



UNIVERSITÄT  
GÖTTINGEN



Abteilung  
Bodenphysik

LWF

TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DRESDEN

# Wie genau können wir den Transpirationsstrom von Bäumen mit Saftflusssensoren messen?

Stefan Seeger



Wald  
Wasser  
Transpiration

Tagung "Wasser- und Stoffhaushalt von Wäldern unter Stress"  
Göttingen, 24.04.2024  
[stefan.seeger@uni-goettingen.de](mailto:stefan.seeger@uni-goettingen.de)

FNR  
Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V.  
Waldklimafonds

# Hintergrund

Wie lassen sich die einzelnen Komponenten der Wasserbilanz eines Waldstandortes erfassen?

Wasserbilanz

$$P = I + T + Q$$



# Hintergrund

Wie lassen sich die einzelnen Komponenten der Wasserbilanz eines Waldstandortes erfassen?

Wasserbilanz

$$P = I + T + Q$$

Niederschlag  $\longrightarrow$   $P =$  Freilandniederschlag



# Hintergrund

Wie lassen sich die einzelnen Komponenten der Wasserbilanz eines Waldstandortes erfassen?

Wasserbilanz

$$P = I + T + Q$$

Niederschlag  $\longrightarrow$   $P =$  Freilandniederschlag

Interzeption  $\longrightarrow$   $I = P -$  Bestandesniederschlag



# Hintergrund

Wie lassen sich die einzelnen Komponenten der Wasserbilanz eines Waldstandortes erfassen?

Wasserbilanz

$$P = I + T + Q$$

Niederschlag  $\longrightarrow$   $P =$  Freilandniederschlag

Interzeption  $\longrightarrow$   $I = P -$  Bestandesniederschlag

Transpiration  $\longrightarrow$   $T = P - I - Q$



# Hintergrund

Wie lassen sich die einzelnen Komponenten der Wasserbilanz eines Waldstandortes erfassen?

Wasserbilanz

$$P = I + T + Q$$

Niederschlag  $\longrightarrow$   $P =$  Freilandniederschlag

Interzeption  $\longrightarrow$   $I = P -$  Bestandesniederschlag

Transpiration  $\longrightarrow$   $T = P - I - Q$

Abfluss/GW-Neubildung  $\longrightarrow$   $Q = P - I - T$



# Hintergrund

Wie lassen sich die einzelnen Komponenten der Wasserbilanz eines Waldstandortes erfassen?

Wasserbilanz

$$P = I + T + Q$$

Niederschlag  $\longrightarrow$   $P =$  Freilandniederschlag

Interzeption  $\longrightarrow$   $I = P -$  Bestandesniederschlag

Transpiration  $\longrightarrow$   $T = P - I - Q$

Abfluss/GW-Neubildung  $\longrightarrow$   $Q = P - I - T$



# Hintergrund

Wie lassen sich die einzelnen Komponenten der Wasserbilanz eines Waldstandortes erfassen?

Wasserbilanz

$$P = I + T + Q$$

Niederschlag  $\longrightarrow$   $P = \text{Freilandniederschlag}$

Interzeption  $\longrightarrow$   $I = P - \text{Bestandesniederschlag}$

Transpiration  $\longrightarrow$   $T = P - I - Q$

Abfluss/GW-Neubildung  $\longrightarrow$   $Q = P - I - T$

- T und Q können, gestützt von Bodenfechtemessungen, mit Hilfe von Waldwasserhaushaltsmodellen abgeschätzt werden





# Hintergrund

Wie lassen sich die einzelnen Komponenten der Wasserbilanz eines Waldstandortes erfassen?

Wasserbilanz

$$P = I + T + Q$$

Niederschlag  $\longrightarrow$   $P =$  Freilandniederschlag

Interzeption  $\longrightarrow$   $I = P -$  Bestandesniederschlag

Transpiration  $\longrightarrow$   $T = P - I - Q$

Abfluss/GW-Neubildung  $\longrightarrow$   $Q = P - I - T$

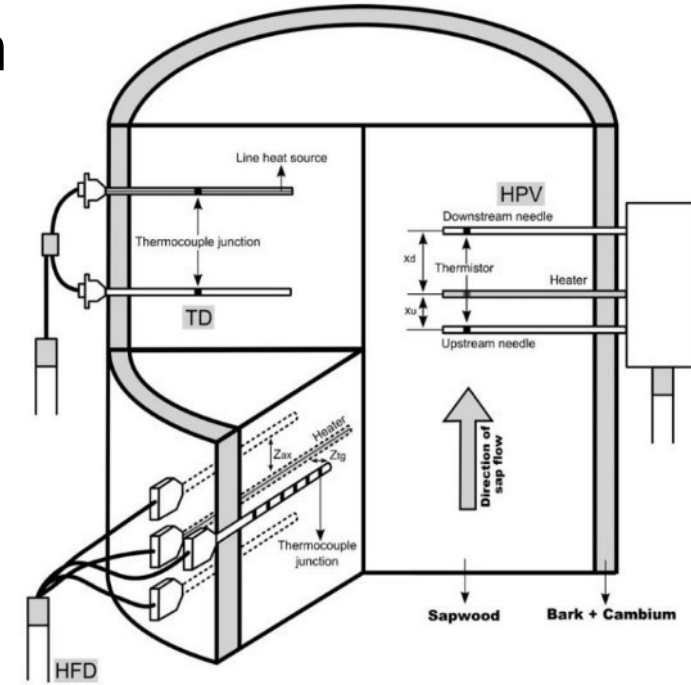
- T und Q können, gestützt von Bodenfechtemessungen, mit Hilfe von Waldwasserhaushaltsmodellen abgeschätzt werden
- **Die Entwicklung/Parametrisierung solcher Modelle und die Beurteilung ihrer Ergebnisse erfordert belastbare Vergleichsmessungen**



# Hintergrund

Wie misst man den Transpirationsstrom eines Baumes?

- Verschiedene thermo-elektrische Methoden basieren auf Wärmetransport im Saftfluss

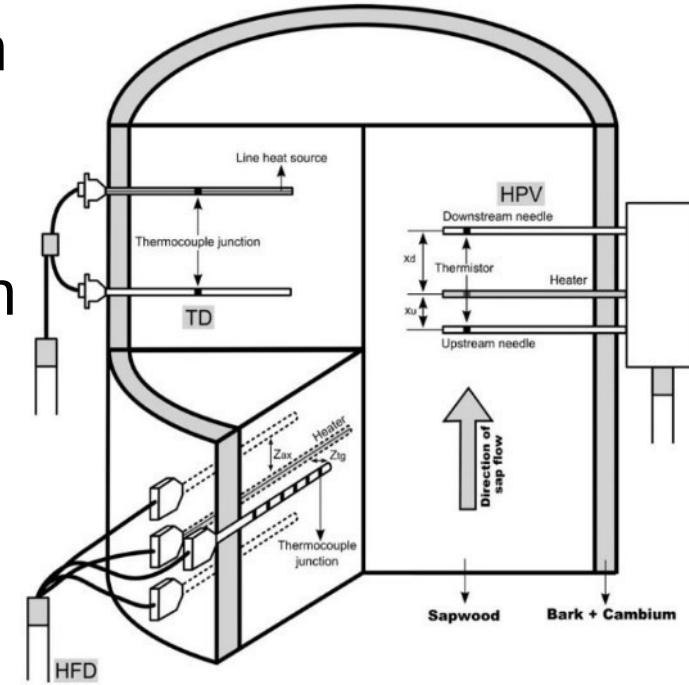


Nadezhdina et al.

# Hintergrund

Wie misst man den Transpirationsstrom eines Baumes?

- Verschiedene thermo-elektrische Methoden basieren auf Wärmetransport im Saftfluss
  - Aus Temperatur- oder Energiemengenumessungen wird auf Flüsse geschlossen

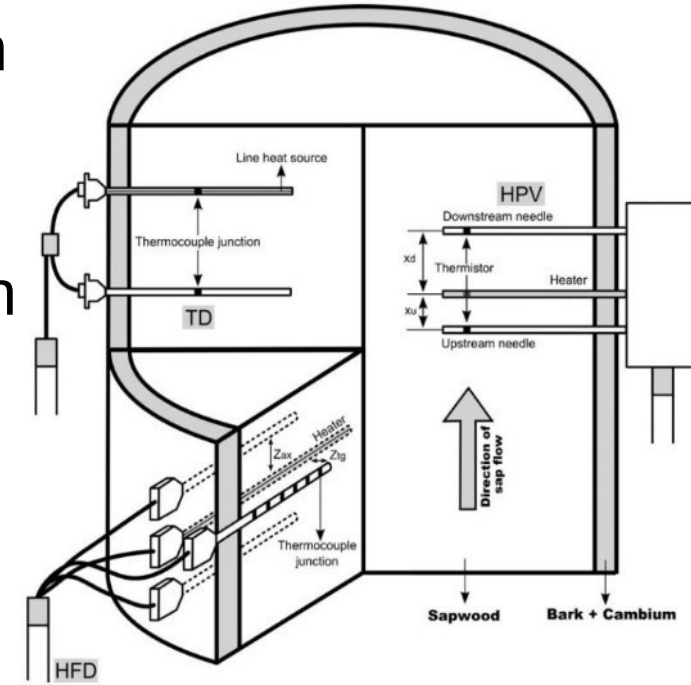


Nadezhkina et al.

# Hintergrund

Wie misst man den Transpirationsstrom eines Baumes?

- Verschiedene thermo-elektrische Methoden basieren auf Wärmetransport im Saftfluss
  - Aus Temperatur- oder Energiemengenumessungen wird auf Flüsse geschlossen
- Keine direkte Messung des Transpirationsstroms eines Baumes, sondern Hochrechnung auf Basis einzelner Punktmessungen



Nadezhkina et al.

# Methodik

Von der Sensormessung zum Transpirationswert (HPV-Methode):

$\Delta T_u$  &  $\Delta T_d$  [K]  
Temperaturdifferenzen

# Methodik

Von der Sensormessung zum Transpirationswert (HPV-Methode):

$\Delta T_u$  &  $\Delta T_d$  [K]  
Temperaturdifferenzen

abhängig von  $k$

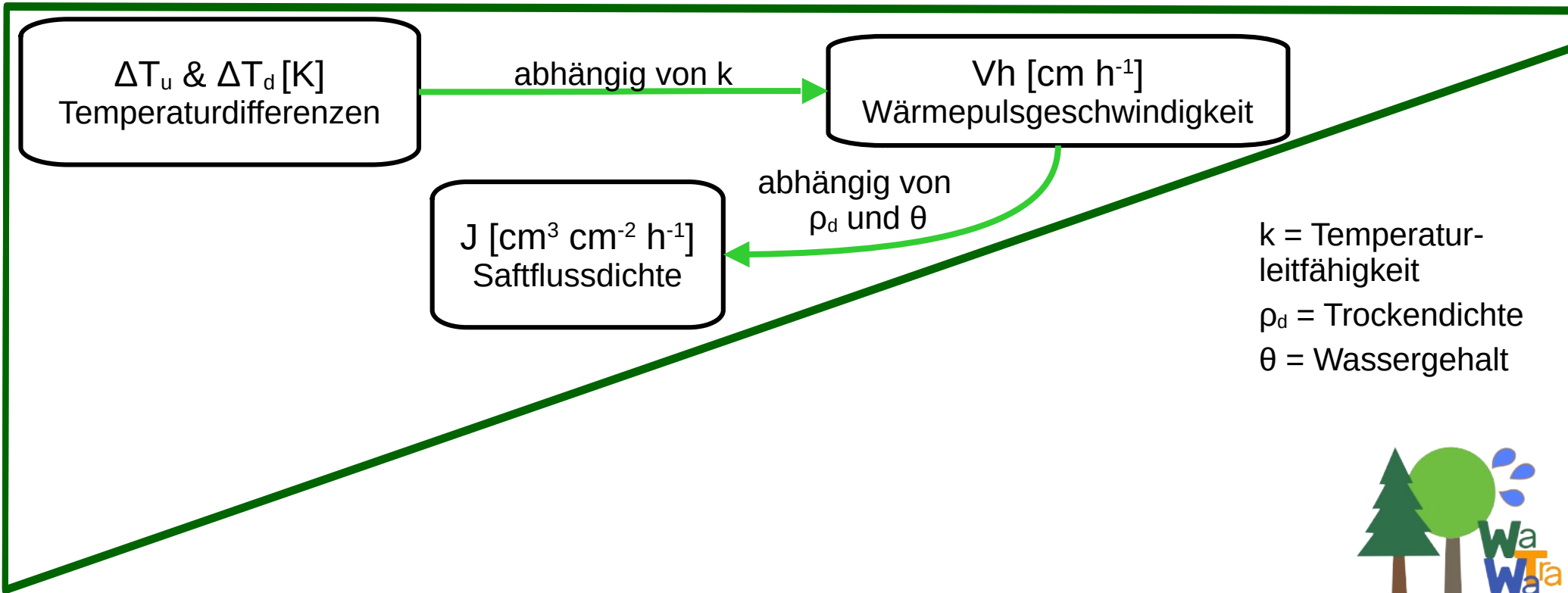
$V_h$  [ $\text{cm h}^{-1}$ ]  
Wärmepulsgeschwindigkeit

$k$  = Temperatur-  
leitfähigkeit



# Methodik

Von der Sensormessung zum Transpirationswert (HPV-Methode):

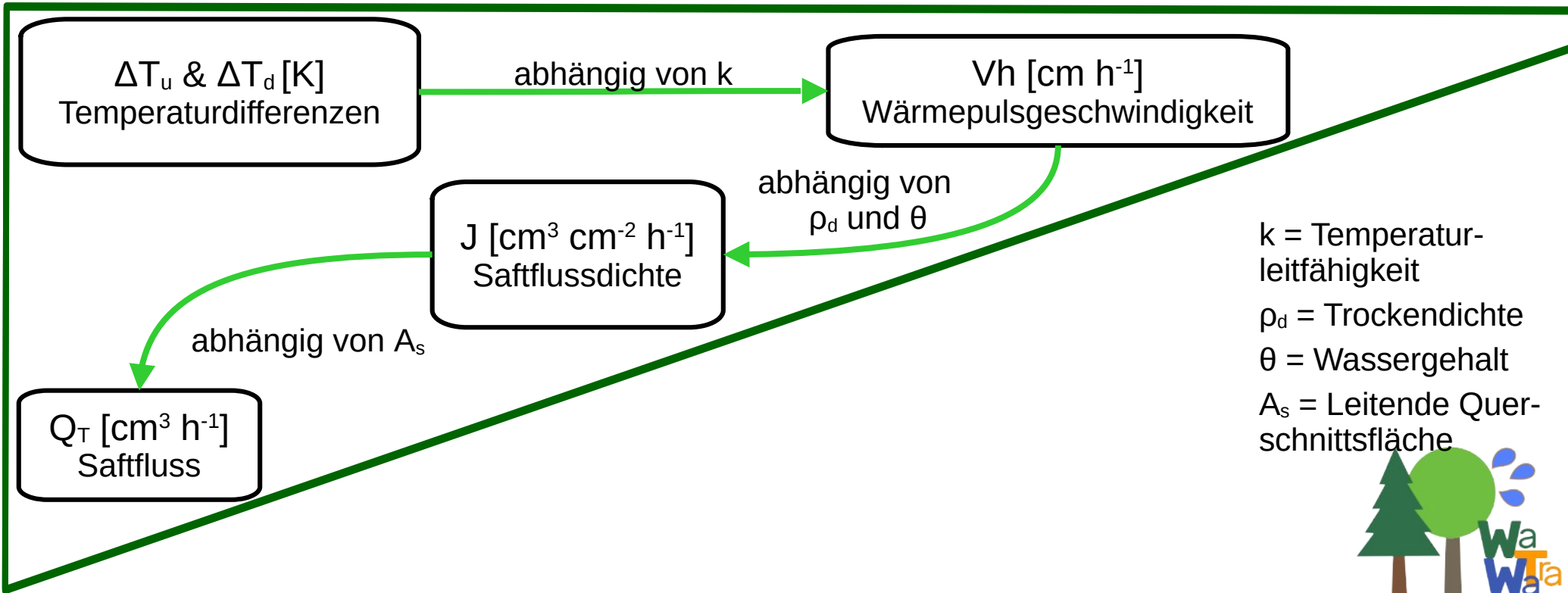


k = Temperaturleitfähigkeit  
ρ<sub>d</sub> = Trockendichte  
θ = Wassergehalt



# Methodik

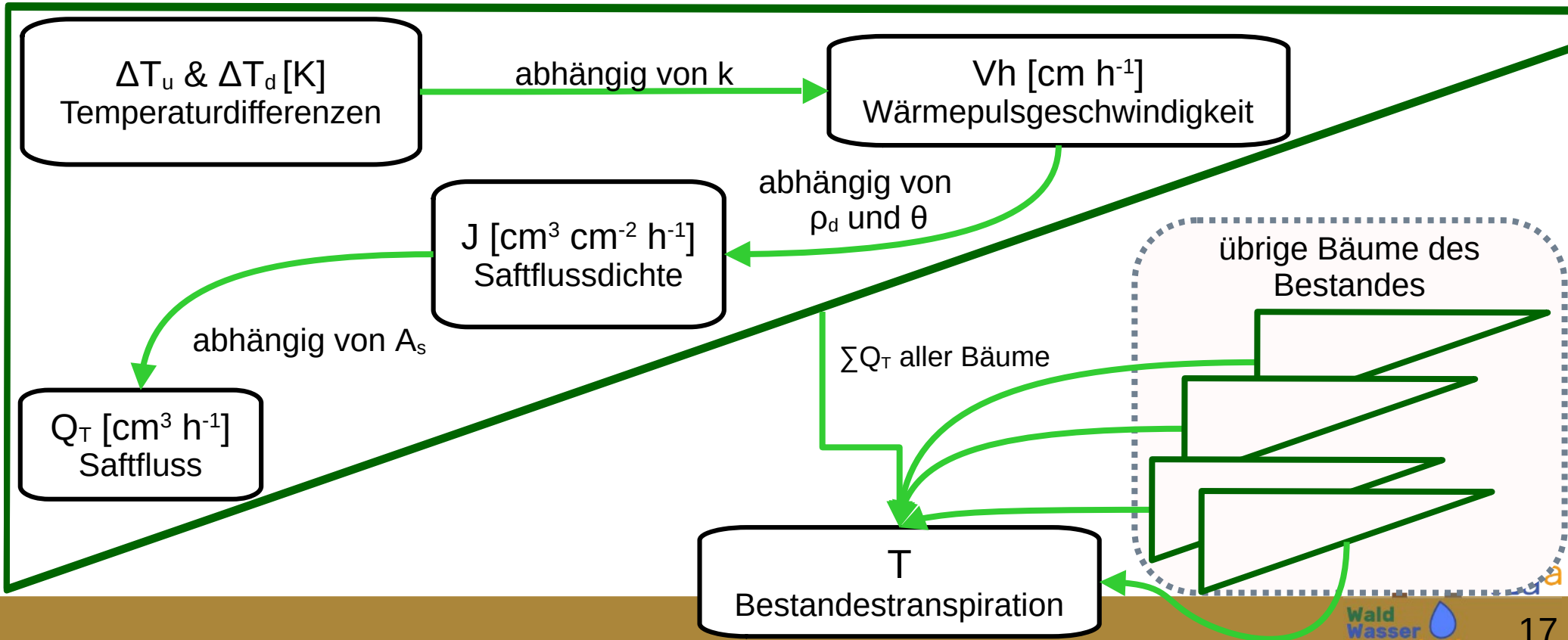
Von der Sensormessung zum Transpirationswert (HPV-Methode):





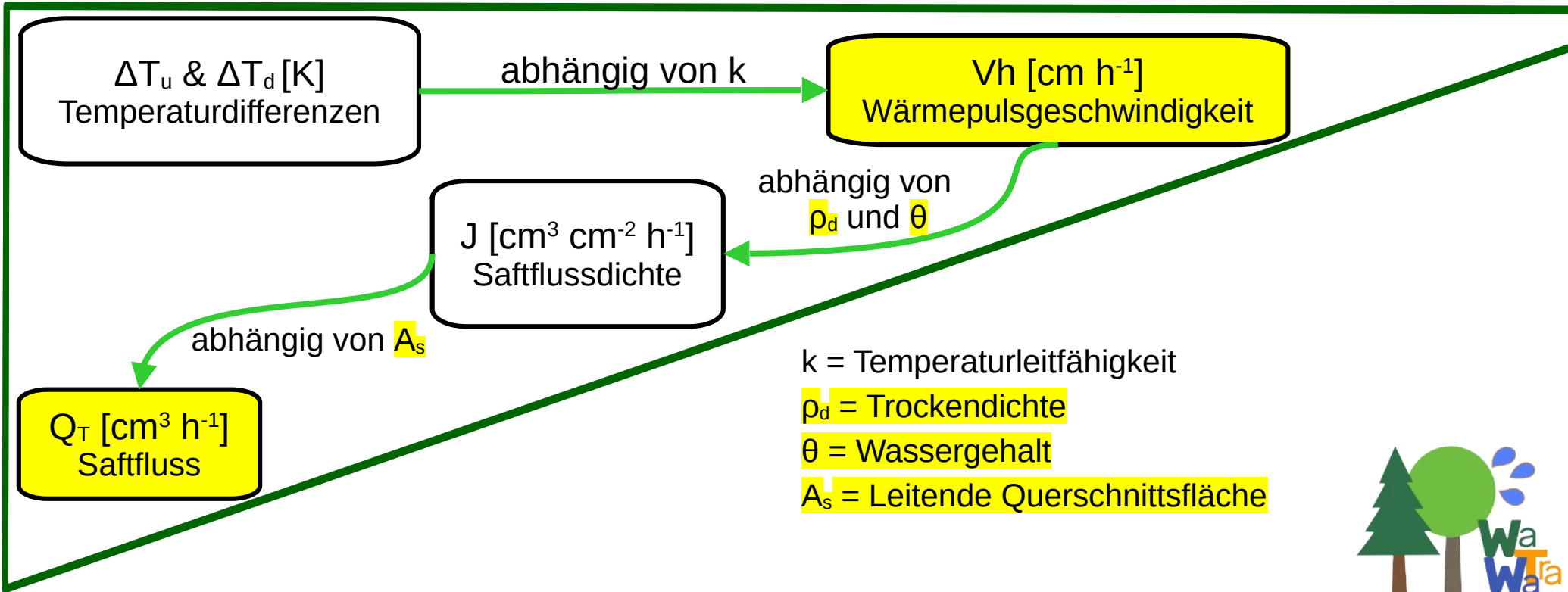
# Methodik

Von der Sensormessung zum Transpirationswert (HPV-Methode):



# Methodik

Von der Sensormessung zum Transpirationswert:



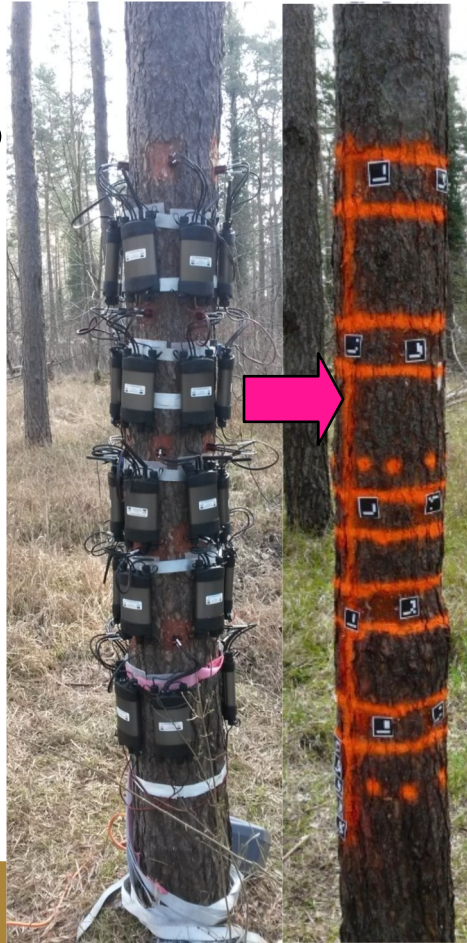
# Der “Opferbaum”

- 25 Saftflusssensoren (je 5 Winkel auf 8, 10, 12, 15 und 18 dm Höhe) über vier Wochen an einer Waldkiefer



# Der “Opferbaum”

- 25 Saftflusssensoren (je 5 Winkel auf 8, 10, 12, 15 und 18 dm Höhe) über vier Wochen an einer Waldkiefer
- Danach:  
Bohrkerne von allen Sensorpositionen...





# Der “Opferbaum”

- 25 Saftflusssensoren (je 5 Winkel auf 8, 10, 12, 15 und 18 dm Höhe) über vier Wochen an einer Waldkiefer
- Danach: Bohrkerne von allen Sensorpositionen...
- ... und Entnahme von Stammscheiben



# Abgrenzung von Splint- und Kernholz

- Am Stammquerschnitt:
  - Farbunterschiede



# Abgrenzung von Splint- und Kernholz

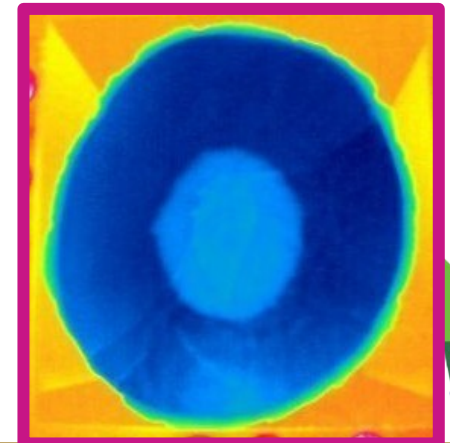
- Am Stammquerschnitt:
  - Farbunterschiede
  - **Lichtdurchlässigkeit**





# Abgrenzung von Splint- und Kernholz

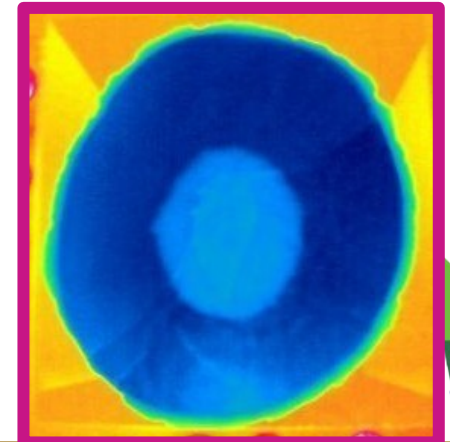
- Am Stammquerschnitt:
  - Farbunterschiede
  - **Lichtdurchlässigkeit**
  - **Temperatur (Verdunstung)**





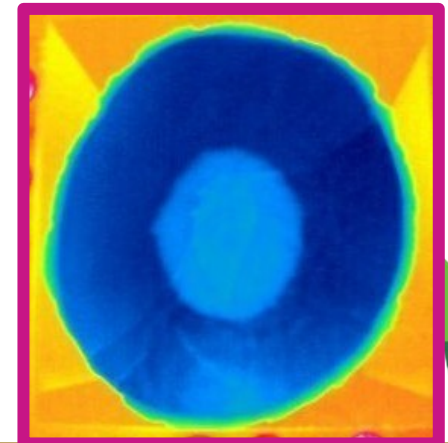
# Abgrenzung von Splint- und Kernholz

- Am Stammquerschnitt:
  - Farbunterschiede
  - **Lichtdurchlässigkeit**
  - **Temperatur (Verdunstung)**
  - Farbindikatoren (z.B. Mythylorange)



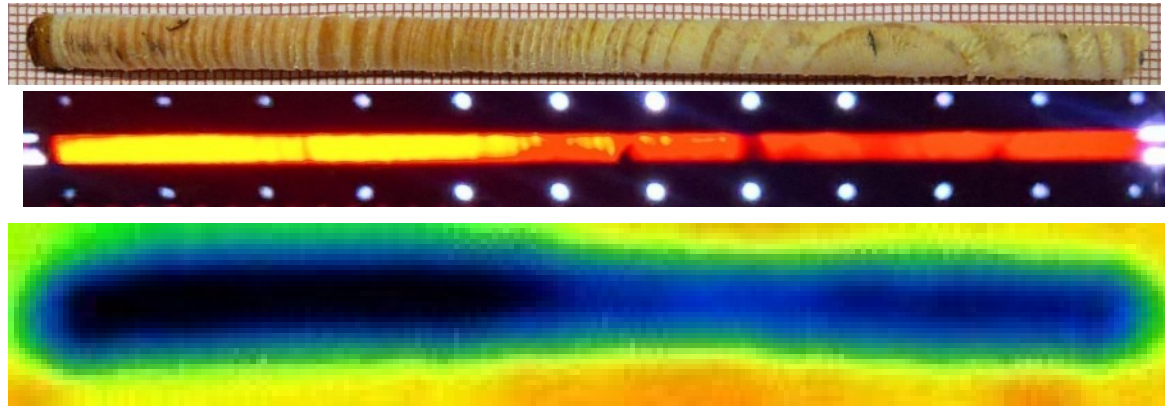
# Abgrenzung von Splint- und Kernholz

- Am Stammquerschnitt:
  - Farbunterschiede
  - **Lichtdurchlässigkeit**
  - **Temperatur (Verdunstung)**
  - Farbindikatoren (z.B. Mythylorange)
- Direkte Ausmessung des Splintholzes ( $\approx A_s$ ) möglich



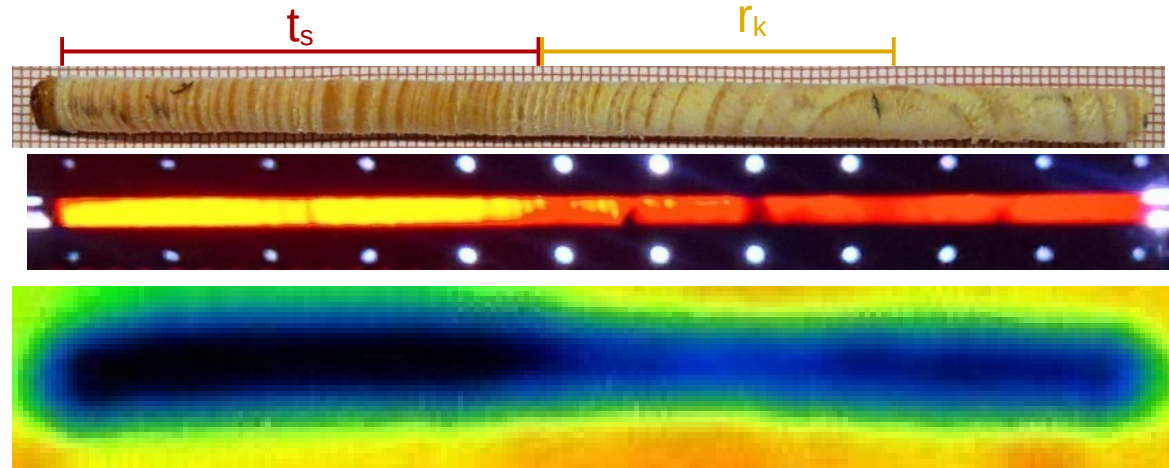
# Abgrenzung von Splint- und Kernholz

- Am Bohrkern:
  - Farbunterschiede
  - Lichtdurchlässigkeit
  - Temperatur (Verdunstung)



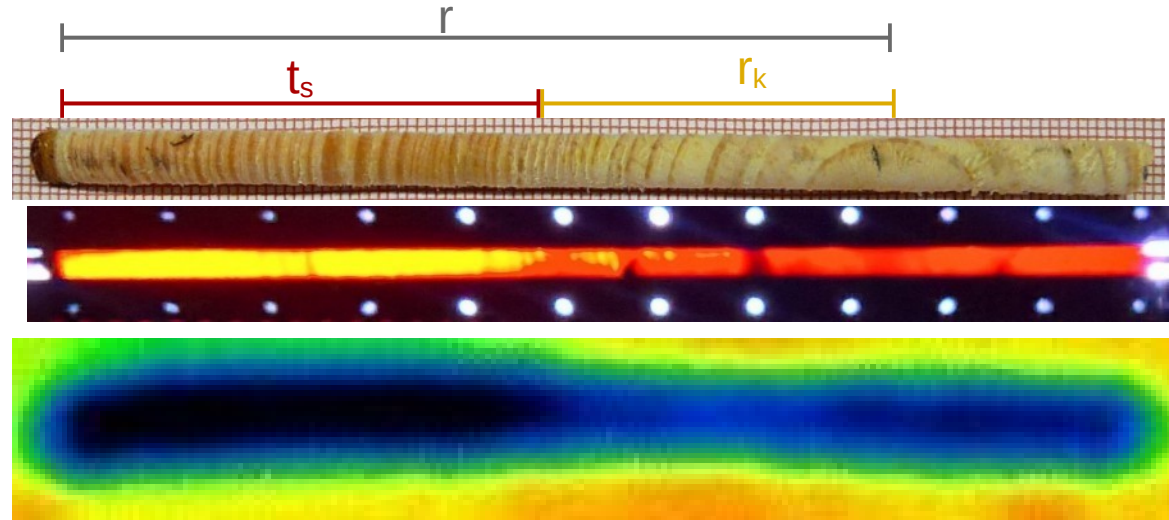
# Abgrenzung von Splint- und Kernholz

- Am Bohrkern:
  - Farbunterschiede
  - Lichtdurchlässigkeit
  - Temperatur (Verdunstung)
- Abschätzung von
  - Splintholztiefe  $t_s$
  - Kernholzradius  $r_k$



# Abgrenzung von Splint- und Kernholz

- Am Bohrkern:
  - Farbunterschiede
  - Lichtdurchlässigkeit
  - Temperatur (Verdunstung)
- Abschätzung von
  - Splintholztiefe  $t_s$
  - Kernholzradius  $r_k$

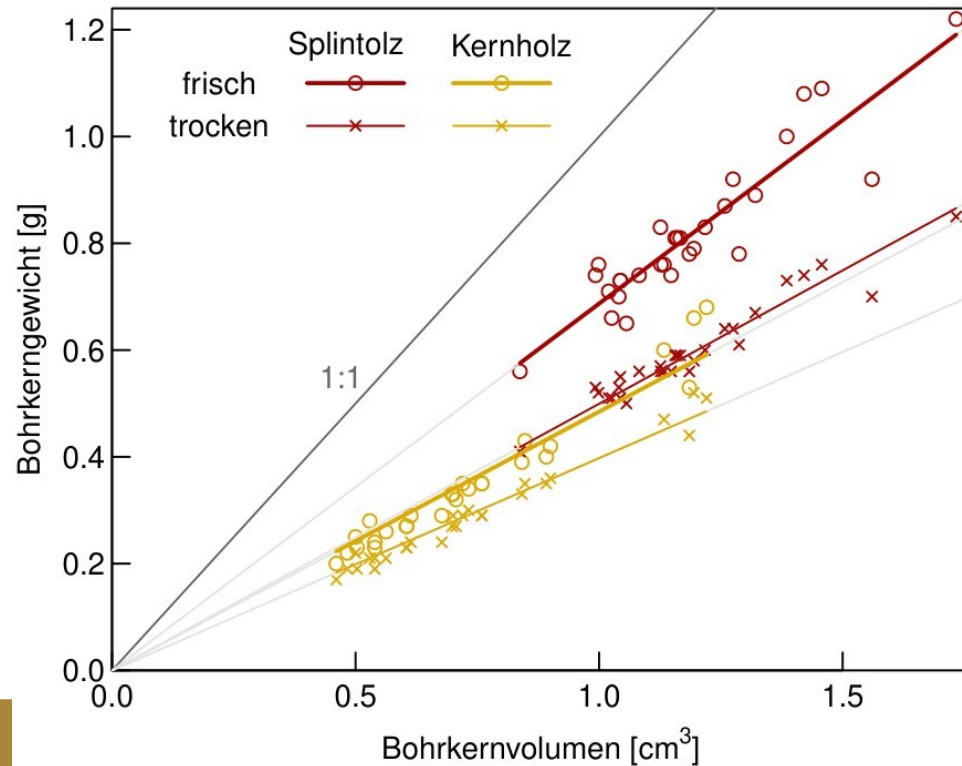


$$\text{Splintholzfläche: } A_s = \pi(r_k + t_s)^2 - \pi(r_k)^2$$



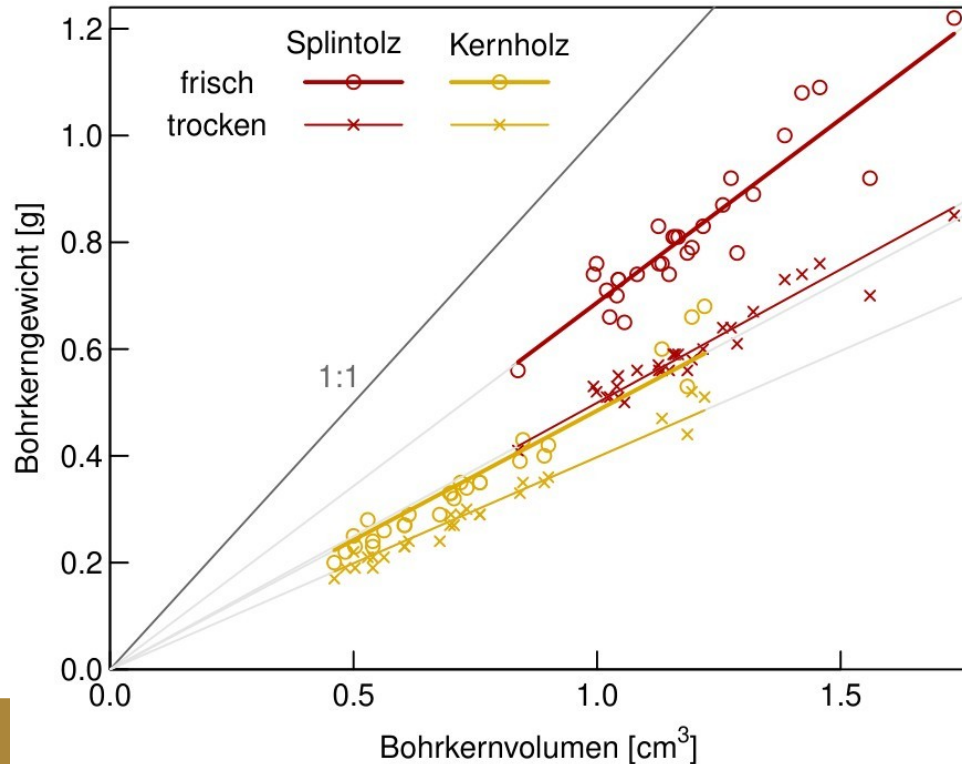
# Dichten und Wassergehalte

**Methode:** Aufteilung der Bohrkern in Splint und Kernholz, Bestimmung von Frisch- und Trockengewichten



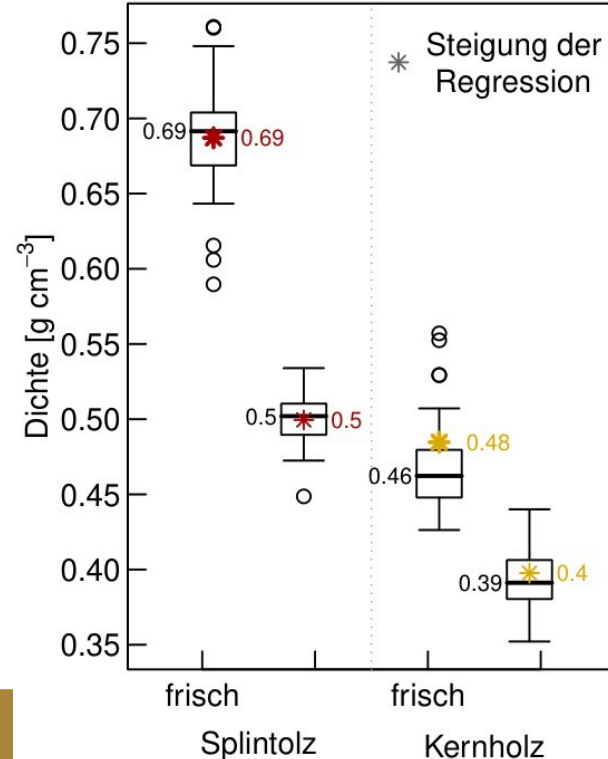
# Dichten und Wassergehalte

**Methode:** Aufteilung der Bohrkern in Splint und Kernholz, Bestimmung von Frisch- und Trockengewichten

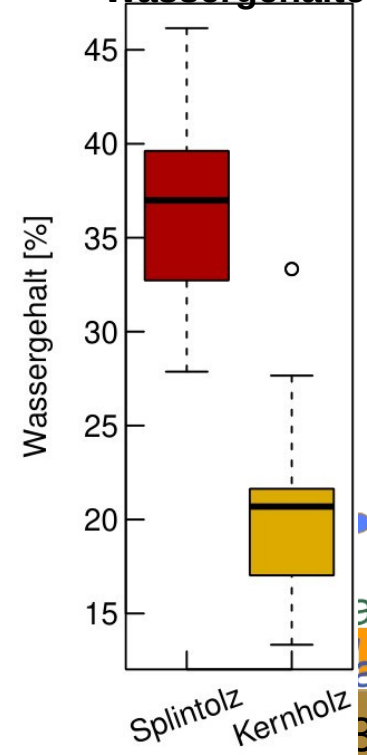


**Ergebnisse:** Klare Dichteunterschiede zwischen Splint- und Kernholz, auch nach Trocknung

**Frisch- und Trockendichten**

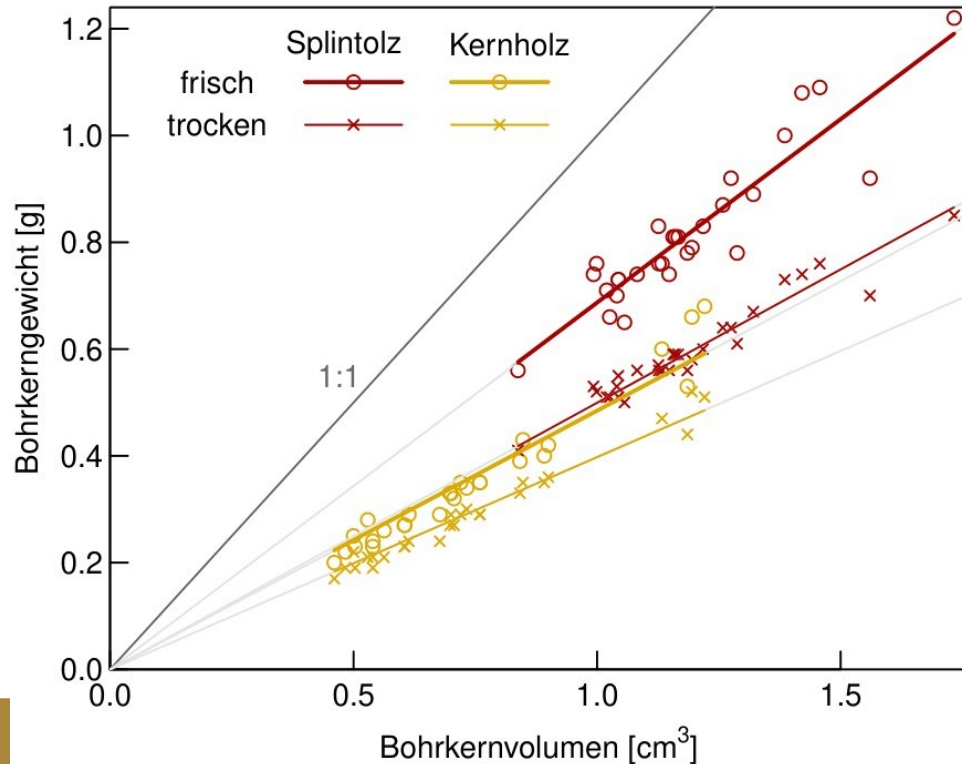


**Wassergehalte**

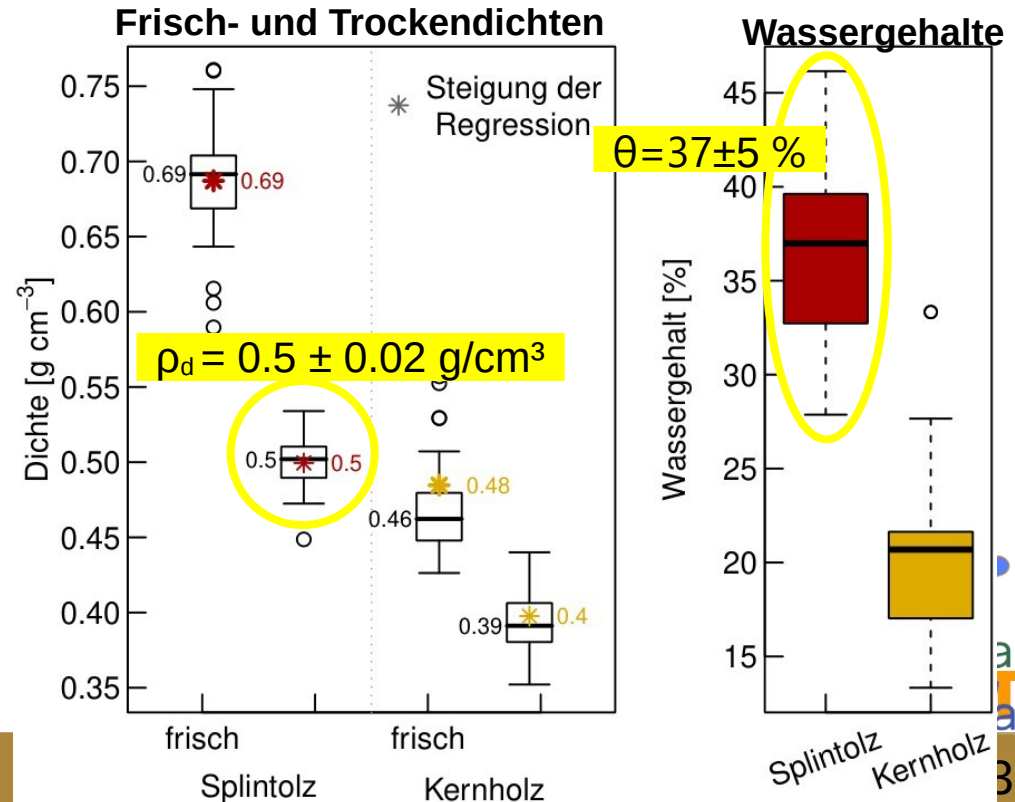


# Dichten und Wassergehalte

**Methode:** Aufteilung der Bohrkern in Splint und Kernholz, Bestimmung von Frisch- und Trockengewichten



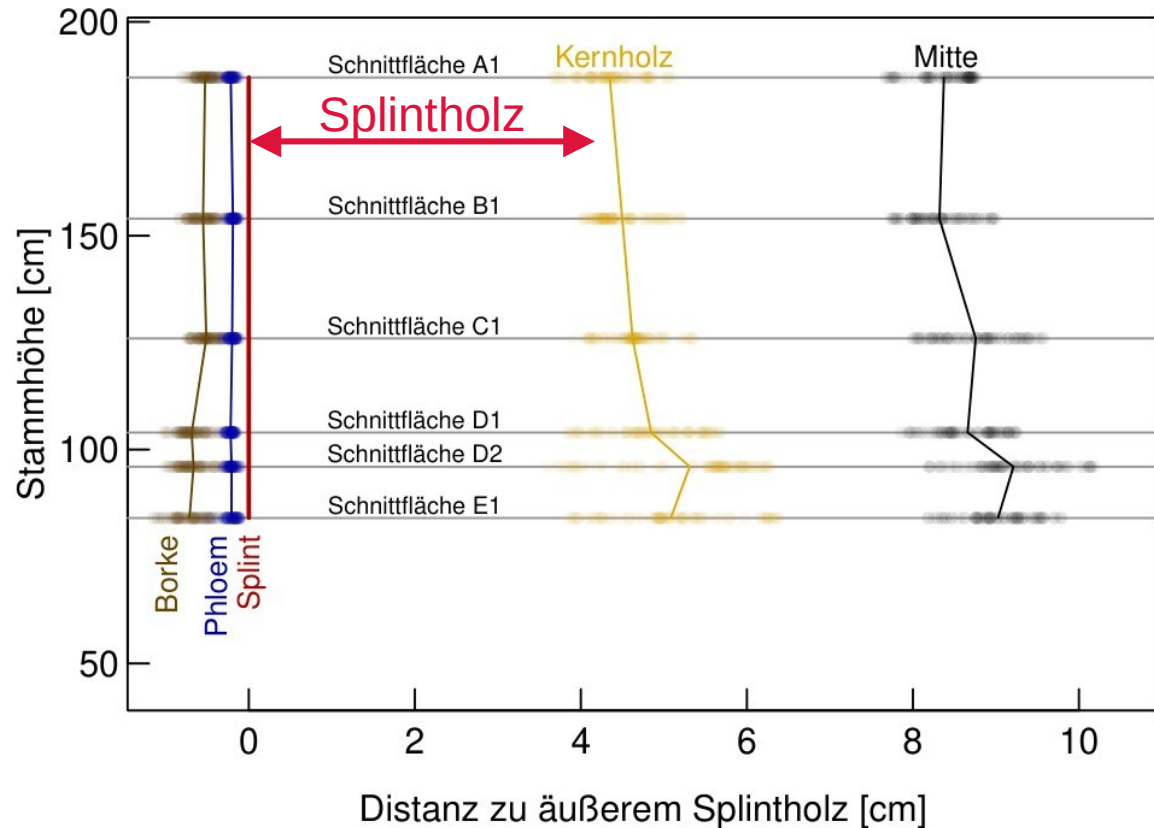
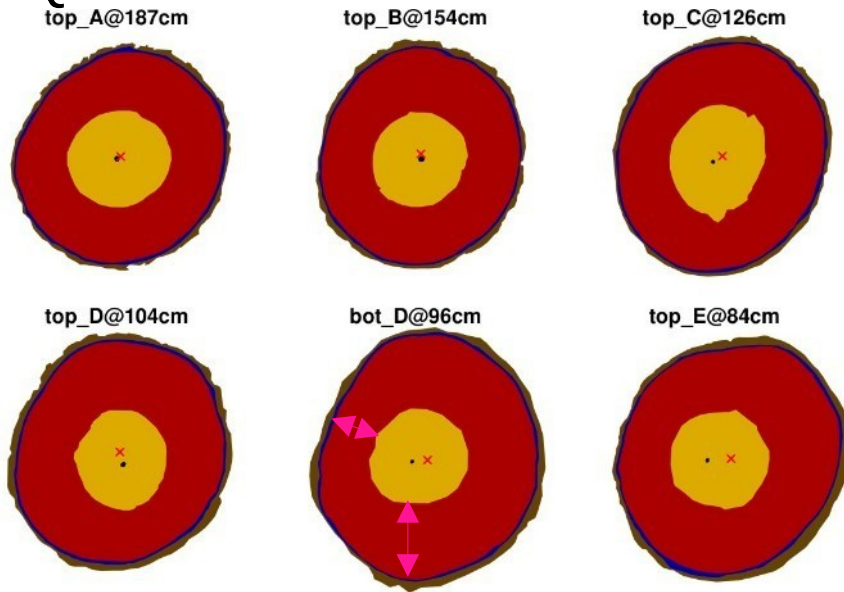
**Ergebnisse:** Klare Dichteunterschiede zwischen Splint- und Kernholz, auch nach Trocknung





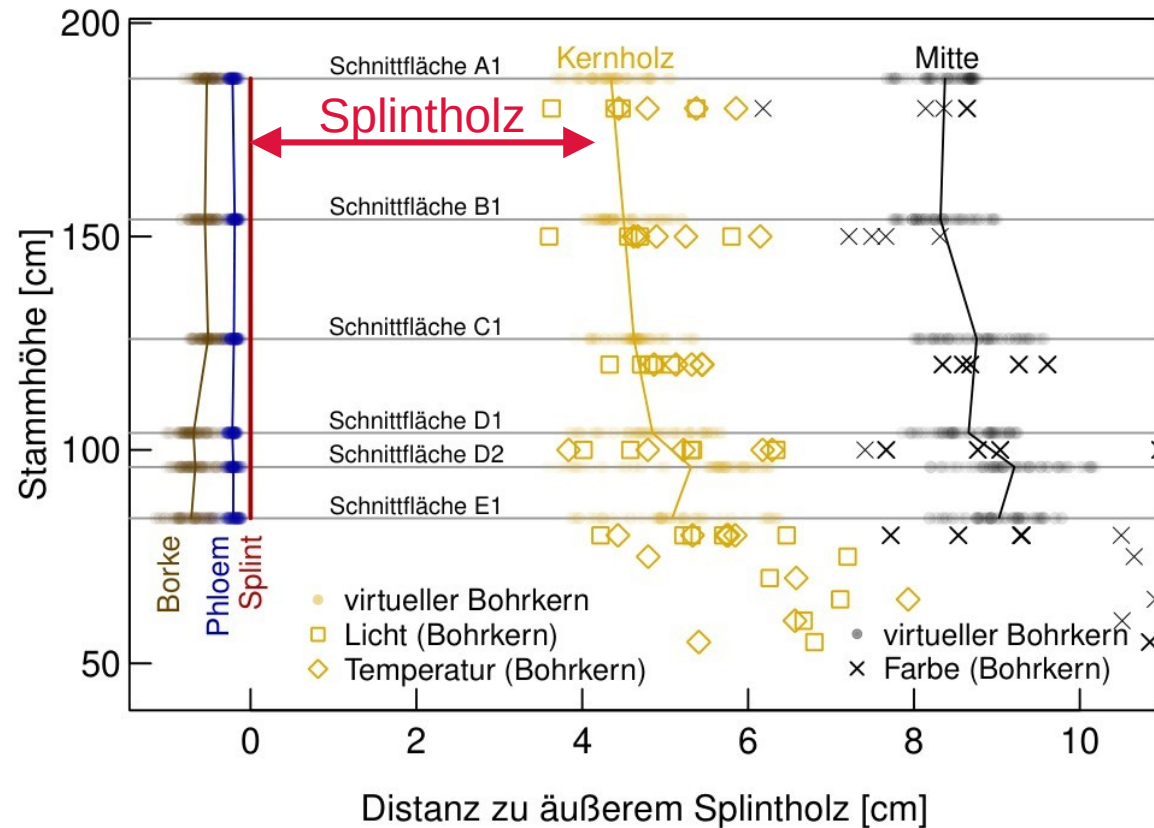
# Bestimmung der Splintholzfläche $A_s$

- Splintholztiefen variieren bis  $\pm 1.5$  cm (bei  $d=18$  cm) um den jeweiligen Mittelwert eines Querschnitts



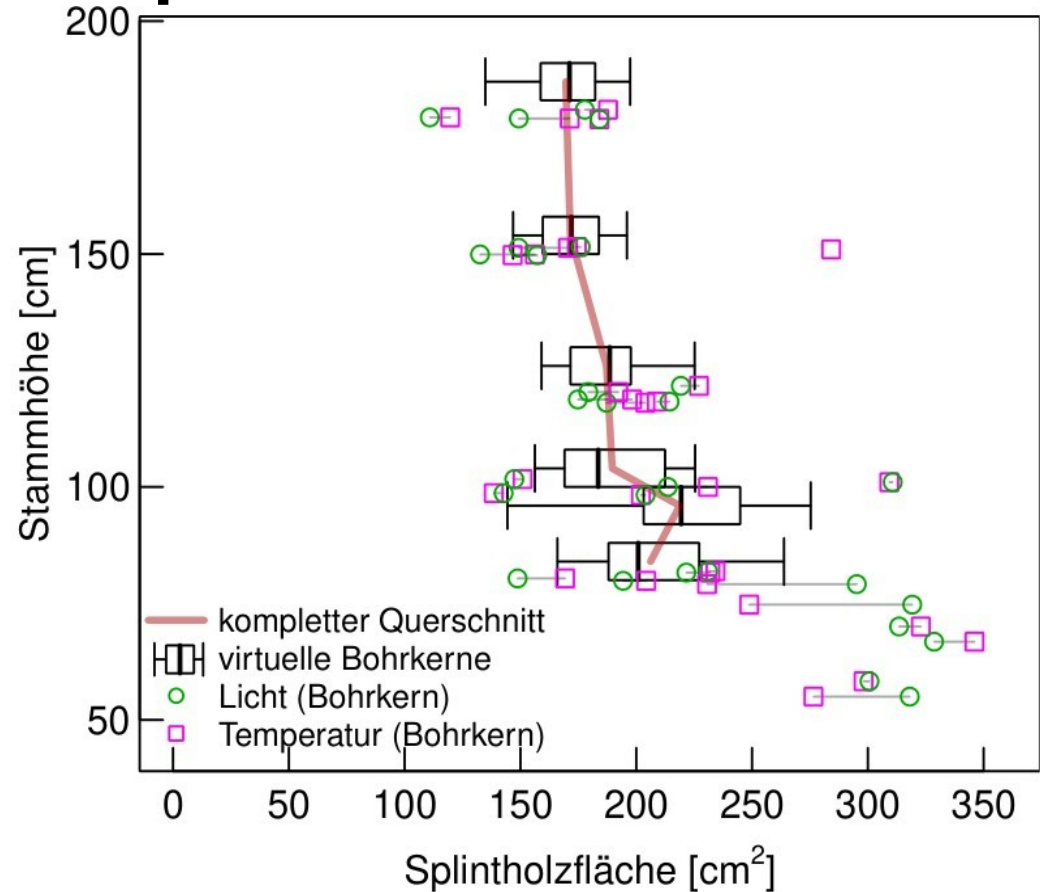
# Bestimmung der Splintholzfläche $A_s$

- Splintholztiefen variieren bis  $\pm 1.5$  cm (bei  $d=18$  cm) um den jeweiligen Mittelwert eines Querschnitts
- Generell gute Übereinstimmung zwischen Abschätzungen aus Querschnitten und Bohrkernen



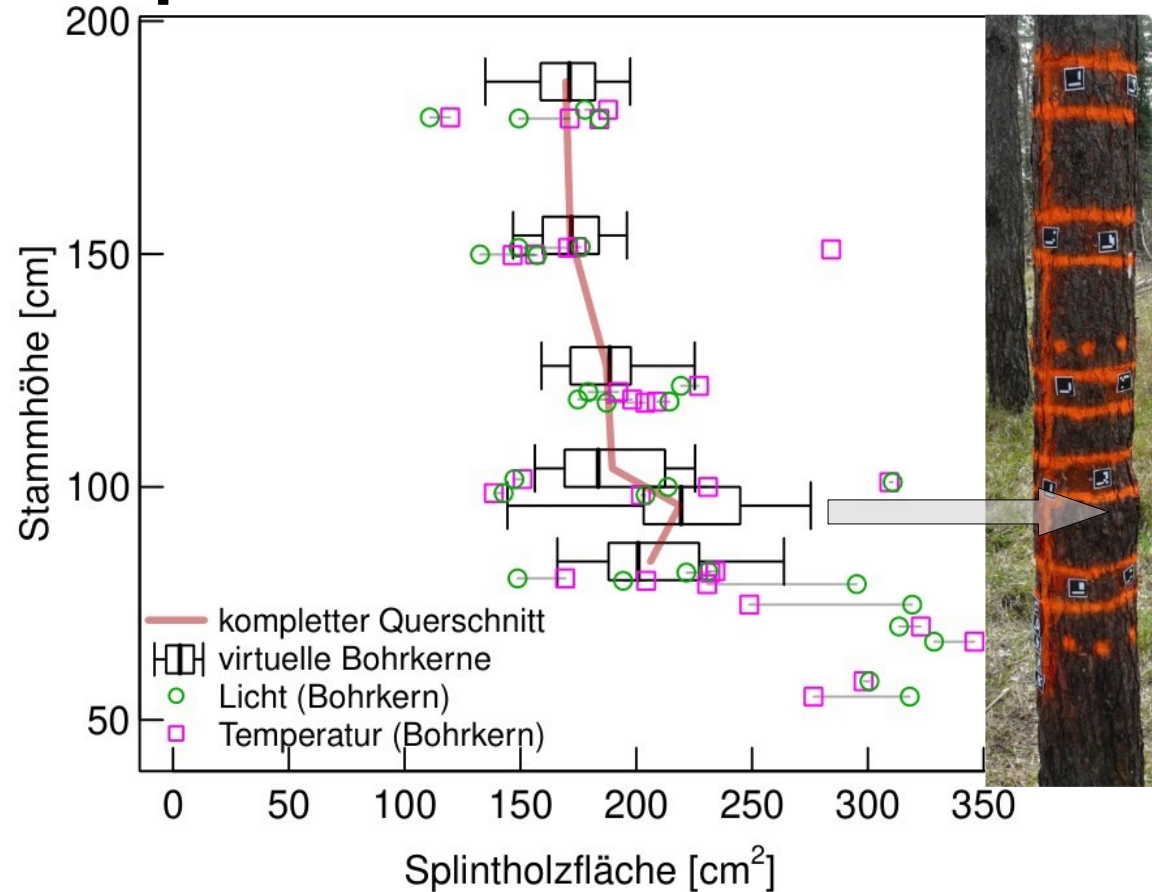
# Bestimmung der Splintholzfläche $A_s$

- Splintholztiefen variieren bis  $\pm 1.5$  cm (bei  $d=18$  cm) um den jeweiligen Mittelwert eines Querschnitts
- Generell gute Übereinstimmung zwischen Abschätzungen aus Querschnitten und Bohrkernen



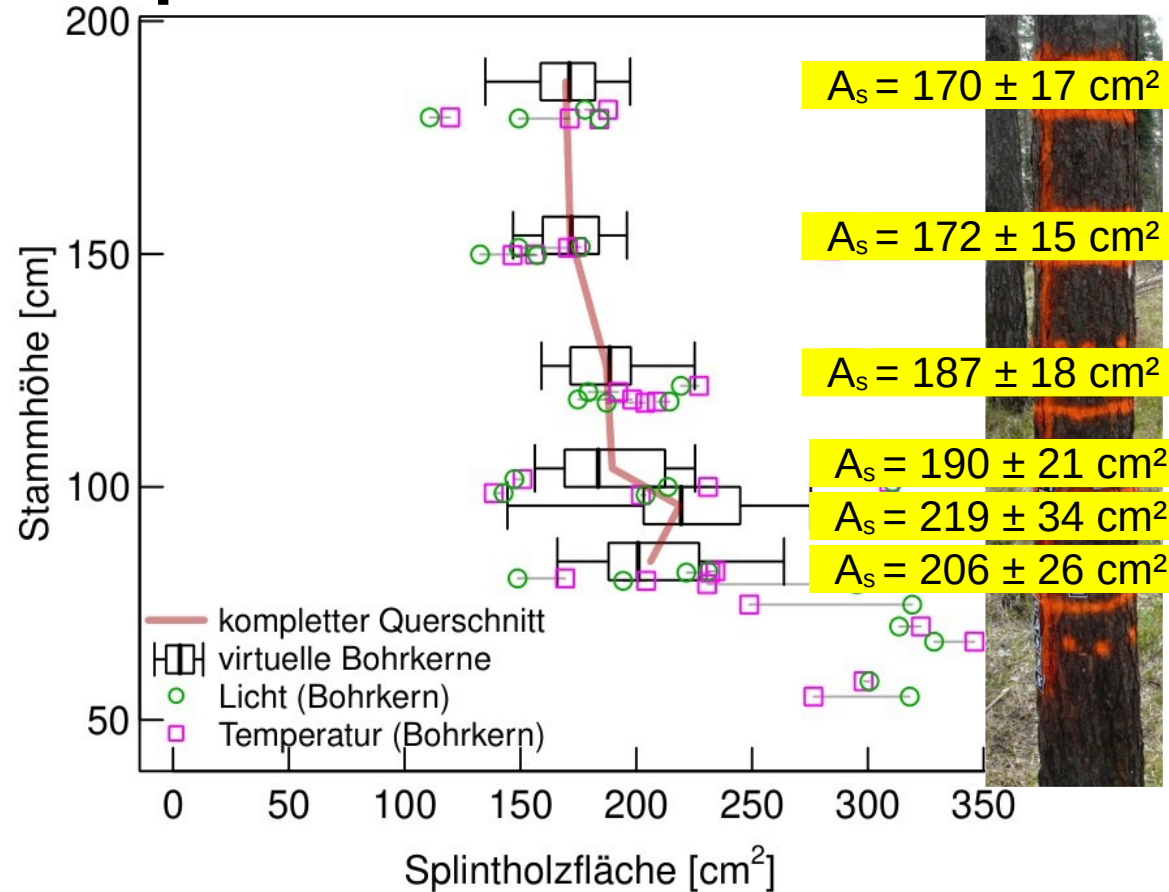
# Bestimmung der Splintholzfläche $A_s$

- Splintholztiefen variieren bis  $\pm 1.5$  cm (bei  $d=18$  cm) um den jeweiligen Mittelwert eines Querschnitts
- Generell gute Übereinstimmung zwischen Abschätzungen aus Querschnitten und Bohrkernen
- Größte Variabilität in der Nähe von Unregelmäßigkeiten



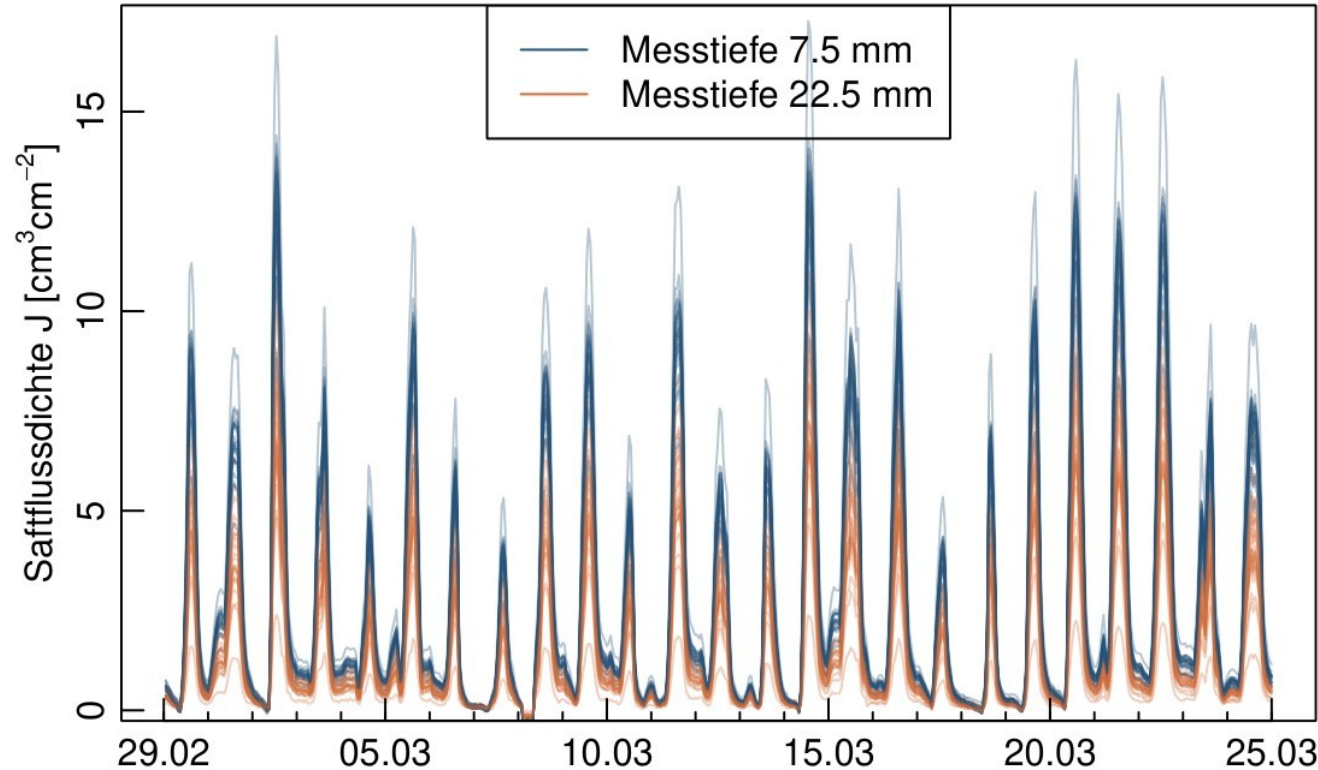
# Bestimmung der Splintholzfläche $A_s$

- Splintholztiefen variieren bis  $\pm 1.5$  cm (bei  $d=18$  cm) um den jeweiligen Mittelwert eines Querschnitts
- Generell gute Übereinstimmung zwischen Abschätzungen aus Querschnitten und Bohrkernen
- Größte Variabilität in der Nähe von Unregelmäßigkeiten



# Wärmepulsgeschwindigkeiten

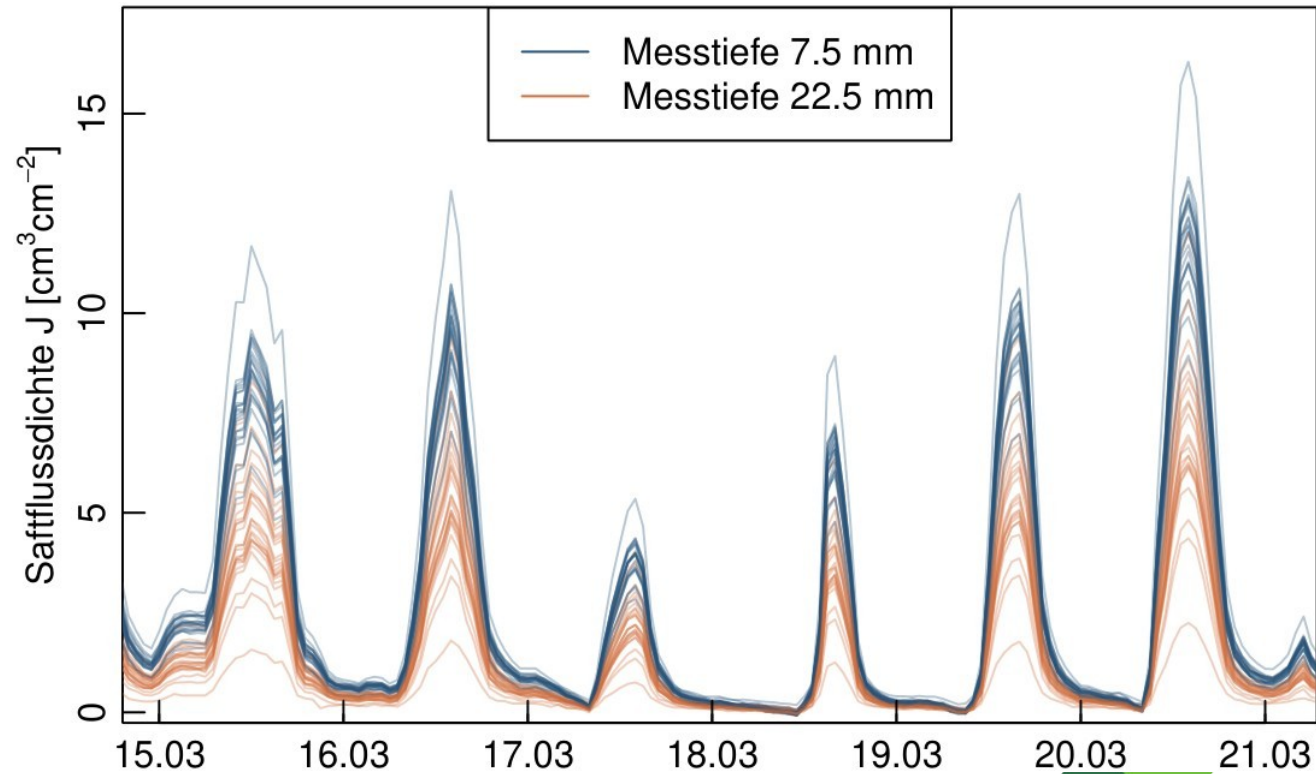
- Abnahme nach innen





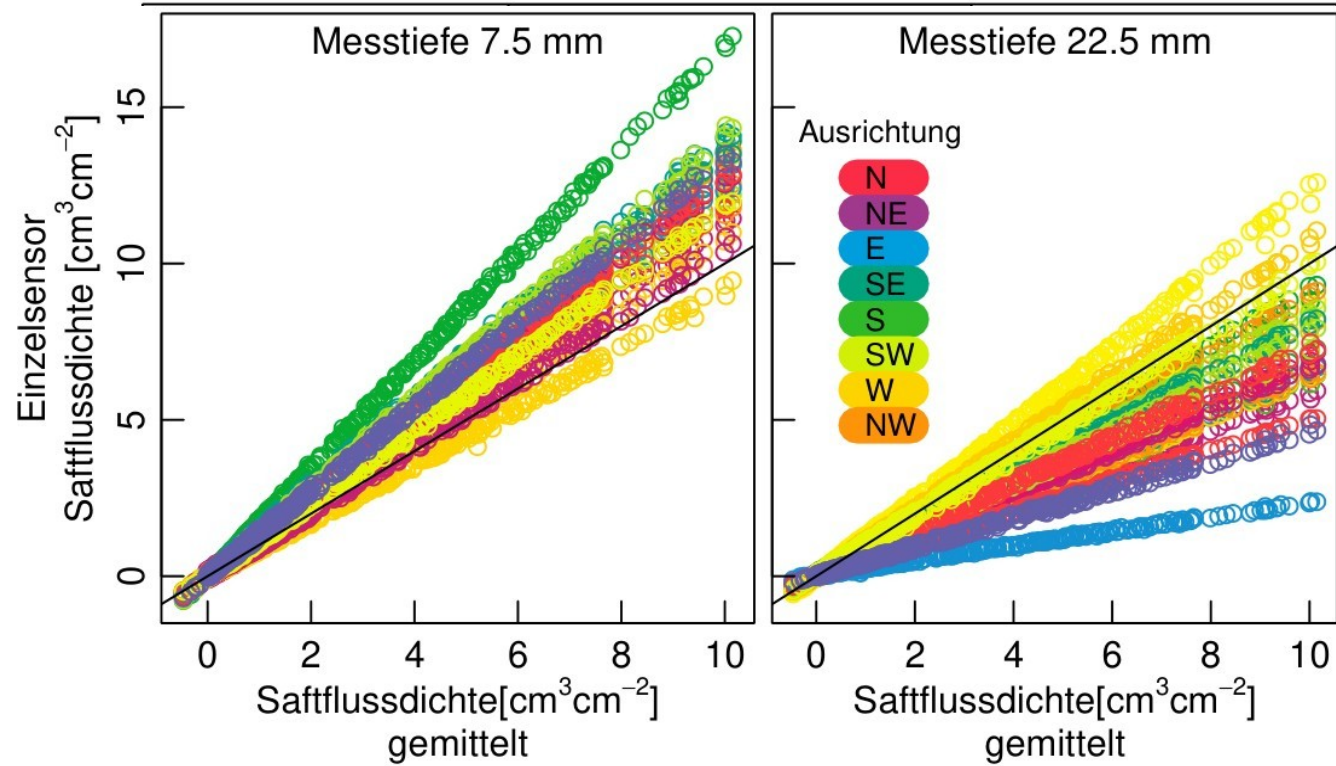
# Wärmepulsgeschwindigkeiten

- Abnahme nach innen
- Hohe Korrelation aller Messreihen untereinander



# Wärmepulsgeschwindigkeiten

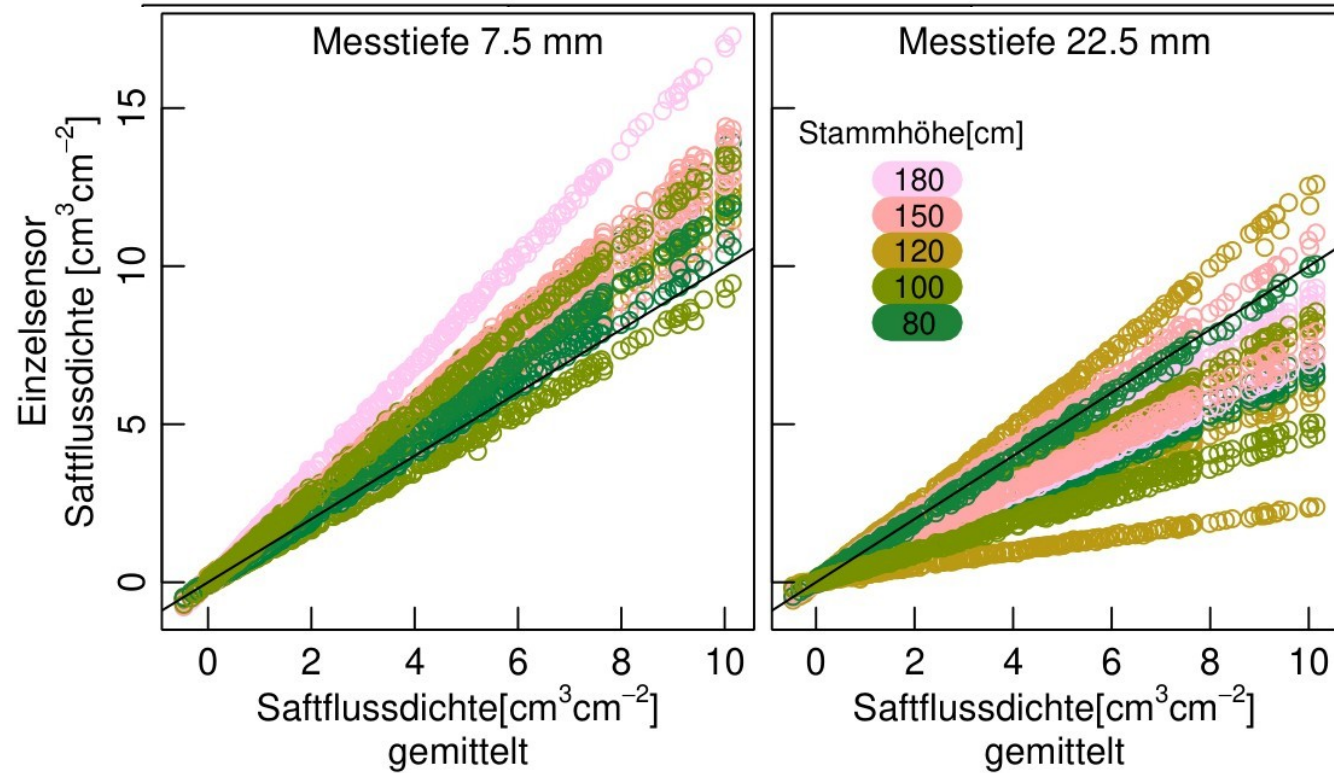
- Abnahme nach innen
- Hohe Korrelation aller Messreihen untereinander
  - Dynamik kann mit einem Sensor gut erfasst werden





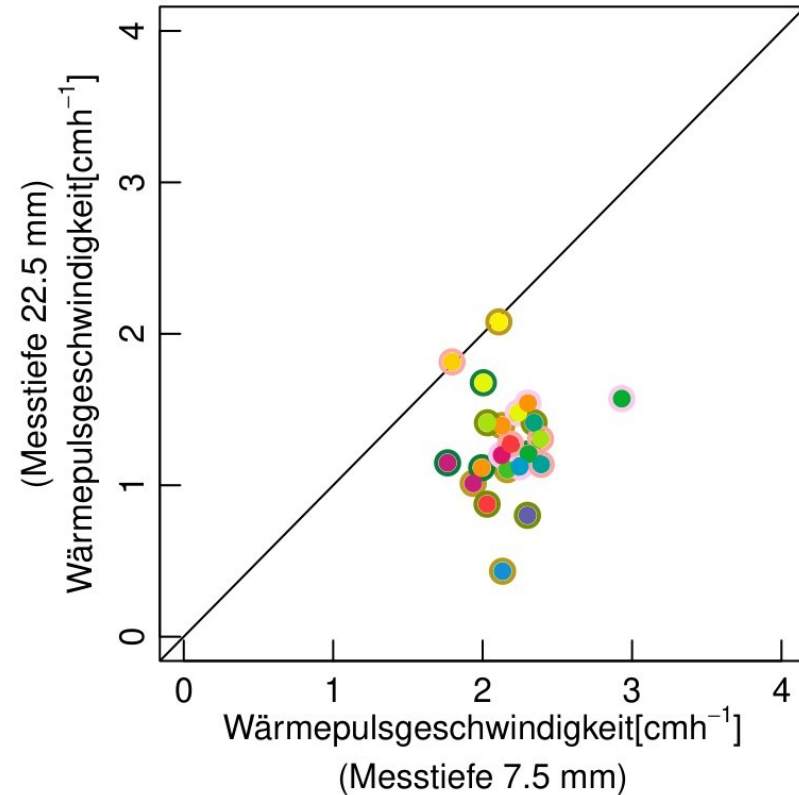
# Wärmepulsgeschwindigkeiten

- Abnahme nach innen
- Hohe Korrelation aller Messreihen untereinander
  - Dynamik kann mit einem Sensor gut erfasst werden
  - Aber variable Skalierung zwischen Positionen und Messtiefen



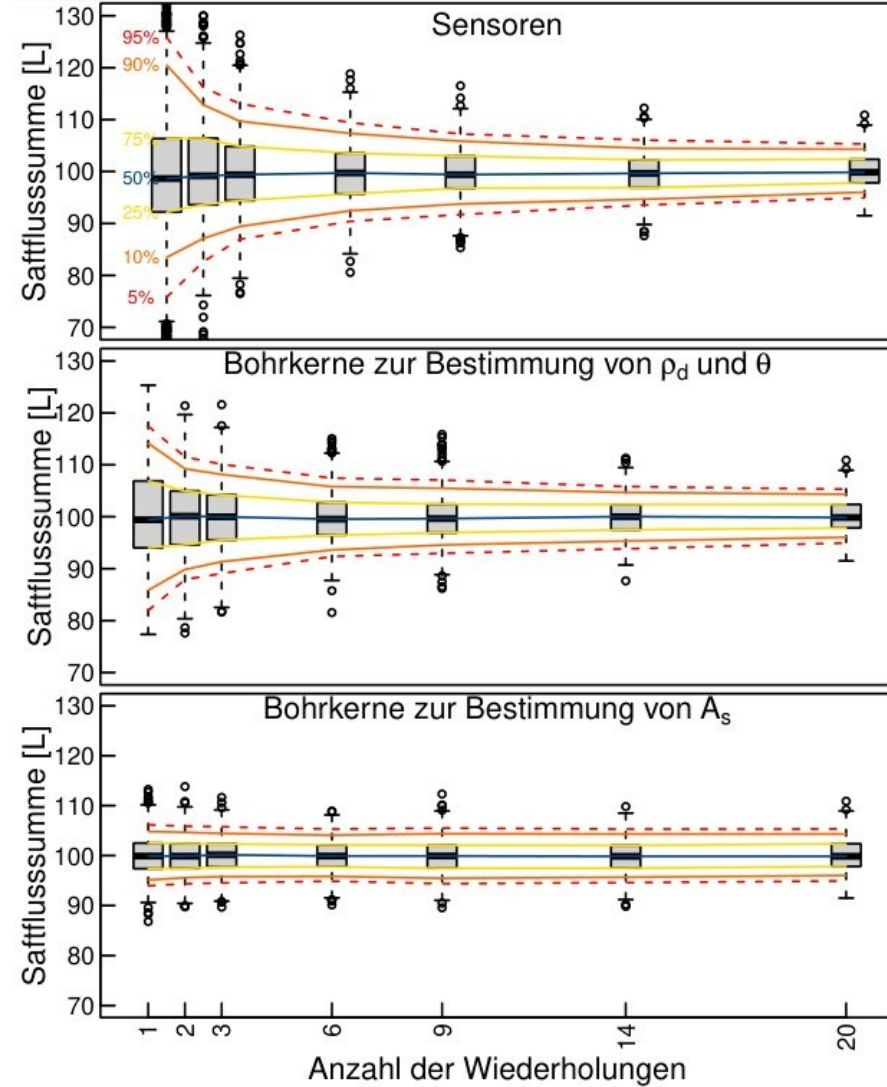
# Wärmepulsgeschwindigkeiten

- Abnahme nach innen
- Hohe Korrelation aller Messreihen untereinander
  - Dynamik kann mit einem Sensor gut erfasst werden
  - Aber variable Skalierung zwischen Positionen und Messtiefen



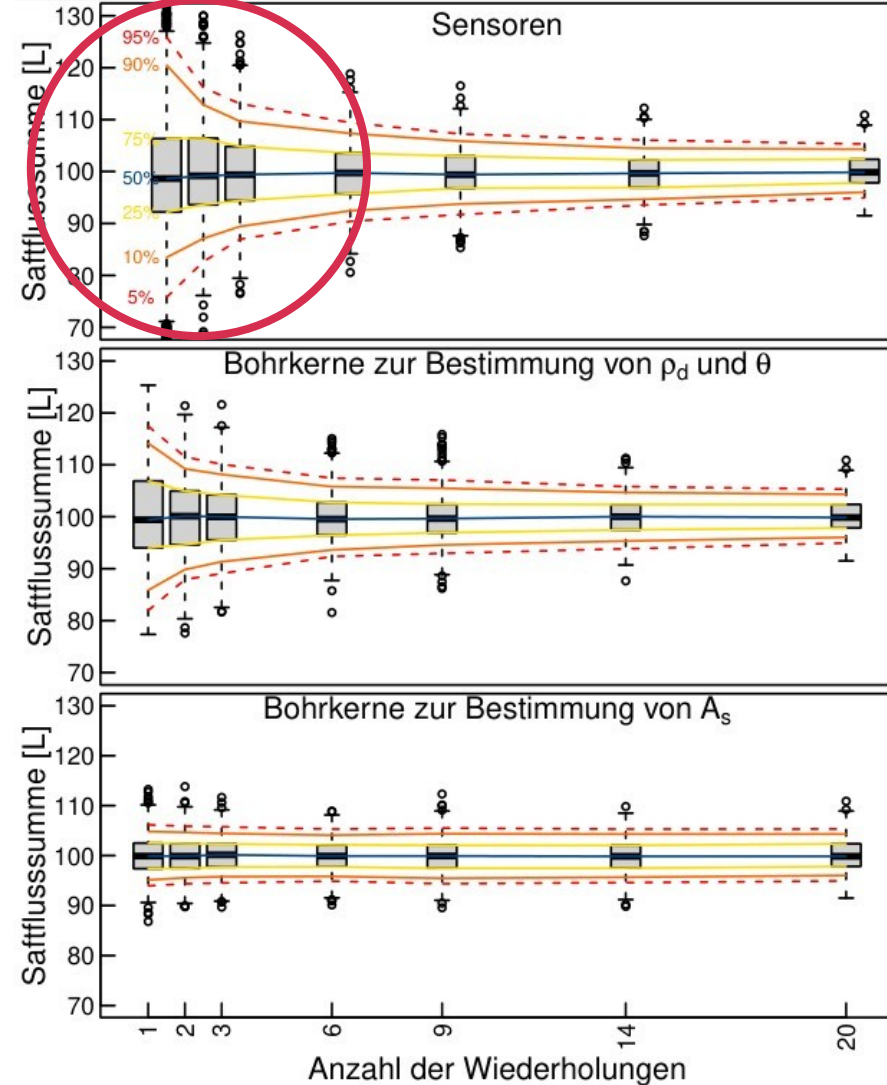
# Saftflüsse

- Aus den beobachteten Werten wurden wiederholt unterschiedlich viele zufällige Werte für  $V_h$ ,  $\rho_d$ ,  $\theta$  und  $A_s$  gezogen um die daraus resultierenden mittleren Saftflussmengen zu bestimmen.



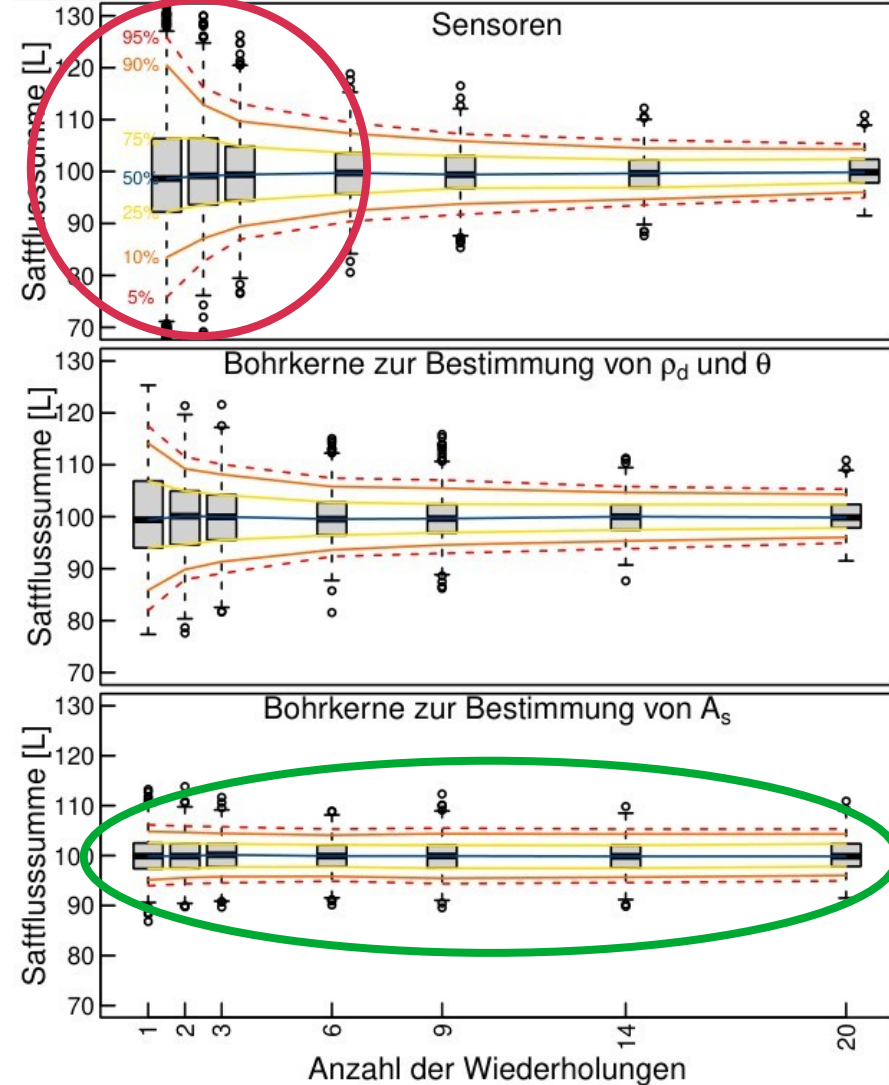
# Saftflüsse

- Aus den beobachteten Werten wurden wiederholt unterschiedlich viele zufällige Werte für  $V_h$ ,  $\rho_d$ ,  $\theta$  und  $A_s$  gezogen um die daraus resultierenden mittleren Saftflussmengen zu bestimmen.
- Die größten Abweichungen vom Mittelwert ergeben sich bei einer geringen Anzahl an Sensormessungen



# Saftflüsse

- Aus den beobachteten Werten wurden wiederholt unterschiedlich viele zufällige Werte für  $V_h$ ,  $\rho_d$ ,  $\theta$  und  $A_s$  gezogen um die daraus resultierenden mittleren Saftflussmengen zu bestimmen.
- Die größten Abweichungen vom Mittelwert ergeben sich bei einer geringen Anzahl an Sensormessungen
- Bestimmung von  $A_s$  scheint am unkritischsten zu sein



# Fazit

- Schon ein Sensor erfasst die zeitliche Saftflussdynamik eines Baumes sehr gut (würde in unserem Falle aber in 50% der Fälle  $Q_T$  um mehr als 10% verfehlen).

# Fazit

- Schon ein Sensor erfasst die zeitliche Saftflussdynamik eines Baumes sehr gut (würde in unserem Falle aber in 50% der Fälle  $Q_T$  um mehr als 10% verfehlen).
- Die Erfassung der Radialen Geschwindigkeitsverteilung ist herausfordernd



# Fazit

- Schon ein Sensor erfasst die zeitliche Saftflussdynamik eines Baumes sehr gut (würde in unserem Falle aber in 50% der Fälle  $Q_T$  um mehr als 10% verfehlen).
- Die Erfassung der Radialen Geschwindigkeitsverteilung ist herausfordernd
- Statt möglichst exakter Vermessung eines Baumes, sollte auch die Heterogenität im Bestand abgedeckt werden

# Fazit

- Schon ein Sensor erfasst die zeitliche Saftflussdynamik eines Baumes sehr gut (würde in unserem Falle aber in 50% der Fälle  $Q_T$  um mehr als 10% verfehlen).
- Die Erfassung der Radialen Geschwindigkeitsverteilung ist herausfordernd
- Statt möglichst exakter Vermessung eines Baumes, sollte auch die Heterogenität im Bestand abgedeckt werden

## Optimal sap flux sensor allocation for stand transpiration estimates: a non-dimensional analysis

[Hikaru Komatsu](#) , [Tomonori Kume](#) & [Yoshinori Shinohara](#)

*Annals of Forest Science* **74**, Article number: 38 (2017) | [Cite this article](#)

1155 Accesses | 5 Citations | 10 Altmetric | [Metrics](#)

### Abstract

#### Key message

Measuring between-tree variations in sap flux density rather than azimuthal variations should be prioritized for reliable stand transpiration estimates based on sap flux methods.



# Radiale Verteilung der Saftflussdichten

