



Volker Schlüter

# Untersuchungen zur Entwicklung von Weidenwurzeln

BAWKolloquium Technisch-biologische Ufersicherungen

Karlsruhe, 14. Mai 2024

# Veranlassung

---

Wurzeln schützen vor Erosion. (DWA 2016)  
Sie verstärken den Boden und reduzieren so das Risiko des Abgleitens (u. a. Eisenmann 2015, Schwarz 2019)

Wird die Wurzelverstärkung in den geotechnischen Nachweisen mit angesetzt, kann eher auf eine Sicherung mit Flächengewicht verzichtet werden.

**Ziel:**  
Berücksichtigung der Wurzelverstärkung in den geotechnischen Nachweisen.





**Wurzelverstärkung  
Stand der Forschung**

BAW

# Stand der Forschung

---

## Wurzelverstärkung

- **mechanisch**
  - Durchwurzelung der Scherzonen
- **hydrologisch**
  - Regulierung des Bodenwasserhaushaltes

*(Stokes et al. 2008)*



Silberweide an der Elbe bei Roßlau

# Stand der Forschung

---

## Wurzelverstärkung

- **mechanisch**
  - Durchwurzelung der Scherzonen
- **hydrologisch**
  - Regulierung des Bodenwasserhaushaltes

*(Stokes et al. 2008)*

Bei voll gesättigten Böden ist die hydrologische Wirkung nicht vorhanden.



Silberweide an der Elbe bei Roßlau

# Modellansätze der mechanischen Wurzelverstärkung

## Ein-Kontinuum-Modell

- Wurzeln bilden mit dem Boden ein Einheit.  
Dabei verändern die Wurzeln die Bodenkennwerte.  
(z. B. Hähne 1991, Eisenmann 2015, Świtłała 2016)

für Wurzelvliese, Gras, Schilf

## Mehr-Kontinuen Modell

- Die Wurzeln bilden ein eigenen Bestandteil mit eigenen Stoffeigenschaften. Die Bodenwerte bleibt unverändert.  
(z. B. Schwarz et al. 2013, Muir Wood et al. 2016)

deutlich erkennbare Wurzelstränge  
z. B. bei Büschen und Bäumen (Giadrossich et al. 2013)

Wurzeln dicker 1 cm sind starr, sie wirken wie Bodennägel.  
Dünnere Wurzeln sind flexibel und werden auf Zug belastet.  
(Stokes et al. 2009, Waldron und Dakessian 1981)



Einjährige Wurzelvliese der Korbweide aus flachen Pflanzkästen



Rhein bei Riedstadt



einjährige Fahlweide



**Wurzeln von  
technisch-biologischen Ufersicherungen  
ohne Flächengewicht**

BAW

# Wurzeln unter technisch-biologischen Ufersicherungen ohne Flächengewicht



Gräser und Kräuter an der Weser (Bad Oeynhausen)

## Gräser und Kräuter

- vorgezogene Pflanzmatten
- Saatmatten
- Rasensoden
- Nass- und Trockenansaat

*(DWA 2016, BAW, BfG und WSA Oberrhein 2020)*



Weiden am Rhein (Lampertheim)

## Weiden

- Weidenspreitlage
- Weidenwippe

# Graswurzeln



Gräser und Kräuter an der Weser (Bad Oeynhausen)

## Gräser und Kräuter

Laut MSD 2011: Bei dichtem, lückenlosem Grasbewuchs kann in der oberen 0,2 m eine Wurzelkohäsion von maximal  $c_{w,k} = 7 \text{ kN/m}^2$  angesetzt werden. ✓

(BAW 2011, Hähne 1991)



Grasnarbe an der Fulda (Alheim)

# Wurzeln unter technisch-biologischen Ufersicherungen ohne Flächengewicht



Weiden am Rhein (Lampertheim)



Weiden am Rhein (Lampertheim)

## Weiden

wie Weiden eine Uferböschung durchwurzeln und welche Kräfte die Wurzeln aufnehmen können, ist kaum erforscht.

### Forschungsfrage:

Welche Wurzeln bilden sich unter einer Weidenspreitlage?

# Wurzeln unter Weidenspreitlagen



K. Schillig, BfG

Nov 2011



BAW

Sep 2013

nach 2 Jahren



BAW

Juli 2017

nach 6 Jahren



BAW

März 2023

nach 11 Jahren



BAW

August 2023

nach 11½ Jahren



BAW

Februar 2024

nach 12 Jahren

## Wurzeln unter Weidenspreitlagen



Flächige Durchwurzelung der oberen Bodenschicht mit teils sehr dicken Wurzeln.  
Verschiedene Stämme sind unterirdisch miteinander verbunden.  
Unklar; wie viele Wurzeln im Boden verblieben sind.

# Wurzelaufgrabungen an der Wasserstraße



Freispülen einer Spreitlage am Rhein Nov. 2011



Durch den Wasserstand begrenzte Erkundungstiefe



**Weidenuntersuchungen im  
Wellenbecken der BAW 2021**

# Weidenwurzelversuche im Wellenbecken 2021



Eibau der Weidenspreitlage (April 2021)



Fertiggestellte Weidenspreitlage (12.04.2021)



nach 11 Wochen (höchster Wasserstand am 02.07.2021)



nach 17 Wochen (09.08.2021)

# Weidenwurzelversuche im Wellenbecken 2021

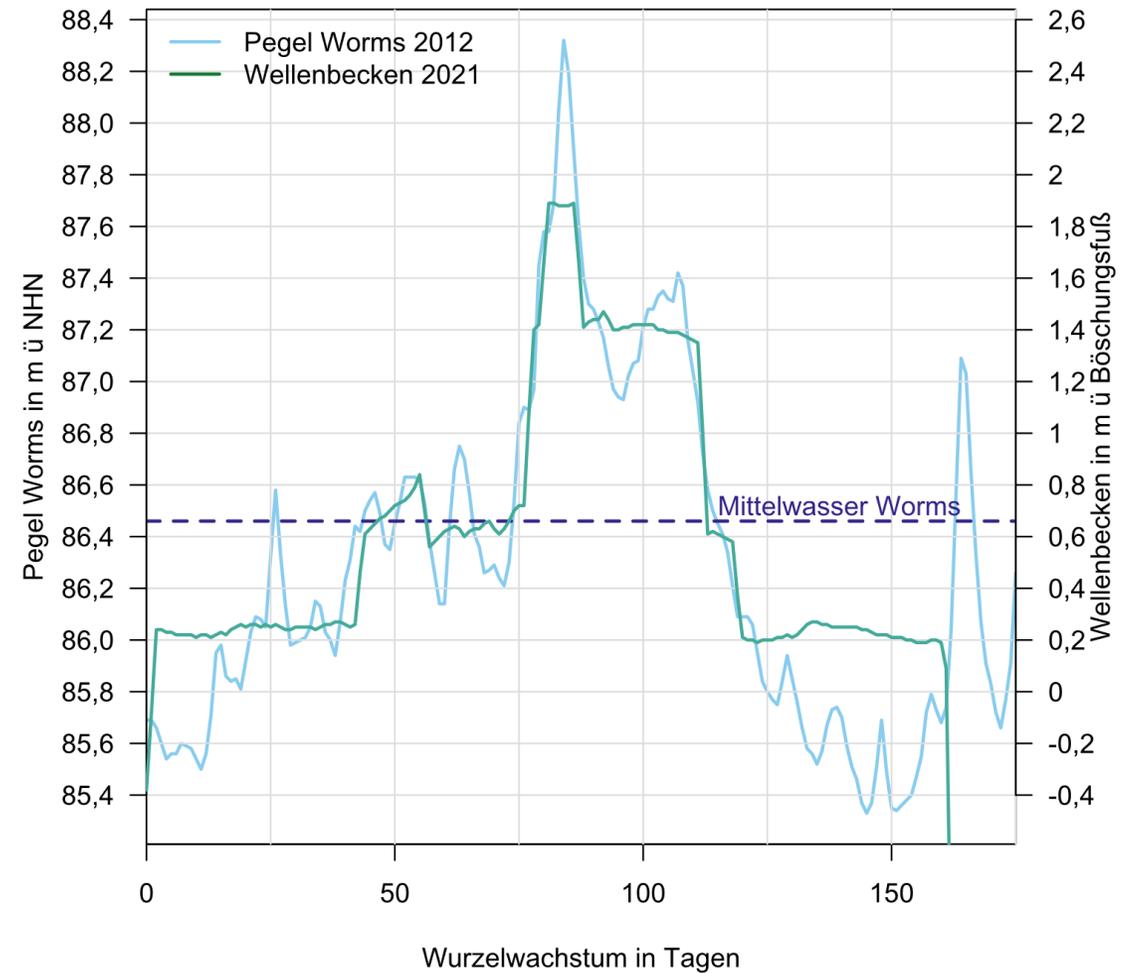


Eibau der Weidenspreitlage



nach 11 Wochen (höchster Wasserstand am 02.07.2021)

Wasserstände



# Vergleich der Spreitlagen-Entwicklung am Rhein und im Wellenbecken



Versuchsstrecke Worms August 2012

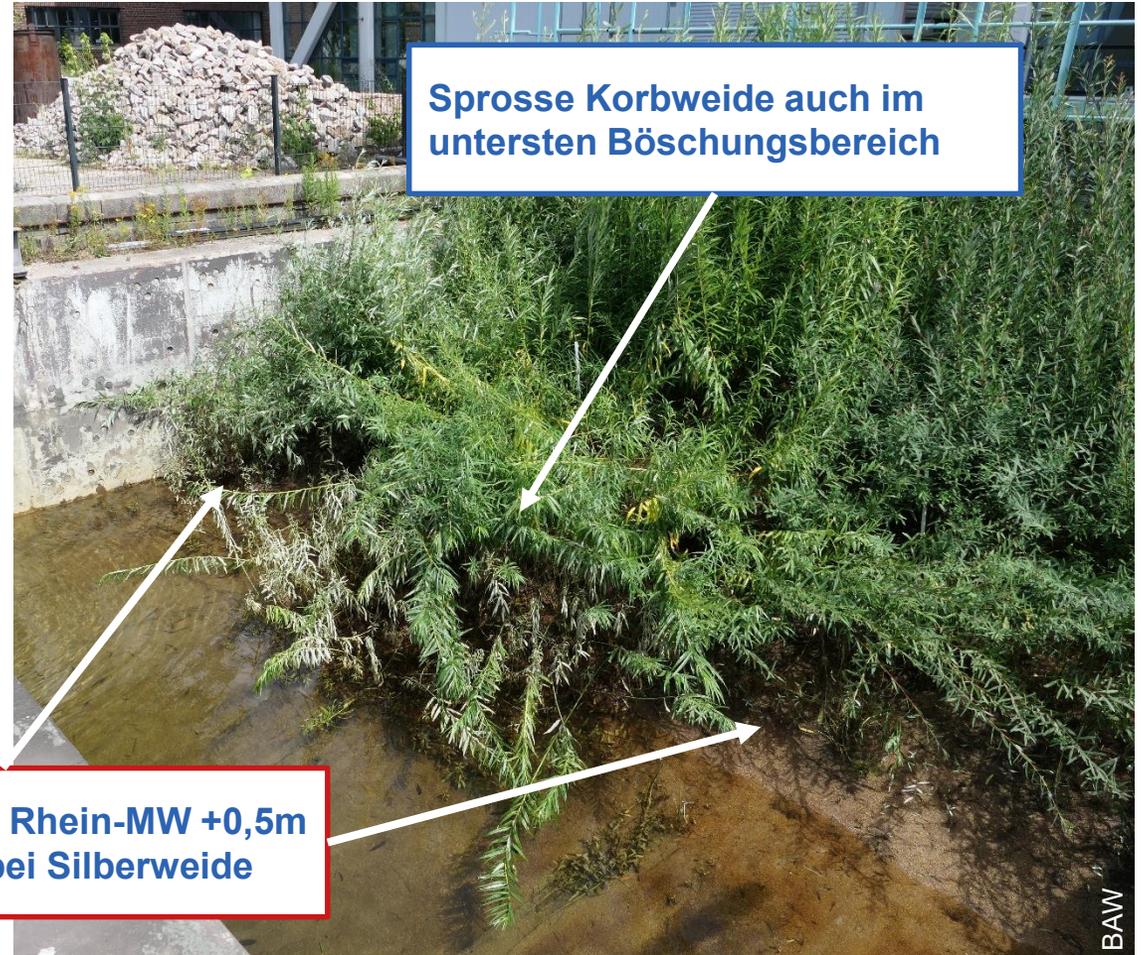


Wellenbecken August 2021

# Vergleich der Spreitlagen-Entwicklung am Rhein und im Wellenbecken



**Ausfall unterhalb Rhein-MW +0,5m  
bei Purpur- und bei Silberweide**

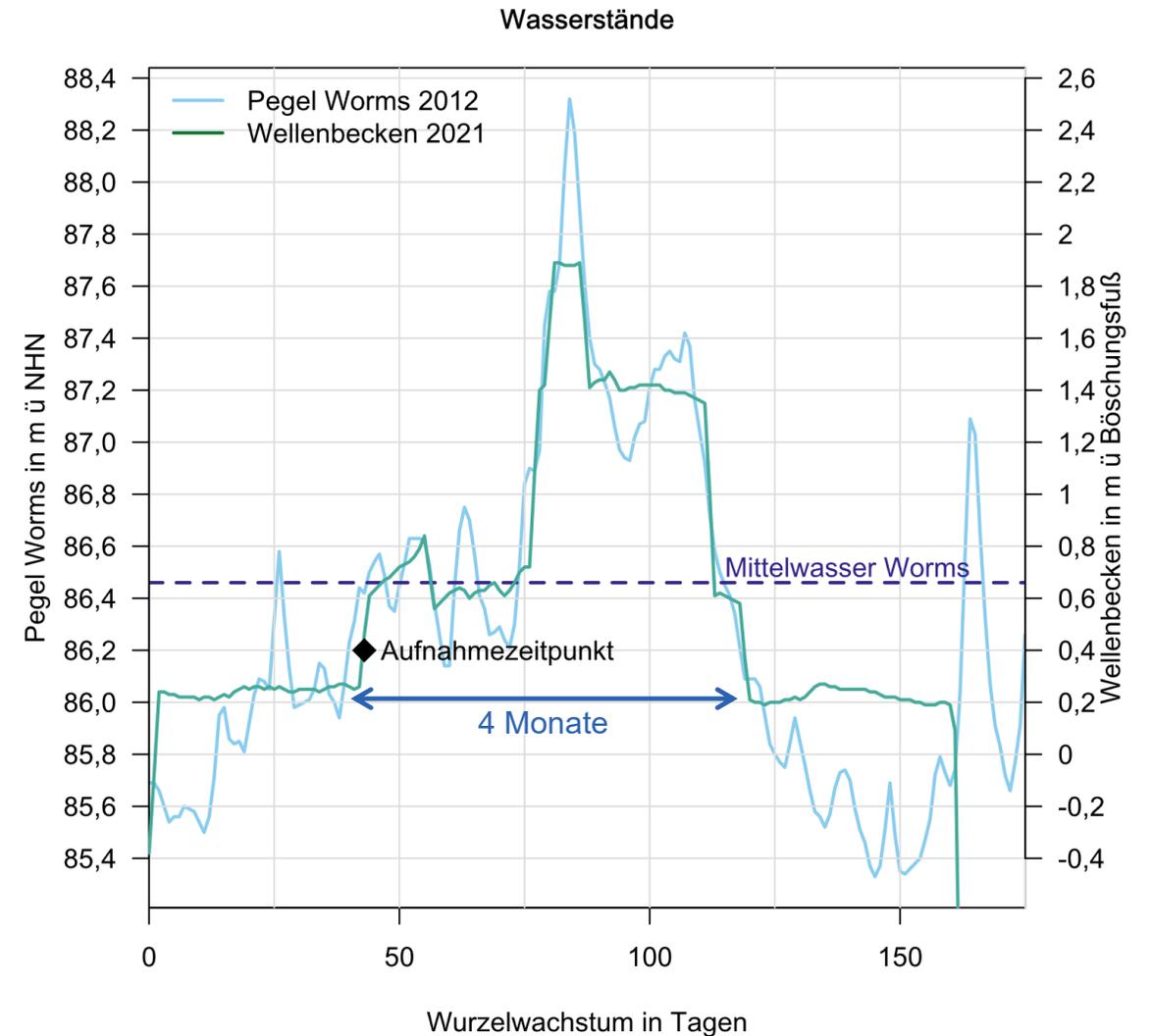


**Sprosse Korbweide auch im  
untersten Böschungsbereich**

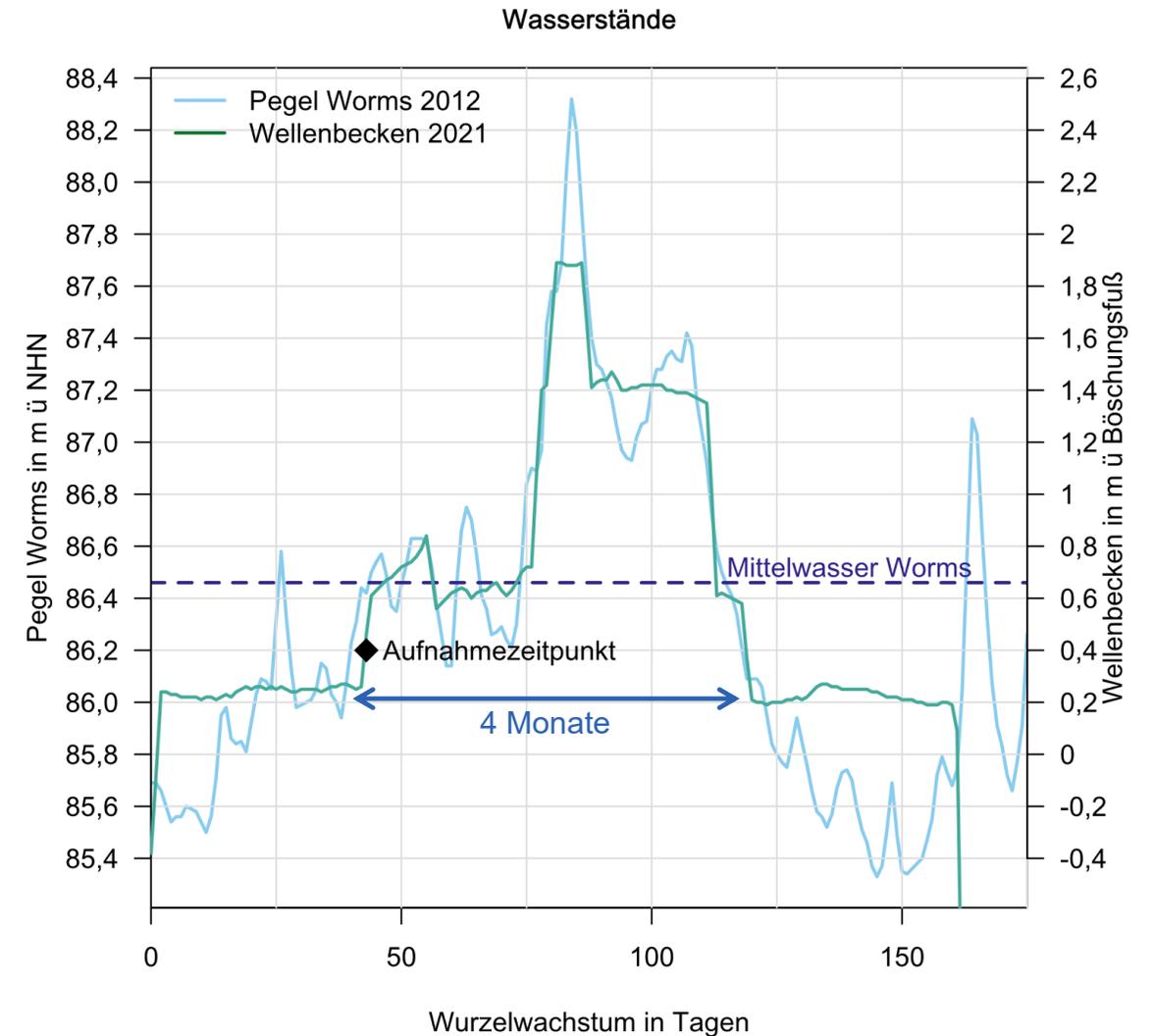
Rhein Versuchstrecke Worms August 2012

Wellenbecken August 2021

# Ursache des Ausfalls im unteren Böschungsbereich



# Ursache des Ausfalls im unteren Böschungsbereich



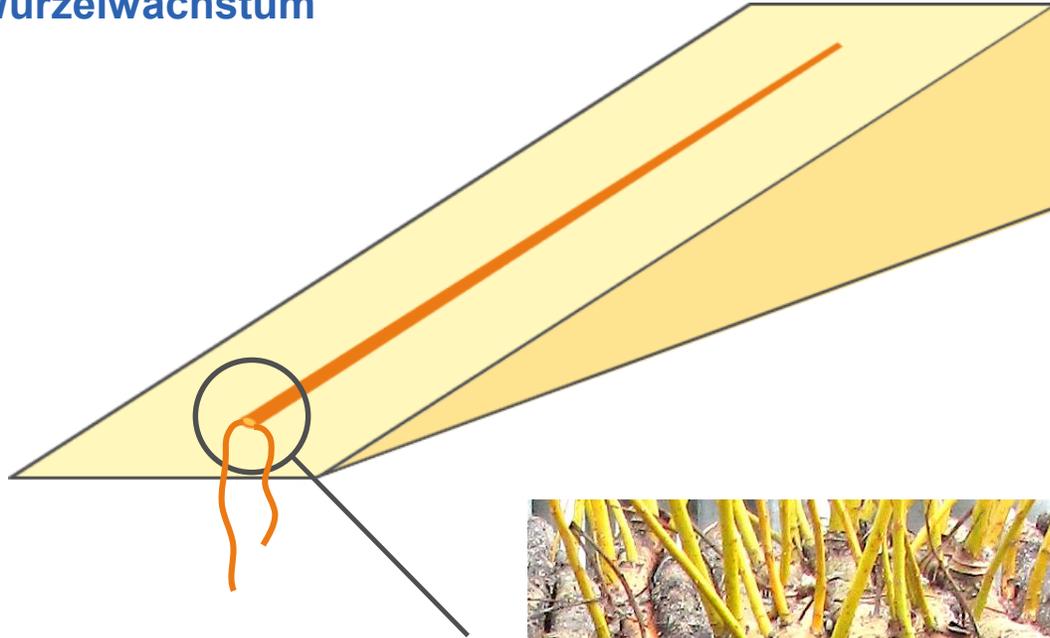


**Wurzeln unter  
der Spreitlage**

# Wurzeln unter einer Spreitlage

---

## Wurzelwachstum



Am unteren Ende bilden Weidenäste besonders starke Wurzeln.

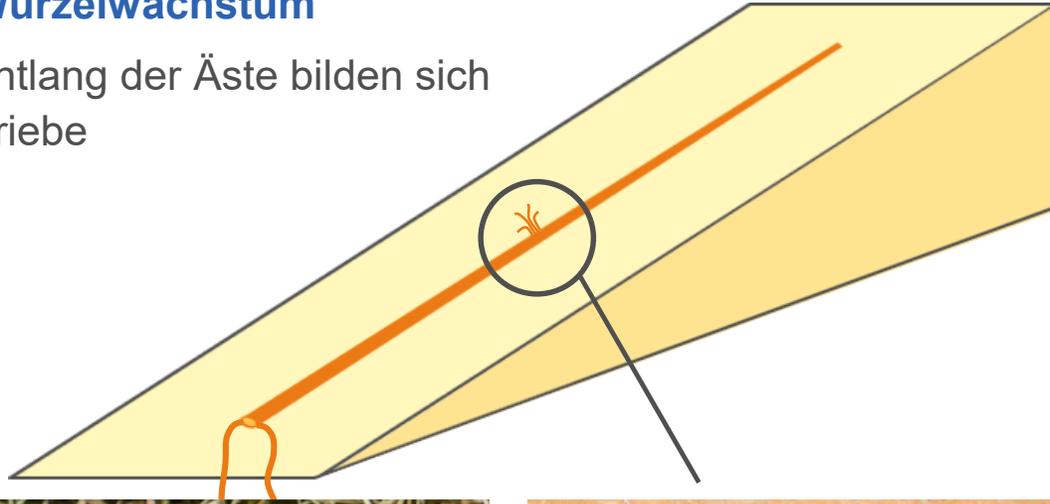


Basale Enden Fahlweide 2020

# Wurzeln unter einer Spreitlage

## Wurzelwachstum

entlang der Äste bilden sich Triebe



frische Triebe Korbweide

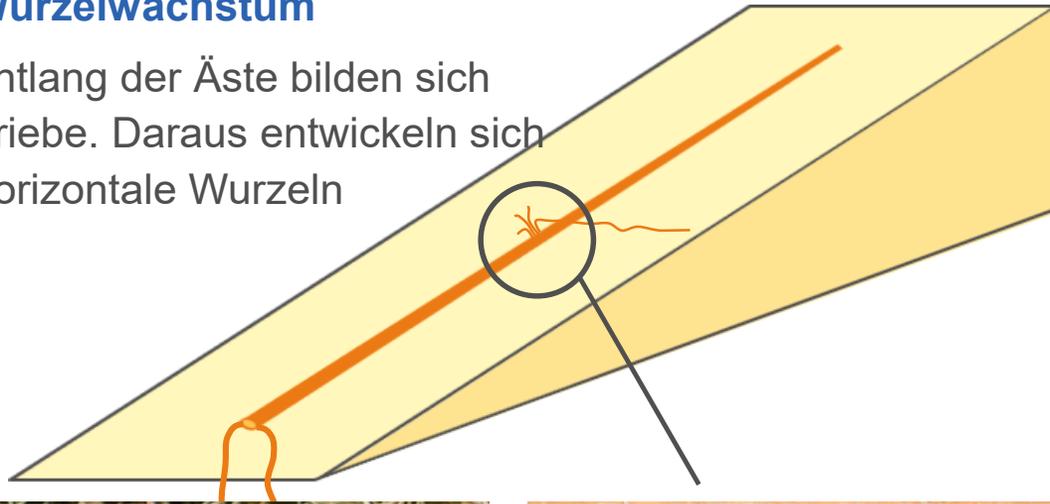


Triebe Silberweide

# Wurzeln unter einer Spreitlage

## Wurzelwachstum

entlang der Äste bilden sich Triebe. Daraus entwickeln sich horizontale Wurzeln



Horizontale Wurzeln einer Korbweide

BAW 2022



frische Triebe Korbweide

BAW 2024



Triebe Silberweide

BAW 2022



Horizontale Wurzeln der Silberweide

BAW 2021

**Korbweiden** bildeten besonders lange horizontale Wurzeln und ein dichtes Wurzelvlies.

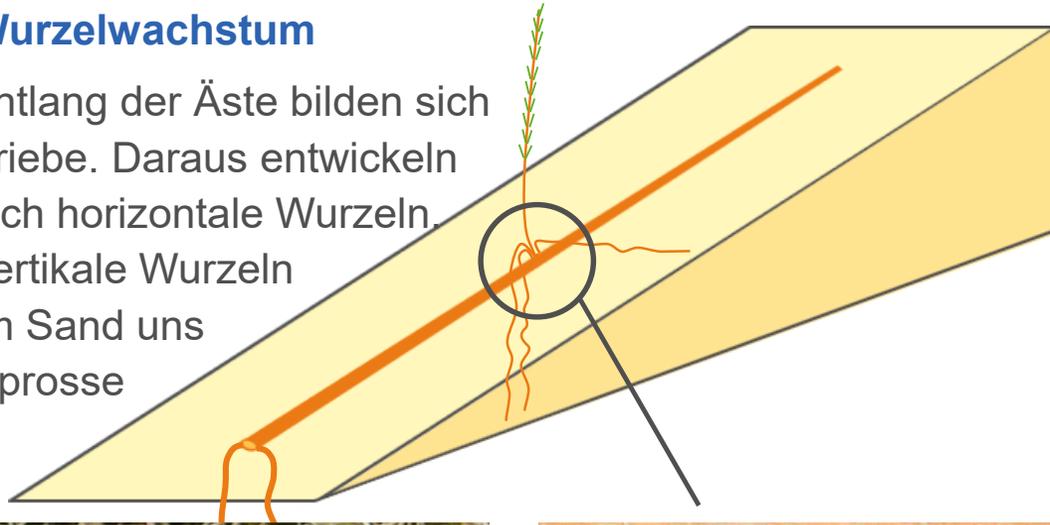
Bei der **Silberweide** war dies geringer ausgeprägt.

Bei der **Purpurweide** waren kaum horizontale Wurzeln vorhanden.

# Wurzeln unter einer Spreitlage

## Wurzelwachstum

entlang der Äste bilden sich Triebe. Daraus entwickeln sich horizontale Wurzeln, vertikale Wurzeln im Sand und Sprosse



senkrechte Wurzeln im Sand (Silberweide)



senkrechte Wurzeln im Sand (Purpurweide)



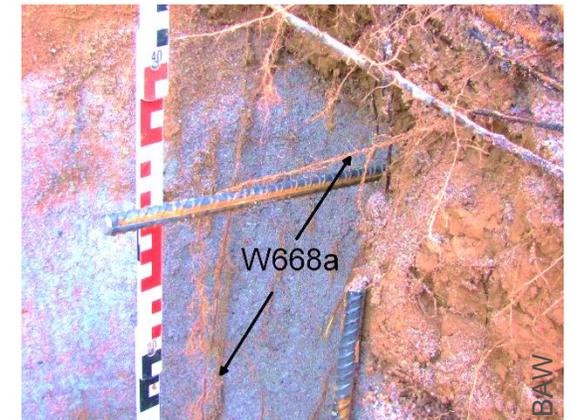
frische Triebe (Korbweide)



Triebe (Silberweide)



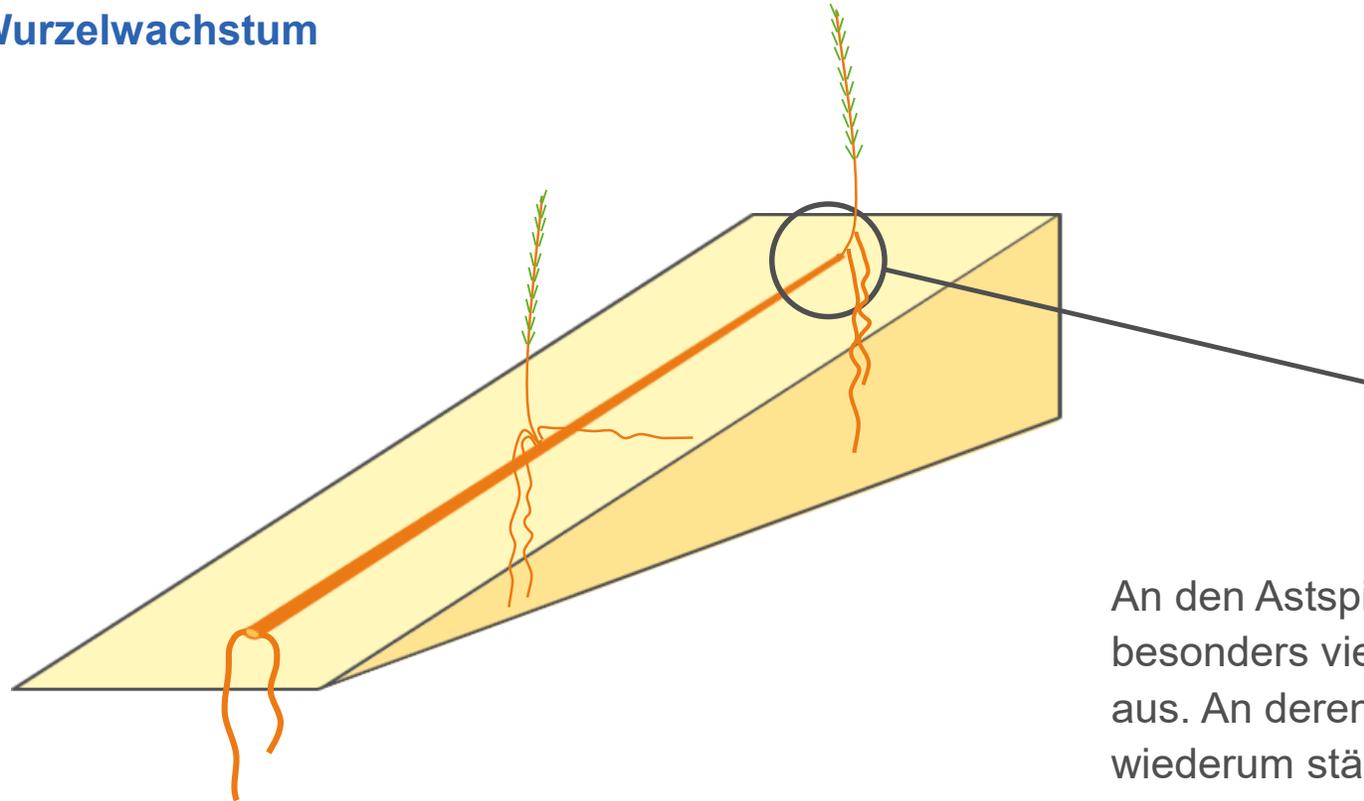
schräge Wurzeln im Schluff (Purpurweide)



schräge Wurzeln im Schluff (Purpurweide)

# Wurzeln unter einer Spreitlage

## Wurzelwachstum



Wurzeln



obere Spitzen (Purpurweide)

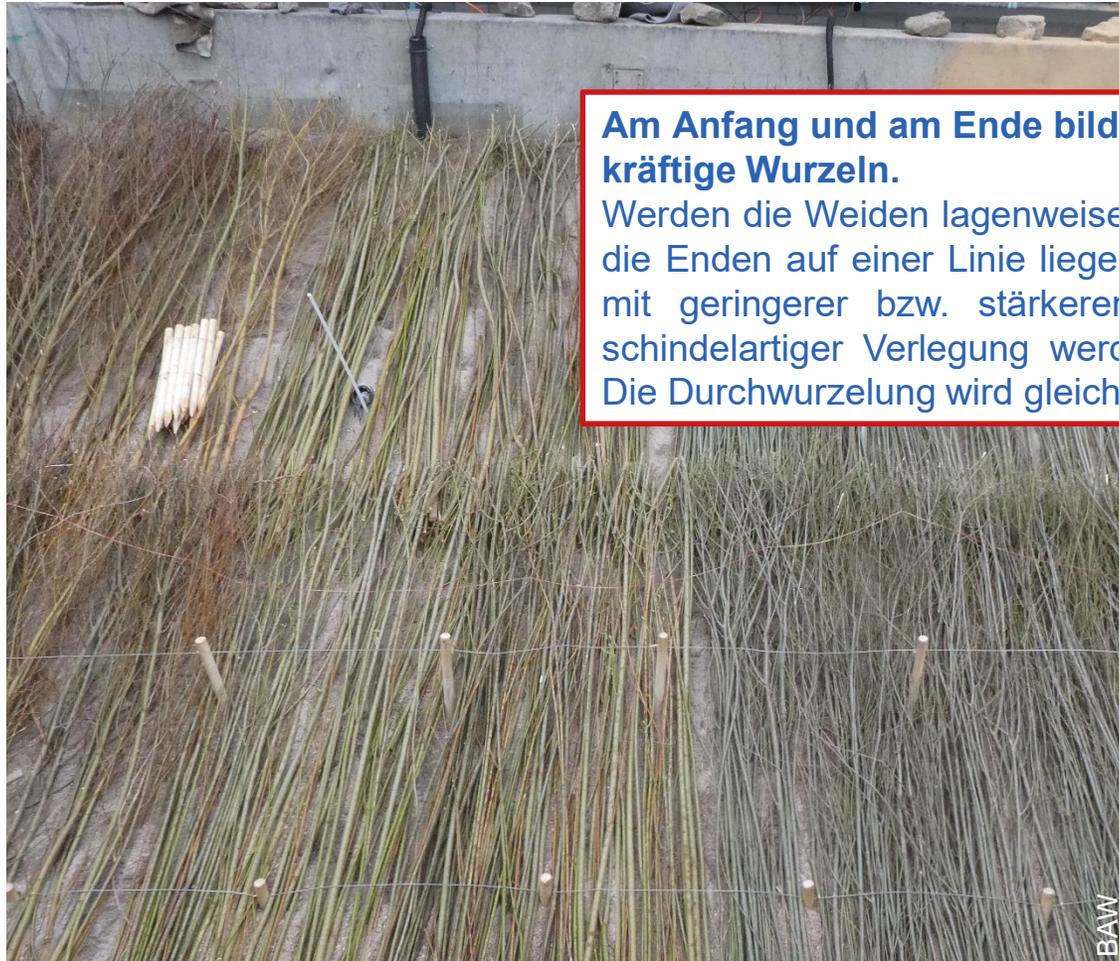
An den Astspitzen bildet sich besonders viele Sprosse aus. An deren Basis sich wiederum stärkere Wurzeln ausbilden.



ober Spitzen (Purpurweide)

BAW

## Hinweis für den Einbau



**Am Anfang und am Ende bilden die Weidenäste besonders kräftige Wurzeln.**

Werden die Weiden lagenweise nebeneinander gelegt, sodass die Enden auf einer Linie liegen, entstehen horizontale Zonen mit geringerer bzw. stärkerer Durchwurzelung (links). Bei schindelartiger Verlegung werden die Enden besser verteilt. Die Durchwurzelung wird gleichmäßiger (rechts).

BAW

Lagenweise Verlegung mit horizontalem Überlappungsbereich



BAW

Schindelartige Verlegung der Weiden

# Durchwurzelungstiefe bei Weiden

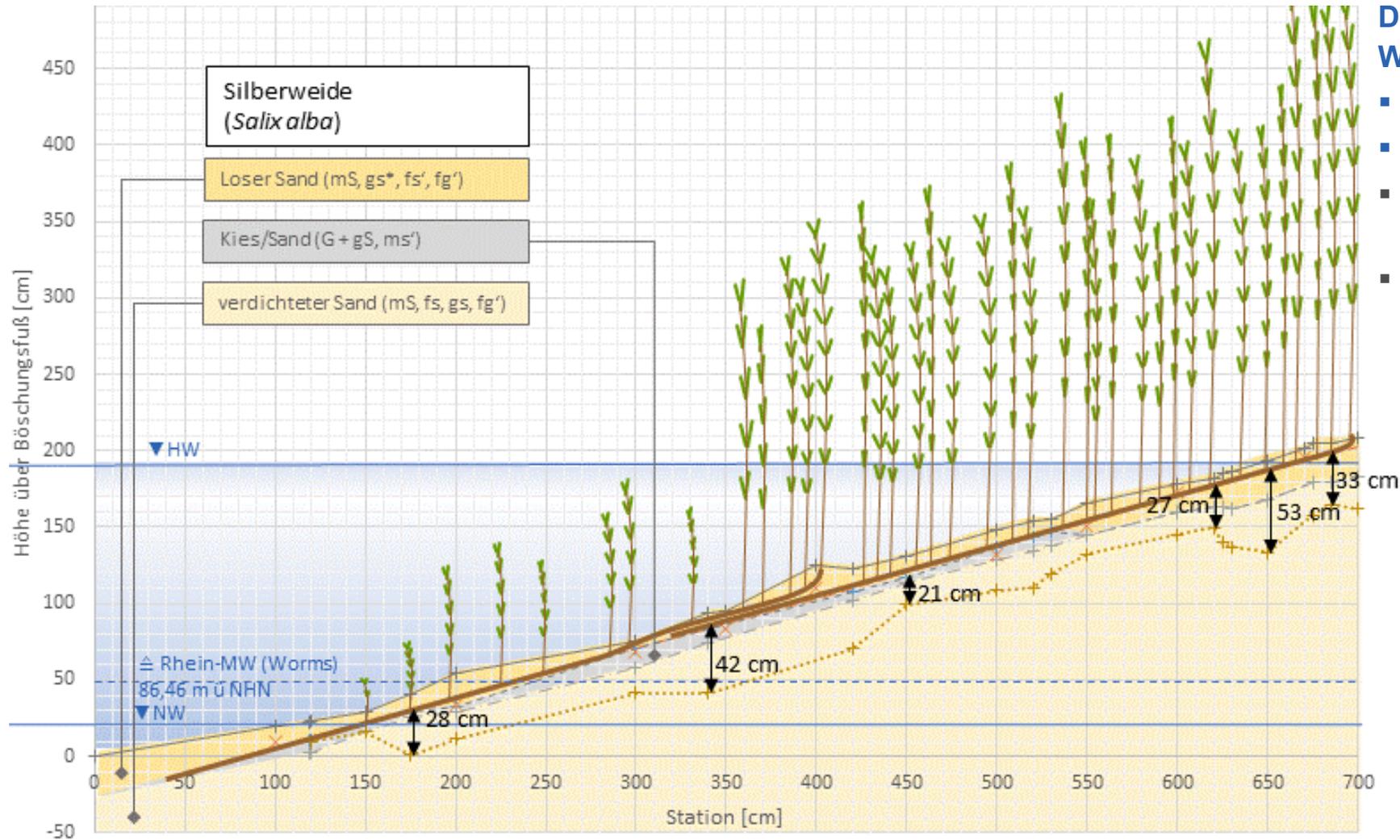


BAW-Versuche 2020: Wurzeln nach einem Jahr



Flacher Wurzelteller einer umgefallenen Weide (Aller km 114,1)

# Durchwurzelungstiefe im Wellenbecken 2021



## Durchwurzelungstiefe im Wellenbecken

- Silber- und Korbweide: 20-30 cm
- Purpurweide: 15-25 cm
- tiefere Durchwurzelung im Bereich der Astspitzen
- **keine Wurzeln unterhalb Niedrigwasser**

## Hinweis für den Einbau

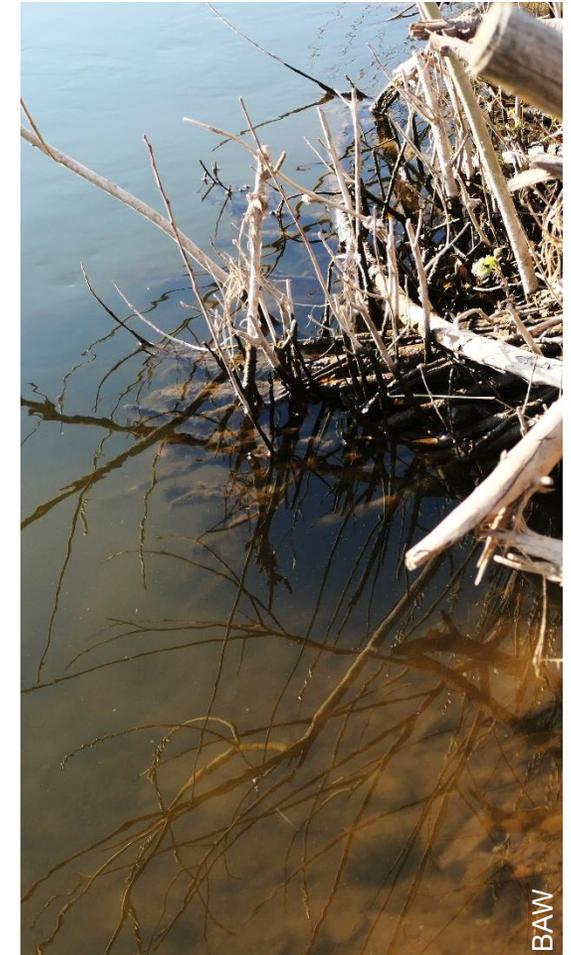
An **Kanälen und staugeregelten Flüssen** werden Spreitlagen meist so verlegt, dass sie bis unter Normalstau reichen.

- Äste können im Stauwasser am unteren Ende keine Wurzeln ausbilden und befestigen dort das Ufer nicht
- Fußeinbindung ins darunter liegen Deckwerk erforderlich

Werden die Äste so verlegt, dass sie oberhalb Normalstau enden, können sich hingegen die typischen starken Wurzeln am unteren Astende ausbilden.



Spreitlage bis Normalstau



fehlende Wurzeln unter Wasser

# Durchwurzelungstiefe im Wellenbecken 2021

## Frage:

Wieso unterscheidet sich die Durchwurzelungstiefe im Wellenbecken von dem in den Pflanzkästen?

Material: jeweils Mittelsand



Wurzeln in den Pflanzkästen



Wurzeln im Wellenbecken

# Einfluss auf Durchwurzelungstiefe

## Frage:

Wieso unterscheidet sich die Durchwurzelungstiefe im Wellenbecken von dem in den Pflanzkästen?  
(Material: jeweils Mittelsand)

## These:

**Wurzeltiefe ist abhängig von Lagerungsdichte.**  
(vgl. Untersuchungen an Mais *Anselmucci et al. 2021*)  
→ weitere Untersuchungen erforderlich.



Einbau der Sandböschung im Wellenbecken (2017)



Wurzeln in den Pflanzkästen



Wurzeln im Wellenbecken

# Wurzeln einer Spreitlage

## Welche Wurzeln bilden sich an den Ästen?

- Anzahl
  - Dicke
- Wurzelfläche pro m<sup>2</sup> Spreitlage



Felder 30 cm × 30 cm



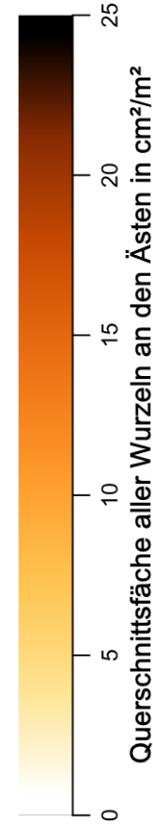
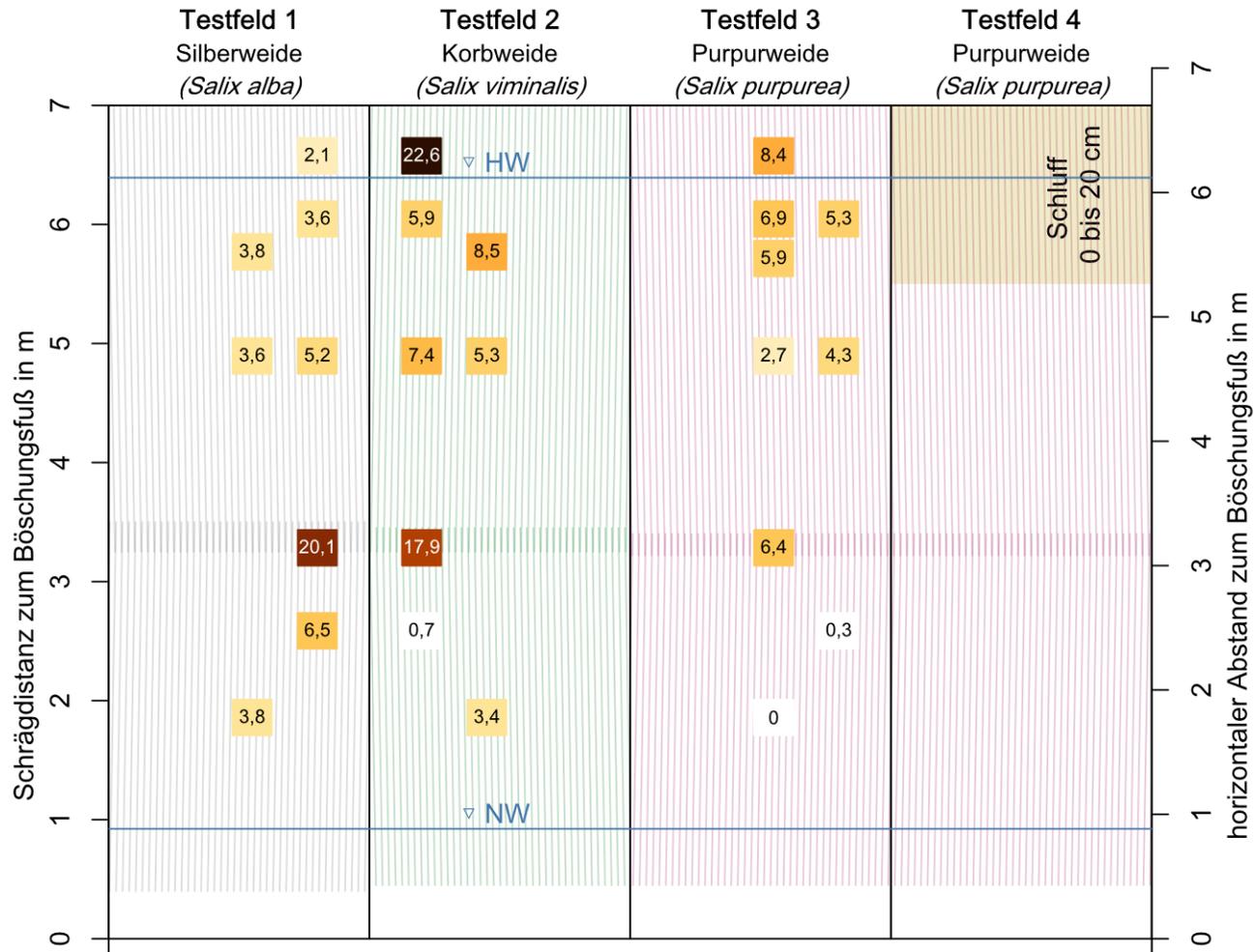
Ast mit Wurzelansätzen



Weidenspreitlage

# Wurzeln einer Spreitlage

## Wurzeln einer Spreitlage



Je dunkler um so mehr Wurzelfläche pro m<sup>2</sup>

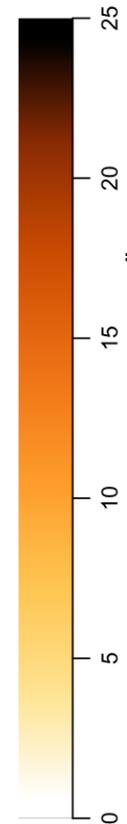
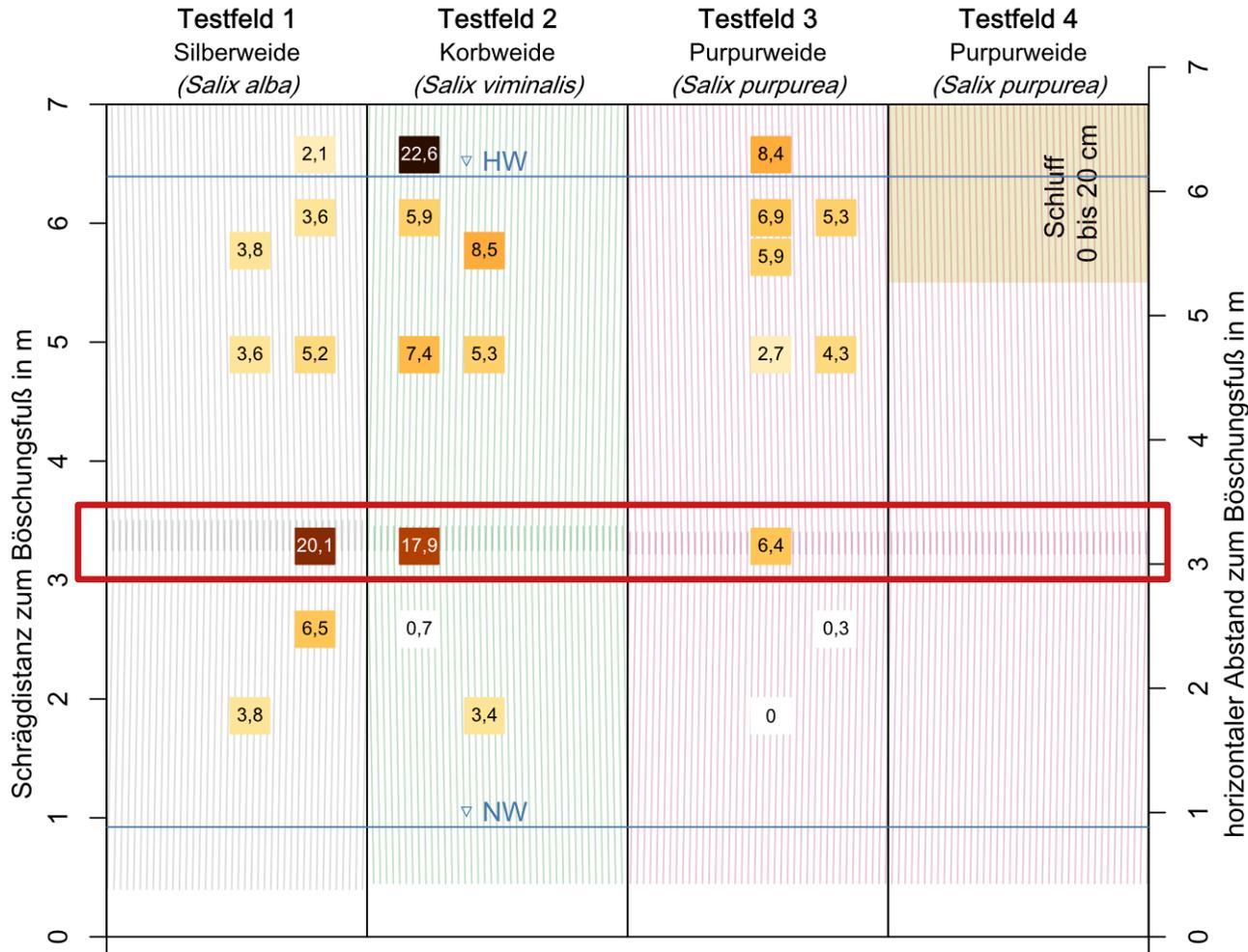
- hohe Variabilität



Weidenspreitlage

# Wurzeln einer Spreitlage

## Wurzeln einer Spreitlage



Je dunkler um so mehr  
Wurzelfläche pro m<sup>2</sup>

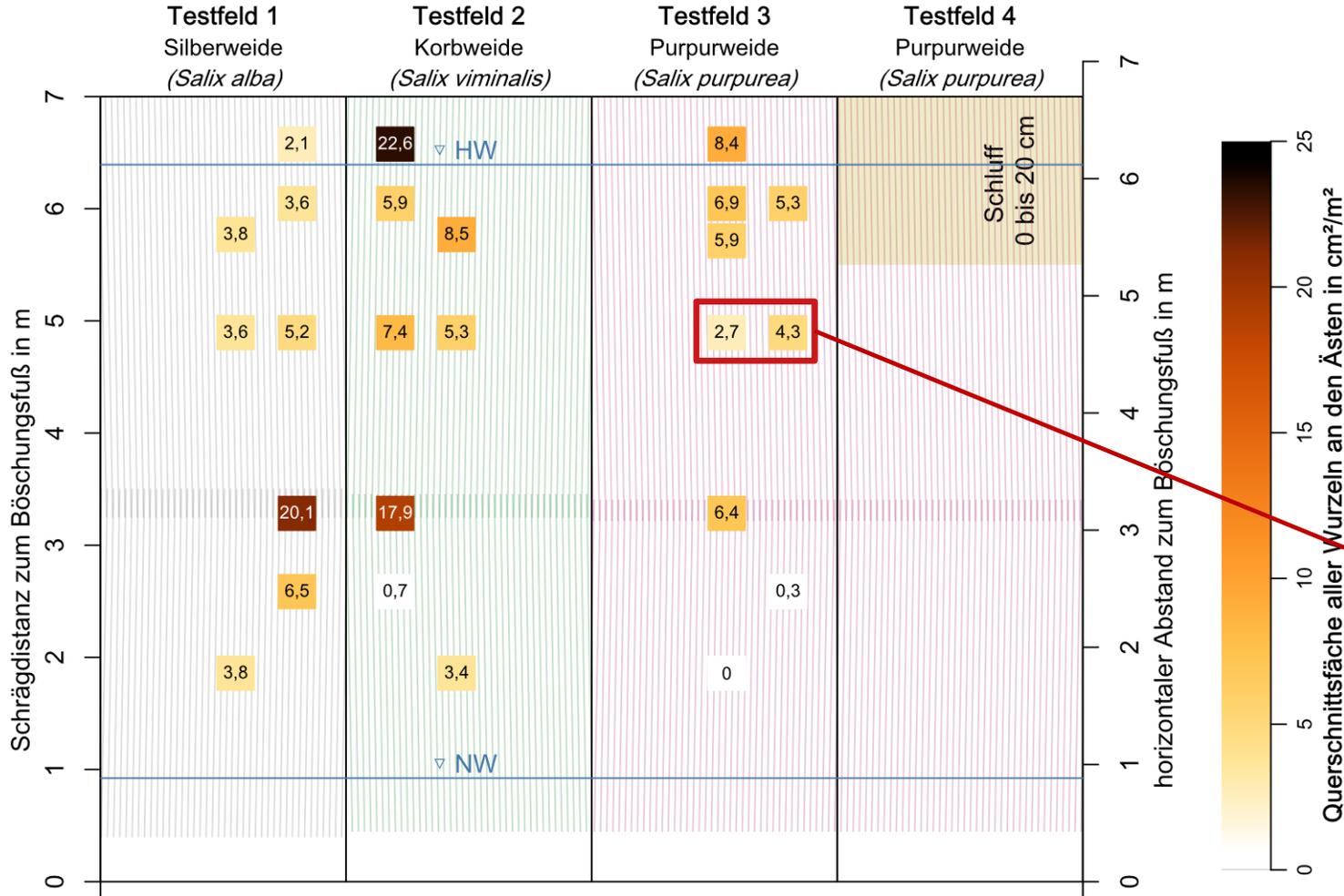
- hohe Werte an den Astspitzen



Weidenspreitlage

# Wurzeln einer Spreitlage

## Wurzeln einer Spreitlage



### Je dunkler um so mehr Wurzelfläche pro m²

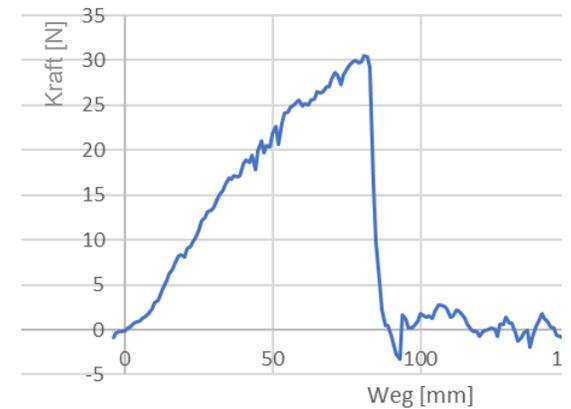
- stark unterschiedliche Werte benachbarter Felder
- statistisch abgesicherte Aussagen schwierig



# Zugversuche



Zugversuche an Wurzeln

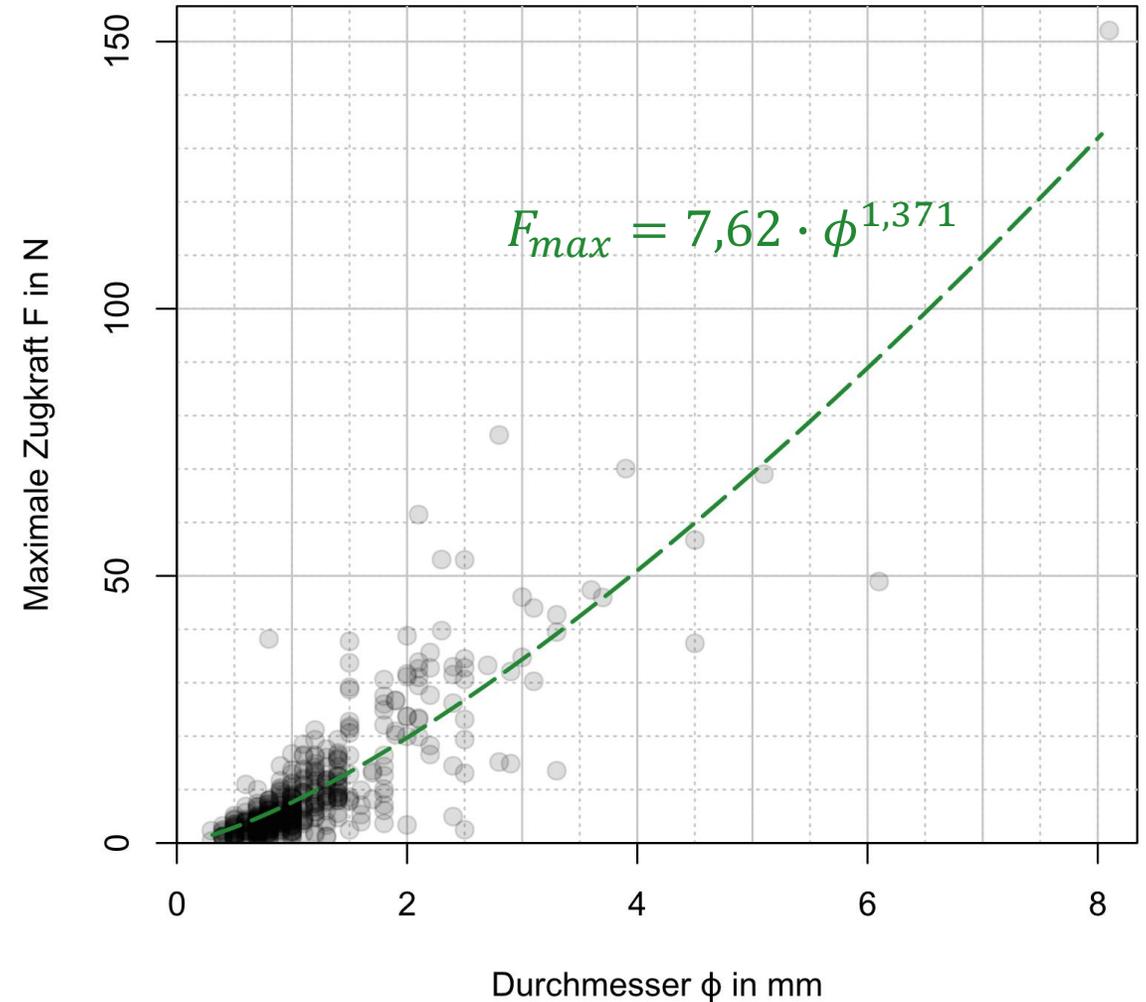


Kraft-Weg-Verlauf einer Wurzel

# maximale Zugkraft

## 473 Zugversuche

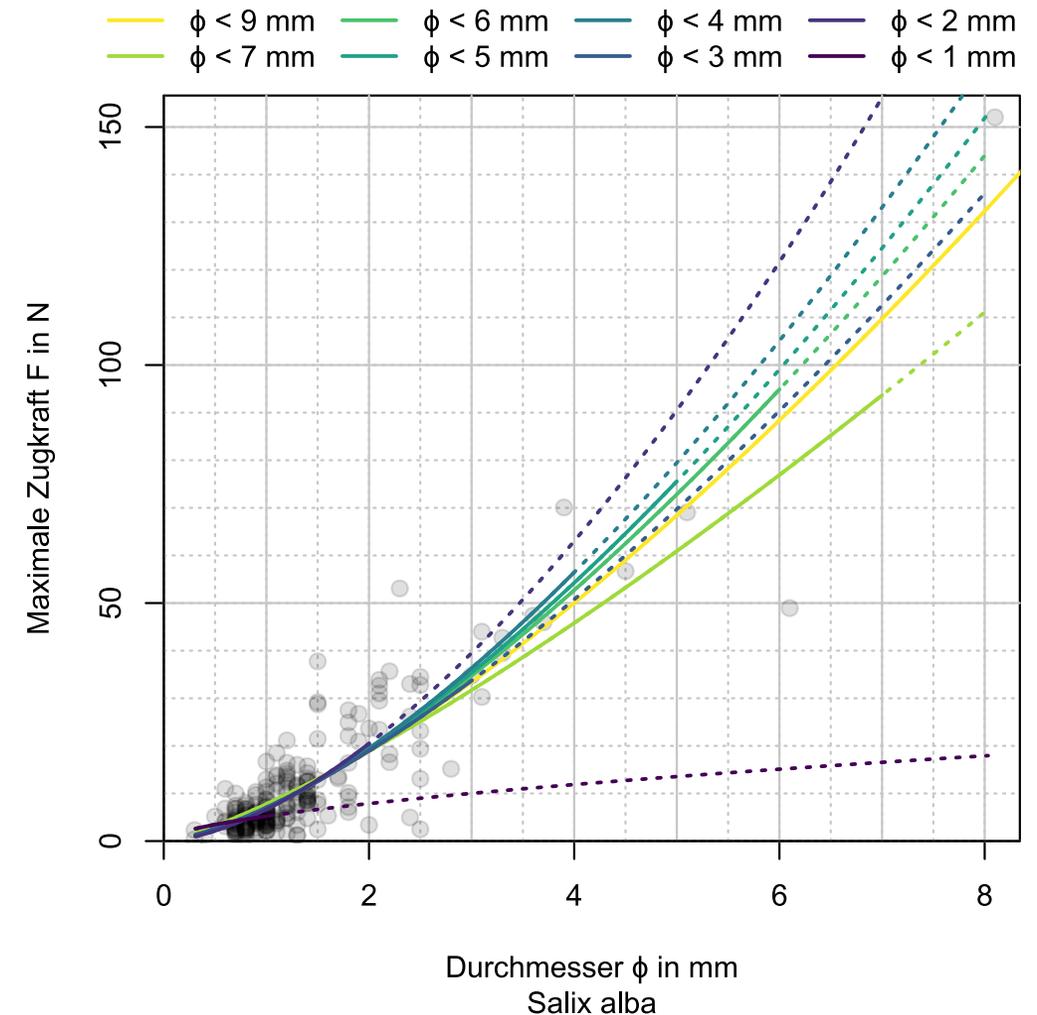
- maximale Zugkraft korreliert mit Wurzeldurchmesser  
(Korrelationstest;  $p \ll 0,0001$  bei  $\alpha = 0,05$ , Korr = 0,85)
- Approximation am besten mittels Potenzgesetz  
(NRMSE = 0,659)
- andere Regressionen signifikant unterschiedlich  
(Varianzanalyse;  $p \ll 0,0001$  bei  $\alpha = 0,05$ )



# maximale Zugkraft

## 473 Zugversuche

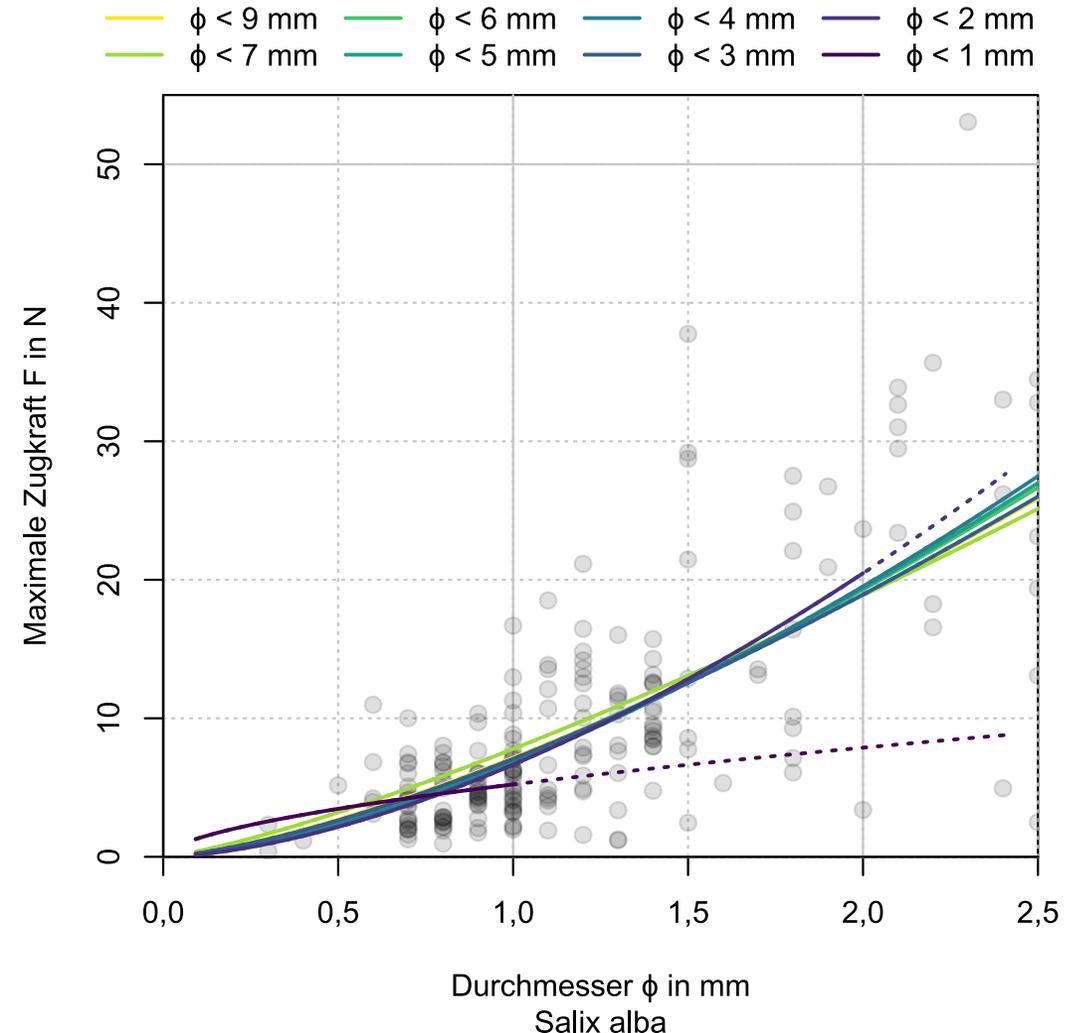
- maximale Zugkraft korreliert mit Wurzeldurchmesser  
(Korrelationstest;  $p \ll 0,0001$  bei  $\alpha = 0,05$ ,  $\text{Korr} = 0,85$ )
- Approximation am besten mittels Potenzgesetz  
(NRMSE = 0,659)
- andere Regressionen signifikant unterschiedlich  
(Varianzanalyse;  $p \ll 0,0001$  bei  $\alpha = 0,05$ )
- Regressions-Koeffizienten sind abhängig vom betrachteten Durchmesserbereich



# maximale Zugkraft

## 473 Zugversuche

- maximale Zugkraft korreliert mit Wurzeldurchmesser  
(Korrelationstest;  $p \ll 0,0001$  bei  $\alpha = 0,05$ , Korr = 0,85)
- Approximation am besten mittels Potenzgesetz  
(NRMSE = 0,659)
- andere Regressionen signifikant unterschiedlich  
(Varianzanalyse;  $p \ll 0,0001$  bei  $\alpha = 0,05$ )
- Regressions-Koeffizienten sind abhängig vom betrachteten Durchmesserbereich
- bei Durchmesser < 2,5 mm sind Unterschiede jedoch marginal (Ausnahme  $\phi = 0$  bis 1 mm)
- Wie genau sind Modellrechnungen?
- Wie können die Ergebnisse überprüft werden?



# Fazit

## Erkenntnisse

- keine Wurzel Ausbildung unter Niedrigwasser
- **Wurzeln unter Spreitlagen sind u. a. abhängig von**
  - Wasserstände in den ersten Wochen nach Einbau
  - Bodenart
  - Lagerungsdichte
  - Weidenspezies
- Wurzel Daten besitzen eine sehr hohe Varianz und entziehen sich statistischen Standardtests

## Gesamtfazit

- **Bevor die Wurzelverstärkung in geotechnischen Nachweisen berücksichtigt werden kann, sind weitere Forschungen erforderlich.**



BAW 2023

Freilegen der Wurzeln



Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit

Bundesanstalt für Wasserbau  
76187 Karlsruhe

[www.baw.de](http://www.baw.de)