



TECHNISCHE UNIVERSITÄT  
BERGAKADEMIE FREIBERG  
Die Ressourcenuniversität. Seit 1765.

# Bodenverflüssigung bei flachwelligen Innenkippenbereichen – analytische Standsicherheitsnachweise

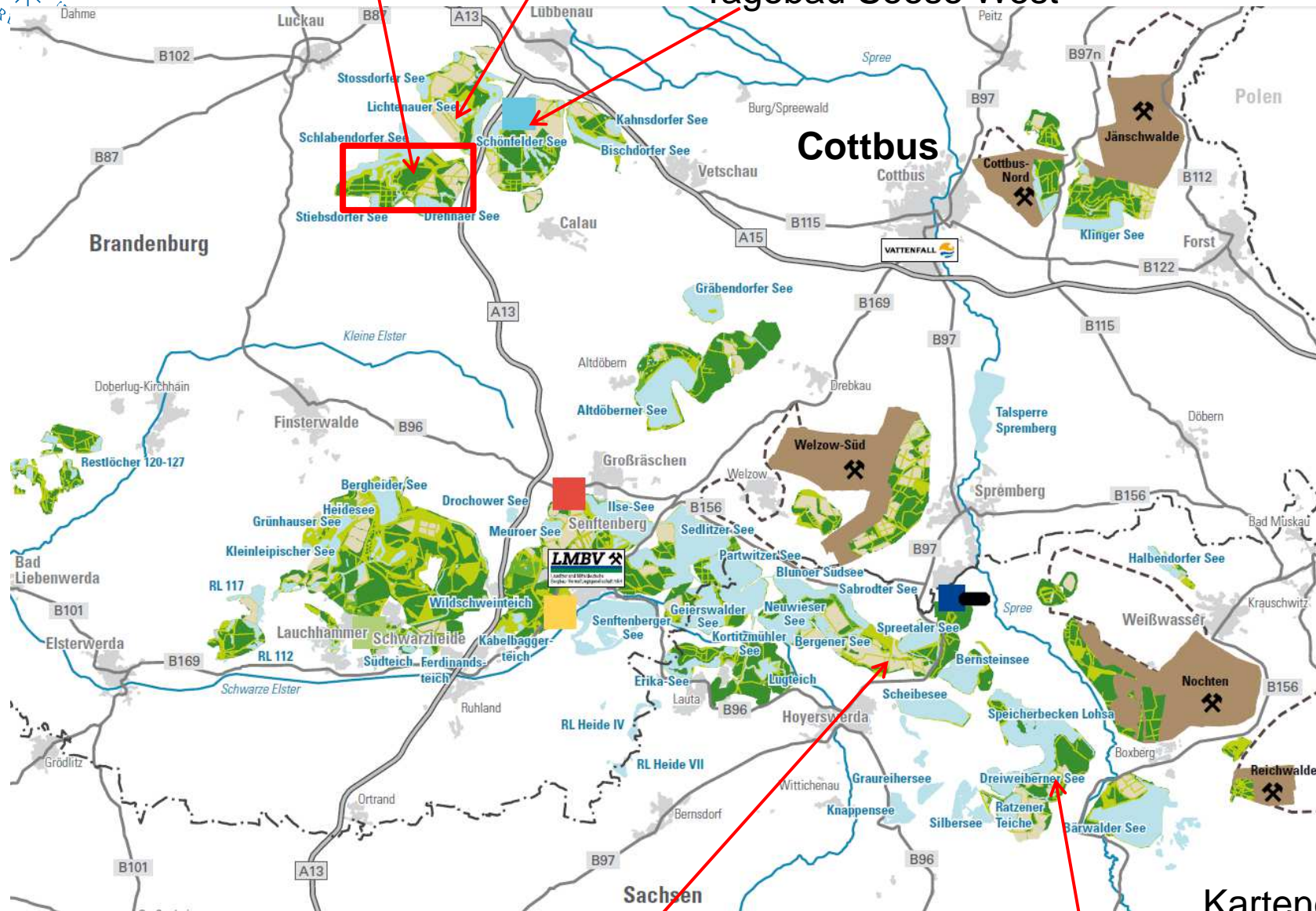


Prof. Dr.-Ing. Wolfram Kudla, Dr.-Ing. Sebastian Szczyrba  
TU Bergakademie Freiberg

Kolloquium zum 25. Firmenjubiläum von BAUGRUND DRESDEN  
am 03.03.2016 im Hygienemuseum in Dresden

Ehemaliger  
Tagebau Schlabendorf Süd und Nord

Ehemaliger  
Tagebau Seese West



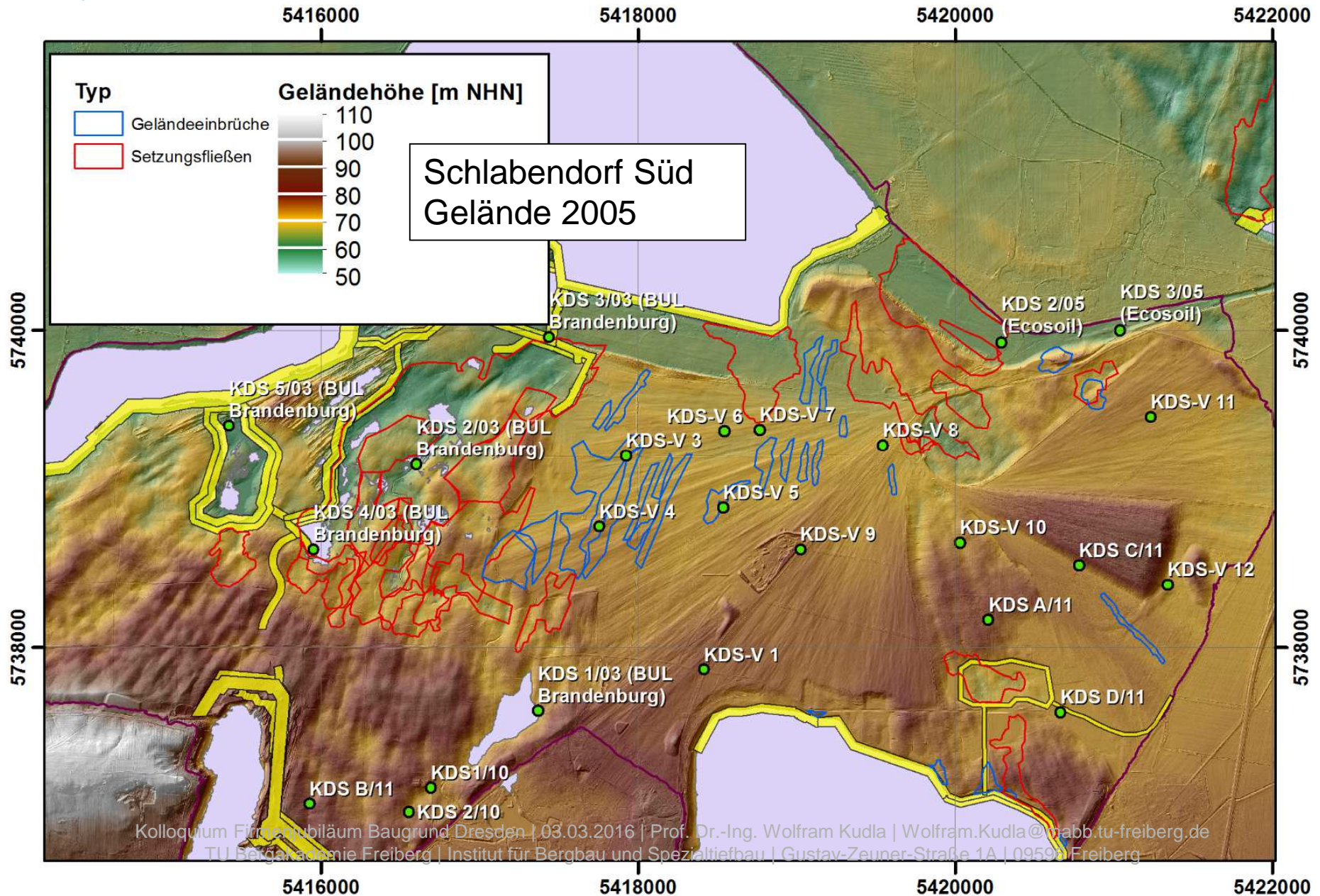
10 km

Ehemaliger  
Tagebau Spreetal

Ehemaliger  
Tagebau Lohsa

Kartenentwurf  
von LMBV

# Ereignisse infolge einer Bodenverflüssigung



# Erscheinungsbild der Ereignisse infolge einer Bodenverflüssigung

## Setzungsfließen

Unter Setzungsfließen wird ein Geländebruch infolge einer Bodenverflüssigung verstanden, bei der sich kontraktile verhaltender Boden so entfestigt, dass es in Abhängigkeit von der Geländemorphologie zu großen Horizontal- und Vertikaldeformationen kommt.



# Erscheinungsbild der Ereignisse infolge einer Bodenverflüssigung

## Geländeeinbruch infolge Bodenverflüssigung

Unter Geländeeinbruch infolge Verflüssigung wird ein Vorgang infolge einer Bodenverflüssigung verstanden, bei dem an der Geländeoberfläche nur vertikale Verschiebungen auftreten.



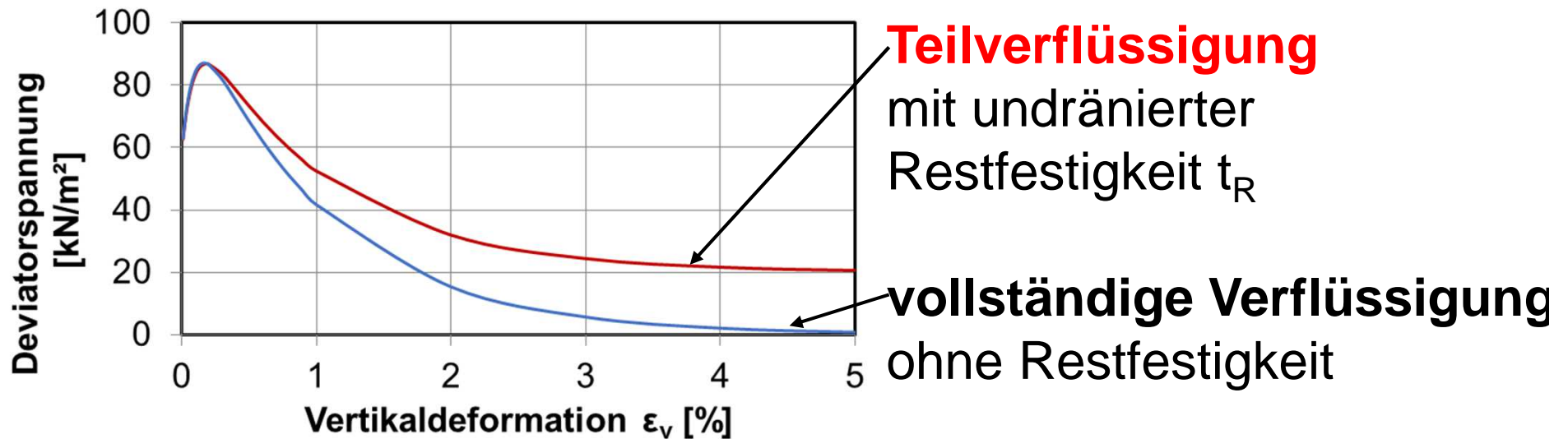
Einsenkungen und teilweise an anderer Stelle Hebungen

# Stand sicherheitsnachweise

- 1) Ein **Nachweis gegen Bodenverflüssigung ist nach dem gegenwärtigen Kenntnisstand nicht möglich** (Der Spannungszustand in der Kippe und die Größe des natürlichen Initials sind derzeit nicht genau bestimmbar).
- 2) Die **Auswirkungen einer Teilverflüssigung** sollen mit den Nachweisen im Hinblick auf die geplante Nutzung beurteilt werden:
  - a) **Stand sicherheitsnachweis gegen Setzungsfließen**  
(„klassische“ Böschungsbruchberechnungen)
  - b) **Stand sicherheitsnachweis gegen Ausgleichsdeformationen durch Geländehöhenunterschiede**
  - c) **Nachweis gegen Verflüssigungsgrundbruch**
  - d) **Gebrauchstauglichkeitsnachweis zur Begrenzung der Verformungen**
- 3) Bei der Nachweisführung wird eine **Teilverflüssigung** in einem räumlich begrenzten Kippenausschnitt unterhalb der Grundwasseroberfläche angenommen und die undrained Restfestigkeit angesetzt.

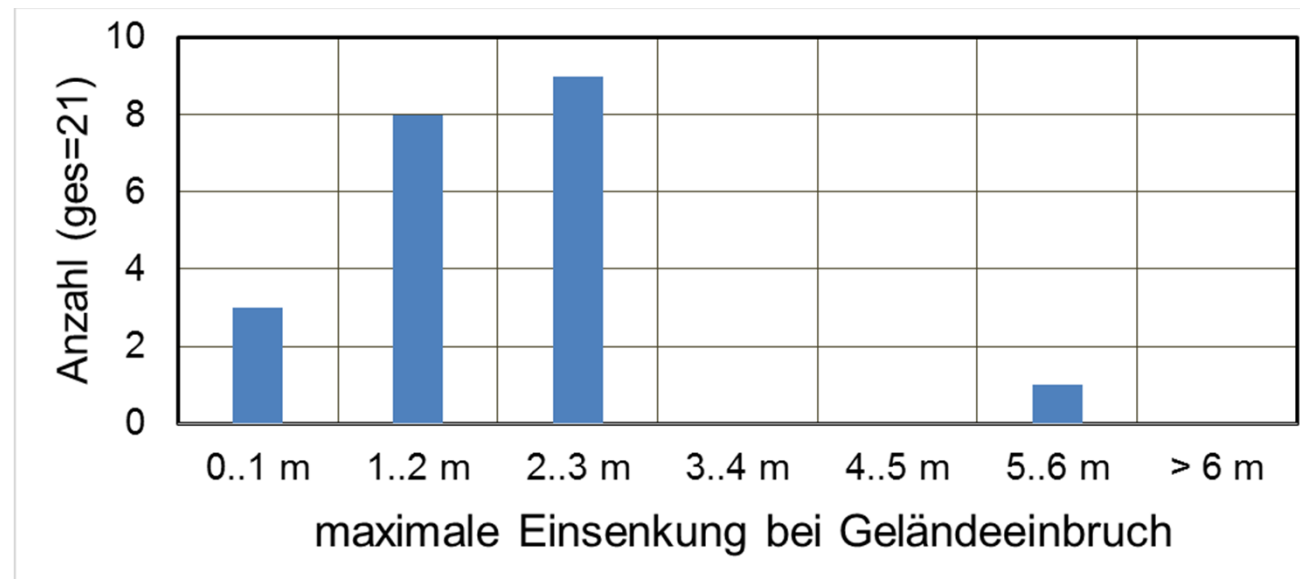
### 3. Verhalten nach Bruch

Triaxialversuch weggesteuert -> Entfestigung kann gemessen werden



# Auswertungen zu Geländeeinbrüchen – $S_{v,max}$

|                          | Geländeeinbruch<br>(Typ 1) | Setzungsfließen<br>(Typ 2 a/b) |
|--------------------------|----------------------------|--------------------------------|
| Horizontalbewegung $v_h$ | kleiner 1 m                | größer 1 m bis weit über 100 m |
| Mittlere Senkung         | <b>0,5 m ± 0,3 m</b>       | 0,5 m ± 0,3 m                  |



**Auswertung von 21  
Geländeeinbrüchen**

**Max. Senkung**

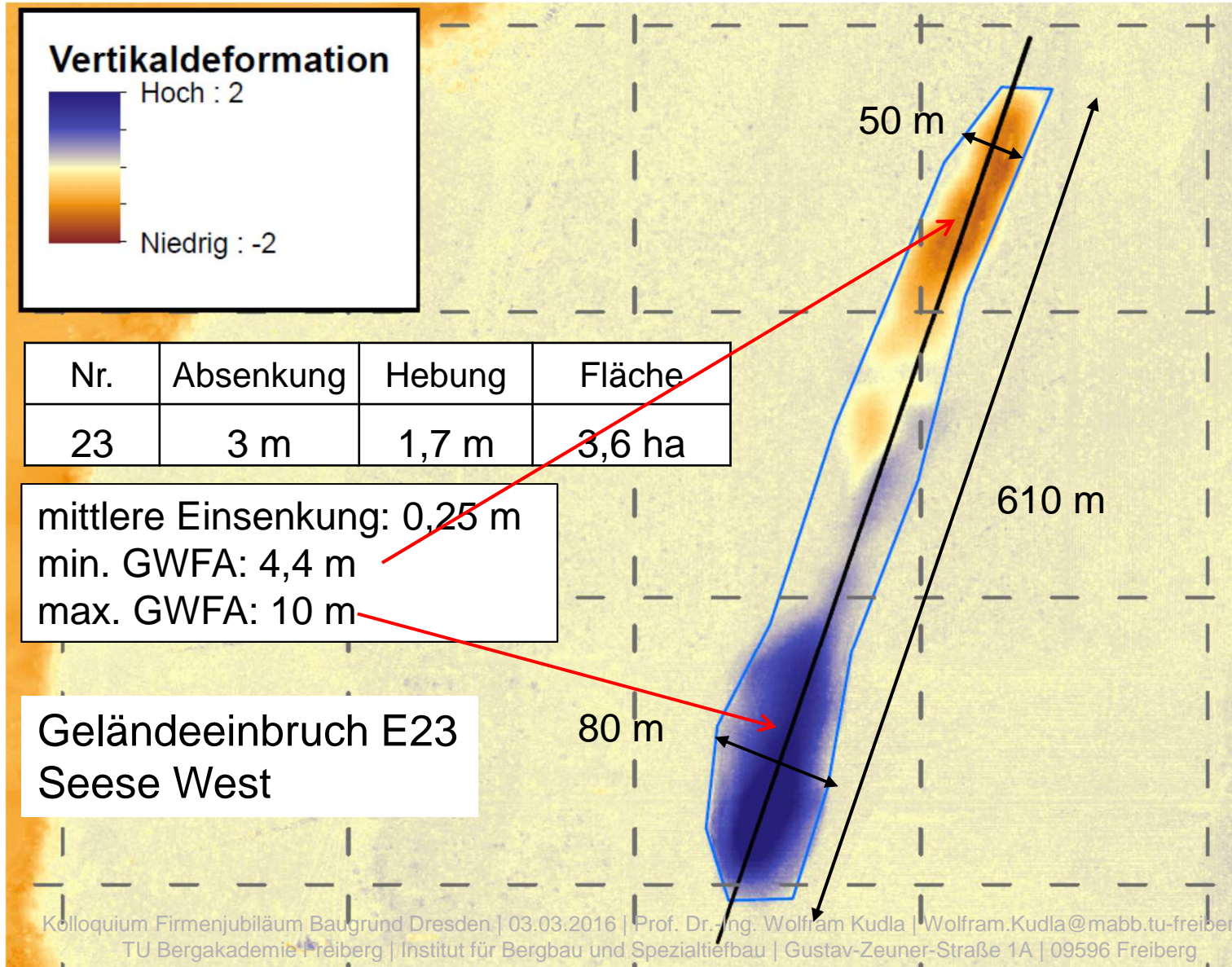
min: 0,7 m

max: 5,1 m

**Median: 1,9 m**

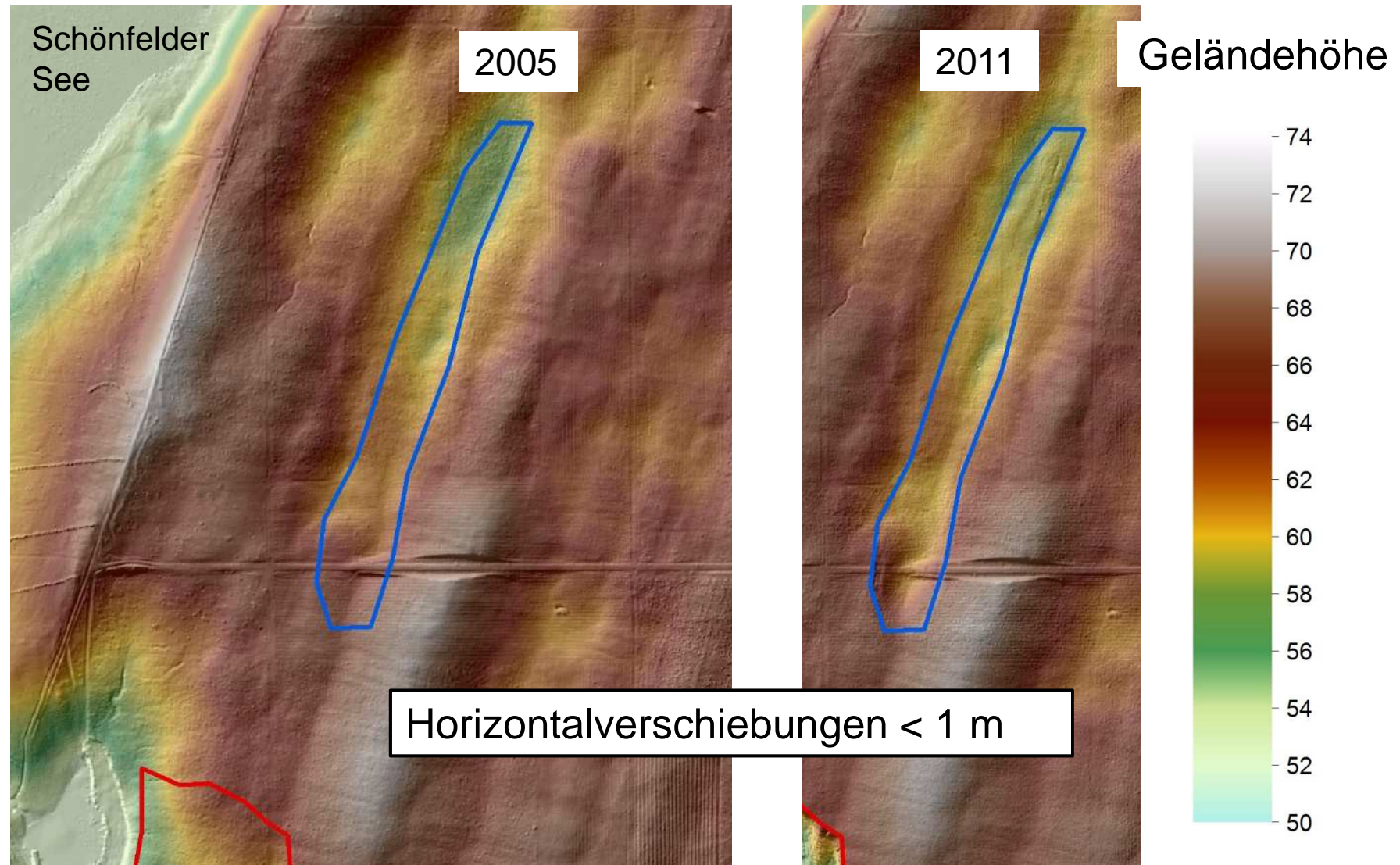


# Geländeeinbrüche mit Hebungen und Einsenkungen Mechanismus und Standsicherheitsnachweis



# Geländeeinbrüche mit Hebungen und Einsenkungen

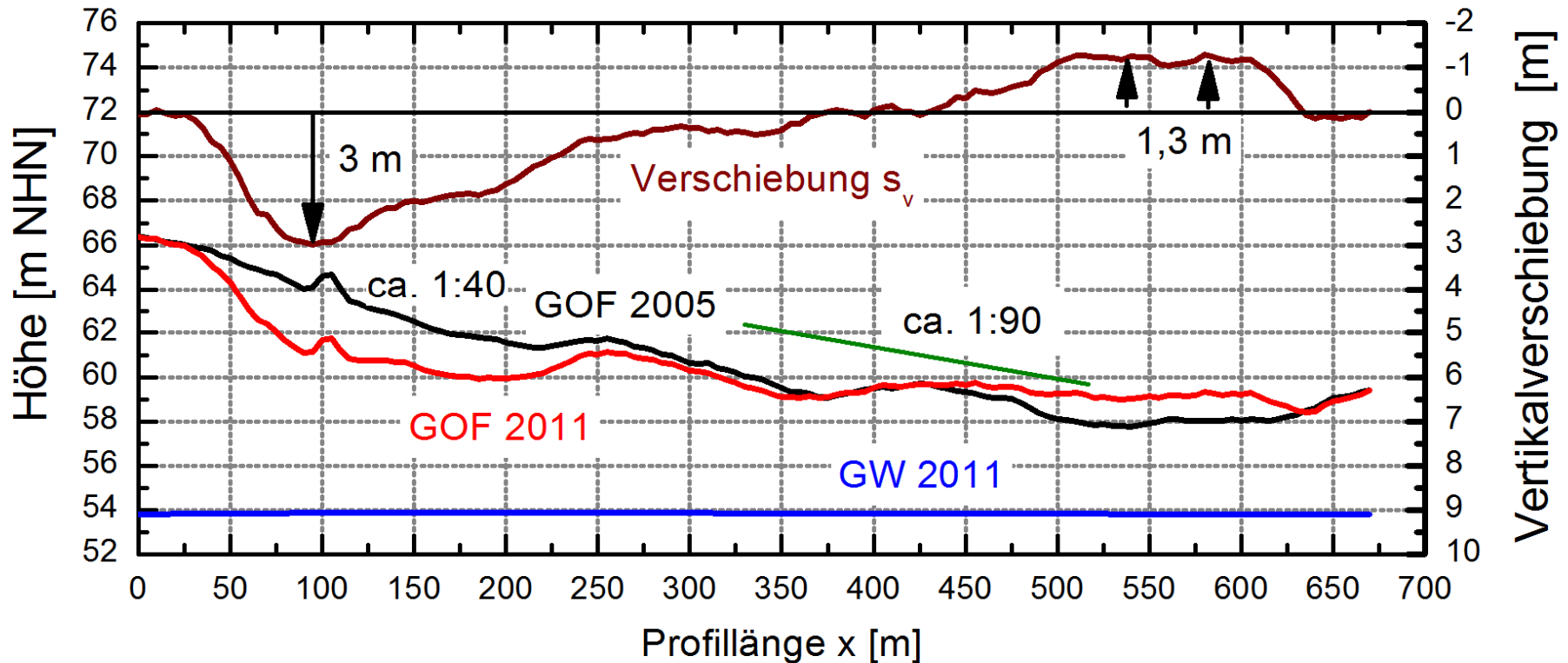
## Mechanismus und Standsicherheitsnachweis



# Geländeeinbrüche mit Hebungen und Einsenkungen

## Mechanismus und Standsicherheitsnachweis

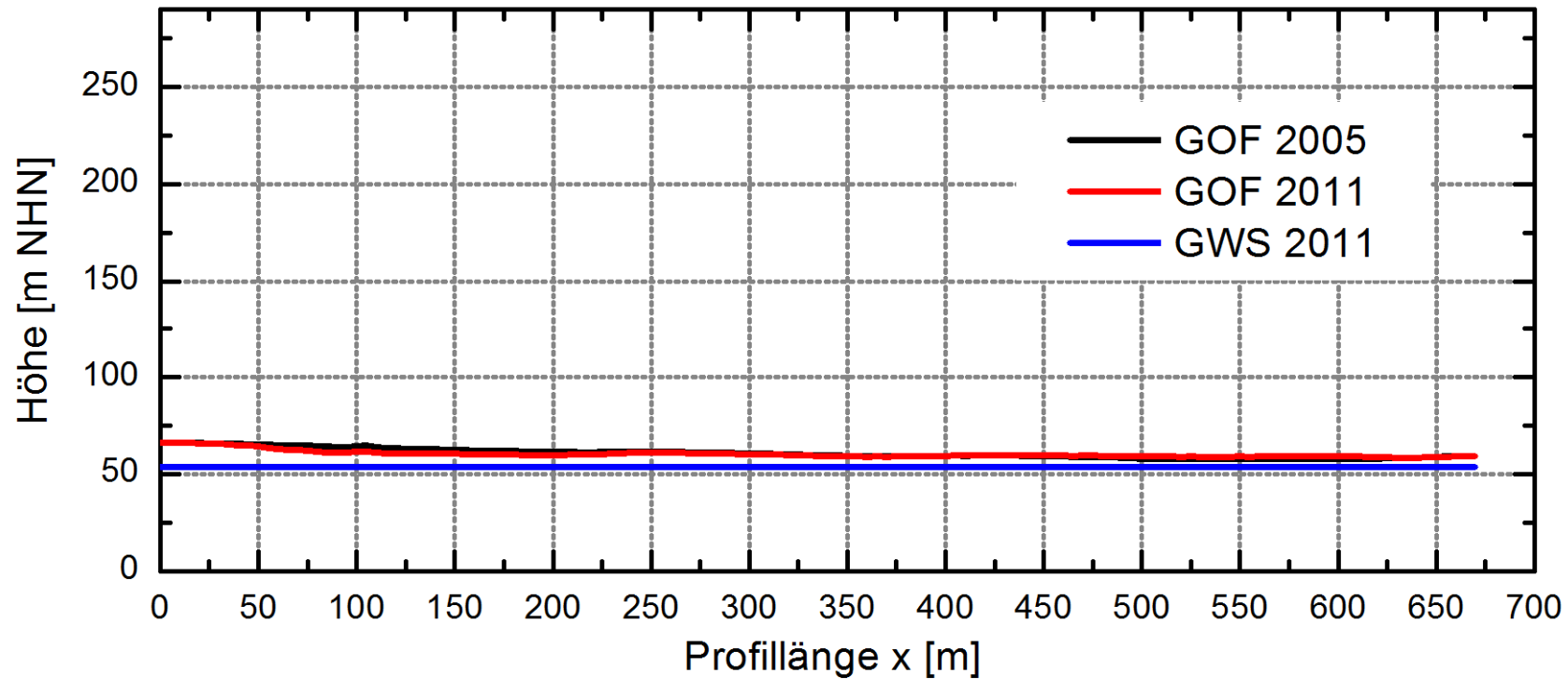
Längsschnitt Ereignis E23 - Seese West



| Bereich                      | Einsenkung | Hebung | mittlere Eins. | Fläche |
|------------------------------|------------|--------|----------------|--------|
| gesamt                       | 3 m        | -1,7 m | 0,25 m         | 3,6 ha |
| Längsschnitt<br>(30...630 m) | 3 m        | -1,3 m | 0,45 m         | --     |

# Geländeeinbruch E23 Längsschnitt nicht überhöht

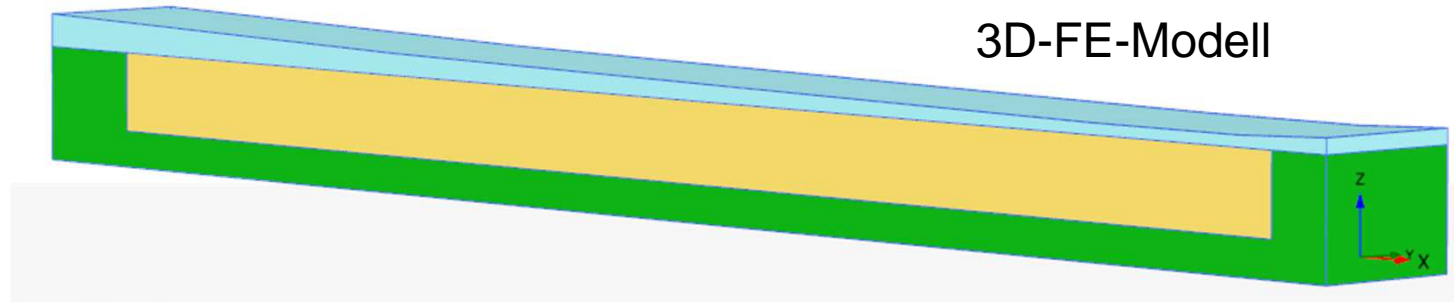
Längsschnitt Ereignis E23 - Seese West



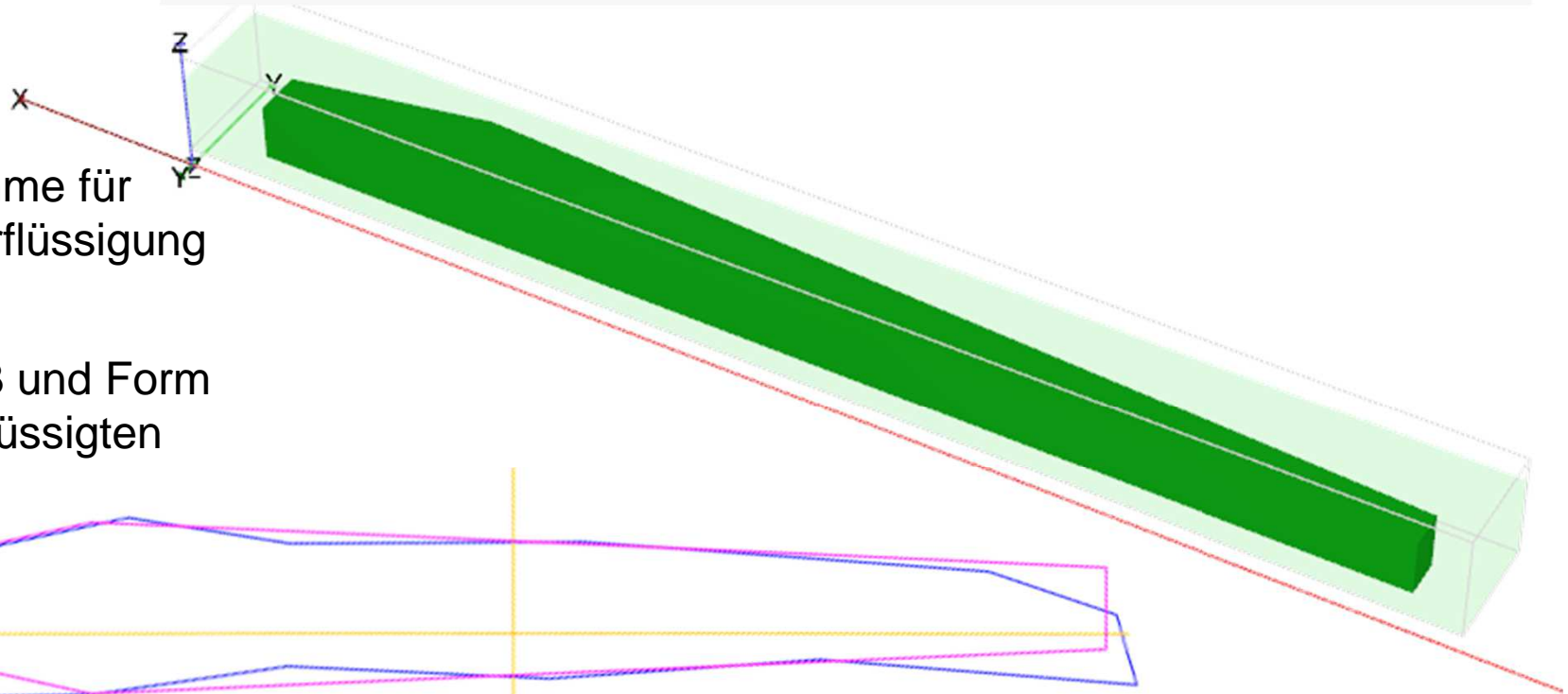
**nicht überhöhte Darstellung**

# Geländeeinbruch E23 mit $h_{tfl} = 30\text{ m}$

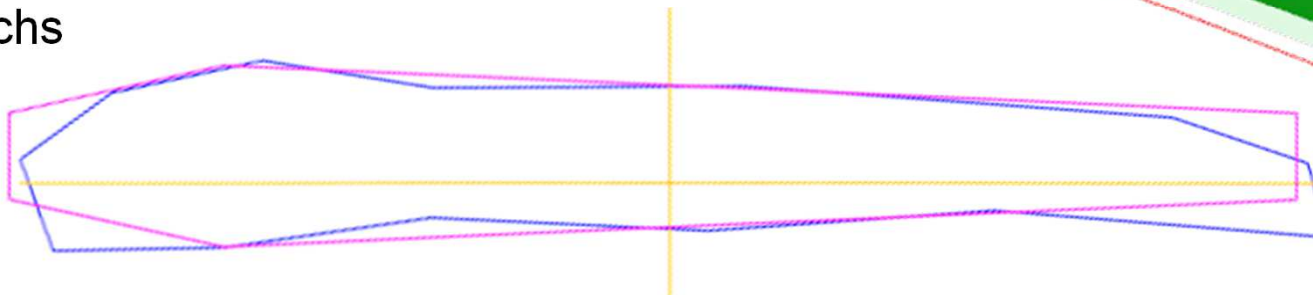
Modellausschnitt  
Länge 670 m  
Breite 60 m



Annahme für  
Teilverflüssigung



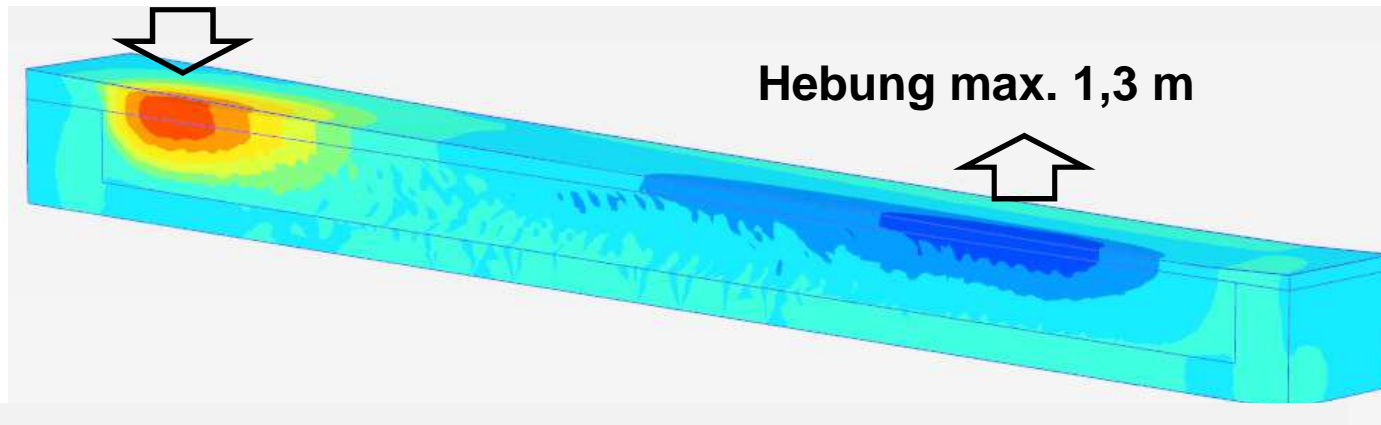
Umring E23 und Form  
des teilverflüssigten  
Bereichs



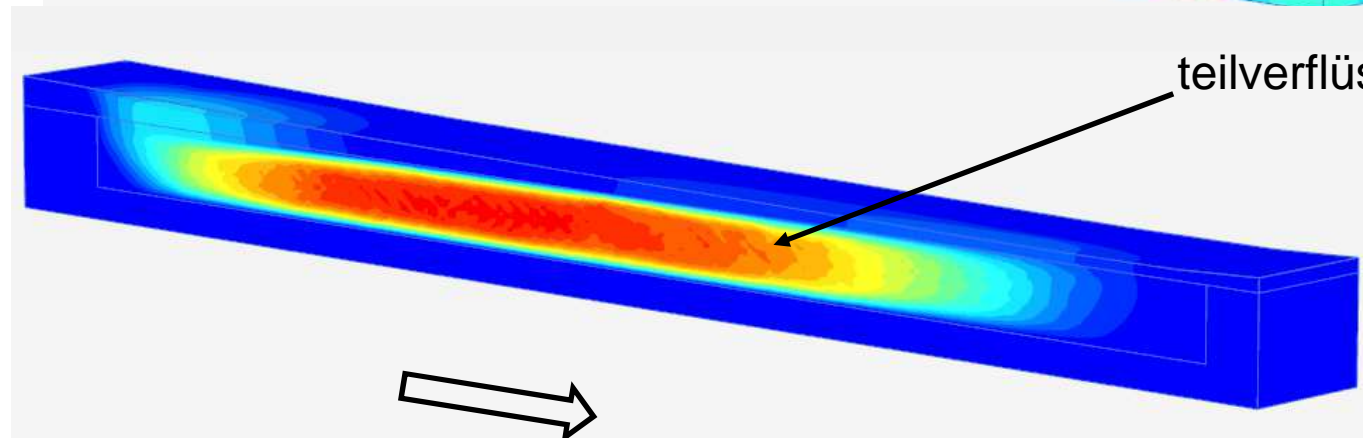
# Geländeeinbruch E23

Senkung max. 2,85 m

Vertikalverschiebung



Hebung max. 1,3 m



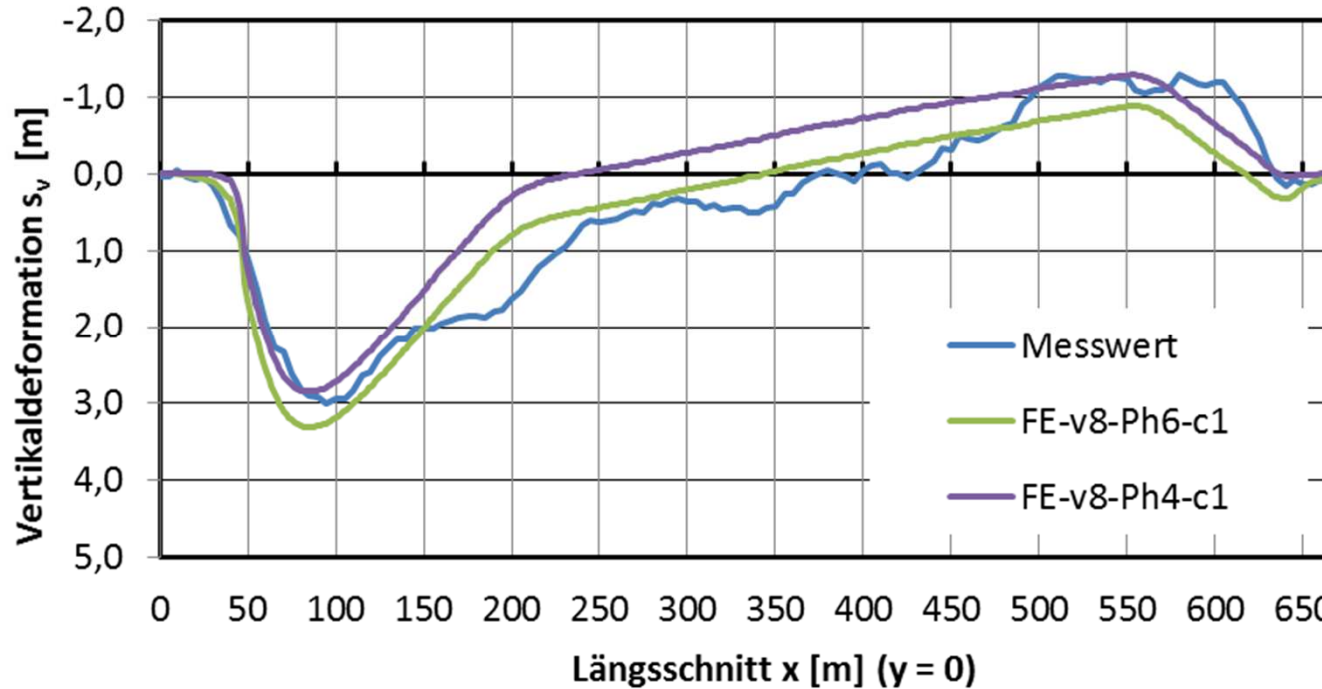
teilverflüssigter Bereich

Horizontalverschiebung max. 9 m

**nahezu keine Horizontalverschiebungen an der Geländeoberfläche**

# Geländeeinbruch E23

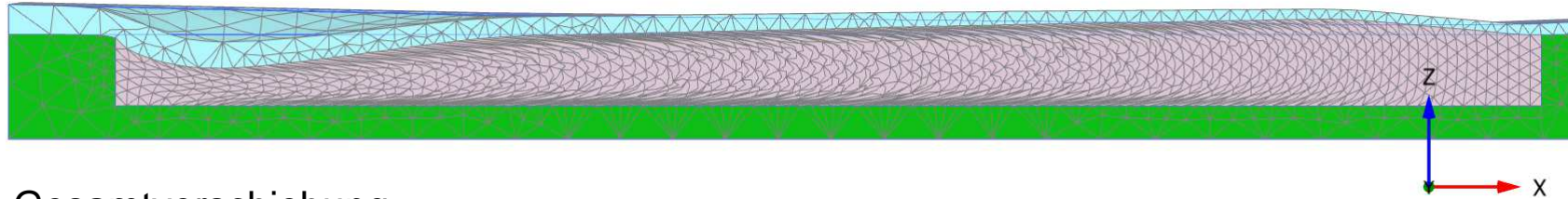
Ph4 = Teilverflüssigung; Ph6 = Konsolidierung)



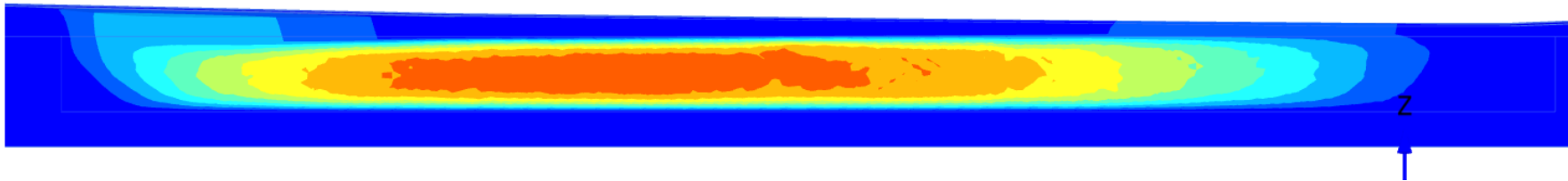
| Längsschnitt (30...630 m) | Senkung | Hebung |
|---------------------------|---------|--------|
| Messwerte                 | 3 m     | 1,3 m  |
| FE-v8 Ph 4                | 2,8 m   | 1,3 m  |
| FE-v8 Ph 6                | 3,3 m   | 0,9 m  |

# Geländeeinbruch E23

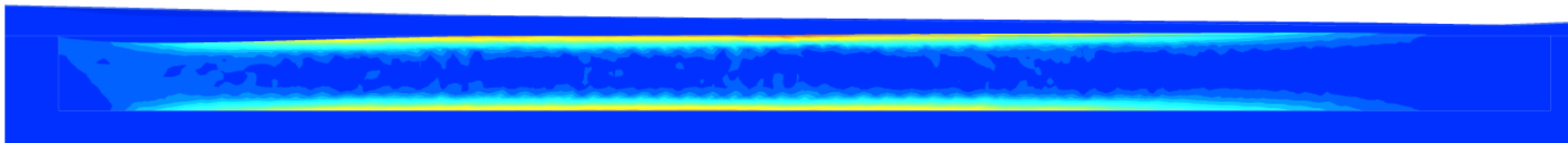
verformtes Netz



Gesamtverschiebung



Scherdeformation

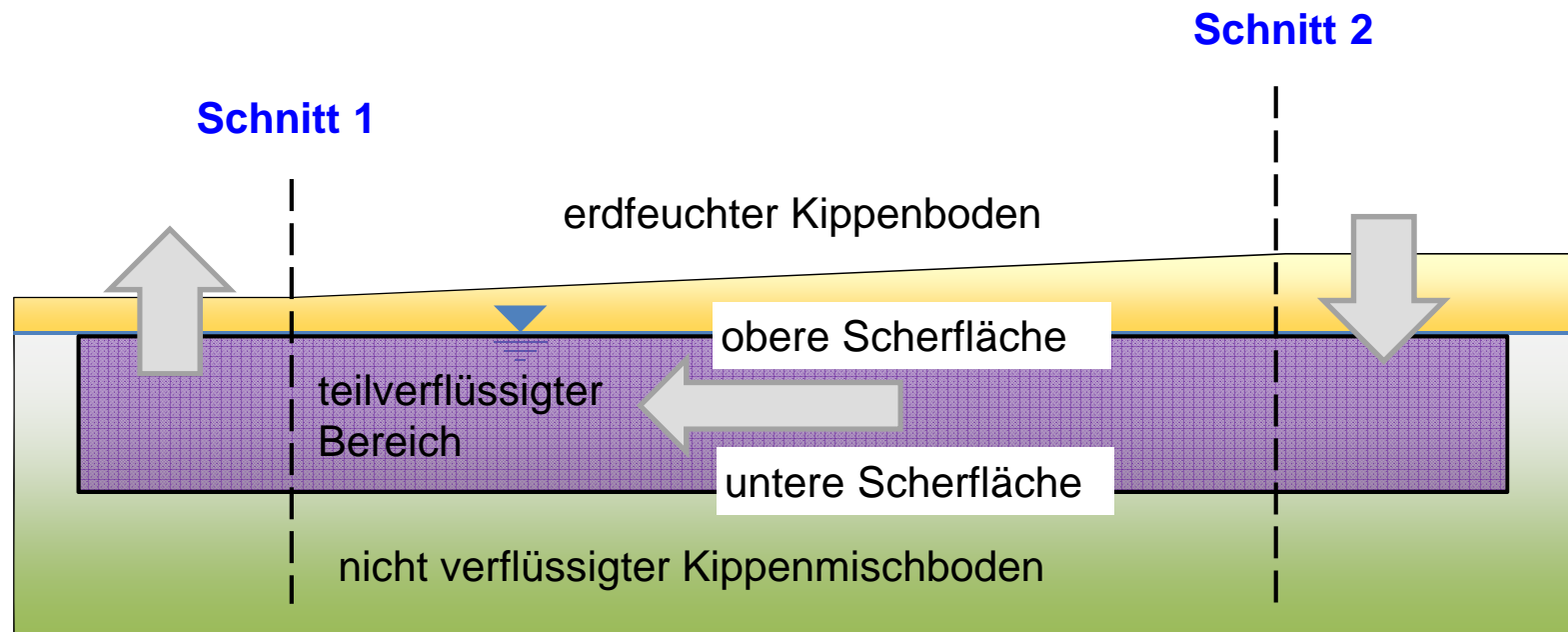




# Stand sicherheitsnachweis gegen Ausgleichsdeformationen durch Geländehöhenunterschiede

## Kippenmodell mit Schnittführung für Standsicherheitsnachweis

Der teilverflüssigte Bereich wird durch eine obere und eine untere Scherfläche begrenzt.

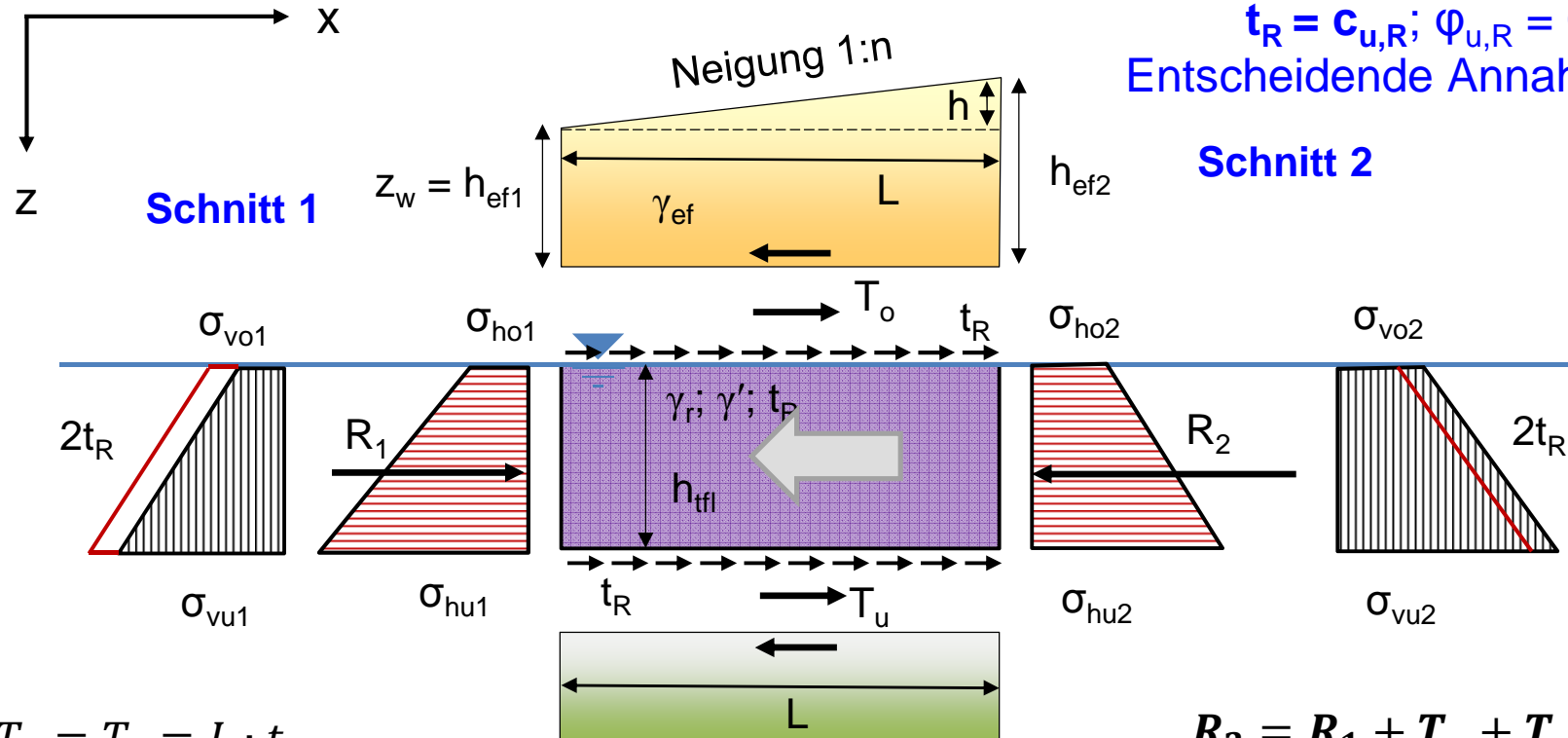


# Ansatz der Kräfte am Starrkörper

Nachweis mit konstanter Restfestigkeit

$$t_R = c_{u,R}; \varphi_{u,R} = 0^\circ$$

Entscheidende Annahme:  $h_{tfl}$



Schnitt 2

$$T_u = T_o = L \cdot t_R$$

$$R_2 = R_1 + T_o + T_u$$

$$R_1 = (\gamma_{ef} \cdot h_{ef1} + 2t_R) \cdot h_{tfl} + \frac{\gamma_r \cdot h_{tfl}}{2} \cdot h_{tfl}$$

$$\text{erf } t_{R,AD} = \frac{\gamma_{ef} \cdot h}{4 + \frac{2L}{h_{tfl}}} \quad \boxed{\eta_{Si,AD} = \frac{\text{vorh}_{t_R}}{\text{erf}_{t_{R,AD}}}}$$

$$R_2 = (\gamma_{ef} \cdot h_{ef2} - 2t_R) \cdot h_{tfl} + \frac{\gamma_r \cdot h_{tfl}}{2} \cdot h_{tfl}$$

erf  $t_{R,AD}$  unabhängig von  $h_{ef1}$  bei konstantem  $c_{u,R}$

# NW Setzungsfließen über Gleitnachweis

$$E_{p,ef,1} = \frac{1}{2} \cdot \gamma_{ef} \cdot z_w^2 \cdot \frac{1 + \sin \varphi'_{ef}}{1 - \sin \varphi'_{ef}}$$

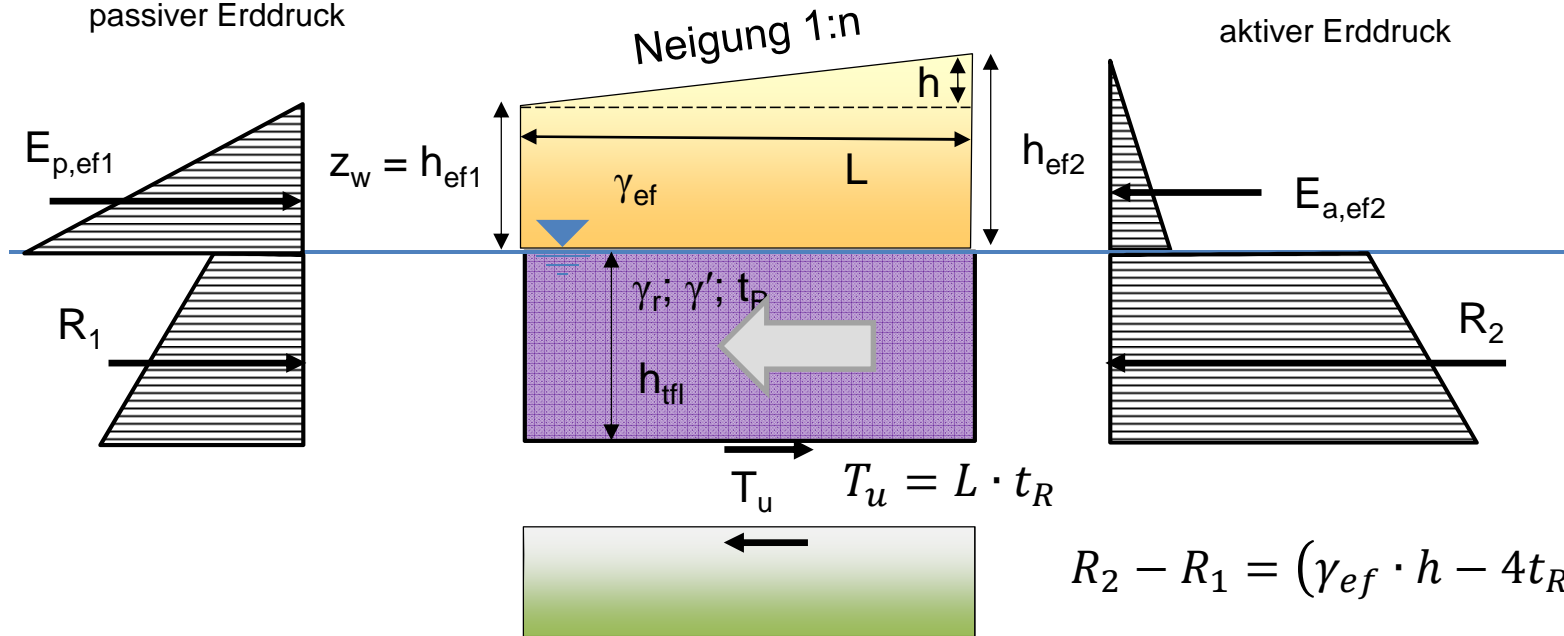
$$E_{a,ef,2} = \frac{1}{2} \cdot \gamma_{ef} \cdot h_{ef2}^2 \cdot \frac{1 - \sin \varphi'_{ef}}{1 + \sin \varphi'_{ef}}$$

Schnitt 1

passiver Erddruck

Schnitt 2

aktiver Erddruck



$$R_2 - R_1 = (\gamma_{ef} \cdot h - 4t_R) \cdot h_{tfl}$$

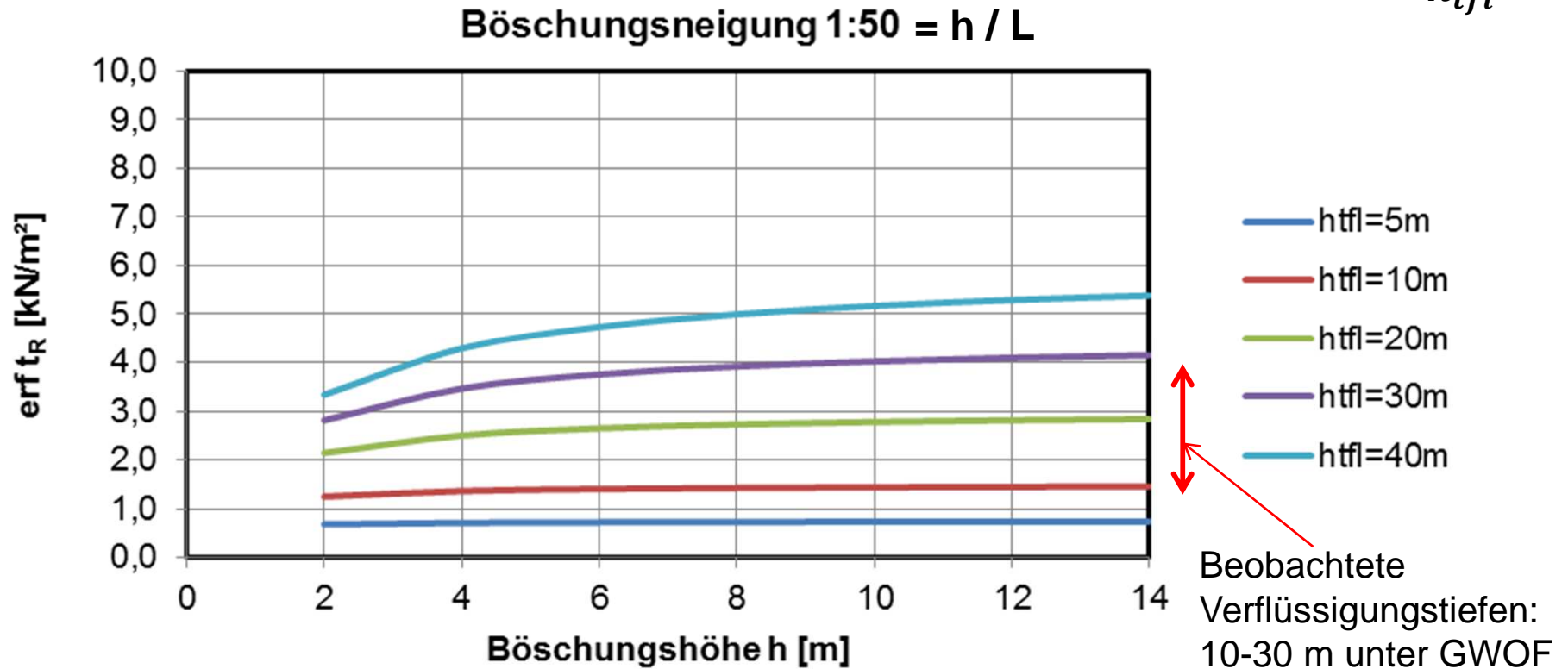
$$R_2 + E_{a,ef,2} = R_1 + T_u + E_{p,ef,1}$$

$$\text{erf}_{t_{R,SF}} = \frac{\gamma_{ef} \cdot h \cdot h_{tfl} + E_{a,ef,2} - E_{p,ef,1}}{L + 4 \cdot h_{tfl}}$$

$$\eta_{Si,SF} = \frac{\text{vorh}_{t_R}}{\text{erf}_{t_{R,SF}}}$$

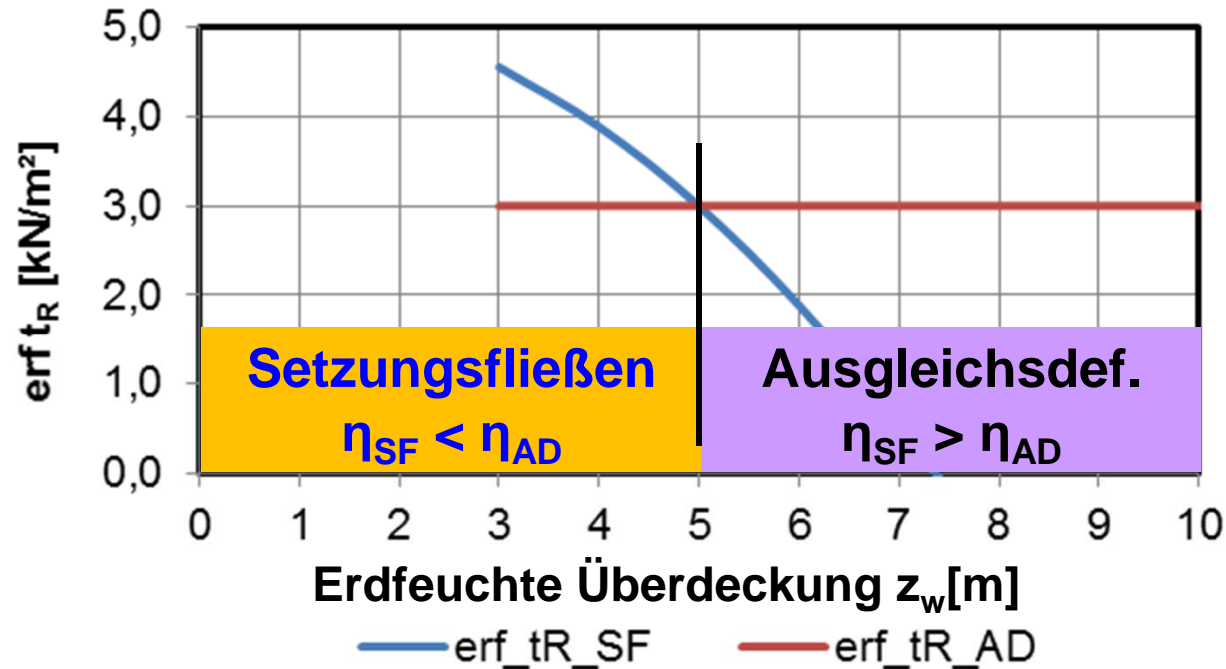
# Stand sicherheitsnachweis gegen Ausgleichsdeformationen durch Geländehöhenunterschiede

$$erf t_R = \frac{\gamma_{ef} \cdot h}{4 + \frac{2L}{h_{tfl}}}$$



Erforderliche konstante undränierete Restfestigkeit  $erf t_R = c_{u,R}$

# NW „Setzungsfließen“ und NW „Geländeeinbruch mit Ausgleichsdeformationen“



$1 : n = 1 : 30$   
 $h = 4 \text{ m}$   
 $\gamma_{ef} = 15 \text{ kN/m}^3$   
 $\varphi'_{ef} = 30^\circ$   
 $h_{tfl} = 15 \text{ m}$   
 $\eta_{si} = 1,0$

Hoher Grundwasserflurabstand -> NW gegen Ausgleichsdeformationen maßgebend

Geringer Grundwasserflurabstand -> NW gegen Setzungsfließen maßgebend

**Für die Beurteilung der Standsicherheit ist der Bruchmechanismus relevant, der den geringsten Standsicherheitskoeffizienten aufweist.**

# Zusammenfassung (1)

1. Nach den Ausprägungen an der Geländeoberfläche werden die Verflüssigungsereignisse als **Setzungsfließen** (mit großen Horizontalverschiebungen an der GOF) oder als **Geländeeinbruch** (ohne größere Horizontalverschiebungen) an der GOF klassifiziert.
2. Geländeeinbrüchen mit Hebungen in einem Teilbereich der Ereignisfläche lassen sich nur **mit Horizontaldeformationen im verflüssigten Bereich** erklären.
3. Ein **Nachweis gegen Bodenverflüssigung ist nach dem gegenwärtigen Kenntnisstand nicht möglich.**
4. Bei der Nachweisführung wird daher eine **Teilverflüssigung  $c_{u,R} > 0^\circ$**  angesetzt und die Auswirkungen im Hinblick auf die geplante Nutzung bewertet.
5. Es sind **Stand sicherheitsnachweise gegen Setzungsfließen, gegen Ausgleichsdeformationen (von uns neu entwickelt) durch Geländehöhenunterschiede und gegen Verflüssigungsgrundbruch** zu führen.

## Zusammenfassung (2)

6. Für ein Material ohne Restfestigkeit ( $c_{u,R} = 0^\circ$ ) folgt  $\eta_{Si,AD} = 0$ .  
Damit kann keine ausreichende Standsicherheit nachgewiesen werden.
7. Bei ausreichender Standsicherheit treten gegen Ausgleichsdeformationen treten **keine Horizontalverschiebungen im Untergrund** auf. **Einsenkungen sind im Fall einer Teilverflüssigung trotzdem zu erwarten.**
8. Zusätzlich zu den Standsicherheitsnachweisen ist daher ein **Gebrauchstauglichkeitsnachweis** zu führen. Die maximal zu erwartenden Einsenkungen im Fall einer Teilverflüssigung müssen für die geplante Nutzung verträglich sein.

## 25 Jahre Baugrund Dresden

- Herzliche Gratulation zu Ihrem Firmenjubiläum!
- Herzlichen Glückwunsch zum 65. Geburtstag an Hr. von Wolffersdorff und besten Dank für Ihre Gastvorlesungen, Betreuung von studentischen Arbeiten und Ihr jahrelanges Engagement in Freiberg!

**Eintracht bricht Not  
Zwietracht bringt Tod  
Gemeinwohl  
geht über Dein Wohl**





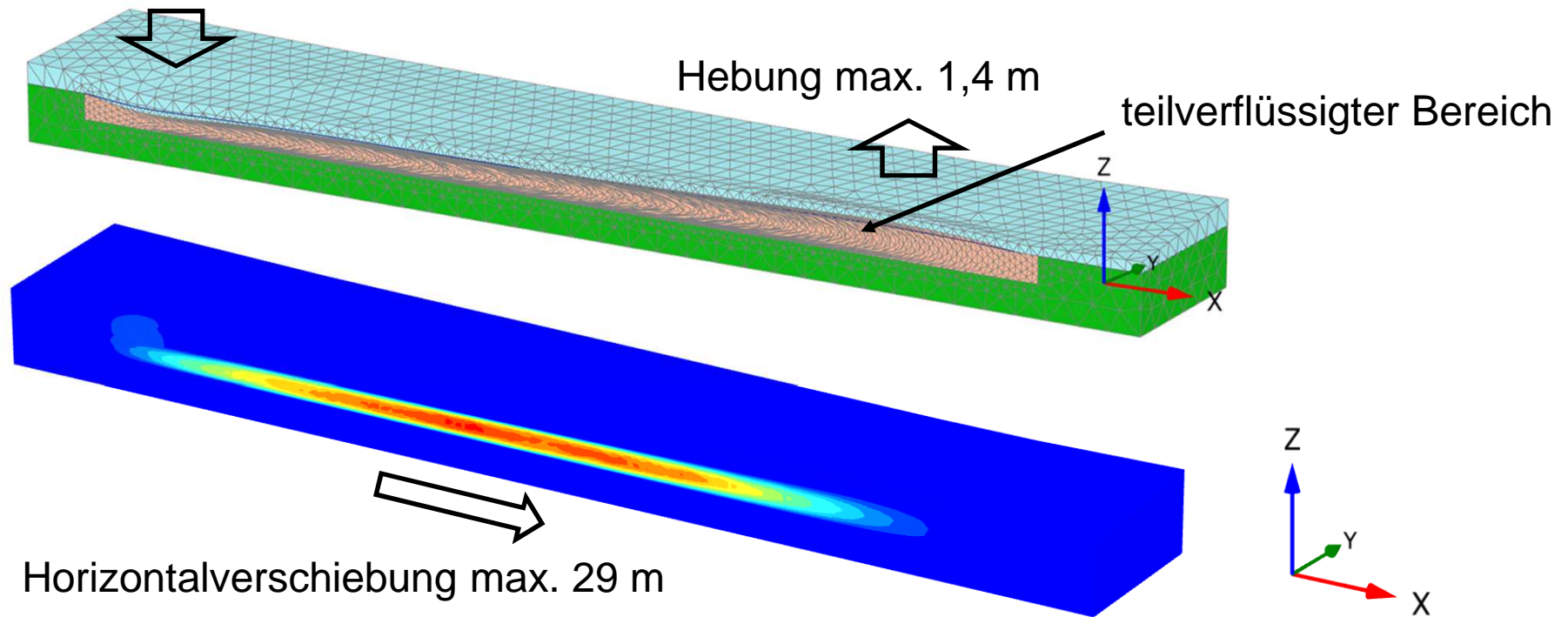
# Geländeeinbrüche mit Hebungen und Einsenkungen

## Mechanismus und Standsicherheitsnachweis

### Nachrechnung mit 3D-FE-Rechnungen

Einsenkung max. 2,9 m

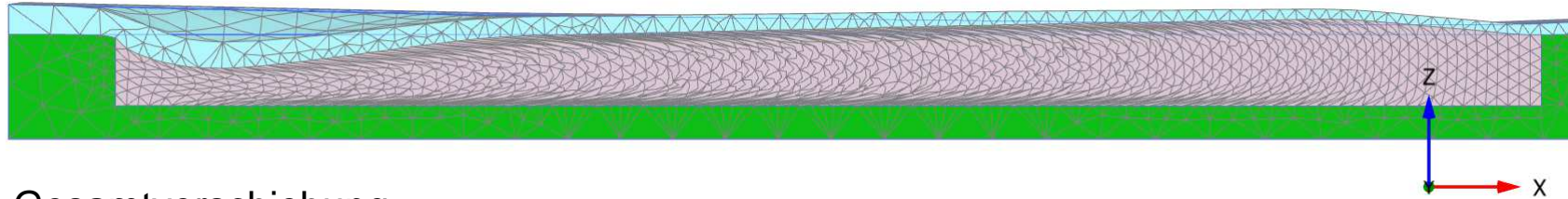
Vertikalverschiebung



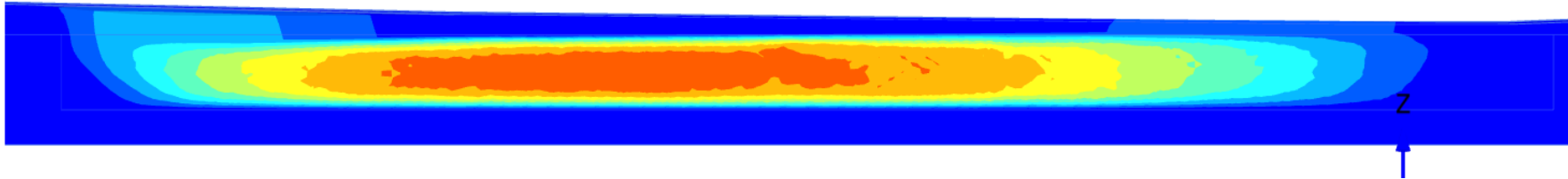
**nahezu keine Horizontalverschiebungen an der Geländeoberfläche**  
**große Horizontalverschiebungen im teilverflüssigten Bereich unterhalb der GWOF**

# E23 Ergebnisse (Ph 4 Teilverflüssigung: $c_{u,R} = 1 \text{ kN/m}^2$ )

verformtes Netz



Gesamtverschiebung



Scherdeformation

