



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

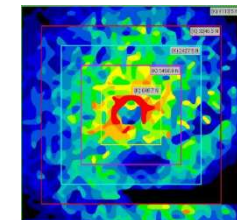
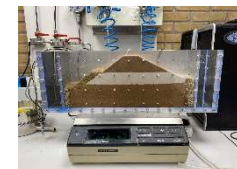
andre.arnold@hslu.ch

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



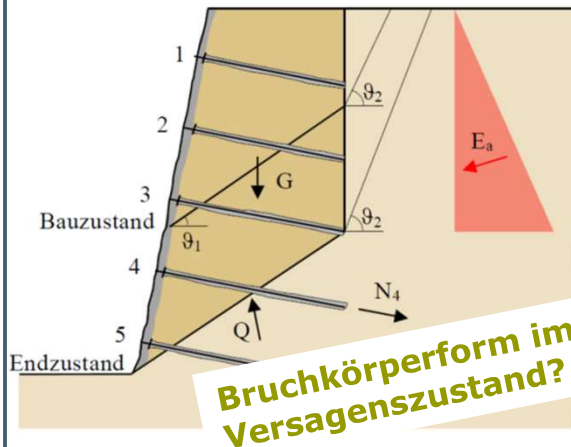
**Weshalb und wozu eine Zentrifuge?**



3, 20.11.2020

## Weshalb und wozu eine Zentrifuge?

Verhalten eines Tragwerks unklar?

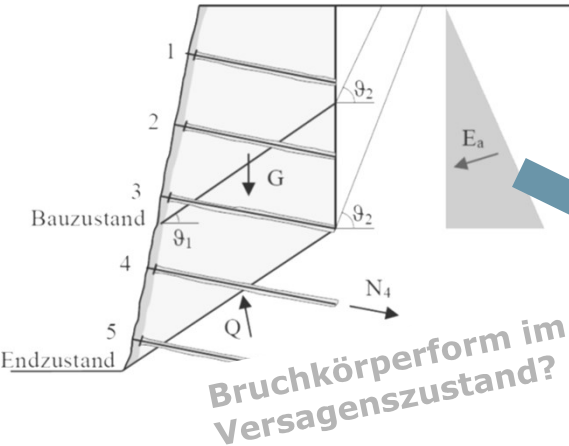


**Bruchkörperform im  
Versagenszustand?**

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...



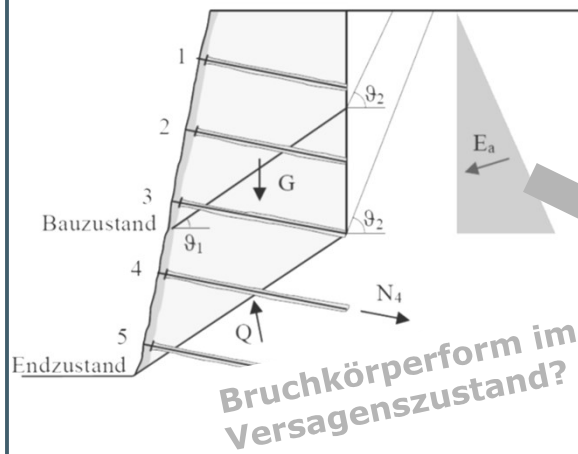
Bild 10. Versuchsaufbau für die Probelastung eines quadratischen Fundaments mit 0.5 m Einbindetiefe und 1 m<sup>2</sup> Grundfläche  
Bild: Geotechnik Schweiz, Heft 22 (1958), Beitrag von Heinz Muhs





## Weshalb und wozu eine Zentrifuge?

Verhalten eines Tragwerks unklar?



**Bruchkörperform im Versagenszustand?**

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

Grossmassstäbliche Versuche...



**...teuer und aufwändig...**

Bild 10. Versuchsaufbau für die Probelastung eines quadratischen Fundaments mit 0,5 m Einbindetiefe und 1 m<sup>2</sup> Grundfläche  
Bild: Geotechnik Schweiz, Heft 22 (1958), Beitrag von Heinz Muhs

Modellversuche?



Wasserstand zu Beginn

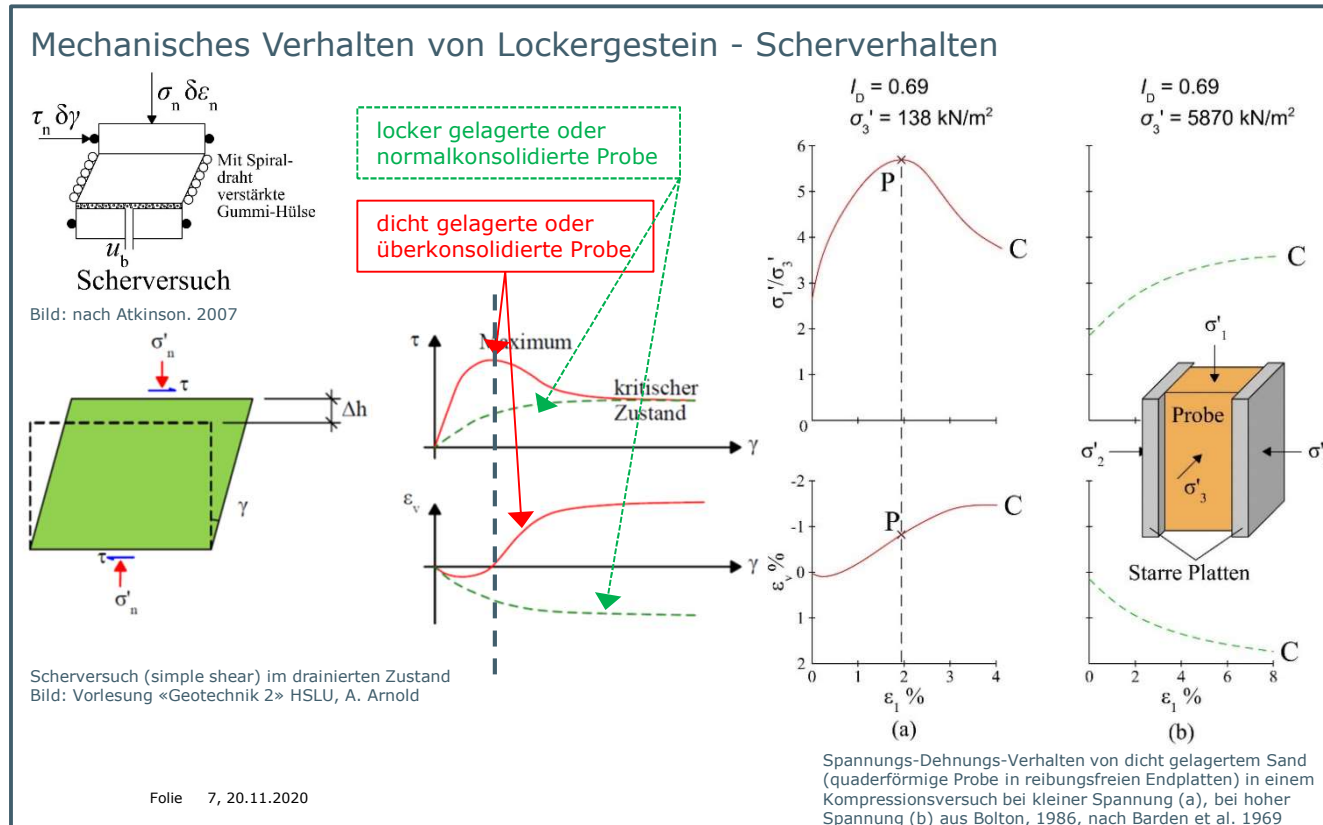
**...einfache Durchführung!  
Aussagekraft?**

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!

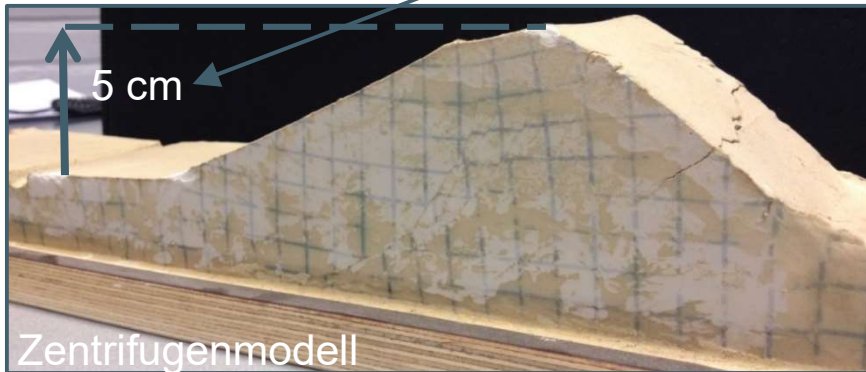
Realitätsnahe Modellierung des Überlagerungsdruckes...

Überlagerungsdruck  $\sigma_v$  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!

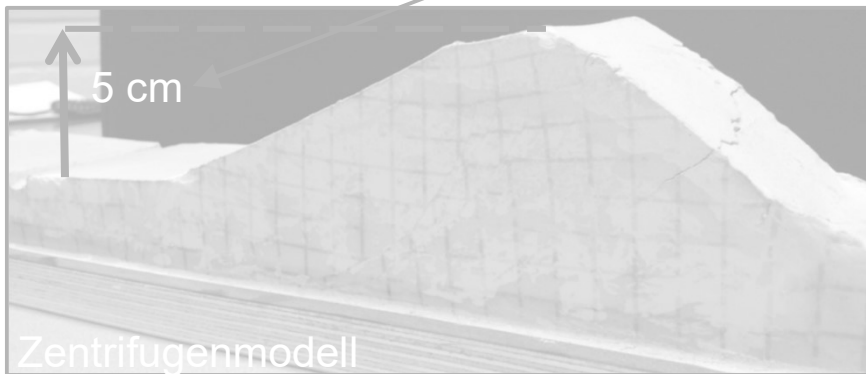
Realitätsnahe Modellierung des Überlagerungsdruckes...

Überlagerungsdruck  $\sigma_v$  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  $\sigma_v$  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  $\sigma_v$  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  $\sigma_v$  im **Prototyp**:

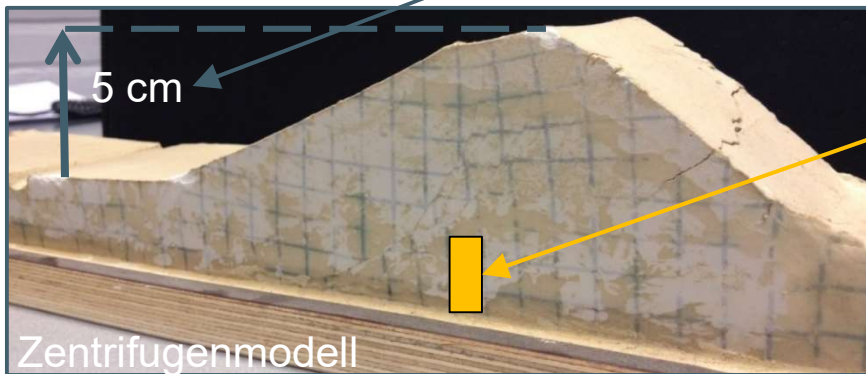
$$\sigma_{v,Prototyp} = Dichte_{Prototyp} \cdot g \cdot Tiefe_{Prototyp} = \rho \cdot g \cdot t$$

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

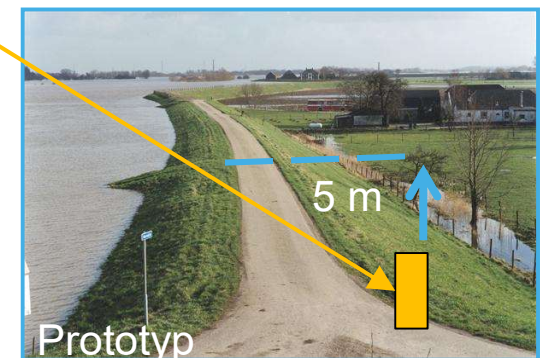
Modellgrösse (N)

Der Überlagerungsdruck  $\sigma_v$  ist gleich gross!

→spannungstreues Modell



Bilder: TU Delft



## Wie sieht eine **typische Zentrifuge** aus?

Armzentrifuge (z.B. TU Delft)

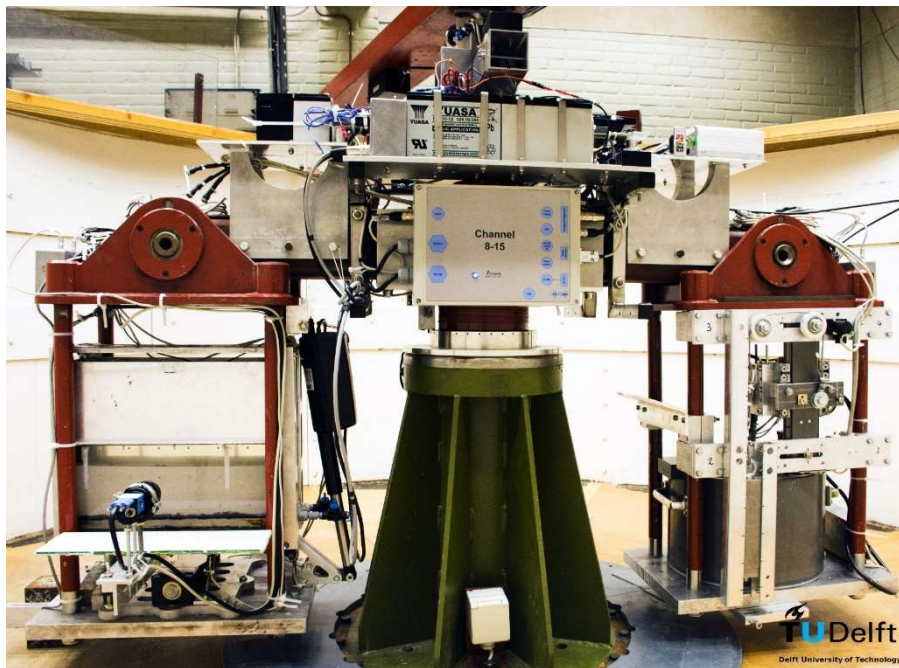


Bild: TU Delft  
Folie 11, 20.11.2020

Trommelzentrifuge (z.B. ETH Zürich)

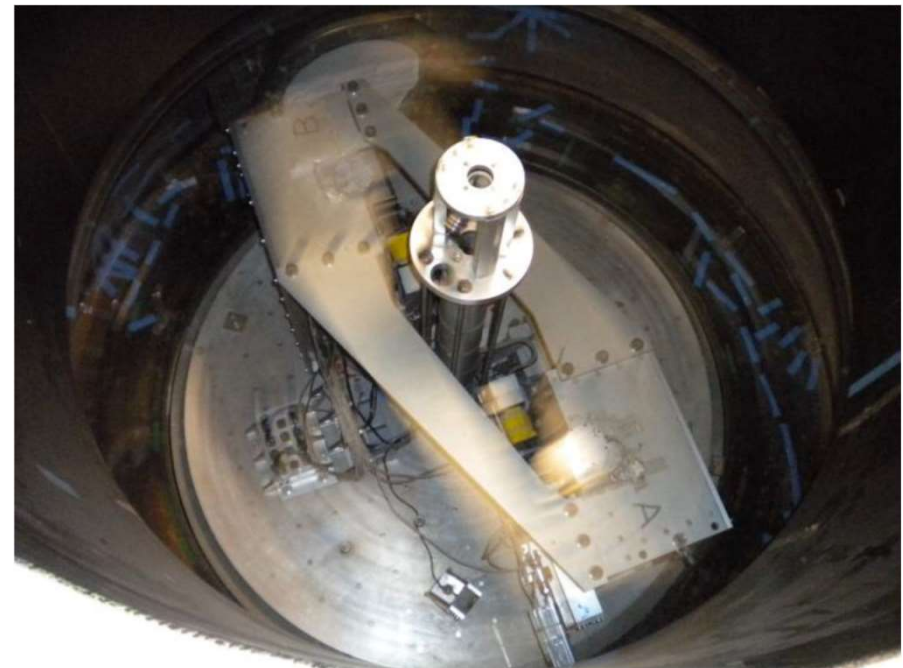


Bild: Arnold, 2011  
(ETH Research Collection)

## 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



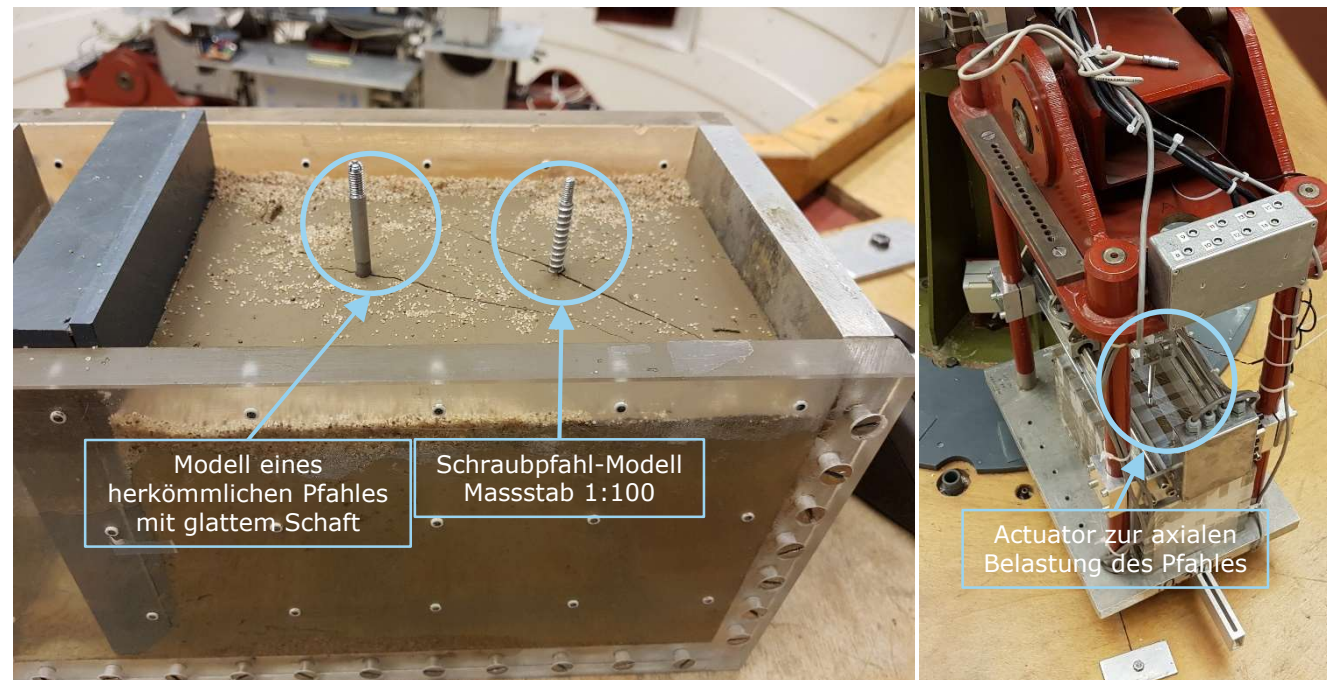


## Geotechnischen Fragestellungen auf der Spur... Teil 1

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

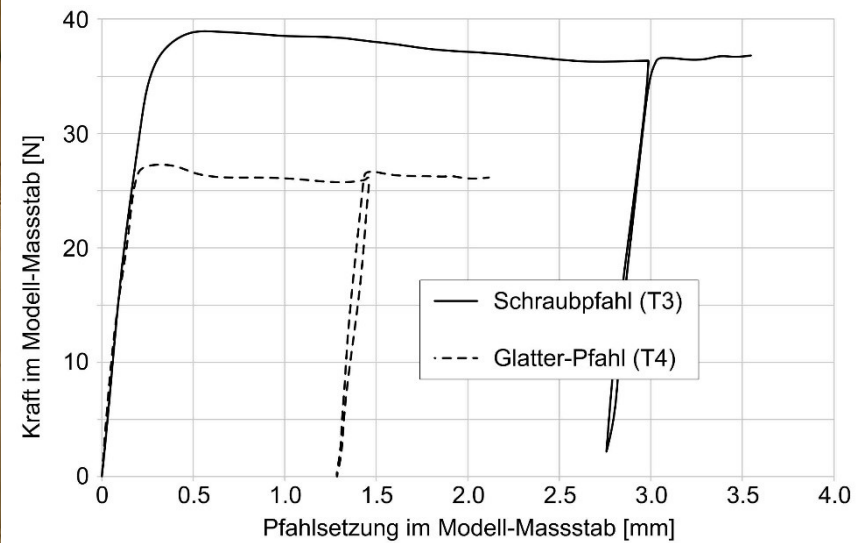
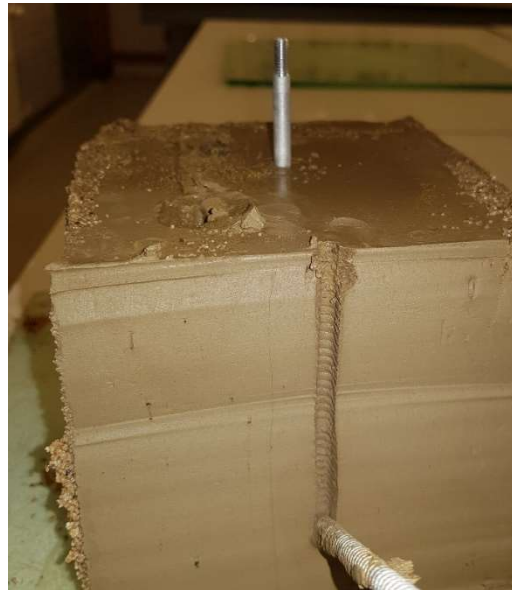


## Geotechnischen Fragestellungen auf der Spur... Teil 1

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

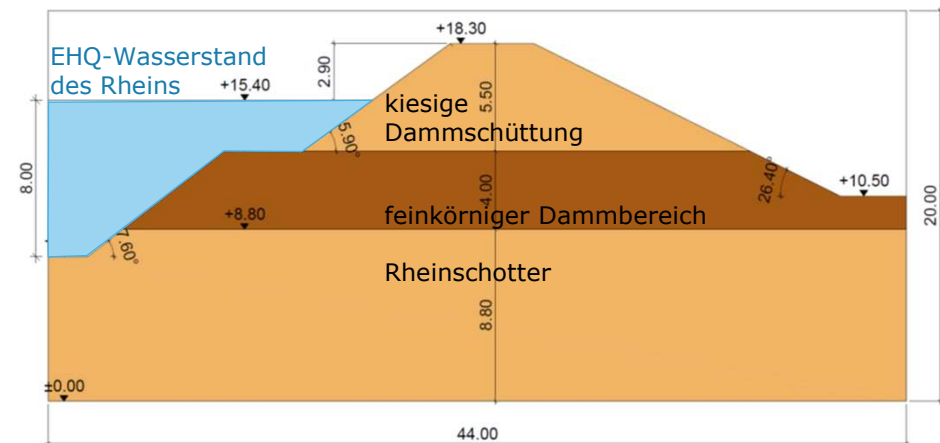


Hochwasser vom Oktober 2020  
Bild: ABS FL



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

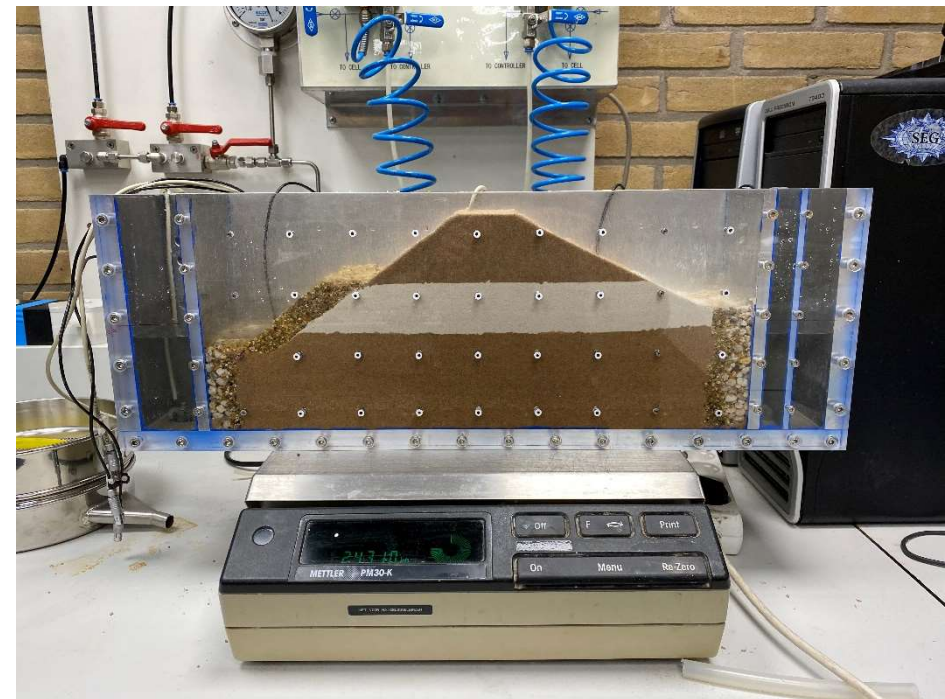


Bild: TU Delft & HSLU 2020



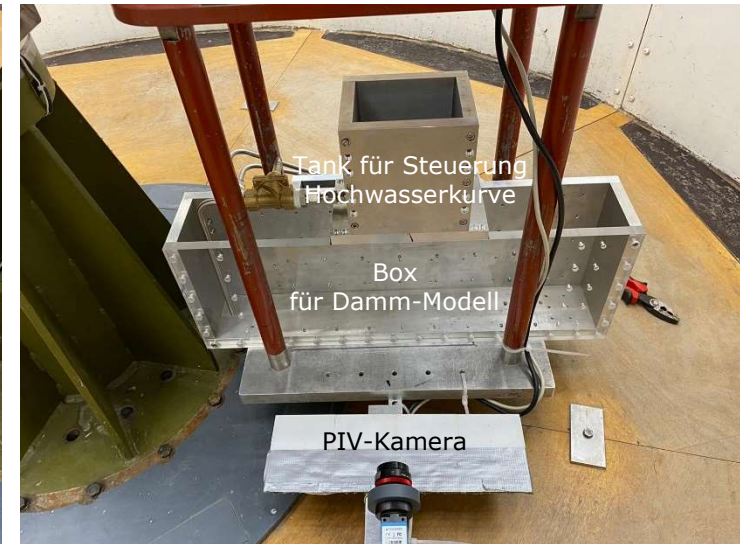
## Geotechnischen Fragestellungen auf der Spur... Teil 2

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**

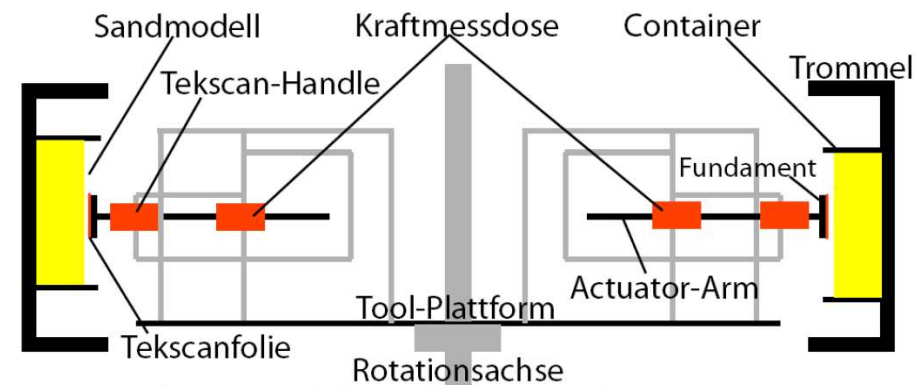


### Geotechnischen Fragestellungen auf der Spur... Teil 3

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)

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

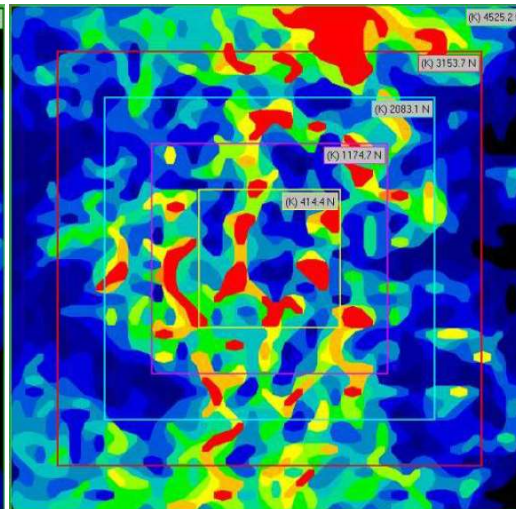
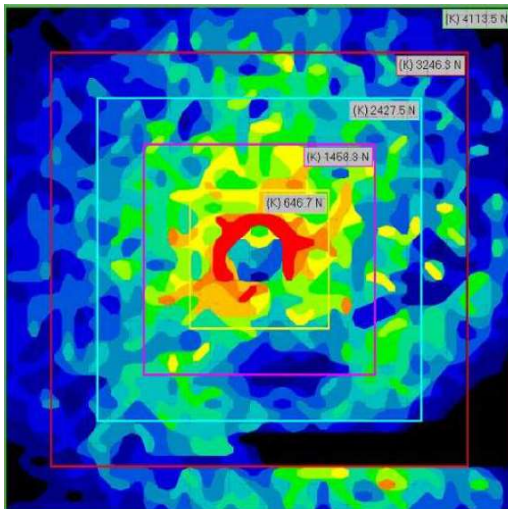
$E_b$ : E-Modul Baustoff  
 $E_s$ : Steifemodul d. Bodens  
 $d$ : Fundationsdicke  
 $L$ : massg. Fundationslänge

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?

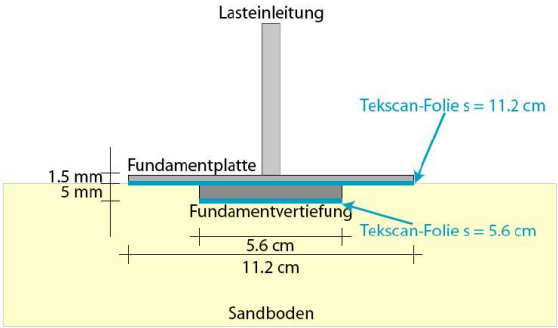
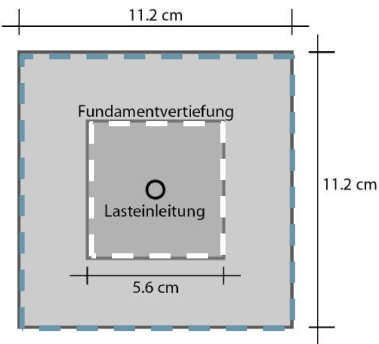
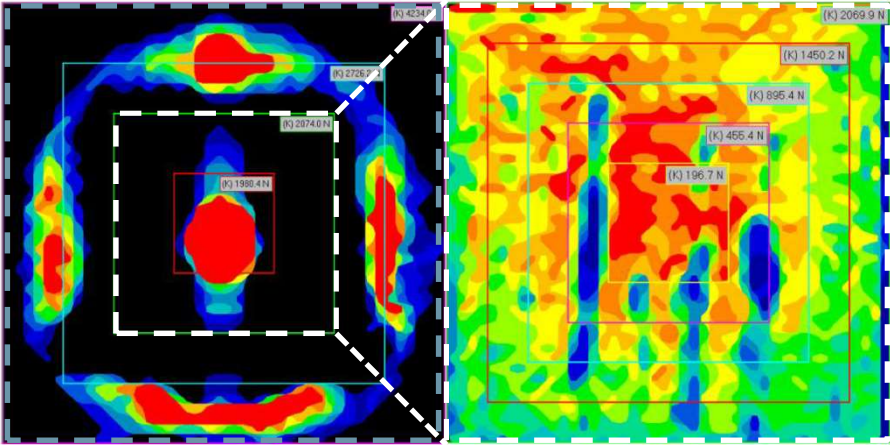
Experimentelle Bestimmung der Sohldruckverteilung:

Schlaffes Verhalten:  
 $K_s \approx 0.05$



Bilder: Arnold, 2011  
(ETH Research Collection)

Lastabtrag in der Vertiefung: ~49%

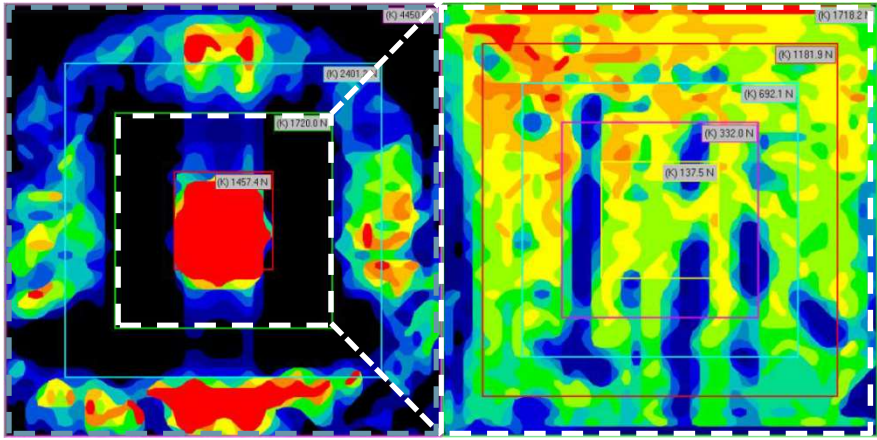


### Geotechnischen Fragestellungen auf der Spur... Teil 3

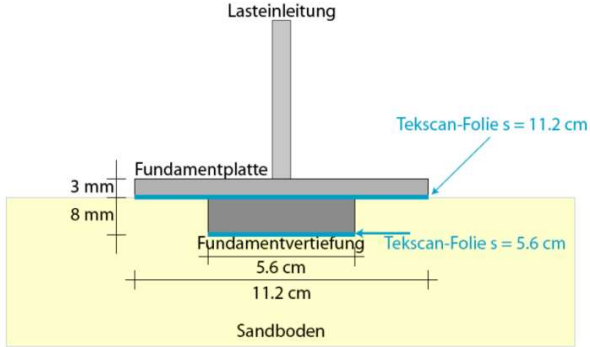
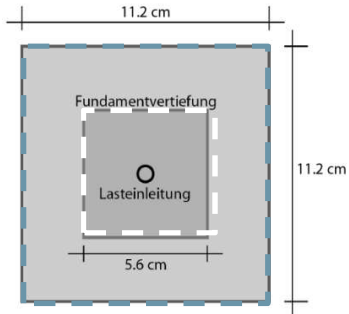
Wie trägt eine Flachfundation ihre Lasten auf den Baugrund ab?

Experimentelle Bestimmung der Sohldruckverteilung:

Starres Verhalten:  
 $K_s > 0.1$



Lastabtrag in der Vertiefung: ~39%

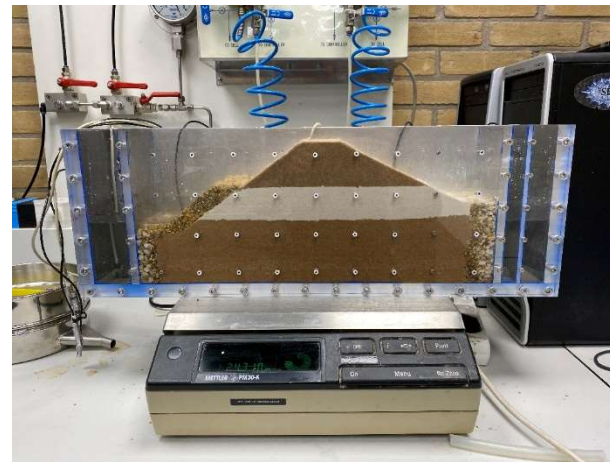


Bilder: Arnold, 2011  
(ETH Research Collection)



## 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](http://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](http://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/](http://www.ltu.se/research/subjects/Geotechnical-engineering/).