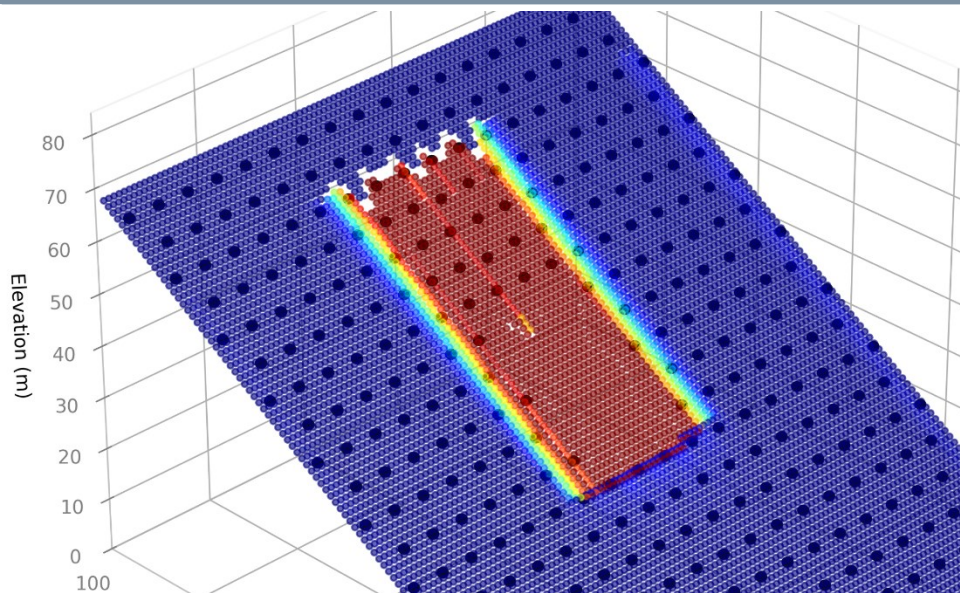


# Quantifizierung der stabilisierenden Wirkung von Schutzwäldern in flachgründigen, rutschgefährdeten Hängen

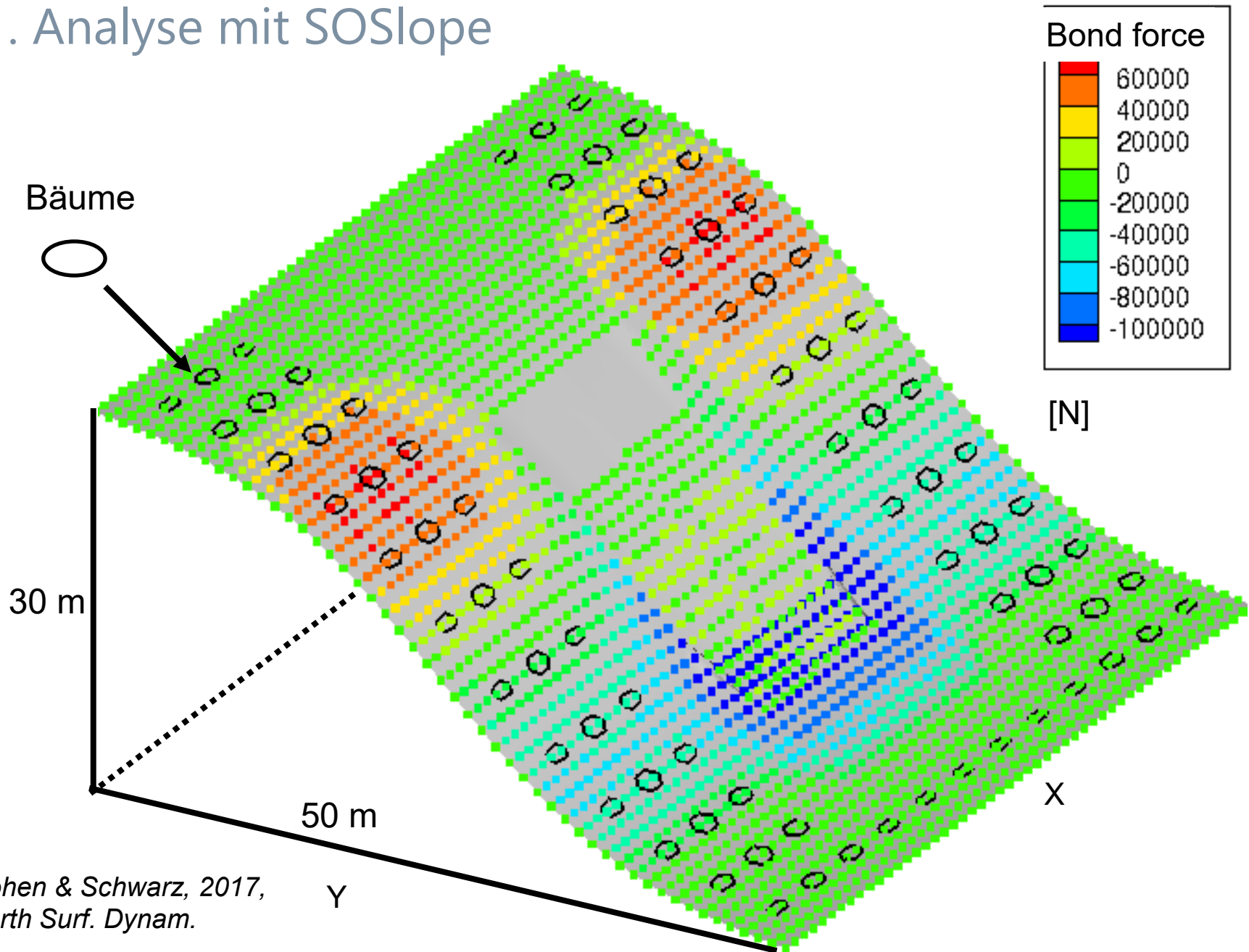


Schwarz M. und Cohen D.

23.8.24

1. **Numerische Analyse mit SOSlope, um den Effekt von Lückenlänge- und breite auf die Hangstabilität zu quantifizieren**
2. **Erweiterte Bemessung der Wurzelwerke im Schutzwald (SlideforNET)**

# 1. Analyse mit SOSlope



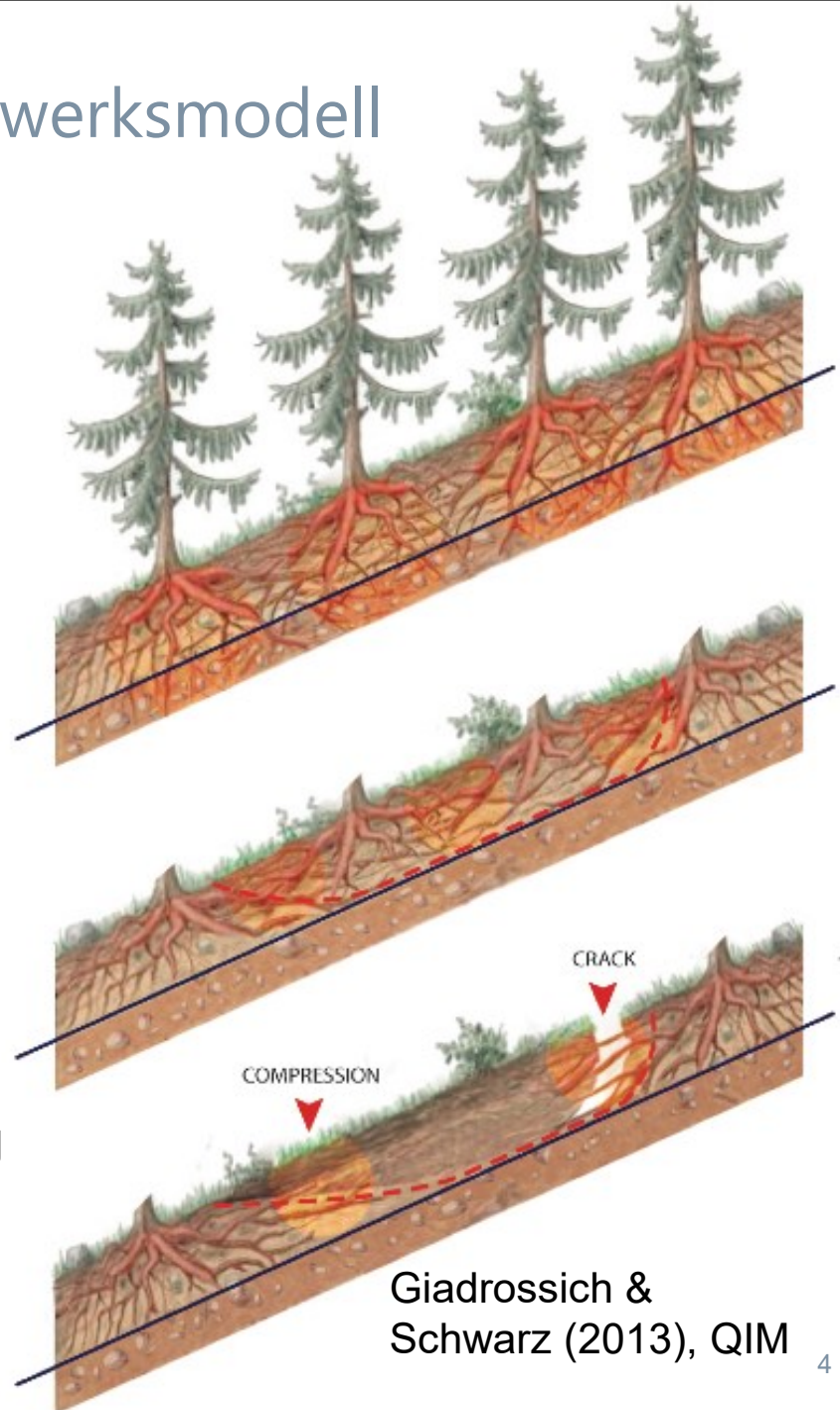


# 1. Analyse mit SOSlope: Tragwerksmodell der Wurzelverstärkung

1. Durch Scherfläche: “Basale Wurzelverstärkung”. (1977).

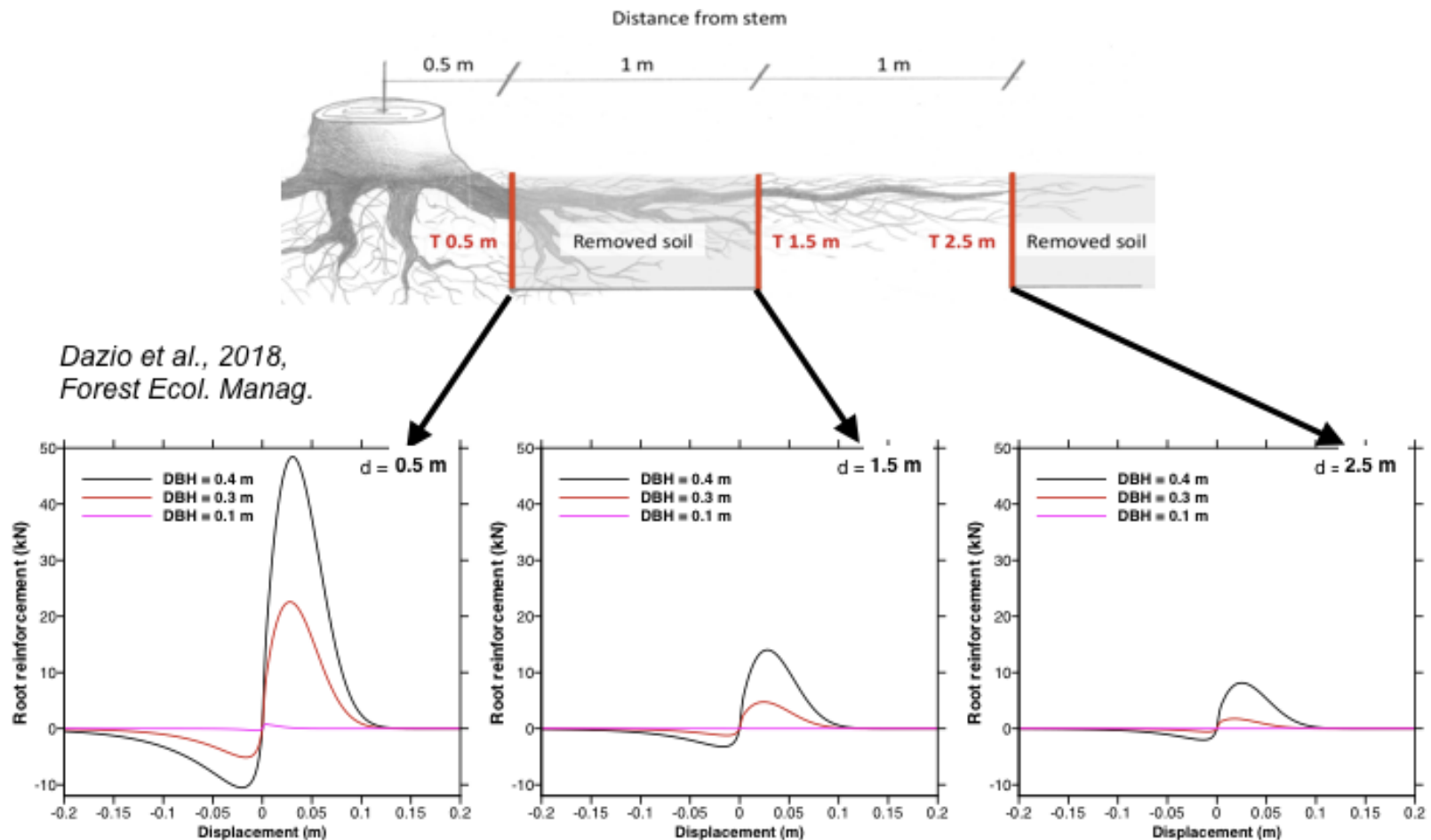
2. Erhöhung der Steifigkeit: Erhöhte passive Erddruckkraft (2011).

3. Laterale Wurzelverstärkung (Zug und Druck) (2001).

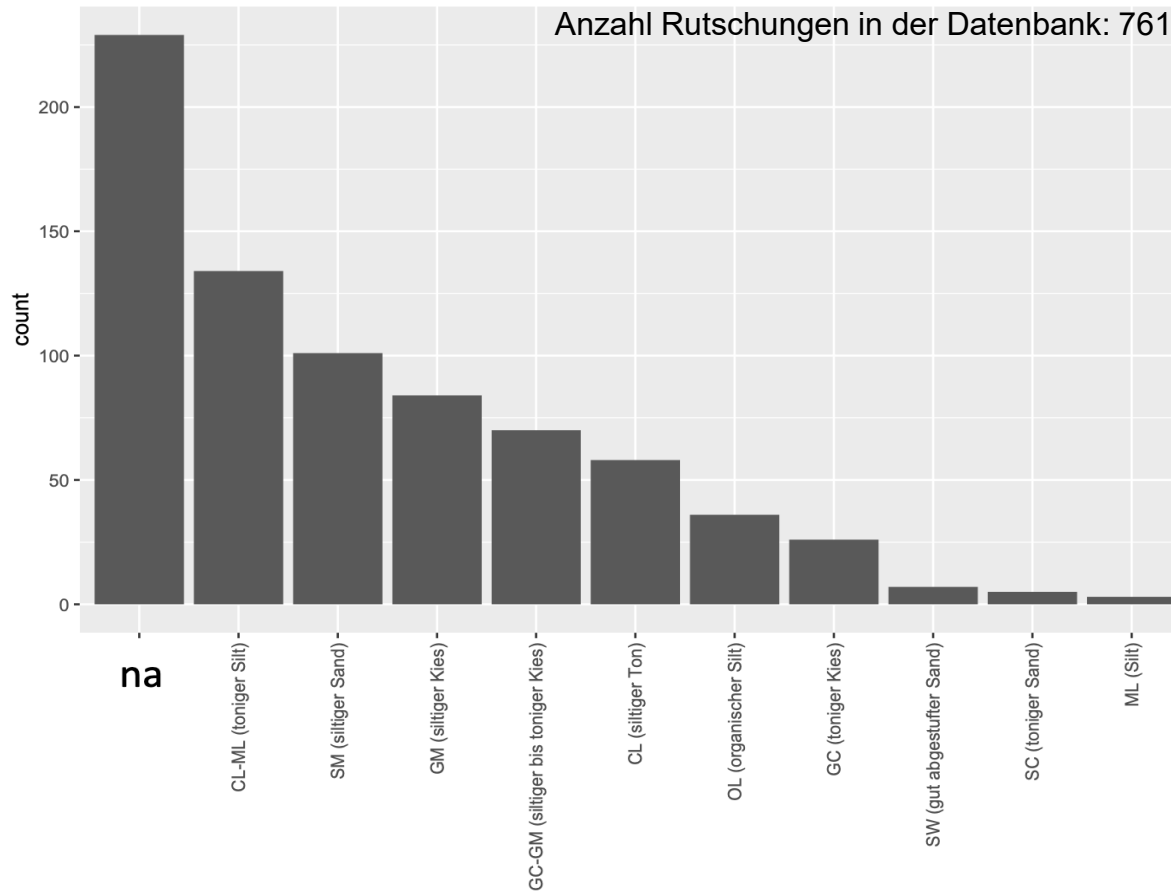




# 1. Analyse mit SOSlope: Berechnungsmodell der Wurzelverstärkung

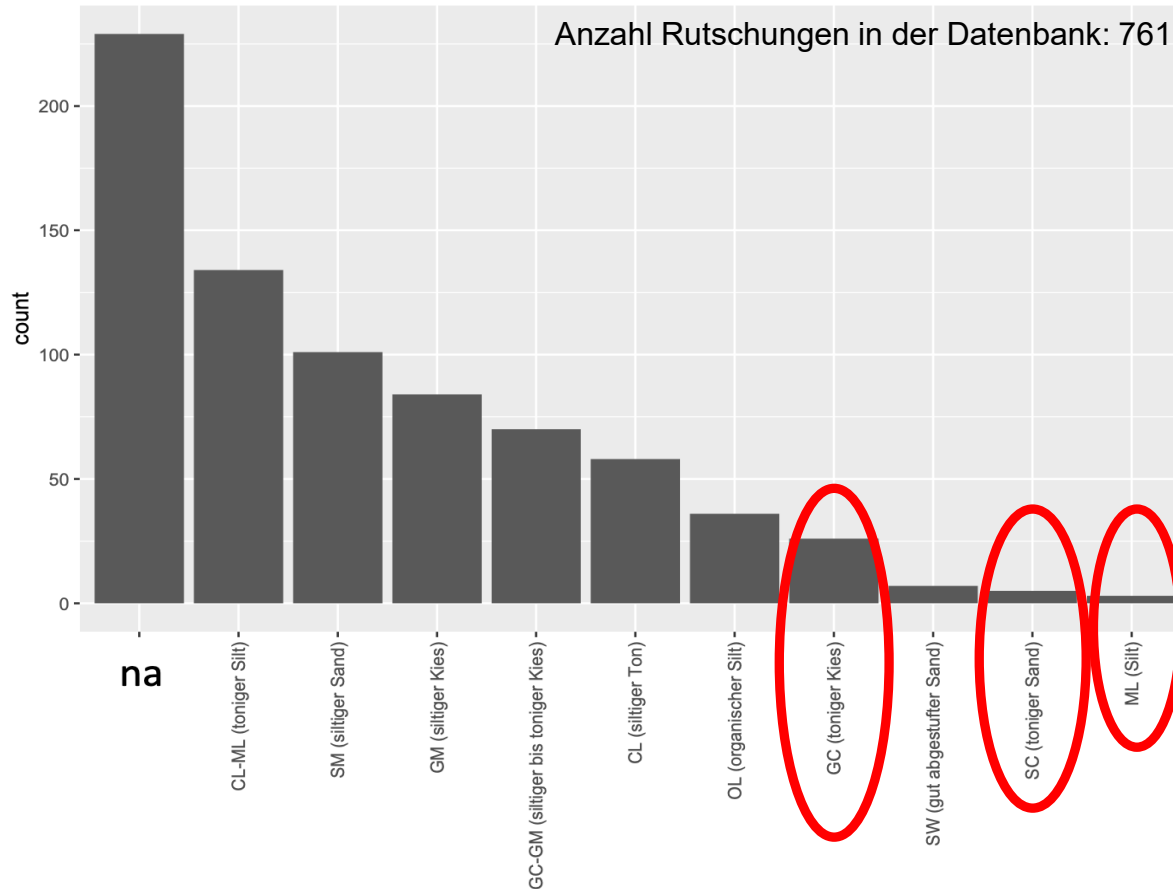


# 1. Analyse mit SOSlope: Boden



## USCS Klassen

# 1. Analyse mit SOSlope: Boden



## USCS Klassen



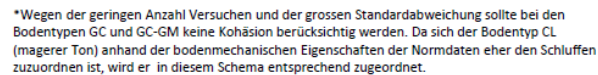
Standardverfahren zur Bodenanalyse  
für Gefahrenbeurteilungen

| Bodenbezeichnung | USCS Labor |
|------------------|------------|
| Därstetten       | MH         |
| Diemtigen        | ML         |
| Rüschegg         | ML         |
| Trub             | GC         |
| Trubschachen     | SC         |

Schwarz et al. (2024)



Berner  
Fachhochschule



# 1. Analyse mit SOSlope: Übersicht Simulationen

1. Effekt der **Lückenlänge/-breite Buche**: Buche (BHD=0.4 m, DG=70% 150 N°/ha), Neigung 30°, Boden:  $\Phi' = 30^\circ$ ,  $c' = 0 \text{ kPa}$  (SM, GM CS-ML, ), Rutschmächtigkeit=0.6 m, Sättigung=0.1
2. Effekt der **Lückenlänge/-breite Fichte**: Fichte (BHD=0.4 m, DG=70% 350 N°/ha), Neigung 30°, Boden:  $\Phi' = 30^\circ$ ,  $c' = 0 \text{ kPa}$  (CS-ML, SM, GM), Rutschmächtigkeit=0.6 m, Sättigung=0.1
3. Effekt der **Neigung**: Fichte (BHD=0.4 m, DG=70% 350 N°/ha), Neigung 30°-35°-40°, Boden:  $\Phi' = 30^\circ$ ,  $c' = 0 \text{ kPa}$  (CS-ML, SM, GM), Rutschmächtigkeit=0.6 m, Sättigung=0.1, Lückenlänge=20m, Lückenbreite=20m.
4. Effekt des **Bodens**: Fichte (BHD=0.4 m, DG=70% 350 N°/ha), Neigung 30°, Boden:  **$\Phi' = 25^\circ$ ,  $c' = 2 \text{ kPa}$**  (CM, CH), Rutschmächtigkeit=0.6 m, Sättigung=0.1, Lückenlänge=20m, Lückenbreite=20m.

# 1. Analyse mit SOSlope: Definition der Lückengrösse (Distanz von Stamm zu Stamm!)

Projizierte Lückenlänge: 10m

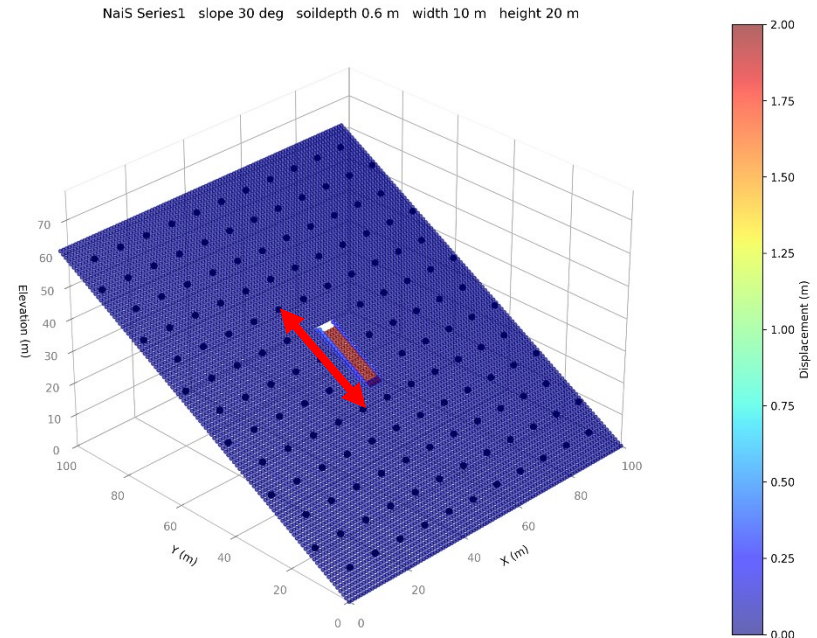
=

Hangparallel bei 30°: **16 m**

Projizierte Lückenlänge: 20m

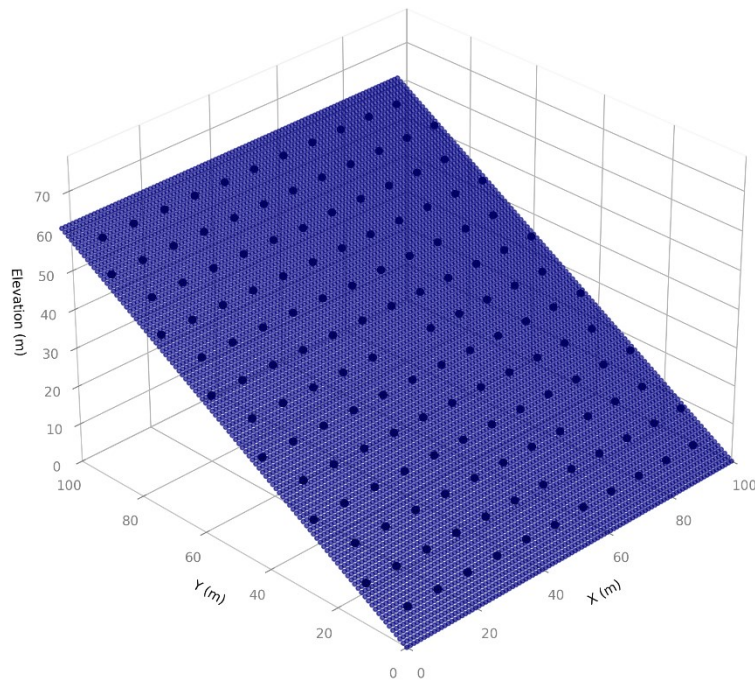
=

Hangparallel bei 30°: **32 m**



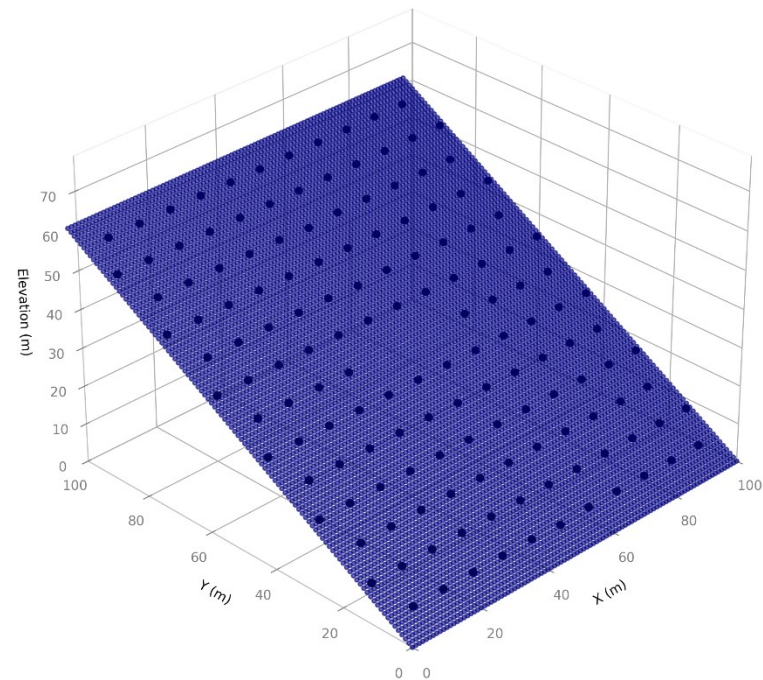
# 1. Analyse mit SOSlope: **Buche**

NaiS Series1 slope 30 deg soildepth 0.6 m width 10 m height 10 m

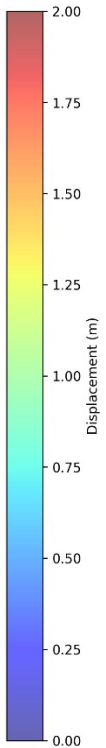


Lückenlänge x Lückenbreite: 10 x 10m

NaiS Series1 slope 30 deg soildepth 0.6 m width 20 m height 10 m

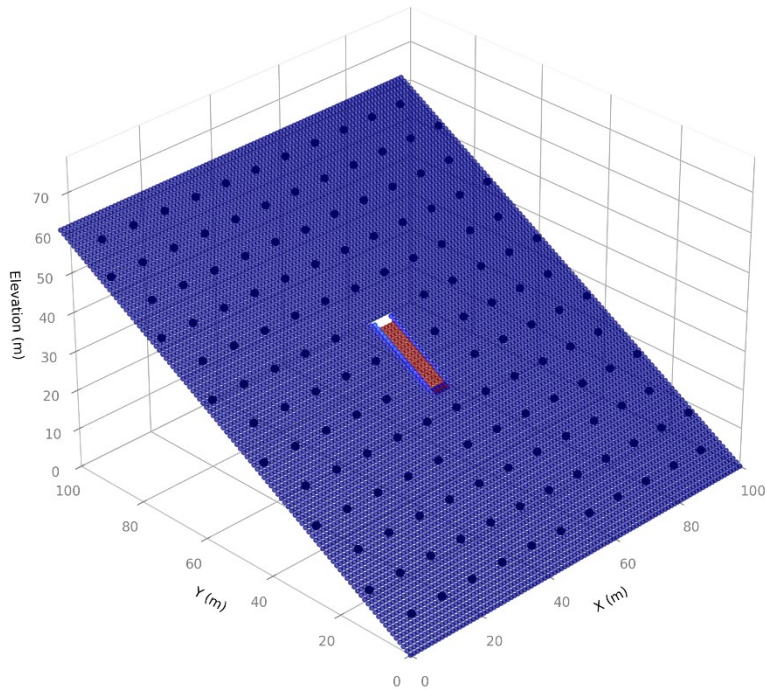


Lückenlänge x Lückenbreite : 10 x 20m

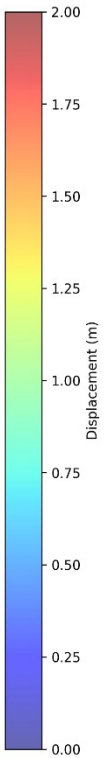
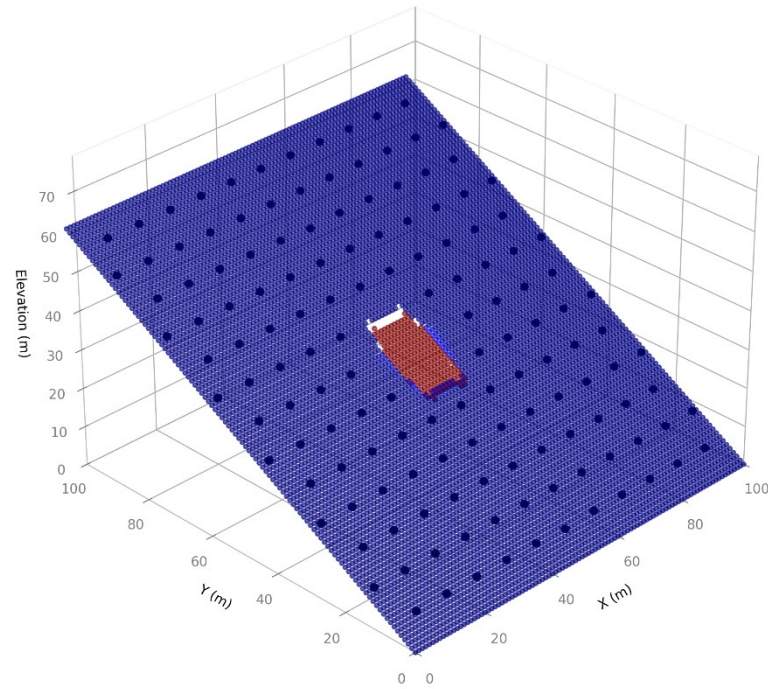


# 1. Analyse mit SOSlope: **Buche**

NaiS Series1 slope 30 deg soildepth 0.6 m width 10 m height 20 m



NaiS Series1 slope 30 deg soildepth 0.6 m width 20 m height 20 m



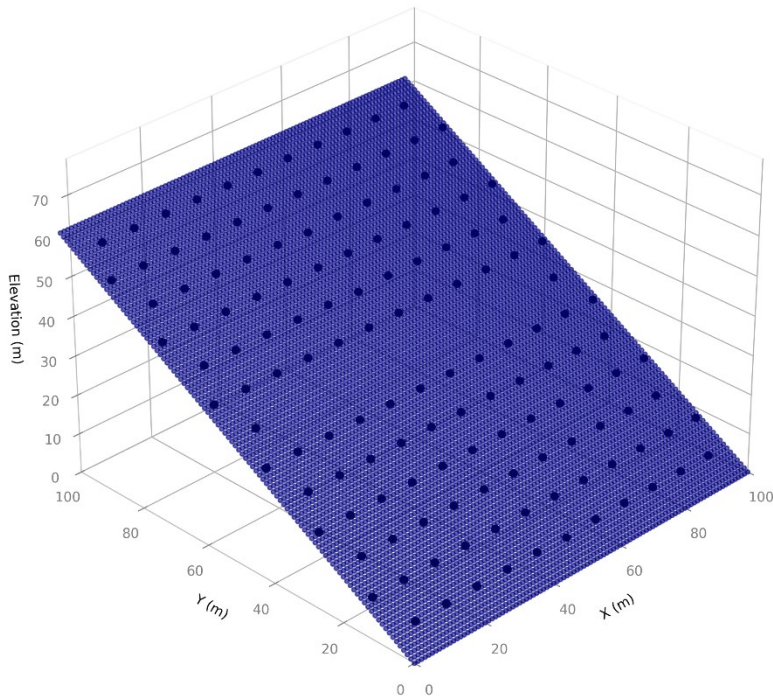
Lückenlänge x Lückenbreite : 20 x 10m

Lückenlänge x Lückenbreite : 20 x 20m

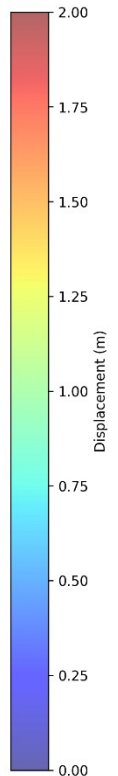
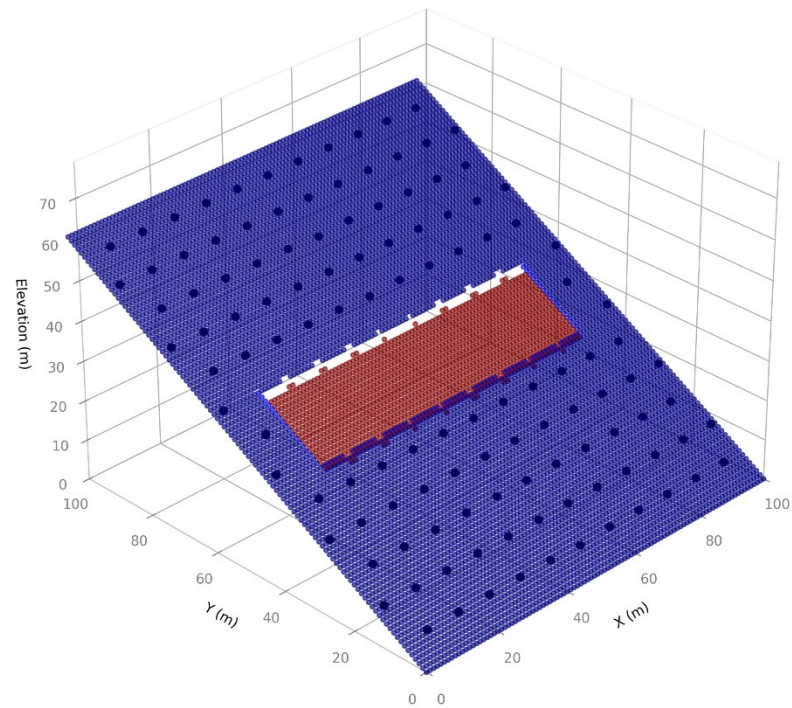


# 1. Analyse mit SOSlope: **Buche**

NaiS Series1 slope 30 deg soildepth 0.6 m width 80 m height 10 m



NaiS Series1 slope 30 deg soildepth 0.6 m width 80 m height 20 m

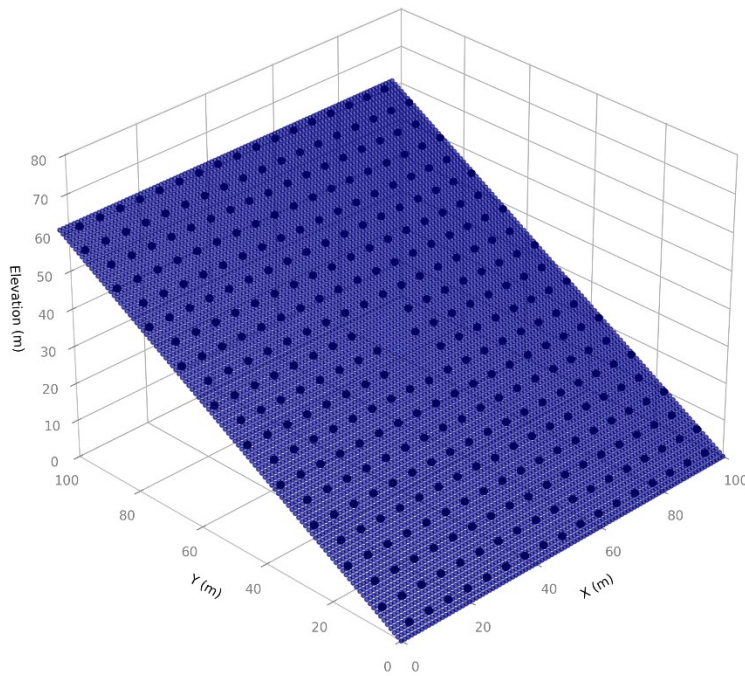


Lückenlänge x Lückenbreite : 10 x 80m

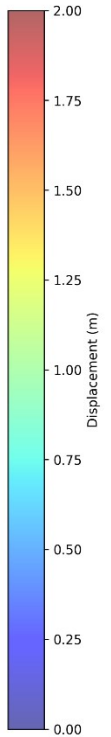
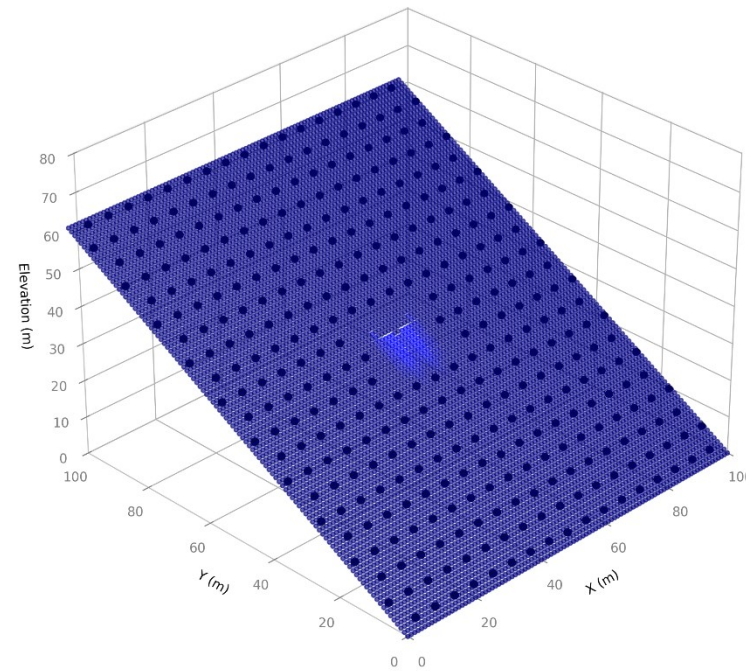
Lückenlänge x Lückenbreite : 20 x 80m

# 1. Analyse mit SOSlope: Fichte

NaiS Series2 slope 30 deg soildepth 0.6 m width 10 m height 10 m



NaiS Series2 slope 30 deg soildepth 0.6 m width 20 m height 10 m



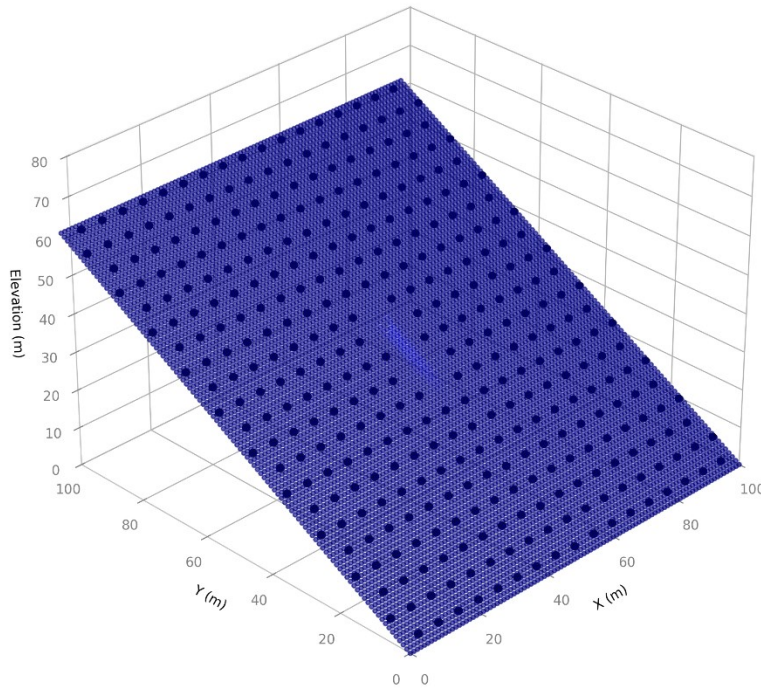
Lückenlänge x Lückenbreite : 10 x 10m

Lückenlänge x Lückenbreite : 10 x 20m

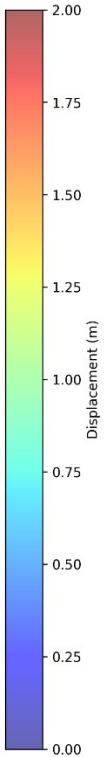
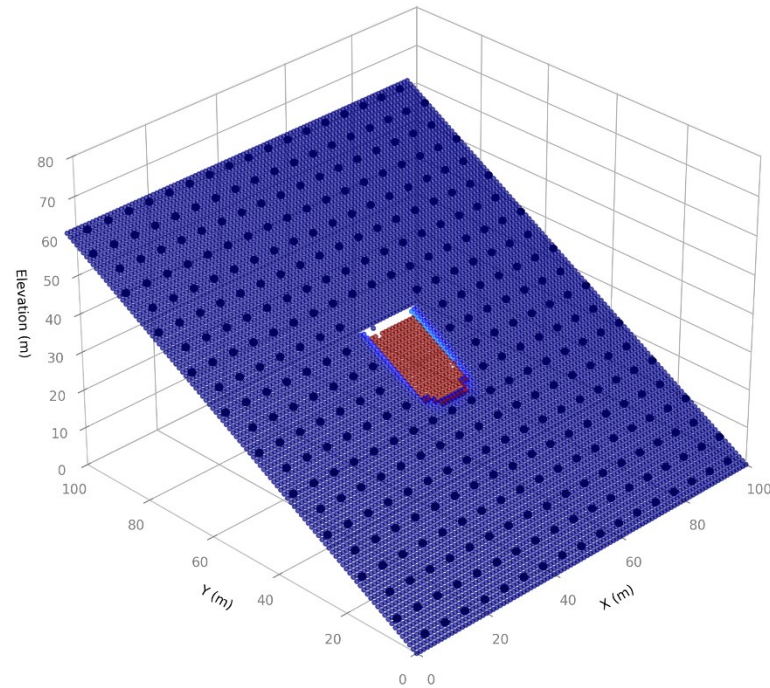


# 1. Analyse mit SOSlope: Fichte

NaiS Series2 slope 30 deg soildepth 0.6 m width 10 m height 20 m



NaiS Series2 slope 30 deg soildepth 0.6 m width 20 m height 20 m

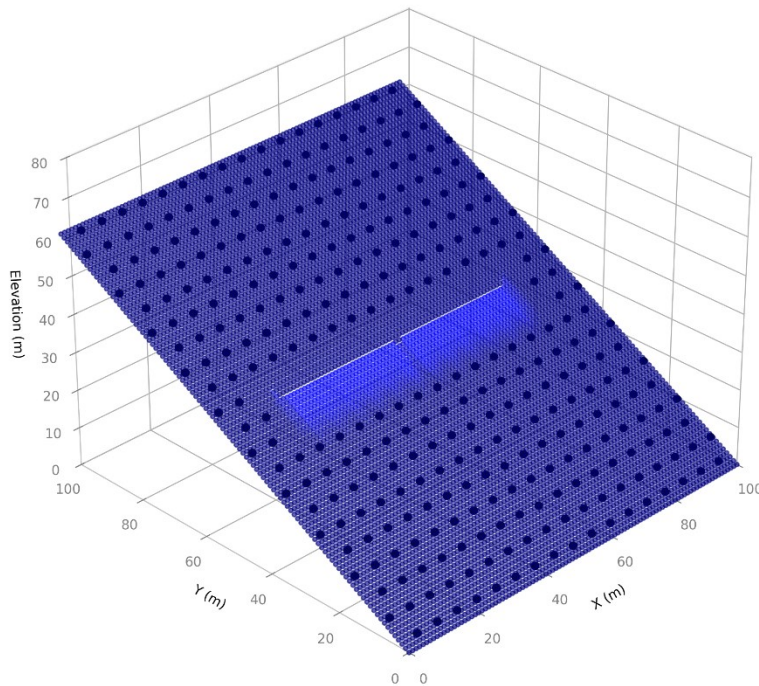


Lückenlänge x Lückenbreite : 20 x 10m

Lückenlänge x Lückenbreite : 20 x 20m

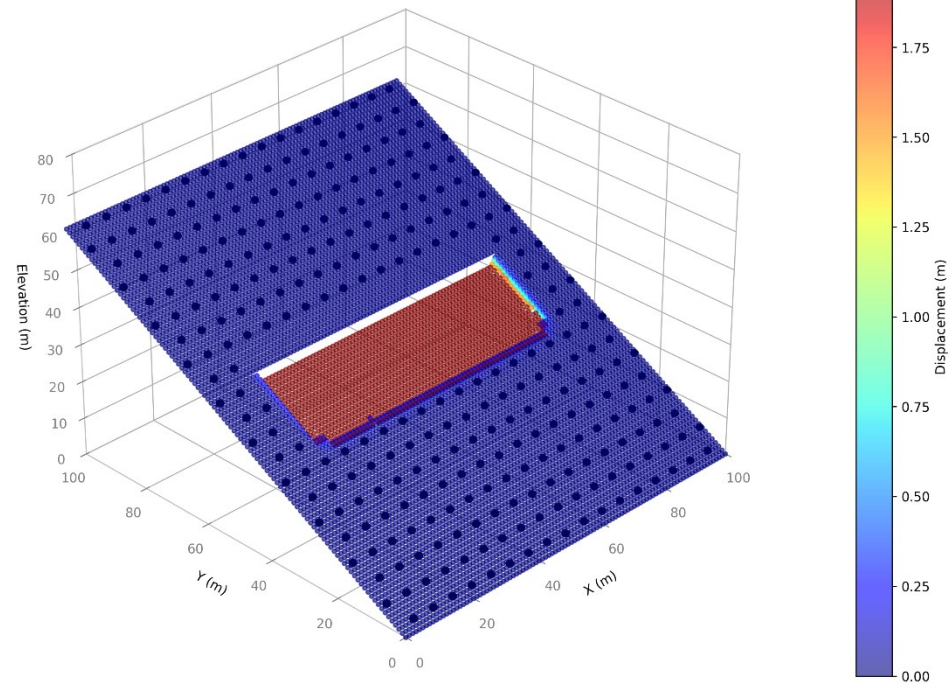
# 1. Analyse mit SOSlope: Fichte

NaiS Series2 slope 30 deg soildepth 0.6 m width 80 m height 10 m



Lückenlänge x Lückenbreite : 10 x 80m

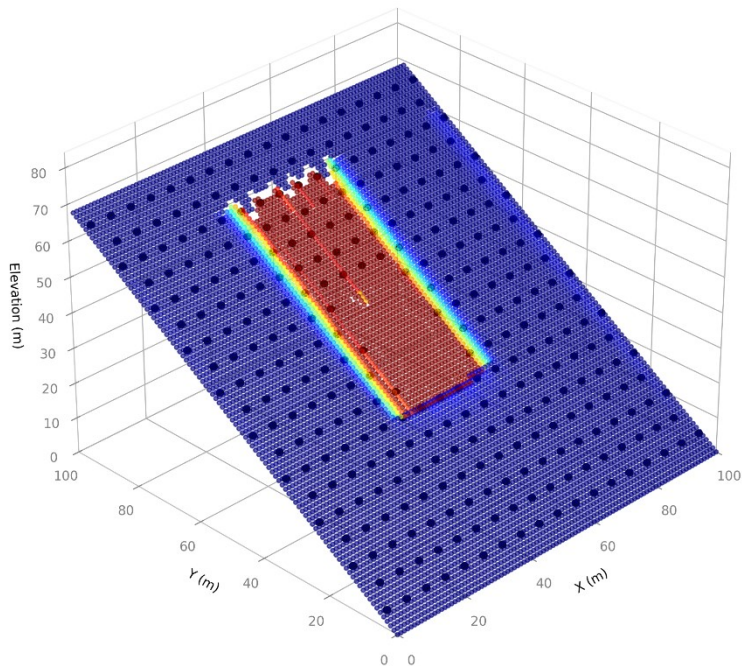
NaiS Series2 slope 30 deg soildepth 0.6 m width 80 m height 20 m



Lückenlänge x Lückenbreite : 20 x 80m

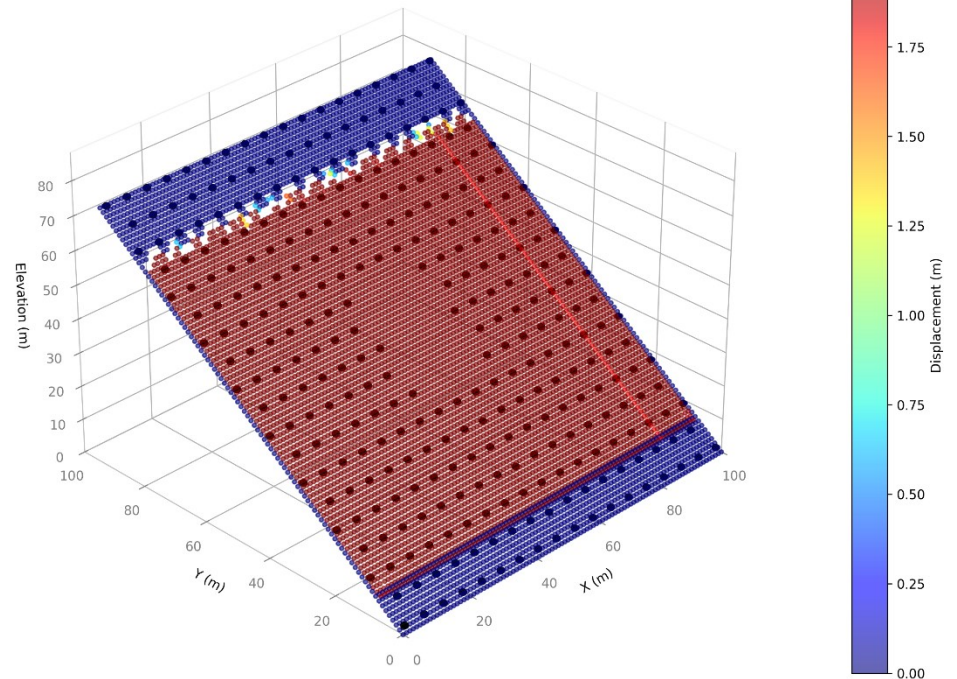
# 1. Analyse mit SOSlope: **Neigung**

NaiS Series3 slope 35 deg soildepth 0.6 m width 20 m height 20 m



Lückenlänge x Lückenbreite : 20 x 20m  
Neigung: 35°

NaiS Series3 slope 40 deg soildepth 0.6 m width 20 m height 20 m

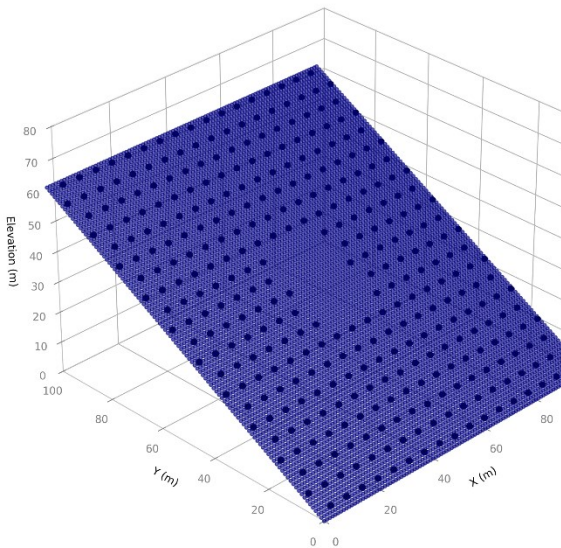


Lückenlänge x Lückenbreite : 20 x 20m  
Neigung: 40°

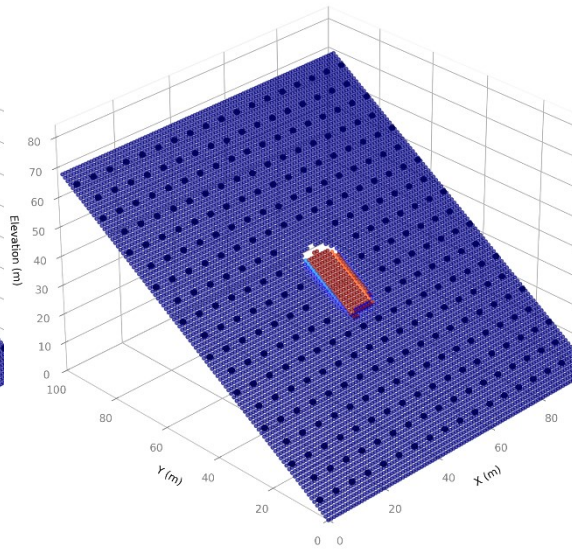


# 1. Analyse mit SOSlope: **Boden**

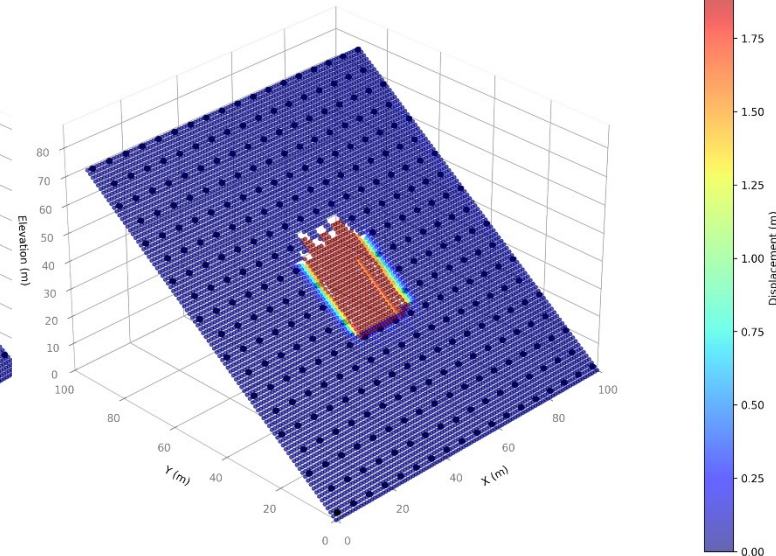
NaiS Series4 slope 30 deg soildepth 0.6 m width 20 m height 20 m



NaiS Series4 slope 35 deg soildepth 0.6 m width 20 m height 20 m



NaiS Series4 slope 40 deg soildepth 0.6 m width 20 m height 20 m



Lückenzlänge x -breite: 20 x 20m

Neigung: **30°**

Boden: **Phi'=25°, c'=2kPa**

Lückenzlänge x -breite: 20 x 20m

Neigung: **35°**

Boden: **Phi'=25°, c'=2kPa**

Lückenzlänge x -breite: 20 x 20m

Neigung: **40°**

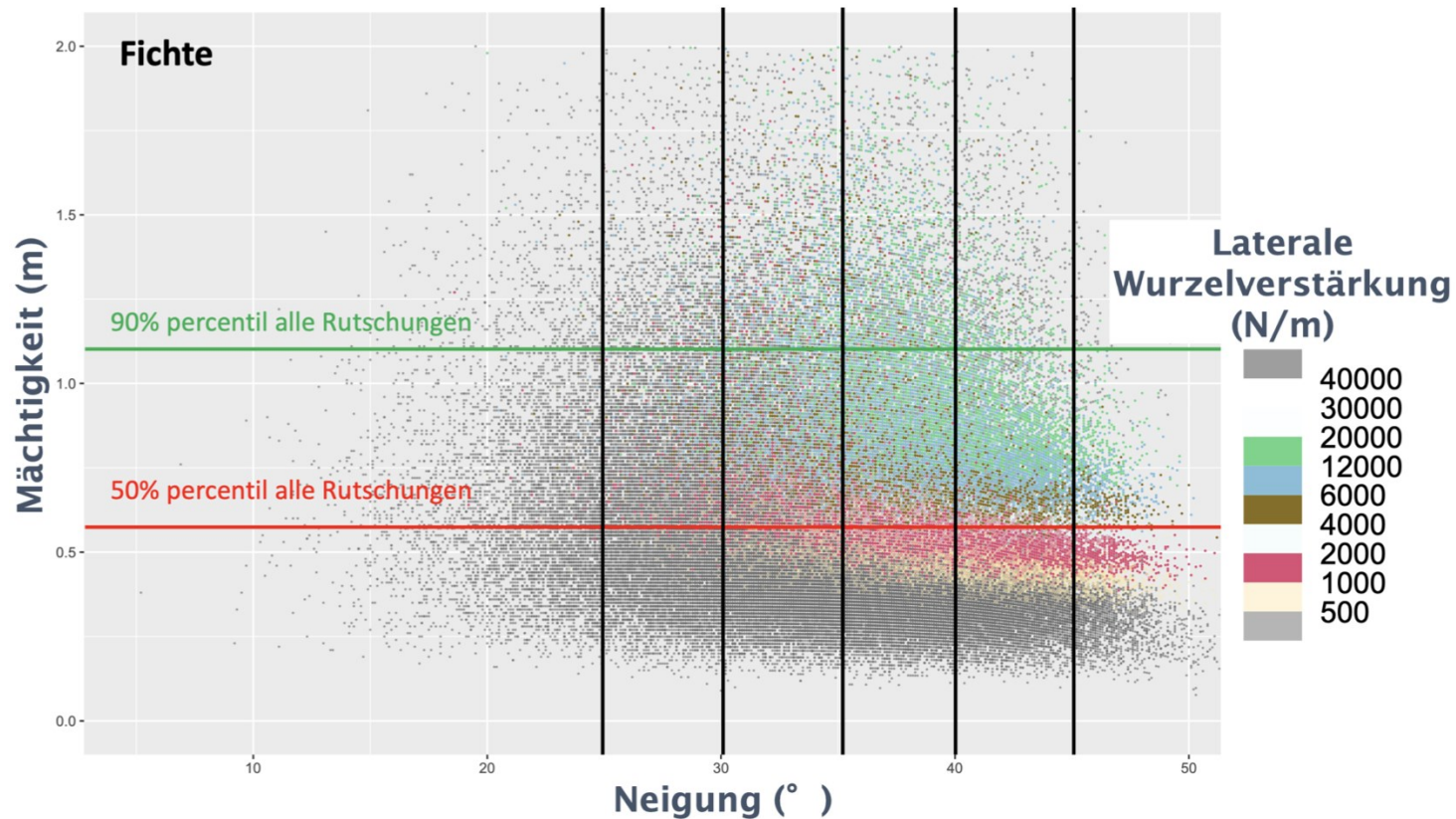
Boden: **Phi'=25°, c'=2kPa**

# 1. Analyse mit SOSlope: Fazit

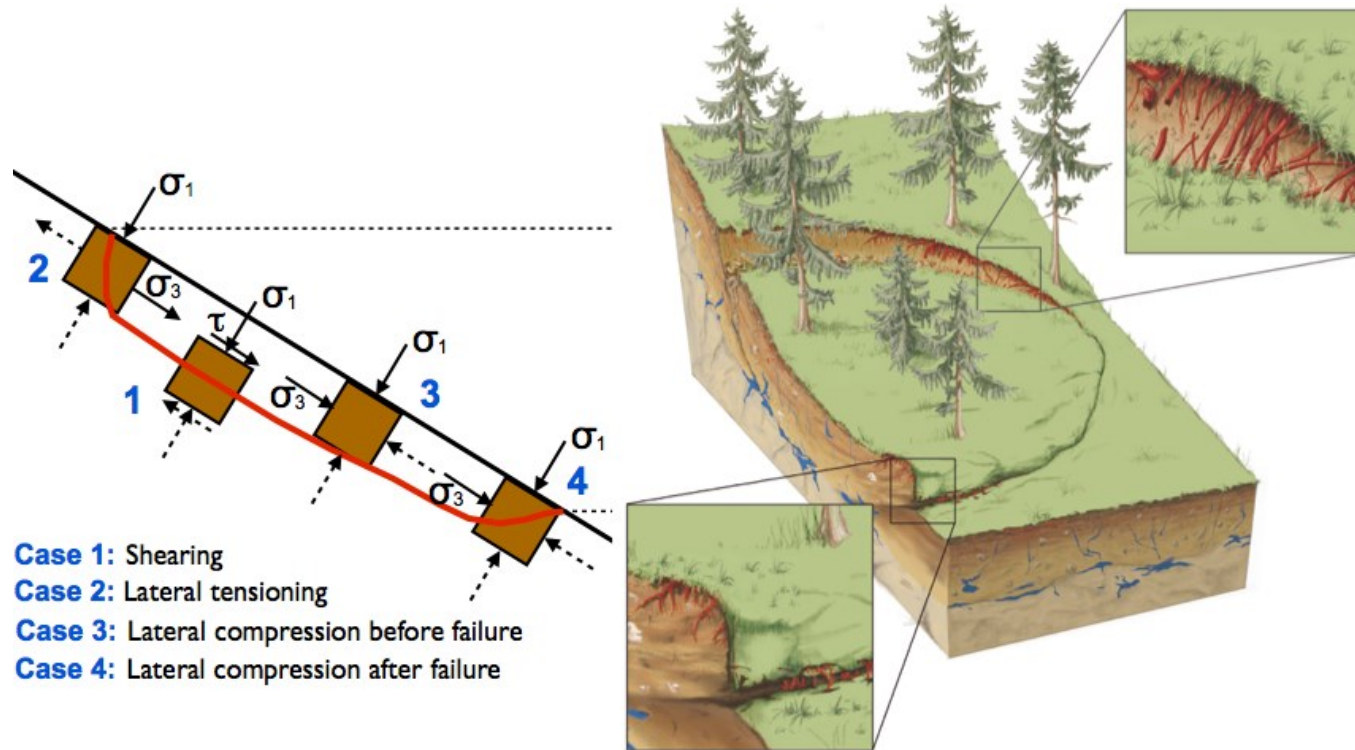
1. Wenn Hangneigung  $> \Phi'$  ist die Schutzwirkung der Wurzeln meist nur für Rutschmächtigkeiten  $< 1\text{m}$  relevant.
2. Lückenlängen (projiziert)  $> 10\text{ m}$  sind kritisch.
3. Die Lückenbreite kann die Rutschvolumina beeinflussen
4. Auf Bestandesebene ist die Schutzwirkung der Fichte mit derjenigen der Buche vergleichbar (bei vergleichbaren DG und Dispositionsbedingungen, z.B.  $0.6\text{ m}$  Mächtigkeit)

## 2. Bemessung der Wurzelwerke

Wie gross muss die Wurzelverstärkung sein, um flachgründige Rutschungen zu stabilisieren?

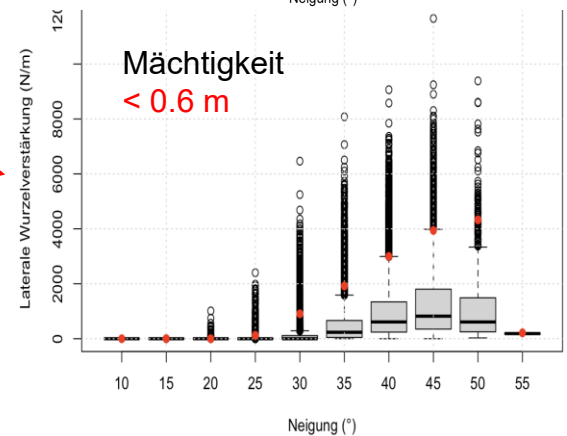
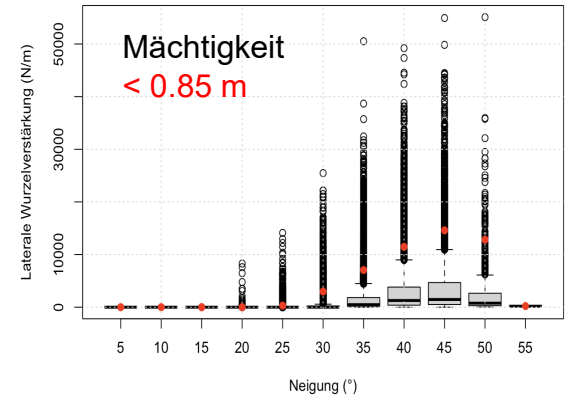
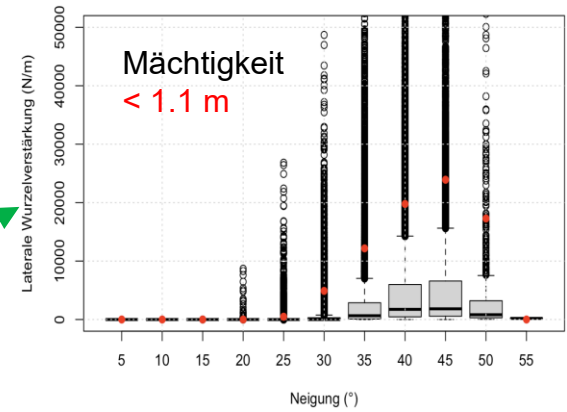
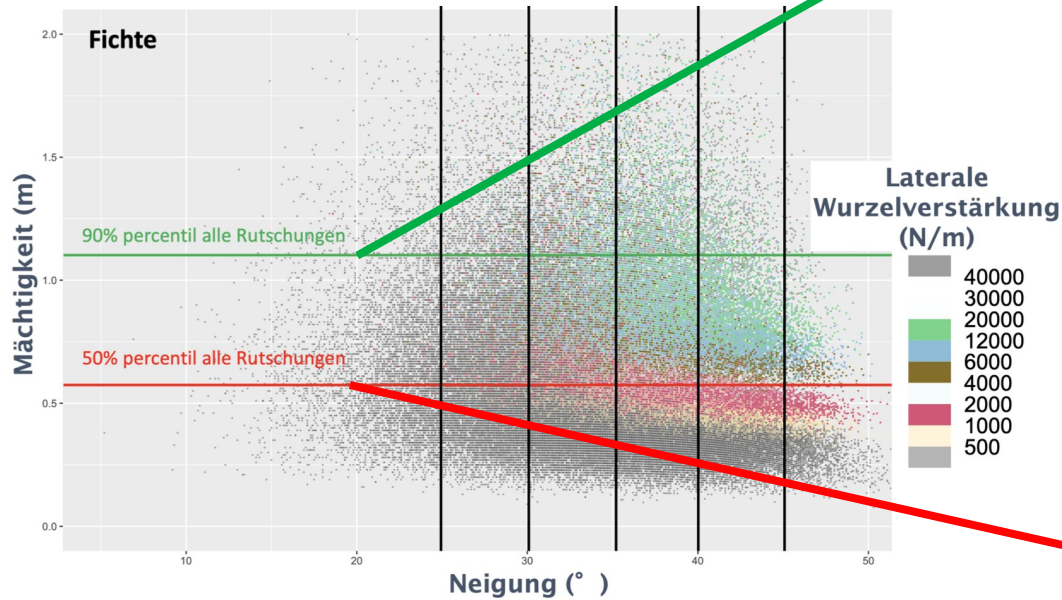


## 2. Bemessung der Wurzelwerke: SlideforNET

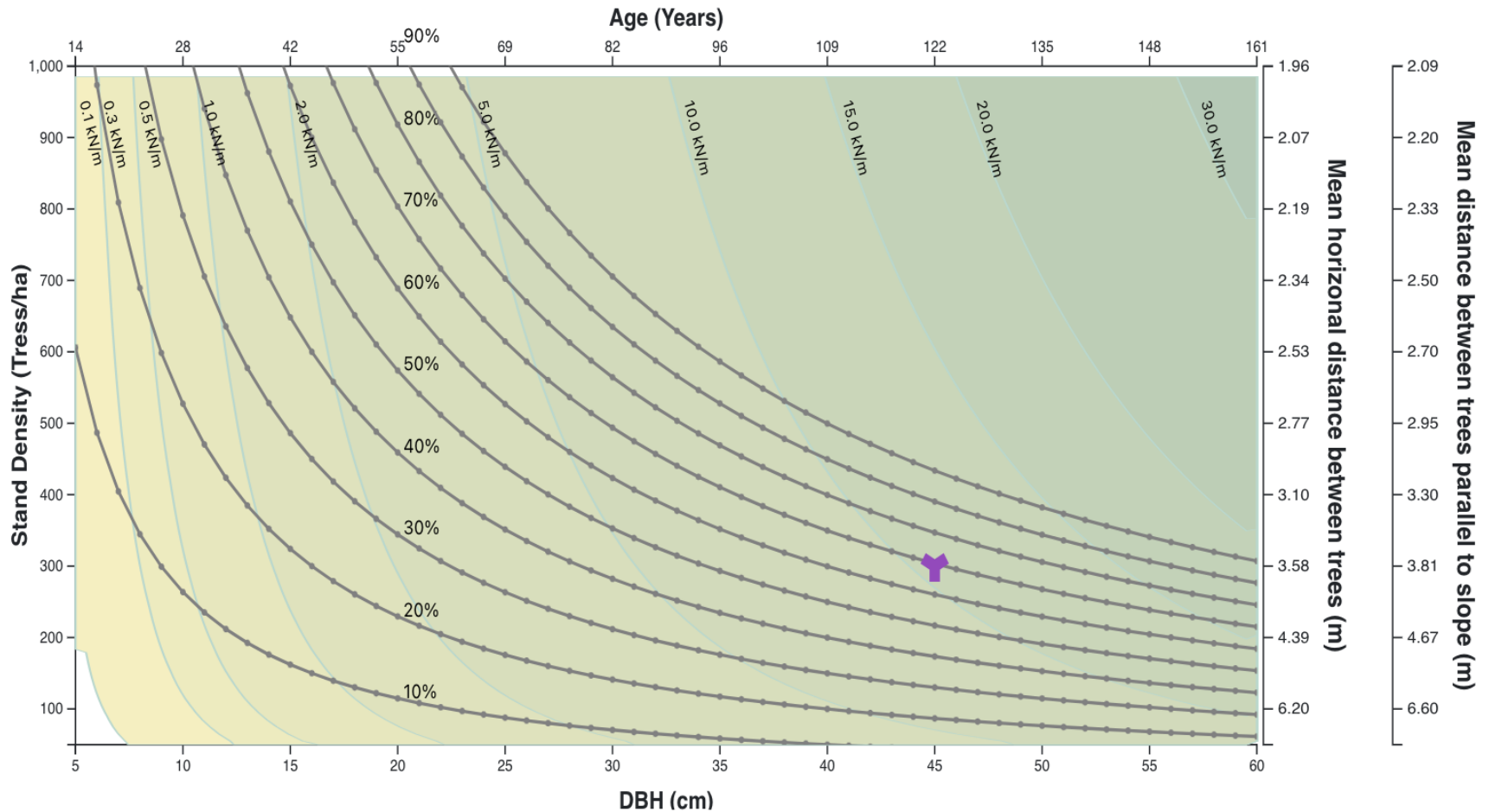




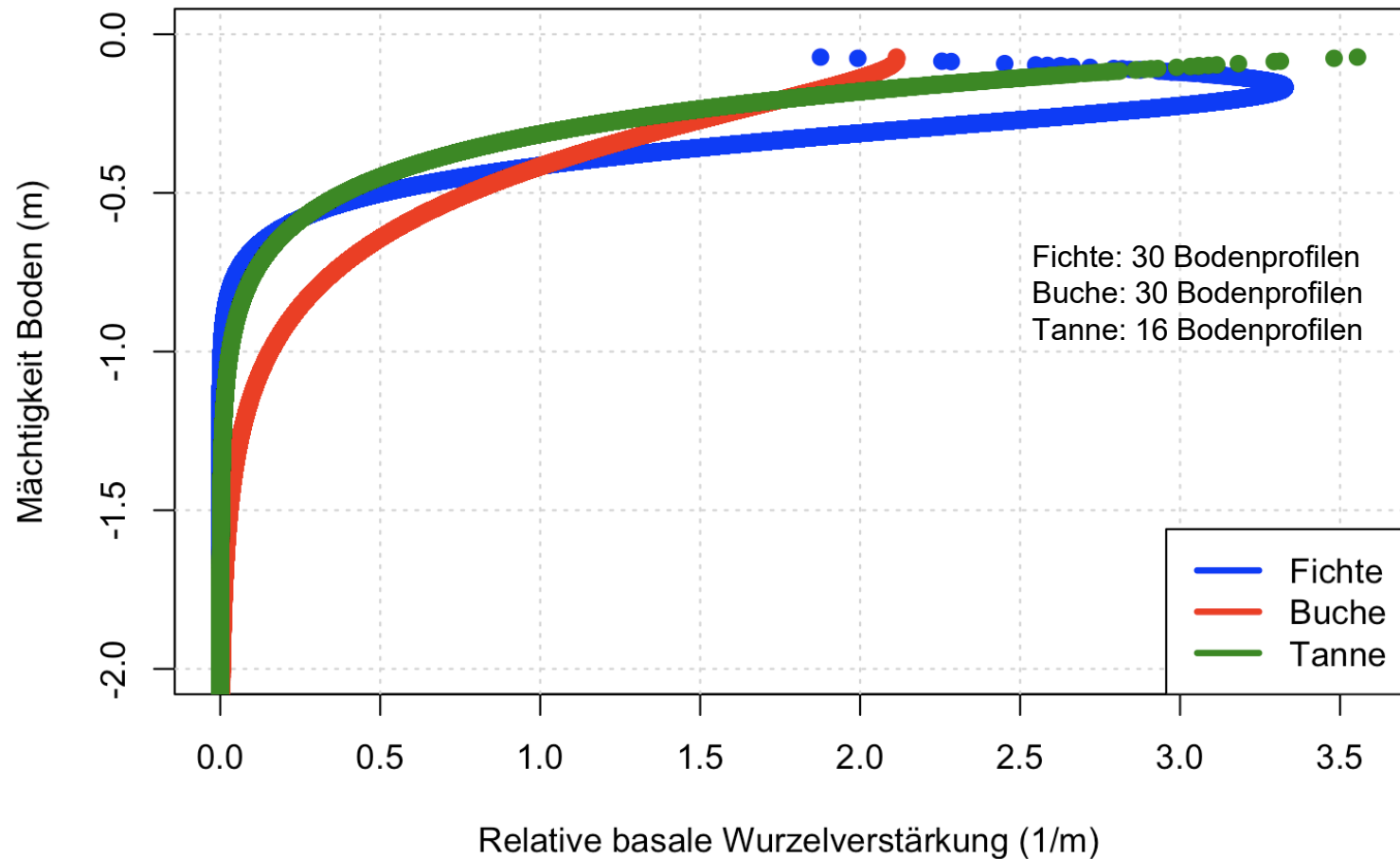
## 2. Bemessung der Wurzelwerke



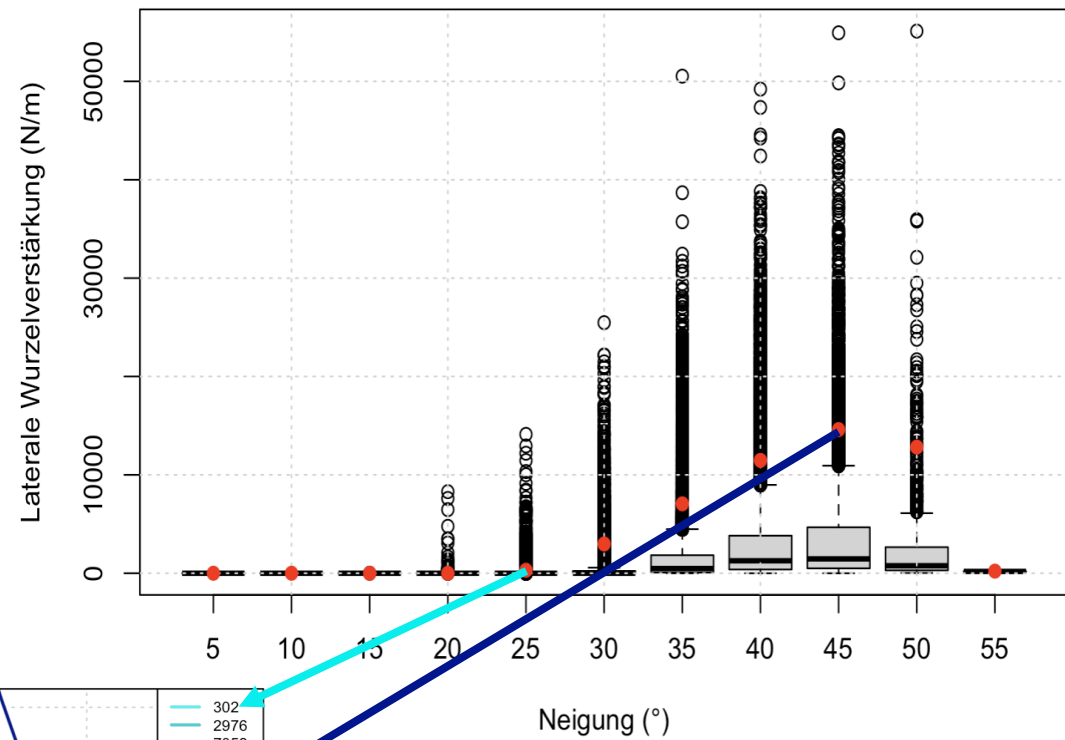
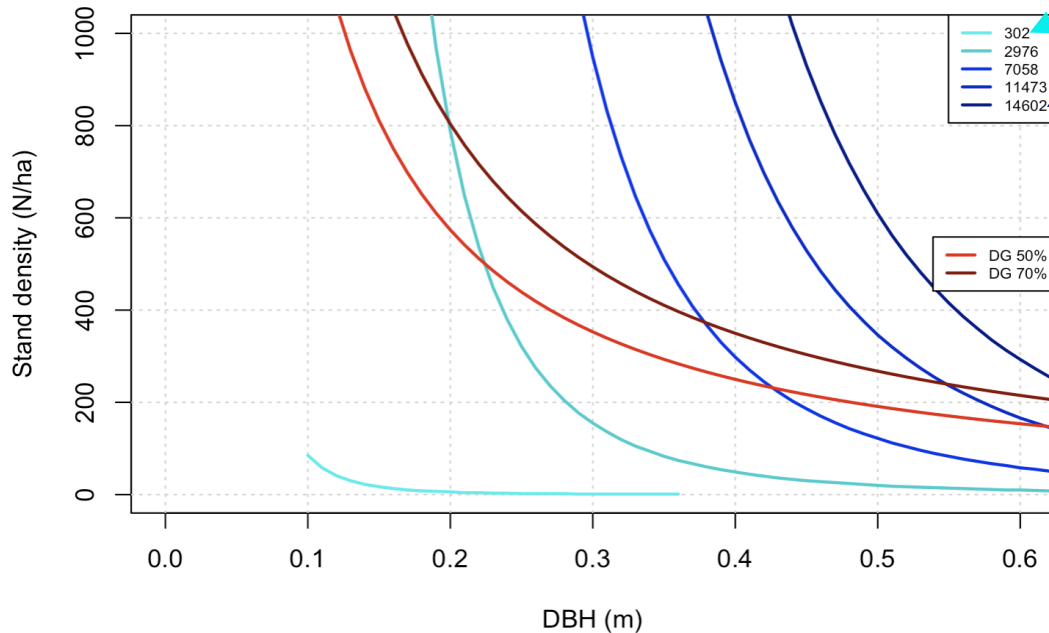
## 2. Bemessung der Wurzelwerke: Zustandsdiagramm in SlideforNET



## 2. Bemessung der Wurzelwerke: Basale Wurzelverstärkung

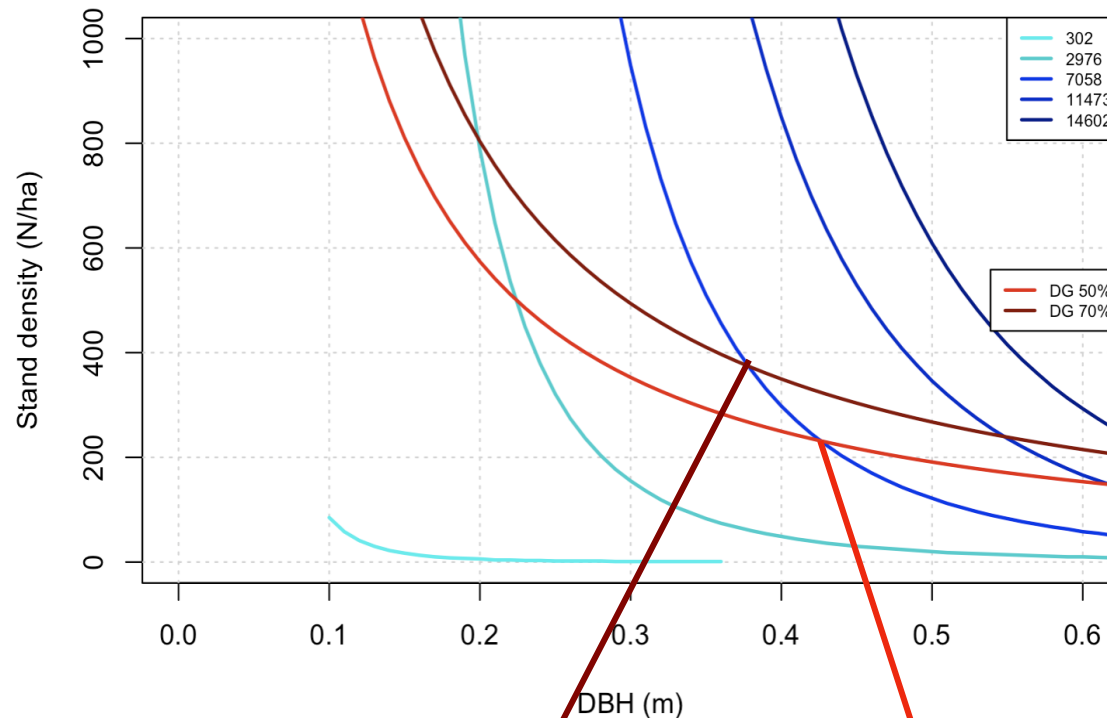


## 2. Bemessung der Wurzelwerke





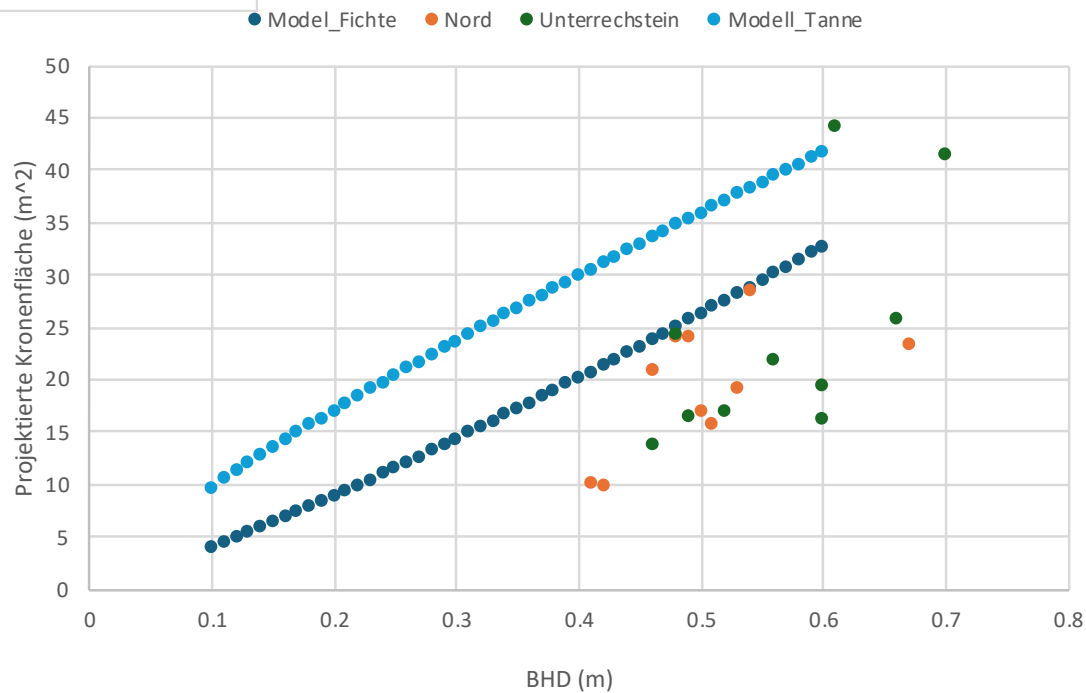
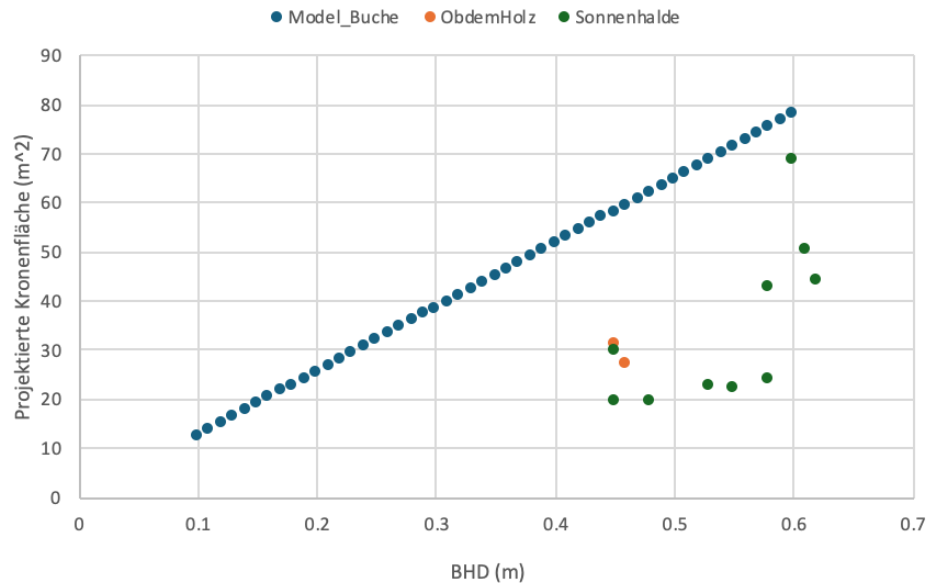
Welches ist der nötige BHD, um eine bestimmte Wurzelverstärkung bei einem gegebenen Deckungsgrad zu erreichen?



Für Fichte und  
Rutschungen mit  
Mächtigkeit < 0.85 m ,  
bei 35° Neigung:

0.38 m

0.43 m



## 2. Bemessung der Wurzelwerke: Vergleich verschiedener Baumarten

Rutschungen mit Mächtigkeit < **0.6 m**

Fichte

| Hangneigung (°) | BHD (m) bei DG 50% | BHD (m) bei DG 70 % |
|-----------------|--------------------|---------------------|
| 25              | > 0.1              | > 0.1               |
| 30              | > 0.1              | > 0.1               |
| 35              | > 0.17             | > 0.15              |
| 40              | > 0.24             | > 0.21              |
| 45              | > 0.3              | > 0.26              |

Buche

| Hangneigung (°) | BHD (m) bei DG 50% | BHD (m) bei DG 70 % |
|-----------------|--------------------|---------------------|
| 25              | >0.1               | >0.1                |
| 30              | >0.18              | >0.14               |
| 35              | >0.24              | >0.19               |
| 40              | >0.29              | >0.23               |
| 45              | >0.33              | >0.26               |

Tanne

| Hangneigung (°) | BHD (m) bei DG 50% | BHD (m) bei DG 70 % |
|-----------------|--------------------|---------------------|
| 25              | >0.1               | >0.1                |
| 30              | >0.19              | >0.17               |
| 35              | >0.29              | >0.26               |
| 40              | >0.4               | >0.37               |
| 45              | >0.48              | >0.44               |

## 2. Bemessung der Wurzelwerke: Vergleich verschiedener Baumarten

Rutschungen mit Mächtigkeit < **0.85 m**

Fichte

| Hangneigung (°) | BHD (m) bei DG 50% | BHD (m) bei DG 70 % |
|-----------------|--------------------|---------------------|
| 25              | > 0.1              | >0.1                |
| 30              | >0.23              | >0.2                |
| 35              | >0.43              | >0.38               |
| 40              | >0.63              | >0.56               |
| 45              | >0.76              | >0.68               |

Buche

| Hangneigung (°) | BHD (m) bei DG 50% | BHD (m) bei DG 70 % |
|-----------------|--------------------|---------------------|
| 25              | >0.13              | >0.11               |
| 30              | >0.23              | >0.18               |
| 35              | >0.3               | >0.25               |
| 40              | >0.37              | >0.3                |
| 45              | >0.42              | >0.34               |

Tanne

| Hangneigung (°) | BHD (m) bei DG 50% | BHD (m) bei DG 70 % |
|-----------------|--------------------|---------------------|
| 25              | >0.1               | >0.1                |
| 30              | >0.32              | >0.29               |
| 35              | >0.58              | >0.54               |
| 40              | -                  | >0.78               |
| 45              | -                  | -                   |



## 2. Bemessung der Wurzelwerke: Vergleich verschiedener Baumarten

Rutschungen mit Mächtigkeit < 1.1 m

Fichte

| Hangneigung (°) | BHD (m) bei DG 50% | BHD (m) bei DG 70 % |
|-----------------|--------------------|---------------------|
| 25              | >0.1               | >0.1                |
| 30              | >0.32              | >0.29               |
| 35              | >0.63              | >0.56               |
| 40              | -                  | -                   |
| 45              | -                  | -                   |

Buche

| Hangneigung (°) | BHD (m) bei DG 50% | BHD (m) bei DG 70 % |
|-----------------|--------------------|---------------------|
| 25              | >0.13              | >0.11               |
| 30              | >0.26              | >0.21               |
| 35              | >0.37              | >0.3                |
| 40              | >0.46              | >0.38               |
| 45              | >0.52              | >0.43               |

Tanne

| Hangneigung (°) | BHD (m) bei DG 50% | BHD (m) bei DG 70 % |
|-----------------|--------------------|---------------------|
| 25              | >0.12              | >0.11               |
| 30              | >0.44              | >0.41               |
| 35              | -                  | -                   |
| 40              | -                  | -                   |
| 45              | -                  | -                   |

## 2. Bemessung der Wurzelwerke: Vorschlag NaiS-Profil

**Minimal:** Ein Bestand mit **DG 50%** kann 95% der mögliche Rutschungen mit Mächtigkeit < **0.6 m** stabilisieren (50. Perzentil)

**Ideal:** Ein Bestand mit **DG 70%** kann 95% der mögliche Rutschungen mit Mächtigkeit < **1.1 m** stabilisieren (90. Perzentil)

| Hangneigung (°) | Minimal, BHD(m) | Ideal, BHD(m) |
|-----------------|-----------------|---------------|
| 25              | >0.1            | >0.1          |
| 30              | >0.2            | >0.3          |
| 35              | >0.3            | >0.6          |
| 40              | >0.4            | >0.6          |
| 45              | >0.5            | >0.6          |

| Neigung (°) | Minimaler BHD (cm) – DG (%) > 50% | Idealer BHD (cm) – DG (%) > 70% |
|-------------|-----------------------------------|---------------------------------|
| <25         | >10                               | >10                             |
| 25-30       | >15                               | >20                             |
| 30-35       | >20                               | >47                             |
| 35-40       | >25                               | >55                             |
| >40         | >35                               | >55                             |

↑  
Tanne, <0.6 m  
Buche, <1.1 m

↑  
Fichte, <1.1 m



**Danke für die Aufmerksamkeit!**



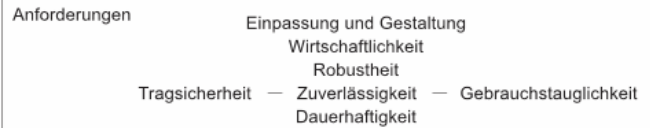


## Bauwerk/Tragwerk

Nutzungsanforderungen

## Projektierung

## Entwurf



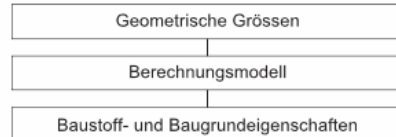
Tragwerkskonzept

## Tragwerksanalyse

## Einwirkungen

- mechanische
- andere physikalische
- chemische
- biologische

## Tragwerksmodell



## Auswirkungen

- Spannungen, Schnittgrössen, Reaktionen
- Verformungen, Verschiebungen
- bauweisen-spezifische Auswirkungen

## Bemessung

Für Bemessung relevante Gefährdungsbilder

Für Bemessung relevante Nutzungszustände

## Bemessungssituationen

- andauernd
- vorübergehend
- aussergewöhnlich

## Grenzzustände

## Tragsicherheit

- Gesamtstabilität
- Tragwiderstand
- Ermüdungsfestigkeit

## Gebrauchstauglichkeit

- Funktionstüchtigkeit
- Komfort
- Aussehen

## Lastfälle

Nachweis der Tragsicherheit

Nachweis der Gebrauchstauglichkeit

Konstruktive Durchbildung

## Ausführung

Vorbereitung der Ausführung  
Schutz- und Vorsorgemassnahmen — Bauausführung — Bauverfahren  
Ausführungskontrollen  
Abnahme

## Nutzung

## Bauwerksakten:

Nutzungsvereinbarung

Projektbasis

Statische Berechnung

Berichte, Übersichts- und  
Detailpläne, Materiallisten,  
Kostenvoranschlag, Protokolle

Technischer Bericht

Ausschreibungsunterlagen  
Dokumente der Ausführung  
Kontrollplan

Dokumente des ausgeführten  
Bauwerks



Berner  
Fachhochschule

SIA 260, 2013

## Tragwerksanalyse

### Einwirkungen

- mechanische
- andere physikalische
- chemische
- biologische

### Tragwerksmodell

Geometrische Grössen

Berechnungsmodell

Baustoff- und Baugrundeigenschaften

### Auswirkungen

- Spannungen, Schnittgrössen, Reaktionen
- Verformungen, Verschiebungen
- bauweisen-spezifische Auswirkungen

## Bemessung

Für Bemessung relevante Gefährdungsbilder

Für Bemessung relevante Nutzungszustände

Bemessungssituationen

- andauernd
- vorübergehend
- aussergewöhnlich

Grenzzustände

Tragsicherheit

- Gesamtstabilität
- Tragwiderstand
- Ermüdungsfestigkeit

Gebrauchstauglichkeit

- Funktionstüchtigkeit
- Komfort
- Aussehen

Lastfälle

Nachweis der Tragsicherheit

Nachweis der Gebrauchstauglichkeit

Konstruktive Durchbildung

SIA 260, 2013



## Tragwerksanalyse

### Einwirkungen

- mechanische
- andere physikalische
- chemische
- biologische

### Tragwerksmodell

Geometrische Grössen

Berechnungsmodell

Baustoff- und Baugrundeigenschaften

### Auswirkungen

- Spannungen, Schnittgrössen, Reaktionen
- Verformungen, Verschiebungen
- bauweisen-spezifische Auswirkungen

## Bemessung

Für Bemessung relevante Gefährdungsbilder

Für Bemessung relevante Nutzungszustände

Bemessungssituationen

- andauernd
- vorübergehend
- aussergewöhnlich

Grenzzustände

Tragsicherheit

- Gesamtstabilität
- Tragwiderstand
- Ermüdungsfestigkeit

Gebrauchstauglichkeit

- Funktionstüchtigkeit
- Komfort
- Aussehen

Lastfälle

Nachweis der Tragsicherheit

Nachweis der Gebrauchstauglichkeit

Konstruktive Durchbildung

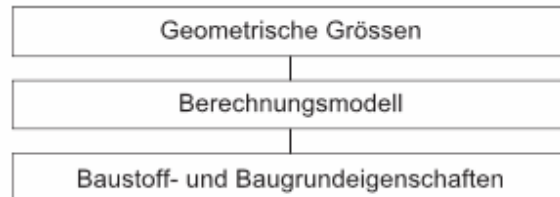
SIA 260, 2013

## Tragwerksanalyse

### Einwirkungen

- mechanische
- andere physikalische
- chemische
- biologische

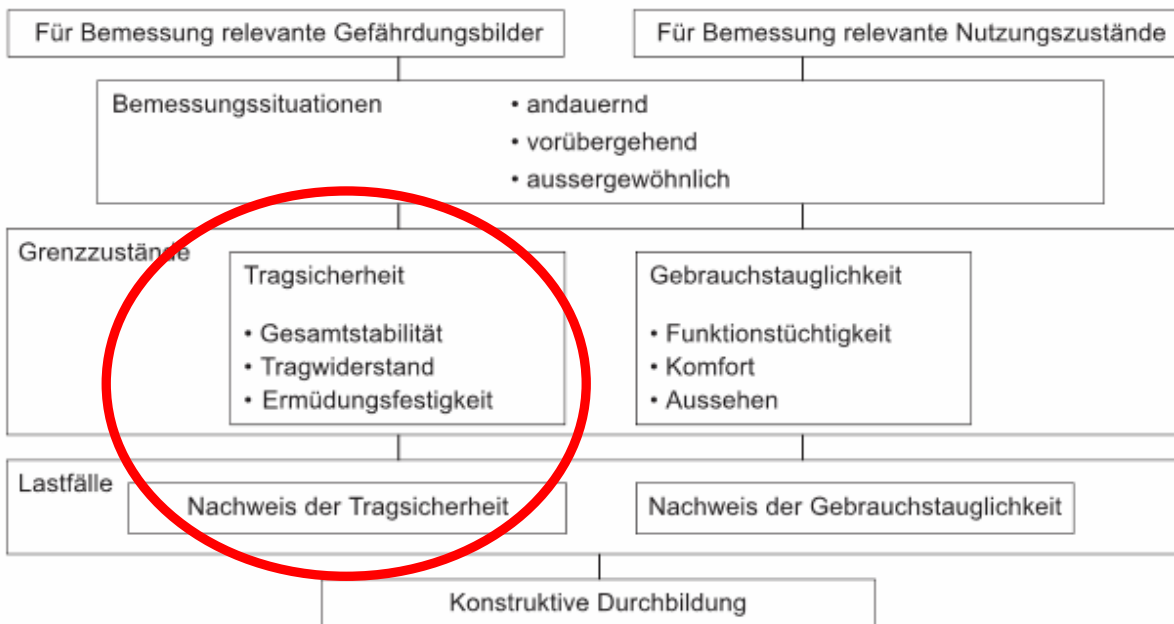
### Tragwerksmodell



### Auswirkungen

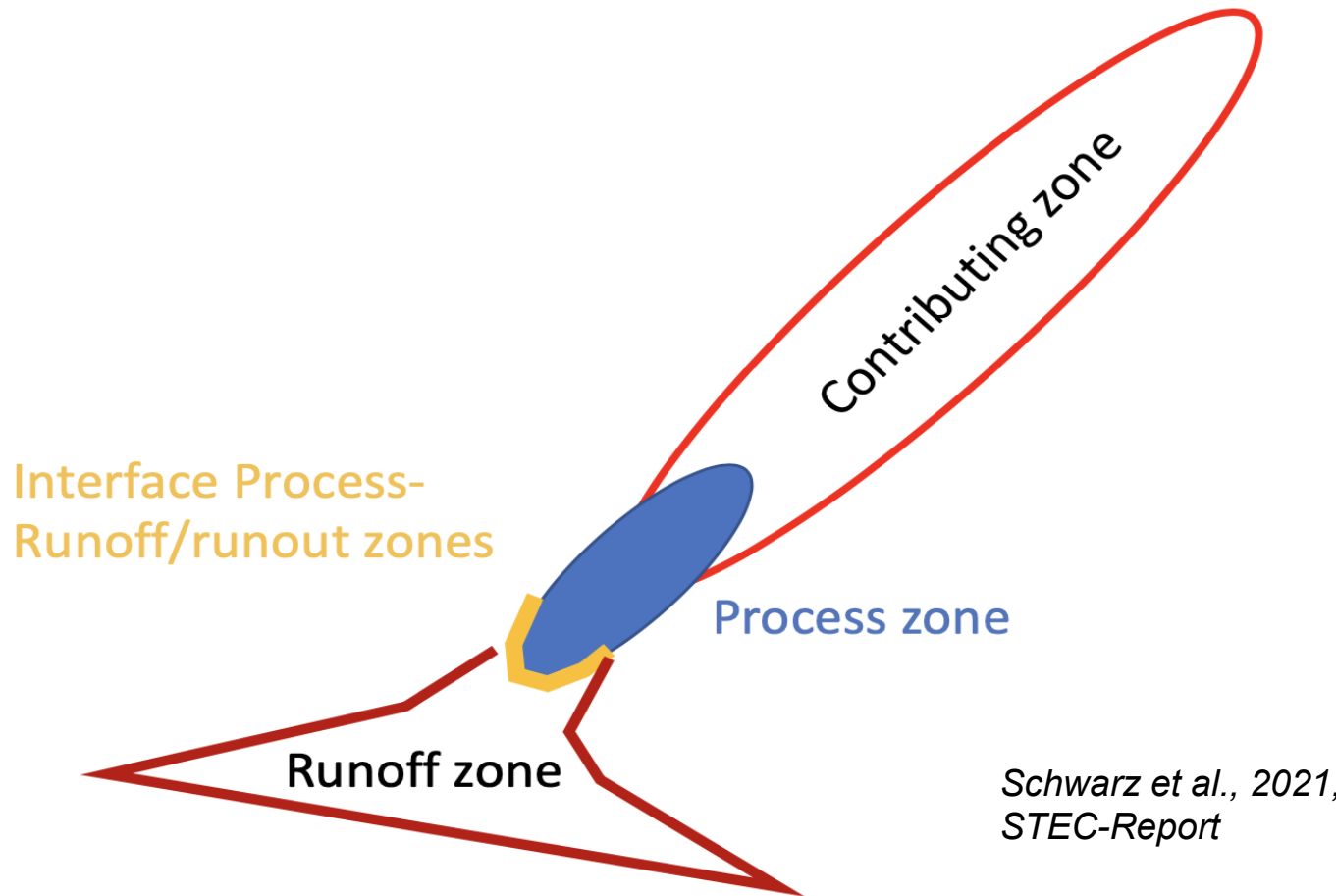
- Spannungen, Schnittgrössen, Reaktionen
- Verformungen, Verschiebungen
- bauweisen-spezifische Auswirkungen

## Bemessung



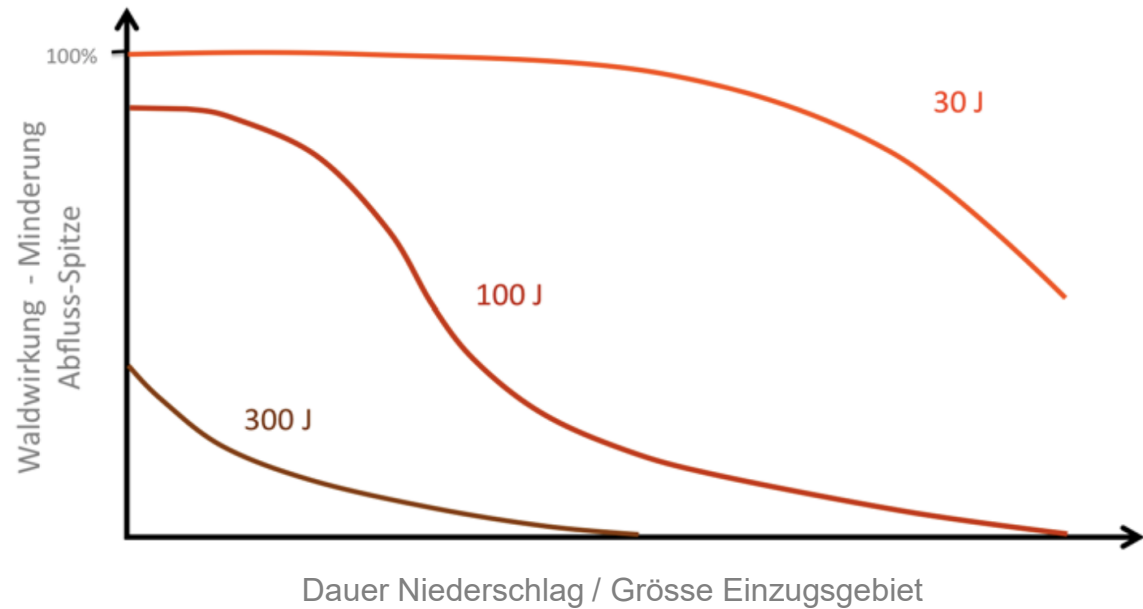
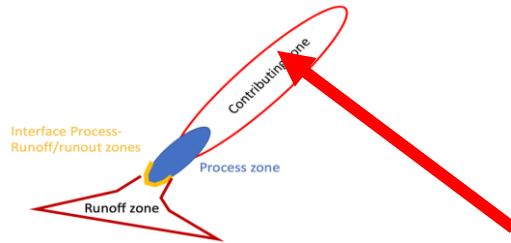
SIA 260, 2013

# Wirkungsräume



*Schwarz et al., 2021,  
STEC-Report*

# Wirkung: Hydrologisch - Abfluss



*Schwarz et al., 2013,  
Forum des Wissen*



# Wirkung: Überblick

## - Infiltrationsgebiet

### . DIREKT:

Hydrologisch: **Interzeption, ET** -> Wasserspeicherung -> Abflussverhalten

### . INDIREKT:

Hydrologisch: **Bodenentwicklung** -> **Durchlässigkeit, Wasserspeicherung** -> Abflussverhalten

## - Entstehungsgebiet

### . DIREKT:

Mechanisch: **Wurzelverstärkung**  
Gewicht der Vegetation  
Wind- und Schneelast

Hydrologisch: Interzeption, ET

### . INDIREKT:

Mechanisch: Bodenentwicklung -> Aggregatenstabilität  
ET -> Scheinbare Kohäsion

Hydrologisch: **Bodenentwicklung** -> **Durchlässigkeit** -> Reduktion Porenwasserdruck

## - Auslaufgebiet

### . DIREKT:

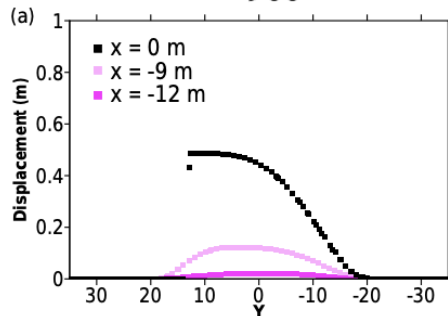
Mechanisch: Energieaufnahme, Retention  
Punktlast  
Stabilisierung gegen Erosion (Minderung zusätzlicher Sedimente)



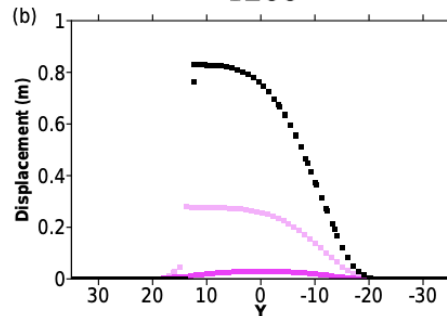
Experiment of the IGT Group of the ETHZ, Prof. S.Springman; TRAMM Project

Time (min) →

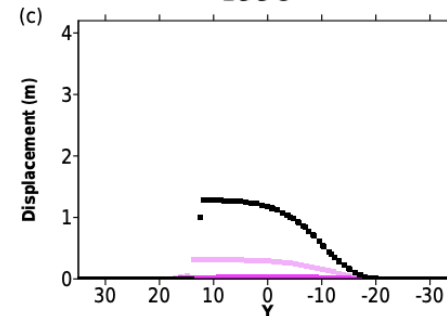
900



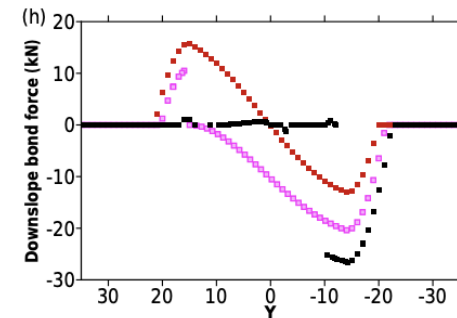
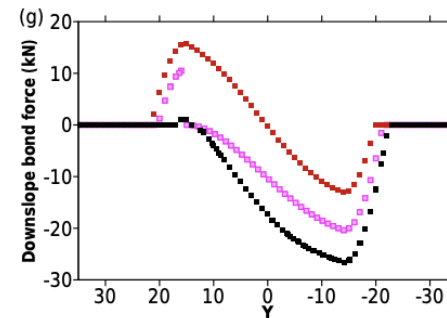
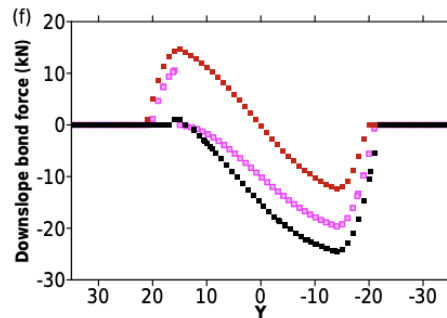
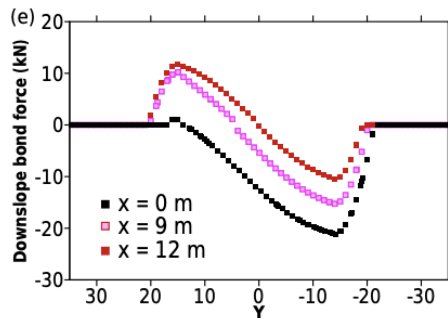
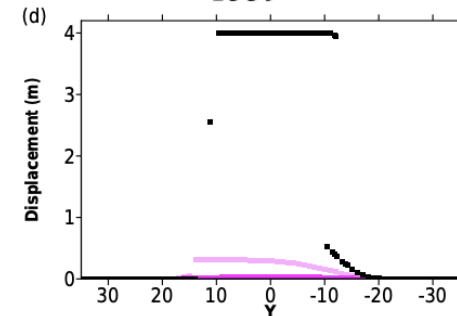
1200



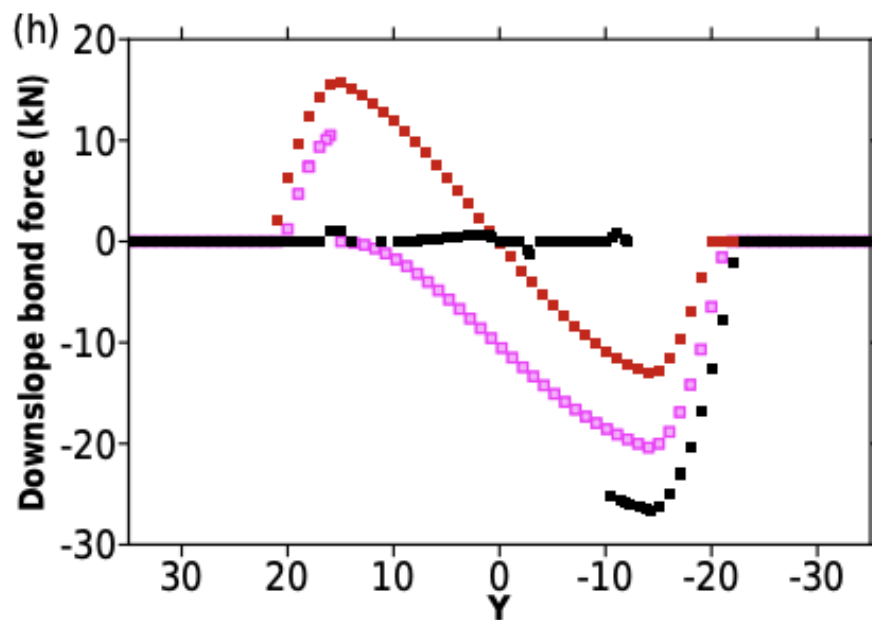
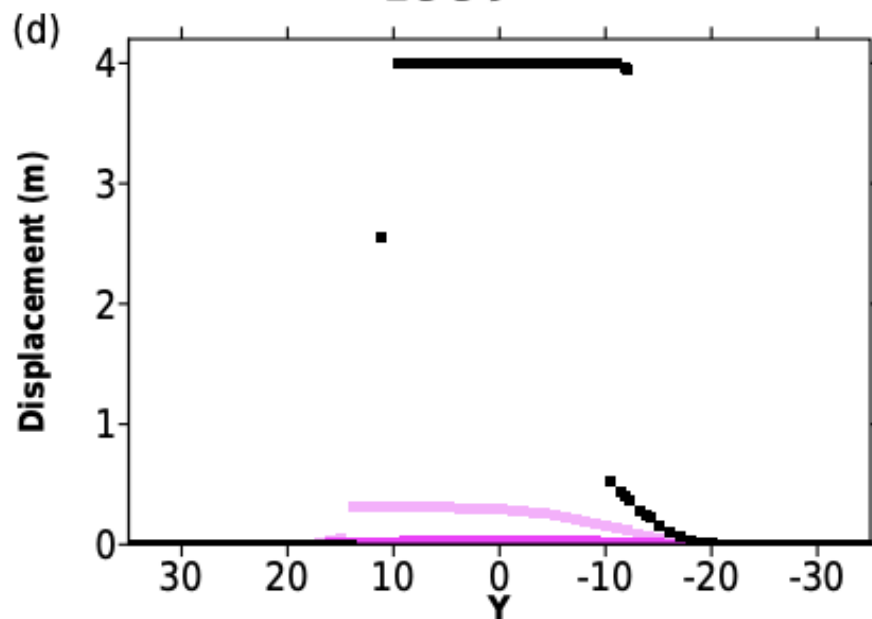
1358



1359

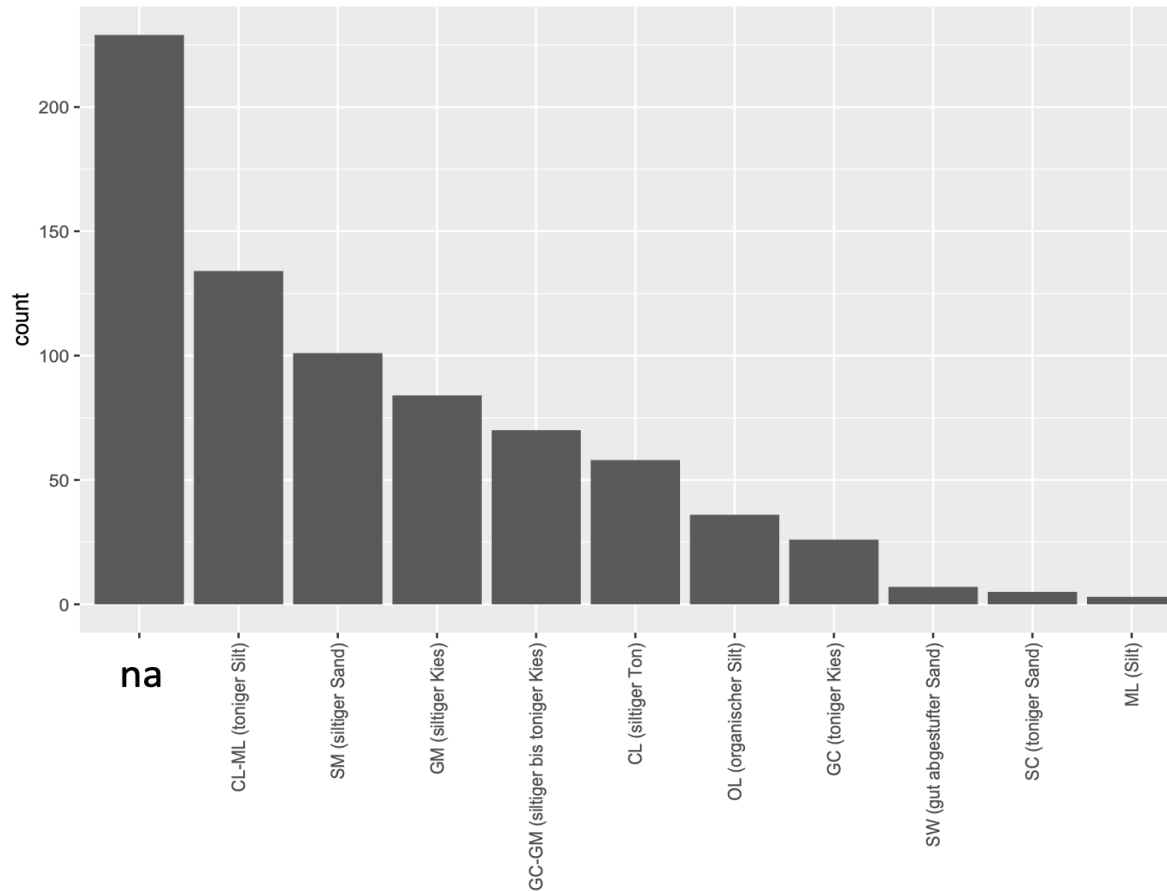


Cohen & Schwarz, 2017,  
*Earth Surf. Dynam*



Cohen & Schwarz, 2017,  
*Earth Surf. Dynam*

# Tragwerksmodell: Analyse der HM-Datenbank mit SlideforNET

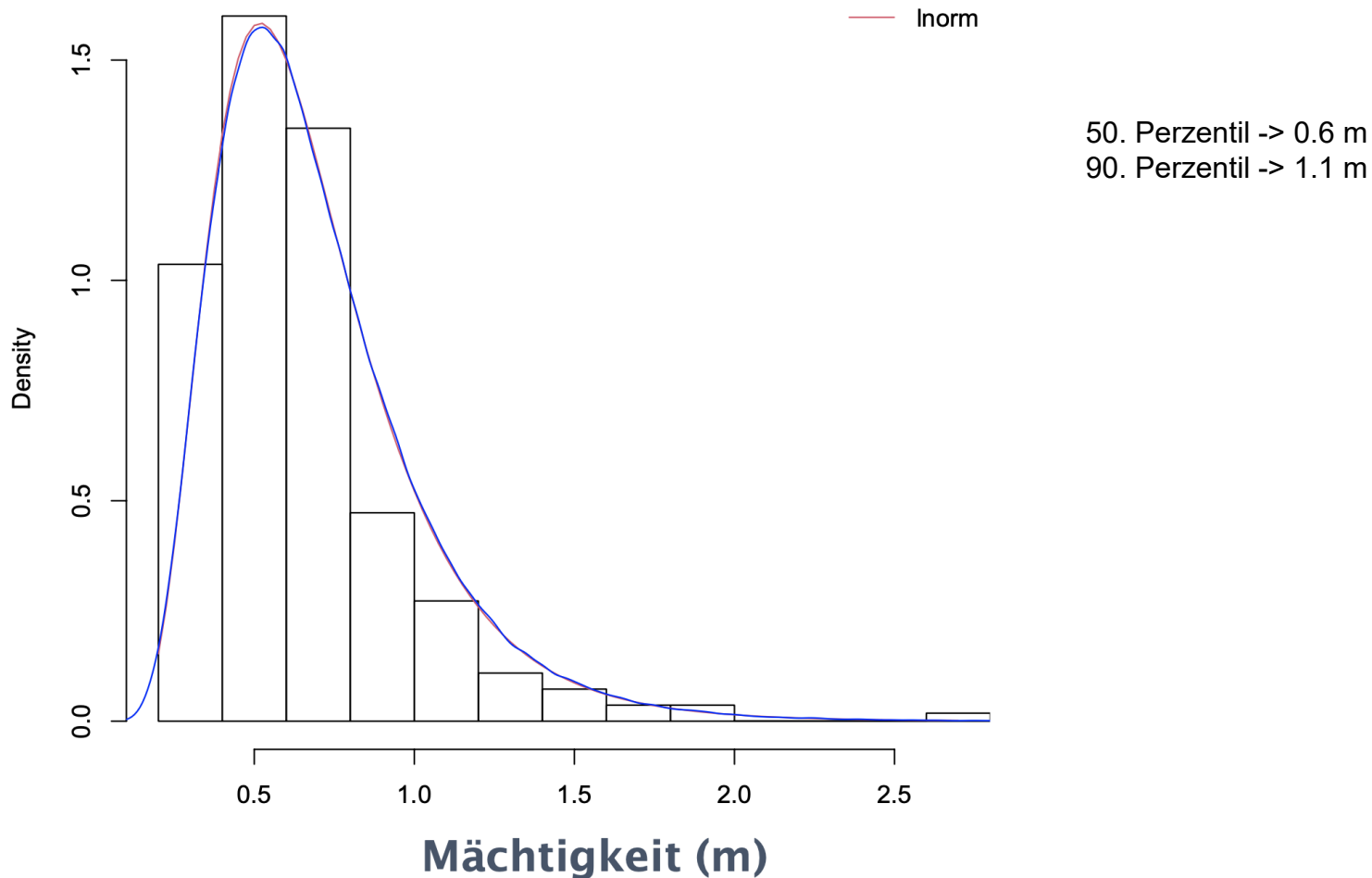


Anzahl Rutschungen in der Datenbank: 761

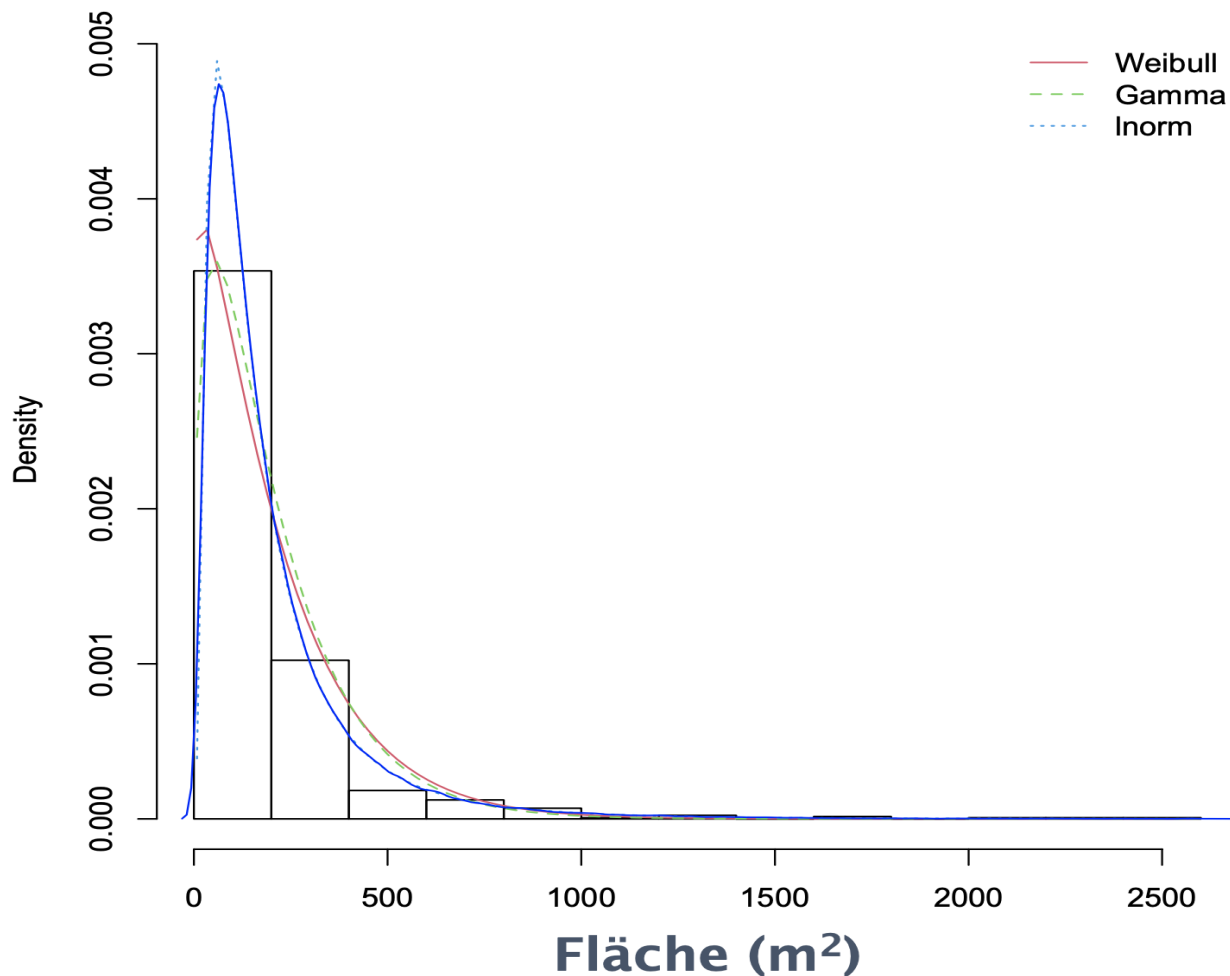
## USCS Klassen



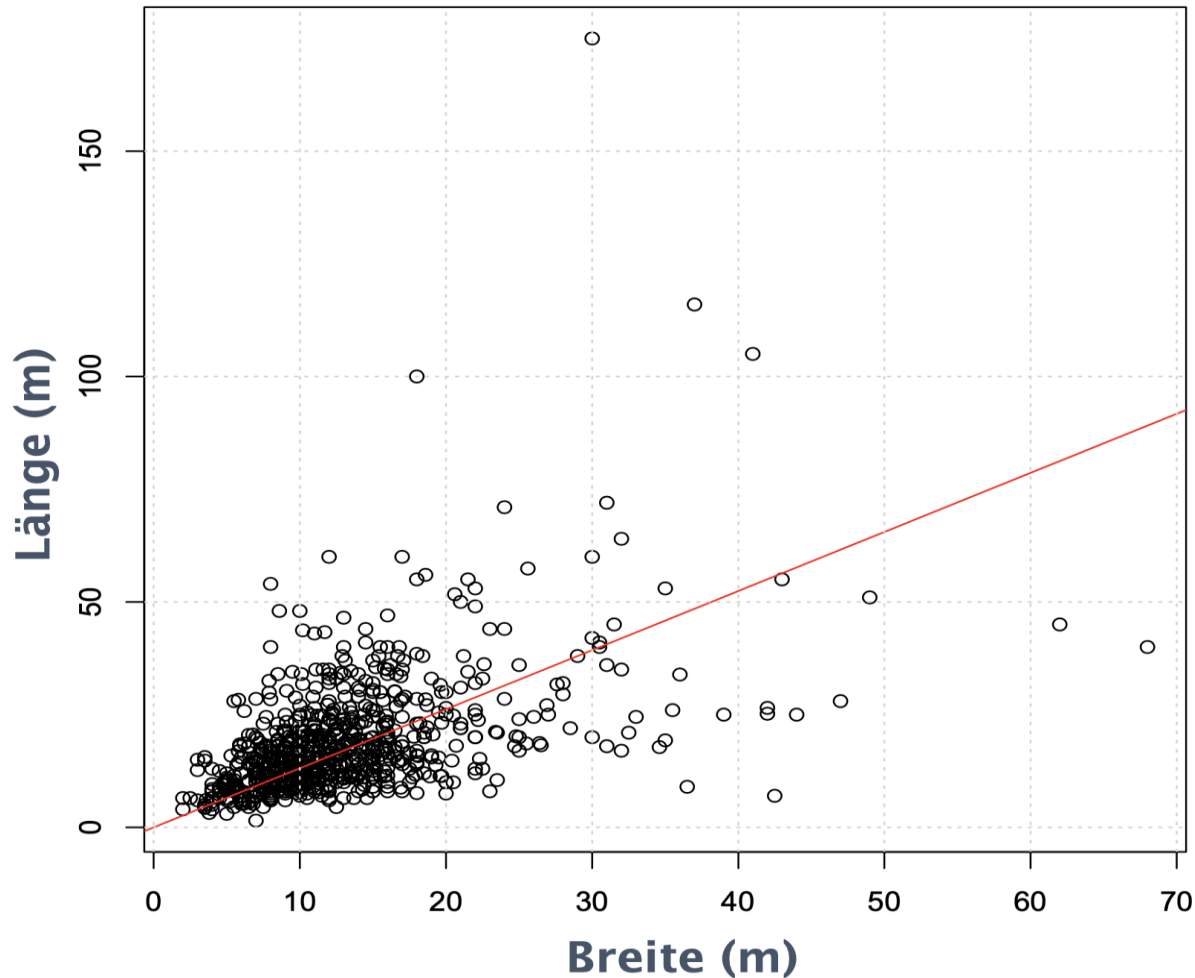
# Tragwerksmodell : Analyse der HM-Datenbank mit SlideforNET



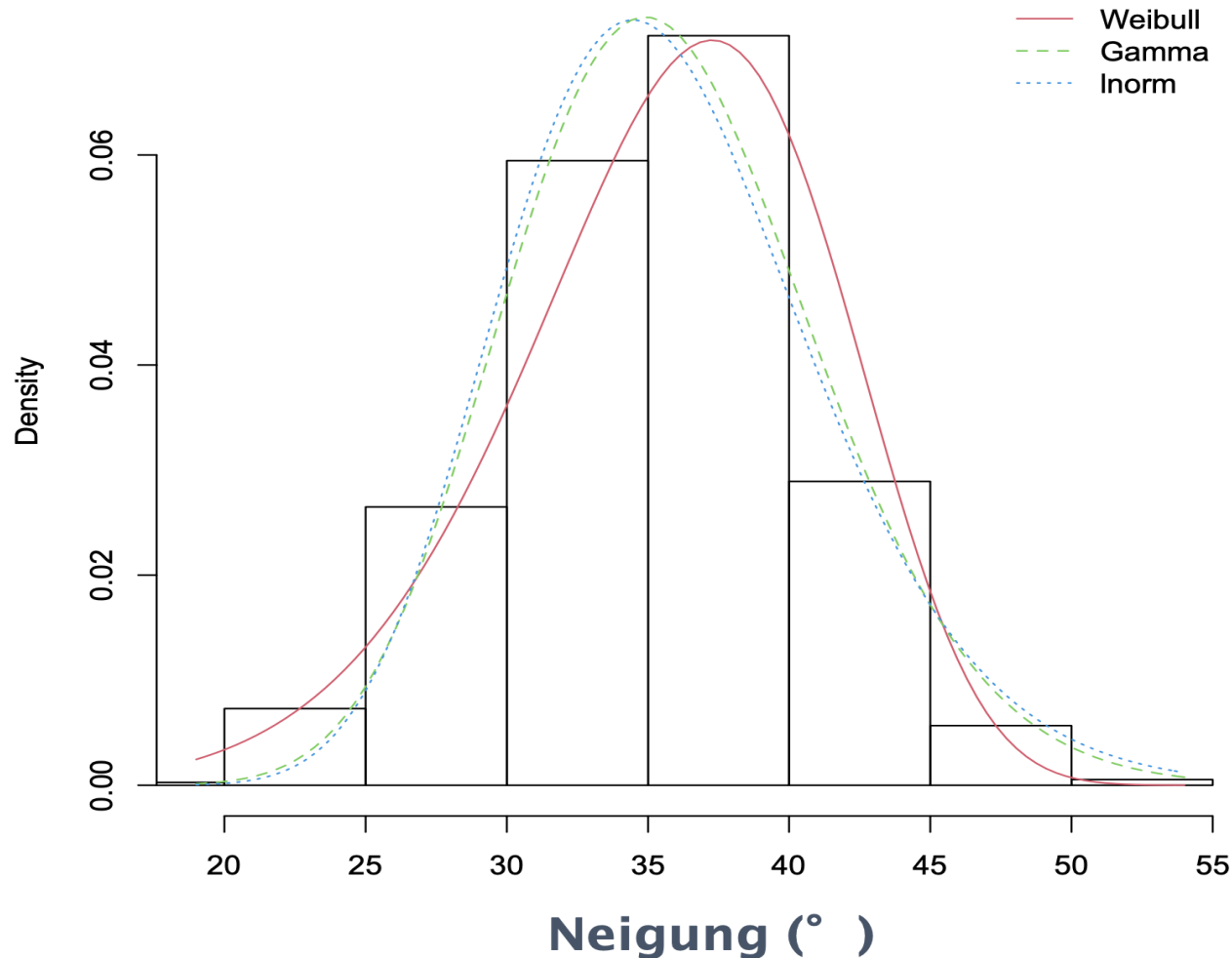
# Tragwerksmodell : Analyse der HM-Datenbank mit SlideforNET



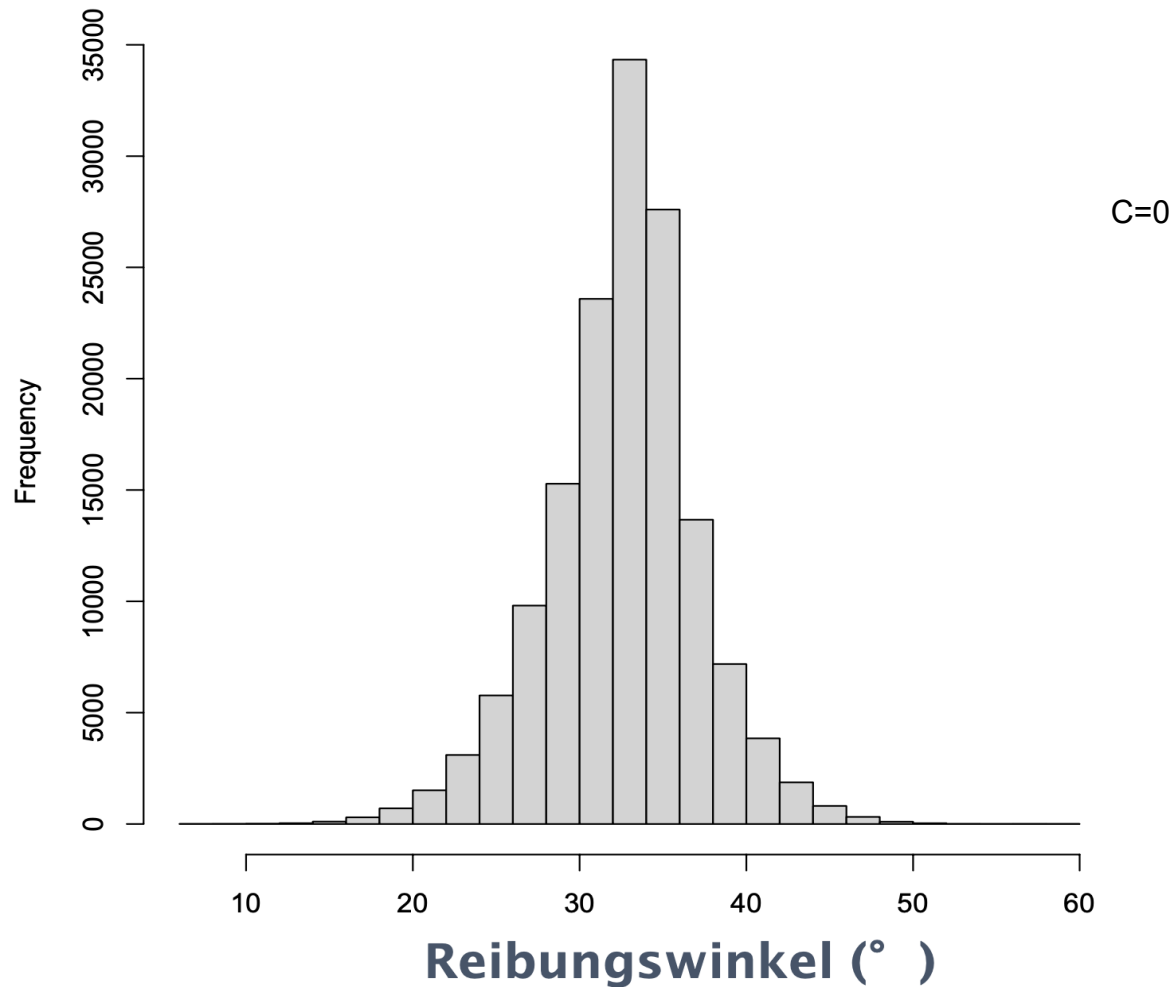
# Tragwerkmodell : Analyse der HM-Datenbank mit SlideforNET



# Tragwerksmodell : Analyse der HM-Datenbank mit SlideforNET

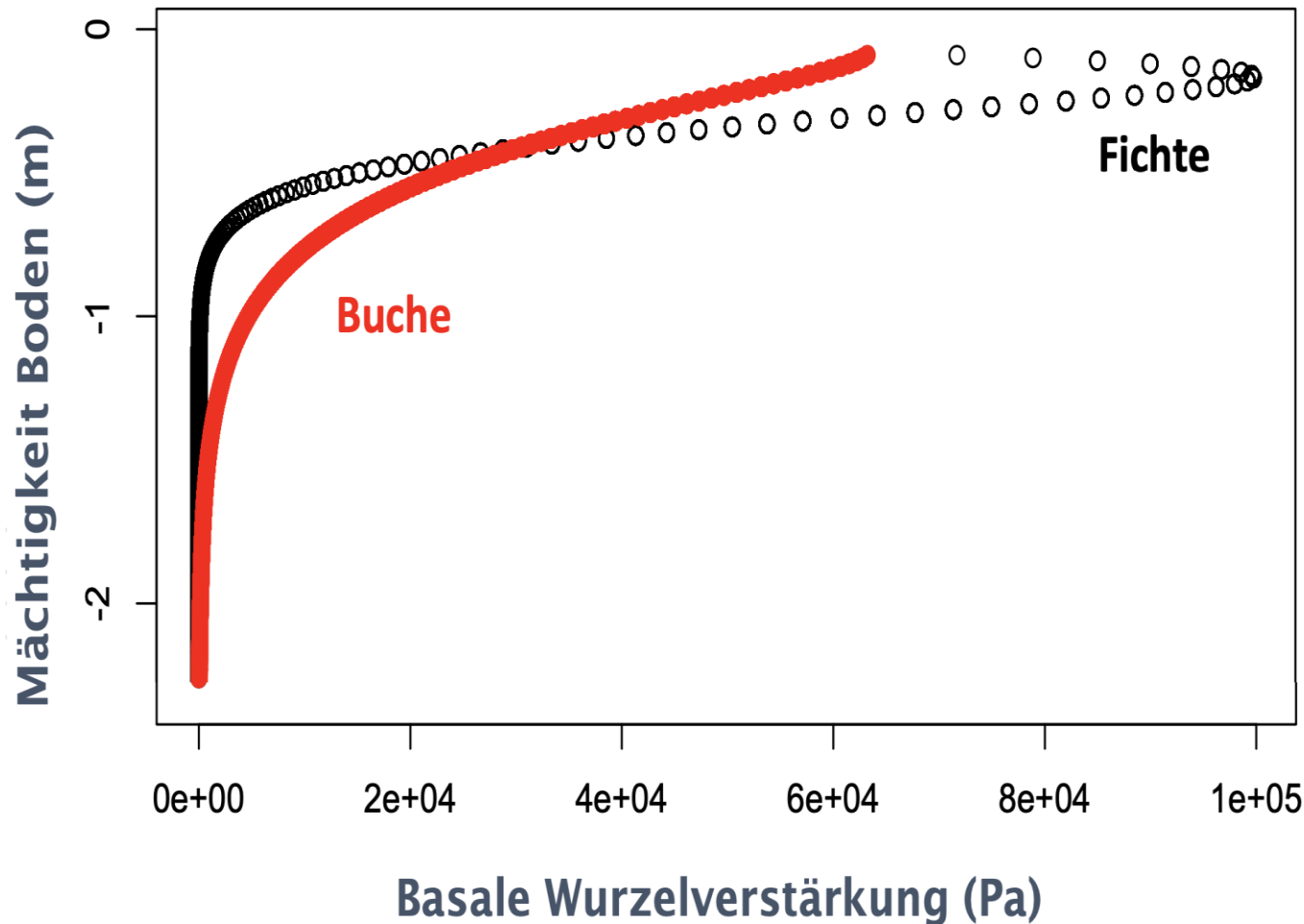


# Tragwerksmodell : Analyse der HM-Datenbank mit SlideforNET

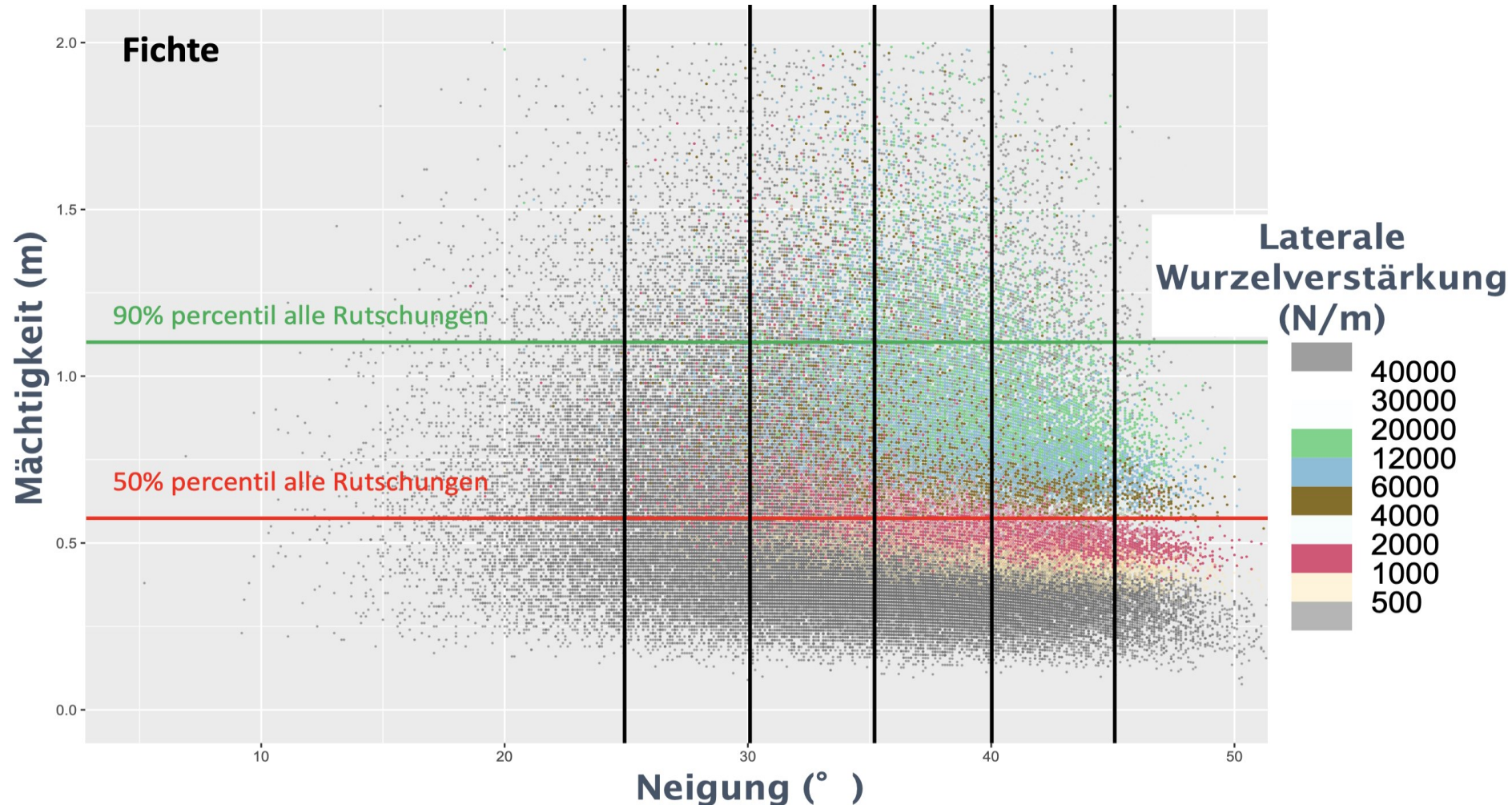




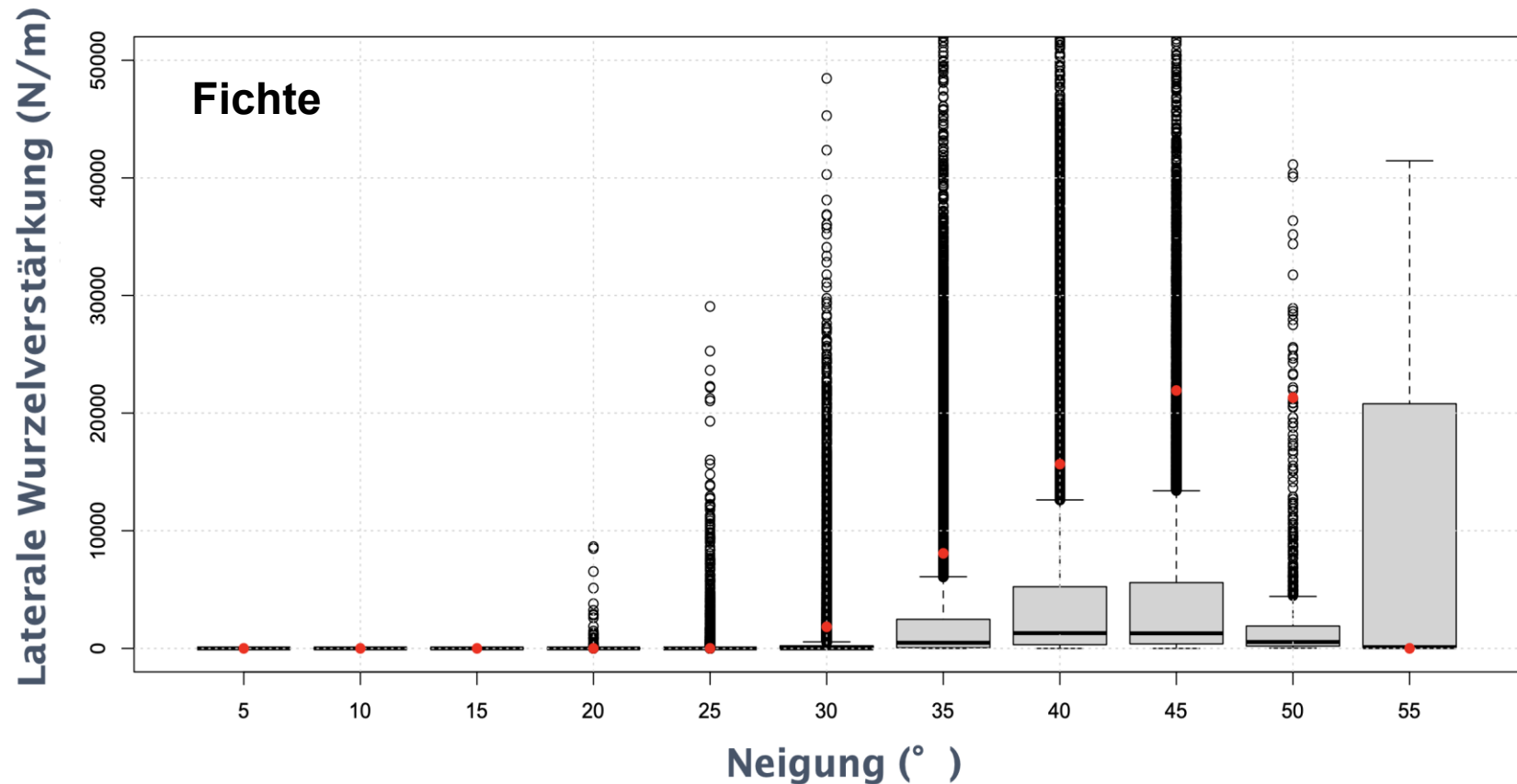
# Tragwerksmodell : Analyse der HM-Datenbank mit SlideforNET



# Tragsicherheit: Analyse der HM-Datenbank mit SlideforNET



# Tragsicherheit: Analyse der HM-Datenbank mit SlideforNET



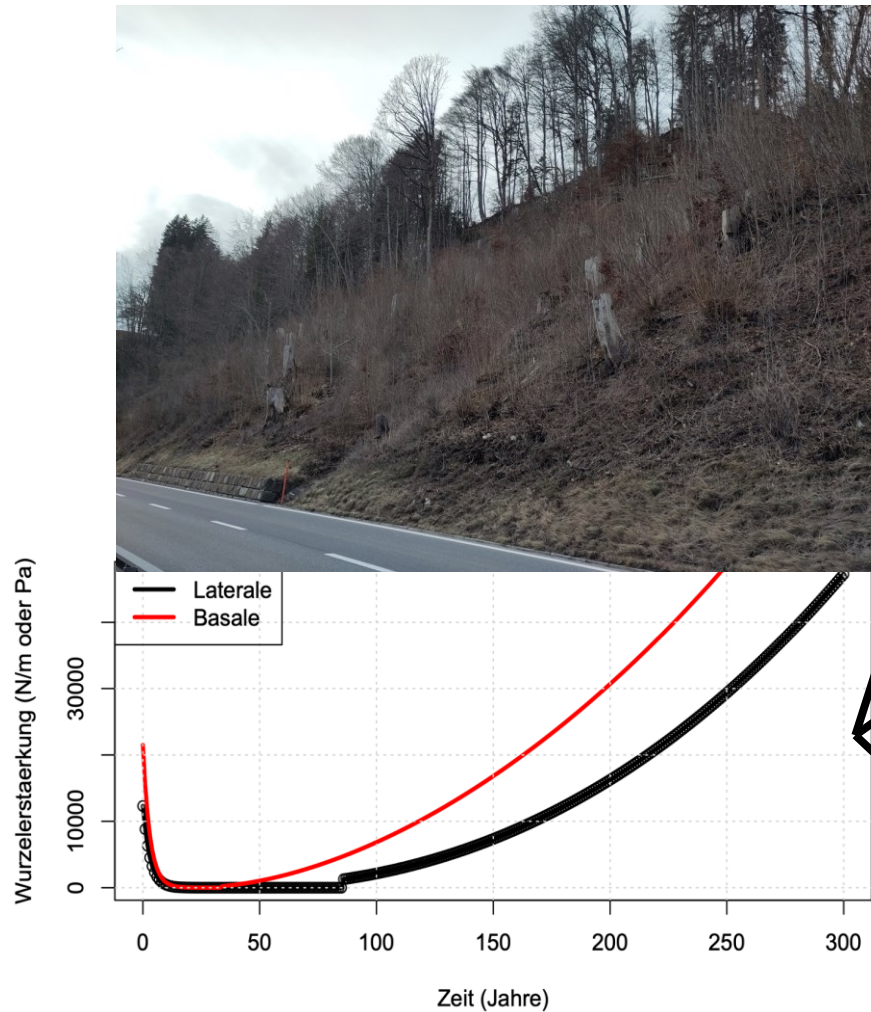
# Zusammenfassung Bemessung

| Neigung<br>(°) | Minimal<br>Laterale<br>Wurzelverstärkung<br>(kN/m) | Ideal<br>Laterale<br>Wurzelverstärkung<br>(kN/m) |
|----------------|----------------------------------------------------|--------------------------------------------------|
| <25            | 0                                                  | 0                                                |
| 25-30          | 0.35                                               | 1.83                                             |
| 30-35          | 1.00                                               | 8.07                                             |
| 35-40          | 1.83                                               | 15.66                                            |
| >40            | 2.61                                               | 21.91                                            |

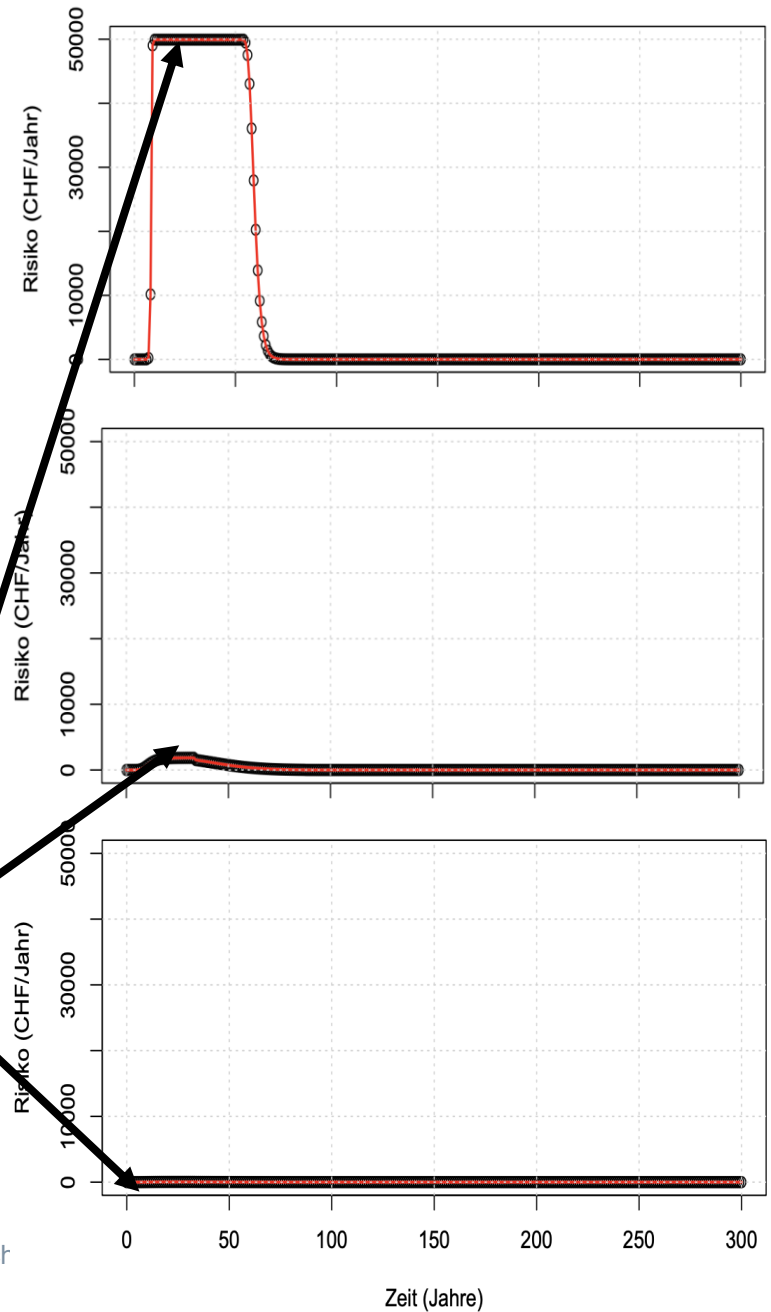




# Eintretenswahrscheinlichkeit in den Lücken: Dynamik der Wurzelverstärkung



Berner Fachhochschule | Hochschule für Agrar-, Forst- und Lebensmittelwissenschaft



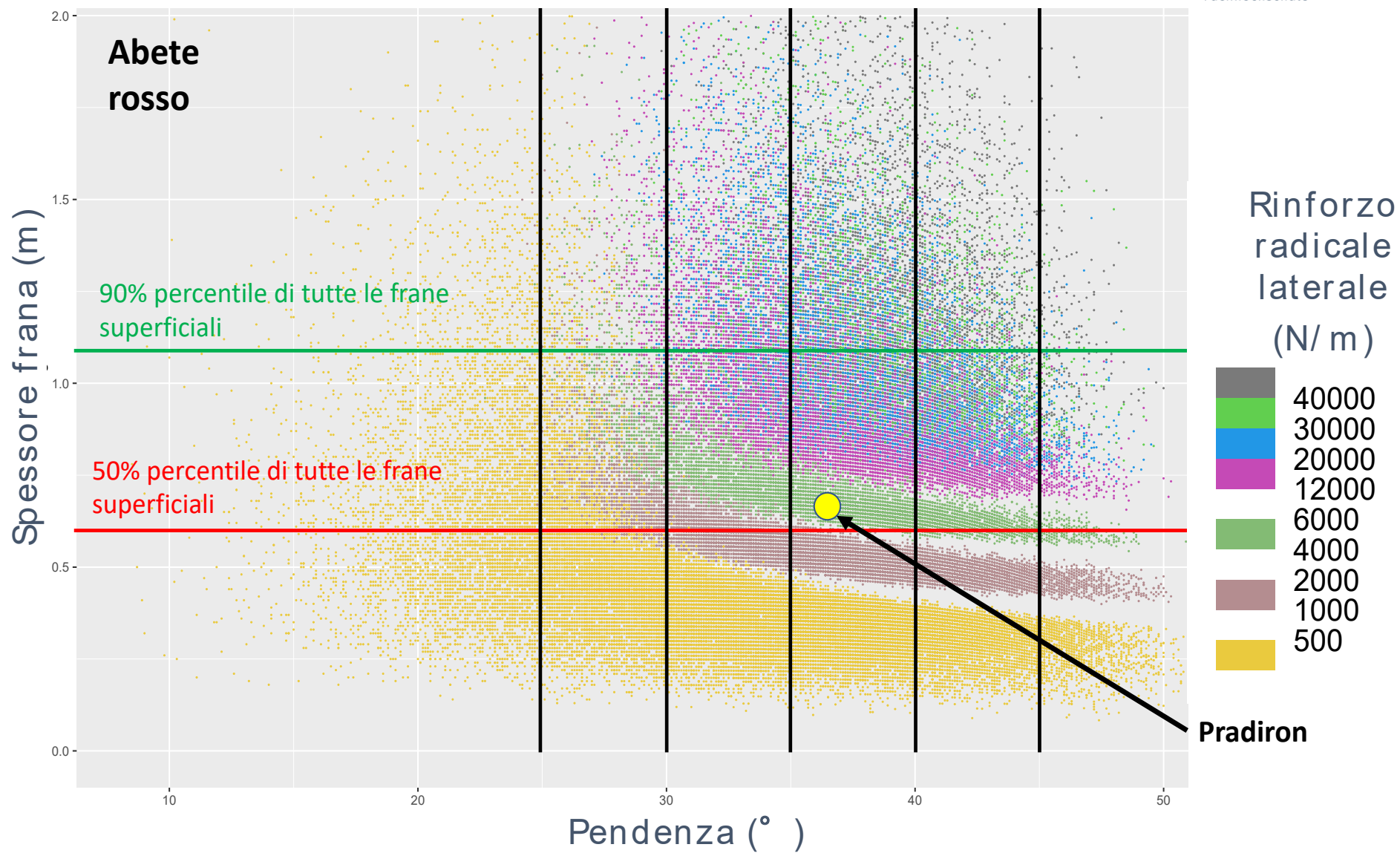


# Beispiel: Pradiron





# Beispiel: Pradiron



# Beispiel: Pradiron

