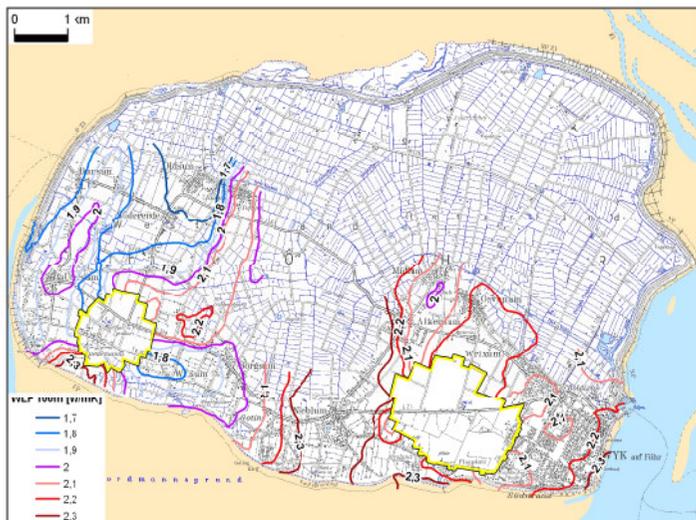


Erstellung von Planungskarten für die oberflächennahe Geothermie auf Basis von elektromagnetischen Hubschraubermessungen



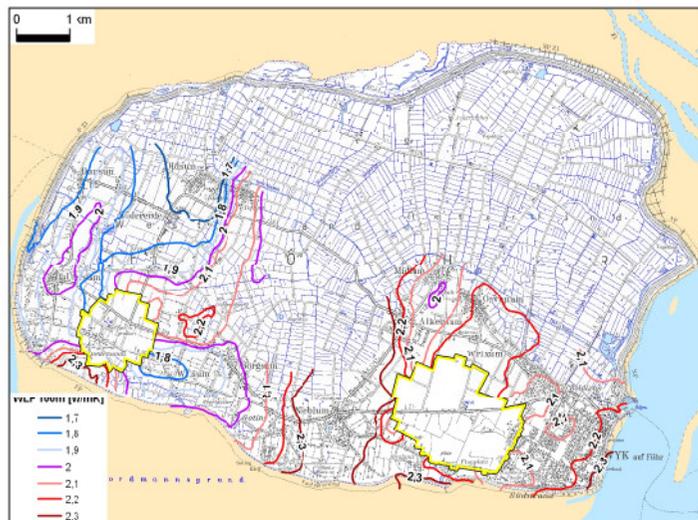
Hotspot Hannover 2013

Reinhard Kirsch
Geologischer Dienst Schleswig-Holstein

Helga Wiederhold
Leibniz-Institut für Angewandte Geophysik

Bernhard Siemon
Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe

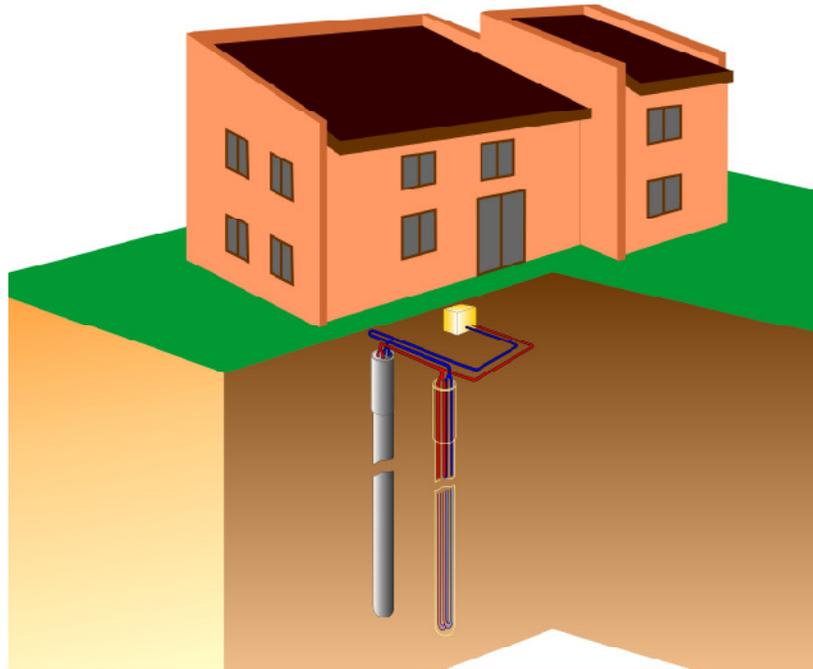




- Geothermische Planungskarten
- Aeroelektromagnetik
- Elektrischer Widerstand und Wärmeleitfähigkeit
- Umsetzung von Widerstandskarten in geothermische Planungskarten
- Was bleibt zu tun? Probleme und Lösungsansätze

Geothermische Planungskarten

Dimensionierung von Erdwärmesonden



welche Sondenlänge ist erforderlich, um eine möglichst hohe Soletemperatur zu realisieren?

- günstiger COP für die Wärmepumpe
- Frost/Tauwechsel Beständigkeit des Verpressmaterials

hierfür erforderliche Untergrundparameter:

spezifische Entzugsleistung nach
VDI 4640

oder (besser):

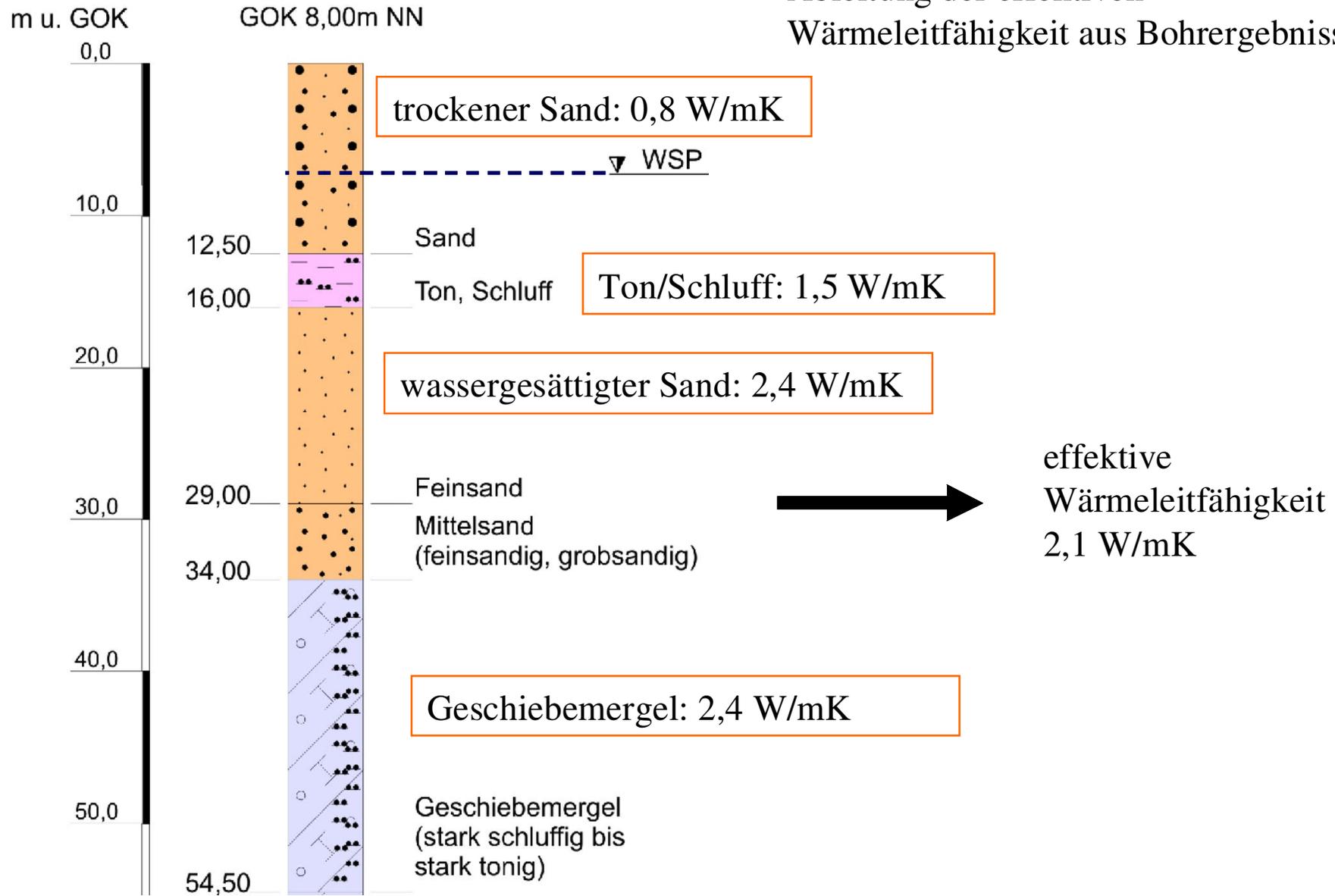
effektive Wärmeleitfähigkeit
als Basis zu einer
Modellierung (z.B. EED)

Datenquelle:

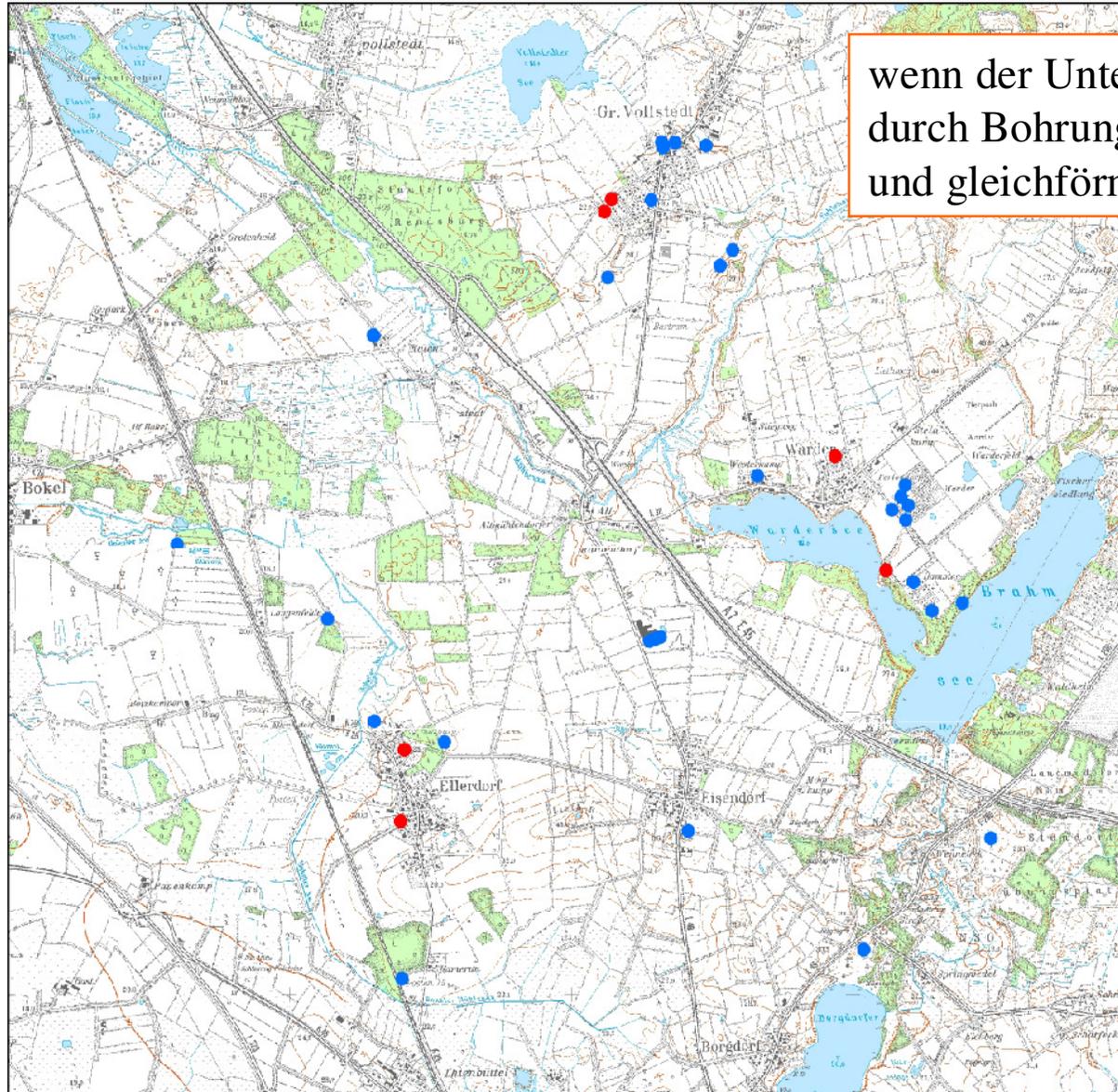
Einzelaskunft durch
Geologische Dienste oder
geothermische Planungskarten



Ableitung der effektiven
Wärmeleitfähigkeit aus Bohrergebnissen



Geothermische Planungskarten

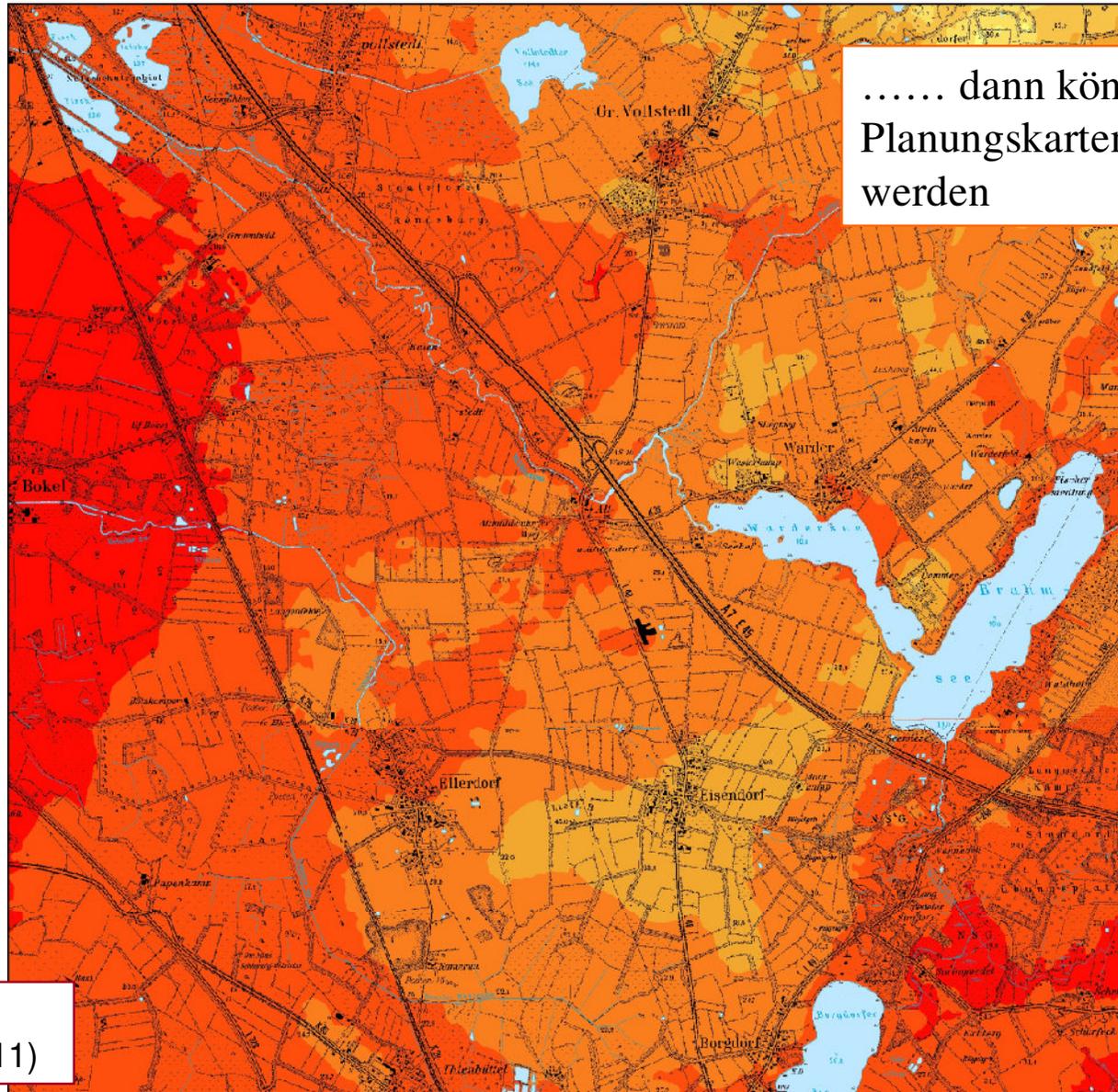


wenn der Untergrund einer Region durch Bohrungen gut erschlossen und gleichförmig aufgebaut ist

- Bohrungen
- Wasser
- Erdwärme

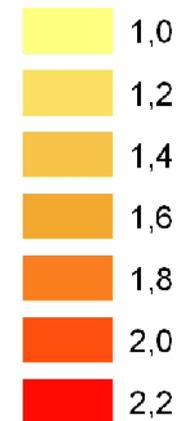


Geothermische Planungskarten



..... dann können Geothermische Planungskarten erstellt (gewagt) werden

**effektive
Wärmeleitfähigkeit
für Bohrtiefe 100m**



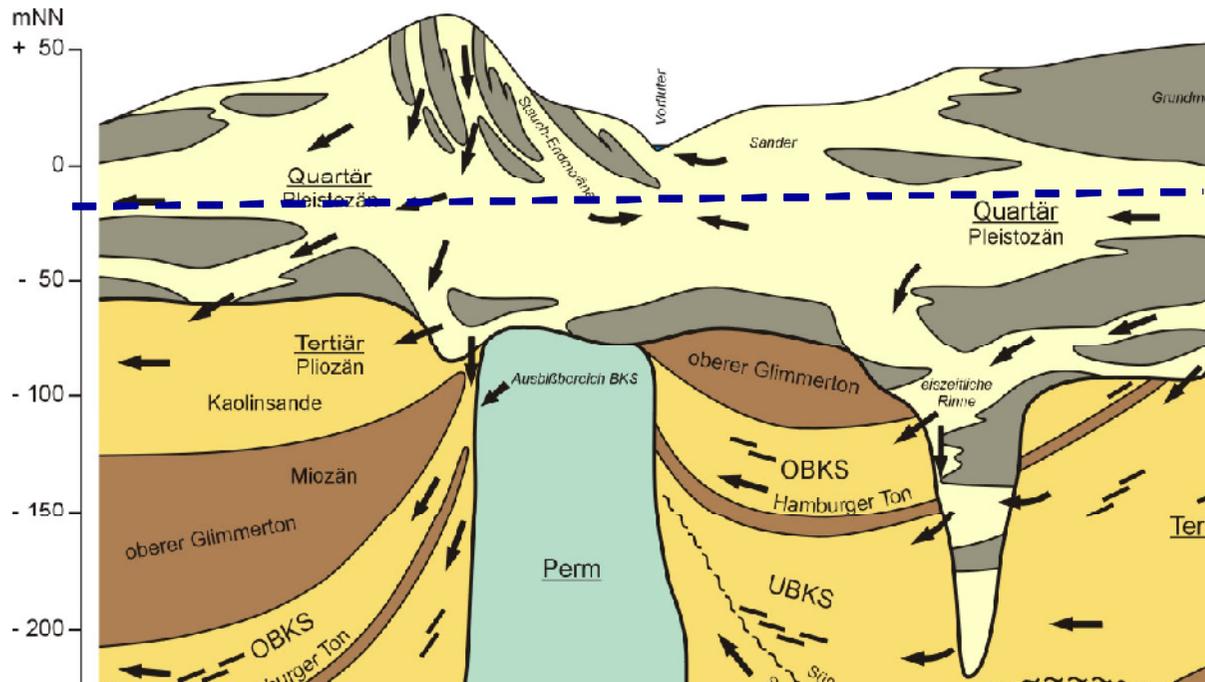
W/mK

Anja Wolf
LLUR (2011)

Geothermische Planungskarten

aber leider sieht der Untergrund oft so aus.....

← wie soll man hier interpolieren??? →



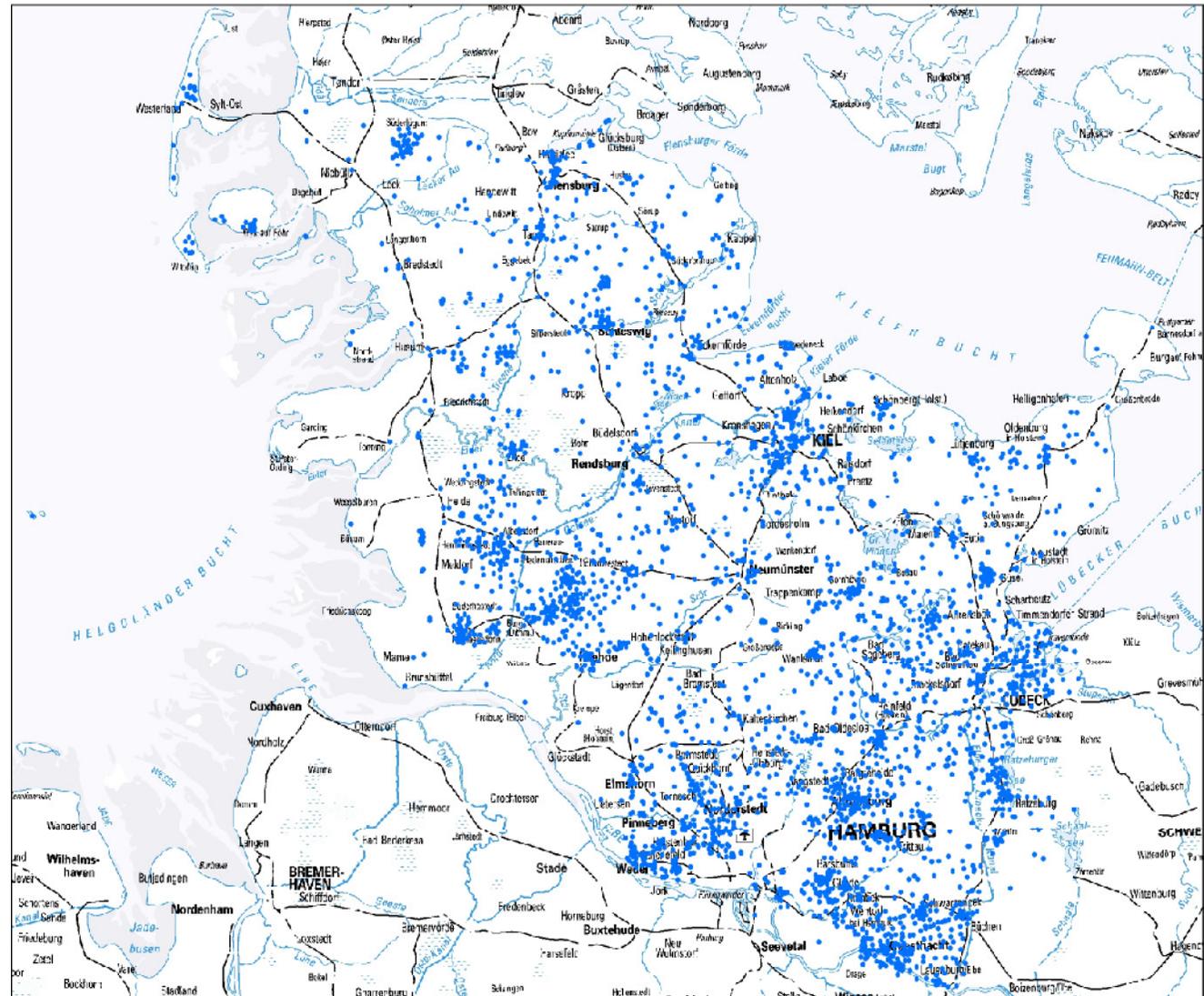
quartäre
Grundwasserleiter und
Trennschichten (Sand,
Geschiebemergel, Ton)

tertiäre
Grundwasserleiter und
Trennschichten
(Sand, Ton)



Geothermische Planungskarten

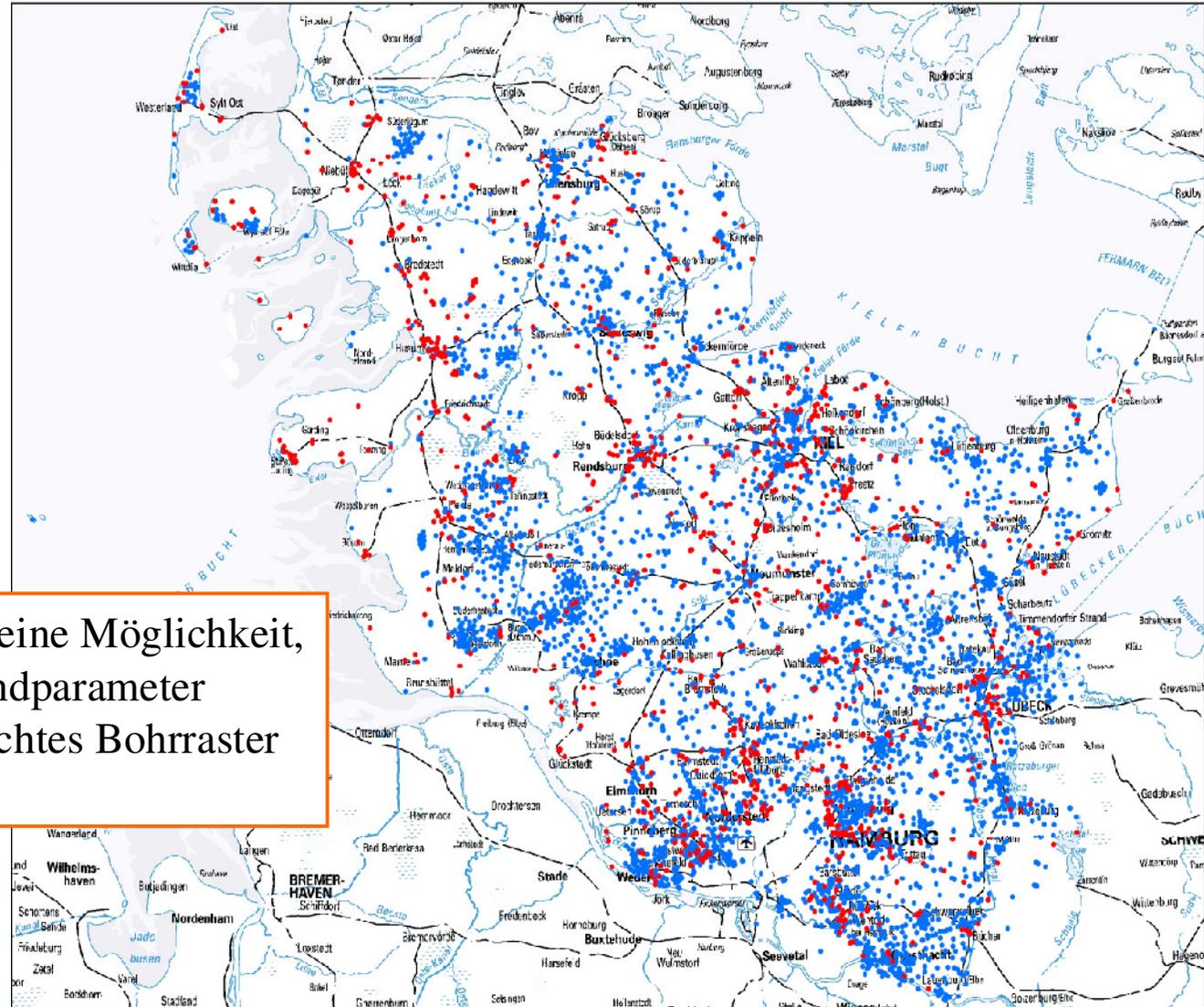
und das Bohrraster
ist dünn
(und die wenigen
Bohrungen sind auch
noch in
Wasserschutzgebieten)



Grundwasserbohrungen
tiefer als 100 m

Geothermische Planungskarten

nimmt man Geothermiebohrungen dazu, sieht es etwas besser aus



Trotzdem: wir brauchen eine Möglichkeit, geothermische Untergrundparameter flächenhaft auch ohne dichtes Bohrraster zu gewinnen.

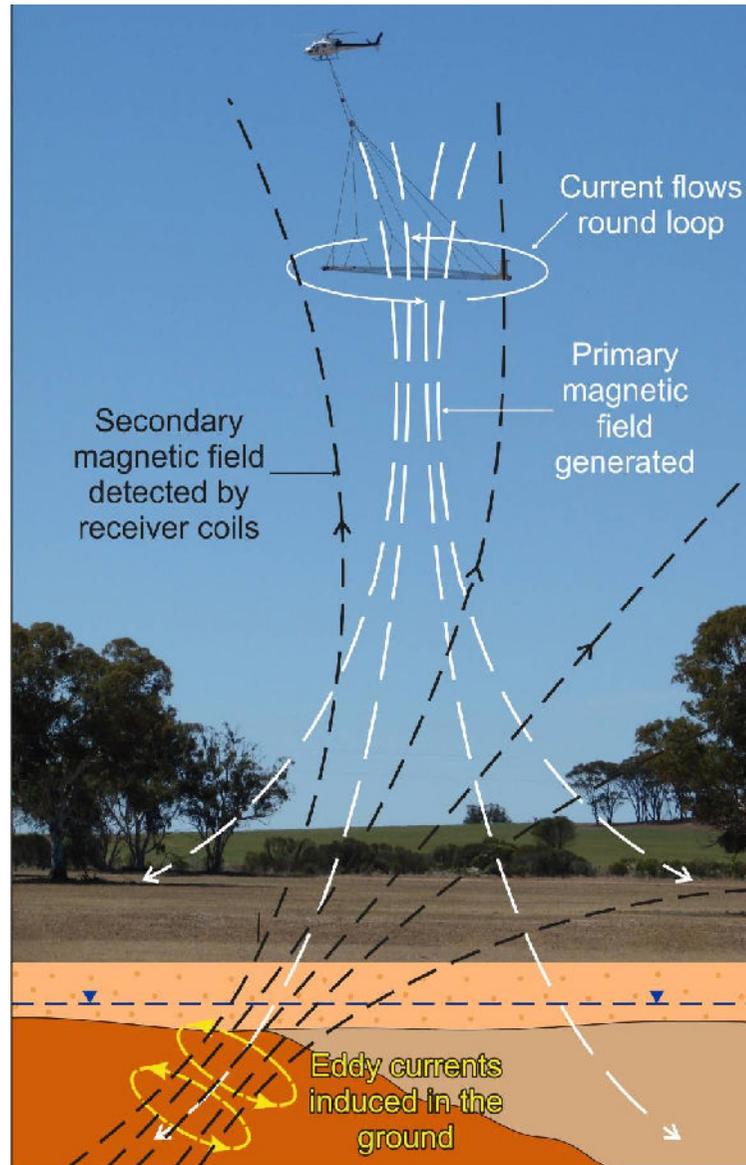
Geothermische Planungskarten

→ **Aeroelektromagnetik**: erprobtes geophysikalisches Erkundungsverfahren für Erzprospektion und Grundwassererkundung

..... **auch für die geothermische Planung anwendbar??**



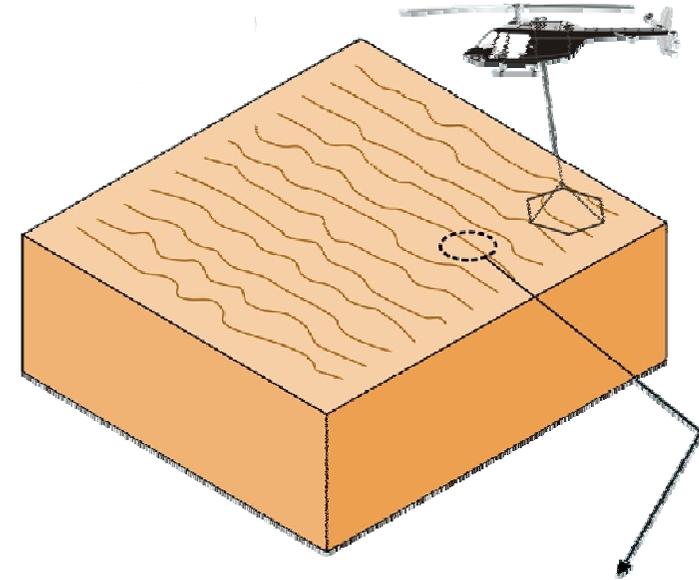
Aeroelektromagnetik



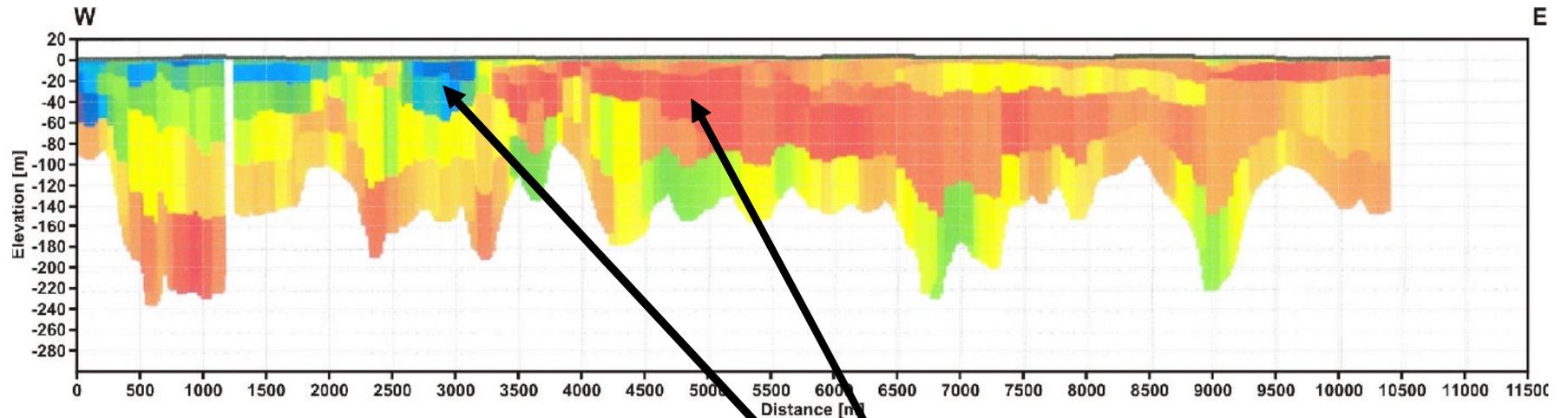
Grundmuster Elektromagnetik

- es wird ein magnetisches Feld (Primärfeld) erzeugt, das in den Untergrund eindringt,
- wenn dieses Magnetfeld sich ändert, wird im Untergrund ein Stromfeld induziert,
- die Stärke des Stromfeldes hängt ab vom elektrischen Widerstand des Untergrundes,
- das Stromfeld führt zu einem sekundären Magnetfeld,
- aus dem primären und sekundären Magnetfeld kann die Verteilung der elektrischen Widerstände im Untergrund ermittelt werden.

Aeroelektromagnetik

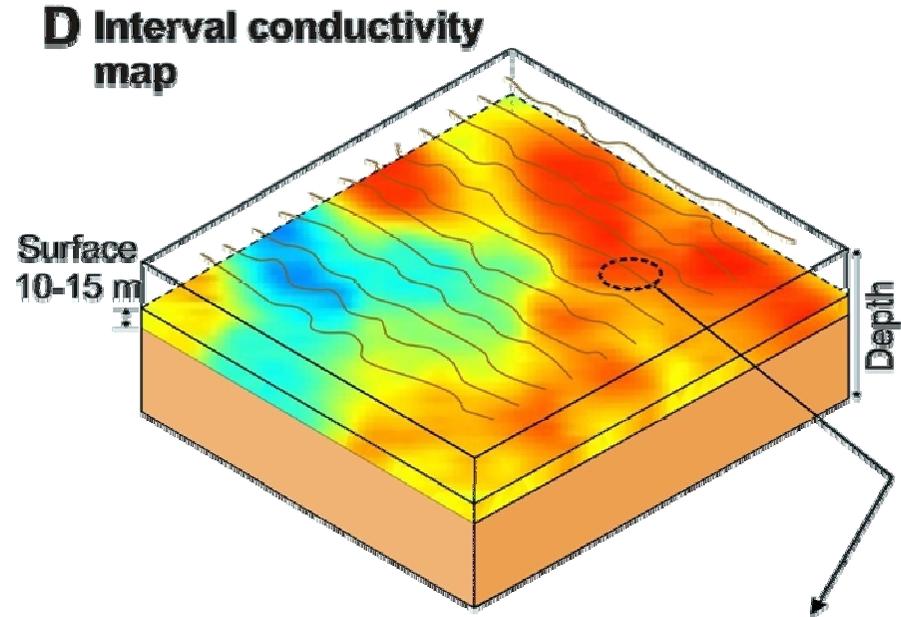
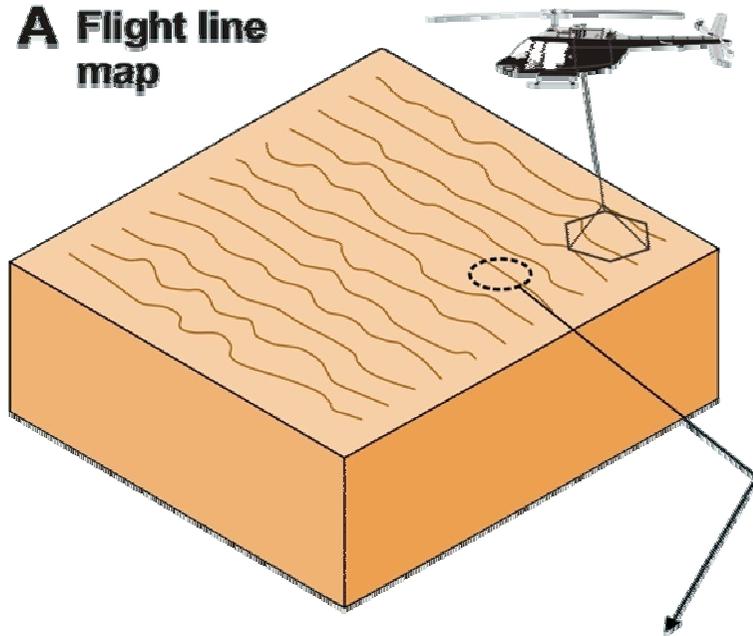


Ergebnis der Messung und Dateninversion ist die Verteilung der (spezifischen) elektrischen Widerstände unterhalb der Fluglinie

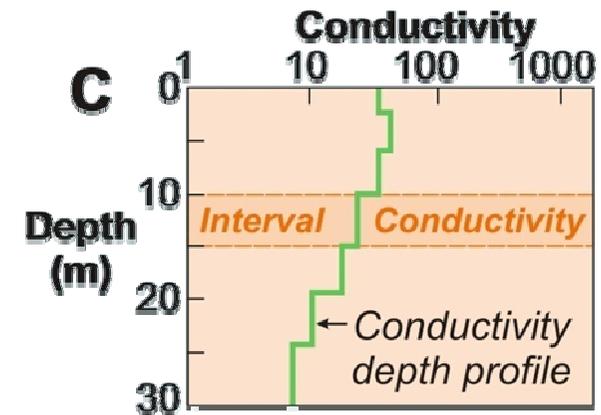


geringer spezifischer elektrischer Widerstand
hoher

Aeroelektromagnetik

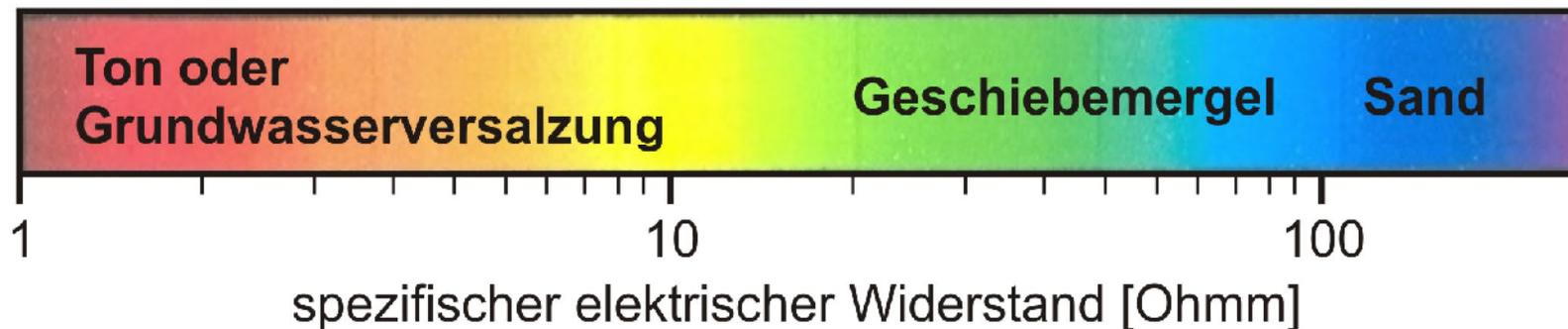


Durch Interpolation der Ergebnisse entlang der Fluglinien ergibt sich ein 3D Bild der elektrischen Widerstände im Untergrund des Befliegungsgebietes



Aeroelektromagnetik

da die bei uns vorkommenden Lockersedimente sich in ihren elektrischen Widerständen teilweise deutlich unterscheiden, spiegelt die Widerstandsverteilung den geologischen Schichtenaufbau wider.



Es kann zu überlappenden Widerstandsbereichen und dadurch zu Interpretationsunsicherheiten kommen!

Aeroelektromagnetik

2 Messsysteme sind im Einsatz:

SkyTEM

University of Aarhus / SKYTEM ApS

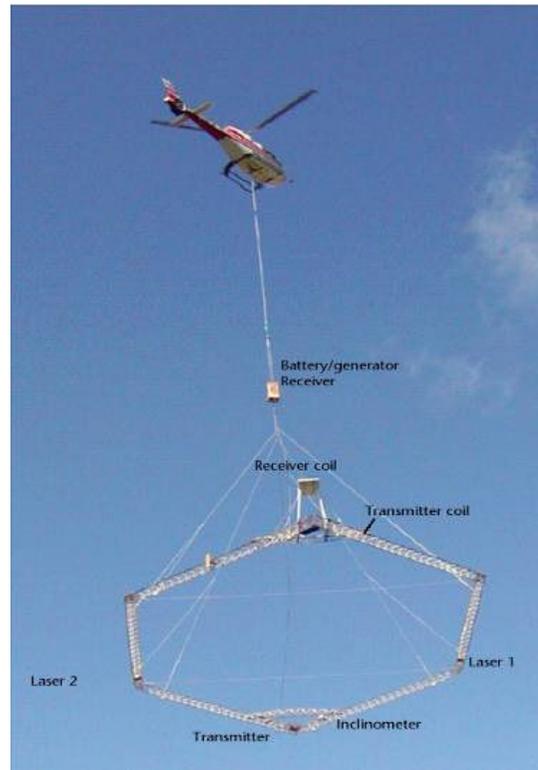
H=30 m

V=70 km/h

Z=30-300 m

$\Delta x = 60$ m

kommerziell eingesetzt



H=Flughöhe Messsonde über Grund
V=Messfluggeschwindigkeit
Z=Eindringtiefe
 ΔX =Messpunktabstand



HEM

BGR Hannover

H=35 m

V=140 km/h

Z=5-150 m

$\Delta x = 4$ m

nicht auf BGR-interne Einsätze beschränkt

**unterschiedliche Messverfahren,
aber kompatible Ergebnisse**

Aeroelektromagnetik

Impressionen eines SkyTEM Einsatzes



die Antenne wird im Messgebiet montiert



vom Hubschrauber aufgenommen.....

Aeroelektromagnetik



und die Messung beginnt



Aeroelektromagnetik

es gibt einen wachsenden Satz an 3D-Daten über den elektrischen Widerstand des Untergrundes.

auch international: Dänemark ist z.B. fast vollständig beflogen.

Rote Farbe → Grundwasserversalzung

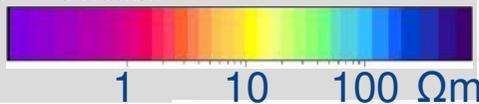
RESOLVE Messgebiete (-15 mNN):

- | | |
|-----|-------------------------|
| 81 | Cuxhaven (2000) |
| 83 | Flensburg (2000) |
| 87 | Bremerhaven (2) |
| 90 | HH/Bergedorf (2) |
| 109 | Hadeln (2004) |
| 111 | Ellerbek (2005) |
| 128 | Langeoog (2008/2009)* |
| 129 | Esens (2008/2009)* |
| 130 | Borkum (2008) |
| 132 | Glückstadt (2008/2009)* |
| 138 | Nordenham (2009/2010)* |
- 13400 km

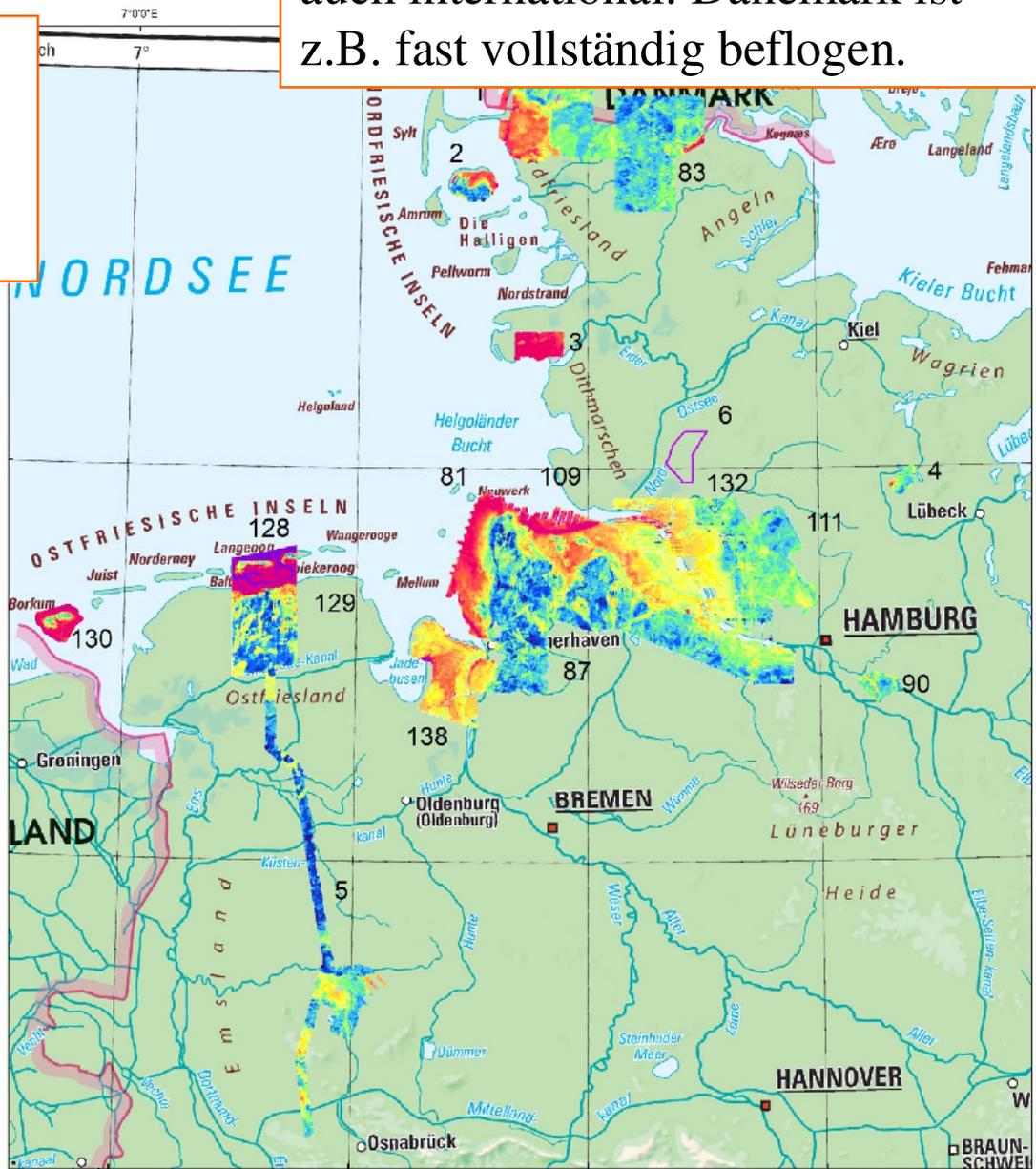


SkyTEM Messgebiete:

- | | |
|---|------------------|
| 1 | Leck und Tondern |
| 2 | Föhr |
| 3 | Garding |
| 4 | Bad Segeberg |
| 5 | Niedersachsen |
| 6 | 6 Wacken |
- 4500 km



* Scheinbarer Widerstand 41 kHz



Hintergrundkarte: © Bundesamt für Kartografie und Geodäsie

1:750.000 0 5 10 20 KM

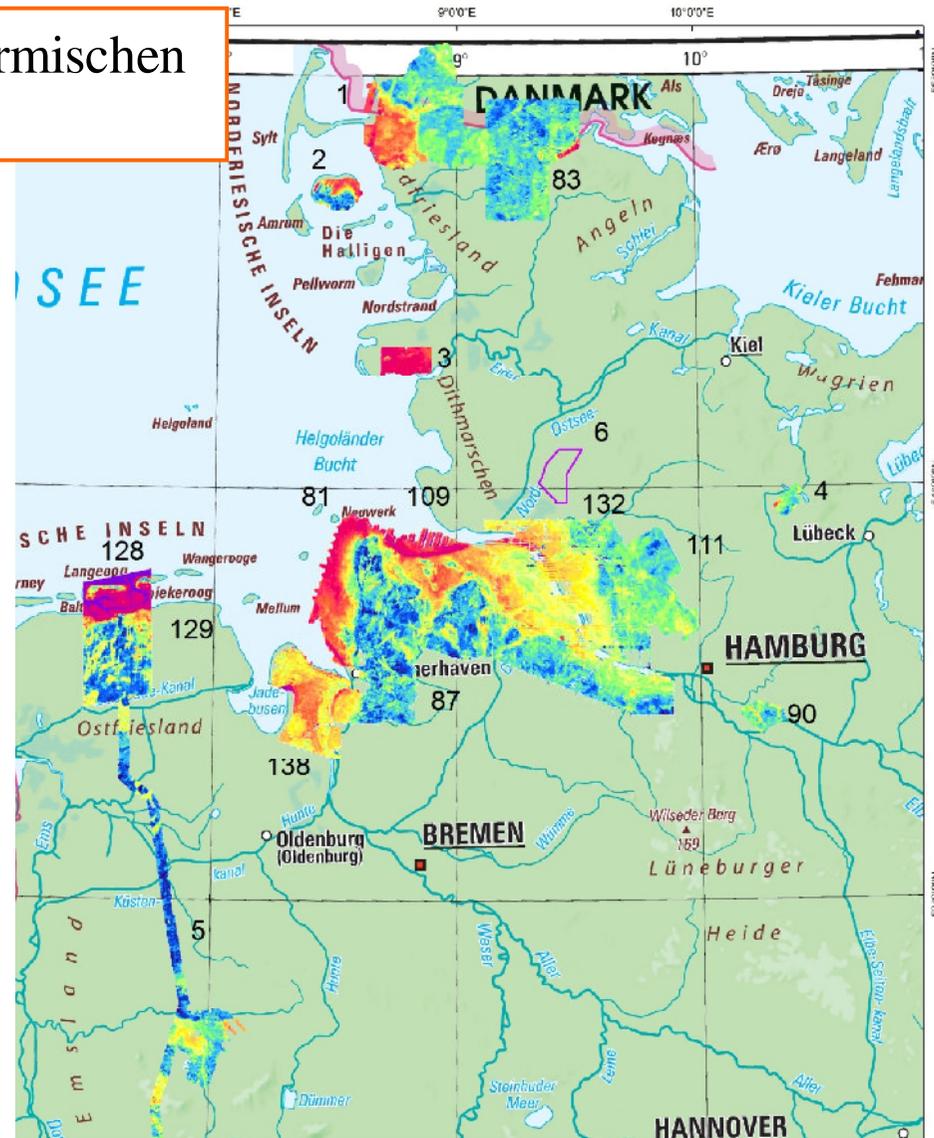


Aeroelektromagnetik

wie können diese Daten zur geothermischen Planung verwendet werden?

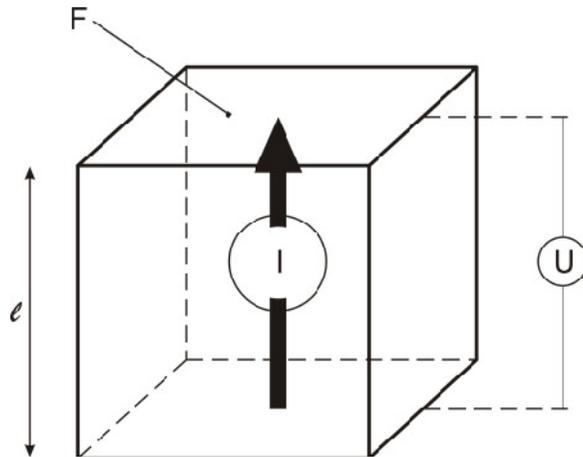


Ableitung der Wärmeleitfähigkeit aus dem elektrischen Widerstand



elektrischer Widerstand → Wärmeleitfähigkeit

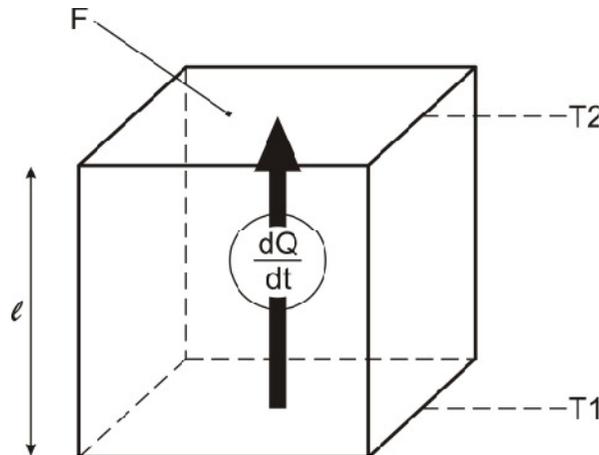
Abschätzung der Wärmeleitfähigkeit aus dem spezifischen elektrischen Widerstand



spezifischer elektrischer Widerstand ρ

$$I = \frac{1}{\rho_s} \cdot \frac{F}{l} \cdot U$$

Ohm'sches Gesetz



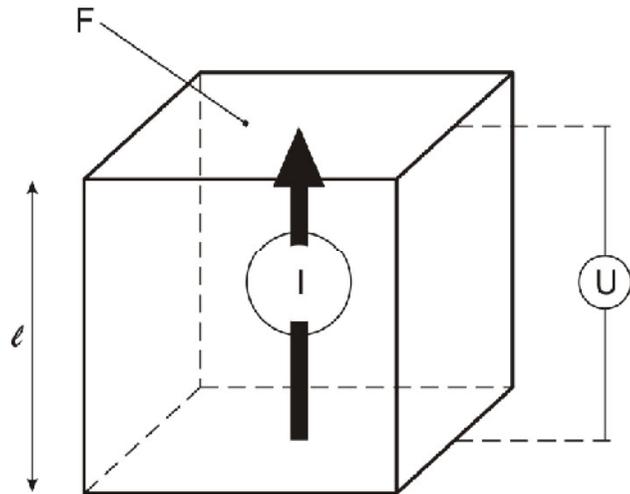
Wärmeleitfähigkeit λ

$$\frac{dQ}{dt} = \lambda \cdot \frac{F}{l} \cdot (T_1 - T_2)$$

Fourier'sches Gesetz

elektrischer Widerstand → Wärmeleitfähigkeit

spezifischer elektrischer Widerstand von Lockersedimenten



tonfrei (Sand, Kies): Gesetz von Archie



Porosität (= Wassergehalt)

Porositätsexponent

spezifischer elektrischer Widerstand des Porenwassers

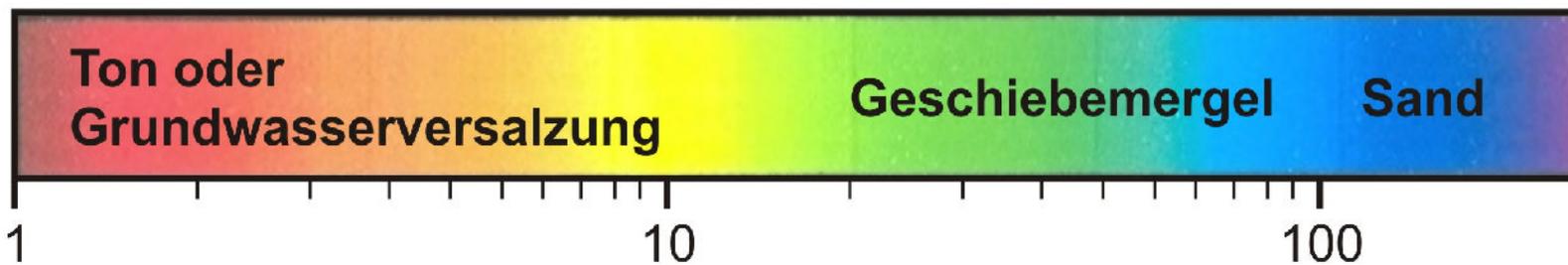
tonhaltig (Geschiebemergel, Ton):



Porosität (= Wassergehalt)

spezifischer elektrischer Widerstand des Porenwassers

Kationenaustauschkapazität



spezifischer elektrischer Widerstand in Ωm

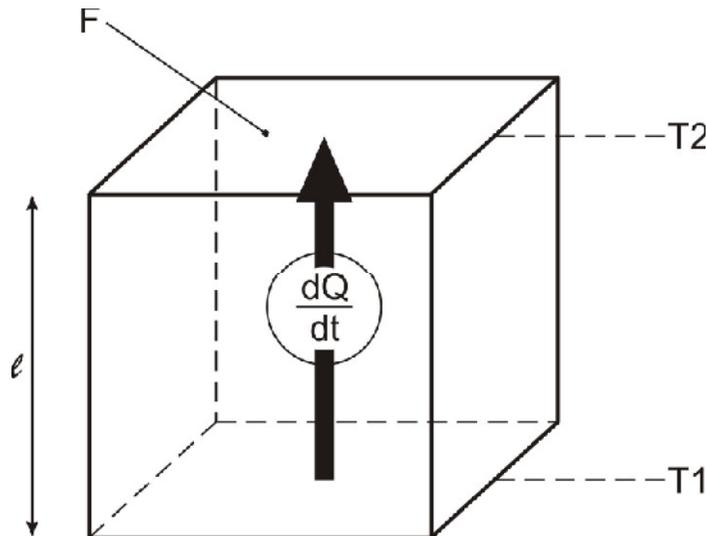
elektrischer Widerstand → Wärmeleitfähigkeit

Wärmeleitfähigkeit von Lockersedimenten

besteht aus Sand, Ton und Porenwasser

$$\lambda_{SEDIMENT} = \prod \lambda_{Komponente}^{n_{Komponente}}$$

Clauser 2005



$$\lambda_{SEDIMENT} = \lambda_{QUARZ}^{n_{QUARZ}} \cdot \lambda_{TON}^{n_{TON}} \cdot \lambda_{PORENWASSER}^{n_{PORENWASSER}}$$

Porenwasser:	$\lambda_{Wasser} = 0.5 \text{ W/(m}^*K)$
Sand (=Quarz):	$\lambda_{Quarz} = 6.5 \text{ W/(m}^*K)$
Ton:	$\lambda_{Ton} = 2.9 \text{ W/(m}^*K)$

Die Wärmeleitfähigkeit wird hauptsächlich durch den Gehalt an Porenwasser bestimmt (wie beim elektrischen Widerstand)

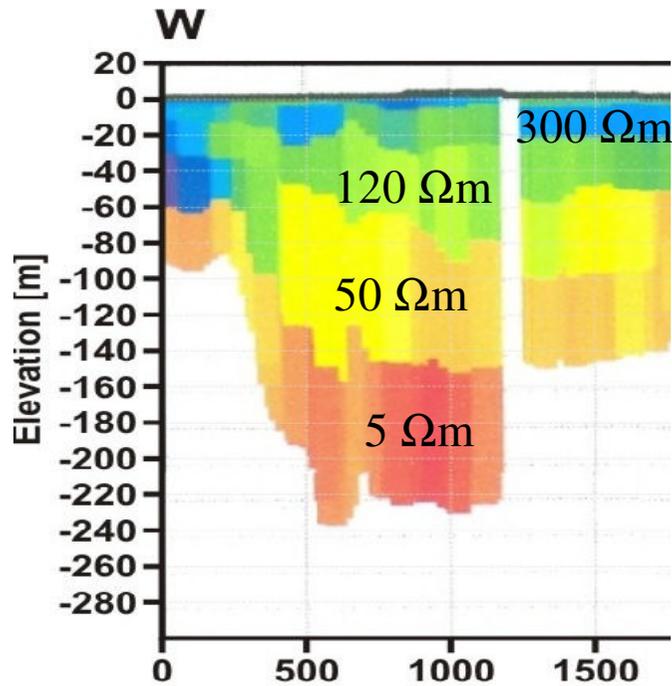
elektrischer Widerstand → Wärmeleitfähigkeit

	spez. elektrischer Widerstand (ohm.m, Ω m)	Wärmeleitfähigkeit nach VDI 4640 (W/mK)
trockener Sand	> 200	0.3 – 0.9 (0.4)
wassergesättigter Sand	70 - 200	2.0 – 3.0 (2.4)
Geschiebemergel	30 - 70	1.1 – 2.9 (2.4)
Ton	5 - 30	1.1 – 3.1 (1.5)

charakteristische elektrische Widerstände und
Wärmeleitfähigkeiten für Lockersedimente



elektrischer Widerstand → Wärmeleitfähigkeit

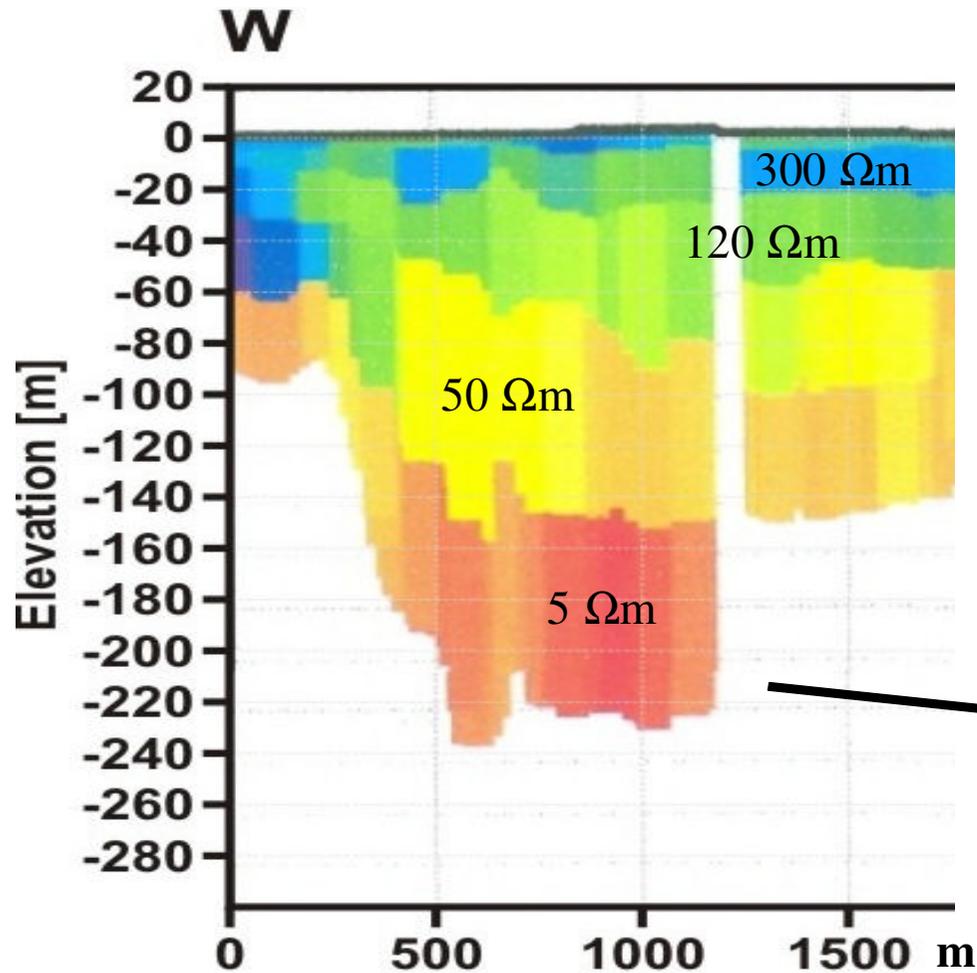


spez. elektrischer Widerstand (ohm.m, Ωm)	Wärmeleitfähigkeit nach VDI 4640 (W/mK)
> 200	0.4
70 - 200	2.4
30 - 70	2.4
5 - 30	1.5

Zuordnung von Wärmeleitfähigkeiten
zu den elektrischen Widerständen



elektrischer Widerstand → Wärmeleitfähigkeit



Wärmeleitfähigkeit nach
VDI 4640 (W/mK)

0.8
2.4
2.4
1.5

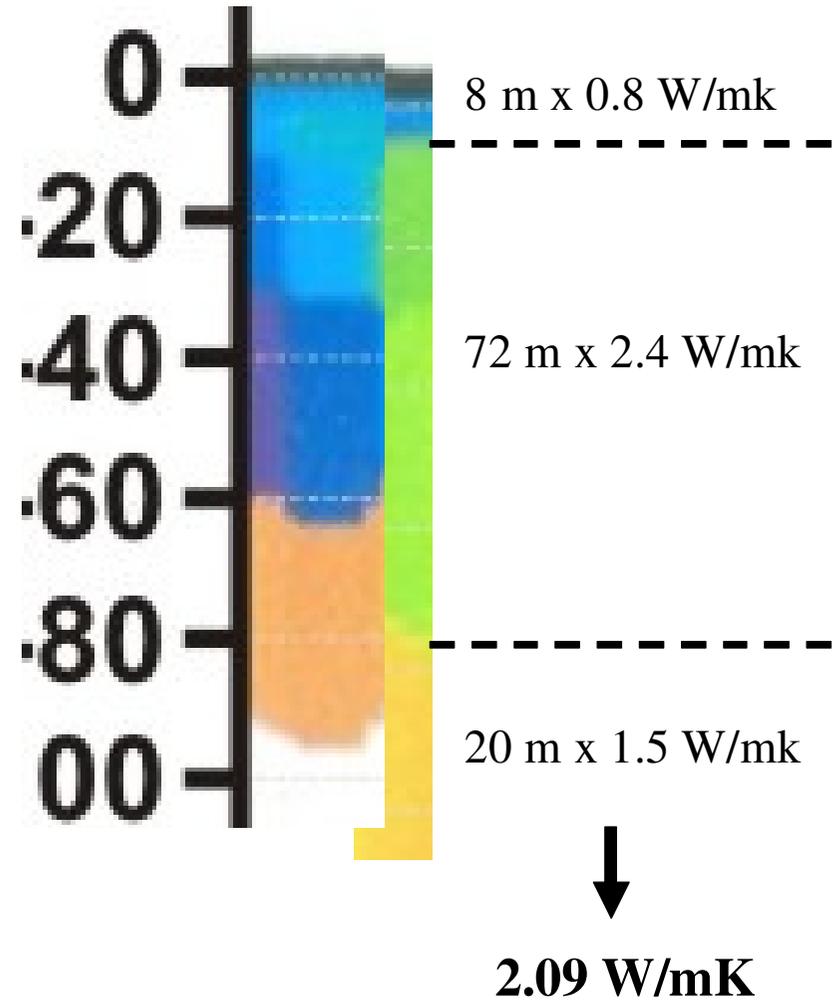
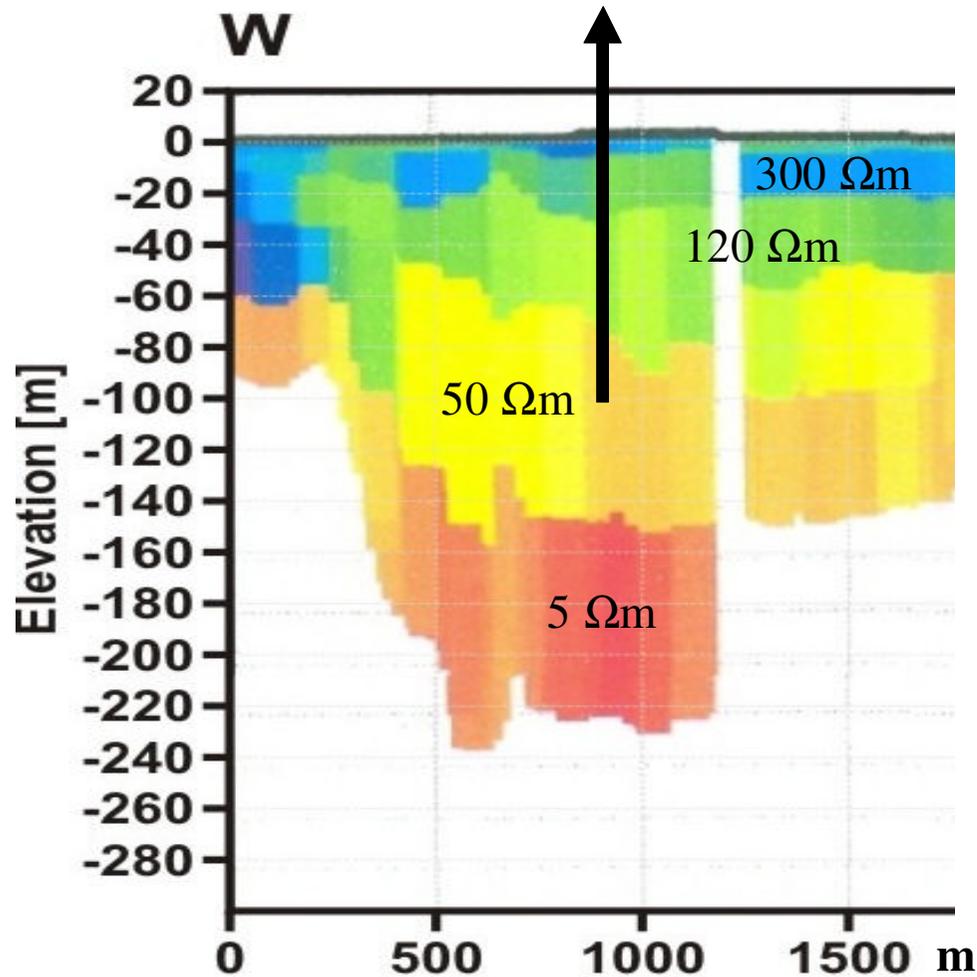
Zuordnung von Wärmeleitfähigkeiten
zu den elektrischen Widerständen



elektrischer Widerstand → Wärmeleitfähigkeit

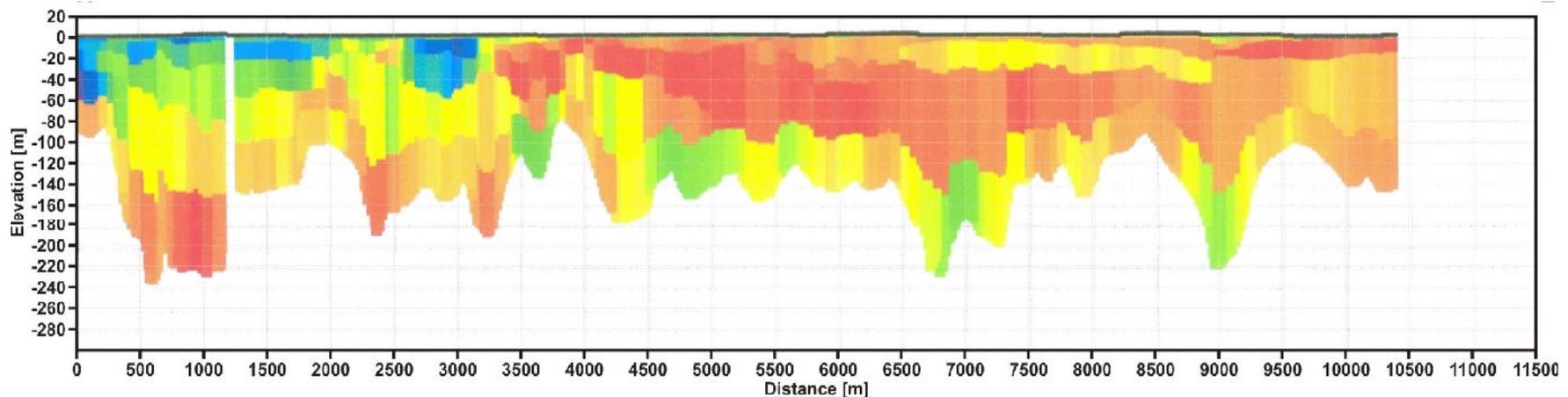
Berechnung der effektiven Wärmeleitfähigkeit

anschl.: Übertragung auf die Fläche
Planungskarte



elektrischer Widerstand → Wärmeleitfähigkeit

Spiegeln die EM-Ergebnisse die Geologische Realität wider??



Abweichungen von EM und Bohrerergebnissen

Gründe:

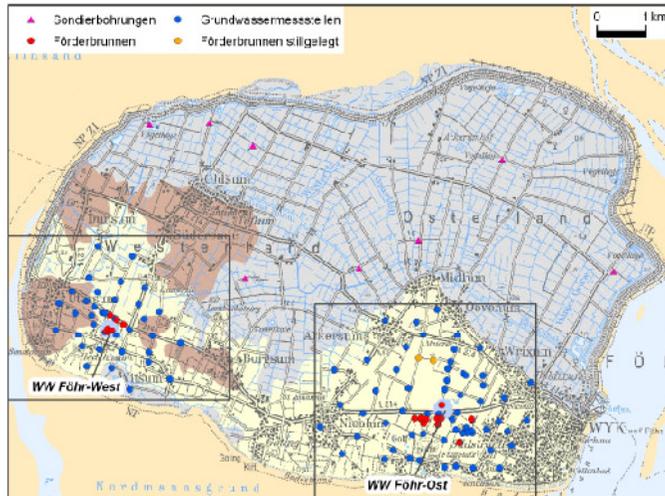
gestörte Messung, z.B. durch technische Störeinflüsse
 Mehrdeutigkeiten der Inversion (Äquivalenzprinzip)
 Beschränkung auf nur wenige Untergrundschichten.

Aber: Bohrergebnisse und Oberflächengeophysik können in die Inversion integriert werden (constraints)



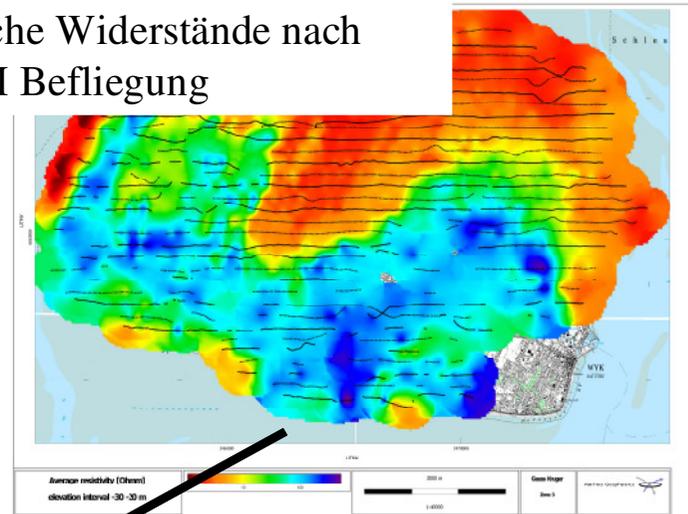
Beispiel Insel Föhr: Versuch einer geothermischen Planungskarte

Bohrergebnisse



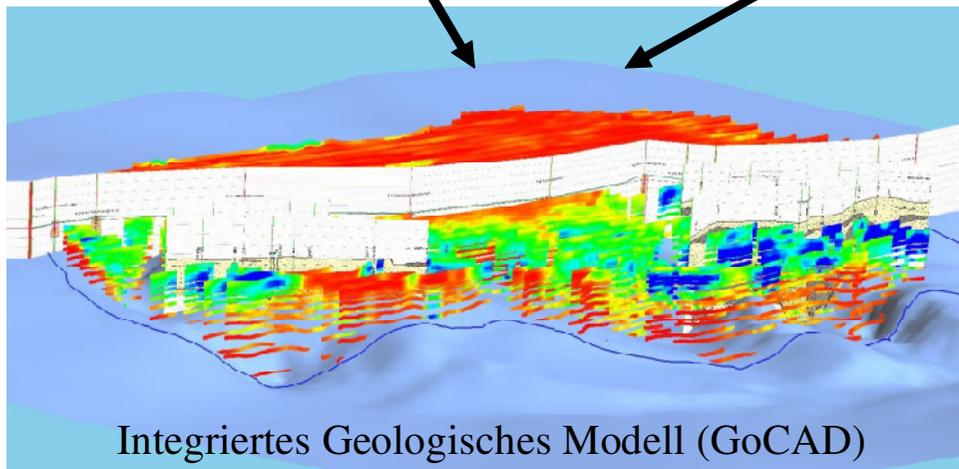
Scheer, König & Steinmann (2012)

Elektrische Widerstände nach SkyTEM Befliegung

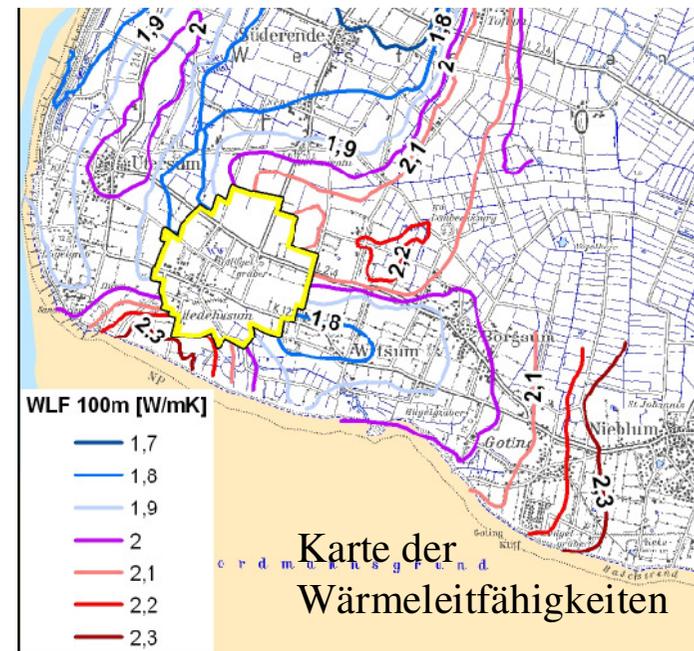


Kirsch, Wiederhold & Burschil (2012)

Kirsch, Thomsen & Wolf (2012)



Integriertes Geologisches Modell (GoCAD)



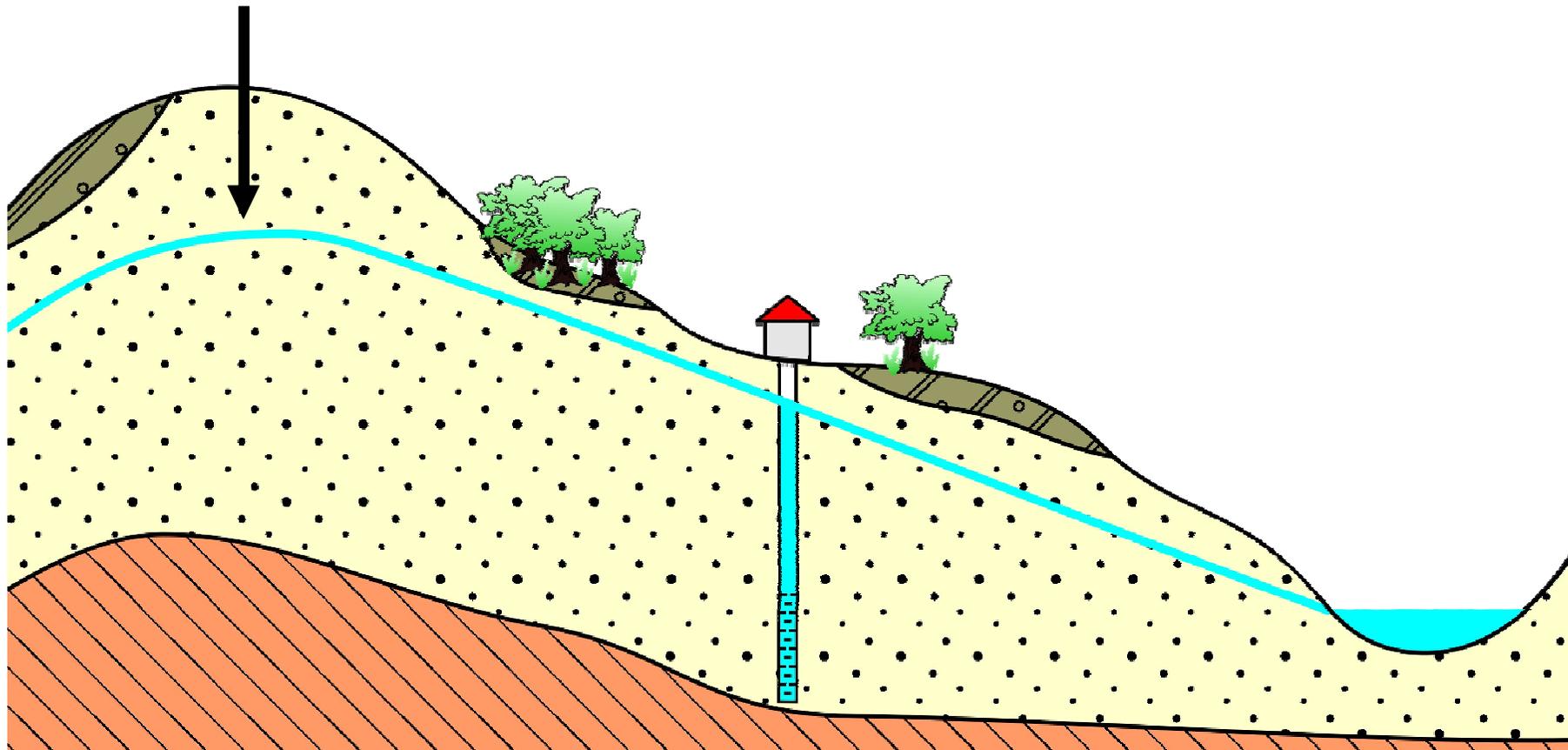
Karte der Wärmeleitfähigkeiten

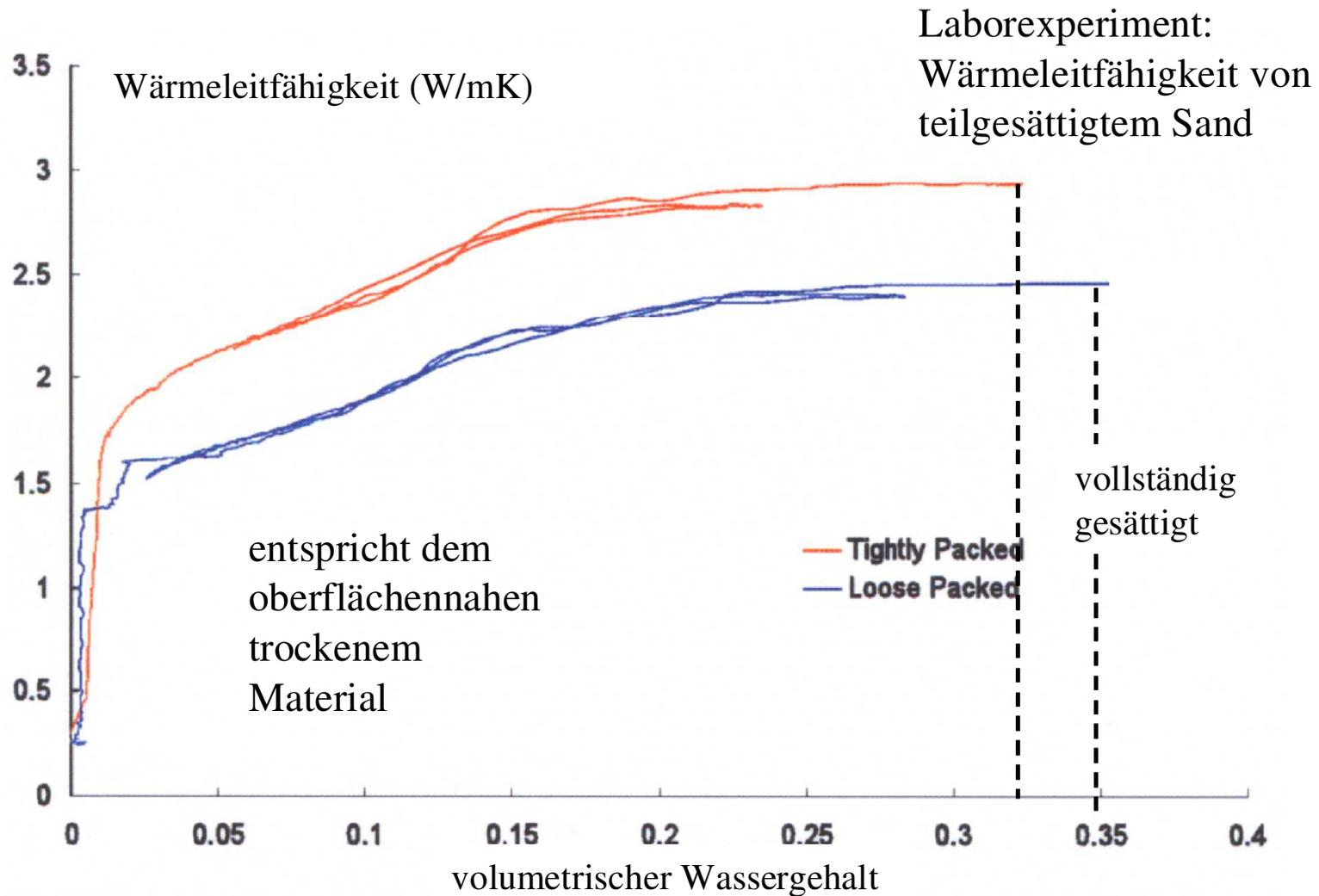
Wärmeleitfähigkeit der ungesättigten Zone – Informationen aus der Geophysik?

VDI 4640 über die ungesättigte Zone:
spezifische Entzugsleistung 20 W/m
Wärmeleitfähigkeit 0,8 W/mK

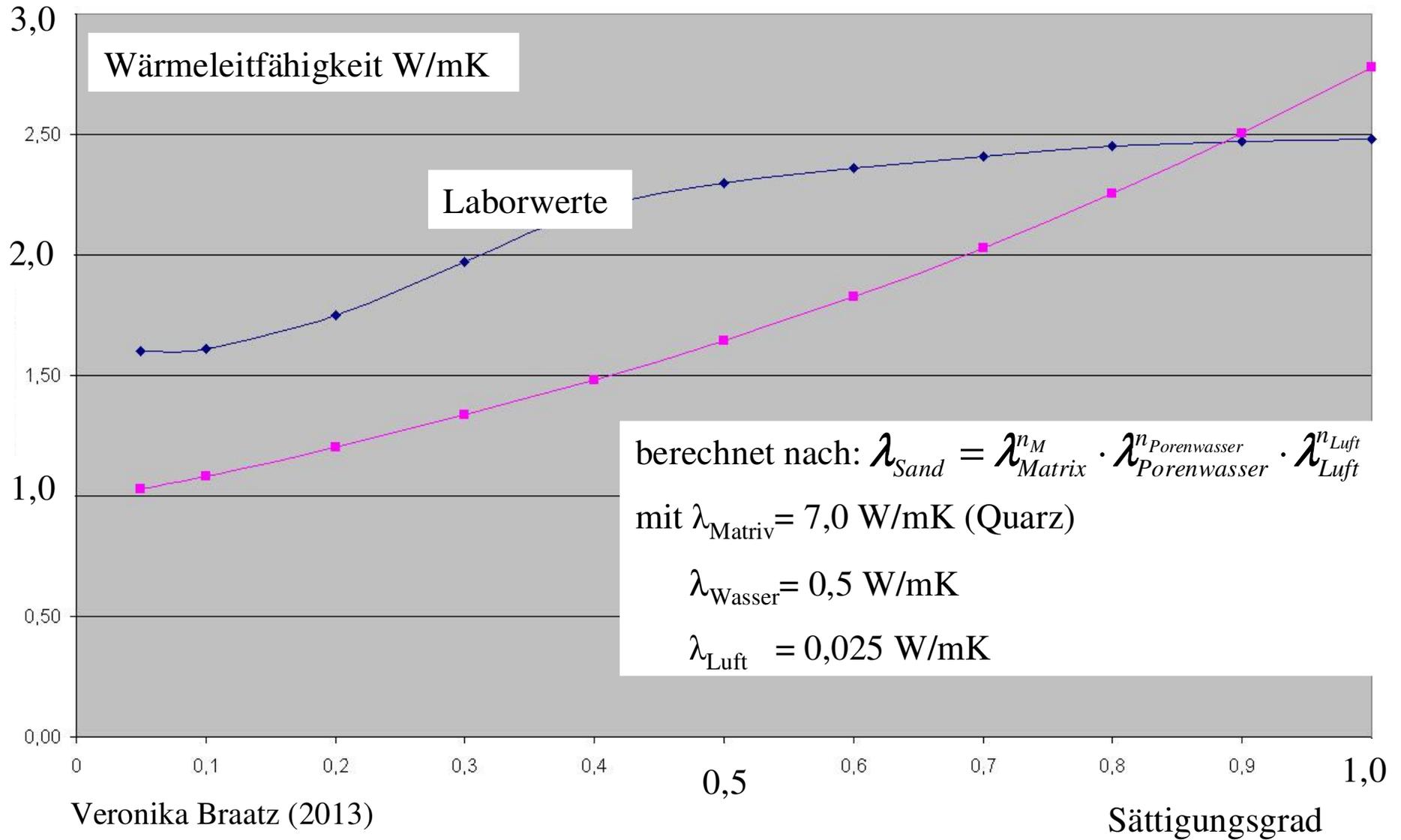


Aber: wie trocken ist
die ungesättigte Zone
eigentlich?





Smits KM, Sakaki T, Limsuwat A, Illangasekare TH (2009): Determination of the thermal conductivity of sands under varying moisture, drainage/wetting, and porosity conditions – applications in near-surface soil moisture distribution analysis. Hydrology days 2009, American Geophysical Union

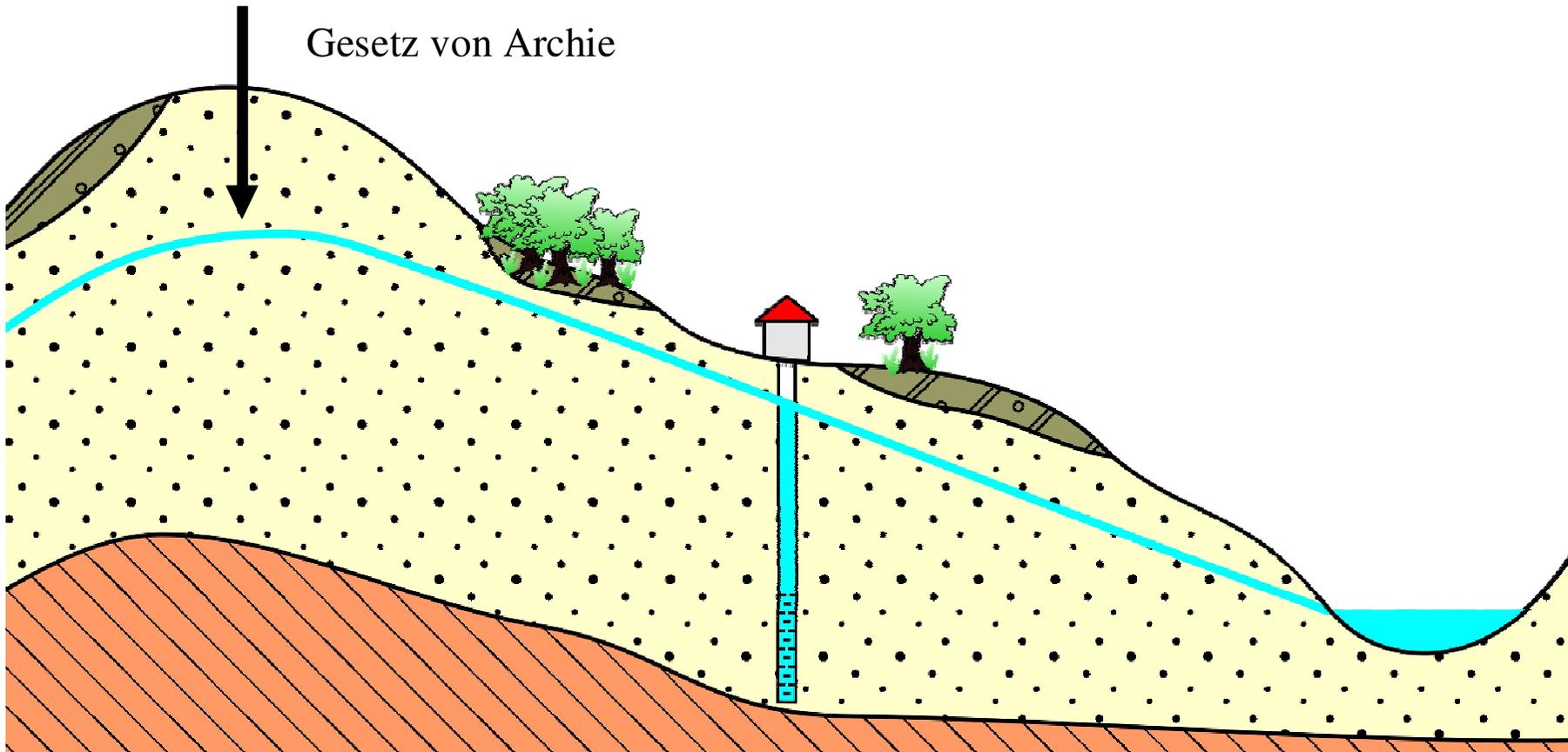


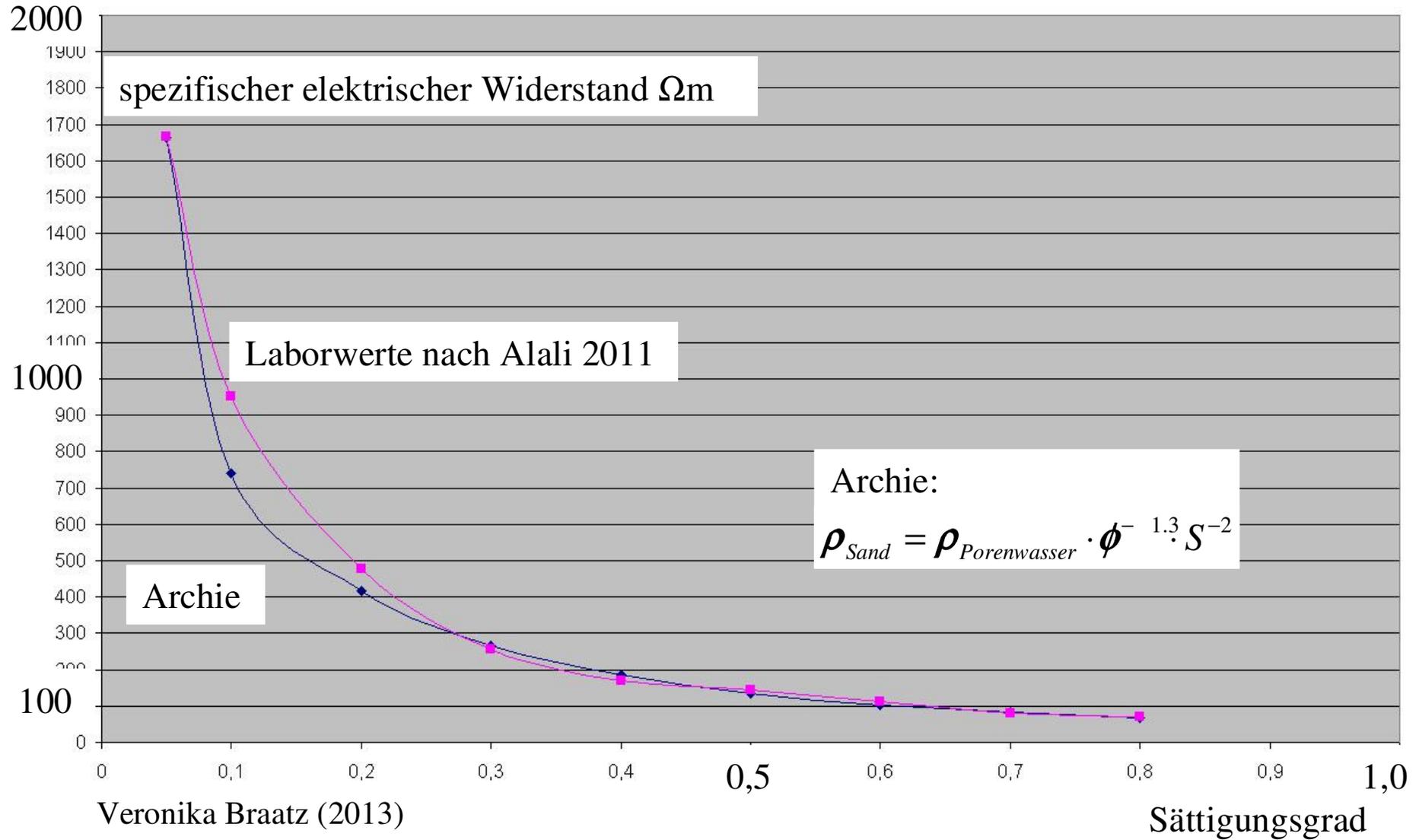
Informationen aus der Geophysik: spezifischer elektrischer Widerstand der ungesättigten Zone

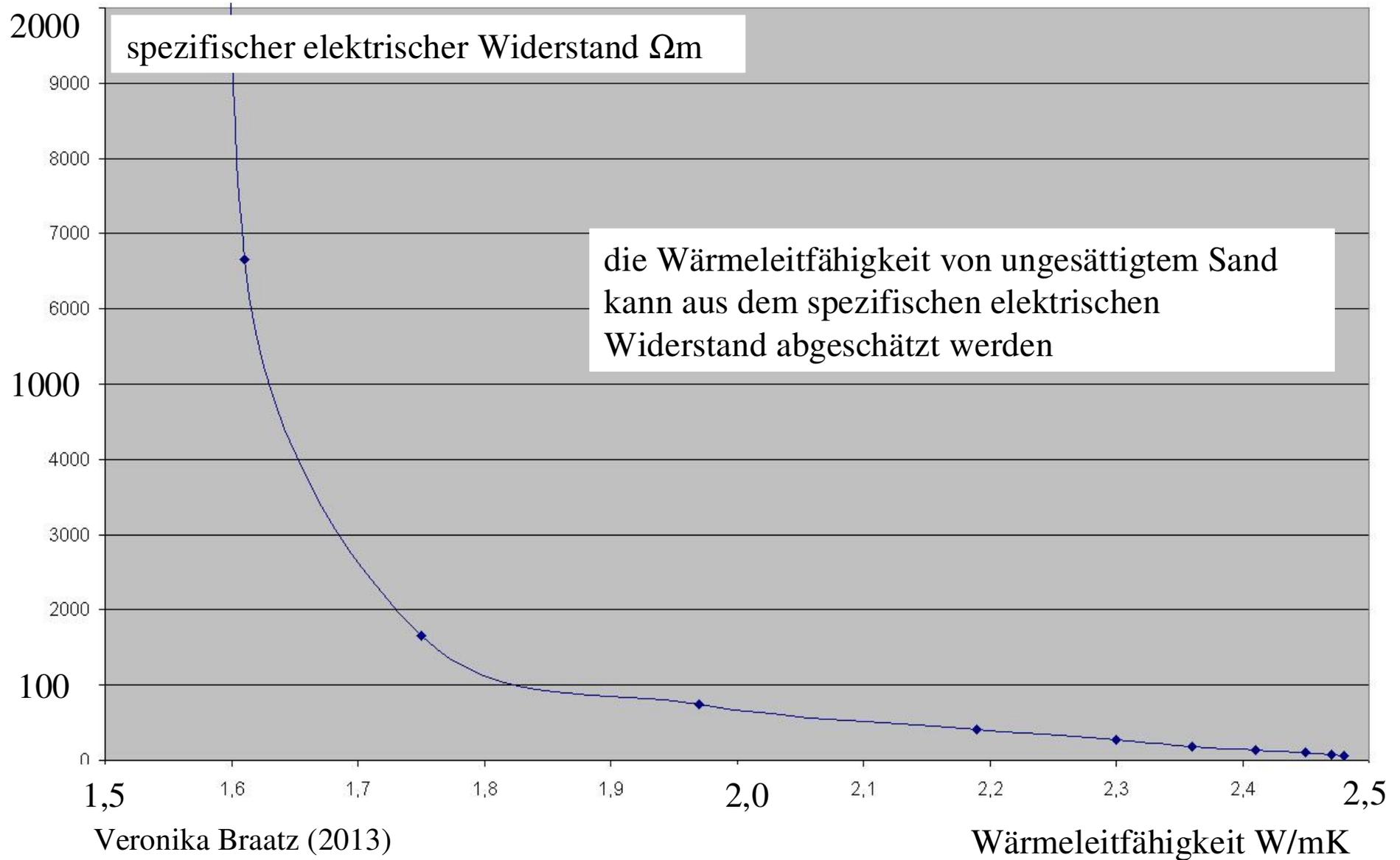
$$\rho_{us} = \rho_{porenwasser} \cdot \phi^{-1.3} \cdot S^{-2}$$

ϕ = Porosität
 S = Sättigungsgrad

Gesetz von Archie



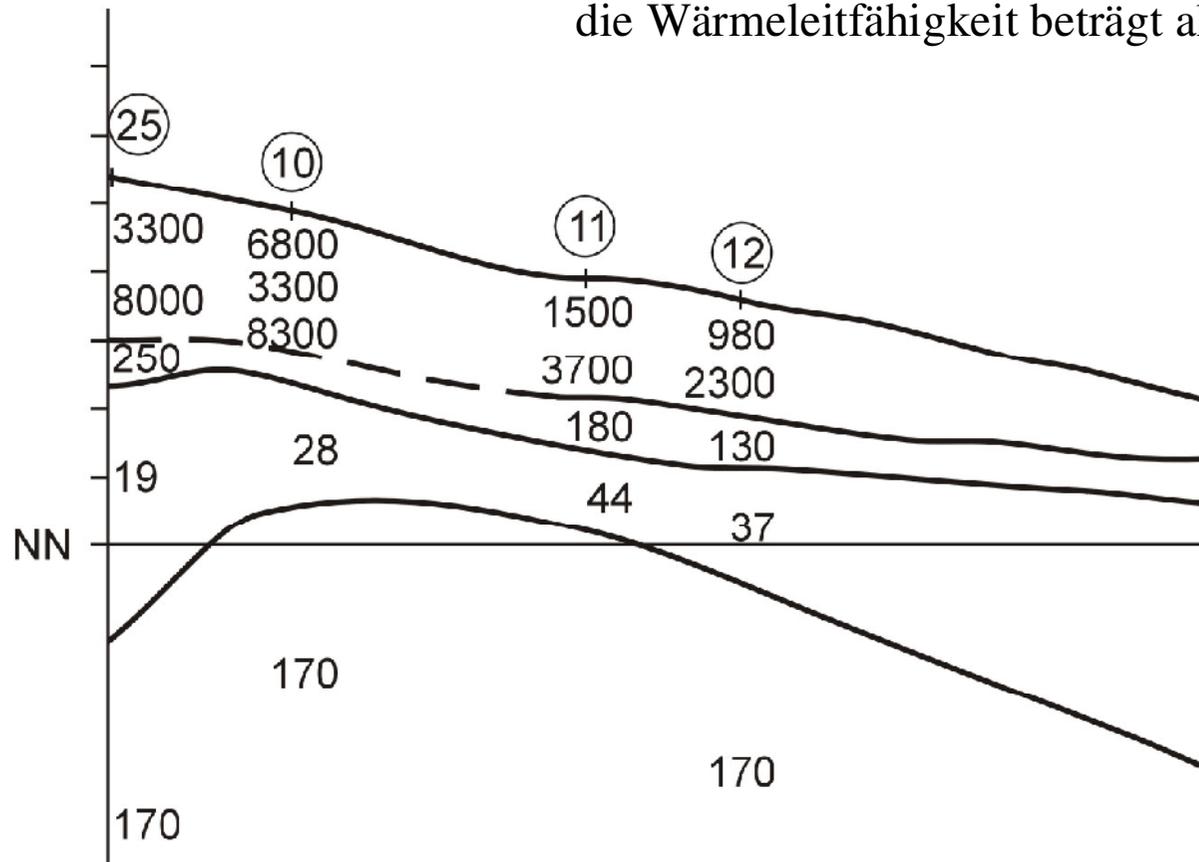






S
Wall

typische Werte des spezifischen Widerstands der ungesättigten Zone liegen im Bereich von 300 – 8000 Ωm , die Wärmeleitfähigkeit beträgt also über 1,6 W/mK



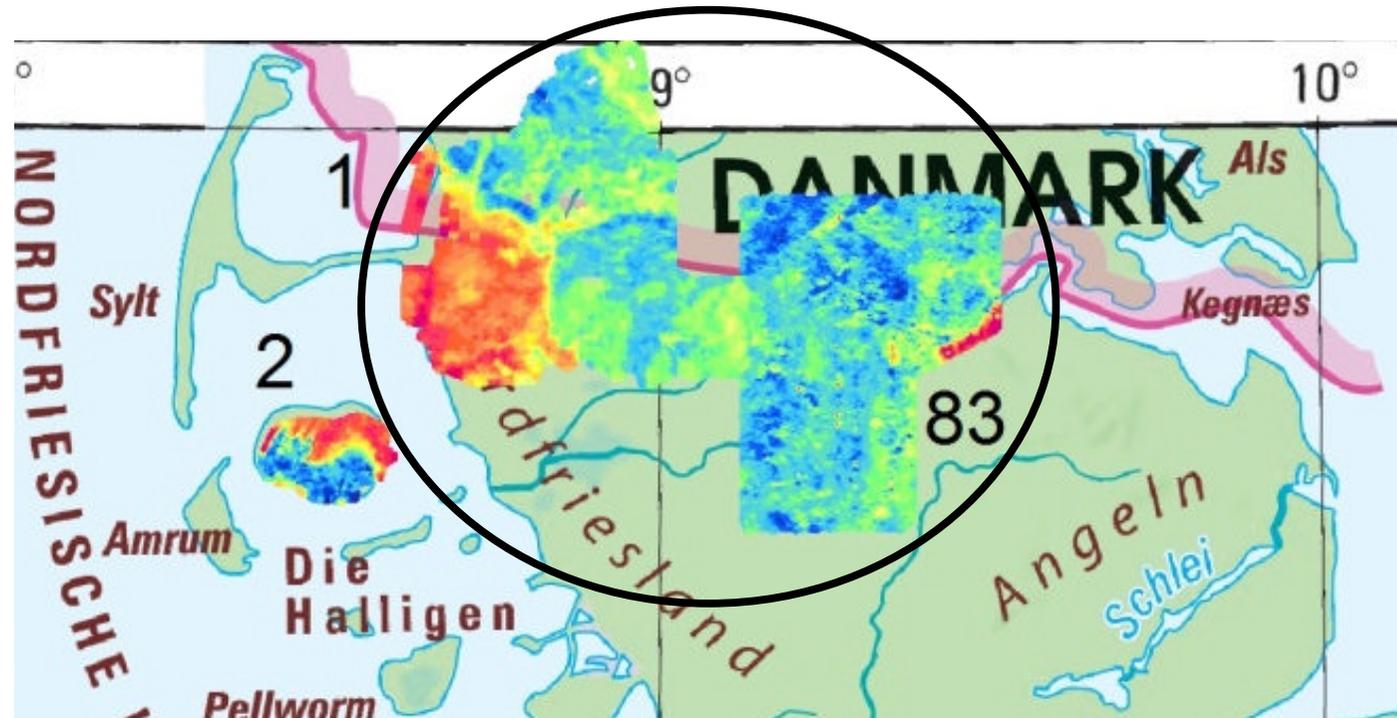
Ketelsen 2005

Zusammengefasst:

Aus flächenhaften Karten des spezifischen elektrischen Widerstands aus airborne Elektromagnetik Messungen lassen sich Karten der effektiven Wärmeleitfähigkeit erstellen. Hierzu müssen Zusatzinformationen aus Bohrungen oder anderen geophysikalischen Messungen als Unterstützung verwendet werden.

Auch für die ungesättigte Zone kann die Wärmeleitfähigkeit aus dem spezifischen elektrischen Widerstand abgeleitet werden. Im oberflächennahen Bereich ist die Auflösung von airborne Verfahren allerdings schlecht, hier müssen Messungen vom Boden erfolgen, z.B. geoelektrische Sondierungen.

Es bleibt viel zu tun.....



als Einstieg:

Grenzüberschreitende Planungskarte Region Südjütland - Schleswig

Partner:

GEUS (Geological Survey of Denmark and Greenland), Universität Horsens

LLUR, LIAG, BGR, LBEG (Elberaum mit einbeziehen)

Finanzierung:

INTERREG Kooperation ?