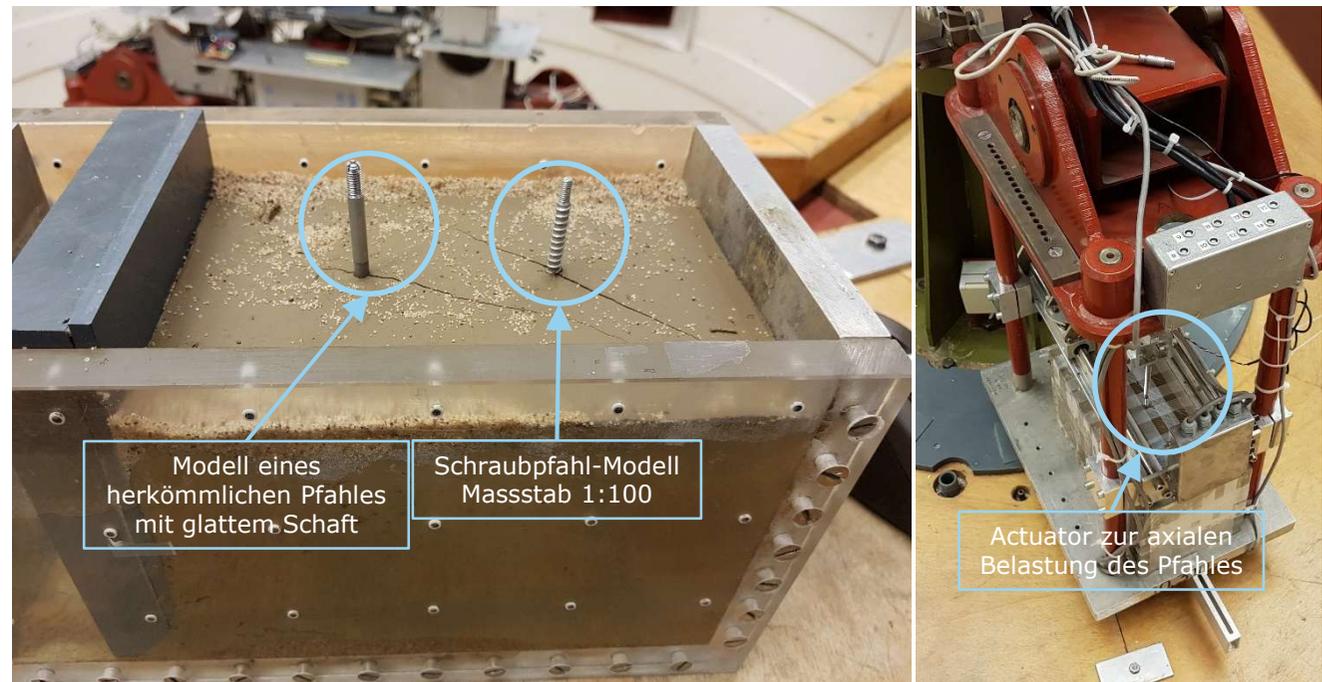


Geotechnischen Fragestellungen auf der Spur... Teil 1

Wie gross ist der äussere Tragwiderstand eines solchen Schraubpfahls?

Versuchsdurchführung

- Schraubpfahl und glatte Pfahl nebeneinander im selben Bodenmodell.
- Bodenproben annähernd gesättigt.
- Axiale Belastung (Wegsteuerung) und Messung der Kraft und des Weges.
- Versuchsdurchführung bei 100-facher Erdbeschleunigung (Verkürzung der Konsolidationsphase vor Pfahl-Belastung)
- Pfahllänge im Modell: 9 cm
Pfahllänge im Prototyp: 9 m

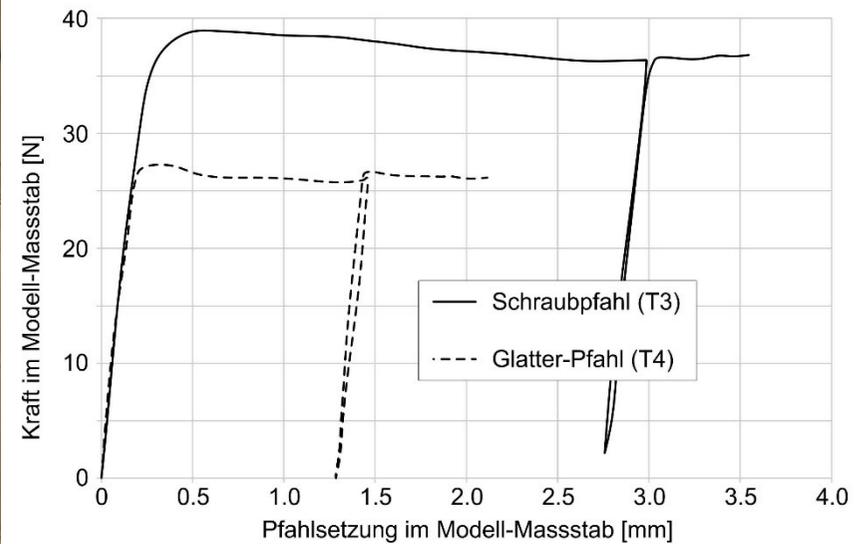
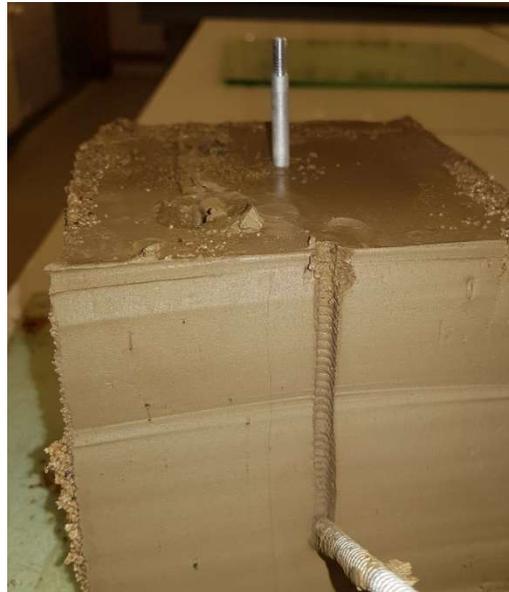


Geotechnischen Fragestellungen auf der Spur... Teil 1

Wie gross ist der äussere Tragwiderstand eines solchen Schraubpfahls?

Versuchsergebnisse:

- Schraubpfahl zeigt höhere äussere Tragfähigkeit als glatter Pfahl.



Geotechnischen Fragestellungen auf der Spur... Teil 2

Wie verhält sich ein Damm in einem Hochwasserfall?

- Untersuchung der Durchströmung des Dammes im Hochwasserereignis
- Untersuchung der Dammstabilität

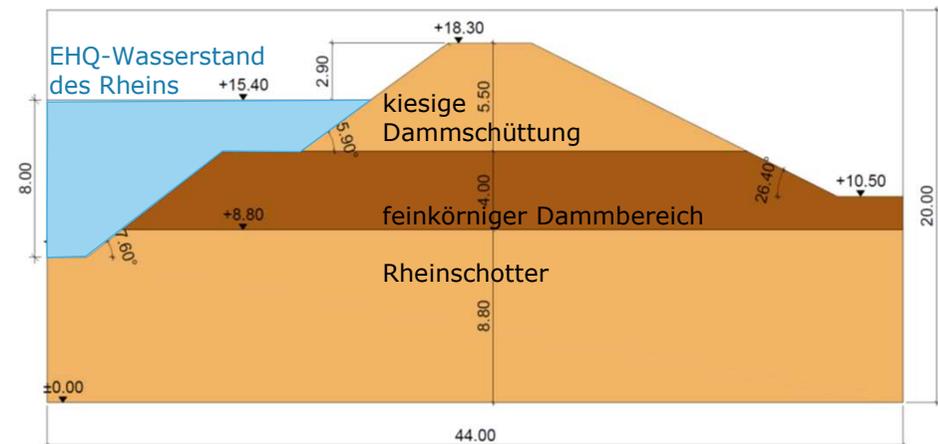


Hochwasser vom Oktober 2020
Bild: ABS FL



Rheindamm im Bereich Vaduz
Bild: ABS FL

Folie 17, 20.11.2020



Schnitt (idealisiert) durch Rheindamm auf Seite Fürstentum Liechtenstein

Geotechnischen Fragestellungen auf der Spur... Teil 2

Wie verhält sich ein Damm in einem Hochwasserfall?

- Herstellung des Damm-Modells im Massstab 1:100
- Versuch bei 100-facher Erdbeschleunigung
- Hochwasserereignis läuft im Versuch **10'000 mal schneller** (N^2) ab als in Wirklichkeit:

3 Tage in 26 Sekunden!

- Mess-Systeme:
 - Porenwasserdruckgeber im Damm-Modell
 - PIV-Kamera

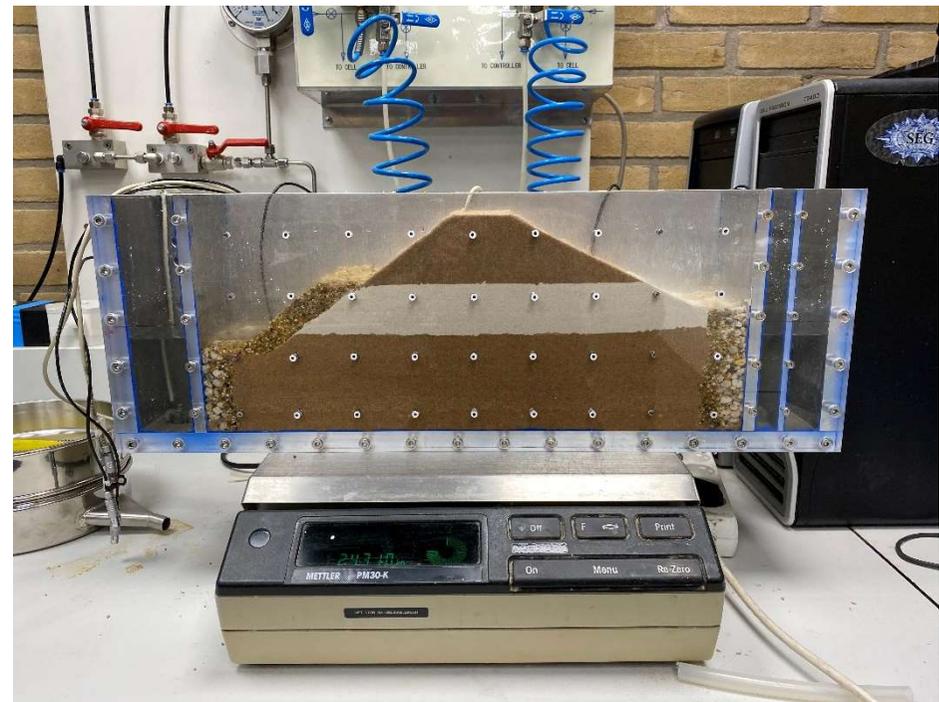


Bild: TU Delft & HSLU 2020

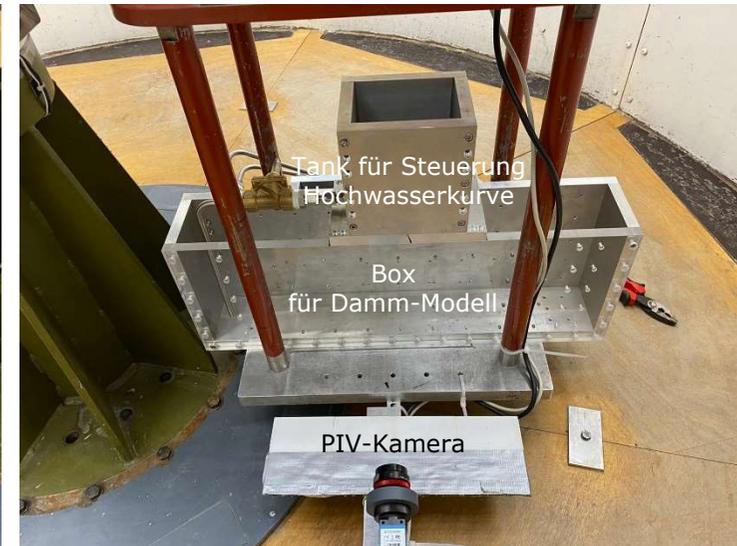
Geotechnischen Fragestellungen auf der Spur... Teil 2

Wie verhält sich ein Damm in einem Hochwasserfall?

- Aufbau des Modells:



Rückseite der Versuchsbox



Vorderseite der Versuchsbox

Geotechnischen Fragestellungen auf der Spur... Teil 2

Wie verhält sich ein Damm in einem Hochwasserfall?

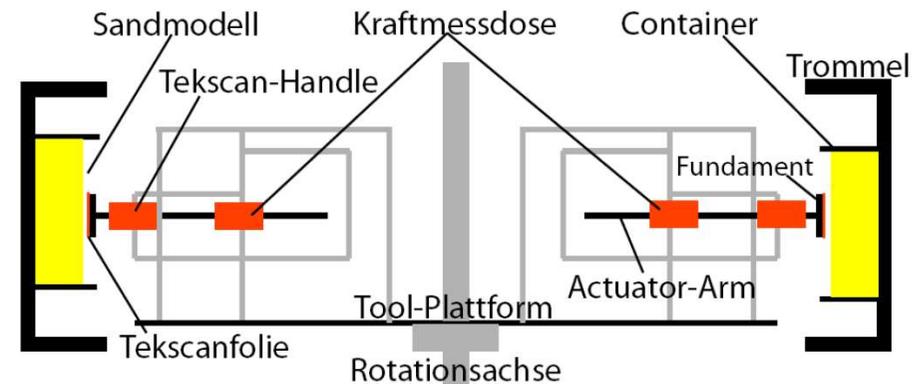
Video

Geotechnischen Fragestellungen auf der Spur... Teil 3

Wie trägt eine Flachfundation die Lasten auf den Baugrund ab?

Experimentelle Bestimmung der Sohldruckverteilung:

Fundament-Seitenlänge im Modell: 11.2 cm
Fundament-Seitenlänge im Prototyp: 5.6 m



Geotechnischen Fragestellungen auf der Spur... Teil 3

Wie trägt eine Flachfundation ihre Lasten auf den Baugrund ab?

Experimentelle Bestimmung der Sohldruckverteilung:

Schlaffes Verhalten:

$$d_{\text{Modell}} = 4 \text{ mm}$$

$$K_s \approx 0.015$$

Starres Verhalten:

$$d_{\text{Modell}} = 12 \text{ mm}$$

$$K_s \approx 0.29$$

Definition der Systemsteifigkeit K_s (DIN 4018, 1981)

$$K_s = \frac{1}{12} \cdot \frac{E_b}{E_s} \cdot \left(\frac{d}{L}\right)^3$$

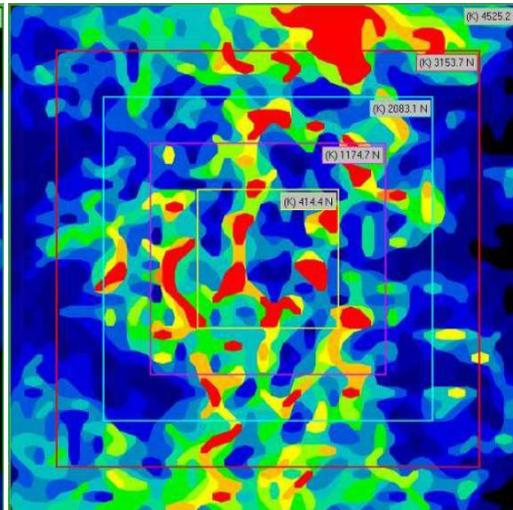
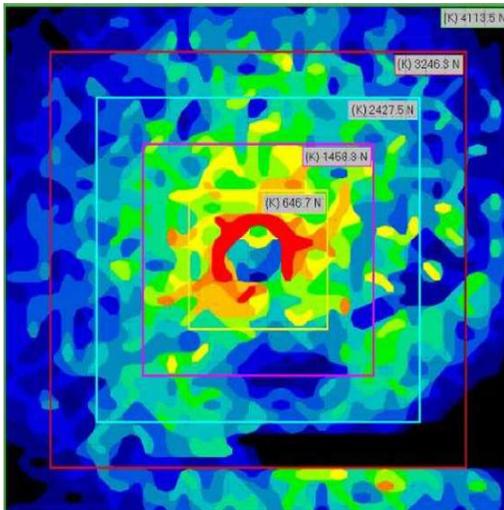
E_b : E-Modul Baustoff
 E_s : Steifemodul d. Bodens
 d : Fundationsdicke
 L : massg. Fundationslänge

Abgrenzung schlaffes/starres Verhalten (nach Meyerhof):

$K_s = 0 \rightarrow$ schlaff

$0.001 < K_s < 0.1$
 \rightarrow Zwischenbereich schlaff/starr

$K_s > 0.1 \rightarrow$ starres Verhalten



Geotechnischen Fragestellungen auf der Spur... Teil 3

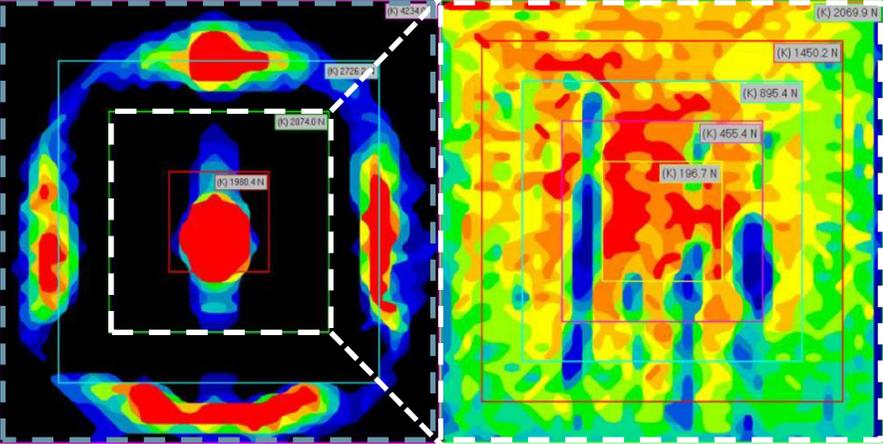
Wie trägt eine Flachfundation ihre Lasten auf den Baugrund ab?

Experimentelle Bestimmung der Sohldruckverteilung:

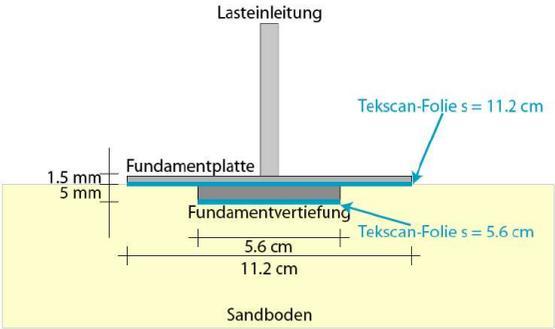
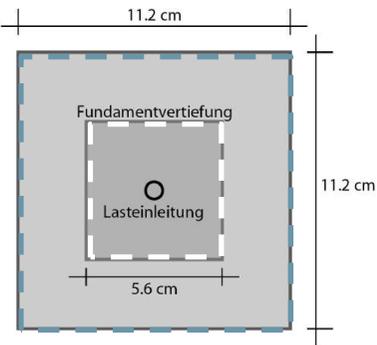
Schlaffes Verhalten:
 $K_s \approx 0.05$



Bilder: Arnold, 2011
(ETH Research Collection)



Lastabtrag in der Vertiefung: ~49%

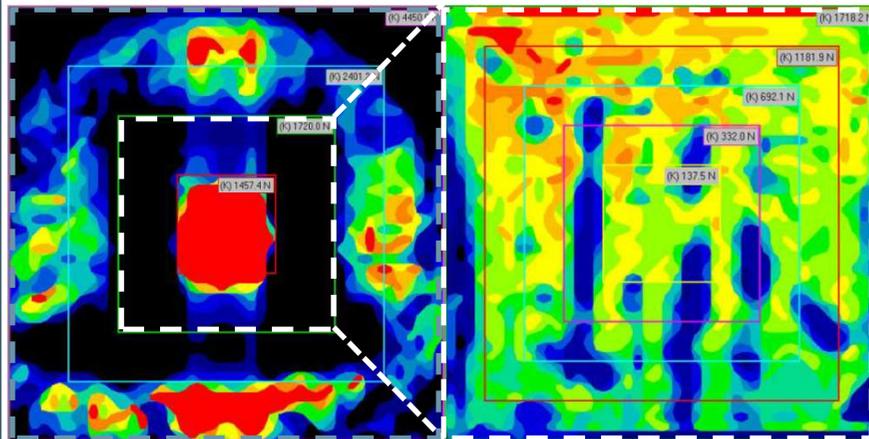


Geotechnischen Fragestellungen auf der Spur... Teil 3

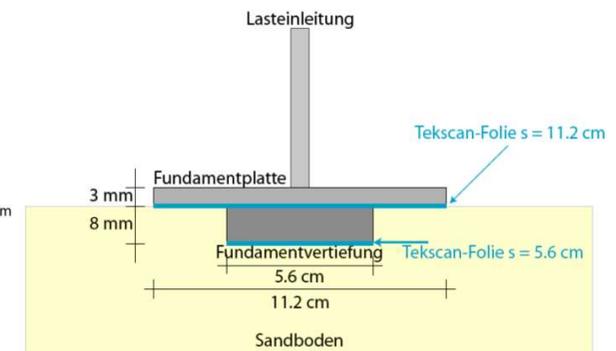
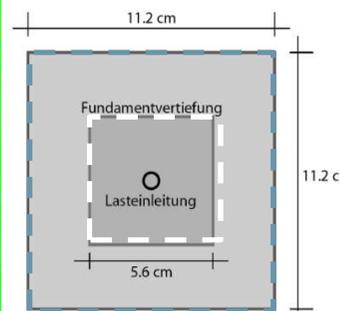
Wie trägt eine Flachfundation ihre Lasten auf den Baugrund ab?

Experimentelle Bestimmung der Sohldruckverteilung:

Starres Verhalten:
 $K_s > 0.1$



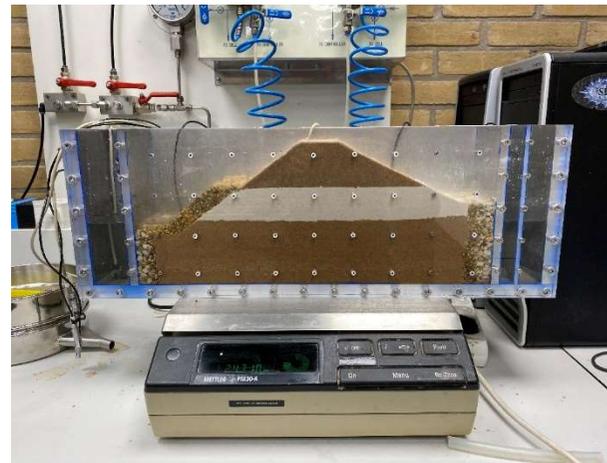
Lastabtrag in der Vertiefung: ~39%

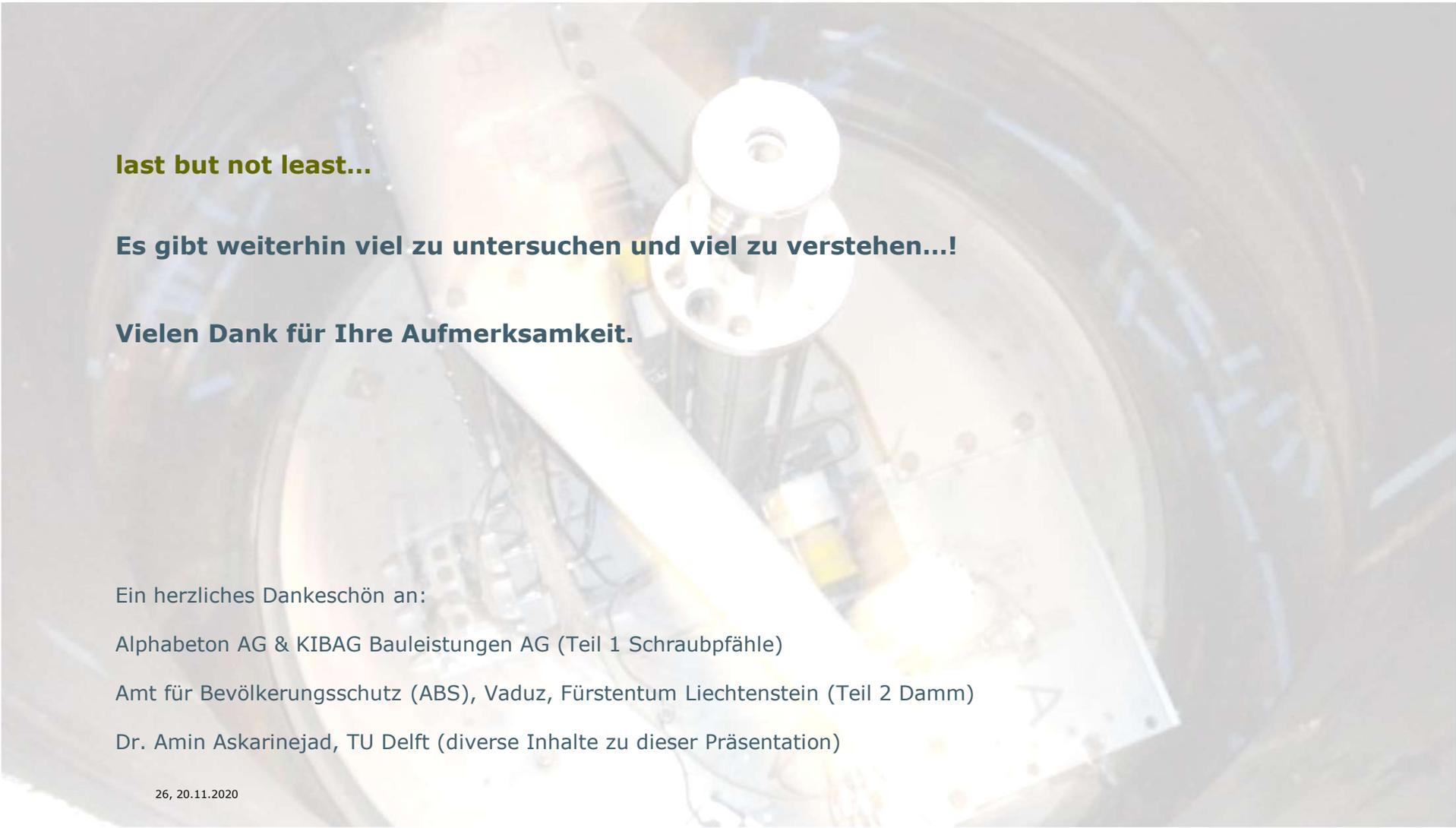


Bilder: Arnold, 2011
(ETH Research Collection)

Schlussfolgerung

Mit Zentrifugenmodellversuchen lassen sich geotechnische Fragestellungen bei **vertretbarem Aufwand** und in **grösserer Versuchszahl** bei **realitätsnahen Bedingungen** untersuchen!





last but not least...

Es gibt weiterhin viel zu untersuchen und viel zu verstehen...!

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit.

Ein herzliches Dankeschön an:

Alphabeton AG & KIBAG Bauleistungen AG (Teil 1 Schraubpfähle)

Amt für Bevölkerungsschutz (ABS), Vaduz, Fürstentum Liechtenstein (Teil 2 Damm)

Dr. Amin Askarinejad, TU Delft (diverse Inhalte zu dieser Präsentation)

Bildnachweis

- Folie 5: Geotechnik Schweiz, Heft 22 (1958), Beitrag von Heinz Muhs, www.geotechnikschweiz.ch.
- Folie 7: Atkinson, J. (2007). The Mechanics of Soils and Foundations. Taylor & Francis, London/New York.
- Bolton, M.D. (1986). The strength and dilatancy of sands. *Géotechnique* 36 (1). p. 65-78.
- Barden, L., Ismail, H. & Tong, P. (1969). Plane strain deformation of granular material at low and high pressures. *Géotechnique* 19 (4). p. 441-452.
- Folien 11, 21 bis 24: Arnold, A. (2011). Tragverhalten von nicht starren Flachfundationen unter Berücksichtigung der lokalen Steifigkeitsverhältnisse. ETH-Dissertation Nr. 19516. vdf Hochschulverlag AG (www.research-collection.ethz.ch).
- Folie 16: Arnold, A. & Askarinejad, A. (2020). Behaviour of prefabricated concrete screw piles under axial loading. 4th European Conference on Physical Modelling in Geotechnics. Lulea, Schweden. p. 287-288. www.ltu.se/research/subjects/Geotechnical-engineering/.