

# Ortsbruststabilität mit vorausseilenden Drainagen

Auszug aus der Dissertation  
«Static effects and aspects of feasibility and design of drainages in tunnelling»

Sara Zingg  
sara.zingg@lombardi.group

## Einleitung

- Herausforderungen beim Tunnelbau in wasserführendem Baugrund: Stabilität, Deformationen, Arbeitsbedingungen,...
- Zahlreiche Versagensfälle aus der Baupraxis bekannt, aber bislang wenig Forschung dazu



## Einleitung

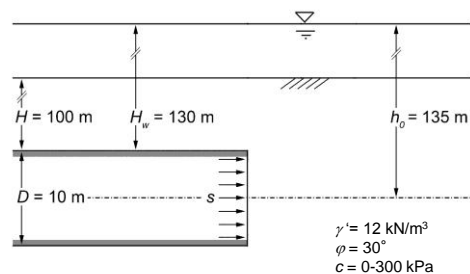
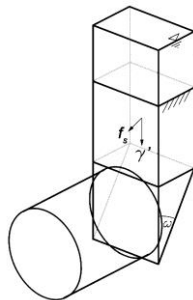
- Negative Auswirkung von Wasser auf Stabilität und Verformung im Tunnelbau:
  - Porenwasserdruck reduziert die effektiven Spannungen und damit den Scherwiderstand des Baugrunds
  - Gegen Tunnelöffnung gerichtete Sickerströmungskräfte wirken destabilisierend
- Vorseilende Drainage des Baugrunds erhöht Stabilität und verringert Deformationen
- Heute:  
Erhöhung der Ortsbruststabilität durch vorseilende Drainagen

30.11.2017

3

## Berechnungsmodell

- Grenzgleichgewicht für Versagensmechanismus aus Keil und Prisma, effektive Spannungen (Anagnostou & Kovári, 1996)
- Berücksichtigung der Sickerströmungskräfte aus numerischer 3D-Berechnung (FEM Code Comsol)



$\gamma' = 12 \text{ kN/m}^3$   
 $\varphi = 30^\circ$   
 $c = 0-300 \text{ kPa}$

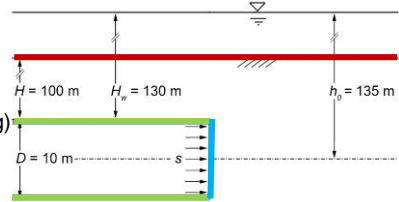
30.11.2017

4

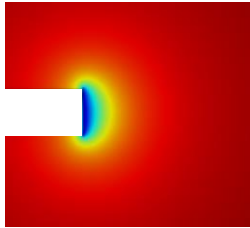
## Referenzfälle: ohne / ideale Drainage

- Randbedingungen:

- No flow (Rand undurchlässig)
- Initial hydraulic head (keine Absenkung)
- seepage face of atmospheric pressure



ohne Drainage



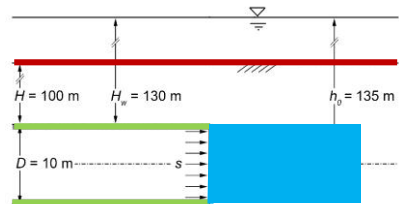
30.11.2017

5

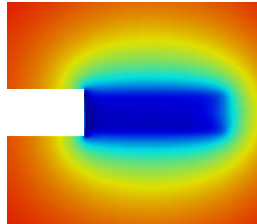
## Referenzfälle: ohne / ideale Drainage

- Randbedingungen:

- No flow
- Initial hydraulic head
- atmospheric pressure



ideale Drainage

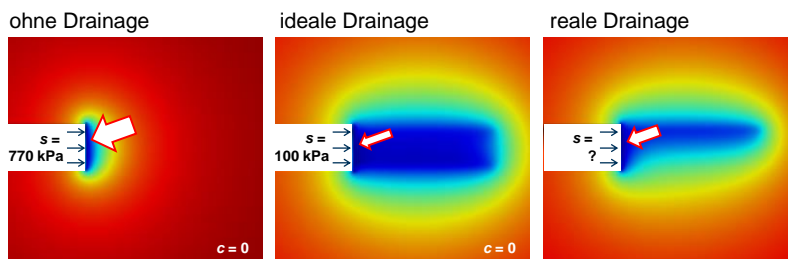


30.11.2017

6

## Referenzfälle: ohne / ideale Drainage

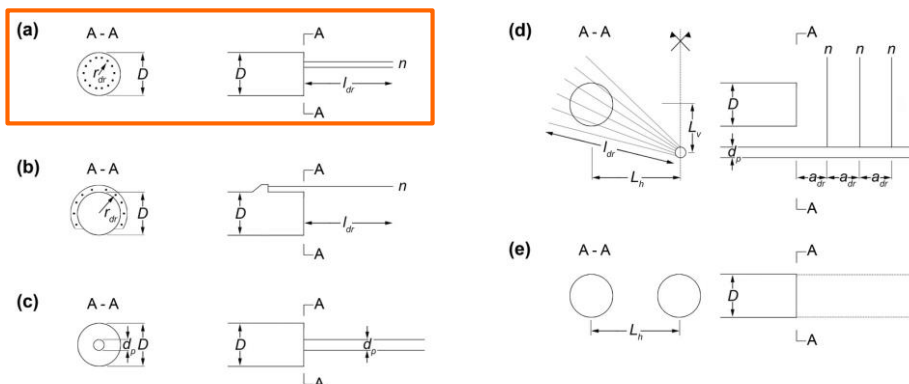
- Stabilisierender Effekt der idealen vorausseilenden Drainage
  - Reduktion des Porenwasserdrucks im Tunnelnahbereich OB
  - Hohe hydraulische Gradienten tief in Baugrund verschoben
  - Destabilisierende Sickerströmungskräfte kleiner
  - Erforderlicher Stützdruck deutlich kleiner
- Stützdruck beim realen Drainagelayout?



30.11.2017

7

## Untersuchte Drainageanordnungen

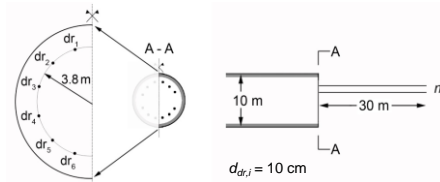
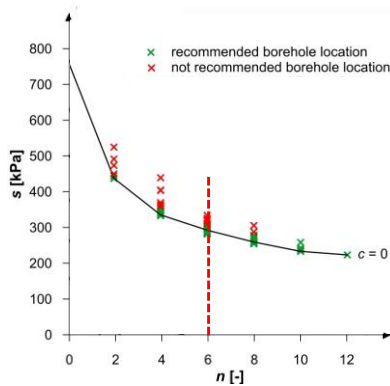


- Die Reichweite von realen Drainagemassnahmen sind durch geometrische Faktoren begrenzt (Drainageanordnung; Anzahl, Länge und Durchmesser der Bohrungen)

30.11.2017

8

## Anzahl und Ort der Bohrungen

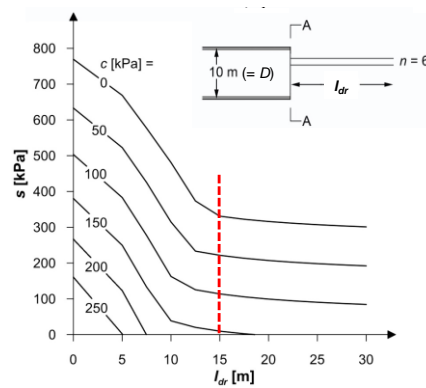
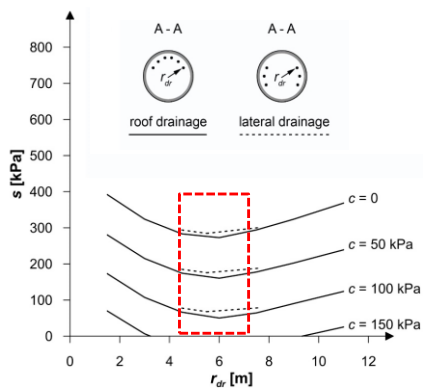


- Kaum Zusatznutzen für mehr als 6 Drainagebohrungen
- Genaue Bohrlochposition vernachlässigbar, sofern zwei Drainagen im oberen Drittel der OB liegen und die verbleibenden Drainagen gleichmässig verteilt sind

30.11.2017

9

## Radialer Abstand und Länge der Bohrungen



- Radialabstand  $r_{dr}$  nahe an Tunnelausbruchrand wählen
- Geringer Zusatznutzen für Drainagen länger als  $l_{dr} > 15$  m
- Empfehlung: bohre  $l_{dr} = 3D$  lange Drainagen alle  $1.5D$

30.11.2017

10

## Dimensionierungs-Gleichung

- Stützdruck  $\bar{s}$  ( $= s/\gamma'D$ ) ist abhängig von der Drainagenanordnung (spezifische Geometrie),  $\varphi$ ,  $\gamma_{ch}$ ,  $H$ , und ist nicht-linear in  $\bar{c}$  ( $= c/\gamma'D$ ) und  $\bar{h}_0$  ( $= h_0\gamma_w/\gamma'D$ )
- Für alle Drainagenanordnungen ist eine Reduktion der Parameter möglich für nicht-oberflächennahe Tunnel (Überlagerung  $T > 5D$ ):

$$\bar{s} = N_\gamma(\varphi, \bar{c}, \bar{h}_0) - N_c(\varphi, \bar{c}, \bar{h}_0)\bar{c} + N_h(\varphi, \bar{c}, \bar{h}_0)\bar{h}_0$$

- Umfassende Parameterstudie zeigt, dass Linearisierung in  $\bar{c}$  und  $\bar{h}_0$  möglich ist:

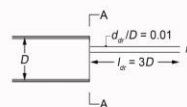
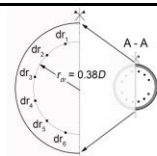
$$\bar{s} = F_0(\varphi) - F_1(\varphi)\bar{c} + (F_2(\varphi) - F_3(\varphi)\bar{c})\bar{h}_0$$

- Koeffizienten  $F_0 - F_3$  bestimmt mittels curve-fitting auf die Resultate der Parameterstudie für sämtliche eingangs gezeigten Drainagenanordnungen
- Nomogramme liefern die Werte der Koeffizienten für jede Drainagenanordnung

30.11.2017

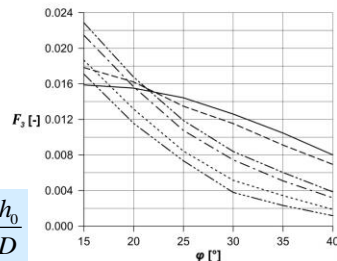
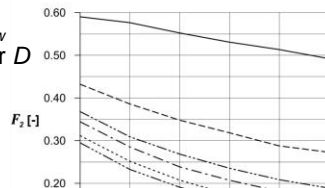
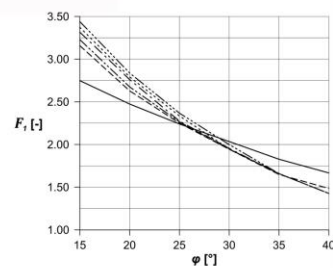
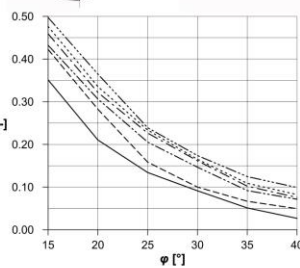
11

## Nomogramme



Legend	
—	$n = 0$
- - -	$n = 2$ ( $dr_2$ )
· · ·	$n = 4$ ( $dr_1, dr_2$ )
- · -	$n = 6$ ( $dr_1, - dr_2$ )
· - ·	$n = 8$ ( $dr_1, dr_2, dr_3, dr_4$ )
- · - ·	$n = 10$ ( $dr_1, - dr_2, dr_3$ )

- Drainagenanordnung
- Koeffizienten  $F_0 - F_3$ :  
Geometrie (Anzahl,  $r_c$  [...])  
Ort, ...)  
Reibungswinkel  $\varphi$
- Nötige Parameter:  
Kohäsion  $c$   
Wassersäule  $h_0$   
Raumgewicht  $\gamma'$ ,  $\gamma_w$   
Tunneldurchmesser  $D$

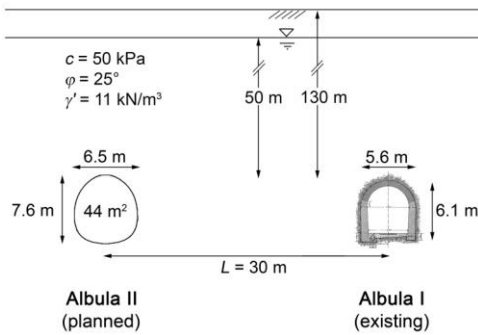


$$\frac{s}{\gamma'D} = F_0 - F_1 \frac{c}{\gamma'D} + \left( F_2 - F_3 \frac{c}{\gamma'D} \right) \frac{\gamma_w h_0}{\gamma'D}$$

30.11.2017

12

# Anwendungsbeispiel Albula



- Neuer Eisenbahntunnel Albula II parallel zum existierenden Albula I
- Ortsbrustversagen während Bau vom Albula II in "schwimmendem Gebirge"
- Ortsbrust stabil unter Berücksichtigung von vorseilenden Drainagen?

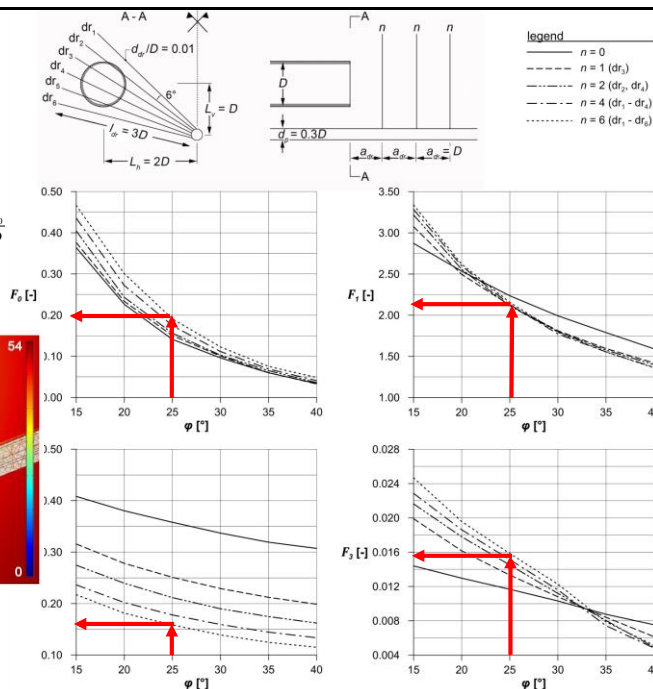
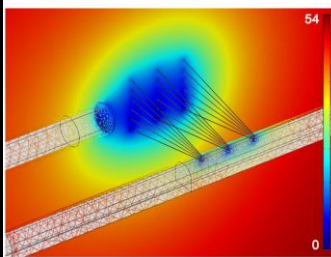
30.11.2017

13

# Nomogramme

$$\frac{s}{\gamma' D} = F_0 - F_1 \frac{c}{\gamma' D} + \left( F_2 - F_3 \frac{c}{\gamma' D} \right) \frac{\gamma_s J_0}{\gamma' D}$$

$s = 0$



30.11.2017

14

## Tatsächliche Umsetzung



30.11.2017

15

## Gängige, vereinfachende Annahmen

- Tendenz zur Überschätzung der Porenwasserdruckreduktion infolge vorauseilender Drainage:
- “Genügend Drainagebohrungen vorhanden”
  - Anordnung von wie vielen und wie langen Drainagen?
  - Ungleichförmig durchlässiger Baugrund?
  - Absenkung des Grundwasserspiegels?
  - Setzungen?
  - Abzuführende Wassermenge?
- “Wände der Drainagen haben atmosphärischen Druck”
  - Hydraulische Kapazität der Bohrungen?
  - Verwendung von Hüllrohren?
- “Genügend Zeit vorhanden”
  - Vorlaufzeit?

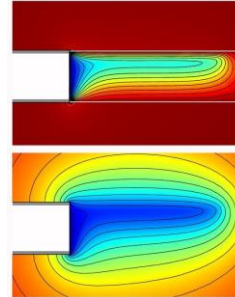
30.11.2017

16



## Ausblick: Drainage im inhomogen durchlässigen Baugrund

- Heterogener Baugrund:
  - Baugrund inhomogen durchlässig ("Aquifere und Aquitarde")
  - Drainagenwirkung örtlich begrenzt und überschätzt v.a. bei hydraulischer Barriere an/bei Ortsbrust
- Faustregel:
  - Drainagen möglichst in durchlässigen Lagen oder Schichten anordnen
  - Undurchlässige Schichten durchbohren
- Mehr dazu:
  - Zingg S., Anagnostou G. (2017). Tunnel face stability and the effectiveness of advance drainage measures in water-bearing ground of non-uniform permeability. Rock Mech Rock Eng, DOI 10.1007/s00603-017-1312-1

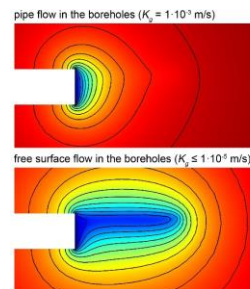


30.11.2017

17

## Ausblick: Berücksichtigung der hydraulischen Kapazität

- Druckabfluss in Drainagen:
  - Bei grossem Zufluss (hochdurchlässiger Baugrund, hoher Grundwasserspiegel) Wechsel von Freispiegel- zu Druckabfluss in Drainagen
  - Druck an der Bohrlochwand nicht mehr atmosphärisch: Drainagenwirkung überschätzt
- Faustregel:
  - Abflusskapazität ausreichend bis  $k \leq 10^{-5}$  m/s (Nomogramme anwendbar)
- Mehr dazu:
  - Zingg S., Anagnostou G. (2018). Effects of the hydraulic capacity of advance drainage boreholes on tunnel face stability. Tunnelling and Underground Space Technology, Volume 71, 518–530



30.11.2017

18

## Zusammenfassung

- Ortsbruststabilität:
  - Vorseilende Drainagen erhöhen Ortsbruststabilität deutlich
  - Empfehlungen zu Ort, Länge und Anordnung der Drainagebohrungen
  - Dimensionierungsgleichung mit Nomogrammen zur raschen und einfachen Beurteilung der Ortsbruststabilität für eine Vielzahl von vorseilenden Drainageanordnungen
- Ausführlich in Dissertation und ASTRA-Bericht:
  - Anwendungsgrenzen der Nomogramme (ungleichförmig durchlässiger Baugrund, hydraulische Kapazität der Drainagen, Hüllrohre, Vorlaufzeit, Zufluss-Menge, GWSp-Absenkung, Setzungen)
  - Interaktion von Injektionskörper und Drainagen
  - Belastung der Tunnelschale bei permanenter Drainage

30.11.2017

19

**Danke für die  
Aufmerksamkeit**

## Literatur zum Thema

(<http://www.tunnel.ethz.ch/personen/ehemalige-mitarbeiter/sara-zingg.html>)

- **Heute vorgestellt, Drainage im homogenen Baugrund:**  
Zingg S., Anagnostou G. (2016). An investigation into efficient drainage layouts for the stabilization of tunnel faces in homogeneous ground. *Tunnelling and Underground Space Technology*, Volume 58, 49-73
- **Druckabfluss in Drainagen:**  
Zingg S., Anagnostou G. (2018). Effects of the hydraulic capacity of advance drainage boreholes on tunnel face stability. *Tunnelling and Underground Space Technology*, Volume 71, 518–530
- **Ungleichförmig durchlässiger Baugrund:**  
Zingg S., Anagnostou G. (2017). Tunnel face stability and the effectiveness of advance drainage measures in water-bearing ground of non-uniform permeability. *Rock Mech Rock Eng*, DOI 10.1007/s00603-017-1312-1
- **Dissertation** (auch gratis zugänglich unter <https://www.research-collection.ethz.ch/handle/20.500.11850/122324>):  
Zingg S. (2016). Static effects and aspects of feasibility and design of drainages in tunnelling. Veröffentlichungen des Instituts für Geotechnik (IGT) an der ETH Zürich, 249, Zürich: vdf Hochschulverlag AG, 2017
- **ASTRA-Bericht:**  
Zingg S., Anagnostou G. (2016). Static effects, feasibility and execution of drainages in tunnelling. Forschungsprojekt FGU 2010/004. Bundesamt für Strassen (ASTRA), Forschungsbericht 1587