

Optimierung der thermischen Leitfähigkeit von Verfüllmaterialien

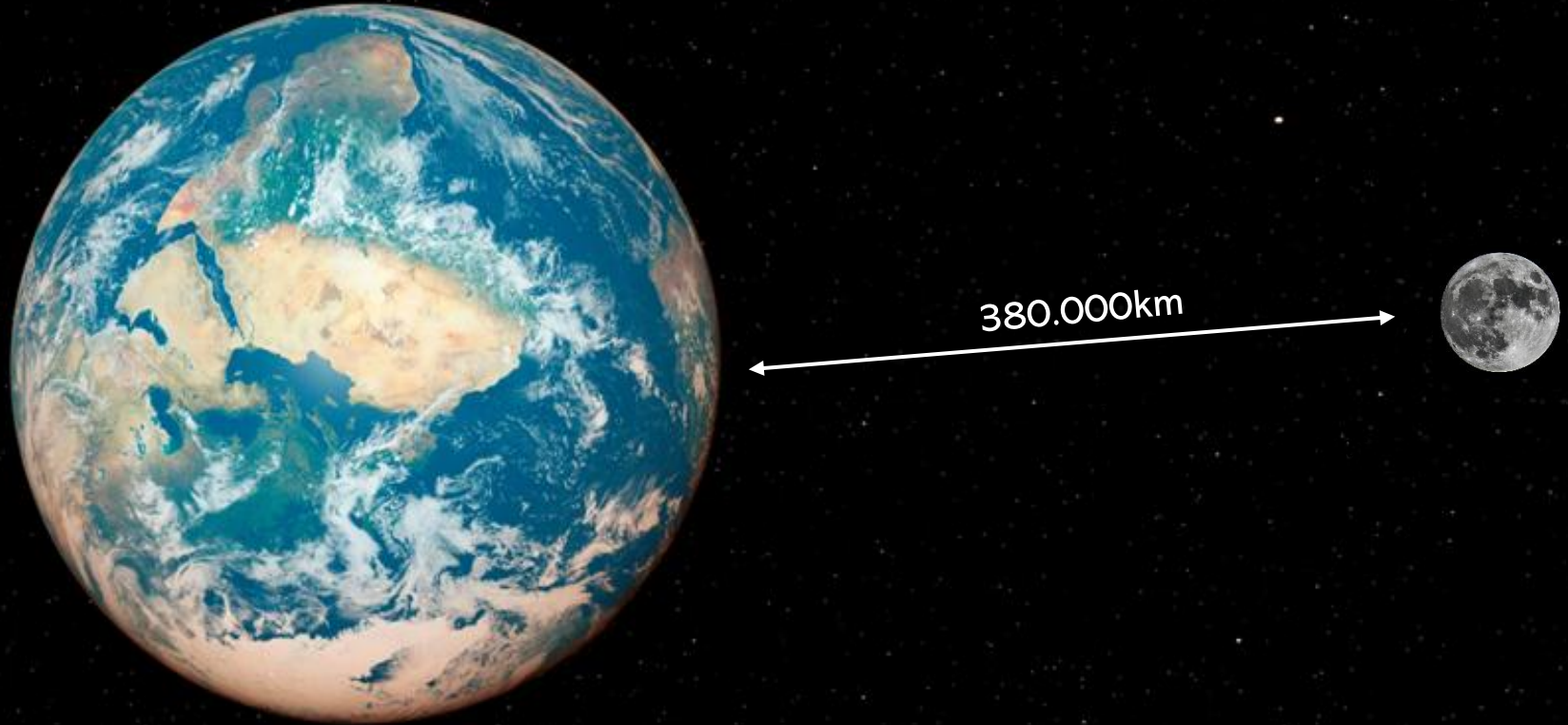
Ermittlung und Beeinflussung der langfristigen thermischen Leistungsfähigkeit
von Erdkabelbettungen

M.Eng. Louis Zrenner, OTH Regensburg
M.Eng. Florian Leusink, OTH Regensburg
Prof. Dr.-Ing. Thomas Neidhart, OTH Regensburg

Hintergrund

- Ausstieg aus Fossilen Energieträgern erfordert Umstrukturierung des Netzes
- Stromnetzausbau durch Südlink und Südostlink mit rund **4000km Erdkabel**
- **Weiterer Ausbau geplant** nach Netzentwicklungsplan 2037/45 (Fassung 10.12.2025)
- **In der Dimension weltweit einzigartig**
→ **Beschreiten von technischem „Neuland“**







380.000km

32mm² Leiterquerschnitt
entspricht etwa einem 50kW-Schnellladekabel!

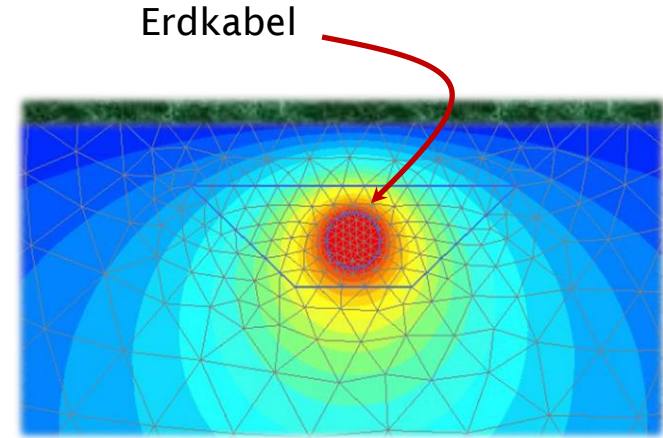


Kupfermenge: $4000\text{km} \times 3000\text{mm}^2 = 12076\text{m}^3 = \mathbf{100.000t}$

Resultierender Querschnitt: $\frac{12076\text{m}^3}{380000\text{km}} = 32\text{mm}^2$

Übertragungskapazität von erdverlegten Stromleitern

- Hängt stark von der sog. thermischen Übertragungskapazität ab
- **Leitung emittiert Wärme infolge von Verlusten, welche abgeführt werden muss**
- Die Erwärmung der Leitung ist zu begrenzen, um **Dauerhaftigkeit des Isolators** zu gewährleisten
- Abtransport der Wärme – und damit auch Übertragungskapazität - abhängig von:



Verlegetiefe des Kabels

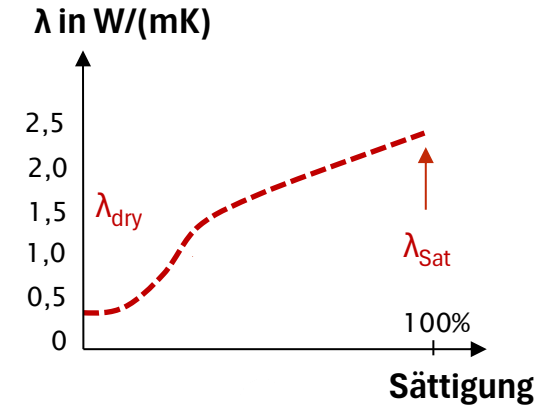
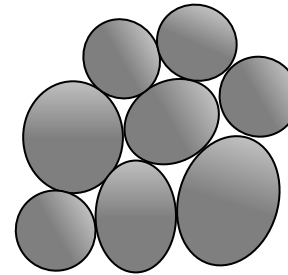
Kabelabstand/Trassenbreite

Wärmeleitfähigkeit Bettung

Einflussfaktoren auf Wärmeleitfähigkeit der Bettung

- Sättigungsgrad S
- Porenanteil n
- Bodenart / Kornverteilung
- Mittlere Wärmeleitfähigkeit λ_s des Korns
(Mineralogische Zusammensetzung)

„Trocken“

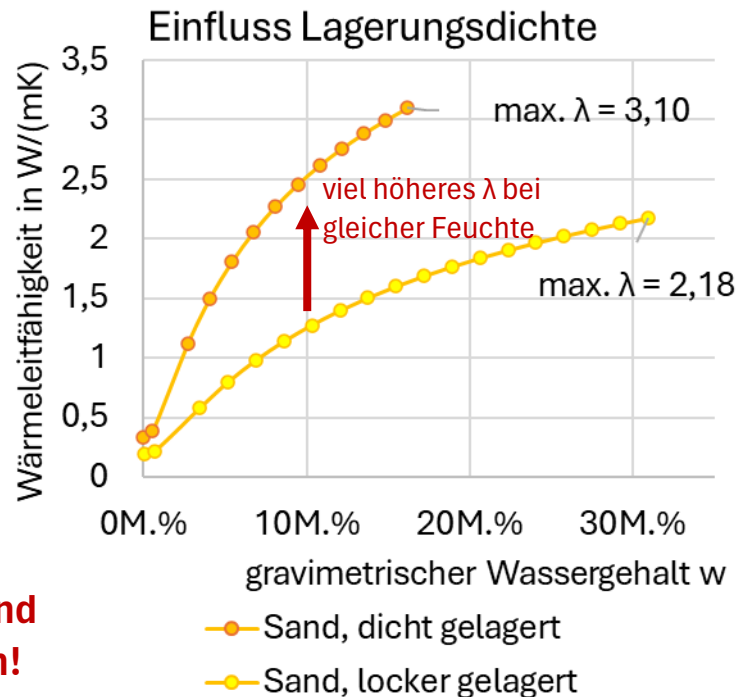


λ_{Sat} bis zu zehnmal höher als λ_{dry} !

Einflussfaktoren auf Wärmeleitfähigkeit der Bettung

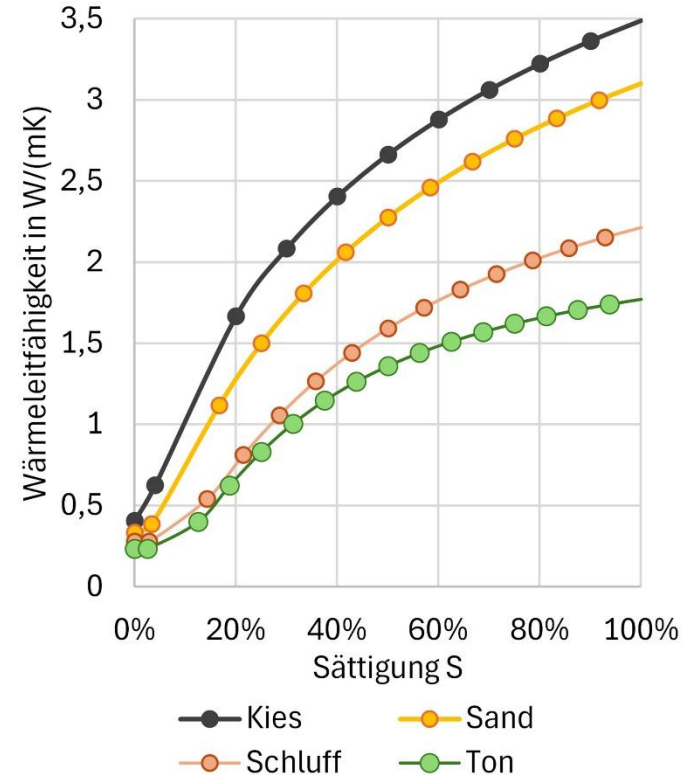
- Sättigungsgrad S
- Porenanteil n
- Bodenart / Kornverteilung
- Mittlere Wärmeleitfähigkeit λ_s des Korns
(Mineralogische Zusammensetzung)

**Großer Hebel durch Sieblinienoptimierung und
Verwendung von größerer Korndurchmessern!**



Einflussfaktoren auf Wärmeleitfähigkeit der Bettung

- Sättigungsgrad S
- Porenanteil n
- **Bodenart / Kornverteilung**
- Mittlere Wärmeleitfähigkeit λ_s des Korns
(Mineralogische Zusammensetzung)



Einflussfaktoren auf Wärmeleitfähigkeit der Bettung

- Sättigungsgrad S
- Porenanteil n
- Bodenart / Kornverteilung
- **Mittlere Wärmeleitfähigkeit des Korns λ_s**
(Mineralogische Zusammensetzung)



Minerale	Wärmeleitfähigkeit
Quarz	~8 W/(mK)
Calcit	~3,5 W/(mK)
Feldspat	~2,3 W/(mK)
Glimmer	~2,5 W/(mK)
Tonminerale	~2 W/(mK)

Prognosemodelle für Wärmeleitfähigkeit in Boden

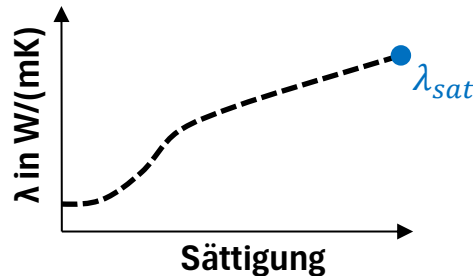
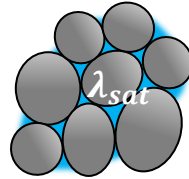
- Wärmeleitfähigkeit des gesättigten Zustands λ_{sat} lässt sich über **geometrisches Mischungsmodell** abschätzen:

 $\lambda_{sat} = \lambda_w^n \cdot \lambda_s^{(1-n)}$

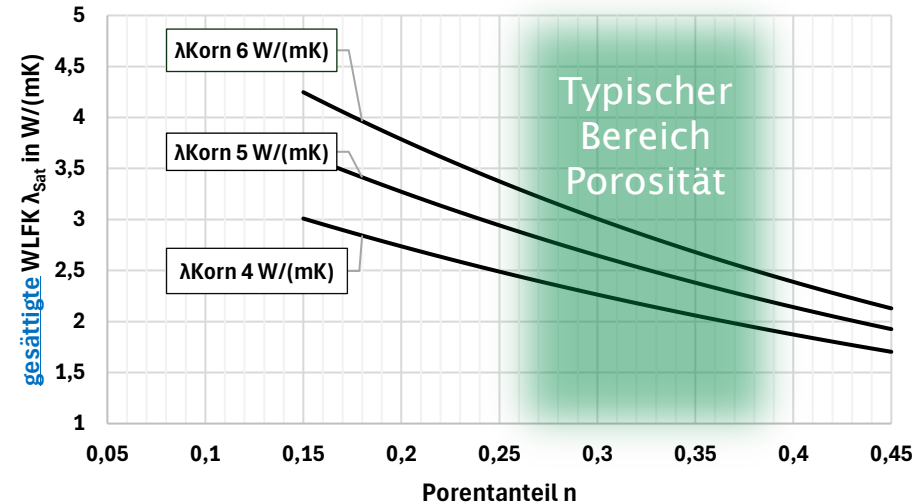
λ_w = Wärmeleitfähigkeit von Wasser

λ_s = mittlere Wärmeleitfähigkeit des Korns

n = Porenanteil



Einfluss von Kornleitfähigkeit und Porenanteil auf λ_{sat}



Prognosemodelle für Wärmeleitfähigkeit bei var. Sättigung

- Physikalisch-basierte Modelle in Praxis
nur bedingt nutzbar, da entweder
ungenau oder umfassende Laborversuche
nötig

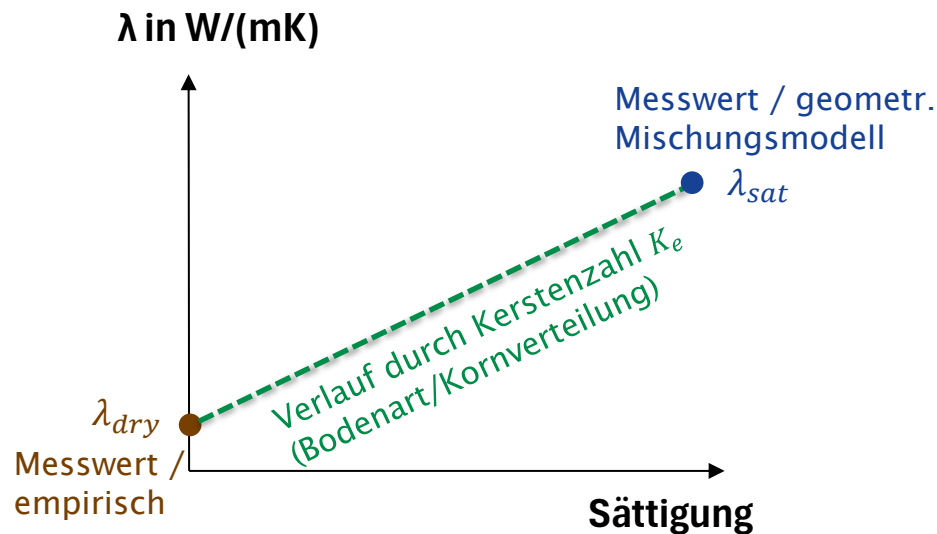


Empirische Modelle, in welche
die Haupt-Einflussfaktoren eingehen

z.B. Johansen-Modell

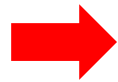
$$\lambda_{eff}(S) = (\lambda_{sat} - \lambda_{dry}) \cdot K_e + \lambda_{dry}$$

mit Anpassung der Kersten-Zahl
z.B. nach Lu (2007)



Prognosemodelle für Wärmeleitfähigkeit bei var. Sättigung

- Physikalisch-basierte Modelle in Praxis
nur bedingt nutzbar, da entweder
ungenau oder umfassende Laborversuche
nötig

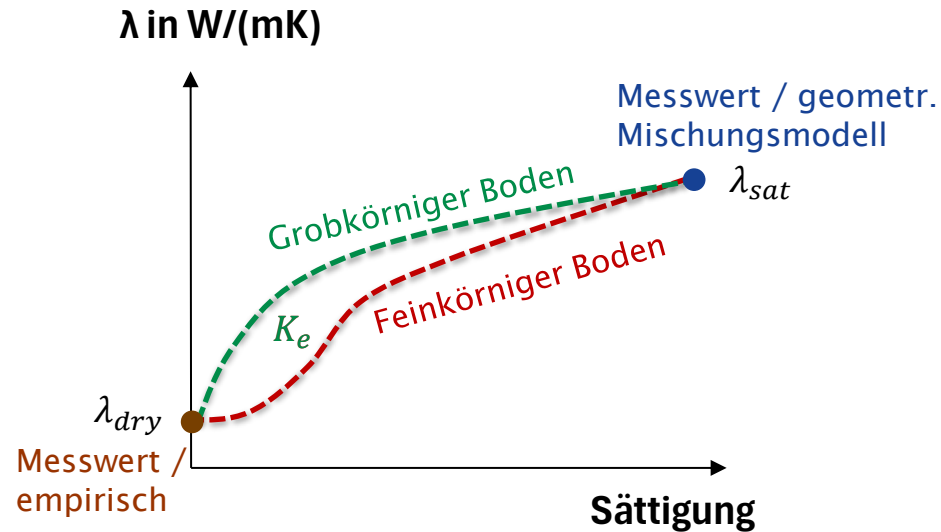


Empirische Modelle, in welche
die Haupt-Einflussfaktoren eingehen

z.B. Johansen-Modell

$$\lambda_{eff}(S) = (\lambda_{sat} - \lambda_{dry}) \cdot K_e + \lambda_{dry}$$

mit Anpassung der Kersten-Zahl
z.B. nach Lu (2007)



Messsysteme zur Ermittlung der Wärmeleitfähigkeit

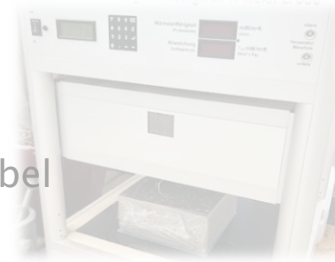
- Prognosemodelle in Genauigkeit begrenzt  Labormessungen weiterhin nötig
- Mehrere Möglichkeiten:



1. Nadelsensor



2. Foliensensor



unpraktikabel

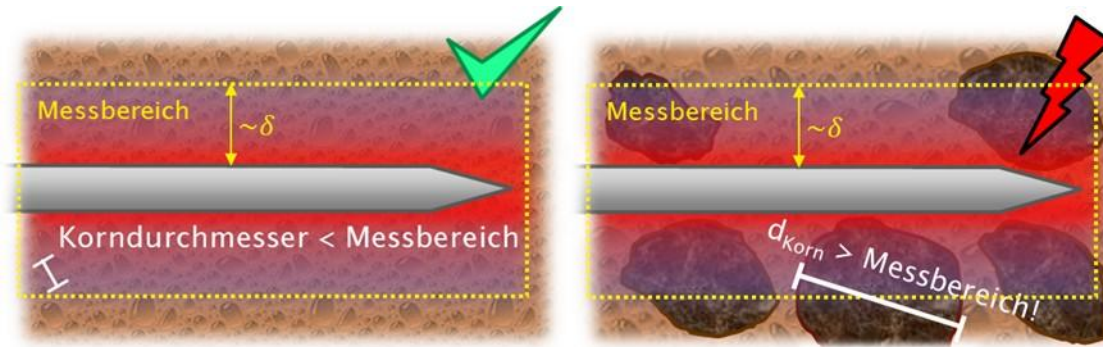
3. Plattengerät

Zu Beachten bei Messungen mit Nadelsonden: Größtkorn

- Nadelsonden als stationäres Messsystem mit kurzer Messdauer, um verfälschende Messeinflüsse von Konvektion infolge von Wasserbewegungen zu minimieren



Bedeutet allerdings auch einen kleinen Messbereich:



$$\delta \approx \sqrt{4\alpha t} \text{ mit } \alpha = \frac{\lambda}{c_v}$$

**Thermische Diffusionslänge
im Bereich von 10 bis 20mm**



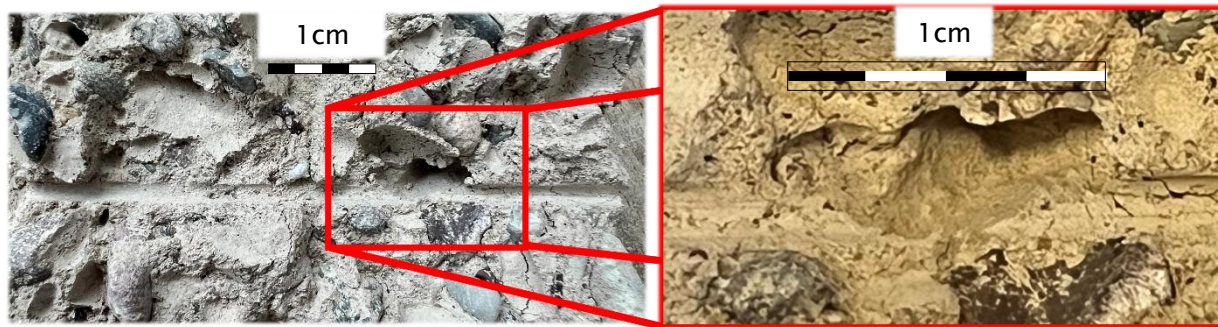
Ideal: Größtkorn $\leq 16\text{mm}$,
bei größeren Körnern wird die
Wärmeleitfähigkeit tendenziell
systematisch unterschätzt

Zu Beachten bei Messungen mit Nadelsonden: Lufteinschlüsse

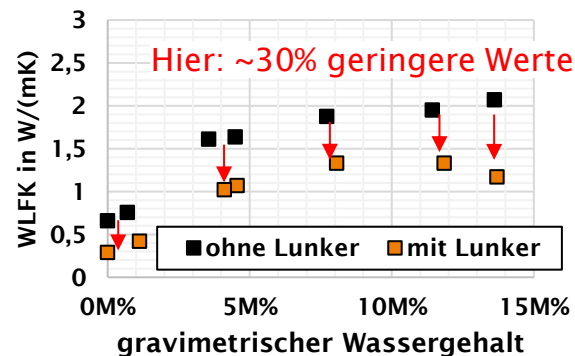
- Nadelsonden als stationäres Messsystem mit kurzer Messdauer



Bedeutet allerdings auch ein kleiner Messbereich



Einfluss v. Lunkern auf Messwerte



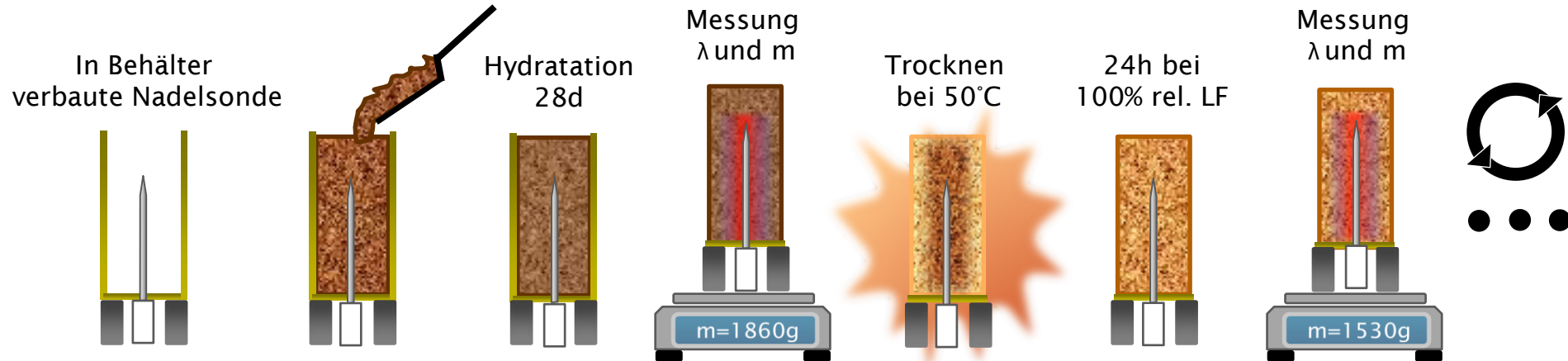
Aufgrund des kleinen Messbereichs wirken sich bereits kleine Lunker stark auf Messwerte aus!



Immer mehrere Probekörper messen, um fehlerhafte Proben identifizieren zu können

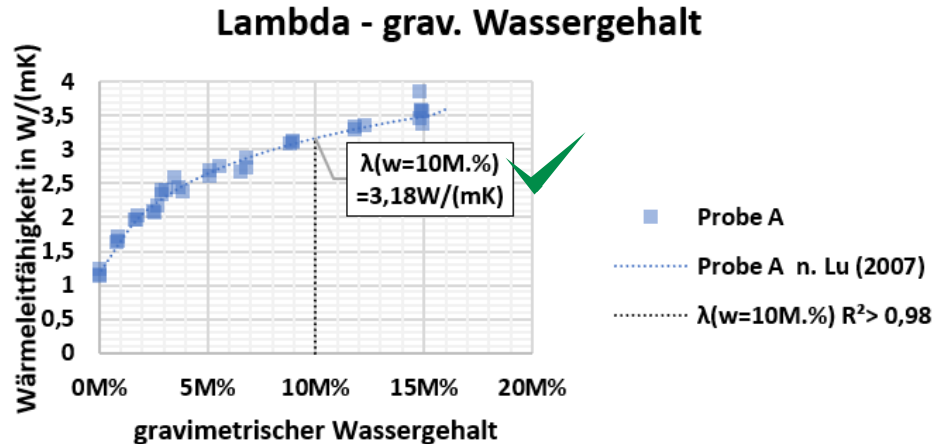
Ansatz zur Ermittlung der Wärmeleitfähigkeit bei var. Sättigung

- Aufgrund der Messunsicherheit der Nadelsonden stets 3 Probekörper parallel
- Nadeln bereits **im fließfähigen Zustand verbauen** und **gegen Bewegung sichern**
- Stufenweises trocknen der Probekörper bei 50°C, anschl. Lagerung bei 100% rel. LF



Ermittlung der Wärmeleitfähigkeit bei var. Wassergehalt

- Anschließend werden die Ergebnisse mit einem empirischen Modell gefittet, welches die Beziehung von Wassergehalt und Wärmeleitfähigkeit abbildet, hier: Lu (2007)



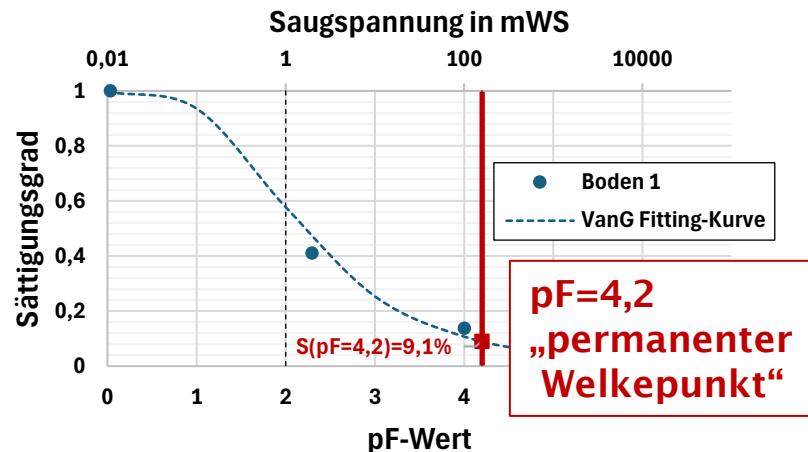
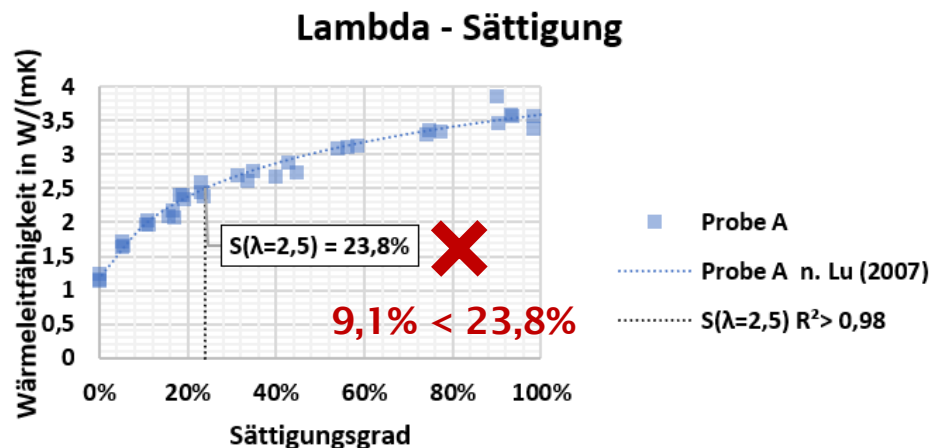
z.B. gemäß techn. RiLi transnetBW:

Bettungsklasse B4

mind. 2,5 W/(mK) bei 10 M.% Feuchte

Beurteilung der Wärmeleitfähigkeit bei var. Sättigung

- Anstelle des Wassergehalts in M.% **sollte Sättigungsgrad herangezogen** werden, da dieser eine bessere Vergleichbarkeit und Einschätzung der Wasserretention erlaubt



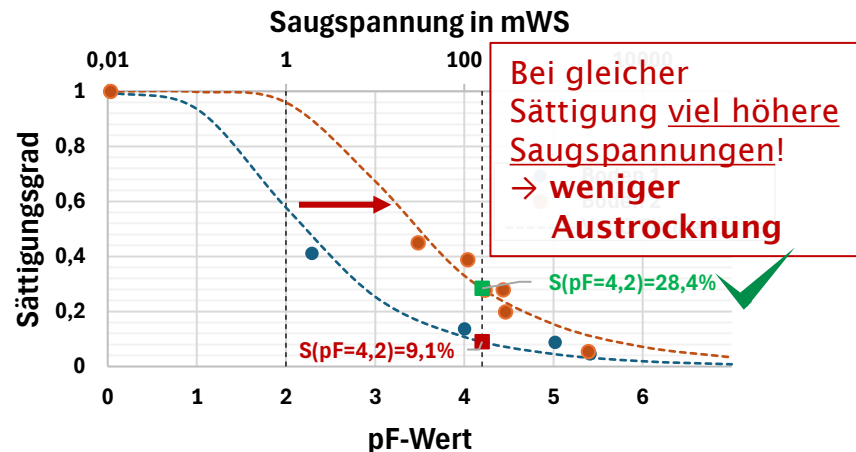
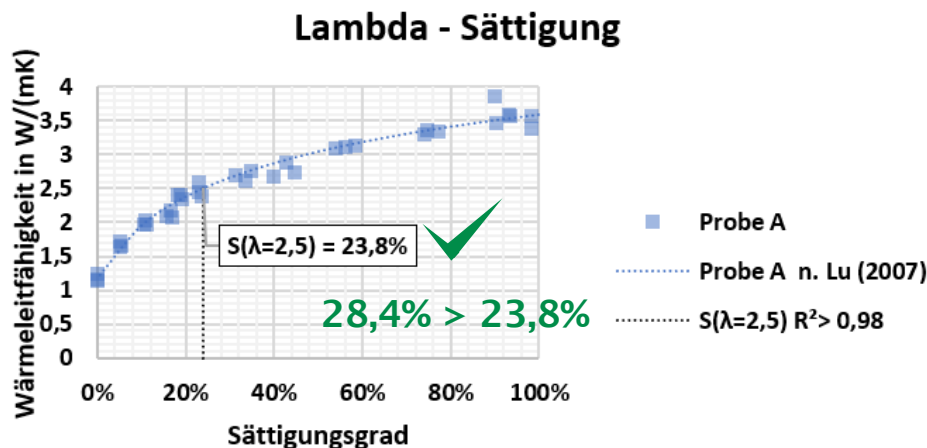
Material kann langfristig auf geringere Sättigung fallen → $\lambda_{\min}$ wird ggf. unterschritten



Je **trockener** der Boden, desto **größer** die Saugspannungen

Beurteilung der Wärmeleitfähigkeit bei var. Sättigung

- Anstelle des Wassergehalts in M.% **sollte Sättigungsgrad herangezogen** werden, da dieser eine bessere Vergleichbarkeit und Einschätzung der Wasserretention erlaubt



Ausgeprägte Wasserretention verhindert Austrocknen durch Bewuchs/Trockenphasen

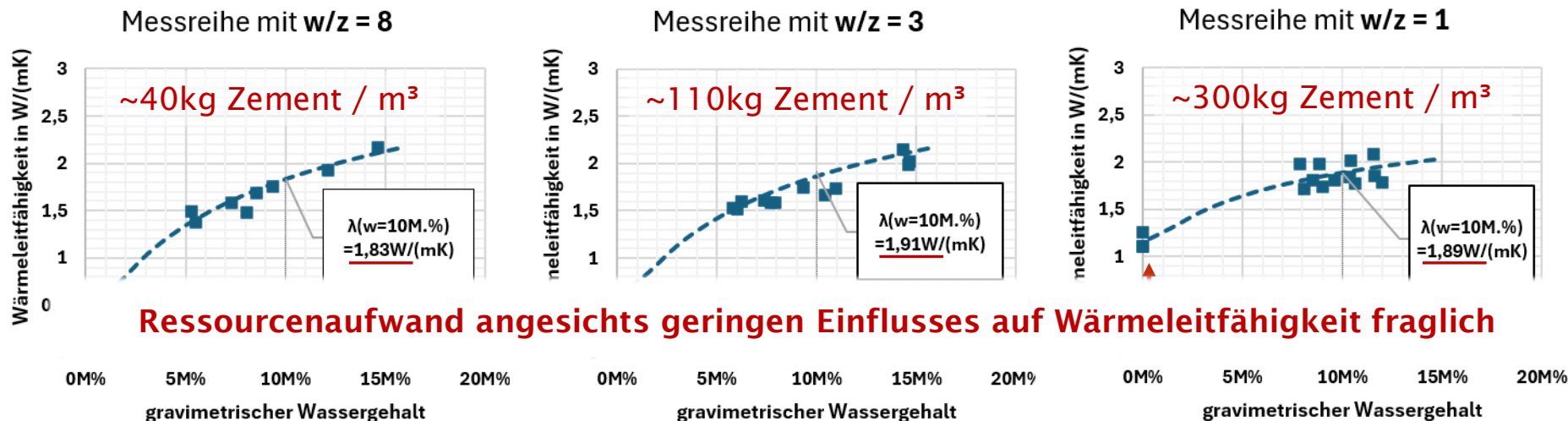


Verlauf der Wasserretentionskurve **stark von Material** abhängig

Erkenntnisse aus laufenden Untersuchungen

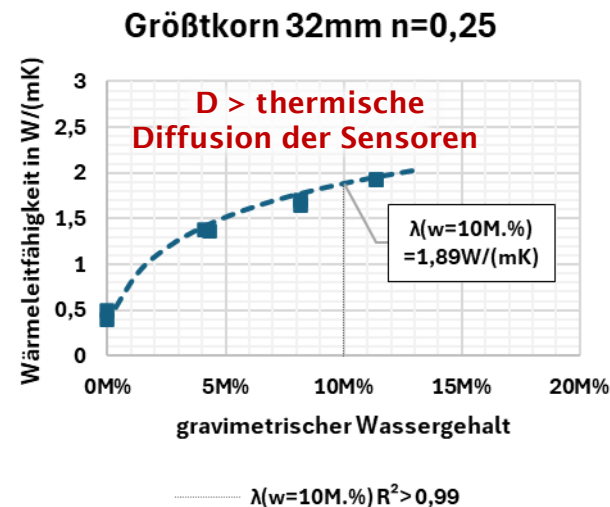
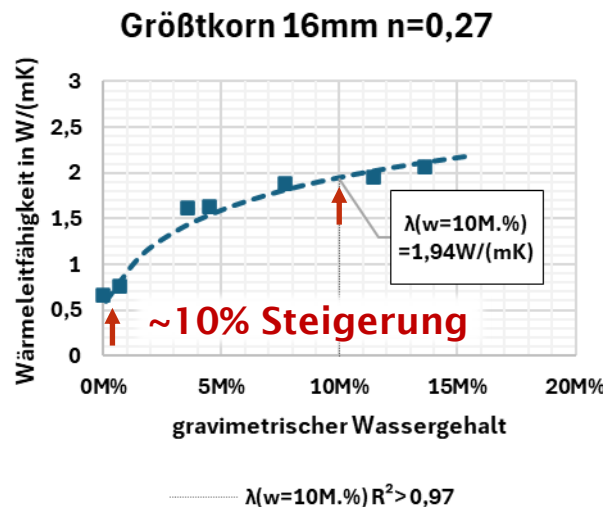
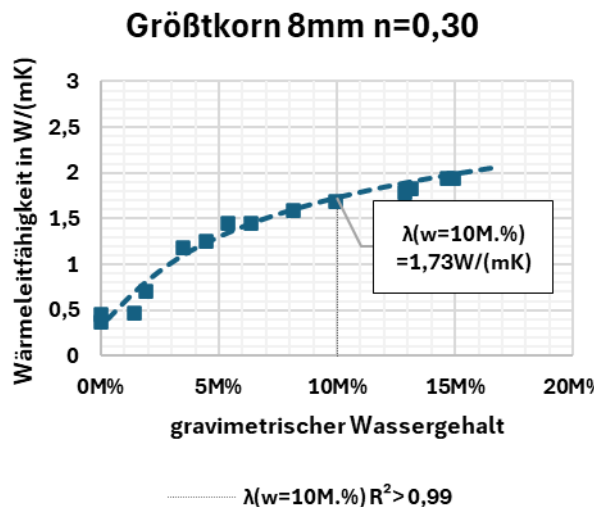
- In Praxis wird bei hohen Anforderungen an therm. Leitfähigkeit auf Beton zurückgegriffen:

Zementgehalt wirkt sich aber **hauptsächlich auf die trockene Wärmeleitfähigkeit λ_{dry}** aus!



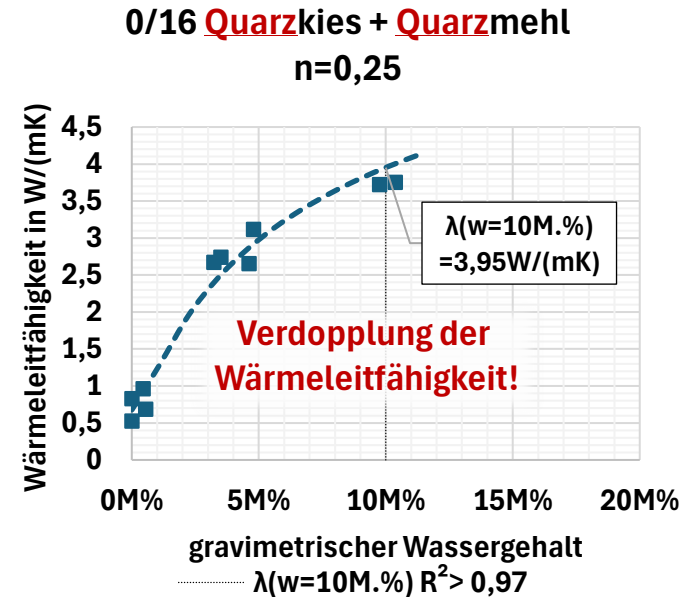
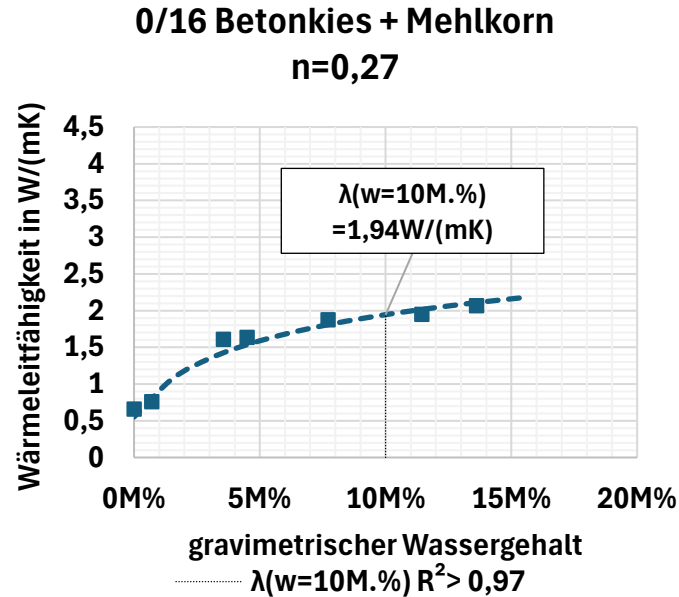
Erkenntnisse aus laufenden Untersuchungen

- Steigerung der Wärmeleitfähigkeit durch Sieblinienoptimierung analog zur Betontechnologie und Verwendung größerer Korndurchmesser **Verarbeitbarkeit und „Messbarkeit“ als Limit**



Erkenntnisse aus laufenden Untersuchungen

- Einfluss der **Kornleitfähigkeit** auf die Wärmeleitfähigkeit dominierender Faktor



Erkenntnisse aus laufenden Untersuchungen

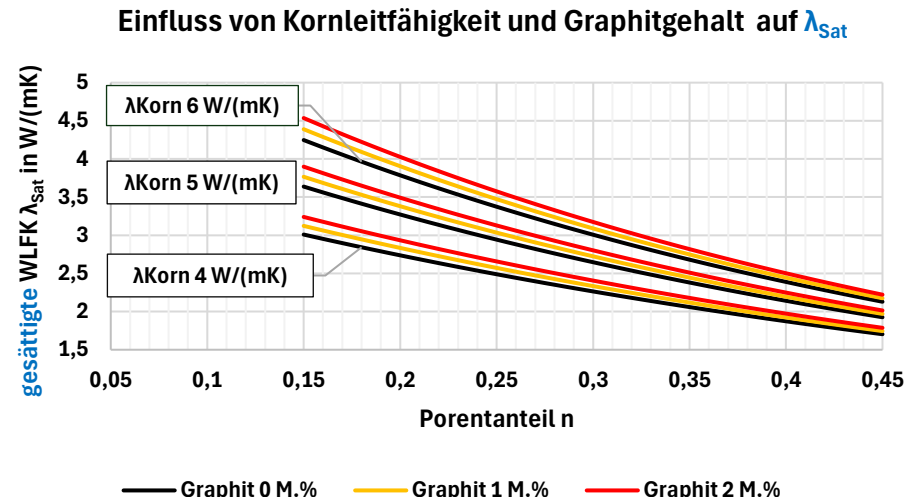
- Zugabe von **wärmeleitfähigen Spezialzuschlägen (z.B. Graphit)** erfolgt aus Kostengründen i.d.R. nur in geringen Mengen

ABER: Geringer Volumenanteil reduziert Einfluss der Spezialzuschläge gemäß geometrischer Mischungsmodelle!



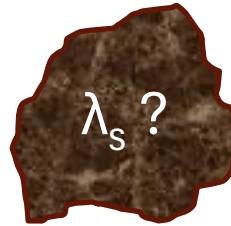
Kornleitfähigkeit von Kies/Sand bleibt dominierende Einflussgröße!

„Kaum Möglich aus ungeeignetem Kies/Sand durch Zugabe von Graphit eine B4 herzustellen“



Wie kann die Kornleitfähigkeit λ_s ermittelt werden?

- Identifizierung der Mineralogie umständlich und ungenau
- Direktmessung an einzelnen Körnern möglich, aber Rückschluss auf mittlere Kornleitfähigkeit schwierig
- **Stattdessen:** Ermittlung der Wärmeleitfähigkeit im gesättigten Zustand bei bekannter Lagerungsdichte

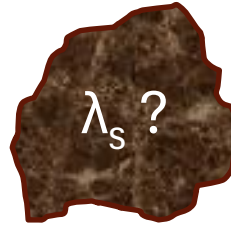


Minerale	Wärmeleitfähigkeit
Quarz	~8 W/(mK)
Calcit	~3,5 W/(mK)
Feldspat	~2,3 W/(mK)
Glimmer	~2,5 W/(mK)
Tonminerale	~2 W/(mK)

Kenntnis von λ_s ermöglicht gesicherte Eignungsbeurteilung zur Verwendung als thermische Bettung (z.B. Aushub)

Ermittlung der Kornleitfähigkeit λ_s über geometrisches Mittel

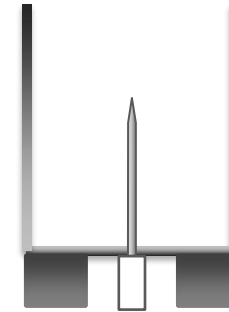
- Für gesättigten Zustand ist die effektive Wärmeleitfähigkeit über geometrisches Mittel ausreichend genau bestimmbar



$$\lambda_{sat} = \lambda_w^n \cdot \lambda_s^{(1-n)}$$

- Aus gemessener Wärmeleitfähigkeit λ_{sat} kann auf Kornleitfähigkeit λ_s rückgerechnet werden:

$$\lambda_s = \left(\frac{\lambda_{sat}}{\lambda_w^n} \right)^{\frac{1}{1-n}}$$

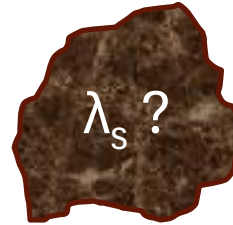


Proctortopf mit Nadelsonde

➔ Für λ_s wird Porosität n und λ_{sat} benötigt!

Ermittlung der Kornleitfähigkeit λ_s über geometrisches Mittel

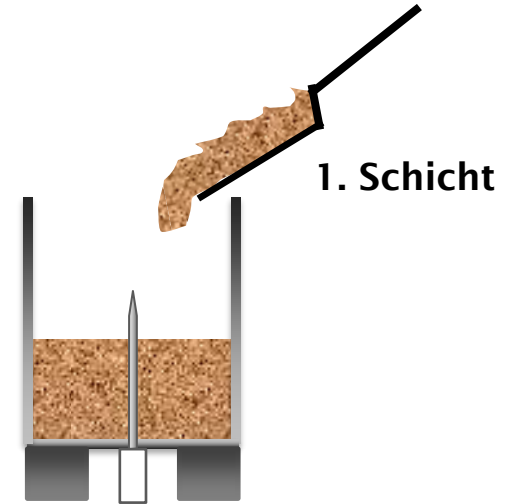
- Für gesättigten Zustand ist die effektive Wärmeleitfähigkeit über geometrisches Mittel ausreichend genau bestimmbar



$$\lambda_{sat} = \lambda_w^n \cdot \lambda_s^{(1-n)}$$

- Aus gemessener Wärmeleitfähigkeit λ_{sat} kann auf Kornleitfähigkeit λ_s rückgerechnet werden:

$$\lambda_s = \left(\frac{\lambda_{sat}}{\lambda_w^n} \right)^{\frac{1}{1-n}}$$

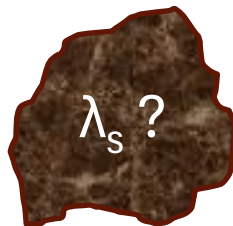


Proctortopf mit Nadelsonde

➔ Für λ_s wird Porosität n und λ_{sat} benötigt!

Ermittlung der Kornleitfähigkeit λ_s über geometrisches Mittel

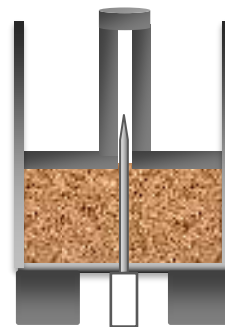
- Für gesättigten Zustand ist die effektive Wärmeleitfähigkeit über geometrisches Mittel ausreichend genau bestimmbar



$$\lambda_{sat} = \lambda_w^n \cdot \lambda_s^{(1-n)}$$

- Aus gemessener Wärmeleitfähigkeit λ_{sat} kann auf Kornleitfähigkeit λ_s rückgerechnet werden:

$$\lambda_s = \left(\frac{\lambda_{sat}}{\lambda_w^n} \right)^{\frac{1}{1-n}}$$



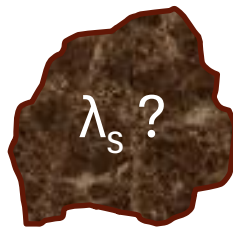
Stempelaufsatz mit hohlem Schaft

Proctortopf mit Nadelsonde

➔ Für λ_s wird Porosität n und λ_{sat} benötigt!

Ermittlung der Kornleitfähigkeit λ_s über geometrisches Mittel

- Für gesättigten Zustand ist die effektive Wärmeleitfähigkeit über geometrisches Mittel ausreichend genau bestimmbar

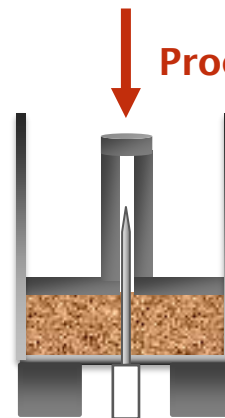


$$\lambda_{sat} = \lambda_w^n \cdot \lambda_s^{(1-n)}$$

- Aus gemessener Wärmeleitfähigkeit λ_{sat} kann auf Kornleitfähigkeit λ_s rückgerechnet werden:

$$\lambda_s = \left(\frac{\lambda_{sat}}{\lambda_w^n} \right)^{\frac{1}{1-n}}$$

➔ Für λ_s wird Porosität n und λ_{sat} benötigt!



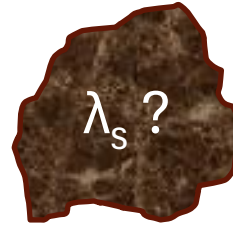
Proctorhammer

Stempelaufsatz mit hohlem Schaft

Proctortopf mit Nadelsonde

Ermittlung der Kornleitfähigkeit λ_s über geometrisches Mittel

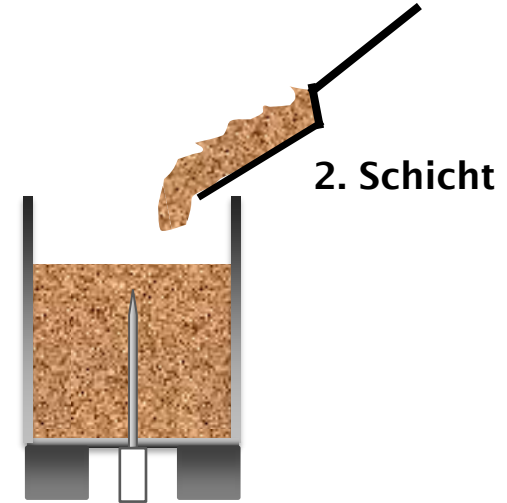
- Für gesättigten Zustand ist die effektive Wärmeleitfähigkeit über geometrisches Mittel ausreichend genau bestimmbar



$$\lambda_{sat} = \lambda_w^n \cdot \lambda_s^{(1-n)}$$

- Aus gemessener Wärmeleitfähigkeit λ_{sat} kann auf Kornleitfähigkeit λ_s rückgerechnet werden:

$$\lambda_s = \left(\frac{\lambda_{sat}}{\lambda_w^n} \right)^{\frac{1}{1-n}}$$

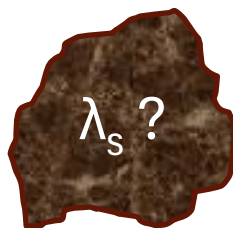


Proctortopf mit Nadelsonde

➔ Für λ_s wird Porosität n und λ_{sat} benötigt!

Ermittlung der Kornleitfähigkeit λ_s über geometrisches Mittel

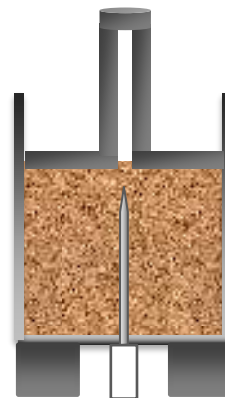
- Für gesättigten Zustand ist die effektive Wärmeleitfähigkeit über geometrisches Mittel ausreichend genau bestimmbar



$$\lambda_{sat} = \lambda_w^n \cdot \lambda_s^{(1-n)}$$

- Aus gemessener Wärmeleitfähigkeit λ_{sat} kann auf Kornleitfähigkeit λ_s rückgerechnet werden:

$$\lambda_s = \left(\frac{\lambda_{sat}}{\lambda_w^n} \right)^{\frac{1}{1-n}}$$



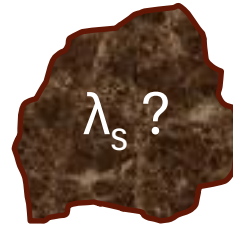
Stempelaufsatz mit hohlem Schaft

Proctortopf mit Nadelsonde

➔ Für λ_s wird Porosität n und λ_{sat} benötigt!

Ermittlung der Kornleitfähigkeit λ_s über geometrisches Mittel

- Für gesättigten Zustand ist die effektive Wärmeleitfähigkeit über geometrisches Mittel ausreichend genau bestimmbar

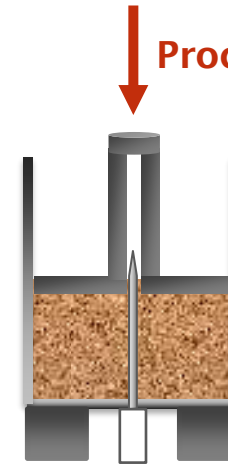


$$\lambda_{sat} = \lambda_w^n \cdot \lambda_s^{(1-n)}$$

- Aus gemessener Wärmeleitfähigkeit λ_{sat} kann auf Kornleitfähigkeit λ_s rückgerechnet werden:

$$\lambda_s = \left(\frac{\lambda_{sat}}{\lambda_w^n} \right)^{\frac{1}{1-n}}$$

➔ Für λ_s wird Porosität n und λ_{sat} benötigt!



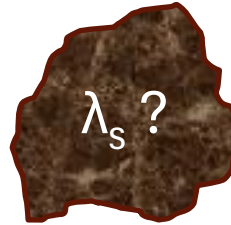
Proctorhammer

Stempelaufsatz mit hohlem Schaft

Proctortopf mit Nadelsonde

Ermittlung der Kornleitfähigkeit λ_s über geometrisches Mittel

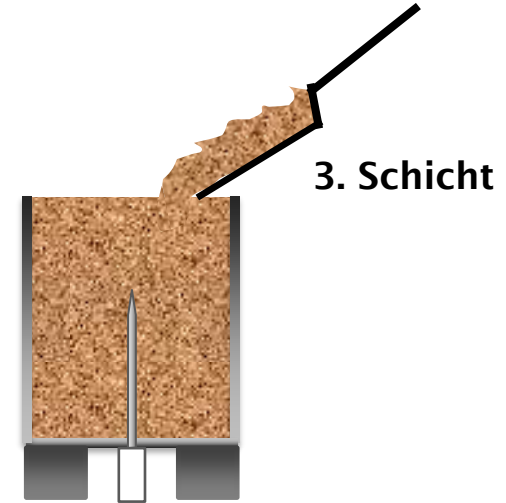
- Für gesättigten Zustand ist die effektive Wärmeleitfähigkeit über geometrisches Mittel ausreichend genau bestimmbar



$$\lambda_{sat} = \lambda_w^n \cdot \lambda_s^{(1-n)}$$

- Aus gemessener Wärmeleitfähigkeit λ_{sat} kann auf Kornleitfähigkeit λ_s rückgerechnet werden:

$$\lambda_s = \left(\frac{\lambda_{sat}}{\lambda_w^n} \right)^{\frac{1}{1-n}}$$

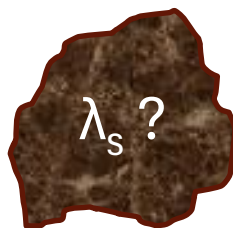


Proctortopf mit Nadelsonde

➔ Für λ_s wird Porosität n und λ_{sat} benötigt!

Ermittlung der Kornleitfähigkeit λ_s über geometrisches Mittel

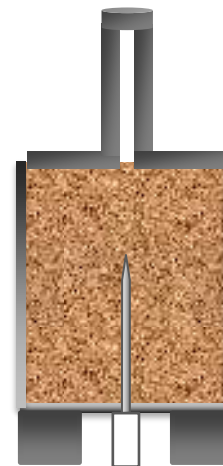
- Für gesättigten Zustand ist die effektive Wärmeleitfähigkeit über geometrisches Mittel ausreichend genau bestimmbar



$$\lambda_{sat} = \lambda_w^n \cdot \lambda_s^{(1-n)}$$

- Aus gemessener Wärmeleitfähigkeit λ_{sat} kann auf Kornleitfähigkeit λ_s rückgerechnet werden:

$$\lambda_s = \left(\frac{\lambda_{sat}}{\lambda_w^n} \right)^{\frac{1}{1-n}}$$



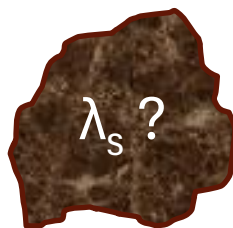
Stempelaufsatz mit hohlem Schaft

Proctortopf mit Nadelsonde

➔ Für λ_s wird Porosität n und λ_{sat} benötigt!

Ermittlung der Kornleitfähigkeit λ_s über geometrisches Mittel

- Für gesättigten Zustand ist die effektive Wärmeleitfähigkeit über geometrisches Mittel ausreichend genau bestimmbar

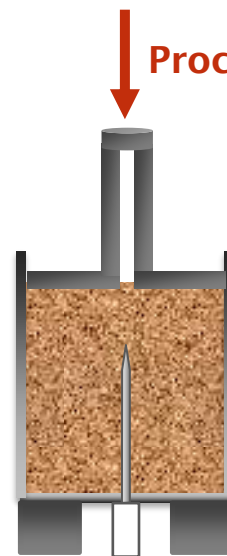


$$\lambda_{sat} = \lambda_w^n \cdot \lambda_s^{(1-n)}$$

- Aus gemessener Wärmeleitfähigkeit λ_{sat} kann auf Kornleitfähigkeit λ_s rückgerechnet werden:

$$\lambda_s = \left(\frac{\lambda_{sat}}{\lambda_w^n} \right)^{\frac{1}{1-n}}$$

➔ Für λ_s wird Porosität n und λ_{sat} benötigt!



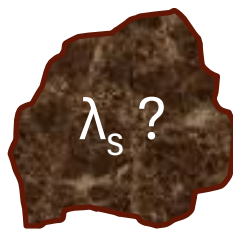
Proctorhammer

Stempelaufsatz mit
hohlem Schaft

Proctortopf mit Nadelsonde

Ermittlung der Kornleitfähigkeit λ_s über geometrisches Mittel

- Für gesättigten Zustand ist die effektive Wärmeleitfähigkeit über geometrisches Mittel ausreichend genau bestimmbar

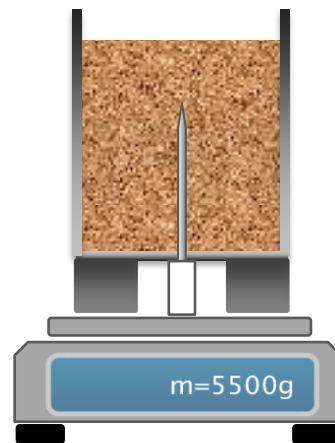


Ermittlung Porosität n ✓

$$\lambda_{sat} = \lambda_w^n \cdot \lambda_s^{(1-n)}$$

- Aus gemessener Wärmeleitfähigkeit λ_{sat} kann auf Kornleitfähigkeit λ_s rückgerechnet werden:

$$\lambda_s = \left(\frac{\lambda_{sat}}{\lambda_w^n} \right)^{\frac{1}{1-n}}$$

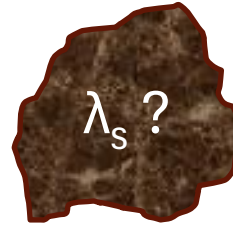


Waage

➔ Für λ_s wird Porosität n und λ_{sat} benötigt!

Ermittlung der Kornleitfähigkeit λ_s über geometrisches Mittel

- Für gesättigten Zustand ist die effektive Wärmeleitfähigkeit über geometrisches Mittel ausreichend genau bestimmbar



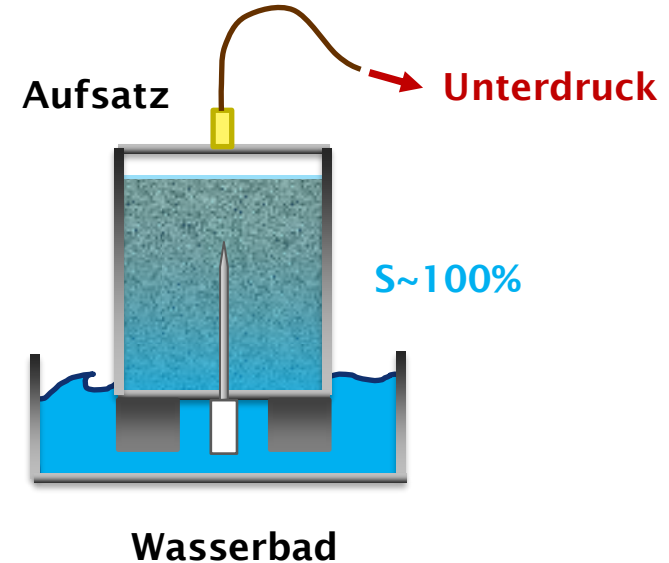
$$\lambda_{sat} = \lambda_w^n \cdot \lambda_s^{(1-n)}$$

- Aus gemessener Wärmeleitfähigkeit λ_{sat} kann auf Kornleitfähigkeit λ_s rückgerechnet werden:

$$\lambda_s = \left(\frac{\lambda_{sat}}{\lambda_w^n} \right)^{\frac{1}{1-n}}$$

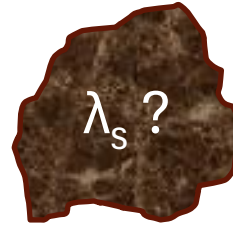
➔ Für λ_s wird Porosität n und λ_{sat} benötigt!

Ermittlung Porosität n ✓



Ermittlung der Kornleitfähigkeit λ_s über geometrisches Mittel

- Für gesättigten Zustand ist die effektive Wärmeleitfähigkeit über geometrisches Mittel ausreichend genau bestimmbar



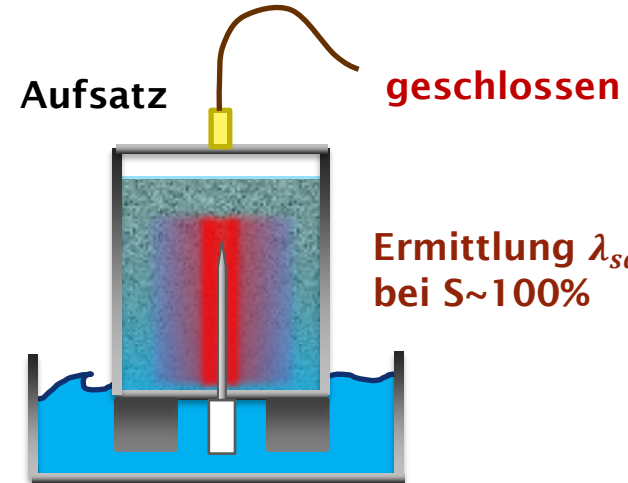
$$\lambda_{sat} = \lambda_w^n \cdot \lambda_s^{(1-n)}$$

- Aus gemessener Wärmeleitfähigkeit λ_{sat} kann auf Kornleitfähigkeit λ_s rückgerechnet werden:

$$\lambda_s = \left(\frac{\lambda_{sat}}{\lambda_w^n} \right)^{\frac{1}{1-n}}$$

➔ Für λ_s wird Porosität n und λ_{sat} benötigt!

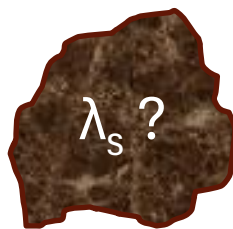
Ermittlung Porosität n ✓



Ermittlung λ_{sat} bei $S \sim 100\%$ ✓

Ermittlung der Kornleitfähigkeit λ_s über geometrisches Mittel

- Für gesättigten Zustand ist die effektive Wärmeleitfähigkeit über geometrisches Mittel ausreichend genau bestimmbar



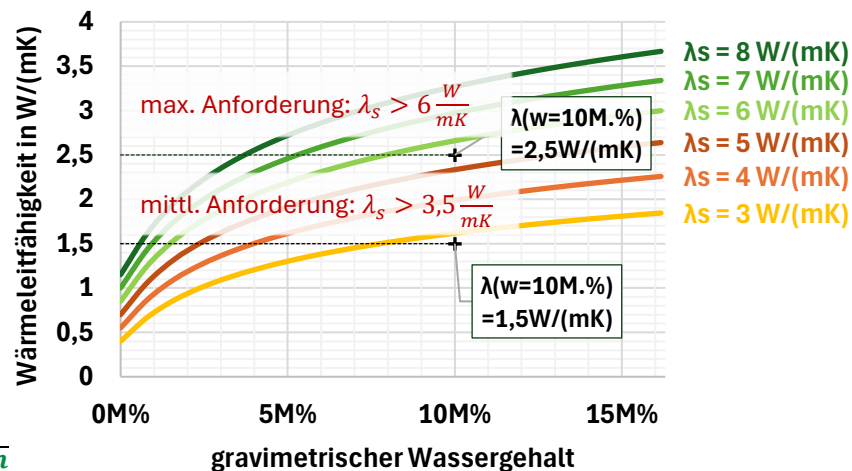
$$\lambda_{sat} = \lambda_w^n \cdot \lambda_s^{(1-n)}$$

- Aus gemessener Wärmeleitfähigkeit λ_{sat} kann auf Kornleitfähigkeit λ_s rückgerechnet werden:

$$\lambda_s = \left(\frac{\lambda_{sat}}{\lambda_w^n} \right)^{\frac{1}{1-n}}$$

rechn. Wärmeleitfähigkeit - Wassergehalt

Porenanteil $n = 0,3$



➔ Mit dem Ergebnis λ_s lässt sich später erreichbare Wärmeleitfähigkeit prognostizieren!

Fazit / Anregungen

1. Technische Richtlinien sollten sich zukünftig **bei Definition der Mindestwerte für die Wärmeleitfähigkeit auf die Sättigung beziehen** (bessere Vergleichbarkeit als grav. Wassergehalt)
2. **Wasserretentionskurven sollten zur Beurteilung der Wärmeleitfähigkeit herangezogen werden**, da diese Einschätzung der langfristigen thermische Leistungsfähigkeit erlauben
3. **Reduktion der Porosität** über Sieblinienoptimierung (z.B. größere Korndurchmesser) großer Hebel
4. **Erhöhte Zementgehalte bringen wenig Mehrwert** (im Verhältnis zum Ressourcenaufwand)
5. **Einfluss von z.B. Graphit aufgrund des geringen Volumenanteils stark begrenzt**
→ in der Praxis oft +0,15 W/(mK) je Massenprozent bezogen auf Trockenmasse (~20kg/m³)
6. Die mittl. Wärmeleitfähigkeit des Korns λ_s stellt den maßgeblichen Faktor für die resultierende Wärmeleitfähigkeit dar und kann verhältnismäßig leicht ermittelt werden
→ **Erleichtert Nutzung von Aushub oder geographisch günstiger Kiesgruben**



Vielen Dank für ihre Aufmerksamkeit!

