

Inhaltsverzeichnis

	Laudatio	III
	Vorwort	VII
	Abbildungsverzeichnis	X
	Tabellenverzeichnis	XIII
1	Einleitung	1
2	Erdkabel	2
2.1	Wärmeentwicklung von Erdkabeln	5
2.2	Erdkabel und Freileitung im Vergleich	9
2.3	Kabelverlegung	10
3	Thermische Bodeneigenschaften	10
3.1	Wärmehaushalt	11
3.2	Wärmetransport	11
3.2.1	Wärmeleitung	13
3.2.2	Konvektion	14
3.3	Thermische Parameter	15
3.3.1	Wärmeleitfähigkeit	15
3.3.2	Wärmekapazität	17
3.3.3	Temperaturleitfähigkeit	19
4	Bestimmung der thermischen Parameter	20
4.1	Methoden zur Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit und der Wärmekapazität	20
4.1.1	Linien-Quellen-Methode	21
4.1.2	Optical Scanning Verfahren	24
4.1.3	Divided-Bar-Methode	24
4.1.4	Thermal-Response-Test	25
4.1.5	Zusammenfassung der Vor- und Nachteile der Methoden zur Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit	26
4.2	Bestimmung mit der Nadelsonden-Methode	28
4.2.1	Das Messgerät	28
4.2.2	Versuchsaufbau	32
4.2.3	Versuchsdurchführung	35

5	Darstellung und Bewertung der Messergebnisse	39
5.1	Charakterisierung und Auswahl der Böden	39
5.1.1	Probe 1	41
5.1.2	Probe 2	41
5.1.3	Probe 3	42
5.2	Messergebnisse	42
5.2.1	Probe 1 (fS, ms, $u^c - \rho_d=1,48 \text{ g/cm}^3$)	45
5.2.2	Probe 2 (mS, gs, $fs^c - \rho_d=1,56 \text{ g/cm}^3$)	50
5.2.3	Probe 3 (U, fs, $t^c - \rho_d=1,67 \text{ g/cm}^3$)	56
5.3	Bewertung der Reproduzierbarkeit	62
5.4	Vergleich mit Literaturwerten und vorherigen Messungen des ICP Braunschweig	65
5.4.1	Literaturwerte	65
5.4.2	Messwerte der ICP Braunschweig GmbH	72
5.5	Einstufung der Böden nach Eignung für den Trassenbau	75
5.5.1	Berechnung des Grenzwertes	76
5.5.2	Interpretation des Grenzwertes und Auswirkungen auf den Bau einer Mittelspannungserdkabeltrasse	80
6	Zusammenfassung und Ausblick	84
7	Literaturverzeichnis	86
8	Anhang	92
	Danksagung und Ausblick	94
	Sachwortverzeichnis	96

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Netzebenen des elektrischen Transportnetzes [Blum, Rosenthal and Diekmann, 2020]	3
Abbildung 2: Aufbau der Starkstromkabel	3
Abbildung 3: Standardkabelkonstruktion NA2XS2Y für Mittelspannung nach DIN VDE 0276-620 [Cichowski and Kliesch, 2012]	5
Abbildung 4: Erwärmung eines Dreierbündels von Mittelspannungskabeln in 70 cm Tiefe in Abhängigkeit von Strom und dem Widerstand $R_{th, spez.}$ des Bodens [Stegner, 2016]	8
Abbildung 5: Schematische Darstellung von Wassermenisken	13
Abbildung 6: Wärmeleitfähigkeit in Abhängigkeit vom Wassergehalt für einen Sandboden mit Porenvolumen von 40 Vol- % und 60 Vol- % [Bachmann, 1996b]	16
Abbildung 7: Volumetrische Wärmekapazität in Abhängigkeit vom Wassergehalt für einen Sandboden mit Porenvolumen von 40 und 60 Vol- % [Bachmann, 1996b]	18
Abbildung 8: Temperaturleitfähigkeit in Abhängigkeit vom Wassergehalt für einen Sandboden mit Porenvolumen von 40 Vol- % und 60 Vol- % [Bachmann, 1996b]	19
Abbildung 9: Übersicht Bestimmungsmethoden der Wärmeleitfähigkeit	21
Abbildung 10: KD2-Pro mit verschiedenen Vollraumsonden [www.ictinternational.com]	22
Abbildung 11: TK04 Halbraumsonden der Firma Teka [www.te-ka.de]	23
Abbildung 12: Schematischer Aufbau des Thermal Conductivity Scanner [Personenkreis Geothermie, 2015]	24
Abbildung 13: Schematische Darstellung der Divided-Bar-Methode [Pasquale, Verdoya and Chiozzi, 2017]	25
Abbildung 14: Schematischer Aufbau eines Thermal-Response-Tests [www.hdg-gmbh.com]	26
Abbildung 15: Schematischer Aufbau eines Messzylinders mit 5 Ringen und Löchern für die Messungen	33
Abbildung 16: Einführung der SH-1 Sonde durch Löcher im Messzylinder ..	34
Abbildung 17: Einführung der TR-1 Sonde durch Löcher im Messzylinder ..	34

Abbildung 18: Ringweise Befüllung des Messzylinders mit Handstamper	35
Abbildung 19: Messzylinder bei der Messung	37
Abbildung 20: Kornverteilungen	40
Abbildung 21: Probe 1 Abhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit vom Wassergehalt	43
Abbildung 22: Probe 2 Abhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit vom Wassergehalt	44
Abbildung 23: Probe 3 Wärmeleitfähigkeit in Abhängigkeit vom Wassergehalt	44
Abbildung 24: Probe 1 Abhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit der TR-1 Sonde vom Wassergehalt mit Fehlerindikatoren bei $\pm 10\%$ vom Mittelwert	48
Abbildung 25: Probe 1 Abhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit der SH-1 Sonde vom Wassergehalt mit Fehlerindikatoren bei $\pm 10\%$ vom Mittelwert	48
Abbildung 26: Probe 1 Abhängigkeit der Wärmekapazität vom Wassergehalt mit Fehlerindikatoren	50
Abbildung 27: Probe 2 Abhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit der TR-1 Sonde vom Wassergehalt mit Fehlerindikatoren bei $\pm 10\%$ vom Mittelwert	54
Abbildung 28: Probe 2 Abhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit der SH-1 Sonde vom Wassergehalt mit Fehlerindikatoren bei $\pm 10\%$ vom Mittelwert	54
Abbildung 29: Probe 2 Wärmekapazität in Abhängigkeit vom Wassergehalt	55
Abbildung 30: Probe 3 Abhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit der TR-1 Sonde vom Wassergehalt mit Fehler-indikatoren bei $\pm 10\%$ vom Mittelwert	59
Abbildung 31: Probe 3 Abhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit der SH-1 Sonde vom Wassergehalt mit Fehler-indikatoren bei $\pm 10\%$ vom Mittelwert	60
Abbildung 32: Probe 3 Wärmekapazität in Abhängigkeit vom Wassergehalt	61
Abbildung 33: Abweichung der Wärmeleitfähigkeitsmesswerte im gleichen Messkanal der TR-1 Sonde	62
Abbildung 34: Abweichung der Wärmeleitfähigkeitsmesswerte im gleichen Messkanal der SH-1 Sonde	62

Abbildung 35: Abweichung der Wärmekapazitätsmesswerte im gleichen Messkanal der SH-1 Sonde	64
Abbildung 36: Abhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit vom Wassergehalt der Füllsubstrate (Kreuze: Messdaten, Linie: Anpassung der Johansen-Funktion) [Trinks, 2010]	68
Abbildung 37: Abhängigkeit der Messwerte der Probe 1 und der des leicht schluffigen Sandes aus [Trinks, 2010]	69
Abbildung 38: Abhängigkeit der Messwerte der Probe 2 und der des Mittelsandes aus [Trinks, 2010]	71
Abbildung 39: Abhängigkeit der Messwerte der Probe 3 und der des mittel tonigem Schluff, des mittel schluffigen Sandes und des stark lehmigen Sandes von [Trinks, 2010]	71
Abbildung 40: Probe1, VP 1.1, VP 1.2 Wärmeleitfähigkeit in Abhängigkeit vom Wassergehalt	73
Abbildung 41: Probe 2, VP 2.1, VP 2.2 Wärmeleitfähigkeit in Abhängigkeit vom Wassergehalt	74
Abbildung 42: Probe 3, VP 3.1, VP 3.2, VP 3.3 Wärmeleitfähigkeit in Abhängigkeit vom Wassergehalt	75
Abbildung 43: Wärmeleitfähigkeit in Abhängigkeit vom Wassergehalt (alle Proben)	81

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Spezifischer Widerstand für verschiedene Materialien bei 20 °C [Albach, 2008]	6
Tabelle 2: Übersicht über bodenphysikalische Größen und Prozesse, die den Wärmefluss im Dreiphasensystem Boden beeinflussen [Blume, Horn and Thiele-Bruhn, 2011]	12
Tabelle 3: Zusammenfassung der Vor- und Nachteile der Methoden	27
Tabelle 4: Sonden Kompatibilität zur Messung der Wärmeleitfähigkeit [Decagon Devices, 2016]	29
Tabelle 5: Abmessung, Messbereich und -genauigkeit der TR-1 und SH-1 Sonde	29
Tabelle 6: Bezeichnung, Bodenart und Trockendichte der untersuchten Böden	42
Tabelle 7: Probe 1 Übersicht über die Trockendichten, die Wassergehalte und die Anzahl der Messungen	46
Tabelle 8: Probe 2 Übersicht über die Trockendichten, die Wassergehalte und die Anzahl der Messungen	52
Tabelle 9: Probe 3 Übersicht über die Trockendichten, die Wassergehalte und die Anzahl der Messungen	57
Tabelle 10: Bezeichnung, Bodenart und Trockendichte der untersuchten Böden	63
Tabelle 11: Beispiele für Wärmeleitfähigkeit und volumenbezogene spezifische Wärmekapazität des Untergrundes [VDI 4640 Blatt 1:2010-06]	66
Tabelle 12: Thermische Parameter des Niederrheins [Clauser et al., 2011]	67
Tabelle 13: Wärmeleitfähigkeit λ [$\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$] der Substrate bei verschiedenen Wassergehalten [Trinks, 2010]	68
Tabelle 14: Probenamen mit Korngrößen und Trockendichten	72
Tabelle 15: Eigenschaften der ausgewählten Mittelspannungskabel [Nexans Deutschland GmbH, 2020]	77
Tabelle 16: Abmessung des NA2XS2Y 150 RM/25 18/30 kV Kabels	79