

Diplomarbeit

Zum Erwerb
des akademischen Grades Diplomingenieur
der Studienrichtung Bauingenieurwissenschaften

von

Wenigmann Rainer

eingereicht am
Institut für Bodenmechanik und Grundbau
der Technischen Universität Graz
Leitung: Ao. Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. M.Sc. Schweiger Helmut

Thema der Diplomarbeit:

**Versuche im Technikumsmaßstab zur Untersuchung der
Austrocknungsvorgänge in Bettungsmaterialien rund um
Fernwärmeleitungen**

Begutachter:

Em. Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Stephan Semprich

Betreuer:

Oberrat Dipl.-Ing. Otto Leibniz

Graz, im Oktober 2011

DIPLOMARBEIT-AUSGABEPROTOKOLL
an der Fakultät für Bauingenieurwissenschaften der TU Graz

KANDIDAT: Rainer WENIGMANN (Name)	90 31362 / F 610 (Mat.Nr.) / (Studienrichtung)  (Unterschrift)
<p>THEMA der Diplomarbeit:</p> <p>Versuche im Technikumsmaßstab zur Untersuchung der Austrocknungsvorgänge in Bettungsmaterialien rund um Fernwärmeleitungen</p> <p>ZIELSETZUNG (stichwortartig):</p> <ul style="list-style-type: none">- Literatursuche und -studium- Grundlagen der Wärmeleitung- Erläuterung der Messprinzipien der unterschiedlichen Messmethoden- Beschreibung der Versuche und Auswertung der Datensituation- Ganglinien der Temperatur- und Feuchtigkeitsentwicklung- Darstellung von Temperaturprofilen zu ausgewählten Zeitpunkten- Analytische Berechnung der auftretenden Wärmeleitfähigkeit- Parameterstudie- Erkenntnisse	
FACHGEBIET: Bodenmechanik und Grundbau ggf. 2. FACHGEBIET:	
BETREUER: O.Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. Stephan Semprich (Name) (Unterschrift) ggf. 2. BETREUER: mitbetreuender Assistent: Oberrat Dipl.-Ing. Otto Leibniz (Name) (Unterschrift)	
AUSGABEDATUM: 22.6.2011	
SPÄTESTER ABGABETERMIN: 23.9.2011	

Beurteilung:

Beurteilung erfolgt durch die Betreuer
--

27.7.11 
.....
Datum und Unterschrift des Studiendekans

Deutsche Fassung:
Beschluss der Curricula-Kommission für Bachelor-, Master- und Diplomstudien vom 10.11.2008
Genehmigung des Senates am 1.12.2008

EIDESSTÄTTLICHE ERKLÄRUNG

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommene Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Graz, am

.....

(Unterschrift)

Englische Fassung:

STATUTORY DECLARATION

I declare that I have authored this thesis independently, that I have not used other than the declared sources / resources, and that I have explicitly marked all material which has been quoted either literally or by content from the used sources.

.....

date

.....

(signature)

Kurzfassung

Titel: Versuche im Technikumsmaßstab zur Untersuchung der Austrocknungsvorgänge in Bettungsmaterialien rund um Fernwärmeleitungen.

Inhalt dieser Diplomarbeit ist die Untersuchung der Wärmeausbreitung rund um Fernwärmeleitungen und die damit im Zusammenhang stehende Austrocknung des Bodens anhand eines Laborgroßversuches.

In der Einleitung erfolgt nach einer kurzen Zusammenfassung der Anforderungen an Bettungsmaterialien von Fernwärmeleitungen eine Beschreibung des als Bettungsmaterial vorgesehenen „Thermosandes“.

In Kapitel 2 wird nach einer Herleitung der für eine Berechnung des Wärmeleitfähigkeitsbeiwertes erforderlichen Formeln der Versuchsaufbau sowie die im Versuch verwendeten Messeinrichtungen und deren Kalibrierung beschrieben.

Kapitel 3 befasst sich mit der Auswertung und Interpretation der Ergebnisse der Laborgroßversuche und dem Vergleich der Bettungsmaterialien „Kabelsand UK4“ und „Thermosand“.

Abschließend werden in Kapitel 4 die Messergebnisse mit den Ergebnissen einer mit dem Programm THERM durchgeführten numerischen Berechnung verglichen und die Möglichkeit einer Rückrechnung des Wärmeleitfähigkeitsbeiwertes untersucht.

Abstract

Title: large scale model tests to investigate the dry up of bedding materials for long distance heat pipes.

This diploma thesis investigates the thermal conductivity around long distance heat pipes and the correlated dry up of the soil by a large scale model test.

The first chapter contains a short summary of the requirements for bedding materials of heat pipes and a description of the determined bedding material called "Thermosand".

In chapter 2 the equations used for calculating the heat conductivity coefficient are derivated and the setup of the large scale model test with the measuring instruments used thereby and their calibration is described.

Chapter 3 attends to the evaluation and interpretation of the results of the laboratory experiment to make a comparison between a conventional bedding sand and "Thermosand".

Finally in chapter 4 a two dimensional simulation of the large scale model tests is done with the computer program THERM and compared with the results of the laboratory experiment to evaluate the possibility to calculate the heat conductivity coefficient from the temperature curve.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Allgemeines	1
1.2	Fernwärmeleitungen	2
1.2.1	Allgemeine Anforderungen an Leitungssysteme	3
1.2.2	Anforderungen an das Verfüllmaterial der Rohrleitungszone	3
2	Grundlagen	4
2.1	Definitionen.....	4
2.1.1	Wassergehalt	4
2.1.2	Umrechnung volumetrischer zu gravimetrischer Feuchte	5
2.1.3	Wärme.....	6
2.1.4	Temperatur.....	6
2.1.5	Temperaturfeld.....	6
2.1.6	Wärmestrom und Wärmestromdichte.....	7
2.1.7	Wärmeleitfähigkeitsbeiwert	8
2.1.8	Wärmeübergangskoeffizient.....	8
2.2	Berechnung der Wärmeleitung	9
2.2.1	Allgemeines.....	9
2.2.2	Eindimensionale Wärmeleitung.....	9
2.2.3	Radialsymmetrische Wärmeleitung (Hohlzylinder)	12
2.2.4	Das Programm „THERM“ zur Berechnung der Wärmeleitung.....	15
2.3	Verwendete Bettungsmaterialien	16
2.3.1	Thermosand	16
2.3.2	Kabelsand UK4	22

2.4	Messeinrichtungen.....	24
2.4.1	Temperaturmessung	24
2.4.2	Wassergehaltsmessung mittels TDR	25
2.5	Materialspezifische Kalibrierung der TDR-Sonden	28
2.5.1	Versuchsanordnung	28
2.5.2	Auswertung für Kabelsand UK4	30
2.5.3	Auswertung für Thermosand	33
2.6	Kalibrieren der Thermoelemente	35
2.7	Durchgeführter Laborversuch im Technikumsmaßstab	36
2.7.1	Aufbau.....	36
2.7.2	Zeitlicher Ablauf Versuch 1 Kabelsand UK4.....	39
2.7.3	Zeitlicher Ablauf Versuch 2 Thermosand	40
3	Auswertung der Versuche	41
3.1	Ausgangslage	41
3.2	Datenaufbereitung	42
3.2.1	Import der Temperaturmesswerte	42
3.2.2	Import der Messwerte der Raumtemperaturmessung	42
3.2.3	Bearbeitung der TDR-Messprotokolle	42
3.3	Ganglinien und Profile	44
3.3.1	Allgemeines.....	44
3.3.2	Auswertung des Versuches mit Kabelsand UK4	45
3.3.3	Auswertung des Versuches mit Thermosand.....	52
3.3.4	Vergleich des zeitlichen Verlaufes des Temperaturanstieges zwischen Kabelsand und Thermosand.....	59

4	Numerische Simulation der Wärmeleitung.....	61
4.1	Berechnung der Temperaturverteilung	61
4.1.1	Berechnung mit THERM	61
4.1.2	Berechnung mit der Formel für Hohlzylinder	64
4.2	Vergleich der Messwerte mit der Berechnung	65
4.2.1	Versuch Kabelsand UK4	65
4.2.2	Versuch Thermosand	67
4.3	Temperaturverlauf bei Verwendung von KVM-Rohren mit Wärmedämmung	69
5	Zusammenfassung und Ausblick.....	70
5.1	Zusammenfassung	70
5.2	Ausblick	71
6	Literaturverzeichnis.....	72
7	Anlagen	75
7.1	Rohdaten Temperaturmessung (1.1.2008)	75
7.2	Rohdaten Temperaturmessung (19.11.2007)	77
7.3	Rohdaten der Wassergehaltsmessung (Auszug).....	78
7.4	Rohdaten der Raumtemperaturmessung.....	80
7.5	Plan 1: Ganglinie des Laborversuches Kabelsand UK4	
7.6	Plan 2: Ganglinie des Laborversuches Thermosand	

Symbole und Einheiten

Große Buchstaben

A	Fläche [m ²]
C _u	Ungleichförmigkeitszahl [1]
D _{Pr}	Verdichtungsgrad [%]
\dot{Q}	Wärmestrom [W]
S _r	Sättigungsgrad [%]
T	Temperatur in Kelvin [K]
U	Elektrische Spannung [V]
V	Volumen [m ³]
V _a	Luftvolumen [m ³]
V _n	Porenvolumen [m ³]
V _s	Feststoffvolumen [m ³]
V _w	Von Wasser eingenommenes Volumen [m ³]

Kleine Buchstaben

c	Ausbreitungsgeschwindigkeit einer elektromagnetischen Welle [m/s]
c ₀	Ausbreitungsgeschwindigkeit im Vakuum [m/s]
c _{gl,600}	Glühverlust [%]
c´	Effektive Kohäsion [kN/m ²]
c´ _{KMR}	Adhäsion Boden - Kunststoffmantelrohr [kN/m ²]
d	Durchmesser [m]
d ₁₀	Wirksamer Korndurchmesser [m]
d ₆₀	Korndurchmesser bei 60% Siebdurchgang [m]
i	Hydraulischer Gradient [1]
k ₁₀	Wasserdurchlässigkeit [m/s]
l	Länge [m]

m	Masse [kg]
m_d	Masse der trockenen Probe [kg]
m_s	Masse der Feststoffe [kg]
m_w	Masse des im Boden vorhandenen Wassers [kg]
n	Porenanteil [%]
\dot{q}	Wärmestromdichte [W/m ²]
r	Radius [m]
s	Schichtdicke [m]
t	Zeit [s]
w	Gravimetrischer Wassergehalt [%]
w_{opt}	Optimaler Wassergehalt [%]
w_{TS}	Wassergehalt gemäß Ofentrocknung für Thermosand [%]
w_{UK4}	Wassergehalt gemäß Ofentrocknung für Kabelsand UK4 [%]
w_{ϑ}	Gravimetrischer Wassergehalt bei der Temperatur ϑ [%]
$w_{\vartheta,TDR}$	Gravimetrischer Wassergehalt aus TDR Messung [%]
x,y,z	Ortskoordinaten

Griechische Buchstaben

α	Wärmeübergangskoeffizient [W/m ² K]
Δw	Differenz der Wassergehalte
ε	Relative Dielektrizitätskonstante
ϑ	Temperatur nach Celsius [°C]
ϑ_{VL}	Vorlauftemperatur [°C]
ϑ_{RL}	Rücklauftemperatur [°C]
ϑ_R	Raumtemperatur [°C]
θ	Volumetrischer Wassergehalt [V-%]
θ_{ϑ}	Volumetrischer Wassergehalt bei der Temperatur ϑ [V-%]
λ	Wärmeleitfähigkeitsbeiwert [W/m K]

π	Kreiszahl, mathematische Konstante $\pi = 3,14159$
ρ	Feuchtdichte [g/cm ³]
ρ_d	Trockendichte [g/cm ³]
ρ_{pr}	Proctordichte [g/cm ³]
ρ_s	Korndichte [g/cm ³]
$\rho_{w,\vartheta}$	Dichte von Wasser bei einer Temperatur ϑ [g/cm ³]
σ_n	Normalspannung [N/cm ²]
φ'	Effektiver Reibungswinkel [°]
φ'_{KMR}	Reibungswinkel zwischen Boden und Kunststoffmantelrohr [°]
φ_r	Restscherwinkel [°]
$\varphi_{r.KMR}$	Restscherwinkel zwischen Boden und Kunststoffmantelrohr [°]

1 Einleitung

1.1 Allgemeines

Der Einsatz von Fernwärme für Heizung und Warmwasserbereitung erfreut sich in den letzten Jahren zunehmender Beliebtheit. Für den Verbraucher ist es eine einfache und platzsparende Alternative, bei der kein Raum für die Heizungsanlage und das Brennstofflager benötigt wird und man sich auch um den Einkauf von Brennmaterial nicht sorgen muss. Für den Betreiber kalorischer Kraftwerke oder von Gaskraftwerken ist der zusätzliche Verkauf von Abwärme als Fernwärme eine Möglichkeit, die Wirtschaftlichkeit seiner Anlage zu erhöhen.

Im ländlichen Raum werden in vielen Fällen nur der Ortskern oder einzelne Gewerbegebiete mit Fernwärme versorgt. Dabei wird gerne der Begriff „Nahwärme“ für Leitungsnetze mit geringer räumlicher Ausdehnung verwendet. Technisch gesehen handelt es sich dabei jedoch auch um Fernwärmenetze. Durch die Lieferung von Holzabfällen als Brennmaterial, für die oft gemeinschaftlich betriebenen Biomasseheizwerke, entsteht in der Landwirtschaft eine zusätzliche Einnahmequelle mit dem positiven Nebeneffekt einer besseren Forstpflge.



Abb. 1: Biowärme Heizwerk in Eggersdorf bei Graz

Aus Sicht des Umweltschutzes bieten Fernwärmenetze im Vergleich zu vielen einzeln verteilten Heizungsanlagen den Vorteil einer besseren Ausnutzung des Brennstoffes und der Möglichkeit zur effizienteren Reinigung der Abgase.

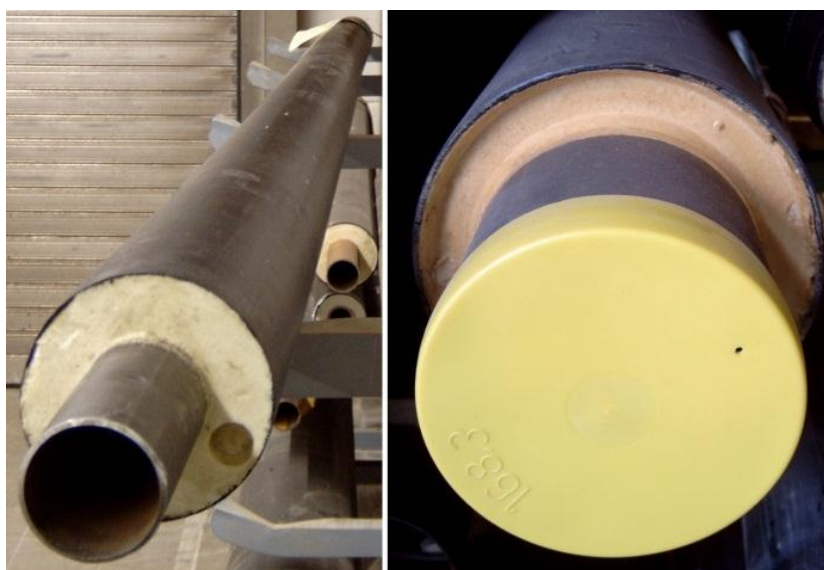
Zukünftig wird die Kühlung mit Fernwärme durch den vermehrten Einsatz von Absorptionskältemaschinen zu einer, über das Jahr betrachtet, gleichmäßigeren Ausnutzung der Fernwärmenetze führen.

1.2 Fernwärmeleitungen

Ein wichtiger Bestandteil des Fernwärmesystems sind die zum Transport des Wärmeträgers notwendigen Leitungssysteme.

Es wird üblicherweise jeweils eine Vorlaufleitung, die den Wärmeträger (meistens Wasser) mit Temperaturen bis zu 130 °C unter Druck zum Verbraucher leitet, und eine Rücklaufleitung, durch die das abgekühlte Wasser zum Wärmeerzeuger zurückfließt, nebeneinander verlegt.

Als Rohrmaterial werden Kunststoffverbundmantelrohre (KVM-Rohre) verwendet. Das KVM-Rohr besteht aus einem Mediumrohr aus Stahl, welches zur Wärmedämmung mit Polyurethanschaum umhüllt wird, und zum Schutz vor Beschädigungen mit einem Mantel aus Polyethylen versehen ist (siehe Abb. 2).



**Abb. 2: KVM-Rohre: links DN50/125, rechts DN150/250
(Fotos von Sönke Kraft, Wikipedia)**

Als Wärmeträger soll gemäß ÖNORM EN13941 aufbereitetes Wasser verwendet werden, das durch Enthärtung, Entsalzung, Entlüftung und den Zusatz von Chemikalien oder auf andere Art und Weise behandelt worden ist, so dass innere Korrosion und Ablagerungen in den Leitungen vermieden werden.

1.2.1 Allgemeine Anforderungen an Leitungssysteme

Gemäß ÖNORM EN 13941 werden folgende Systemeigenschaften gefordert:

- Ausreichende Dauerhaftigkeit, Widerstandsfähigkeit und Zuverlässigkeit bezüglich der inneren und äußeren Belastungen.
- Ausreichende Sicherheit, damit keine unüblichen Betriebsbedingungen oder Unfälle Personen oder Umwelt gefährden.
- Gute Energiewirtschaftlichkeit
- Gute Betriebseigenschaften
- Gesicherte Versorgung

1.2.2 Anforderungen an das Verfüllmaterial der Rohrleitungszone

- Maximale Korngröße ≤ 32 mm
- Eine Kornverteilung mit maximal 10 M-% mit $d \leq 0,075$ mm oder 3 M-% mit $d \leq 0,02$ mm
- Ungleichförmigkeitszahl $C_u = \frac{d_{60}}{d_{10}} > 1,8$
- Behinderung der Längsdehnung durch definierte Reibung
- Gleichmäßige homogene Bettung durch sorgfältige Verdichtung (Die Reibungskoeffizienten des Materials beruhen auf einer Standard-Proctordichte von durchschnittlich 97 % bis 98 %)
- Das Material sollte keine schädlichen Mengen an Pflanzenresten, Humus, Lehm- oder Schlammklumpen enthalten
- Große, scharfkantige Körner, die Rohr und Verbindungen beschädigen können, sollen vermieden werden.
- Vermeidung einer nicht zulässigen Erwärmung des Mantelrohres über 50°C bei gleichzeitiger Minimierung der Wärmeverluste.

Der üblicherweise verwendete Kabelsand, meistens in Form von Quarzsand, erfüllt diese Anforderungen zufriedenstellend, hat aber eine hohe Wärmeleitfähigkeit. Um die Wärmeverluste beim Transport so gering wie möglich zu halten, kann die Dicke der Polyurethandämmung erhöht werden oder es können andere Bettungsmaterialien mit höheren Wärmedämmeigenschaften zum Einsatz kommen. Ein solches Material ist der von der Firma KE KELIT patentierte Thermosand, der auch als „Fohnsdorfer Halditt“ bezeichnet wird.

2 Grundlagen

2.1 Definitionen

2.1.1 Wassergehalt

Der Wassergehalt w einer Bodenprobe ist das Verhältnis der Masse des im Boden vorhandene Wassers m_w das bei einer Temperatur von 105°C verdampft, zur Masse m_d der trockenen Probe (ÖNORM B4410).

$$w = \frac{m_w}{m_d} * 100 \quad (1)$$

w	[%]	Gravimetrischer Wassergehalt
m_w	[kg]	Masse des im Boden vorhandenen Wassers
m_d	[kg]	Masse der trockenen Probe

Die Angabe des Wassergehaltes w erfolgt in Massenprozent.

Erfolgt die Angabe des Wassergehaltes in Volumsprozent gilt: Die volumetrische Feuchte θ eines Bodens ist das Verhältnis des vom Wasser eingenommenen Volumens V_w zum Gesamtvolumen V des betrachteten Bodenprismas bzw. -bereiches.

2.1.2 Umrechnung volumetrischer zu gravimetrischer Feuchte

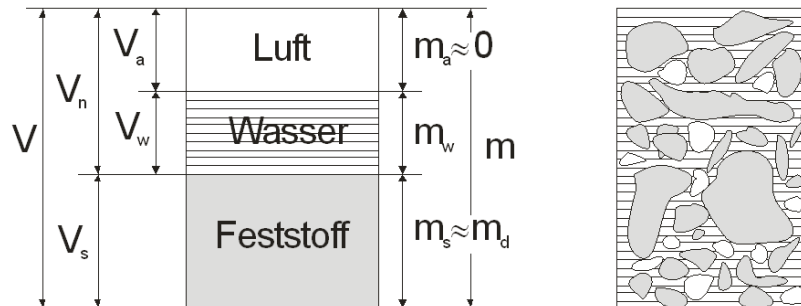


Abb. 3: Boden als Dreikomponentensystem, volumetrische und gravimetrische Betrachtung. (Semprich, Henögl, 2003)

Der gravimetrische Wassergehalt w ist physikalisch mit der volumetrischen Feuchte θ verbunden und kann, wenn die Trockendichte ρ_d des untersuchten Bodens bestimmt wurde, über folgende Umrechnungsgleichung berechnet werden:

$$w_{\vartheta} = \frac{\theta_{\vartheta} * \rho_{w,\vartheta}}{\rho_d} \quad (2)$$

w_{ϑ}	[M-%]	Gravimetrischer Wassergehalt bei der Temperatur ϑ
θ_{ϑ}	[Vol-%]	Volumetrische Feuchte bei der Temperatur ϑ
$\rho_{w,\vartheta}$	[kg/m ³]	Dichte des Wassers bei der Temperatur ϑ
ϑ	[°C]	Temperatur nach Celsius
ρ_d	[kg/m ³]	Trockendichte des Bodens

2.1.3 Wärme

Wärme ist eine Energieform. Es handelt sich dabei physikalisch gesehen um die Bewegungsenergie der Moleküle und Atome eines Stoffes. Die Maßeinheit für die Energiemenge ist Joule [J] oder Wattsekunde [Ws].

2.1.4 Temperatur

Die Temperatur T ist das Maß für den Wärmezustand eines Körpers. Sie ist eine physikalische Basisgröße und hat die SI-Einheit Kelvin [K].

Die im deutschsprachigen Raum verwendete Celsius Temperatur ϑ entspricht der thermodynamischen Temperatur in Kelvin, aber durch Verschiebung des Nullpunktes mit einem um 273,15 kleineren Zahlenwert.

$$\vartheta = T - 273,15 \quad (3)$$

ϑ	[°C]	Temperatur nach Celsius
T	[K]	Temperatur in Kelvin

2.1.5 Temperaturfeld

Jedem Punkt im betrachteten Raum wird eine Temperatur zugeordnet. Diese Temperatur kann sich mit der Zeit ändern, sie ist somit eine Funktion vom Ort x und der Zeit t .

$$\vartheta = \vartheta(x, t) \tag{4}$$

Hängt die Temperatur nicht von der Zeit ab spricht man von einem stationären Temperaturfeld. Spielt die Zeit eine Rolle handelt es sich um ein instationäres oder nicht stationäres Temperaturfeld.

Verbindet man jene Punkte die zu einem Zeitpunkt dieselbe Temperatur aufweisen erhält man isotherme Flächen oder bei Betrachtung in einer Ebene isotherme Linien.

Die stärkste Änderung der Temperatur erfolgt normal zu den Isothermen und ist durch den Temperaturgradienten gegeben (Baer, Stephan, 2006).

$$\text{grad } \vartheta = \frac{\partial \vartheta}{\partial x} + \frac{\partial \vartheta}{\partial y} + \frac{\partial \vartheta}{\partial z} \tag{5}$$

2.1.6 Wärmestrom und Wärmestromdichte

Der Wärmestrom \dot{Q} gibt an, wie viel Wärme pro Zeiteinheit übertragen wird und hat die Einheit Watt [W].

Die Wärmestromdichte \dot{q} gibt an, welcher Wärmestrom pro Flächeneinheit übertragen wird. Ihre Einheit ist Watt pro Quadratmeter [W/m²] (Böckh, Wetzel, 2009)

$$\dot{q} = \frac{\dot{Q}}{A} \tag{6}$$

\dot{q}	[W/m ²]	Wärmestromdichte
\dot{Q}	[W]	Wärmestrom
A	[m ²]	Durchströmte Fläche

2.1.7 Wärmeleitfähigkeitsbeiwert

Der Wärmeleitfähigkeitsbeiwert λ ist eine charakteristische Materialgröße.

Sie gibt an, welche Wärmemenge durch eine 1 Quadratmeter große und 1 Meter dicke Schichte eines Stoffes bei einer Temperaturdifferenz von 1 Kelvin in einer Sekunde durchfließt.

Die Wärmeleitfähigkeit hängt von der Temperatur und vom Druck ab, wobei ihre Druckabhängigkeit nur bei Gasen und Flüssigkeiten beachtet zu werden braucht. Die Temperaturabhängigkeit ist oft nicht stark ausgeprägt, so dass sie vernachlässigt werden kann (Baer, Stephan, 2006)

2.1.8 Wärmeübergangskoeffizient

Der Wärmeübergangskoeffizient α gibt die Wärmemenge an, die in einer Sekunde über die Fläche von 1 Quadratmeter bei einem Temperaturunterschied von 1 Kelvin von der Oberfläche eines Stoffes auf das ihn berührende Fluid (Gas oder Flüssigkeit) oder von diesem auf den Stoff übertragen wird.

Der Wärmeübergangskoeffizient oder auch Wärmeübergangszahl ist eine spezifische Kennzahl einer Kombination von Materialien.

2.2 Berechnung der Wärmeleitung

2.2.1 Allgemeines

Wird Energie in Form von Wärme nur auf Grund eines Temperaturunterschiedes übertragen, wird dieser Vorgang als Wärmeübertragung bezeichnet. Gemäß dem zweiten Hauptsatz der Thermodynamik fließt die Wärme nur in Richtung der fallenden Temperatur (Baer, Stephan, 2006).

Der Wärmetransport kann auf drei unterschiedliche Arten erfolgen.

Bei Wärmeleitung wird die Energie innerhalb eines festen Stoffes oder einer ruhenden Flüssigkeit von Molekül zu Molekül weitergegeben.

Als Konvektion wird der Wärmetransport in bewegten Flüssigkeiten oder Gasen durch Ortsveränderung der Teilchen infolge einer Strömung bezeichnet.

Wird die Energie durch elektromagnetische Wellen von Oberfläche zu Oberfläche transportiert wird der Vorgang als Wärmestrahlung bezeichnet. Es wird dafür kein Medium zur Übertragung benötigt.

Im weiteren Verlauf dieser Arbeit werden nur mehr die Wärmeleitung und die Konvektion berücksichtigt, Wärmestrahlung wird vernachlässigt.

2.2.2 Eindimensionale Wärmeleitung

In Abb. 4 wird eine ebene Wand mit der Dicke s und der Wärmeleitfähigkeit λ dargestellt. Durch die thermische Isolierung an der Ober- und Unterseite des Wandstückes kann die Wärme nur mehr in x -Richtung transportiert werden und somit ergibt sich eine eindimensionale Problemstellung.

Bei gleicher Querschnittsfläche A auf beiden Seiten der Wand ergibt sich eine konstante Wärmestromdichte und somit gilt für den Wärmestrom:

$$\dot{Q} = -\lambda * A * \frac{d\vartheta}{dx} \quad (7)$$

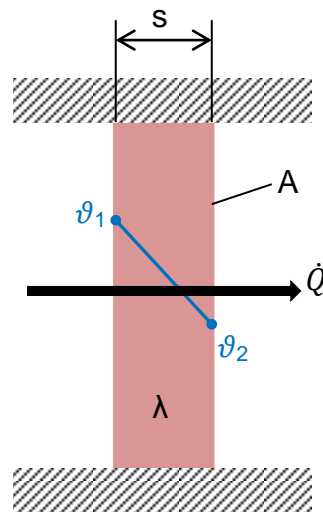


Abb. 4: Wärmeleitung in einer ebenen Wand
(nach Böckh, Wetzel, 2009)

Da der Wärmestrom konstant bleibt, folgt bei von der Temperatur unabhängiger Wärmeleitfähigkeit

$$\dot{Q} = \frac{\lambda}{s} * A * (\vartheta_1 - \vartheta_2) \quad (8)$$

\dot{Q}	[W]	Wärmestrom
λ	[W/m ² K]	Wärmeleitfähigkeitsbeiwert
s	[m]	Schichtdicke
A	[m ²]	Querschnittsfläche
ϑ_1	[°C]	Temperatur auf der wärmeren Seite der Wand
ϑ_2	[°C]	Temperatur auf der kälteren Seite der Wand

In einer ebenen Wand mit konstanter Wärmeleitfähigkeit ist der Temperaturgradient linear (Böckh, Wetzel, 2009).

Besteht nun das zu betrachtende Wandelement aus zwei Schichten mit unterschiedlicher Wärmeleitfähigkeit so gilt:

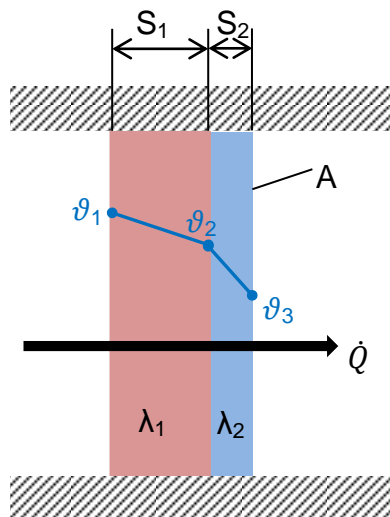


Abb. 5: Wärmeleitung in einer ebenen Wand bestehend aus zwei Schichten

$$\dot{Q}_1 = A * \frac{s_1}{\lambda_1} * (\vartheta_1 - \vartheta_2) \quad (9)$$

$$\dot{Q}_2 = A * \frac{s_2}{\lambda_2} * (\vartheta_2 - \vartheta_3) \quad (10)$$

Da der Wärmestrom durch beide Schichten der Wand gleich sein muss, kann durch Gleichsetzen der Gleichungen (9) und (10) bei bekannten Schichtdicken und Temperaturen, ein Wärmeleitfähigkeitsbeiwert oder bei bekannten Wärmeleitfähigkeitsbeiwerten ein Temperaturwert berechnet werden.

$$\frac{s_1}{\lambda_1} * (\vartheta_1 - \vartheta_2) = \frac{s_2}{\lambda_2} * (\vartheta_2 - \vartheta_3) \quad (11)$$

λ_1, λ_2	[W/m ² K]	Wärmeleitfähigkeitsbeiwert der Schichte 1 oder 2
s_1, s_2	[m]	Schichtdicke der jeweiligen Schichte
$\vartheta_1, \vartheta_2, \vartheta_3$	[°C]	Temperatur an den Schichtgrenzen

2.2.3 Radialsymmetrische Wärmeleitung (Hohlzylinder)

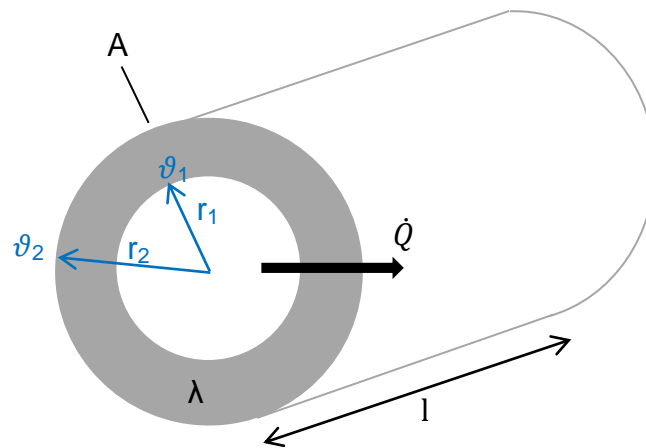


Abb. 6: Wärmeleitung durch eine Zylinderwand

Die Querschnittsfläche A durch die der Wärmestrom fließt ist in diesem Fall nicht mehr konstant sondern eine Funktion vom Radius. Die Gleichung (7) wird somit zu:

$$\dot{Q} = -\lambda * 2r\pi * l * \frac{d\vartheta}{dr} \quad (12)$$

Umgeformt zu:

$$\frac{1}{r} dr = \frac{-\lambda * 2\pi * l}{\dot{Q}} d\vartheta \quad (13)$$

Durch Integration erhält man:

$$\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right) = \lambda * \frac{2\pi l}{\dot{Q}} * (\vartheta_1 - \vartheta_2) \quad (14)$$

und daraus für den Wärmestrom

$$\dot{Q} = \lambda * \frac{2\pi * l}{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)} * (\vartheta_1 - \vartheta_2) \quad (15)$$

\dot{Q}	[W]	Wärmestrom
λ	[W/m ² K]	Wärmeleitfähigkeitsbeiwert
π	[1]	Kreiszahl, Konstante $\pi = 3,14159$
l	[m]	Länge des Zylinders
r_1	[m]	Innenradius
r_2	[m]	Außenradius
ϑ_1	[°C]	Temperatur innen
ϑ_2	[°C]	Temperatur außen

Bei einem mehrschichtigen Zylinder gilt analog zur ebenen Wand, dass der Wärmestrom konstant bleiben muss.

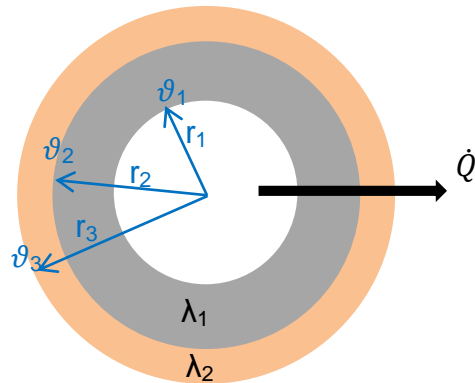


Abb. 7: Hohlzylinder mit zwei Schichten

Daraus folgt:

$$\lambda_1 * \frac{2\pi * l}{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)} * (\vartheta_1 - \vartheta_2) = \lambda_2 * \frac{2\pi * l}{\ln\left(\frac{r_3}{r_2}\right)} * (\vartheta_2 - \vartheta_3) \quad (16)$$

Für λ_2 gilt bei radialsymmetrischer Schichtenfolge

$$\lambda_2 = \lambda_1 * \frac{\ln\left(\frac{r_3}{r_2}\right)}{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)} * \frac{(\vartheta_1 - \vartheta_2)}{(\vartheta_2 - \vartheta_3)} \quad (17)$$

λ_1, λ_2	[W/m ² K]	Wärmeleitfähigkeitsbeiwert der Schichte 1 oder 2
r_1, r_2, r_3	[m]	Radius der Schichtgrenzen gemäß Abb. 7
$\vartheta_1, \vartheta_2, \vartheta_3$	[°C]	Temperatur an den Schichtgrenzen

2.2.4 Das Programm „THERM“ zur Berechnung der Wärmeleitung

Zusätzlich zur Berechnung mit den Formeln für radialsymmetrische Schichtenfolge wurde eine Simulation mit dem Programm THERM durchgeführt.

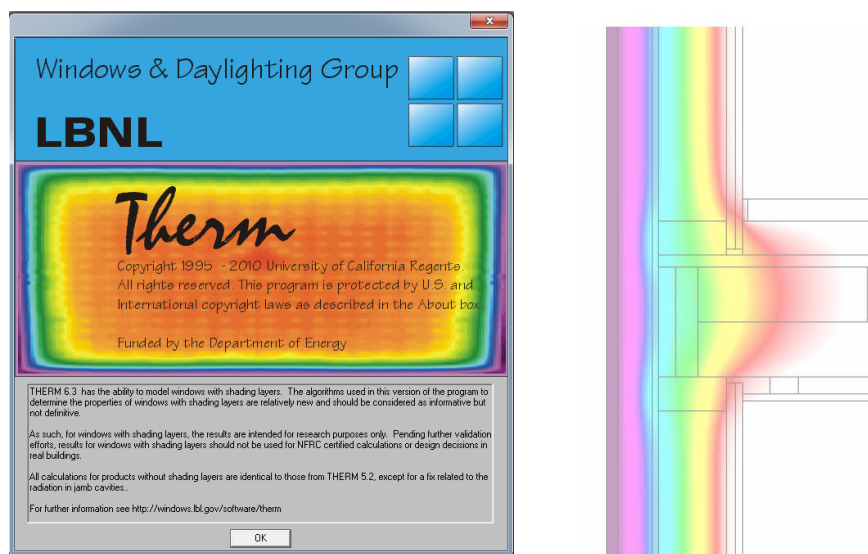


Abb. 8: Programm THERM 6.3 Infoscreen und grafische Darstellung eines Ergebnisses

THERM ist ein EDV-Programm zur zweidimensionalen Berechnung der Wärmeleitung und zum Auffinden von Wärmebrücken in Gebäudeteilen. Entwickelt wurde das Programm vom Lawrence Berkeley National Laboratory (LBNL) in Kalifornien, USA.

Nach einer Registrierung auf <http://windows.lbl.gov/> kann das Programm in der aktuellen Version bezogen und verwendet werden. LBNL erteilt eine gebührenfreie unbefristete Lizenz für die Benutzung. Die Software sowie eine ebenfalls erhältliche Beschreibung sind nur in englischer Sprache verfügbar.

Die Berechnung der Wärmeleitung erfolgt nach der Methode der Finiten Elemente. Das Programm arbeitet mit grafischer Eingabe der Querschnitte ebenso wie mit numerischer Eingabe über den Ziffernblock. Als weitere Möglichkeit besteht der Import von Dateien aus AutoCAD im DXF-Format. Wurde die Vorlage mit Polylinien gezeichnet, können die Teilflächen direkt importiert werden, anderenfalls müssen die Querschnitte nachgezeichnet werden. In einer Materialdatenbank sind einige Materialien vordefiniert, es können jedoch beliebig

neue Materialien angelegt werden. Nach Definition der Randbedingungen erfolgen die Erstellung des FE-Netzes und die Berechnung automatisch auf Knopfdruck.

Die Ausgabe der Ergebnisse erfolgt nur grafisch, es können aber verschiedene Darstellungsformen gewählt werden.

2.3 Verwendete Bettungsmaterialien

2.3.1 Thermosand

2.3.1.1 Herkunft

Schon im 17. Jahrhundert wurde im obersteirischen Fohnsdorf Kohle abgebaut. Seit 1889 betrieb die Österreichische Alpine Montangesellschaft den Untertagebergbau zur Gewinnung von Kohle für die Stahlwerke in Judenburg und Zeltweg. In den Jahren bis zur Schließung im Jahr 1978 wurde das Abraummateriale auf einer bis zu 100 Meter hohen und mehrere Hektar großen Halde aufgeschüttet.

Dieses Abraummateriale bestand zum größten Teil aus Schluff und Ton, hatte aber noch einen etwa 10 prozentigen Anteil an Kohle. Durch thermische Umwandlung dieser Kohlereste erfolgte in Teilen der Halde ein Prozess, der dem Brennen von Ziegeln bei hoher Temperatur gleicht. Es entstand dadurch ein klinkerähnliches Material, welches heute abgebaut wird und nach Brechen und Sieben zu Thermosand der Korngröße 0 bis 4 mm klassiert wird und als Tennissand oder Dämmmateriale Verwendung findet.



**Abb. 9: Abbau von Thermosand in der Halde in Fohnsdorf, Stmk.
(Lokalausweis am 14. August 2011)**

2.3.1.2 Bodenmechanische Eigenschaften

Die bodenmechanischen Eigenschaften wurden am Institut für Bodenmechanik und Grundbau der Technischen Universität Graz ermittelt (Semprich, Henögl, 2003)

Thermosand weist eine Korndichte von $\rho_s = 2,78 \text{ g/cm}^3$ auf.

Die Sieb und Schlämmanalyse gemäß ÖNORM B4412 ergab eine Kornverteilung mit einem Ton und Schluffanteil ($d < 0,063 \text{ mm}$) von 22,8 M-%, einem Sandanteil ($0,063 < d < 2 \text{ mm}$) von 74,3 M-% und einem Kiesanteil von 2,9 M-% bei einem Größtkorn von 4 mm.

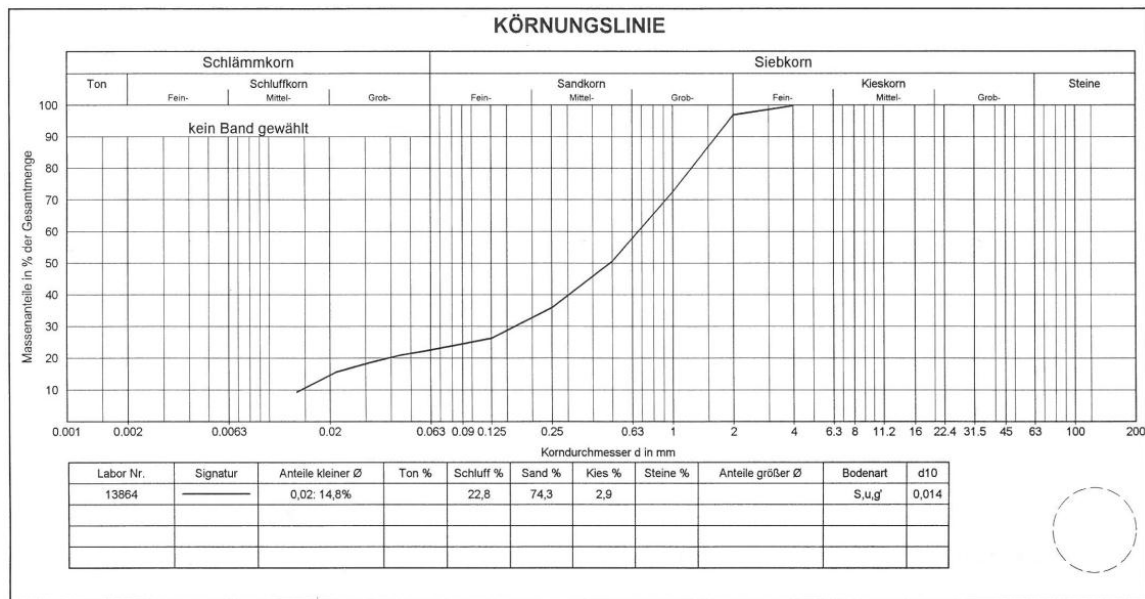


Abb. 10: Kornverteilung von Thermosand (Semprich, Henögl, 2003)

Bodenmechanisch wird er als gering kiesiger, schluffiger Sand bezeichnet.

Der wirksame Korndurchmesser d_{10} liegt bei 0,014 mm.

Die Ungleichförmigkeitszahl C_u beträgt 47.

Der Anteil an organischen Beimengungen wurde mittels Glühverlust gemäß DIN 18128 ermittelt und ergab einen Massenverlust von $c_{gl,600} = 1,6$ M-% bezogen auf die Trockenmasse.

Um das Verdichtungsverhalten zu untersuchen, wurde die Proctorkurve gemäß ÖNORM 4418 anhand von 5 Proben mit unterschiedlichen Wassergehalten von $w = 21,3 \%$, $22,7 \%$, $23,9 \%$, $25,3 \%$ und $28,2 \%$ und den zugehörigen Sättigungsgraden $S_r = 61, 67, 72, 77$ und 84% ermittelt. Es ergaben sich Trockendichten zu $\rho_d = 1,41, 1,43, 1,45, 1,46$ und $1,44$ g/cm³.

Der optimale Wassergehalt beträgt $w_{opt} = 25,6 \%$. Die dem Verdichtungsgrad $D_{Pr} = 100 \%$ entsprechende Proctordichte hat sich zu $\rho_{Pr} = 1,46$ g/cm³ ergeben. Der Porenanteil schwankt zwischen $n = 48 \%$ und 49% .

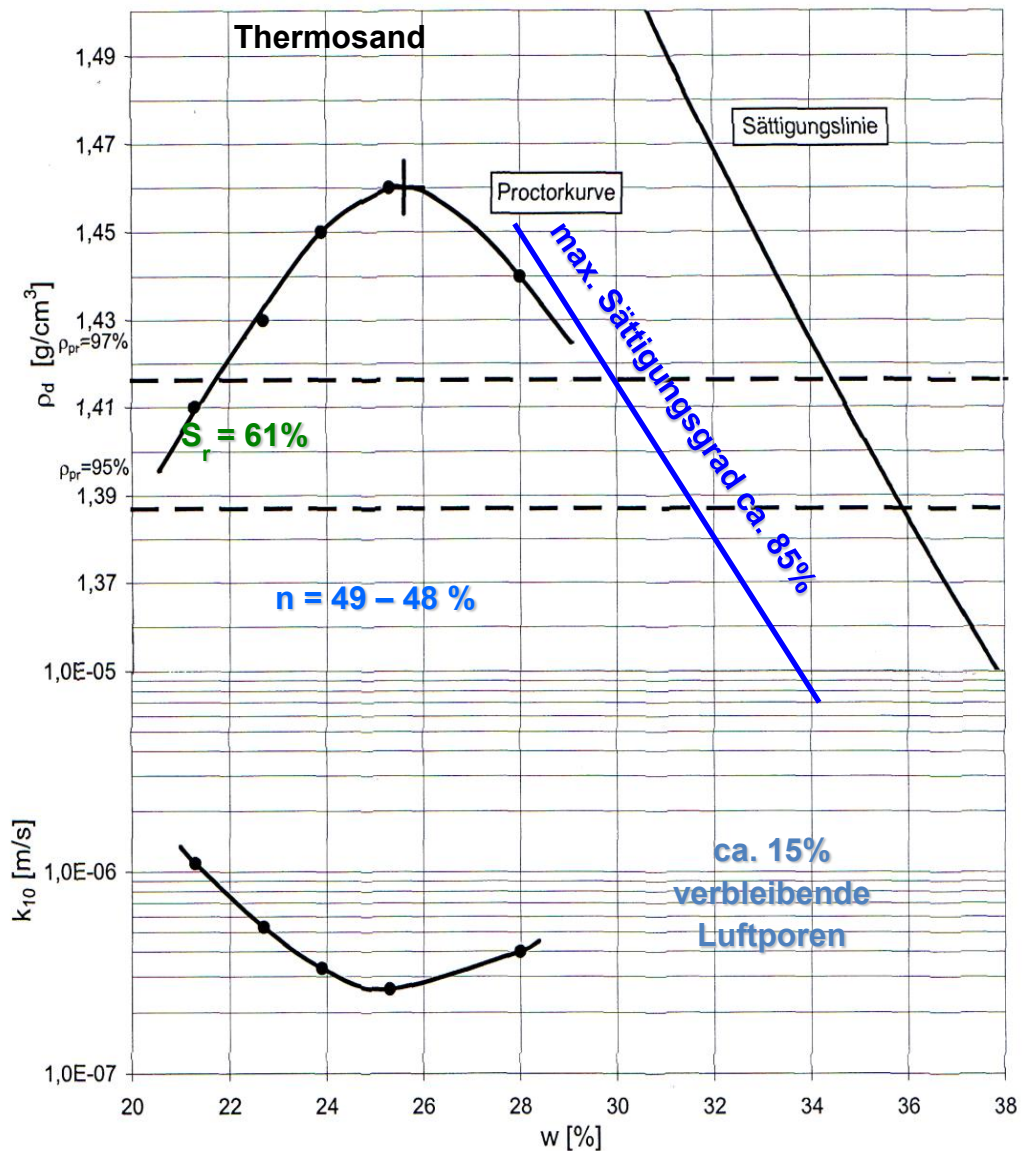


Abb. 11: Proctorkurve und Durchlässigkeitsbeiwerte von Therмосand (Henögl, 2006)

Der Durchlässigkeitsbeiwert k_{10} wurde gemäß ÖNORM B4422-1 an Proben mit 10 cm Durchmesser und 12 cm Höhe bei einem hydraulische Gefälle $i = 30$ bestimmt. Einbaudichte und Wassergehalt entsprachen denen des Proctorversuches. Nach zweimonatigem Verbleib in den triaxialen Durchlässigkeitszellen ergaben die Messungen Durchlässigkeitsbeiwerte von $k_{10} = 1,1 \cdot 10^{-6}$, $5,3 \cdot 10^{-7}$, $3,3 \cdot 10^{-7}$, $2,6 \cdot 10^{-7}$ und $4,0 \cdot 10^{-7}$ m/s, im Mittel $5,2 \cdot 10^{-7}$ m/s.

Die Bestimmung des effektiven Reibungswinkels φ' und der Kohäsion c' erfolgte durch konsolidiert drainierte Rahmenscherversuche in Scherbüchsen mit einer Probenabmessung von $10 \cdot 10 \cdot 2$ cm bei konstanter Schergeschwindigkeit von 0,013 mm/min und Normalspannungen von $\sigma_n = 5, 10$ und 15 N/cm². Die Versuche wurden über den Bruchpunkt mit einer Schergeschwindigkeit von 2,33 mm/min fortgesetzt um den Restscherwinkel φ_r zu ermitteln.

Der innere Reibungswinkel φ' liegt zwischen $34,5^\circ$ für $\rho_d = 1,41$ und $44,9^\circ$ für $\rho_d = 1,46$ g/cm³, im Mittel bei $\varphi' = 38,2^\circ$. Zur Mobilisierung der maximalen Scherfestigkeit sind Scherwege von 4,3 bis 13,0 mm erforderlich. Die effektive Kohäsion liegt zwischen $c' = 8,3$ N/cm² und $23,0$ N/cm² bei einem Mittelwert von $15,5$ N/cm². Der Restscherwinkel φ_r liegt zwischen $30,8^\circ$ und $36,0^\circ$, im Mittel bei $34,0^\circ$.

In weiteren Scherversuchen wurden Reibungswinkel und Adhäsion zwischen Thermosand und dem Mantel des KVM-Rohres ermittelt. In mehreren Serien wurden Proben mit verschiedenen Trockendichten zwischen $\rho_d = 1,41$ und $1,46$ g/cm³ in den oberen Scherrahmen eingebaut. In einem ersten Schritt wurden neue und anschließend durch die ersten Versuche zerkratzte Oberflächen des Mantelrohres in den unteren Scherrahmen eingebaut.

Der Reibungswinkel φ'_{KMR} beträgt bei neuem Rohrmaterial zwischen $24,0^\circ$ und $32,7^\circ$ und bei zerkratztem Rohrmaterial zwischen $26,7^\circ$ und $33,8^\circ$.

Für die Adhäsion c'_{KMR} ergaben sich Werte zwischen $2,8$ und $3,9$ N/cm² bei glatten und zwischen $3,2$ und $4,3$ N/cm² bei zerkratztem Rohrmaterial.

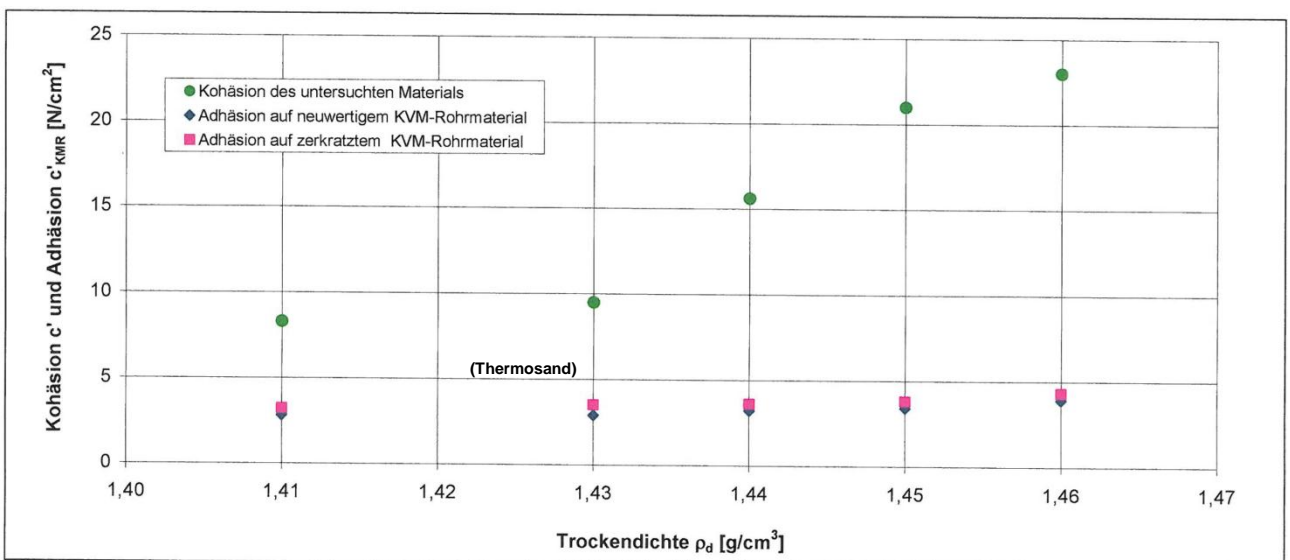


Abb. 12: Zusammenhang zwischen Trockendichte ρ_d und Kohäsion bzw. Adhäsion (Semprich, Henögl, 2003)

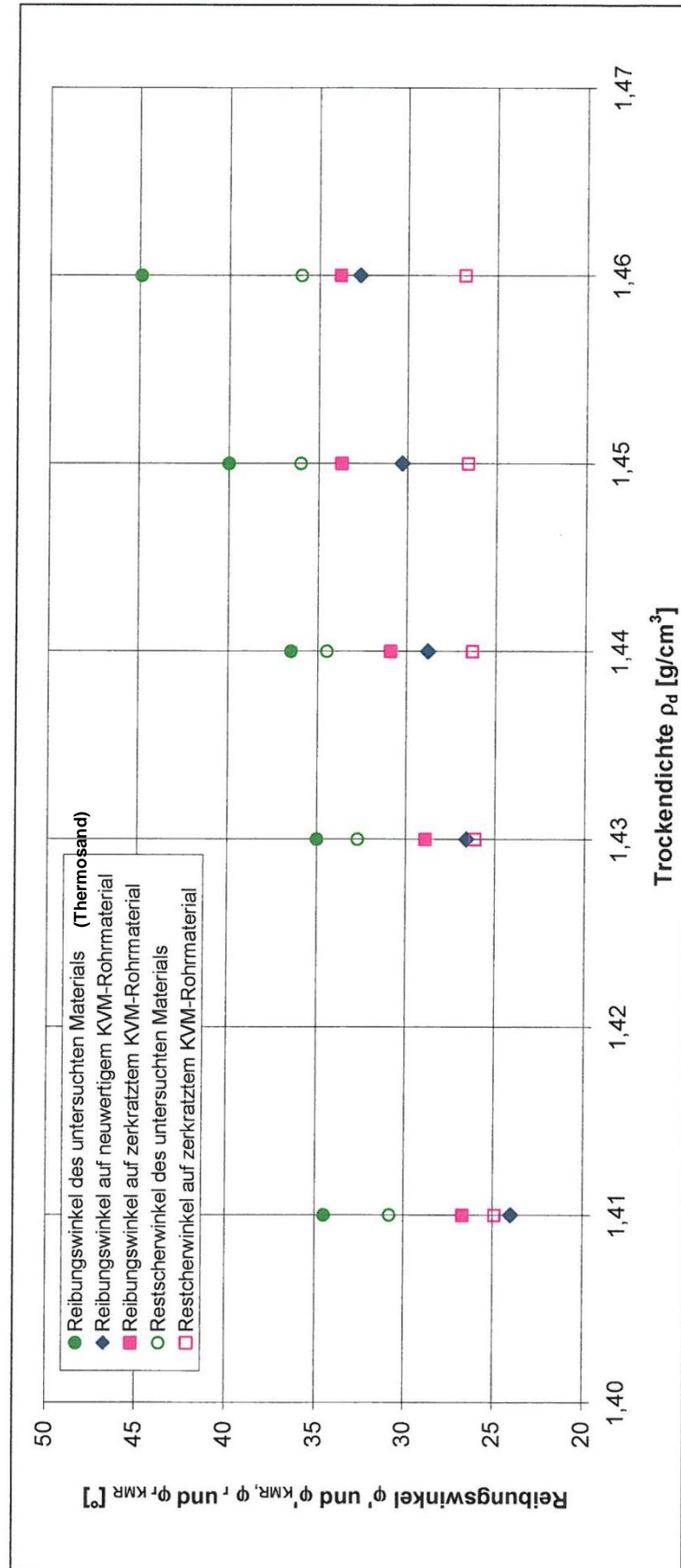


Abb. 13: Zusammenhang zwischen Trockendichte ρ_d und den ermittelten Reibungswinkeln (Semprich, Henögl, 2003)

2.3.2 Kabelsand UK4

Der in den Versuchen verwendete Kabelsand UK4 stammt von der Firma Schwarzl Schotter und Betonwerk BetriebsgesmbH in Unterpremstätten bei Graz. Die bodenmechanischen Eigenschaften wurden am Institut für Bodenmechanik und Grundbau der Technischen Universität Graz ermittelt.

Der Kabelsand UK4 weist eine Korndichte von $\rho_s = 2,72 \text{ g/cm}^3$ auf.

Die Sieb und Schlämmanalyse ergab eine Kornverteilung mit einem Ton und Schluffanteil ($d < 0,063 \text{ mm}$) von 6,3 M-%, einem Sandanteil ($0,063 < d < 2 \text{ mm}$) von 84,7 M-% und einem Kiesanteil von 9,0 M-% bei einem Größtkorn von 4 mm.

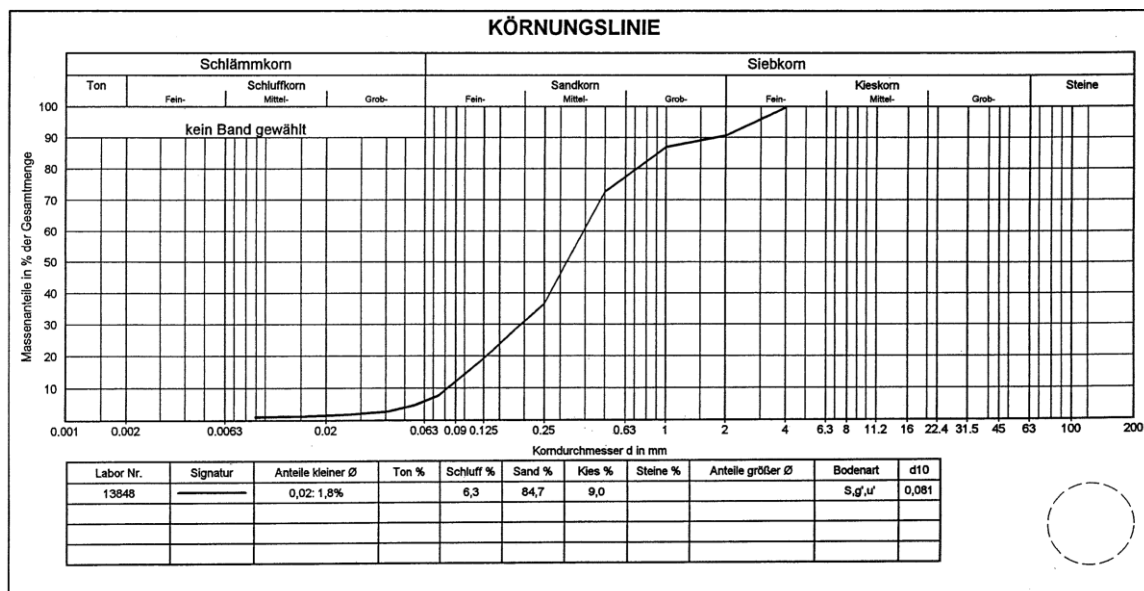


Abb. 14: Kornverteilung von Kabelsand UK4

Der wirksame Korndurchmesser d_{10} liegt bei 0,081 mm.

Die Ungleichförmigkeitszahl C_u beträgt 5.

Der Anteil an organischen Beimengungen, ermittelt mittels Glühverlust gemäß DIN 18128 ergab einen Massenverlust von $c_{gl,600} = 0,4 \text{ M-%}$ bezogen auf die Trockenmasse.

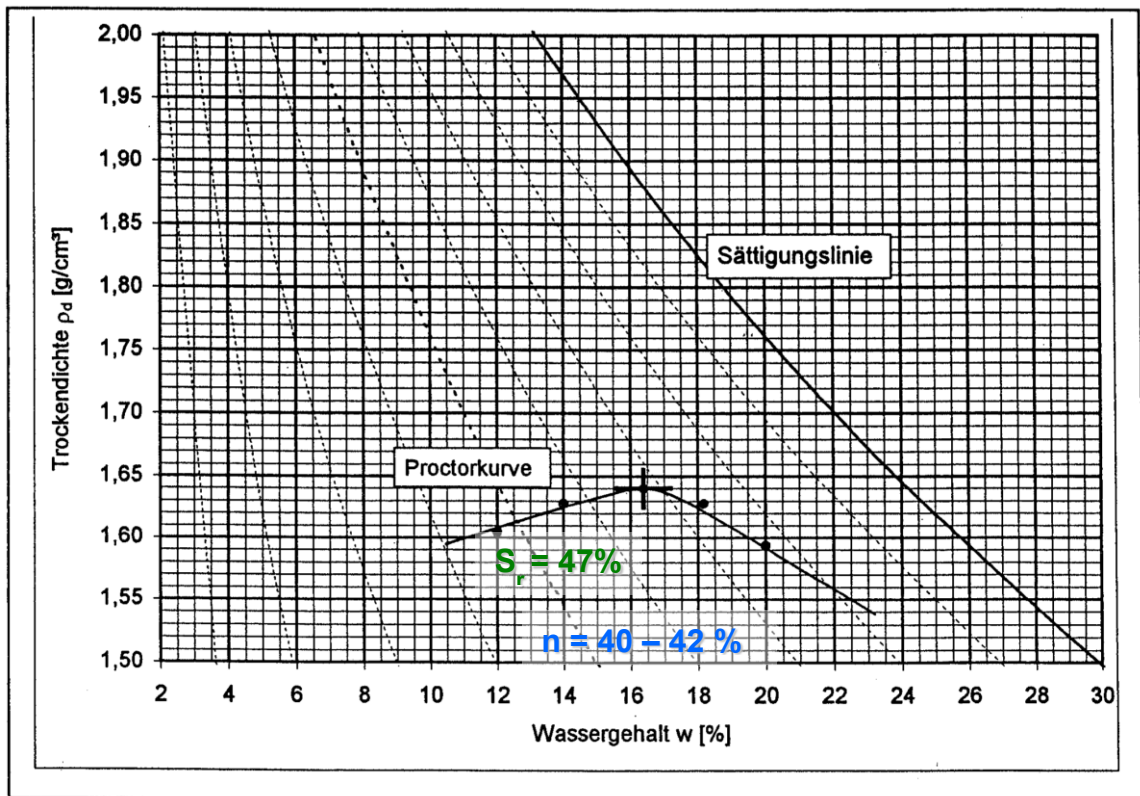


Abb. 15: Proctorkurve von Kabelsand UK4

Die Proctorkurve wurden anhand von 5 Proben mit den Wassergehalten von $w = 12,0\%$, $14,0\%$, $16,4\%$, $18,2\%$ und $20,0\%$ und den zugehörigen Sättigungsgraden $S_r = 47, 57, 68, 74$ und 77% ermittelt. Es ergaben sich Trockendichten zu $\rho_d = 1,60, 1,63, 1,64, 1,63$ und $1,59 \text{ g/cm}^3$.

Bei dem optimalen Wassergehalt von $w_{\text{opt}} = 16,4\%$ ergab sich die Proctordichte zu $\rho_{Pr} = 1,64 \text{ g/cm}^3$.

Der effektive Reibungswinkel φ' und die Kohäsion c' wurden durch konsolidiert drainierte Rahmenscherversuche bei konstanter Schergeschwindigkeit von $0,003 \text{ mm/min}$ und Normalspannungen von $\sigma_n = 10, 20$ und 35 N/cm^2 ermittelt. Die Versuche wurden über den Bruchpunkt mit einer Schergeschwindigkeit von $2,33 \text{ mm/min}$ fortgesetzt um den Restscherwinkel φ_r zu ermitteln.

Der innere Reibungswinkel liegt bei $\varphi' = 42,0^\circ$. Zur Mobilisierung der maximalen Scherfestigkeit sind Scherwege von $3,4$ bis $7,6 \text{ mm}$ erforderlich. Die effektive Kohäsion beträgt $c' = 3,7 \text{ N/cm}^2$ und der Restscherwinkel liegt bei $\varphi_r = 41,2^\circ$.

2.4 Messeinrichtungen

In diesem Kapitel werden die im Laborgroßversuch verwendeten Messeinrichtungen für Temperatur- und Wassergehaltsmessung beschrieben.

2.4.1 Temperaturmessung

Die Messung der Temperatur erfolgte mit Thermoelementen des Typ K und der Datenerfassungseinheit Spider 8 (siehe Abb. 16). Die Speicherung der Messwerte erfolgte mit der Aufzeichnungssoftware „Catman“ von HBM.

Die Thermoelemente sind für einen Anwendungsbereich von -270 °C bis 1372 °C geeignet. Die von den Thermoelementen erzeugte Spannung liegt zwischen $-6458\text{ }\mu\text{V}$ bei -270 °C und $54886\text{ }\mu\text{V}$ bei 1372 °C . Ihre Messgenauigkeit liegt bei $\pm 1,5\text{ °C}$ im Bereich zwischen -40 °C und 375 °C .

Die Elemente bestehen aus zwei elektrischen Leitern verschiedener Metalle die an einem Ende miteinander verbunden sind. An dieser Berührungsstelle entsteht eine elektrische Spannung, die temperaturabhängig ist (Seebeck-Effekt). Diese Spannung wird von der Datenerfassungseinheit gemessen und in einen Temperaturwert umgerechnet.



Abb. 16: links: Datenerfassungseinheit Spider 8 rechts: Thermoelement Typ K

Bei den Thermoelementen des Typs K besteht der positive Draht aus einer Legierung aus 90% Nickel, 9% Chrom und je 0,5% Eisen und Silizium. Der

negative Draht besteht zu ca. 95 bis 96% aus Nickel, 1 bis 1,5% Silizium, 1 bis 2,3% Aluminium, 1 bis 3,2% Mangan und bis zu 0,5% Kobalt (Rössel Messtechnik).

2.4.2 Wassergehaltsmessung mittels TDR

Die Time-Domain-Reflectometrie (TDR) basiert auf der von Faraday (1859) erkannten Eigenschaft, dass das einen Leiter umgebende Medium dessen elektrisches Feld beeinflusst. Faraday platzierte im Vakuum verschiedene Nichtleiter zwischen den Platten eines Kondensators und stellte dabei eine Änderung der Kapazität fest. Das Verhältnis der Kapazität des Kondensators bei einem bestimmten Material zu der Kapazität im Vakuum nannte er relative Dielektrizitätskonstante ε .

Die Dielektrizitätskonstante eines Mediums, in dem sich ein elektromagnetisches Feld ausbildet, beeinflusst dessen Ausbreitung. Abgeleitet aus der Maxwellschen Lichttheorie (Maxwell, 1873) gilt vereinfacht für die Ausbreitungsgeschwindigkeit c einer elektromagnetischen Welle in einem beliebigen Material (Rost, 1978).

$$c = \frac{c_0}{\sqrt{\varepsilon}} \quad (18)$$

c [m/s] Ausbreitungsgeschwindigkeit im Medium

c_0 [m/s] Ausbreitungsgeschwindigkeit im Vakuum

ε Relative Dielektrizitätskonstante

Aufgrund dieser Formel kann durch Messung der Laufzeit eines elektrischen Impulses die Dielektrizitätskonstante ermittelt werden.

Ursprünglich wurde die TDR Methode zum Auffinden von Kurzschlüssen oder Leiterbrüchen verwendet. Ein Signalgenerator erzeugt einen Spannungsimpuls, der sich in der Leitung ausbreitet bis er eine Bruchstelle erreicht. Dort kommt es zu einer Reflexion des Impulses. Aus der Laufzeit vom Generator bis zur Bruchstelle und wieder zurück kann, weil die Ausbreitungsgeschwindigkeit im Kabel bekannt ist, die Leitungslänge bis zur Bruchstelle berechnet werden.

Um diese Methode zur Bestimmung des Wassergehaltes im Boden verwenden zu können, darf sich das Messsignal nur an der zu messenden Stelle im umgebenden Boden ausbreiten (Stacheder, 1996, Topp et al., 1980). Zu diesem Zweck werden Stabsonden mit einem abgeschirmten Koaxialleiter verwendet. Den Messbereich bilden zwei parallele Stäbe aus Edelstahl mit bekannter Länge, die in den Boden eingebettet werden.

Die Auswertung erfolgt durch Messung der Laufzeit des Impulses von Stabanfang bis Stabende. Um eine hohe Genauigkeit der Messung zu erreichen, bedarf es einerseits eines Impulses mit einem steilen Spannungsanstieg und einer hohen zeitlichen Auflösung der Zeitmessung im Pikosekundenbereich und andererseits einer exakten Geradlinigkeit und eines konstant gleichen Abstandes der Sondenstäbe.

Abb. 17 zeigt einen möglichen Signalverlauf, bei dem durch Anlegen von Tangenten und Bildung der Schnittpunkte die Laufzeiten bestimmt werden.

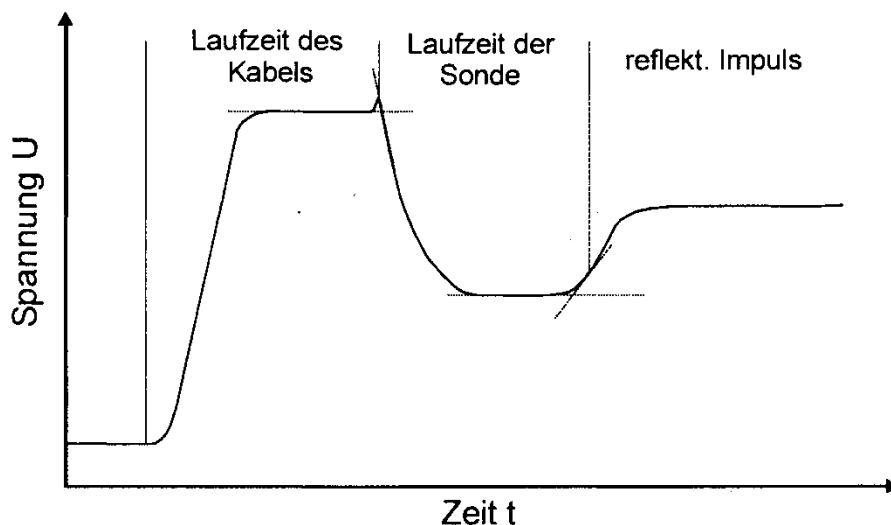


Abb. 17: Signalverlauf bei einer TDR-Messung (Scheid 2000, nach Stacheder, 1996)

Aus der durch die Laufzeit ermittelten Dielektrizitätskonstante kann, durch den großen Unterschied der Dielektrizitätskonstanten von Wasser ($\epsilon \sim 81$) und Boden ($\epsilon \sim 3-5$) sowie Luft ($\epsilon \sim 1$), der volumetrische Wassergehalt errechnet werden.

Für den Laborgroßversuch wurden Zweistabsonden LP/ms und eine PC-gesteuerte Datenerfassungseinheit LOM/8/mps (Malicki & Skierucha, 1989) der Fa. EASY TEST, Berlin verwendet. Die Sondenstäbe bestehen aus rostfreiem

Stahl mit einer Länge von 75 mm und einen Durchmesser von 0,8 mm. Sie haben einen gegenseitigen Abstand von 5 mm.



Abb. 18: TDR Zweistabsonde LP/ms (Foto Leibniz O.)

Die Messungen wurden bei den Langzeitversuchen in vorgegebenen Zeitintervallen durchgeführt. Sämtliche Messwerte wurden gespeichert.

Die werksseitig angegebene Genauigkeit des gemessenen volumetrischen Wassergehalts liegt bei mindestens $\pm 2\%$, was einem absoluten Fehler bei der Messung der Dielektrizitätskonstanten ε von ± 1 für den Bereich $2 \leq \varepsilon < 6$ und ± 2 für den Bereich von $\varepsilon > 6$ entspricht (Handbuch des Herstellers).

Zur Basiskalibrierung der Sonden wird ein künstlicher Boden aus Glasperlen verwendet. Für die Messung im trockenen sowie im wassergesättigten Zustand ergeben sich zwei Messpunkte mit definiertem Wassergehalt. Aus diesen Punkten wird eine Kalibrierfunktion erzeugt und in der Auswertungssoftware für die Umrechnung der Dielektrizitätskonstanten in den volumetrischen Wassergehalt hinterlegt.

Für Böden mit hohem Anteil an Tonmineralien oder hohem Organikgehalt ist eine substratspezifische Kalibrierung unumgänglich (Stacheder, 1996).

2.5 Materialspezifische Kalibrierung der TDR-Sonden

2.5.1 Versuchsanordnung

Die materialspezifische Kalibrierung der TDR Sonden erfolgte durch Vergleich von TDR-Messungen mit den Ergebnissen der Ofentrocknung. Dafür wurden Bodenproben in Ausstechzylindern mit den im Großversuch eingebauten Trockendichten hergestellt. Die verwendeten Trockendichten waren bei Kabelsand UK4 $\rho_d = 1,56 \text{ g/cm}^3$ und bei Thermosand $\rho_d = 1,40 \text{ g/cm}^3$.

Bei der Verwendung von Ausstechzylindern mit 10 cm Durchmesser und 12 cm Höhe ergab sich für die erwünschten Trockendichten eine Trockenmasse je Zylinder bei Thermosand von 1319,5 g und bei Kabelsand UK4 von 1470,3 g.

Für beide untersuchten Bettungsmaterialien wurden Probenserien mit einem Wassergehalt von 5 %, 15 % und 25 % hergestellt. Der Einbau in die Ausstechzylinder erfolgte in 6 Lagen mittels Einpressen mit einer hydraulischen Presse. Von dem zu untersuchenden Boden wurde eine ausreichend große Menge zuerst getrocknet, dann gewogen und mit der erwünschten Menge an entionisiertem Wasser gründlich vermischt. Die Masse an feuchten Boden die in den Zylinder je Lage einzubauen war, wurde berechnet, beim Einfüllen in den Zylinder gewogen und anschließend mit der Presse auf das gewünschte Volumen verdichtet (siehe Abb. 19).



Abb. 19: Verdichten mittels hydraulischer Presse

Um alle 8 verwendeten TDR-Sonden gleichzeitig messen zu können, dabei aber genügend Abstand zwischen den Sonden untereinander und zwischen den Sonden und dem Zylinder zu haben, wurden je Probenserie 3 Zylinder hergestellt, und in jeden Zylinder maximal 3 Sonden eingebaut.

Durch mehrere Vorversuche hat sich ergeben, dass es in Hinblick auf exakt parallele Lage der Sondenstäbe von Vorteil war, während des Einpressens die Löcher durch Einbau von Schweißdraht, dessen Durchmesser exakt dem der Sondenstäbe entsprach, frei zu halten. Nach Herausziehen des Schweißdrahtes wurden die Sonden in die entstandenen Löcher gesteckt.

Anschließend wurde über die Dauer von 1 Stunde alle 5 Minuten der Wassergehalt in den Probezylindern mittels TDR-Messung gemessen. Abb. 20 zeigt den Aufbau der TDR-Messungen mit 8 Sonden in 3 Zylindern.



Abb. 20: TDR-Messung in den Probezylindern

Nach Beendigung der Messung wurde der Boden aus den Zylindern ausgepresst, gewogen und im Trockenofen bei 105°C bis zur Gewichtskonstanz getrocknet. Durch eine abschließende Wiegung wurde der gravimetrische Wassergehalt festgestellt.

2.5.2 Auswertung für Kabelsand UK4

Aus den Ergebnissen der TDR-Messungen wurden, nach Umrechnung des volumetrischen Wassergehalts in gravimetrischen Wassergehalt, Mittelwerte für jede Sonde gebildet und diese den Ergebnissen der Ofentrocknung gegenübergestellt (siehe Abb. 21)

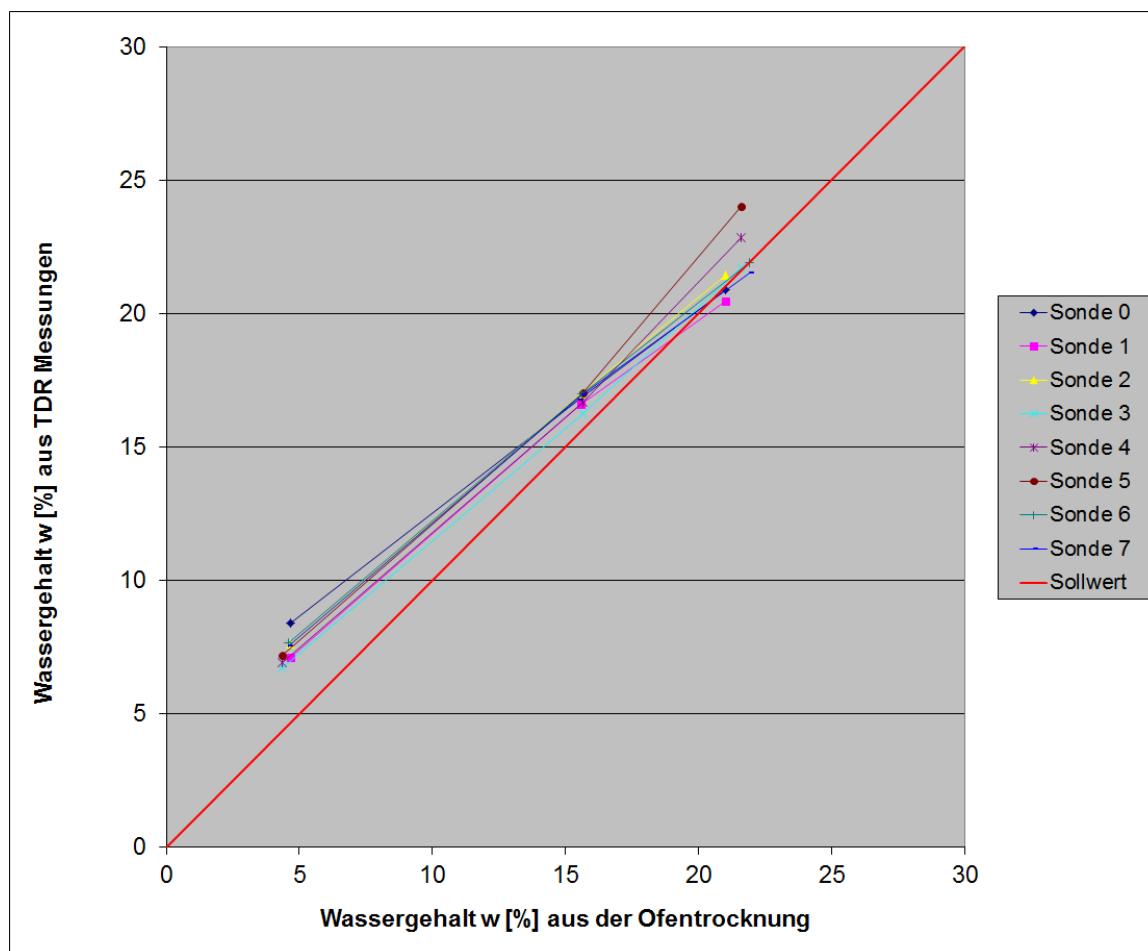


Abb. 21 Gravimetrischer Wassergehalt Kabelsand UK4

Im Bereich von $w = 5\%$ Wassergehalt liegen die Messwerte der TDR-Methode zwischen 2,4 und 3,7 Prozentpunkte über den durch Ofentrocknung ermittelten Werten.

Beim Wassergehalt der Bodenprobe um $w = 15\%$ liegen die Ergebnisse der TDR-Messung mit 0,6 bis 1,4 Prozentpunkten nur mehr leicht über der Ofentrocknung.

Ein Wassergehalt von $w = 25\%$ konnte bei Kabelsand nicht erreicht werden, da beim Verdichten Wasser aus der Probe gepresst wurde. Auffällig ist hierbei das nur die Sonden 4 und 5 stärker vom Sollwert abweichen.

Aufgrund der Tatsache, dass alle Ergebnisse der verwendeten Sonden nahe beisammen liegen, wurde nur eine Korrekturfunktion ermittelt, welche für alle Sonden Verwendung findet.

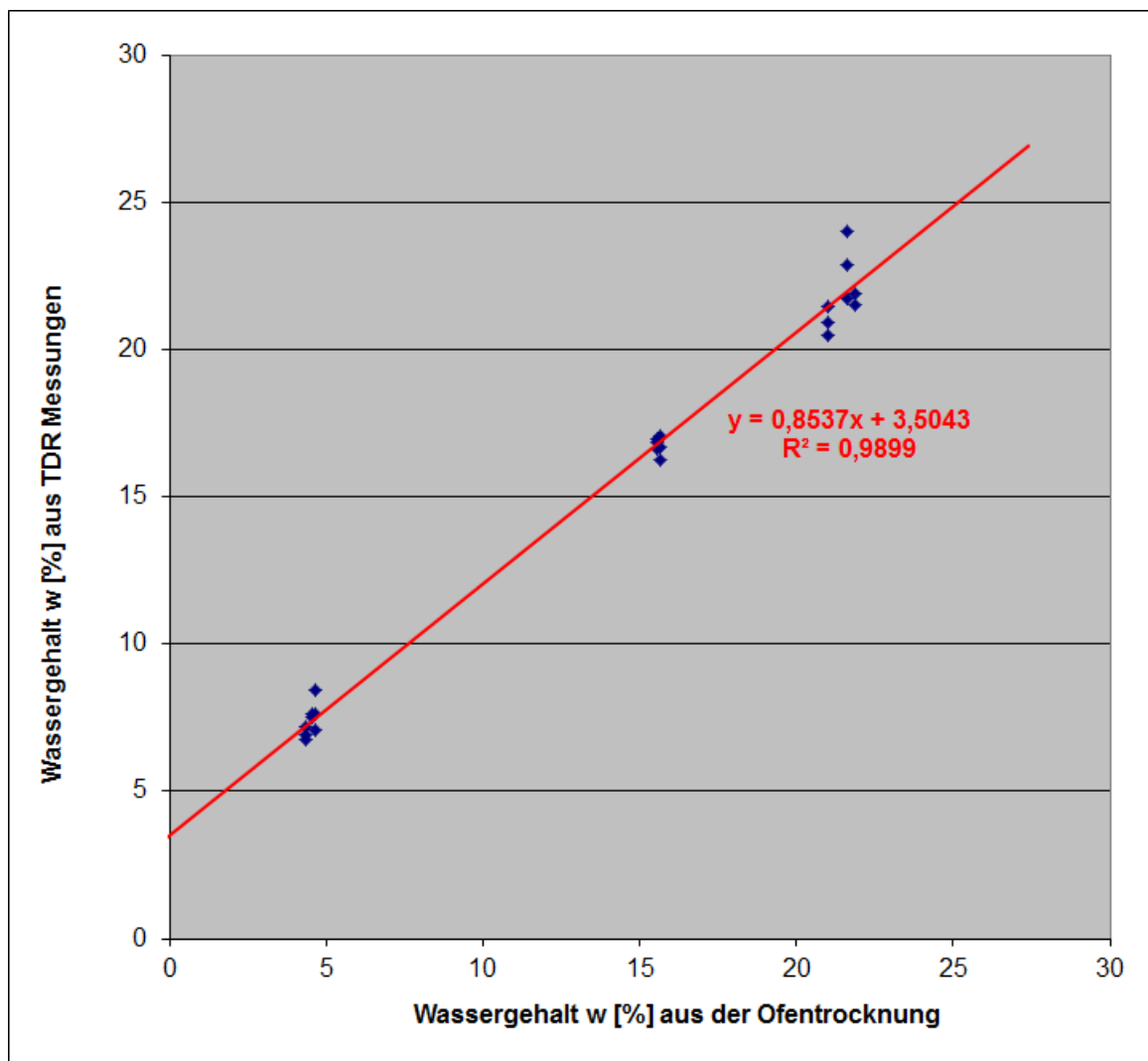


Abb. 22: Ausgleichsgerade für Kabelsand UK4

Aus der Gleichung der Ausgleichsgeraden (siehe Abb. 22) wurde durch Umformung ein Korrekturfaktor ermittelt.

$$w_{UK4} = \frac{w_{\vartheta,tdr} - 3,504}{0,854} \quad (19)$$

$w_{\vartheta,tdr}$ Gravimetrischer Wassergehalt aus TDR Messung [M-%]

w_{UK4} tatsächlicher Wassergehalt gemäß Ofentrocknung für Kabelsand UK4

2.5.3 Auswertung für Thermosand

Im Gegensatz zu den Versuchen mit Kabelsand ergaben sich bei Thermosand bei höheren Wassergehalten bei den Messungen mit der TDR-Methode deutlich zu niedrige Ergebnisse. Die Ursache dieser Abweichung dürfte in der mineralogischen Zusammensetzung des Thermosandes liegen.

Dies entspricht den Beobachtungen, dass bei höherem Tongehalt der Böden mit der TDR - Methode ein zu geringer Wassergehalt gemessen wird (Topp et al., 1980).

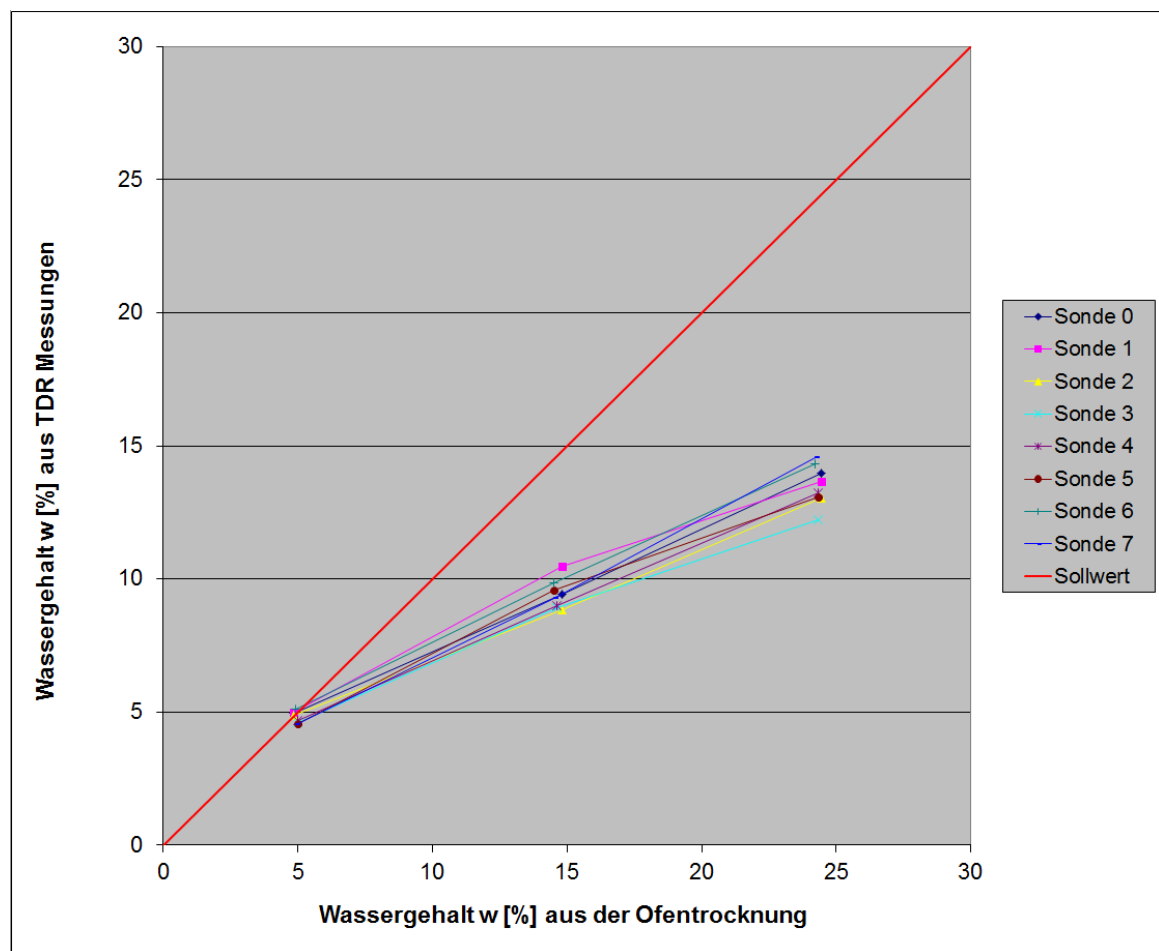


Abb. 23: Gravimetrischer Wassergehalt Thermosand

Abb.24 zeigt eine Ausgleichsgerade unter Einbeziehung alle Sonden.

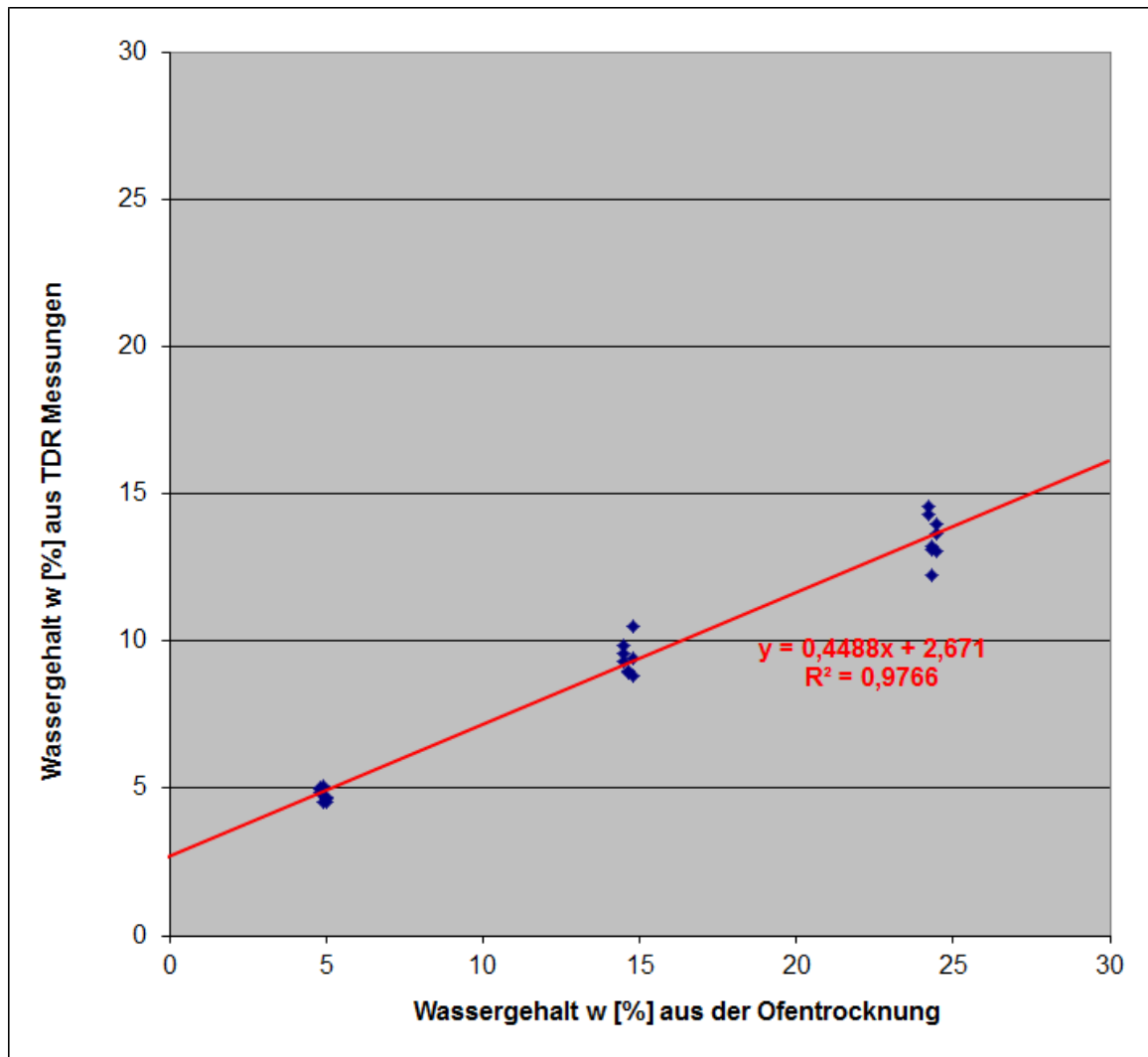


Abb. 24: Ausgleichsgerade für Thermosand

Daraus folgt der Korrekturfaktor für Thermosand mit:

$$w_{TS} = \frac{w_{\vartheta,tdr} - 2,671}{0,449} \quad (20)$$

$w_{\vartheta,tdr}$ Gravimetrischer Wassergehalt aus TDR Messung [M-%]

w_{TS} tatsächlicher Wassergehalt gemäß Ofentrocknung für Thermosand

2.6 Kalibrieren der Thermoelemente

Zur Überprüfung der Messgenauigkeit wurden die Thermoelemente mit dem Gerät „Temperature Calibrator, D 55SE“ der Firma AMETEK, Jofra Instruments, kalibriert.



Abb. 25: Temperature Calibrator D55SE

Der „Temperature Calibrator“ hält die eingestellte Temperatur in seiner Temperaturkammer mit hoher Genauigkeit konstant. Die zu prüfenden Fühler werden in diese Kammer (in Abb. 25 in geöffnetem Zustand) eingeführt und nach Erreichen der gewünschten Prüftemperatur der Messwert mit dem Sollwert verglichen.

Bei den im Großversuch verwendeten Fühlern ergaben sich Messwerte, die maximal $0,5^{\circ}\text{C}$ unter und nie über dem Sollwert lagen. Die mittlere Abweichung lag bei allen Solltemperaturstufen zwischen $0,3$ und $0,4^{\circ}\text{C}$ und wurde bei der Erstellung der Ganglinien und Profile nicht berücksichtigt, weil für die weitere Betrachtung weniger der absolute Wert sondern vor allem die Temperaturdifferenzen relevant waren.

2.7 Durchgeführter Laborversuch im Technikumsmaßstab

2.7.1 Aufbau

Am Institut für Bodenmechanik und Grundbau der Technischen Universität Graz wurde bereits in den Jahren 2007 bis 2009 ein großmaßstäblicher Modellversuch zur Messung der Wassergehaltsänderung im Zuge der Austrocknung durch die Wärmeströmung rund um Fernwärmerohren durchgeführt. Die Auswertung und Interpretation der Daten ist Aufgabe dieser Diplomarbeit.

Für den Modellversuch wurde ein Stahlbehälter verwendet, der vormals für Untersuchungen von Strömungsvorgängen von Druckluft im Tunnelbau eingesetzt wurde (Kammerer, 2000).

Dieser Stahlbehälter mit einer inneren Grundrissfläche von 90 cm x 102 cm und einer Höhe von 120 cm wurde umgebaut, so dass in mittlerer Höhe zwei Fernwärmerohre installiert werden konnten (siehe Abb. 26).

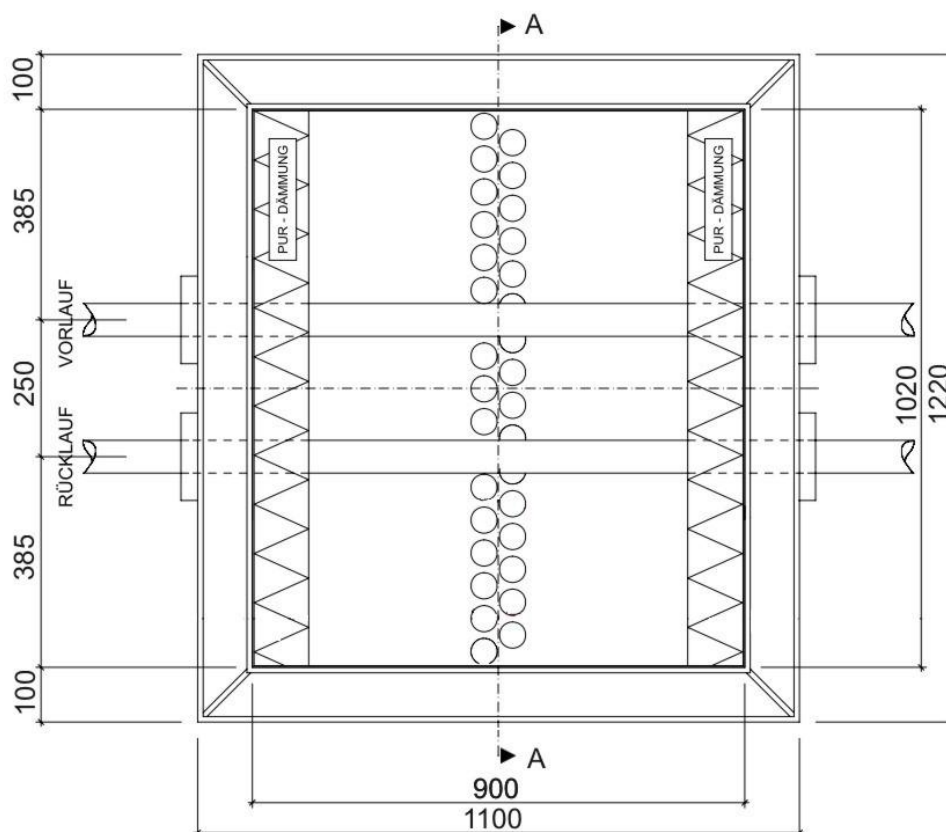


Abb. 26 Grundriss des Stahlbehälters modifiziert (nach Kammerer, 2000)

Die Bohrungen in der Bodenplatte, die bei den Versuchen von Kammerer für das Einströmen der Druckluft hergestellt wurden, hatten bei diesem Versuch die Aufgabe auftretendes Sickerwasser abzuleiten. Um den Boden zurückzuhalten, wurden vor Einbau des Bodens die Entwässerungsbohrungen mit Flies abgedeckt. Auf den beiden Längsseiten wurden innen je eine 10 cm dicke Polyurethan Dämmplatte eingebaut, um die Wärmeströmung längs zur Rohrachse zu minimieren. Der Boden wurde in mehreren Lagen eingeschlämmt und so der Einbau in der dichtesten Lagerung sichergestellt.

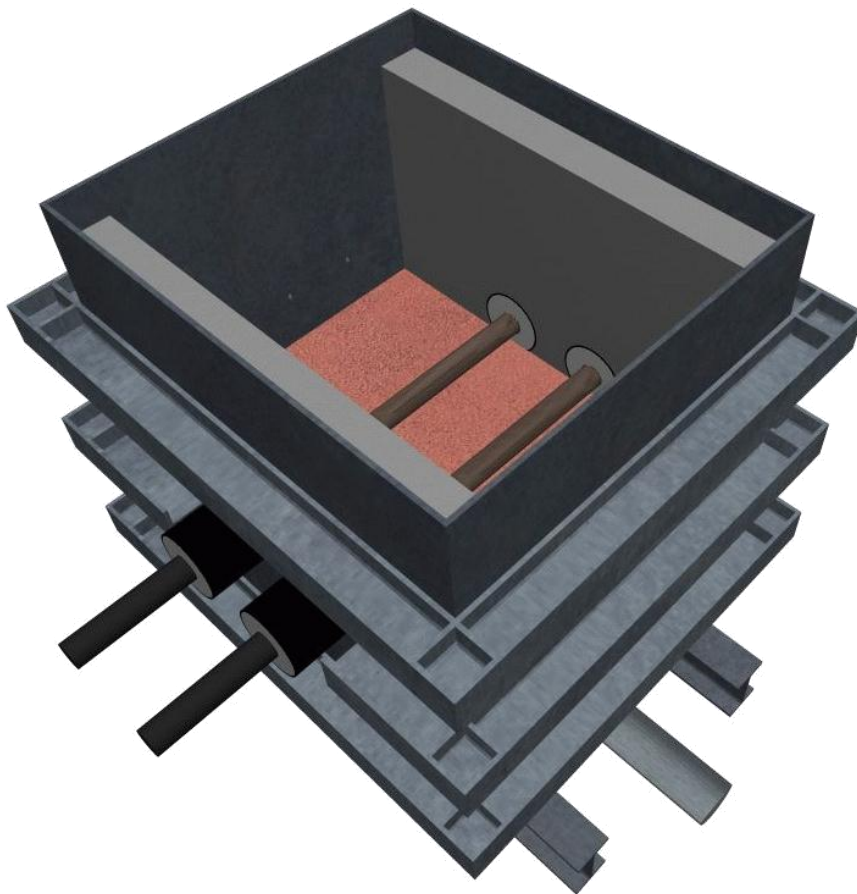


Abb. 27: Grafische Darstellung des Versuchsaufbaues

Abbildung 27 zeigt eine grafische Darstellung des Versuchsaufbaues mit dem durch I-Träger verstärkten Behälter, den beiden Fernwärmerohren, den Polyurethanplatten und dem bis zur Rohrachse eingebauten Boden. Nach Einbau der Messfühler für Temperatur und Wassergehalt wurde der restliche Boden bis zur Oberkante der Dämmplatten eingebaut.

Der Einbau der Messfühler erfolgte in der in Abb. 26 als Schnitt A-A gekennzeichneten Ebene. Auf Höhe der Rohrachse wurden sechs Temperaturfühler und sechs TDR-Sonden paarweise eingebaut. Die Fühlerpaare mit den Nummern 0 bis 2 wurden zwischen Vor- und Rücklauf, die Fühlerpaare Nummer 3 bis 6 zwischen Vorlauf und Außenwand des Behälters eingebaut. Die Fühlerpaare 0, 2 und 3 liegen jeweils 2 cm neben den Rohrleitungen. Das Fühlerpaar Nummer 1 liegt genau zwischen Vor- und Rücklauf. Das Fühlerpaar 5 liegt 15 cm von der Außenwand des Behälters entfernt und das Fühlerpaar 4 in der Mitte zwischen 3 und 5. Das Fühlerpaar Nummer 6 wurde 2 cm von der Außenwand entfernt positioniert. Ein weiteres Fühlerpaar (Nummer 7) wurde 45 cm über dem Vorlaufrohr und 15 cm unter der Oberkante des Behälters eingebaut. Die genaue Lage der Fühler ist in der folgenden Abbildung ersichtlich.

Zusätzlich wurde während der Versuchsdauer die Raumtemperatur gemessen und elektronisch aufgezeichnet.

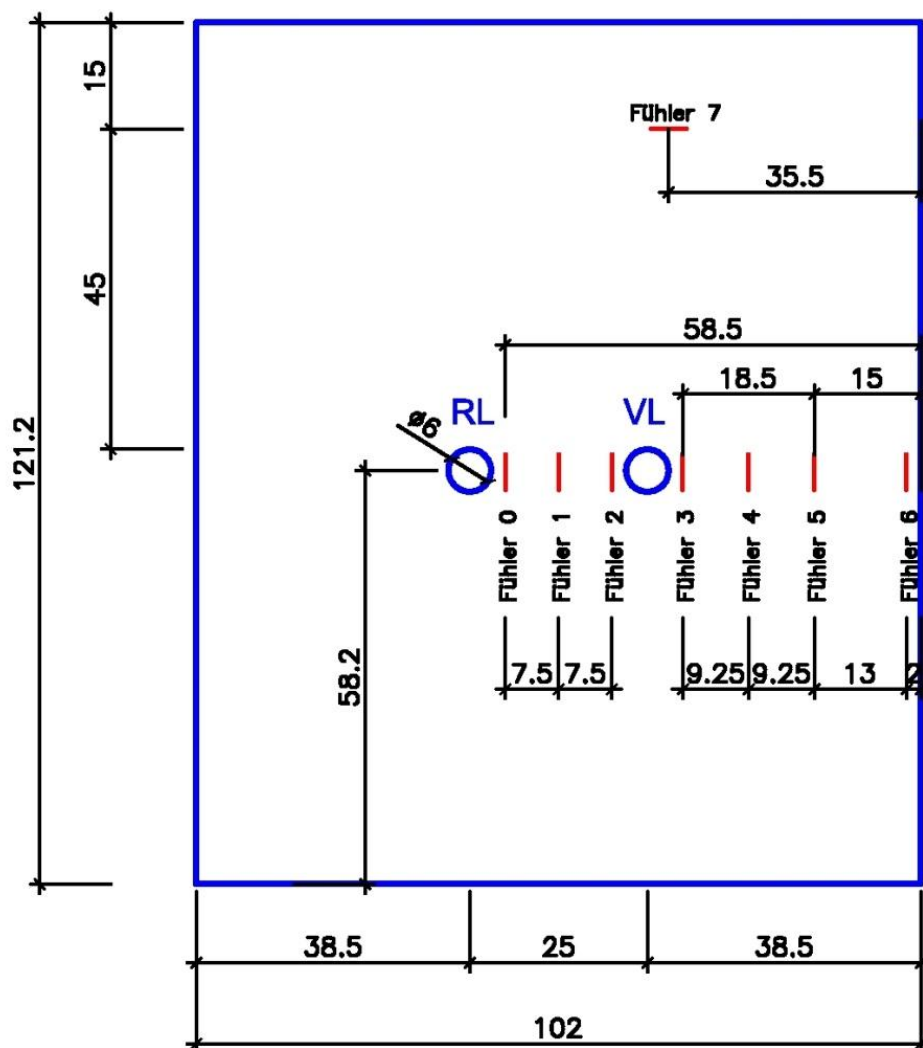


Abb. 28: Lage der Temperaturfühler und TDR-Sonden (Schnitt A-A in Abb. 26)

Als Boden wurde im ersten Versuch Kabelsand UK4 und im zweiten Versuch Thermosand aus Fohnsdorf verwendet. Bei beiden Bettungsmaterialien wurde abwechselnd eine Oberfläche aus Rasen und eine Betonabdeckung aufgebracht um sowohl die Trassenführung im Freiland als auch unter versiegelten Flächen zu simulieren.

2.7.2 Zeitlicher Ablauf Versuch 1 Kabelsand UK4

09.11.2007	Tag 0	Versuchsbeginn und Einbau des Kabelsandes UK4 Start der Wassergehaltsmessung.
19.11.2007	Tag 10	Einbau der Rasenoberfläche und Beginn der täglichen Bewässerung mit 10 l pro Tag.
19.12.2007	Tag 40	Start der Temperaturmessung und Einstellen der Temperatur für den Vorlauf auf 40°C und für den Rücklauf auf 30°C.
08.01.2008	Tag 60	Oberflächenversiegelung durch Betonplatte und Erhöhen der Vorlauftemperatur auf 60 °C und der Rücklauftemperatur auf 50 °C.
19.02.2008	Tag 94	Versuchsende.

2.7.3 Zeitlicher Ablauf Versuch 2 Thermosand

20.05.2008	Tag 0	Nach Einbau des Thermosandes Beginn der Messungen mit einer Vorlauftemperatur von 40 °C und einer Rücklauftemperatur von 30 °C.
03.07.2008	Tag 44	Erhöhen der Vorlauftemperatur auf 60 °C und der Rücklauftemperatur auf 50 °C.
10.07.2008	Tag 51	Einbau der Rasenoberfläche und Bewässerungsbeginn.
04.08.2008	Tag 76	Erhöhen der Vorlauftemperatur auf 70 °C und der Rücklauftemperatur auf 60 °C.
06.08.2008	Tag 78	Ende der Bewässerung
13.08.2008	Tag 85	Einbau der Mörtelplatte.
26.09.2008	Tag 129	Reduktion der Vorlauftemperatur auf 60 °C und der Rücklauftemperatur auf 50 °C.
04.12.2008	Tag 198	Ende Versuch 2

Es folgten vom 10.12.2008 bis 04.06.2009 weitere Temperaturmessungen, jedoch ohne Heizung von Vor- und Rücklauf und ohne Messung des Wassergehaltes.

Im weiteren Verlauf dieser Arbeit erfolgt die Angabe der Zeit nur mehr in Tagen ab Beginn des jeweiligen Versuches.

3 Auswertung der Versuche

3.1 Ausgangslage

Basis der Auswertung der Laborgroßversuche sind die Rohdaten der Messungen in Form der Logfiles der Messeinrichtungen für Wassergehalt, Temperaturmessung im Boden und Messung der Raumtemperatur. Durch die während des Versuches durchgeführten Zwischenspeicherungen, die aufgrund der Länge der Versuchsdauer erforderlich wurden, entstanden etwa 200 Dateien mit Messwerten aus sich teilweise überschneidenden Zeiträumen. Durch Erstellen einer Zeitlinie, in der alle Dateien entsprechend den Zeiten der ersten und der letzten Messung eingetragen wurden, konnten die doppelt vorhandenen Daten ausgeschlossen werden. Dadurch wurde die Anzahl der zu verarbeitenden Dateien auf 60 reduziert. Diese Dateien enthalten etwas mehr als 2,9 Millionen Messwerte.

Ziel war es alle vorhandenen Messwerte der Wassergehalts- und Temperaturmessungen eines Versuches in einer gemeinsamen Excel-Tabelle zusammenzuführen und graphisch aufzubereiten um vorhandene Zusammenhänge zwischen Temperatur und Wassergehalt zu erkennen. In den Anlagen 7.1 bis 7.3 sind beispielhaft Ausschnitte der Logdateien angeführt um die Unterschiede der Datenformate darzustellen. Außerdem sind auffällige Stellen durch gelbe Markierungen gekennzeichnet.

Anlage 7.1 beinhaltet die Messwerte der Temperaturmessung vom 1.1.2008 15:43 bis 1.1.2008 23:43 (8 Stunden) inklusive umfangreichem Dateikopf. Das in Anlage 7.2 dargestellte falsche Datumsformat, welches in einigen Dateien anzutreffen war, musste vor der Weiterbearbeitung umgewandelt werden.

Anlage 7.3 zeigt Messwerte der Wassergehaltsmessung vom 11.09.2007 von 11:00 bis 12:00 Uhr (Versuch Kabelsand). Markiert wurden die Messwerte von Fühler 6, der stark streuende Werte zeigt.

Anlage 7.4 zeigt die Messwerte der Raumtemperaturmessung aus dem Zeitraum vom 13.11.2007 11:54 bis 17:54 (die ersten 6 Stunden der Messung). Das Datum wurde bei der Raumtemperaturmessung durchgehend mit der falschen Jahreszahl protokolliert (2011 statt 2007 und 2012 anstelle von 2008).

3.2 Datenaufbereitung

3.2.1 Import der Temperaturmesswerte

Der Kopfbereich der Logdateien der Temperaturmessung beinhaltet alle Einstellungen der Messeinrichtung, die verwendeten Fühlertypen und die für die Berechnung der Temperaturen verwendeten Berechnungsfunktionen. Dem Kopfbereich folgen die Ergebnisse der Messungen, wobei in einer Zeile jeweils ein Datensatz, bestehend aus einem Zeitindex, den 8 Messwerten der Fühler, Datum und Uhrzeit steht. Nach dem Entfernen der Kopfbereiche wurden die Messwerte in eine Excel Tabelle importiert.

3.2.2 Import der Messwerte der Raumtemperaturmessung

Das Ecolog-Messprotokoll besteht aus einem kurzen Kopfbereich gefolgt von dem Datenbereich mit folgendem Zeilenaufbau: Fortlaufende Nummer, Datum, Uhrzeit und der Messwert der Raumtemperatur. Es wurde in die gleiche Excel-Datei wie die Messwerte der obigen Temperaturmessung, jedoch auf ein neues Tabellenblatt importiert.

3.2.3 Bearbeitung der TDR-Messprotokolle

Wie aus Anlage 7.3 ersichtlich ist, erzeugt die Software bei der TDR-Messung für jede Einzelmessung eine neue Zeile in der Logdatei. Jede Zeile ist nach folgendem Schema aufgebaut: Datum, Uhrzeit, Nummer der gemessenen Sonde, Dielektrizitätskonstante und der daraus berechnete volumetrische Wassergehalt. Für die Auswertung wurde jedoch ein Format benötigt, in dem die Messwerte der verschiedenen Fühler nicht untereinander sondern nebeneinander in einer Zeile stehen.

Für diese Umwandlung wurden die Daten in eine temporäre Excel-Datei importiert und anschließend mit folgendem programmierten Visual Basic Script durch Ausführen des Makros umgewandelt.

```
Sub TDR_Werte_umsortieren()  
Z = InputBox("Anzahl der Messzeilen", "TDR-Werte umsortieren")  
x = Z / 8 - 1  
For a = 0 To x  
    Sheets("original").Select  
    Cells(a * 8 + 1, 1).Select  
    Selection.Copy  
    Sheets("sortiert").Select  
    Cells(a + 2, 1).Select  
    ActiveSheet.Paste  
    Sheets("original").Select  
    Cells(a * 8 + 1, 2).Select  
    Selection.Copy  
    Sheets("sortiert").Select  
    Cells(a + 2, 2).Select  
    ActiveSheet.Paste  
    For b = 1 To 8  
        Sheets("original").Select  
        Cells(a * 8 + b, 5).Select  
        Selection.Copy  
        Sheets("sortiert").Select  
        Cells(a + 2, b + 2).Select  
        ActiveSheet.Paste  
    Next b  
Next a  
End Sub
```

Das Makro wählt nach Abfrage der Anzahl der zu übertragenden Zeilen Datum und Uhrzeit jeder neunten Messung (entspricht wieder der ersten Sonde) vom Tabellenblatt „original“ und überträgt es zusammen mit den Wassergehalten der dazwischen liegenden Messungen in eine Zeile des Datenblattes „sortiert“. Aus diesem Datenblatt wurden anschließend die Messwerte in die Excel-Datei mit den Temperaturmessungen auf ein weiteres Datenblatt kopiert.

Nach dem Import aller Rohdaten eines Versuches in eine Excel Arbeitsmappe wurden die Werte der Wassergehaltsmessung vom volumetrischen in den gravimetrischen Wassergehalt umgerechnet und mittels der in Kapitel 2.5 ermittelten Funktion korrigiert.

Weiters wurde die Uhrzeit der Wassergehaltsmessungen korrigiert, weil sich herausgestellt hat, dass die interne Uhr des Laptops, der für die Aufzeichnung der Messwerte verwendet wurde, um 40 Minuten hinter der Uhr des für die Temperaturmessung verwendeten Computers nachging.

3.3 Ganglinien und Profile

Die Ganglinien sind die Darstellung der Messwerte in Abhängigkeit von der Zeit. In den Profilen wird die Verteilung der Temperatur und des Wassergehaltes zu einem bestimmten Zeitpunkt im Querschnitt in der Achse der Fühler dargestellt.

3.3.1 Allgemeines

Für die Erstellung der Ganglinien wurden Datum und Uhrzeit in ein dezimales Zahlenformat umgewandelt und der erste Tag des Versuches als Tag Null festgelegt. Somit wird z.B. 12:00 Mittag am 2. Tag des Versuches zu 1,5 (seit Mitternacht des Tages an dem der Versuch gestartet wurde sind 1,5 Tage vergangen).

Diese Vorgehensweise ermöglicht in Excel die genaue Darstellung aller Messergebnisse zum exakten Zeitpunkt durch Verwendung dieser Zahl als x-Koordinate und des Messwertes als y-Koordinate bei der Darstellung jedes Messwertes als Einzelpunkt.

Notwendig wurde diese Vorgehensweise durch unterschiedliche zeitliche Abstände der Messungen. So erfolgte die Messung der Wassergehalte alle 4 Minuten, die Erfassung der Raumtemperatur jedoch alle 10 Minuten und die Temperaturmessung anfänglich mit einem Messintervall von 2 Minuten, die dann nach einer kurzen Erhöhung auf 5 Minuten auf 4 Minuten eingestellt wurde. Gegen Ende des Thermosandversuches erfolgte, wahrscheinlich unbeabsichtigt, die Temperaturmessung im Minutenabstand.

3.3.2 Auswertung des Versuches mit Kabelsand UK4

Abb. 29 zeigt die Ganglinien für den Versuch mit Kabelsand UK4 im Überblick (eine größere Darstellung erfolgt in Plan 1). Im oberen Bereich der Grafik sind die Wassergehalte w und im unteren Bereich die Temperaturen ϑ dargestellt. Die hellblaue Linie im unteren Bereich der Grafik entspricht der gemessenen Raumtemperatur. Fühlerpaare für Wassergehalt und Temperatur, die von ihrer Lage her an gleicher Stelle eingebaut wurden, sind auch in gleicher Farbe dargestellt.

Die im Bereich der Wassergehaltsmessung zeitweise auftretenden, und über den Messbereich verstreuten Punkte, sind die Folgen instabiler Messergebnisse der jeweiligen TDR - Sonden. Die Fühler mit den Nummern 5 und 6 liefern an den ersten 5 Tagen über den gesamten Messbereich streuende Werte und fallen danach komplett aus. Andere Fühler wie Nummer 0 und 2 liefern nur kurzzeitig stark streuende Werte, erholen sich aber wieder und liefern im Weiteren plausible Werte, die in die Auswertung einbezogen werden können. Zwischen Tag 33 und Tag 40 wurden bei den TDR-Sonden 0 bis 5 Messwerte mit einem Wassergehalt von $w = -5,2 \%$ gemessen. Dieser negative Wert für den Wassergehalt errechnet sich aus einer gemessenen Dielektrizitätskonstanten von $\epsilon=1$ und deutet auf einen Signalverlust, der durch eine Unterbrechung der Leitungen zwischen der Messeinheit und den Sonden entstanden sein könnte.

Der Verlauf der Wassergehalte zeigt nach dem Einschlämmen des Bodens ein anfängliches starkes Absinken auf $w = 8$ bis 12 M-\% , danach aber nur mehr eine geringe Austrocknungstendenz. So sinkt er zwischen Tag 6 und Tag 33 um einen Prozentpunkt, zwischen Tag 40 und 60 und zwischen Tag 60 und dem Ende des Versuches am Tag 94 jeweils nur um 2 Prozentpunkte.

Obwohl die Rasenoberfläche im Zeitraum bis zum Einbau der Betonplatte mit 10 Liter Wasser pro Tag begossen wurde, zeigt die Ganglinie keine dem Bewässerungsvorgang zu zuordnenden Ausschläge. Diese Beobachtung legt die Vermutung nahe, dass die gesamte aufgebrachte Wassermenge von der Rasenoberfläche und ihrer Humusschichte aufgenommen wurde und es somit nicht zu einem messbaren Durchsickern bis zur Rohrebene gekommen ist.

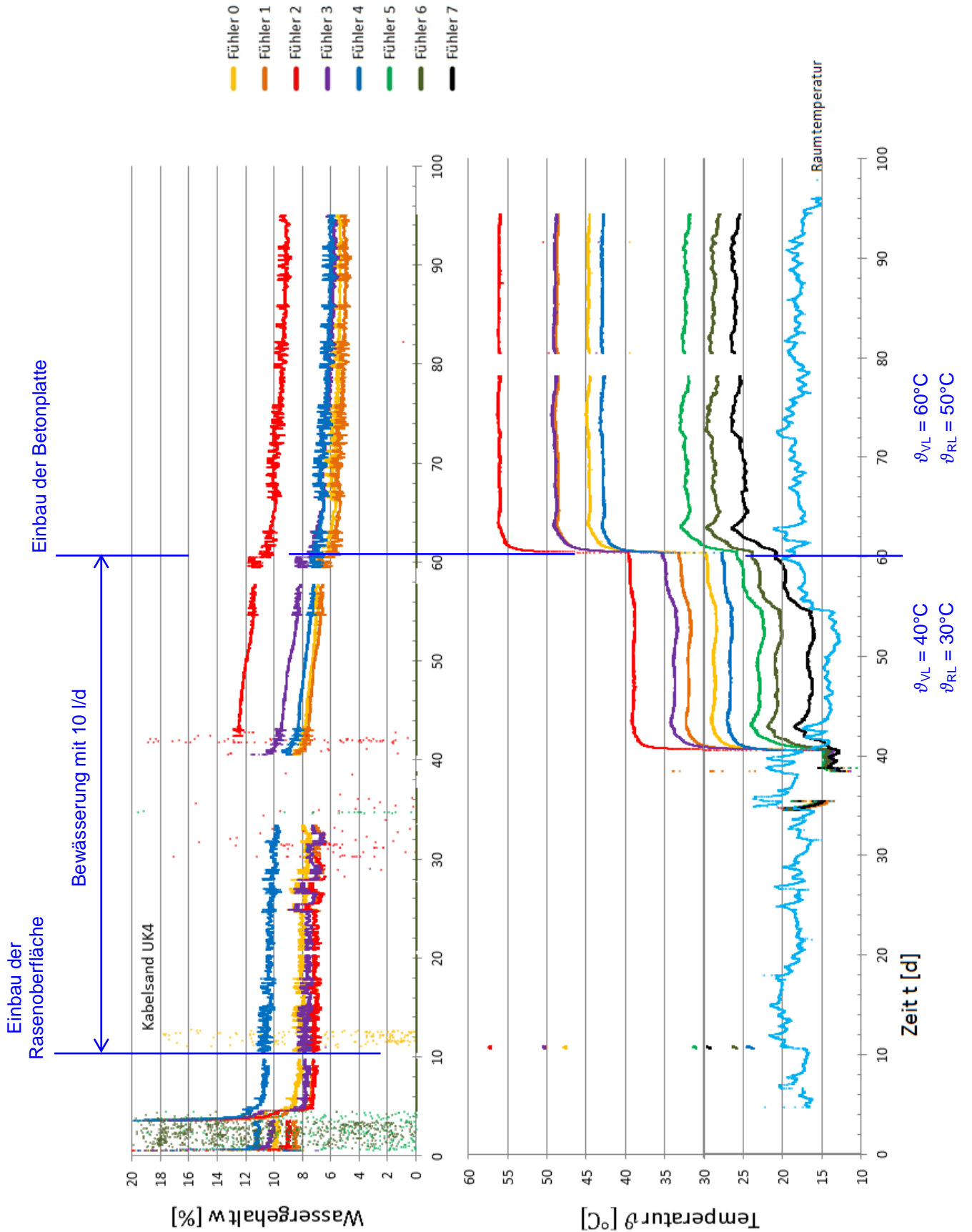


Abb. 29: Ganglinie für Kabelsand UK4

Beim Temperaturverlauf kann man sowohl in der Ganglinie wie auch bei den Profilen einen deutlichen Einfluss der Raumtemperatur auf die außenliegenden Fühler 5 bis 7 erkennen. Die näher an den Leitungen liegenden Fühler zeigen nur bei starker Änderung der Raumtemperatur eine geringe Schwankung.

Im Profil zeigt die Temperatur unmittelbar neben dem Vorlauf die höchsten Werte wobei die Temperaturen auf der Seite zum Rücklauf, bei gleichem Abstand, um etwa 5°C höher sind als die Temperaturen auf der Außenseite.

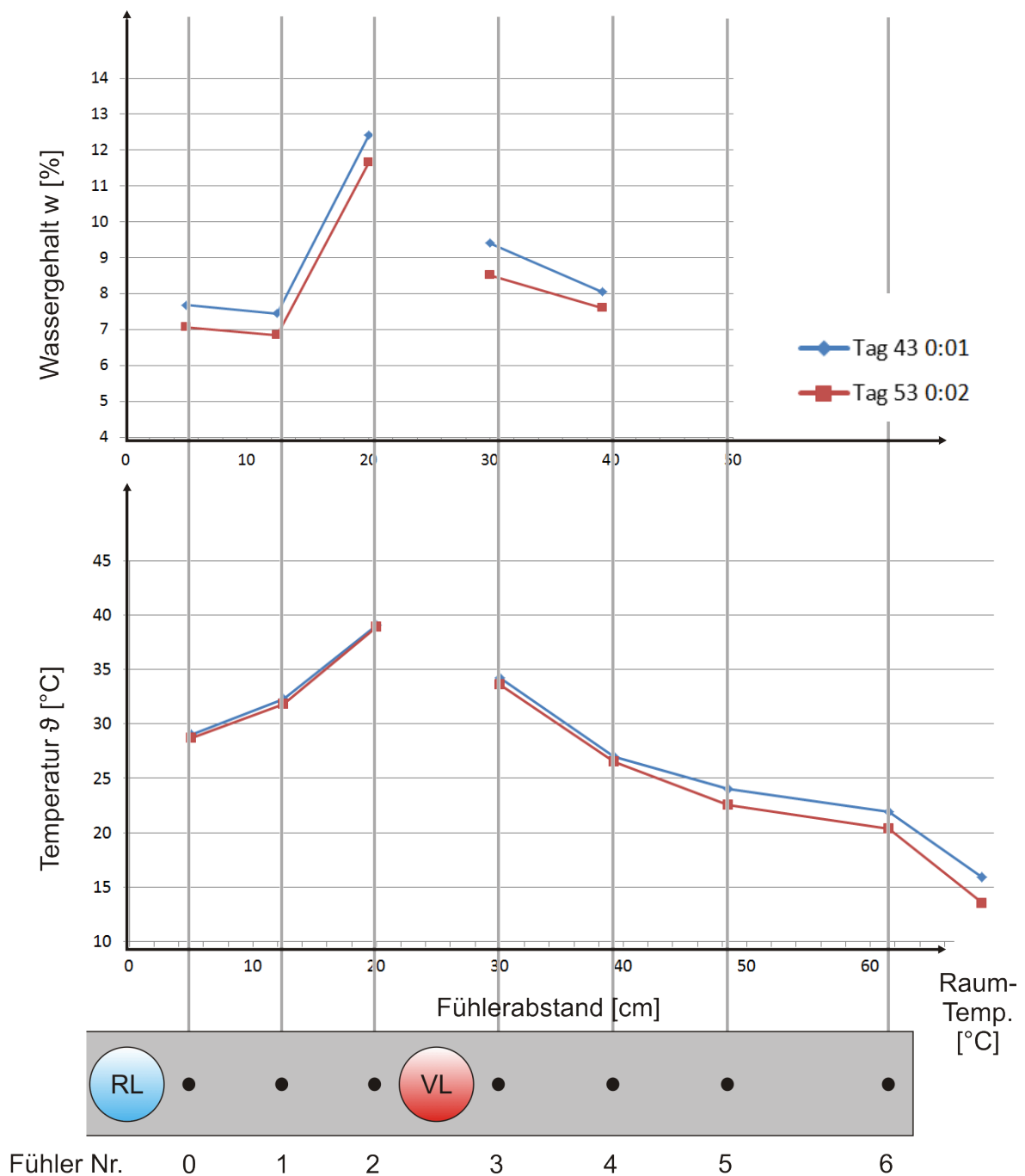


Abb. 30: Temperatur und Wassergehalt im Profil für Tag 43 und 53 jeweils um 0:00

Der Wassergehalt zeigt seine höchsten Werte, gleich wie die Temperatur, rund um den Vorlauf. Auch hier ist er auf der Innenseite des Vorlaufes höher als auf der Außenseite (siehe Abb. 30 oberer Teil). Zeitlich betrachtet sinkt der Wassergehalt innerhalb der 10 Tage von Tag 43 bis 53 über den Querschnitt gleichmäßig um ca. 0,6 Prozentpunkte.

Abbildung 31 zeigt bei einer Vorlauftemperatur von 60°C und gleichbleibender Raumtemperatur über einen Zeitraum von 30 Tagen einen konstanten Temperaturverlauf. Der Wassergehalt bestätigt wieder eine geringe aber gleichmäßige und von der Temperatur unabhängige Austrocknung.

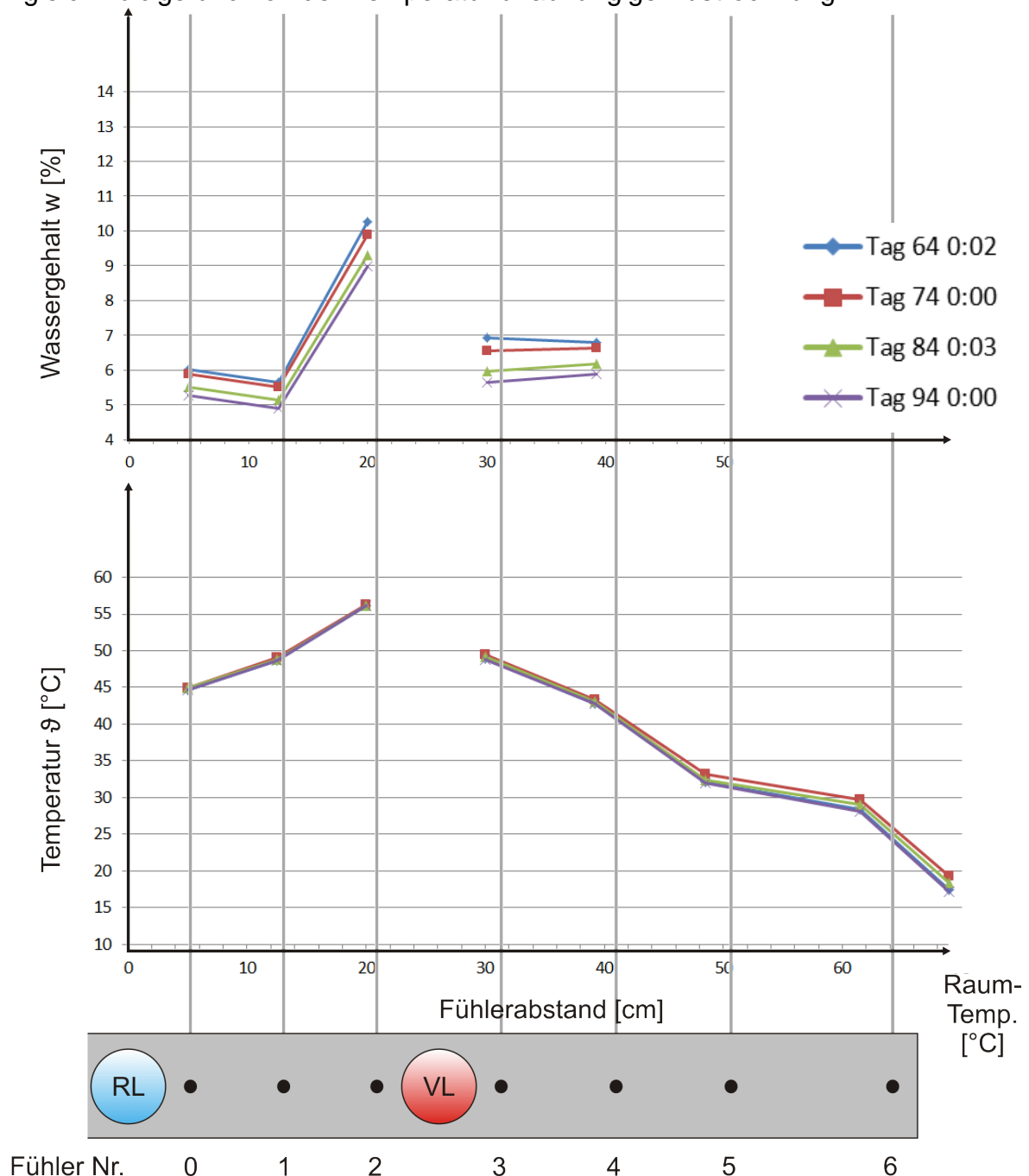


Abb. 31: Temperatur und Wassergehalt im Profil für Tag 64 bis 94

Abbildung 32 zeigt den Verlauf von Temperatur und Wassergehalt am Tag 60 während der Erhöhung der Vorlauf- und der Rücklauf­temperatur. Durch die vergrößerte Darstellung von nur einem Tag wird jede Einzelmessung als Punkt sichtbar.

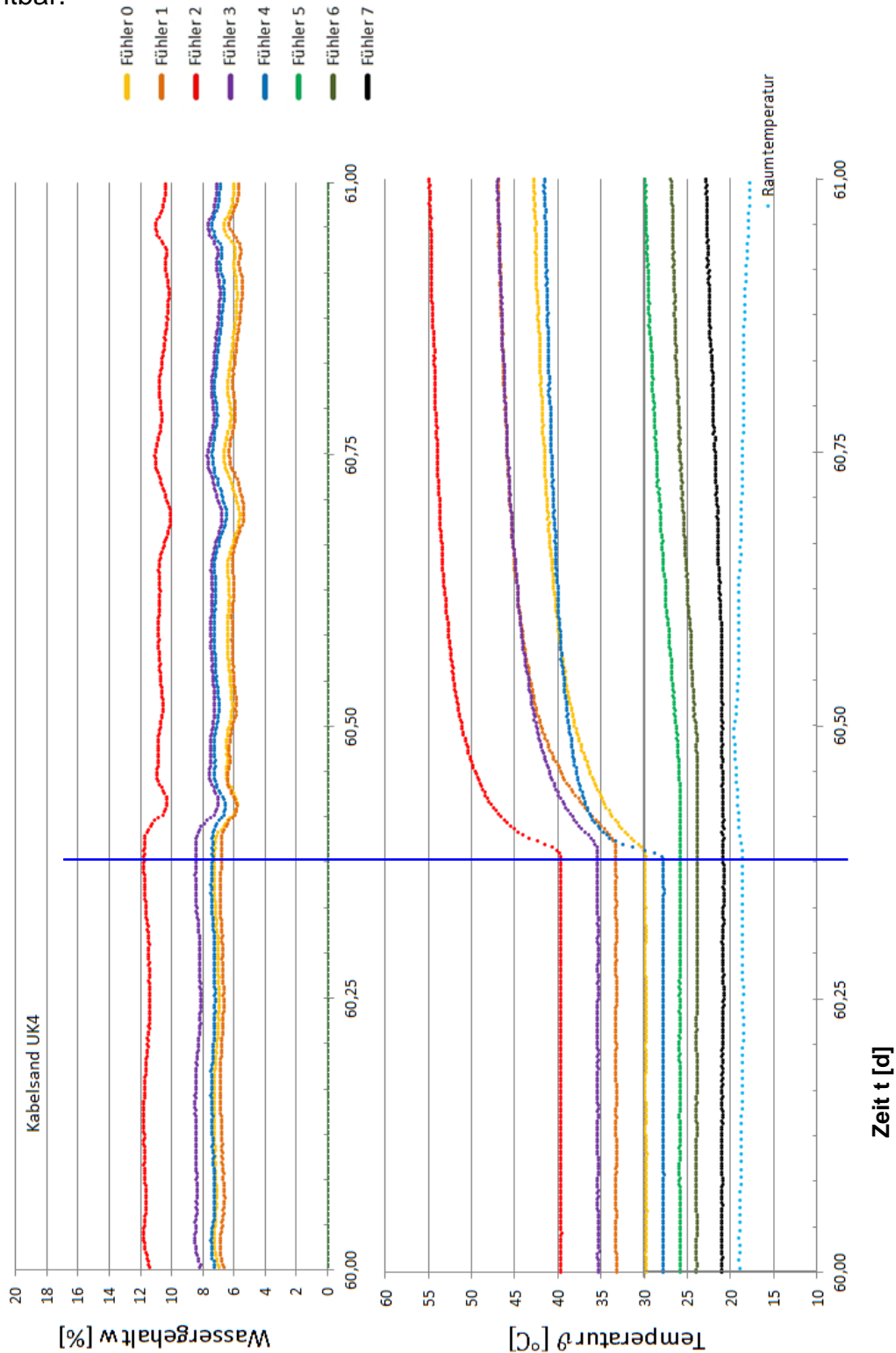


Abb. 32: Ganglinien des 60 Versuchstages bei Kabelsand UK4

Gleichzeitig mit dem Erhöhen der Temperatur zeigt der Wassergehalt innerhalb einer halben Stunde einen Rückgang von 1 Prozentpunkt. Da jedoch auch an diesem Tag die Rasenoberfläche durch eine Betonplatte ersetzt wurde, kann die Temperaturerhöhung nicht eindeutig als Ursache für das Absinken des Wassergehaltes identifiziert werden. Das Abtragen der Rasenoberfläche oder die Herstellung der Betonplatte könnten auch als Ursache in Betracht gezogen werden. Für eine nähere Eingrenzung der Ursache sollten, bei einer eventuellen Wiederholung des Versuches, zwischen Temperaturerhöhung und Änderung der Oberfläche einige Tage zeitlicher Abstand eingehalten werden.

Abbildung 33 zeigt das Ansteigen der Temperatur im Profil. Dabei ist ersichtlich dass die Temperatur bei den Fühlern 0 bis 4 in den ersten 5 Stunden nach Erhöhung von Vor- und Rücklauftemperatur schnell ansteigt. Die außen liegenden Fühler 5 und 6 zeigen in den ersten Stunden noch kein Ansteigen der Temperatur und beginnen erst mit deutlicher Verzögerung zu reagieren. Die oberste, hellviolette Linie zeigt den Temperaturverlauf am Tag 67 und liegt damit im Bereich mit stationärem Temperaturverlauf (vergleiche Abb. 31).

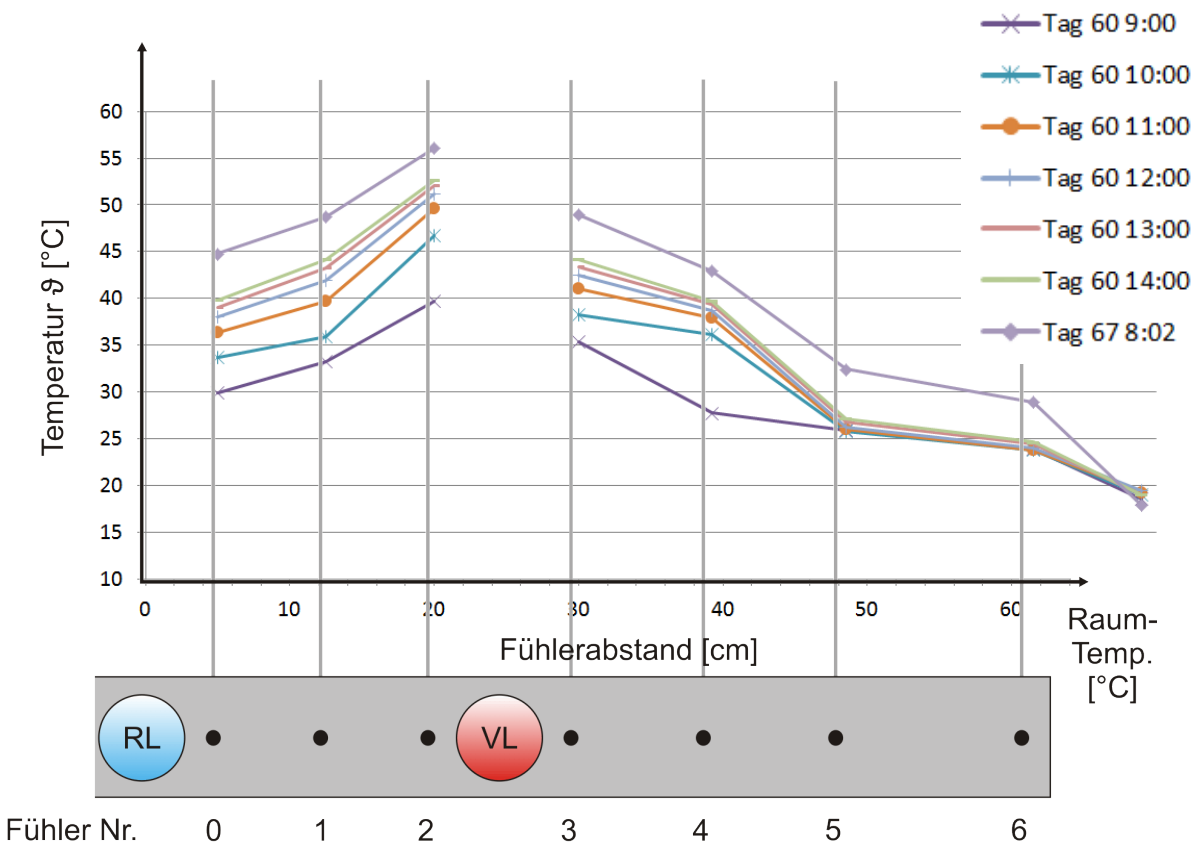


Abb. 33: Temperaturverlauf bei der Erhöhung der Vor- und Rücklauftemperatur

Abb. 34 zeigt die Verteilung des Wassergehaltes über den Querschnitt aus dem Zeitraum vom 8. bis zum 28. Tag. Vergleicht man die Verteilung mit der Verteilung des Wassergehaltes aus den Abbildungen 30 und 31 zeigt sich ein vollständig anderer Verlauf. Während der Wassergehalt zu den Zeiten mit 40°C und 60°C Vorlauf am höchsten ist, ist der Wassergehalt in der ersten Phase des Versuches ohne Heizung unmittelbar neben dem Vorlauf am geringsten. Interessant wäre der Übergang zwischen den beiden unterschiedlichen Verteilungen des Wassergehaltes vor und nach Inbetriebnahme der Heizung. Dieser ist aber wegen des Ausfalles der Fühler von Tag 33 bis Tag 40 leider nicht ersichtlich.

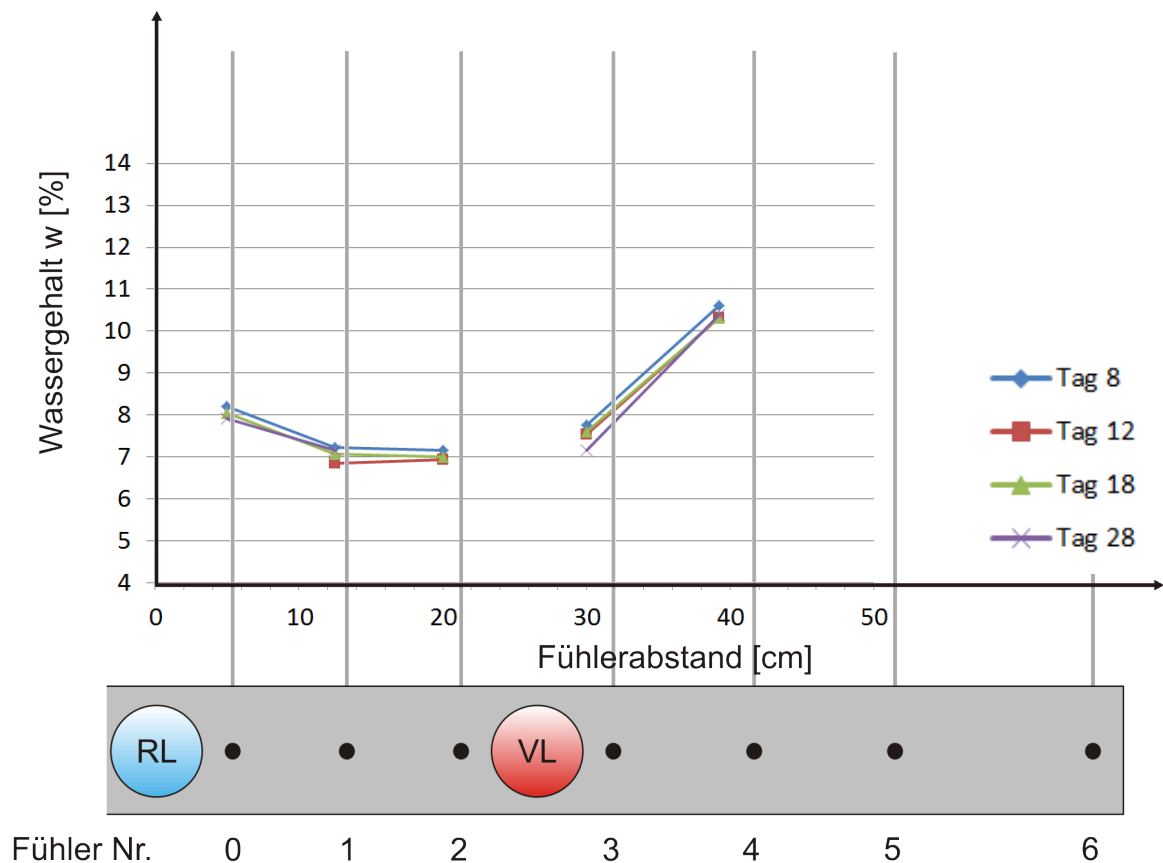


Abb. 34: Wassergehalte vor Inbetriebnahme der Heizung

3.3.3 Auswertung des Versuches mit Thermosand

Bei dem Versuch mit Thermosand wurde, so wie auch beim Kabelsand, zuerst eine Rasenoberfläche eingebaut, die im späteren Verlauf des Versuches durch eine Oberflächenversiegelung in Form einer Mörtelplatte ersetzt wurde. In der Zeit der Rasenoberfläche wurde ebenfalls mit 10 Liter pro Tag bewässert.

Die Temperaturen betragen die ersten 44 Tage des Versuches 40°C als Vorlauftemperatur und 30°C für den Rücklauf. Vom Tag 44 bis Tag 76 wurden der Vorlauf auf 60°C und der Rücklauf auf 50°C geheizt. Darauf folgte dann eine weitere Erhöhung der Temperatur auf eine dritte Temperaturstufe mit 70°C beim Vorlauf und 60°C beim Rücklauf.

Nach mehreren Ausfällen der Heizungseinheiten wurde am Tag 129 wieder auf die vorherige Temperaturstufe mit 60°C Vorlauftemperatur und 50°C für den Rücklauf zurückgeschaltet und diese bis zum Ende des Versuches beibehalten.

Nach einem starken Bewässern des Bodens am Tag 36 erfolgt ähnlich wie bei dem Versuch mit Kabelsand, ein starkes Absinken des Wassergehaltes innerhalb von zwei Tagen. Im weiteren Verlauf des Versuches erfolgt danach nur mehr ein geringer Rückgang. Der Wassergehalt sinkt in den folgenden 150 Tagen des Versuches nur mehr um 1,5 bis 2,5 Prozentpunkte.

Die gemessenen Wassergehalte bewegen sich für Thermosand in einem Bereich von 15 bis 25 % und damit deutlich über den Wassergehalten aus dem Versuch mit Kabelsand, die sich im Bereich von 5 bis 12 % einpendeln. Die Werte entsprechen aber ungefähr dem Wasserrückhaltevermögen des Thermosandes.

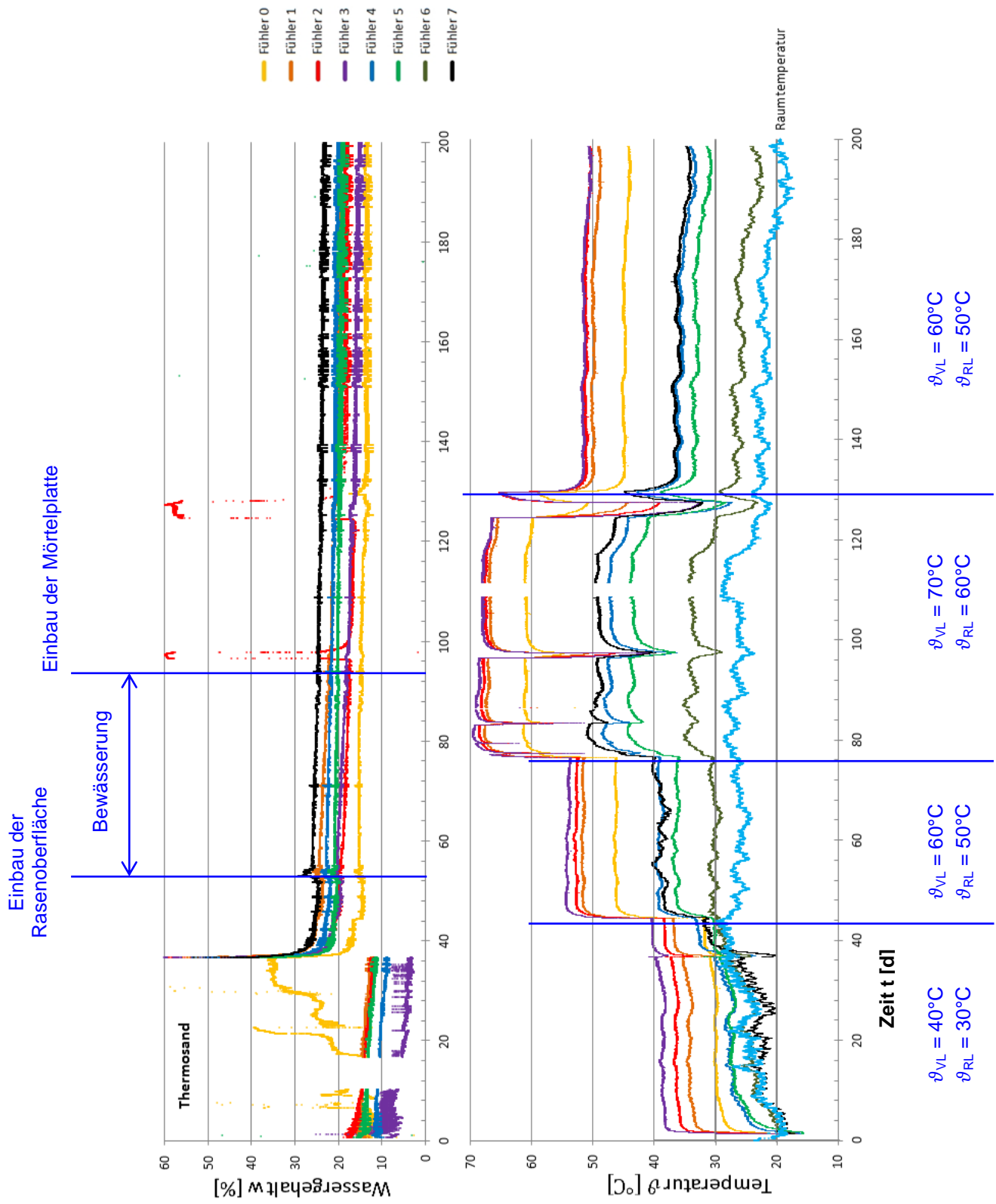


Abb. 35: Ganglinie für Thermosand

Im Profil zeigt die Temperatur einen ähnlichen Verlauf wie bei Kabelsand, jedoch ist der Temperaturabfall auf der Außenseite des Vorlaufes zwischen Fühler 3 und 4 deutlich stärker. Im Unterschied zu Kabelsand ergeben sich bei Thermosand unmittelbar neben dem Vor- und Rücklauf niedrigere Wassergehalte als in den Bereichen dazwischen. Überraschend groß ist der Unterschied mit $\Delta w = 9\%$ zwischen Fühler 0 und 1 obwohl ihr Abstand nur 7,5 cm beträgt.

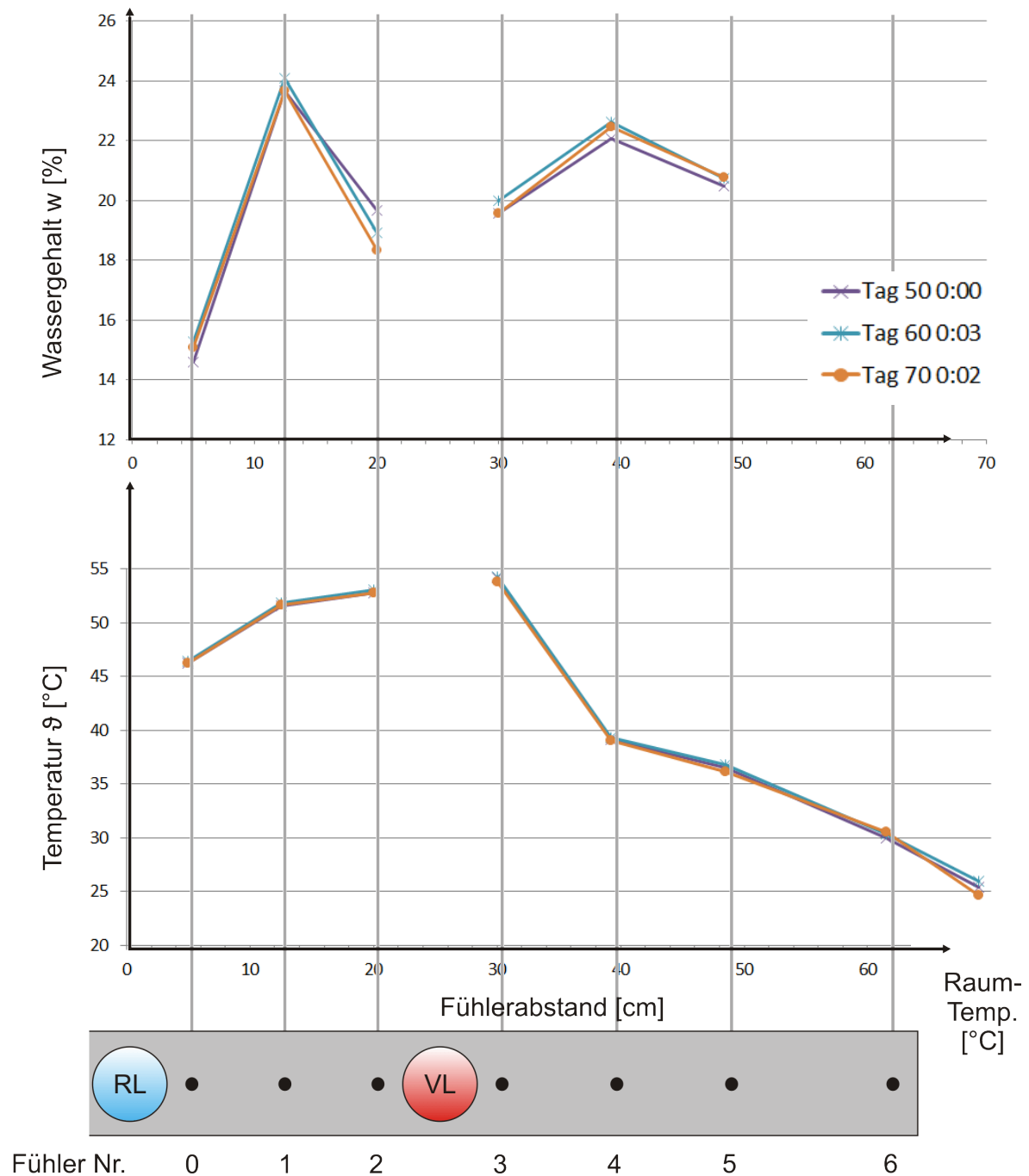


Abb. 36: Temperatur und Wassergehalt im Profil für die Tage 50, 60 und 70

Zwischen Tag 135 und 185 zeigt sich, dass sich bei durchschnittlich 5°C geringerer Raumtemperatur eine nahezu gleiche Temperaturverteilung wie im Zeitraum zwischen Tag 50 und 70 einstellt.

Auch der Wassergehalt zeigt keine Veränderung der Verteilung über den Querschnitt und über einen Zeitraum von 50 Tagen zeigt sich keine Austrocknung.

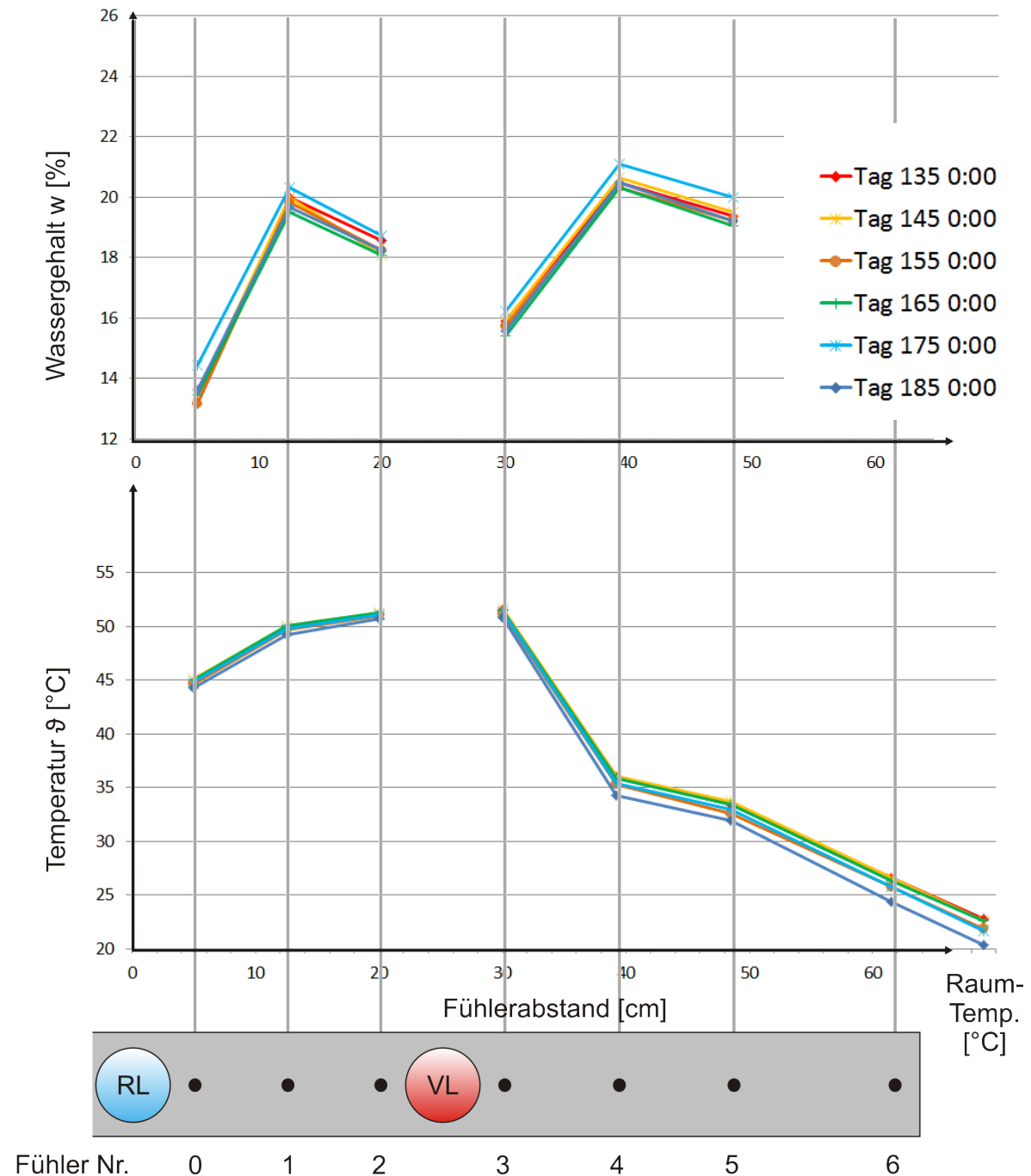


Abb. 37: Temperatur und Wassergehalt im Profil für die Tage 135 bis 185

Auffallend beim Vergleich zwischen Tag 70 (in Abb. 36) und Tag 135 (Abb. 37) ist ein Absinken des Wassergehaltes bei Fühler 1 und 3 um 4 Prozentpunkte während sich der Wassergehalt bei den übrigen Fühlern nur um 1 Prozentpunkt verringert.

Ein weiteres ungeklärtes Verhalten zeigt die TDR-Sonde Nummer 2 gleichzeitig mit den zwei längsten Ausfällen der Heizeinheiten in Form eines plötzlichen Anstieges des Wassergehaltes auf $w = 60\%$. Es könnte sich dabei um eine Folge von Kondensation handeln, jedoch sollte sich dann zumindest bei dem auf der Außenseite des Vorlaufes liegenden Fühler 3 der gleiche Effekt zeigen.

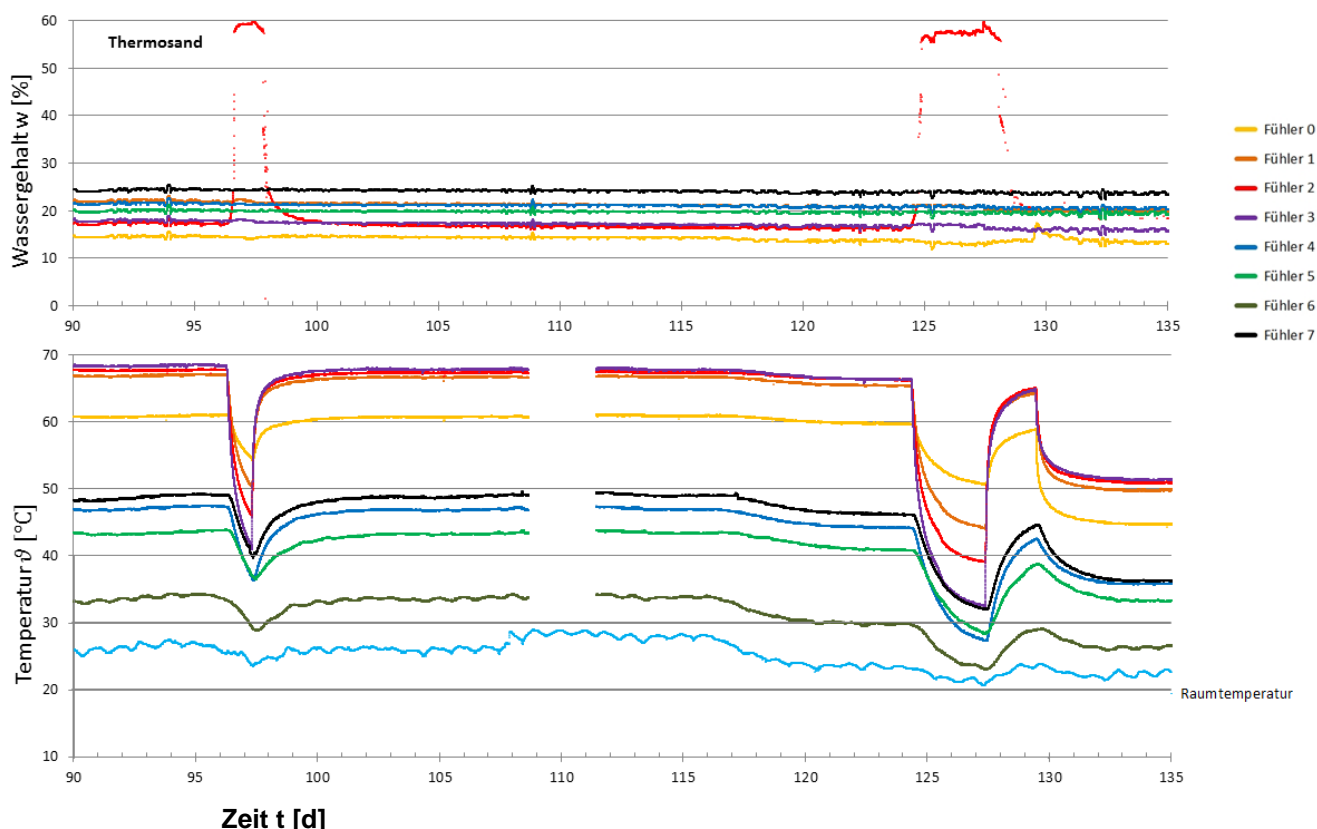


Abb. 38: Ausfälle der Heizeinheiten

Abb. 38 zeigt auch, dass sich eine stärkere Änderung der Raumtemperatur, wie sie von Tag 116 bis Tag 120 mit einem Rückgang um 5°C eingetreten ist, in geringem Ausmaß auch auf die unmittelbar neben den Fernwärmerohren liegenden Fühler Nummer 2 und 3 auswirkt.

In Abbildung 39 ist, bedingt durch die unmittelbar nach dem Auflegen des Rollrasens erforderliche stärkere Bewässerung, ein Ansteigen des Wassergehaltes zu erkennen. Besonders deutlich zeigt dies der Fühler 7, der 15 cm unter der Oberfläche eingebaut ist, durch ein Ansteigen des Wassergehaltes um 4 Prozentpunkte. Innerhalb von 2 Tagen erreichen die Wassergehalte wieder nahezu ihr Ausgangsniveau.

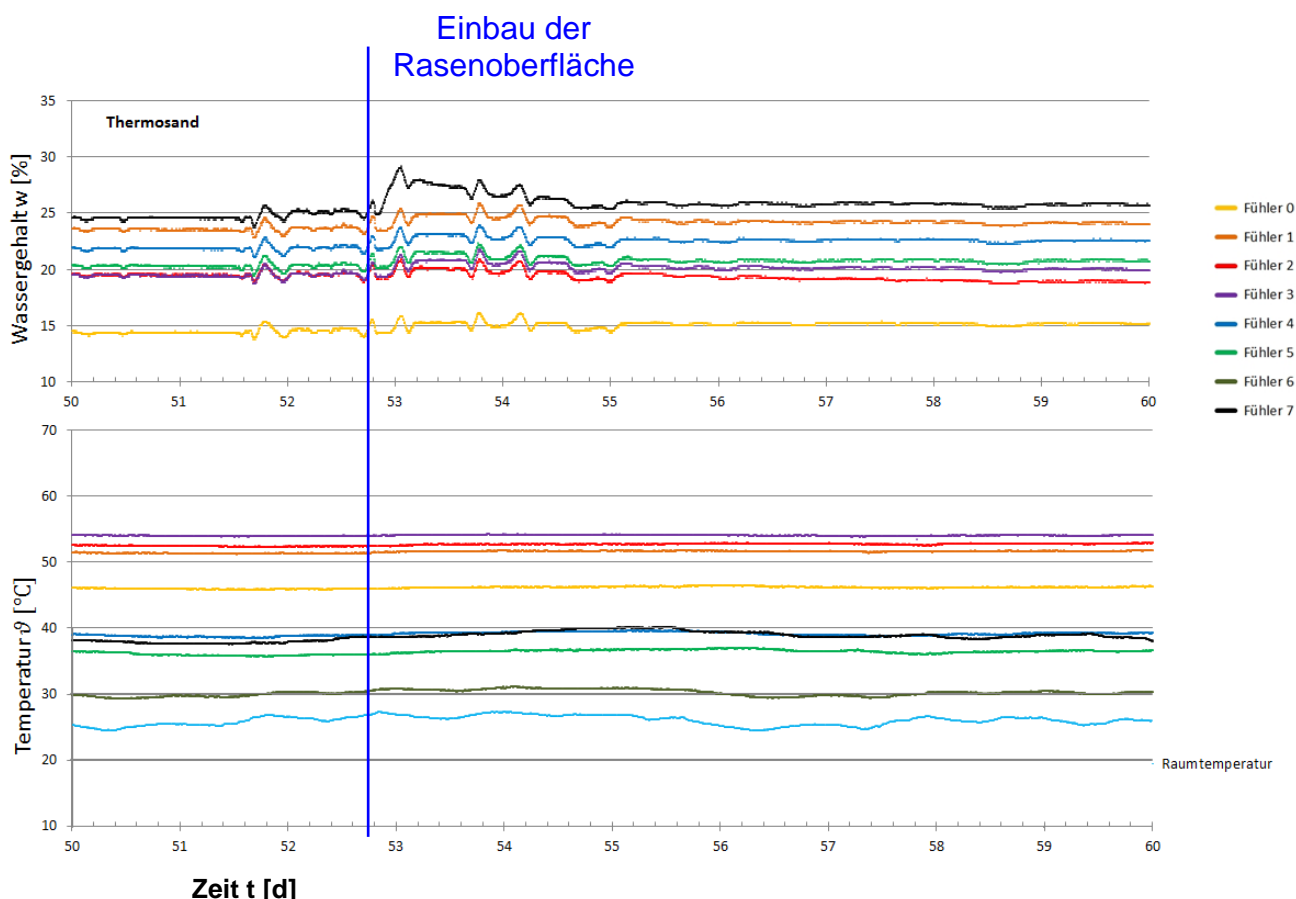


Abb. 39: Wassergehaltsänderung durch stärkere Bewässerung beim Einbau der Rasenoberfläche

Nach Ende des Versuches 2 und Abschalten der Heizung für Vor- und Rücklauf wurde ab 10.12.2008 die Messung der Temperaturen fortgesetzt, jedoch erfolgte keine Erfassung der Wassergehalte.

Abbildung 40 und 41 zeigen den Temperaturverlauf nach Abschalten der Heizung. Die Temperaturen im Versuchsaufbau folgen der Raumtemperatur (hellblaue Linie) im Abstand von nur wenigen zehntel Grad.

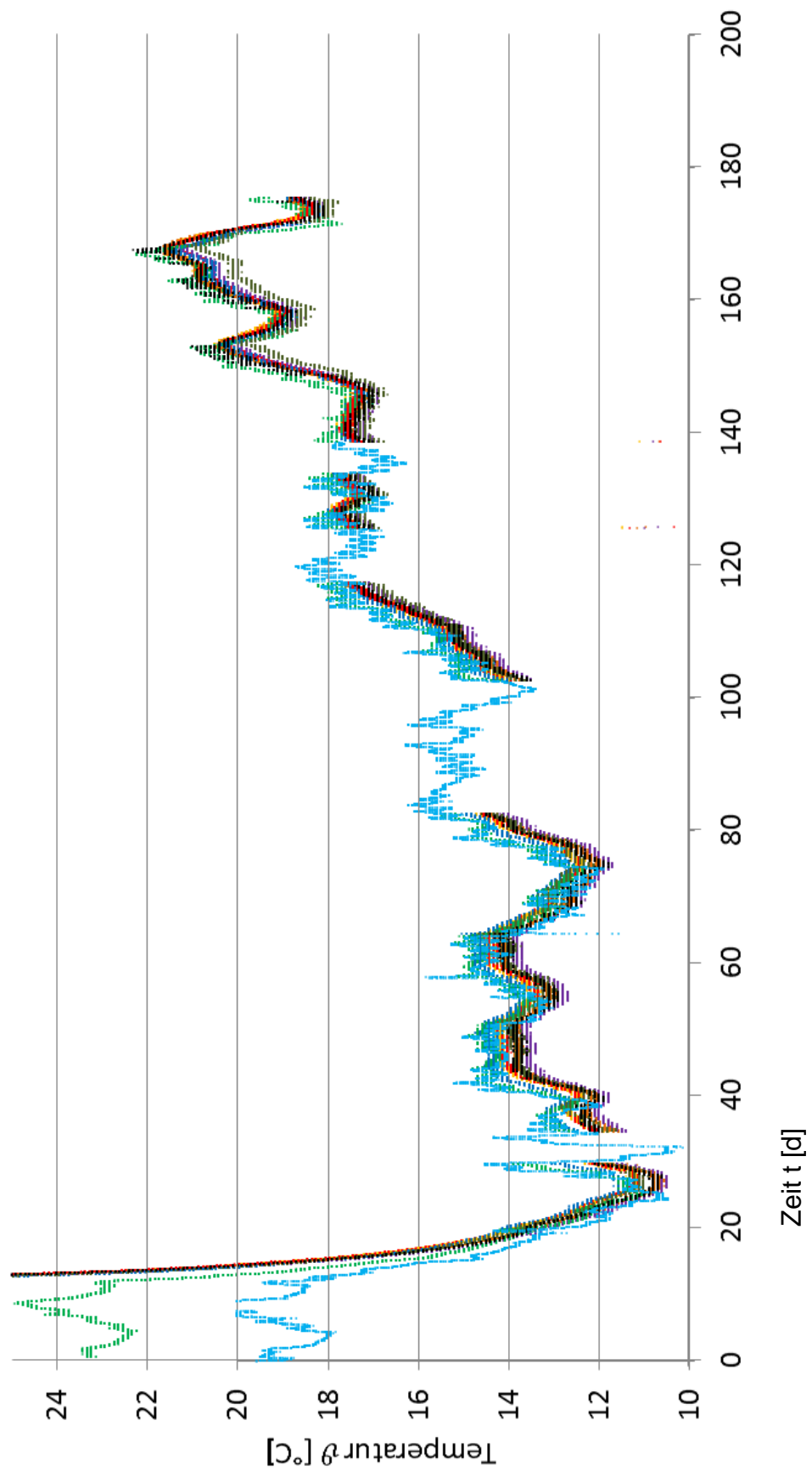


Abb. 40: Temperaturverlauf nach Abschalten der Heizeinheiten

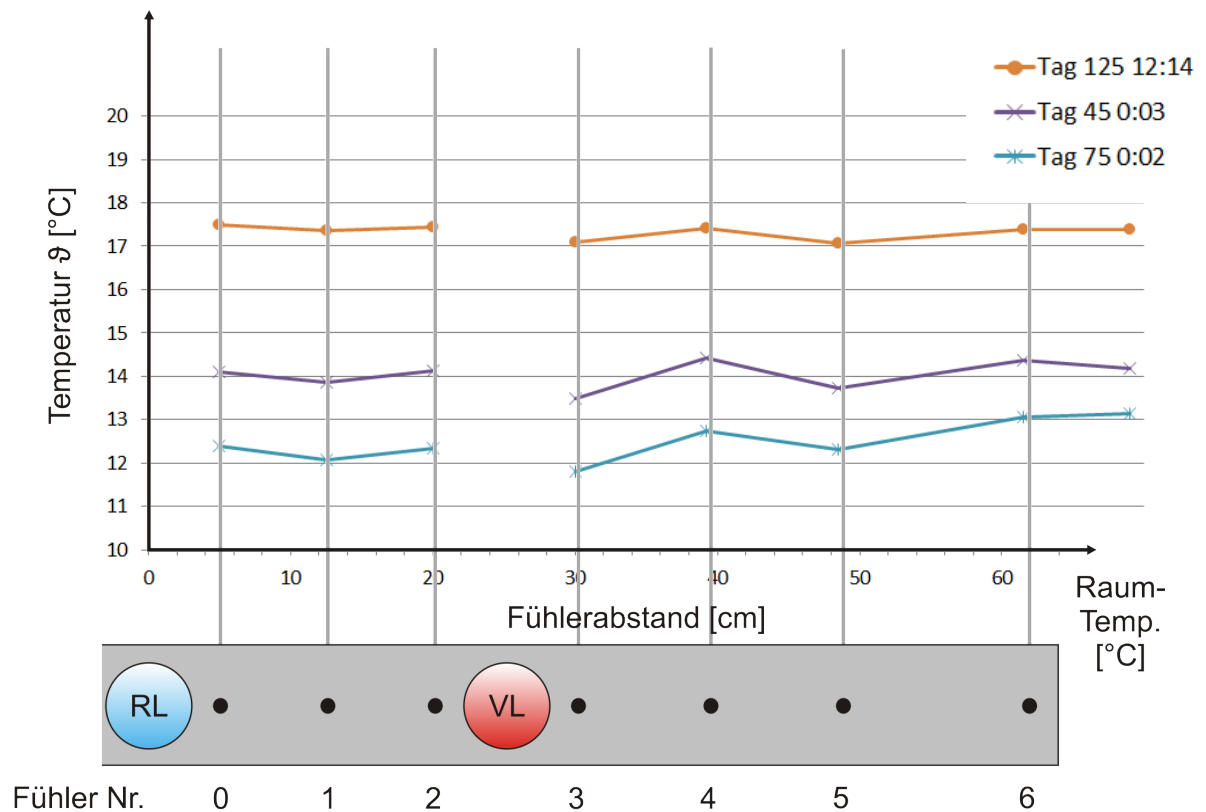


Abb. 41: Temperaturverlauf im Profil

3.3.4 Vergleich des zeitlichen Verlaufes des Temperaturanstieges zwischen Kabelsand und Thermosand

Für den Vergleich des Temperaturverlaufes im instationären Zustand der Temperaturerhöhung von Vor- und Rücklauf wurden die Messwerte aus dem Versuch mit Kabelsand mit den Messwerten aus dem Versuch mit Thermosand überlagert. Dabei wurden die Werte von Thermosand parallel verschoben bis die Ausgangstemperatur und der Beginn des Anstieges beider Kurven zusammenfallen. Aus Abb. 42 und 43 ist ersichtlich, dass die Fühler bei Kabelsand schneller auf die Erhöhung der Temperatur reagieren.

Daraus kann geschlossen werden, dass der Wärmeleitfähigkeitsbeiwert λ von Thermosand geringer ist als der von Kabelsand UK4.

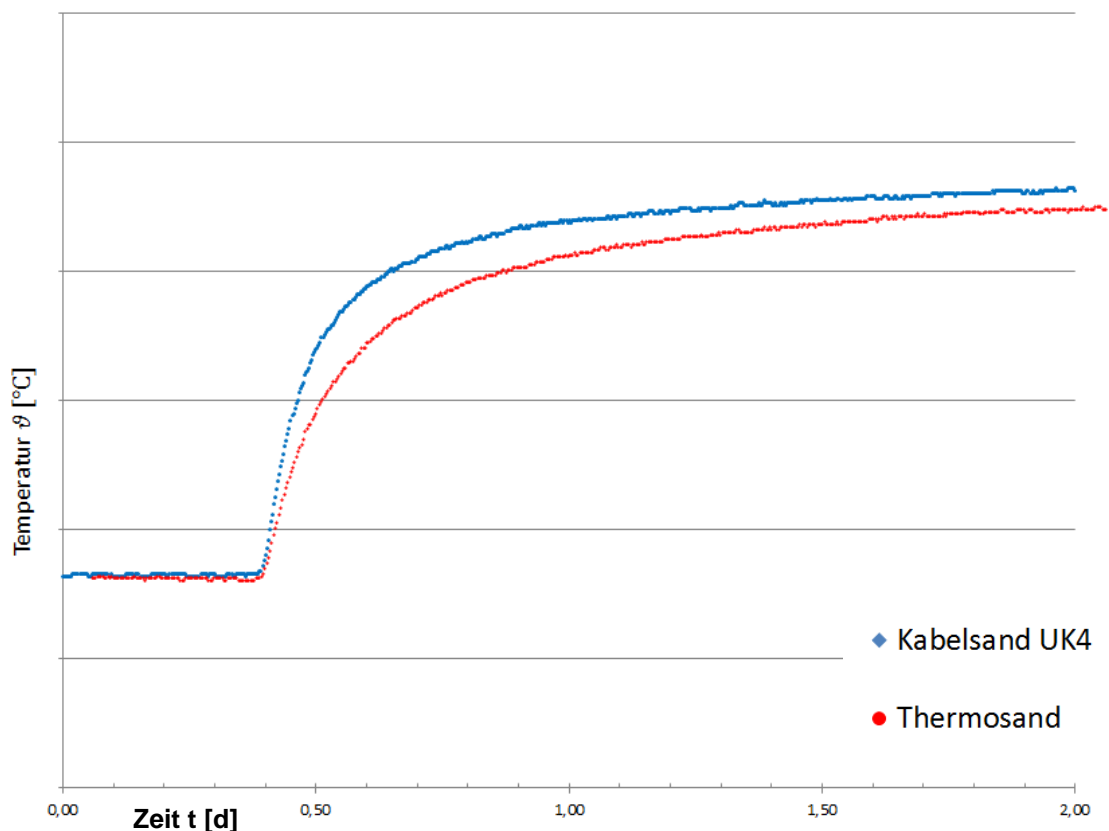


Abb. 42: Vergleich des Temperaturanstieges bei Fühler 1

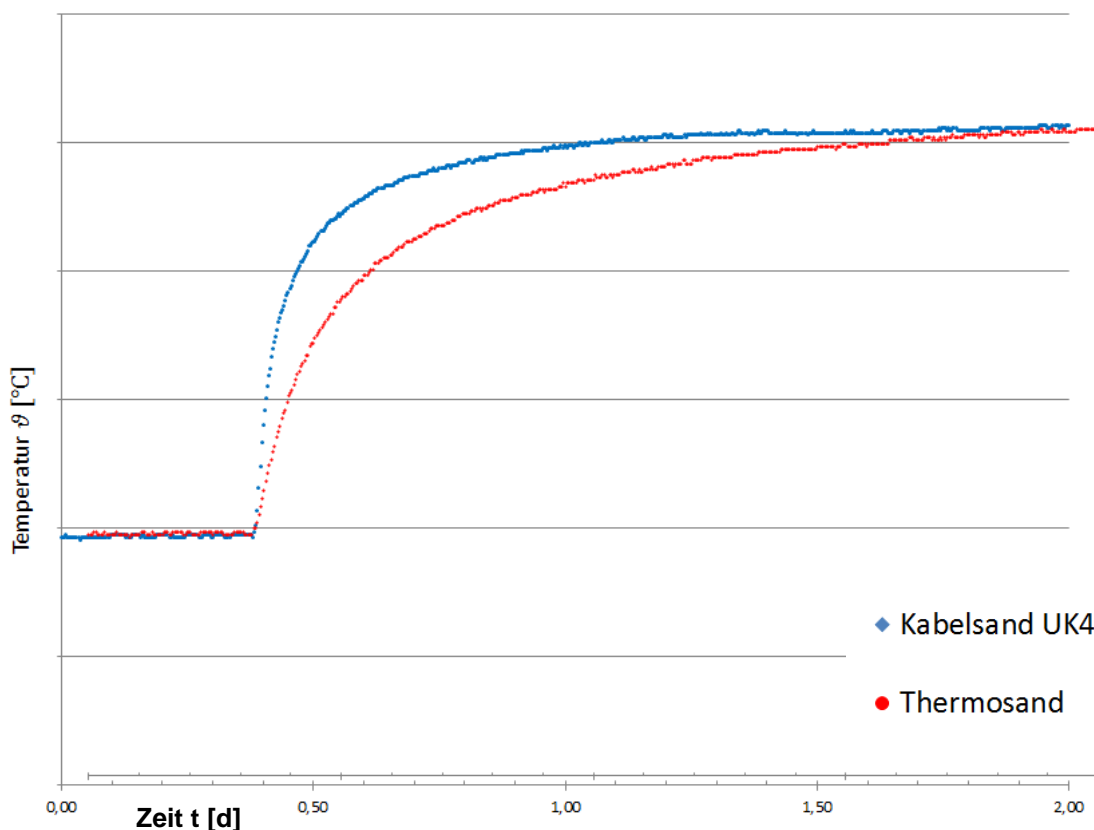


Abb. 43: Vergleich des Temperaturanstieges bei Fühler 2

4 Numerische Simulation der Wärmeleitung

Wie bei früher durchgeführten Feldversuchen (Versuchsstrecke in Wien, Diplomarbeit Axnix (2008) und Versuchsstrecke der Fa. KE KELIT in Linz) sollte auch für diese Laborversuche die Wärmeleitfähigkeit auf Basis der gemessenen Temperaturen berechnet und daraus der Zusammenhang zwischen Wärmeleitfähigkeit und den gemessenen Wassergehalten abgeleitet werden.

Die Berechnung wurde in einem ersten Schritt, unter Annahme radialsymmetrischer Wärmeausbreitung, mit der Formel (15) in Kapitel 2.2.3 durchgeführt. Darüber hinaus wurde eine vergleichende Berechnung mit dem Programm THERM durchgeführt.

4.1 Berechnung der Temperaturverteilung

4.1.1 Berechnung mit THERM

In AutoCAD wurde ein Schnitt durch die Ebene der Fühler (Schnitt A-A in Abb. 26) inklusive der Stahlprofile, die zur Verstärkung des Behälters dienen, erstellt. Die Geometrie dieses Schnittes wurde als Vorlage in das Programm THERM 6.3.19 importiert. Basierend auf dieser Grundlage wurden die einzelnen Querschnittsflächen nachgezeichnet und mit den entsprechenden Materialwerten versehen. Da das Programm die Angabe von Randbedingungen im Inneren des Bauteiles nicht akzeptiert, wurde der Querschnitt für die Berechnung in eine obere und eine untere Hälfte aufgeteilt.

Als Randbedingungen für eine erste Berechnung wurden die Vorlauftemperatur mit $\vartheta_{VL} = 60^{\circ}\text{C}$, die Rücklauftemperatur mit $\vartheta_{RL} = 50^{\circ}\text{C}$ und die Raumtemperatur mit $\vartheta_R = 26^{\circ}\text{C}$ gewählt. Für die Wärmeübergangszahl vom im Rohr strömenden Wasser auf das Rohr wurde $\alpha = 4000 \text{ W/m}^2\text{K}$ und für den Übergang zwischen Versuchsaufbau und Raumluft wurde $\alpha = 20 \text{ W/m}^2\text{K}$ (Luft senkrecht zur Metallwand) gewählt. Für den Boden wurde eine einheitliche Wärmeleitfähigkeit von $\lambda = 0,8 \text{ W/mK}$, für den Stahlbehälter ein $\lambda = 50 \text{ W/mK}$ und für die Deckschichte (Beton) ein $\lambda = 2,2 \text{ W/mK}$ gewählt.

Die Werte für die Wärmeübergangszahlen wurden nach den Tabellen von Anton Schweizer auf <http://www.schweizer-fn.de> gewählt und entsprechen auch den Angaben der Beispiele im Buch Wärmeübertragung (Peter von Böckh, 2009).

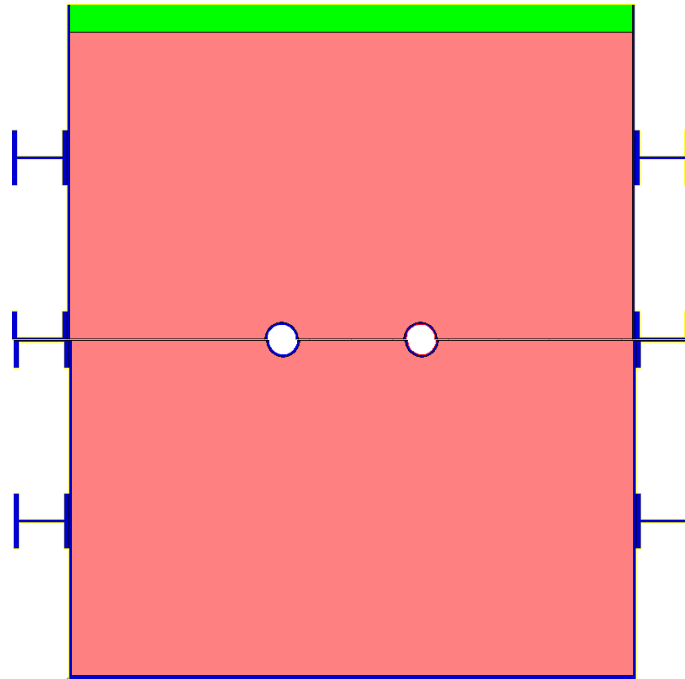


Abb. 44: Modellierung des Querschnittes

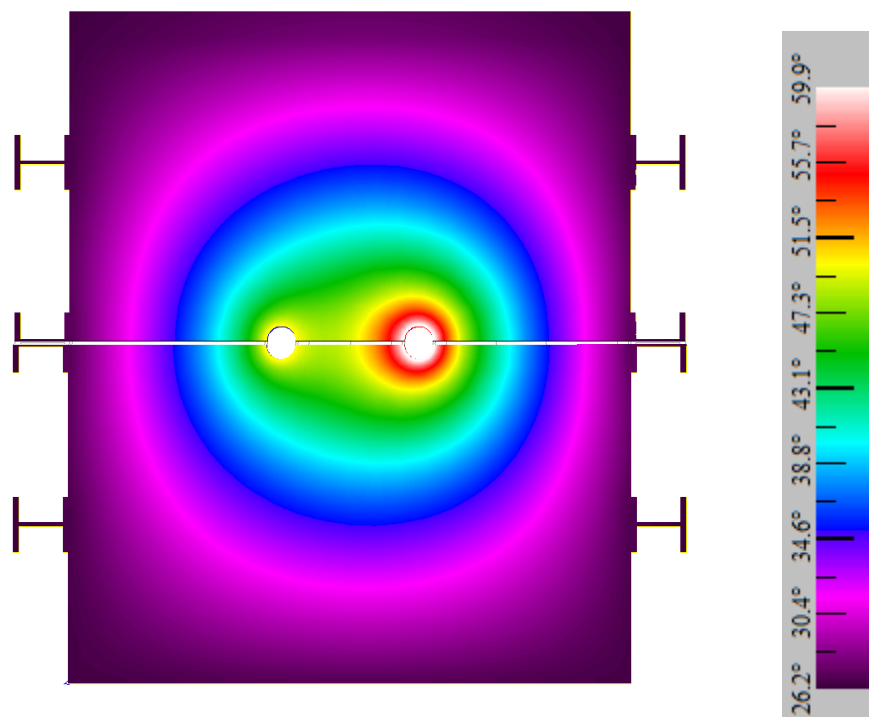


Abb. 45 Darstellung der Temperaturverteilung als Farbspektrum

Die grafische Darstellung der Berechnungsergebnisse zeigt für den Bereich außerhalb der Rohre einen annähernd kreisförmigen Verlauf der Temperaturverteilung

In weiteren Berechnungen wurde der Einfluss veränderter Wärmeleitfähigkeitsbeiwerte des Bodens und der Deckschichte untersucht.

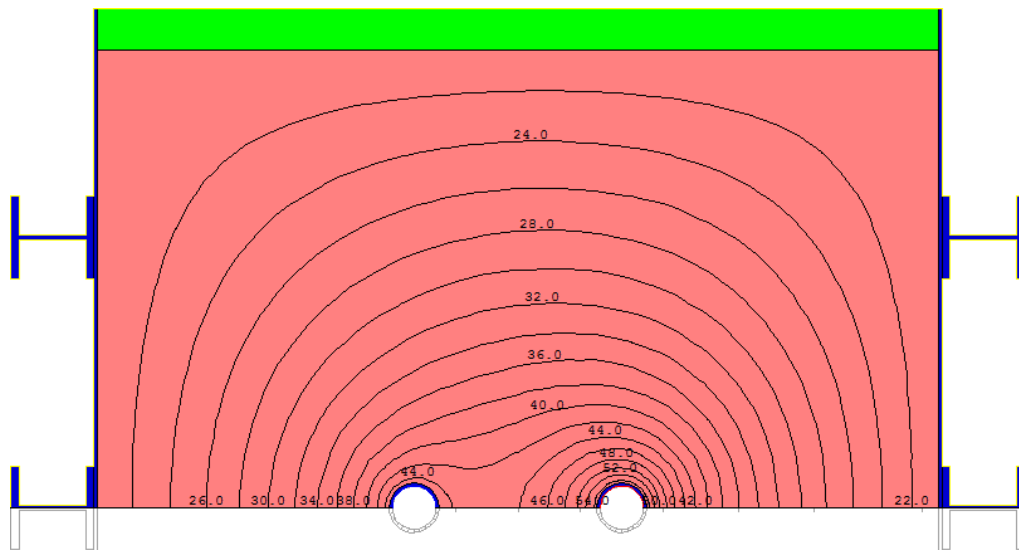


Abb. 46: Isothermen bei $\lambda=0,18$

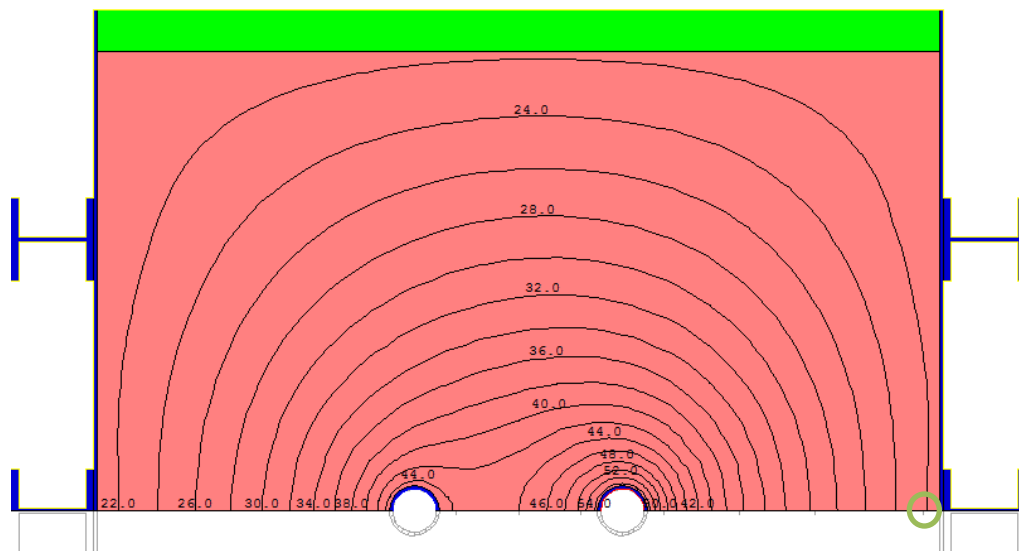


Abb. 47: Isothermen bei $\lambda=0,88$

Abb. 46 und 47 zeigen den Temperaturverlauf bei einem Wärmeleitfähigkeitsbeiwert des Bodens von $\lambda = 0,18$ bzw. $\lambda = 0,88$ W/mK. Zwischen diesen beiden Werten schwankt nach Untersuchungen der Firma KE KELIT der

Wärmeleitfähigkeitsbeiwert für Thermosand in Abhängigkeit des Wassergehaltes.

Zwischen Vor- und Rücklauf ergibt sich durch die Variation des Wärmeleitfähigkeitsbeiwertes keine Änderung des Temperaturverlaufes. Zwischen Vorlauf und Außenwand des Versuchsaufbaues ergibt sich der größte Temperaturunterschied an der Stelle von Fühler Nummer 6 (in Abb. 47 markiert durch einen grünen Kreis) dieser beträgt $0,9^{\circ}\text{C}$. Zwischen $\lambda = 0,60$ und $\lambda = 0,88 \text{ W/mK}$ beträgt der Temperaturunterschied an dieser Stelle nur mehr $0,3^{\circ}\text{C}$ und liegt somit im Bereich der Messgenauigkeit der Temperaturfühler.

4.1.2 Berechnung mit der Formel für Hohlzylinder

Bei dem Versuch den Temperaturverlauf mit der Formel für Hohlzylinder zu berechnen stellte sich sehr schnell heraus, dass eine explizite Berechnung der von den Fernwärmerohren abgegebenen Wärmemenge nicht möglich war. Ursache dafür war der Versuchsaufbau, bei dem aus Überlegungen zum Maßstabsfaktor auf die das Mediumrohr umhüllende Wärmedämmung verzichtet wurde.

Aus diesem Grund wurde versucht unter Annahme des Wärmeleitfähigkeitsbeiwertes von $\lambda = 0,88$, der Vorlauftemperatur und der Temperatur an der Innenseite der Behälterwand, welche der Berechnung mit THERM entnommen wurde, den Wärmestrom zu berechnen und daraus den Temperaturverlauf abzuleiten.

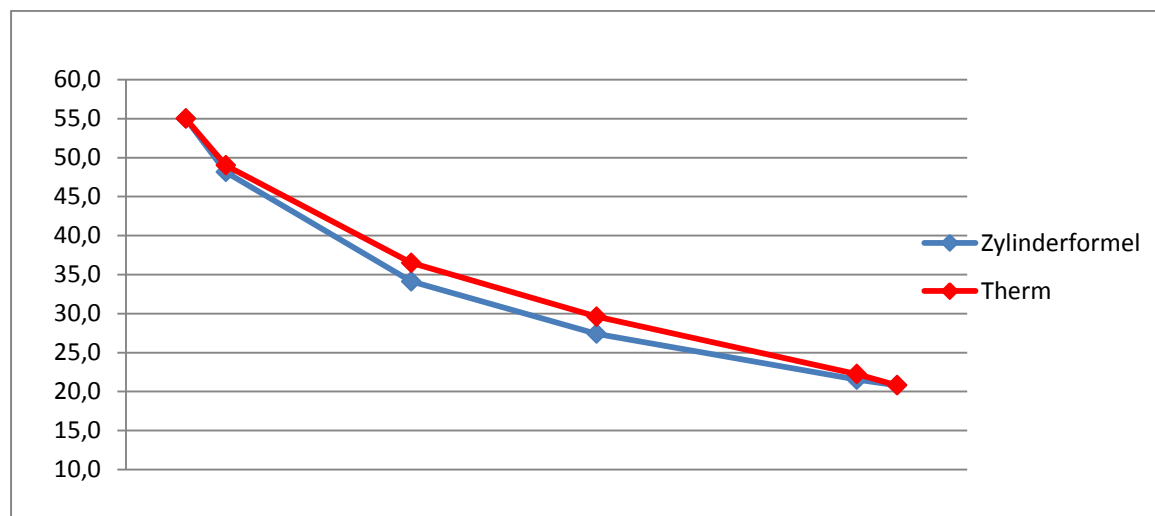


Abb. 48: Vergleich der Berechnungen mit THERM und der Formel für Hohlzylinder

Der Vergleich dieser Berechnungsmethode mit den Ergebnissen der Berechnung mit THERM zeigt eine maximale Abweichung der Temperaturen von 2,4°C.

Wird nun aus dem Temperaturverlauf der THERM-Berechnung ($\lambda = 0,88$) mit der Formel für den Hohlzylinder ein Lambdawert rückgerechnet, so schwankt das Ergebnis zwischen $\lambda = 0,71$ und $\lambda = 0,99$. Das bedeutet für eine Berechnung des Wärmeleitfähigkeitsbeiwertes direkt aus dem Temperaturverlauf eine Differenz von bis zu 20 % zwischen den beiden Berechnungsmethoden. Aufgrund dieser großen Abweichung erscheint die Berechnung mit der Zylinderformel bei diesem Versuchsaufbau als nicht geeignet.

4.2 Vergleich der Messwerte mit der Berechnung

4.2.1 Versuch Kabelsand UK4

Für die Berechnung des Temperaturverlaufes mit THERM wurden folgende Eingabeparameter verwendet.

- Vorlauftemperatur $\vartheta_{VL} = 40^\circ\text{C}$
- Rücklauftemperatur $\vartheta_{RL} = 30^\circ\text{C}$
- Raumtemperatur $\vartheta_R = 15^\circ\text{C}$
- Wärmeleitfähigkeitsbeiwert $\lambda = 1,40$ und $\lambda = 1,70$ für Kabelsand

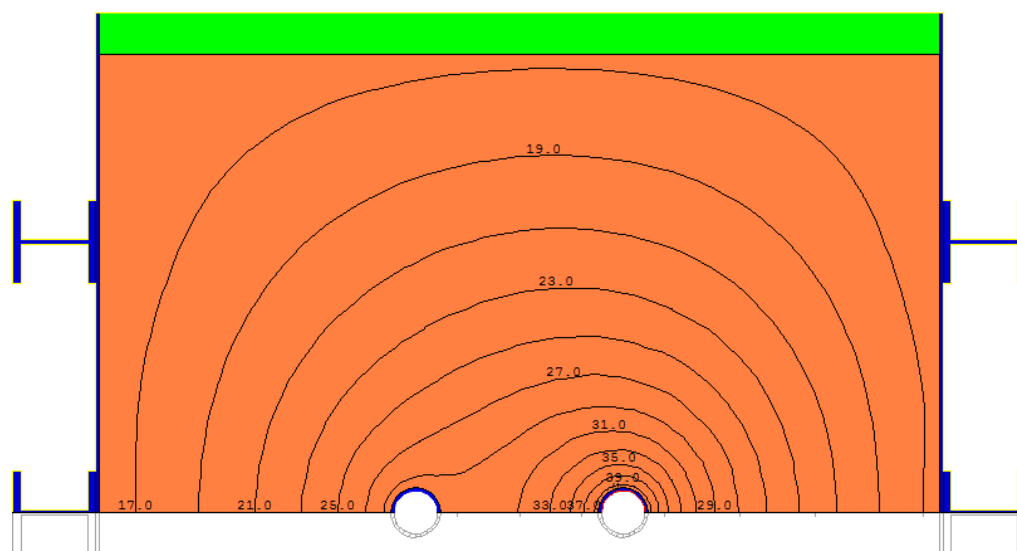


Abb. 49: Nachrechnung des Versuches für Kabelsand UK4

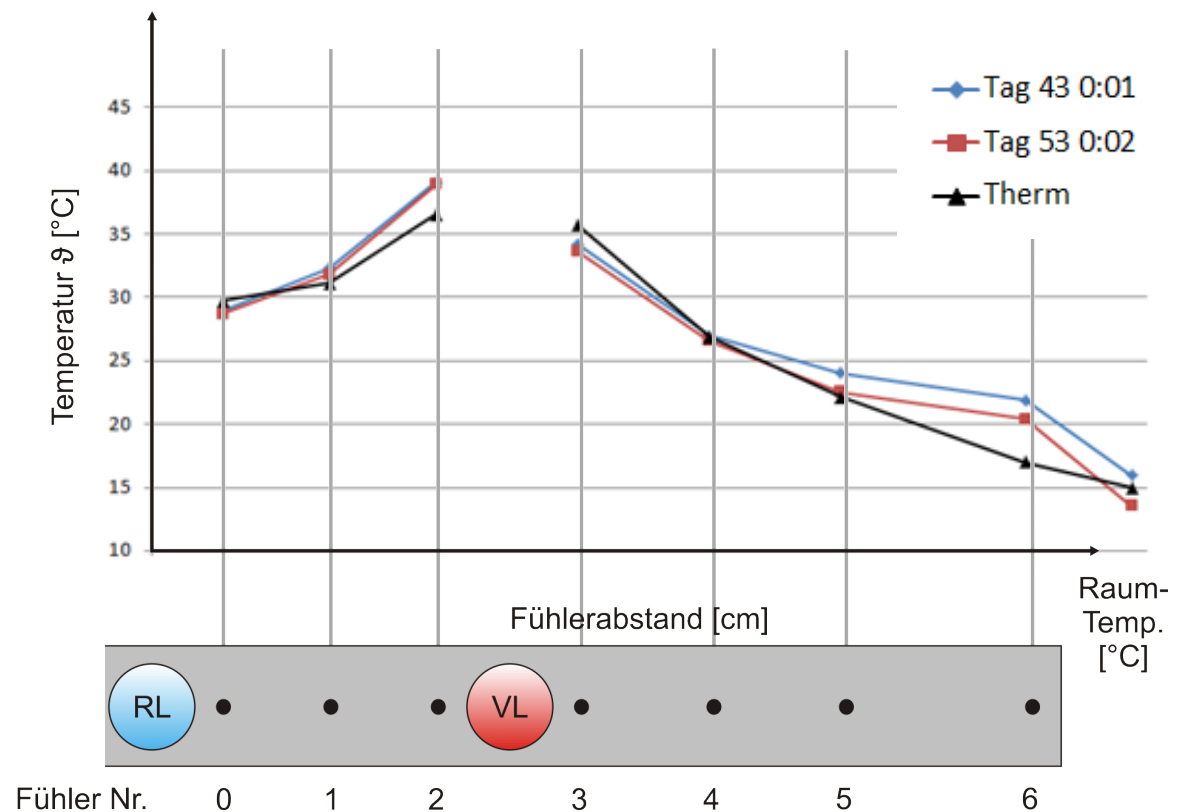


Abb. 50: Vergleich gemessene Temperaturen mit der Berechnung in THERM mit $\alpha = 20 \text{ W/m}^2\text{K}$

In der Berechnung mit THERM ergeben sich zwischen den Ergebnissen mit $\lambda = 1,40$ und $\lambda = 1,70$ nur minimalste Temperaturunterschiede. Die größte Abweichung ergibt sich im Bereich von Fühler Nummer 6 bei dem die berechnete Temperatur bei $\lambda = 1,70$ bei $22,1^\circ\text{C}$ lag und damit um $0,4^\circ\text{C}$ über dem Ergebnis für $\lambda = 1,40$. Es zeigt sich, dass der Temperaturverlauf in einer Schicht unabhängig von deren Wärmeleitfähigkeitsbeiwert ist. Die geringen Temperaturunterschiede ergeben sich nur durch Einbeziehen der dünnen Stahlflächen von Behälter und Rohr und den daraus resultierenden Schichtenverlauf mit unterschiedlichem Verhältnis der Wärmeleitfähigkeitsbeiwerte.

Um an der Stelle von Fühler 6 eine bessere Übereinstimmung zwischen Messwerten und Berechnung zu erreichen, wurde der Wärmeübergangsbeiwert vom Stahlbehälter zur Umgebungsluft variiert. Abb. 51 zeigt den Temperaturverlauf der Berechnung mit $\alpha = 5 \text{ W/m}^2\text{K}$ im Vergleich zu den Messwerten. Es zeigt sich eine deutlich bessere Übereinstimmung

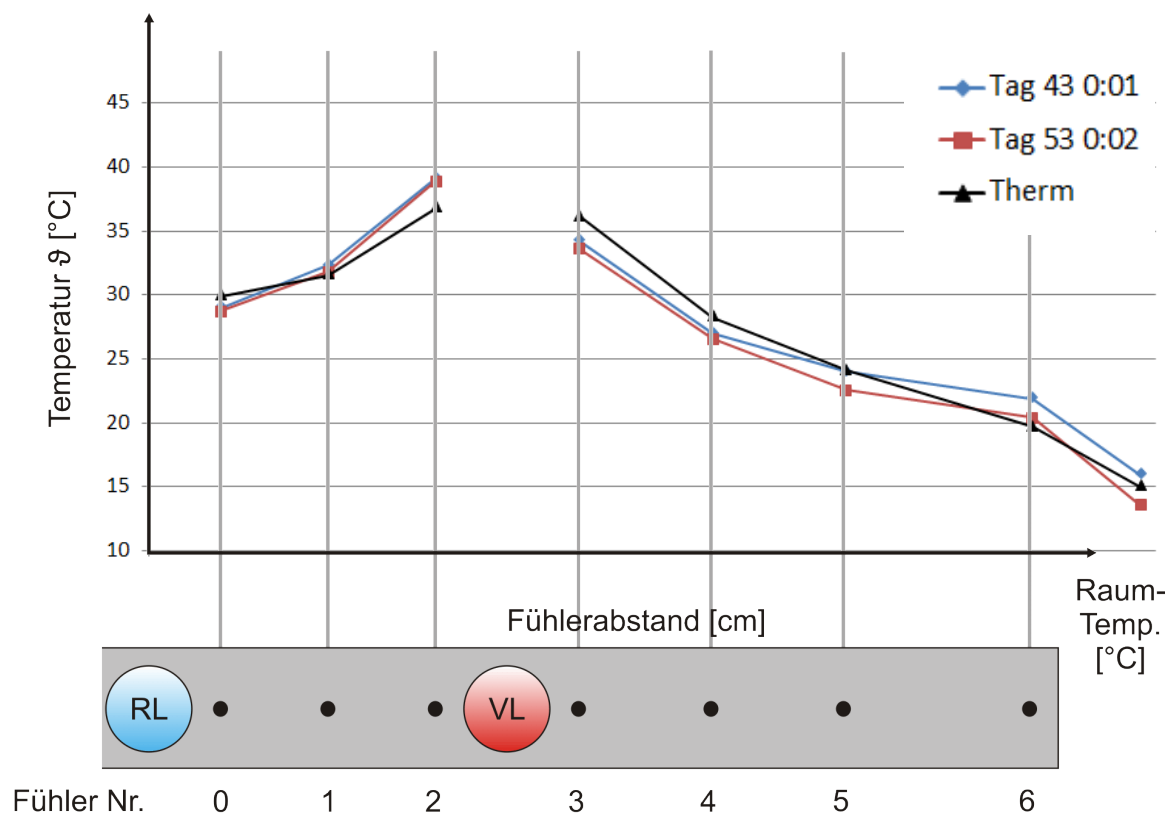


Abb. 51: Vergleich gemessene Temperaturen mit der Berechnung in THERM mit $\alpha = 5 \text{ W/m}^2\text{K}$

4.2.2 Versuch Thermosand

Für die Berechnung des Temperaturverlaufes mit THERM wurden folgende Eingabeparameter verwendet.

- Vorlauftemperatur $\vartheta_{VL}=60^\circ\text{C}$
- Rücklauftemperatur $\vartheta_{RL}=50^\circ\text{C}$
- Raumtemperatur $\vartheta_R=26^\circ\text{C}$
- Wärmeleitfähigkeitsbeiwert $\lambda=0,7$ für Thermosand
- Wärmeübergangskoeffizient $\alpha = 5 \text{ W/m}^2\text{K}$

Der Vergleich der Berechnungsergebnisse mit den Messwerten zeigt Abweichungen von bis zu $3,4^\circ\text{C}$ (siehe Abb. 53). Ursache dieser Temperaturunterschiede könnte die Veränderung der Wärmeleitfähigkeit in Teilbereichen aufgrund von unterschiedlichen Wassergehalten sein.

Eine weitere mögliche Ursache könnten Messfehler bei der Temperaturerfassung sein, die sich aus einer nicht exakt bestimmten Lage der Fühler ergeben. So würde eine Verschiebung von Fühler 2 oder 3 um nur 5 mm eine Veränderung der Temperatur um $\pm 1,2^\circ\text{C}$ ergeben. Bei Fühler 4 würde sich die Temperatur bei einer Lageänderung von 1 cm um 1°C ändern.

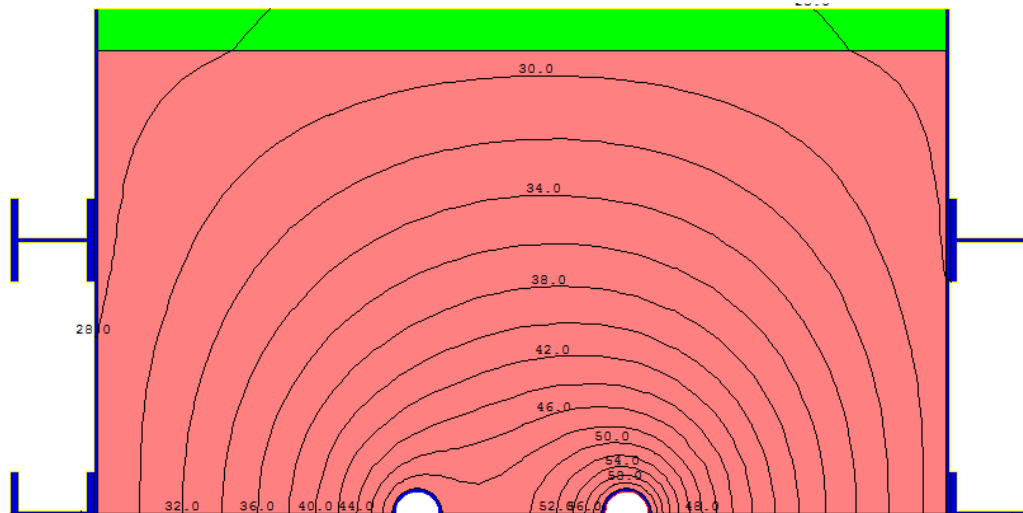


Abb. 52: Nachrechnung des Versuches für Thermosand

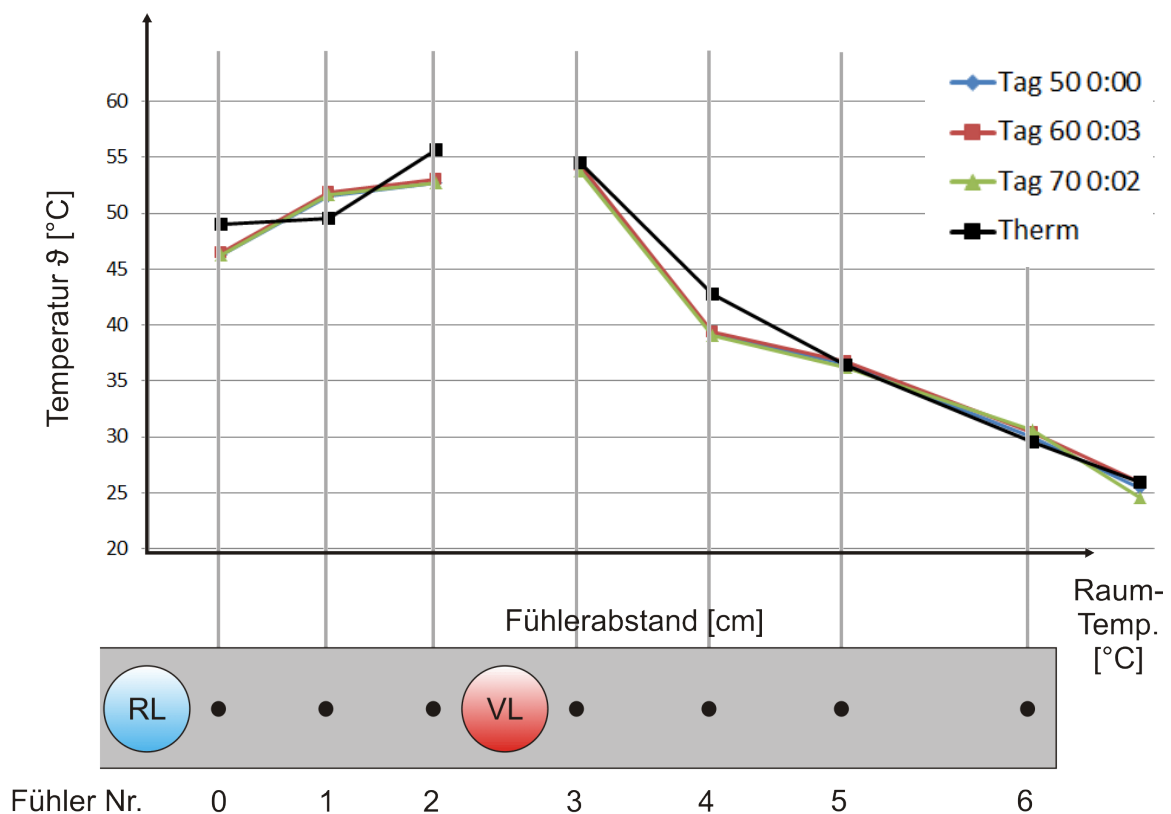


Abb. 53: Vergleich gemessene und berechnete Temperaturen bei Thermosand

4.3 Temperaturverlauf bei Verwendung von KVM-Rohren mit Wärmedämmung

Da sich durch Entfernen der Wärmedämmung von den Fernwärmerohren bei den Versuchen die Temperaturverteilung nahezu unabhängig vom Wärmeleitfähigkeitsbeiwert einstellte, wurde abschließend die Temperaturverteilung unter Verwendung einer 4 cm dicken Polyurethandämmung rund um die Rohre simuliert. Der Temperaturverlauf zeigt in diesem Fall auf der Außenseite des KVM-Rohres bei Thermosand um 4 bis 5°C höhere Werte als bei Kabelsand.

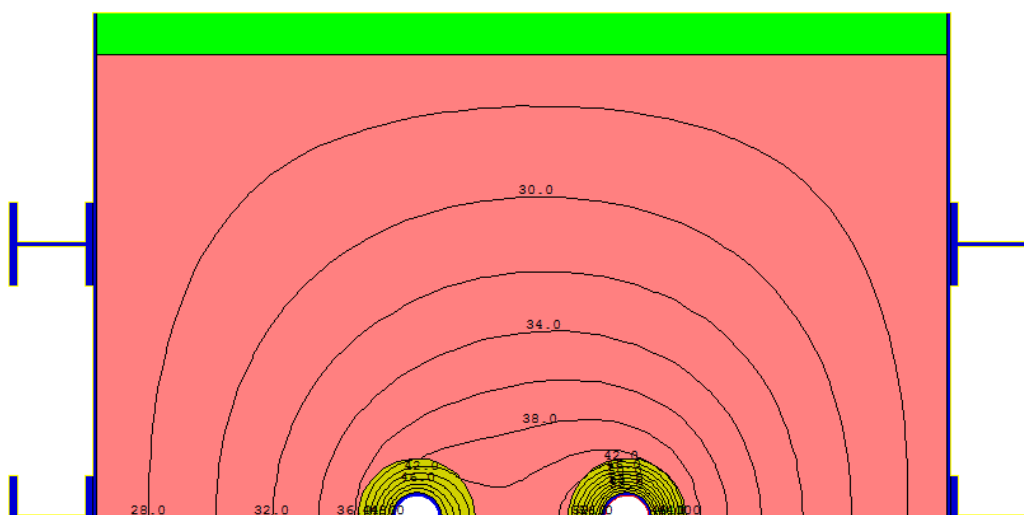


Abb. 54: Temperaturverteilung KVM-Rohr mit Wärmedämmung und Thermosand $\lambda=0,88$

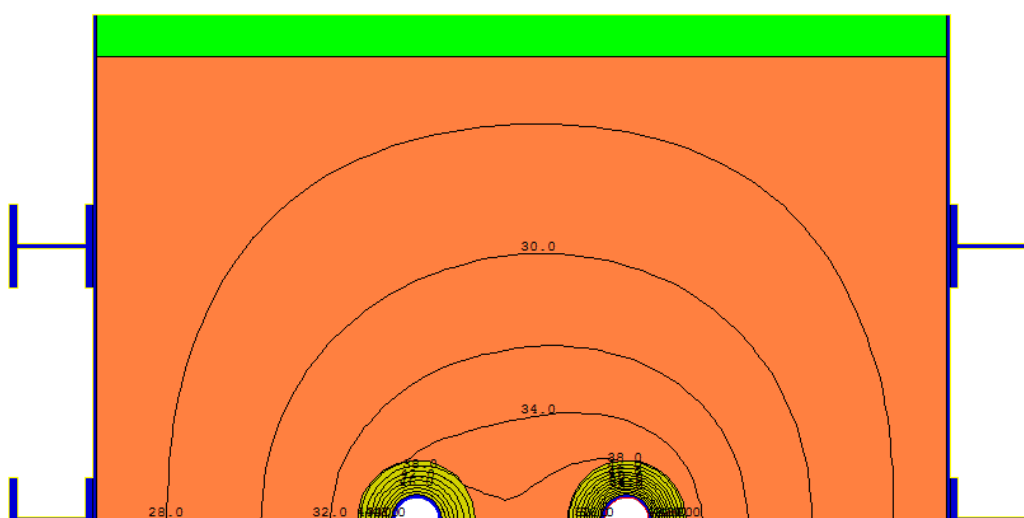


Abb. 55: Temperaturverteilung KVM-Rohr mit Wärmedämmung und Kabelsand $\lambda=1,70$

5 Zusammenfassung und Ausblick

5.1 Zusammenfassung

Ziel der Diplomarbeit war die Aufbereitung und Auswertung der Messergebnisse der Laborgroßversuche zur Wärmeausbreitung rund um Fernwärmerohre unter Einbeziehung der Bodenfeuchtigkeit. Durch das Erstellen von Ganglinien und Querprofilen für Temperaturverlauf und Wassergehalt wurde der Versuchsablauf grafisch dargestellt. Weitere Kapitel beschäftigen sich mit der Kalibrierung der Messfühler und der Rückrechnung des Wärmeleitfähigkeitsbeiwertes.

Es wurden dabei folgende Feststellungen gemacht:

Für die Ermittlung des Wassergehaltes ist bei Thermosand zusätzlich zur Basiskalibrierung der TDR-Sonden eine materialspezifische Korrektur erforderlich, da die Messwerte deutlich von den Vergleichswerten aus der Ofentrocknung abweichen.

Sowohl bei Kabelsand wie auch bei Thermosand zeigt sich nach einem schnellen Absinken des Wassergehaltes unmittelbar nach Einschlämmen des Bodens im weiteren Verlauf der Versuche nur mehr eine geringe Reduktion der Wassergehalte. Die Austrocknung wird auch durch eine Erhöhung der Temperaturen in den Rohrleitungen nicht verstärkt.

Es zeigt sich bei der Austrocknung kein erkennbarer Unterschied zwischen dem Zeitraum in dem eine Rasenoberfläche aufgebracht war und dem Zeitraum mit einer Betonoberfläche. Die für die Bewässerung des Rasens täglich aufgebrachte Menge von 10 Liter Wasser wird vollständig vom Rasen und der Humusschicht aufgenommen und dringt nicht bis in die Ebene der Rohrleitungen ein.

Im Profil zeigt der Temperaturverlauf bei Thermosand auf der Außenseite des Vorlaufes innerhalb der ersten 10 cm einen signifikant stärkeren Abfall als in den weiter außen liegenden Bereichen. Dieser Temperaturverlauf kann eine Folge der starken Abhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit vom Wassergehalt, wie sie bei

Thermosand der Fall ist, sein. Aufgrund der zu geringen Informationen über die räumliche Verteilung der Wassergehalte und eine für die Rückrechnung zu unsicheren Lage der Messfühler kann der Zusammenhang nicht nachgewiesen werden.

Die Berechnung der Wärmeleitfähigkeit durch inverse Modellierung reagiert sehr sensibel auf Abweichungen der Temperaturverläufe und würde wegen der geringen Abmessungen des Versuchsaufbaues eine sehr genaue Bestimmung der Lage der Fühler und eine präzisere Temperaturmessung erfordern um brauchbare Ergebnisse zu erzielen.

5.2 Ausblick

Die Versuche werfen einige Fragen auf, die in speziell konzipierten weiteren Versuchen geklärt werden sollten. Die Ursache für die Verteilung der Wassergehalte über den Querschnitt kann weder aus dem Versuchsablauf noch aus der Temperaturverteilung erklärt werden. In weiteren Versuchen sollte ein möglicher Einfluss der Temperaturschwankungen oder der Stahlrohre auf die Messergebnisse der TDR-Sonden überprüft werden. Bei zukünftigen Versuchen wäre die Verwendung von KVM-Rohren mit Dämmschicht in Betracht zu ziehen oder es wäre die, von den Rohrleitungen abströmende, Wärmemenge auf eine andere Art zu messen.

Auch wenn die Ermittlung der Wärmeleitfähigkeit aus dem Temperaturverlauf aufgrund der Einfachheit der Berechnung als eine verlockende Möglichkeit erscheint, sollten andere Methoden zur Bestimmung des Wärmeleitfähigkeitsbeiwertes mit einer höheren Genauigkeit bevorzugt werden.

Bei weiteren Versuchen sollte die Auswertung der Messwerte laufend während des Versuches erfolgen um die Auswirkungen verschiedener Veränderungen (z.B. Temperatur oder Oberfläche) abgrenzen zu können, bevor andere Randbedingungen variiert werden. Interessant wäre auch eine Veränderung der Bewässerungsmenge um die Auswirkungen einer Trockenphase oder eines Starkregens (20 - 40 l/m²) zu untersuchen.

6 Literaturverzeichnis

ÖNORM EN 13941, Ausgabe: 2011-01-15:

Auslegung und Installation von werksmäßig gedämmten Verbundmantelrohren für die Fernwärme. Österreichisches Normungsinstitut, Wien

Leibniz, O. (2010):

Messung der Wassergehaltsänderungen im Zuge der Austrocknung durch die Wärmeabströmung von Fernwärmerohren mit der TDR-Methode. Unveröffentlicht.

Faraday, M. (1859):

Experimental researches in chemistry and physics. R. Taylor and W. Francis, London, UK.

Maxwell, J.C. (1873):

Treatise on Electricity and Magnetism. Clarendon Press, Oxford, UK.

Stacheder, M. (1996):

Die Time Domain Reflectometry in der Geotechnik, Messung von Wassergehalt, elektrischer Leitfähigkeit und Stofftransport. Schriftenreihe Angewandte Geologie, Universität Karlsruhe, Heft 40.

Rost, A. (1978):

Messung dielektrischer Stoffeigenschaften.
1. Auflage, Vieweg Verlag, Braunschweig

Topp, G.C.; Davis, J.L.; Annan, A.P. (1980):

Electromagnetic Determination of Soil Water Content: Measurements in Coaxial Transmission Lines. Water Resources Research 16, No. 3: 574-582

Malicki, M.A.; Skierucha, W.M. (1989)
A manually controlled TDR soil moisture meter operating with 300ps risetime
needlepulse. Irrigation Science 10: 153-163

Baehr, H.D.; Stephan, K. (2009):
Wärme und Stoffübertragung. 5. Auflage, Springer Verlag.

von Böckh, P.; Wetzel, T. (2009):
Wärmeübertragung, Grundlagen und Praxis. 3. Auflage, Springer Verlag.

Scheid, Y. (2000)
Die TDR-Methode zur Bestimmung des Sättigungsgrades teilgesättigter Böden.
2. Workshop Teilgesättigte Böden, Schriftenreihe Geotechnik, Schanz & Witt
(Hrsg.), Bauhaus-Universität Weimar, Heft 4: 35-55

Semprich, S.; Henögl, O. (2003):
Forschungsprojekt Thermosand, Bericht und Attest zur Eignungsprüfung im
Labor. Institut für Bodenmechanik und Grundbau der TU Graz.

Henögl, O. (2006):
Bodenmechanische Eignung und thermische Vorteile eines neuartigen
Bettungssandes für Fernwärmeleitungen
5. Kolloquium, Bauen im Boden und Fels, Tagungshandbuch 2006

ÖNORM B 4410, Ausgabe Mai 1974:
Bestimmung des Wassergehaltes durch Ofentrocknung Untersuchung von
Bodenproben, Erd- und Grundbau. Österreichisches Normungsinstitut, Wien

Kammerer, G. (2000)

Experimentelle Untersuchungen von Strömungsvorgängen in teilgesättigten Böden und in Spritzbetonrissen in Hinblick auf den Einsatz von Druckluft zur Wasserhaltung im Tunnelbau.

Gruppe Geotechnik Graz, Heft 8: 77-83

Axnix, P.J. (2008)

Wärmeausbreitung im Boden. Mathematische Formulierung und Fernwärmeleitungen als Anwendungsbeispiel. Diplomarbeit am Institut für Bodenmechanik und Grundbau der Technischen Universität Graz

7 Anlagen

7.1 Rohdaten Temperaturmessung (1.1.2008)

HBM_CATMAN_DATAFILE_31
 Fortsetzung des Versuchs von 21-12-07
 01.01.2008
 15:43
 CHANNELS: 11
 SEPARATOR: 9
 MAXLINES: 2063

Zeit DEVICE_1 CH=1	Thermo 0 CH=2	Thermo 1 CH=3	Thermo 2 CH=4	Thermo 3 CH=5	Thermo 4 CH=6	Thermo 5 CH=7	Thermo 6 CH=8	Thermo 7 CH=9	Dauer (Datum,Uhrzeit) CH=10	Uhrzeit CH=11
min	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	hh:mm:ss	hh:mm:ss
01.01.2008-14:34	01.01.2008-14:34	01.01.2008-14:34	01.01.2008-14:34	01.01.2008-14:34	01.01.2008-14:34	01.01.2008-14:34	01.01.2008-14:34	01.01.2008-14:34	01.01.2008-14:34	01.01.2008-14:34
T0 =12.11.07 11:52:54	T0 =30.12.99 00:00:00	T0 =30.12.99 00:00:00	T0 =30.12.99 00:00:00	T0 =30.12.99 00:00:00	T0 =30.12.99 00:00:00	T0 =30.12.99 00:00:00	T0 =30.12.99 00:00:00	T0 =30.12.99 00:00:00	T0 =30.12.99 00:00:00	T0 =30.12.99 00:00:00
dt =0 ms	dt =500 ms	dt =500 ms	dt =500 ms	dt =500 ms	dt =500 ms	dt =500 ms	dt =500 ms	dt =500 ms	dt =500 ms	dt =500 ms
CH 0	CH 4	CH 5	CH 6	CH 7 - 1	CH 14 - 1	CH 15	CH 16	CH 17	CH 10	CH 11
S/N Nicht verfügbar	S/N Nicht verfügbar	S/N Nicht verfügbar	S/N Nicht verfügbar	S/N Nicht verfügbar	S/N Nicht verfügbar	S/N Nicht verfügbar	S/N Nicht verfügbar	S/N Nicht verfügbar	S/N Nicht verfügbar	S/N Nicht verfügbar
Nicht verfügbar ID=0	SR01 DC Verstärker (Erweiterungsmodul) ID=5054	SR01 DC Verstärker (Erweiterungsmodul) ID=5054	SR01 DC Verstärker (Erweiterungsmodul) ID=5054	SR01 DC Verstärker (Erweiterungsmodul) ID=5054	SR01 DC Verstärker (Erweiterungsmodul) ID=5054	SR01 DC Verstärker (Erweiterungsmodul) ID=5054	SR01 DC Verstärker (Erweiterungsmodul) ID=5054	SR01 DC Verstärker (Erweiterungsmodul) ID=5054	SR01 DC Verstärker (Erweiterungsmodul) ID=5054	SR55 4800 Hz TF-Verstärker + Impulsmessung (Basisplatine) ID=5051
Nicht verfügbar ID=0	Nicht verfügbar ID=0	Nicht verfügbar ID=0	Nicht verfügbar ID=0	Nicht verfügbar ID=0	Nicht verfügbar ID=0	Nicht verfügbar ID=0	Nicht verfügbar ID=0	Nicht verfügbar ID=0	Nicht verfügbar ID=0	Nicht verfügbar ID=0
Nicht verfügbar ID=0	Thermoelement Typ K ID=451	Thermoelement Typ K ID=451	Thermoelement Typ K ID=451	Thermoelement Typ K ID=451	Thermoelement Typ K ID=451	Thermoelement Typ K ID=451	Thermoelement Typ K ID=451	Thermoelement Typ K ID=451	Thermoelement Typ K ID=451	Thermoelement Typ K ID=451
x1=0 y1=0;x2=0 y2=0	x1=0 y1=0;x2=0 y2=0	x1=0 y1=0;x2=0 y2=0	x1=0 y1=0;x2=0 y2=0	x1=0 y1=0;x2=0 y2=0	x1=0 y1=0;x2=0 y2=0	x1=0 y1=0;x2=0 y2=0	x1=0 y1=0;x2=0 y2=0	x1=0 y1=0;x2=0 y2=0	x1=0 y1=0;x2=0 y2=0	x1=0 y1=0;x2=0 y2=0
(Elektr.) V	(Elektr.) V	(Elektr.) V	(Elektr.) V	(Elektr.) V	(Elektr.) V	(Elektr.) V	(Elektr.) V	(Elektr.) V	(Elektr.) V	(Elektr.) V
(Physik.)	(Physik.)	(Physik.)	(Physik.)	(Physik.)	(Physik.)	(Physik.)	(Physik.)	(Physik.)	(Physik.)	(Physik.)
1,356316E-19	1,356316E-19	1,356316E-19	1,356316E-19	1,356316E-19	1,356316E-19	1,356316E-19	1,356316E-19	1,356316E-19	1,356316E-19	1,356316E-19
Endwert	Endwert	Endwert	Endwert	Endwert	Endwert	Endwert	Endwert	Endwert	Endwert	Endwert
Thermoelement Typ K ID=451	Thermoelement Typ K ID=451	Thermoelement Typ K ID=451	Thermoelement Typ K ID=451	Thermoelement Typ K ID=451	Thermoelement Typ K ID=451	Thermoelement Typ K ID=451	Thermoelement Typ K ID=451	Thermoelement Typ K ID=451	Thermoelement Typ K ID=451	Thermoelement Typ K ID=451
Nicht verfügbar ID=0	Nicht verfügbar ID=0	Nicht verfügbar ID=0	Nicht verfügbar ID=0	Nicht verfügbar ID=0	Nicht verfügbar ID=0	Nicht verfügbar ID=0	Nicht verfügbar ID=0	Nicht verfügbar ID=0	Nicht verfügbar ID=0	Nicht verfügbar ID=0
Nicht verfügbar ID=0	Thermoelement Typ K ID=451	Thermoelement Typ K ID=451	Thermoelement Typ K ID=451	Thermoelement Typ K ID=451	Thermoelement Typ K ID=451	Thermoelement Typ K ID=451	Thermoelement Typ K ID=451	Thermoelement Typ K ID=451	Thermoelement Typ K ID=451	Thermoelement Typ K ID=451
Skalierung = Physikalisch ID=0	Skalierung = Elektrisch ID=1	Skalierung = Elektrisch ID=1	Skalierung = Elektrisch ID=1	Skalierung = Elektrisch ID=1	Skalierung = Elektrisch ID=1	Skalierung = Elektrisch ID=1	Skalierung = Elektrisch ID=1	Skalierung = Elektrisch ID=1	Skalierung = Elektrisch ID=1	Skalierung = Elektrisch ID=1
Elektrisch ID=1	Skalierung = Elektrisch ID=1	Skalierung = Elektrisch ID=1	Skalierung = Elektrisch ID=1	Skalierung = Elektrisch ID=1	Skalierung = Elektrisch ID=1	Skalierung = Elektrisch ID=1	Skalierung = Elektrisch ID=1	Skalierung = Elektrisch ID=1	Skalierung = Elektrisch ID=1	Skalierung = Elektrisch ID=1
Nicht verfügbar ID=0	Fest (2.5 V) ID=20000	Fest (2.5 V) ID=20000	Fest (2.5 V) ID=20000	Fest (2.5 V) ID=20000	Fest (2.5 V) ID=20000	Fest (2.5 V) ID=20000	Fest (2.5 V) ID=20000	Fest (2.5 V) ID=20000	Fest (2.5 V) ID=20000	Fest (2.5 V) ID=20000
Fest (2.5 V) ID=20000	Fest (2.5 V) ID=20000	Fest (2.5 V) ID=20000	Fest (2.5 V) ID=20000	Fest (2.5 V) ID=20000	Fest (2.5 V) ID=20000	Fest (2.5 V) ID=20000	Fest (2.5 V) ID=20000	Fest (2.5 V) ID=20000	Fest (2.5 V) ID=20000	Fest (2.5 V) ID=20000
ID=20000	Fest (2.5 V) ID=20000	Fest (2.5 V) ID=20000	Fest (2.5 V) ID=20000	Fest (2.5 V) ID=20000	Fest (2.5 V) ID=20000	Fest (2.5 V) ID=20000	Fest (2.5 V) ID=20000	Fest (2.5 V) ID=20000	Fest (2.5 V) ID=20000	Fest (2.5 V) ID=20000

Anlagen

Filter = Nicht verfügbar ID=0 Filter = Kein Filter ID=140 Filter = Kein Filter ID=140 Filter = Kein Filter ID=140 Filter = Kein Filter ID=140
 ID=140 Filter = Kein Filter ID=140 Filter = Kein Filter ID=140 Filter = Kein Filter ID=140 Filter = Kein Filter ID=140
 fg = Nicht verfügbar ID=0 fg = Ungefiltert Hz ID=1199 fg = Ungefiltert Hz ID=1199 fg = Ungefiltert Hz ID=1199 fg = Ungefiltert Hz ID=1199
 fg = Ungefiltert Hz ID=1199 fg = Ungefiltert Hz ID=1199 fg = Ungefiltert Hz ID=1199 fg = Ungefiltert Hz ID=1199 fg = Ungefiltert Hz ID=1199
 ID=1199 fg = Ungefiltert Hz ID=1199 fg = Kein Filter Hz ID=140 fg = 0.5 Hz ID=921
 0 Null 0 Null 0 Null 0 Null 0 Null 0 Null 0 Null 0 Null 0 Null 0 Null 0 Null 0 Null
 0 Tara 0 Tara 0 Tara 0 Tara 0 Tara 0 Tara 0 Tara 0 Tara 0 Tara 0 Tara 0 Tara 0 Tara
 0 Software-Null 0 Software-Null 0 Software-Null 0 Software-Null 0 Software-Null 0 Software-Null 0 Software-Null 0 Software-Null 0 Software-Null 0 Software-Null 0 Software-Null 0
 Software-Null 0 Software-Null 0 Software-Null 0 Software-Null 0 Software-Null 0 Software-Null
 k = 0 k = 0 k = 0 k = 0 k = 0 k = 0 k = 0 k = 0 k = 0 k = 0 k = 0 k = 0
 B = 0 B = 0 B = 0 B = 0 B = 0 B = 0 B = 0 B = 0 B = 0 B = 0 B = 0 B = 0
 Software Skalierung: Keine Software Skalierung: Keine Software Skalierung: Linearisierungstabelle x(1) =
 1,20000001788139E-05 y(1) = 0 x(2) = 1,41600002110004E-03 y(2) = 35 x(3) = 2,02800003021956E-03 y(3) = 50 x(4) =
 2,8440000423789E-03 y(4) = 70 Software Skalierung: Linearisierungstabelle x(1) = 3,600000005364418E-05 y(1) =
 0 x(2) = 1,43200002133846E-03 y(2) = 35 x(3) = 0,002064000030756 y(3) = 50 x(4) = 2,88000004291534E-03 y(4) =
 70 Software Skalierung: Linearisierungstabelle x(1) = 0,000048 y(1) = 0 x(2) = 1,44800002157688E-03 y(2) = 35
 x(3) = 2,89200004309416E-03 y(3) = 70 Software Skalierung: Linearisierungstabelle x(1) = -
 1,60000002384186E-05 y(1) = 0 x(2) = 1,40000002086163E-03 y(2) = 35 x(3) = 2,85200004249811E-03 y(3) = 70
 Software Skalierung: Linearisierungstabelle x(1) = 2,80000004172325E-05 y(1) = 0 x(2) =
 1,42000002115965E-03 y(2) = 35 x(3) = 2,87200004279614E-03 y(3) = 70 Software Skalierung:
 Linearisierungstabelle x(1) = 2,40000003576279E-05 y(1) = 0 x(2) = 1,21200001806021E-03 y(2) = 30 x(3) =
 1,42000002115965E-03 y(3) = 35 x(4) = 2,86000004261732E-03 y(4) = 70 Software Skalierung:
 Linearisierungstabelle x(1) = 3,20000004768372E-05 y(1) = 0 x(2) = 1,23200001835823E-03 y(2) = 30 x(3) =
 1,47200002193451E-03 y(3) = 35 x(4) = 2,87200004279614E-03 y(4) = 70 Software Skalierung:
 Linearisierungstabelle Software Skalierung: Keine

21700,95	28,500	31,809	38,892	33,600	22,542	26,552	20,303	16,200	01.01.2008	15:43
21704,95	28,500	31,809	38,797	33,500	22,444	26,552	20,404	16,300	01.01.2008	15:47
21708,95	28,500	31,909	38,797	33,500	22,542	26,552	20,303	16,200	01.01.2008	15:51
21712,95	28,500	31,809	38,892	33,600	22,542	26,451	20,404	16,300	01.01.2008	15:55
21716,95	28,500	31,809	38,797	33,600	22,444	26,552	20,404	16,300	01.01.2008	15:59
21720,95	28,500	31,809	38,892	33,500	22,444	26,552	20,303	16,200	01.01.2008	16:03
21724,95	28,600	31,909	38,892	33,600	22,542	26,451	20,303	16,200	01.01.2008	16:07
21728,95	28,500	31,809	38,892	33,600	22,542	26,552	20,303	16,300	01.01.2008	16:11
21732,95	28,500	31,809	38,892	33,600	22,542	26,552	20,303	16,300	01.01.2008	16:15
21736,95	28,500	31,809	38,797	33,600	22,542	26,552	20,303	16,300	01.01.2008	16:19
21740,95	28,500	31,809	38,797	33,600	22,542	26,552	20,303	16,300	01.01.2008	16:23
21744,95	28,500	31,809	38,797	33,500	22,542	26,552	20,303	16,300	01.01.2008	16:27
21748,95	28,500	31,909	38,892	33,500	22,542	26,552	20,303	16,300	01.01.2008	16:31
21752,95	28,500	31,809	38,892	33,500	22,542	26,552	20,303	16,300	01.01.2008	16:35
21756,95	28,600	31,809	38,892	33,600	22,542	26,552	20,303	16,300	01.01.2008	16:39
21760,95	28,500	31,809	38,892	33,600	22,542	26,552	20,303	16,300	01.01.2008	16:43
21764,95	28,500	31,909	38,797	33,600	22,542	26,552	20,303	16,300	01.01.2008	16:47
21768,95	28,600	31,909	38,892	33,600	22,542	26,552	20,404	16,300	01.01.2008	16:51
21772,95	28,600	31,909	38,892	33,600	22,444	26,552	20,404	16,300	01.01.2008	16:55
21776,95	28,500	31,909	38,892	33,600	22,542	26,552	20,404	16,300	01.01.2008	16:59
21780,95	28,500	31,909	38,892	33,600	22,542	26,552	20,404	16,300	01.01.2008	17:03
21784,95	28,500	31,809	38,892	33,600	22,542	26,552	20,404	16,300	01.01.2008	17:07
21788,95	28,500	31,809	38,892	33,600	22,542	26,451	20,404	16,300	01.01.2008	17:11
21792,95	28,500	31,809	38,797	33,600	22,542	26,451	20,303	16,300	01.01.2008	17:15
21796,95	28,500	31,809	38,797	33,600	22,542	26,552	20,303	16,300	01.01.2008	17:19
21800,95	28,500	31,909	38,892	33,600	22,542	26,552	20,404	16,300	01.01.2008	17:23
21804,95	28,500	31,809	38,797	33,600	22,542	26,552	20,404	16,300	01.01.2008	17:27
21808,95	28,500	31,909	38,892	33,500	22,542	26,451	20,303	16,300	01.01.2008	17:31
21812,95	28,500	31,909	38,892	33,500	22,542	26,552	20,303	16,300	01.01.2008	17:35
21816,95	28,500	31,909	38,892	33,500	22,542	26,451	20,303	16,300	01.01.2008	17:39
21820,95	28,500	31,909	38,892	33,600	22,542	26,552	20,404	16,300	01.01.2008	17:43
21824,95	28,500	31,909	38,892	33,500	22,542	26,451	20,303	16,300	01.01.2008	17:47
21828,95	28,500	31,909	38,892	33,500	22,641	26,552	20,404	16,300	01.01.2008	17:51
21832,95	28,500	31,909	38,892	33,500	22,542	26,552	20,404	16,300	01.01.2008	17:55
21836,95	28,500	31,909	38,892	33,600	22,542	26,552	20,404	16,300	01.01.2008	17:59
21840,95	28,500	31,909	38,892	33,500	22,542	26,451	20,404	16,300	01.01.2008	18:03
21844,95	28,500	31,909	38,892	33,500	22,542	26,451	20,404	16,300	01.01.2008	18:07
21848,95	28,500	31,909	38,892	33,600	22,542	26,552	20,404	16,300	01.01.2008	18:11
21852,95	28,500	31,909	38,892	33,600	22,542	26,552	20,404	16,300	01.01.2008	18:15
21856,95	28,500	31,909	38,892	33,600	22,542	26,552	20,404	16,300	01.01.2008	18:19
21860,95	28,500	31,909	38,892	33,500	22,542	26,451	20,404	16,300	01.01.2008	18:23
21864,95	28,500	31,909	38,892	33,500	22,641	26,652	20,404	16,300	01.01.2008	18:27
21868,95	28,500	31,909	38,892	33,600	22,641	26,552	20,404	16,300	01.01.2008	18:31
21872,95	28,500	31,909	38,892	33,600	22,641	26,552	20,404	16,300	01.01.2008	18:35
21876,95	28,500	31,809	38,892	33,600	22,641	26,451	20,404	16,300	01.01.2008	18:39
21880,95	28,500	31,809	38,892	33,600	22,641	26,552	20,404	16,300	01.01.2008	18:43

21884,95	28,500	31,809	38,892	33,600	22,641	26,451	20,404	16,400	01.01.2008	18:47
21888,95	28,500	31,809	38,892	33,600	22,641	26,552	20,404	16,400	01.01.2008	18:51
21892,95	28,600	31,909	38,892	33,600	22,641	26,552	20,404	16,400	01.01.2008	18:55

7.2 Rohdaten Temperaturmessung (19.11.2007)

Zeitweise erfolgte die Aufzeichnung der Temperaturmesswerte im falschen Datumsformat. (39405,720 = 19.11.2007 um 17:16:48)

...

4,585	47,677	50,203	57,353	50,416	31,243	24,440	26,364	29,700	39405,720
6,585	47,677	50,305	57,255	50,416	31,243	24,339	26,465	29,600	39405,721
8,585	47,677	50,305	57,255	50,416	31,342	24,339	26,364	29,600	39405,722
10,585	47,677	50,305	57,353	50,416	31,342	24,440	26,364	29,600	39405,724
12,585	47,677	50,305	57,255	50,416	31,243	24,339	26,465	29,600	39405,725
14,585	47,677	50,203	57,255	50,416	31,342	24,339	26,465	29,600	39405,727
16,585	47,774	50,305	57,353	50,319	31,342	24,339	26,364	29,600	39405,728
18,585	47,677	50,305	57,353	50,416	31,342	24,339	26,364	29,600	39405,729
20,585	47,677	50,305	57,255	50,416	31,342	24,440	26,364	29,600	39405,731
22,584	47,677	50,305	57,255	50,512	31,243	24,440	26,364	29,700	39405,732
24,585	47,677	50,305	57,255	50,512	31,342	24,339	26,263	29,600	39405,734
26,585	47,677	50,305	57,353	50,416	31,342	24,339	26,263	29,600	39405,735
28,585	47,677	50,305	57,255	50,416	31,342	24,440	26,364	29,600	39405,736
30,584	47,677	50,305	57,353	50,512	31,342	24,339	26,263	29,700	39405,738
32,585	47,677	50,305	57,353	50,416	31,342	24,440	26,364	29,600	39405,739
34,585	47,677	50,406	57,255	50,416	31,243	24,440	26,364	29,700	39405,740
36,584	47,677	50,305	57,255	50,512	31,342	24,339	26,263	29,700	39405,742
38,584	47,677	50,305	57,353	50,416	31,342	24,339	26,263	29,700	39405,743
40,585	47,677	50,305	57,353	50,416	31,243	24,339	26,263	29,600	39405,745
42,585	47,677	50,305	57,255	50,416	31,243	24,440	26,263	29,600	39405,746
44,585	47,677	50,305	57,255	50,416	31,342	24,339	26,364	29,600	39405,747
46,585	47,677	50,305	57,255	50,416	31,342	24,339	26,263	29,700	39405,749
48,585	47,677	50,305	57,353	50,416	31,342	24,339	26,263	29,700	39405,750
50,585	47,677	50,305	57,255	50,416	31,342	24,339	26,263	29,700	39405,752
52,585	47,677	50,305	57,255	50,416	31,243	24,440	26,263	29,600	39405,753
54,585	47,677	50,305	57,255	50,416	31,243	24,440	26,263	29,600	39405,754
56,585	47,774	50,305	57,353	50,512	31,243	24,440	26,263	29,600	39405,756
58,585	47,677	50,305	57,353	50,512	31,243	24,440	26,263	29,600	39405,757
60,585	47,677	50,305	57,353	50,416	31,243	24,440	26,364	29,600	39405,759
62,585	47,677	50,406	57,353	50,416	31,243	24,540	26,364	29,600	39405,760
64,585	47,774	50,406	57,255	50,416	31,243	24,339	26,364	29,600	39405,761
66,585	47,774	50,406	57,255	50,416	31,243	24,440	26,263	29,700	39405,763
68,585	47,774	50,305	57,255	50,416	31,342	24,440	26,263	29,700	39405,764
70,585	47,677	50,305	57,255	50,416	31,342	24,440	26,263	29,700	39405,765
72,585	47,677	50,305	57,255	50,416	31,342	24,440	26,263	29,700	39405,767
74,585	47,677	50,305	57,255	50,512	31,342	24,440	26,263	29,700	39405,768
76,585	47,677	50,305	57,353	50,512	31,342	24,440	26,263	29,700	39405,770
78,585	47,677	50,305	57,353	50,512	31,342	24,440	26,263	29,700	39405,771
80,585	47,677	50,305	57,353	50,512	31,243	24,440	26,263	29,700	39405,772
82,584	47,677	50,305	57,353	50,512	31,342	24,440	26,263	29,700	39405,774
84,585	47,677	50,305	57,353	50,416	31,342	24,440	26,263	29,700	39405,775
86,585	47,677	50,305	57,353	50,416	31,342	24,440	26,263	29,700	39405,777
88,585	47,677	50,305	57,353	50,416	31,243	24,540	26,364	29,700	39405,778
90,585	47,677	50,305	57,353	50,416	31,243	24,540	26,364	29,700	39405,779
92,585	47,677	50,305	57,353	50,512	31,243	24,540	26,364	29,700	39405,781
94,585	47,677	50,305	57,353	50,416	31,243	24,540	26,364	29,700	39405,782

7.3 Rohdaten der Wassergehaltsmessung (Auszug)

Messwerte vom 11.09.2007 von 11:00 bis 12:00 Uhr (Versuch Kabelsand).

11-09-2007	11:00:51	00	13.45	23.2
11-09-2007	11:01:06	01	10.43	18.5
11-09-2007	11:01:20	02	10.97	19.4
11-09-2007	11:01:35	03	8.24	14.7
11-09-2007	11:01:50	04	10.13	18.0
11-09-2007	11:02:07	05	1.00	-5.2
11-09-2007	11:02:25	06	63.85	82.5
11-09-2007	11:04:51	00	13.38	23.1
11-09-2007	11:05:05	01	10.41	18.5
11-09-2007	11:05:20	02	10.84	19.2
11-09-2007	11:05:35	03	10.05	17.9
11-09-2007	11:05:49	04	10.02	17.9
11-09-2007	11:06:04	05	1.07	-4.8
11-09-2007	11:06:18	06	11.52	20.3
11-09-2007	11:08:51	00	13.17	22.8
11-09-2007	11:09:05	01	10.29	18.3
11-09-2007	11:09:20	02	10.68	18.9
11-09-2007	11:09:34	03	10.07	17.9
11-09-2007	11:09:49	04	9.80	17.5
11-09-2007	11:10:04	05	4.16	5.9
11-09-2007	11:10:19	06	19.09	30.7
11-09-2007	11:12:51	00	12.70	22.1
11-09-2007	11:13:05	01	9.86	17.6
11-09-2007	11:13:20	02	10.32	18.4
11-09-2007	11:13:34	03	10.01	17.8
11-09-2007	11:13:49	04	9.60	17.1
11-09-2007	11:14:03	05	1.00	-5.2
11-09-2007	11:14:18	06	15.58	26.2
11-09-2007	11:16:53	00	12.52	21.8
11-09-2007	11:17:07	01	9.63	17.2
11-09-2007	11:17:22	02	10.08	18.0
11-09-2007	11:17:37	03	9.91	17.7
11-09-2007	11:17:51	04	9.44	16.9
11-09-2007	11:18:06	05	1.42	-3.2
11-09-2007	11:18:20	06	24.59	36.9
11-09-2007	11:20:50	00	12.10	21.2
11-09-2007	11:21:05	01	9.47	16.9
11-09-2007	11:21:20	02	9.98	17.8
11-09-2007	11:21:34	03	9.89	17.6
11-09-2007	11:21:49	04	9.38	16.8
11-09-2007	11:22:05	05	1.80	-1.5
11-09-2007	11:22:21	06	48.27	64.4
11-09-2007	11:24:50	00	12.07	21.1
11-09-2007	11:25:05	01	9.33	16.7
11-09-2007	11:25:20	02	9.76	17.4
11-09-2007	11:25:34	03	9.73	17.4
11-09-2007	11:25:49	04	9.28	16.6
11-09-2007	11:26:03	05	1.00	-5.2
11-09-2007	11:26:22	06	28.26	40.7
11-09-2007	11:28:50	00	9.18	16.4
11-09-2007	11:29:05	01	9.24	16.5
11-09-2007	11:29:20	02	9.78	17.4
11-09-2007	11:29:34	03	9.57	17.1
11-09-2007	11:29:49	04	9.07	16.2
11-09-2007	11:30:03	05	1.31	-3.6
11-09-2007	11:30:18	06	28.88	41.3
11-09-2007	11:32:50	00	9.02	16.1
11-09-2007	11:33:05	01	9.20	16.4
11-09-2007	11:33:19	02	9.78	17.4
11-09-2007	11:33:34	03	9.69	17.3
11-09-2007	11:33:49	04	9.18	16.4
11-09-2007	11:34:03	05	5.65	9.5

Anlagen

11-09-2007	11:34:28	06	38.25	51.2
11-09-2007	11:36:50	00	9.04	16.2
11-09-2007	11:37:05	01	9.29	16.6
11-09-2007	11:37:19	02	9.86	17.6
11-09-2007	11:37:34	03	9.91	17.7
11-09-2007	11:37:48	04	10.13	18.0
11-09-2007	11:38:03	05	3.35	3.6
11-09-2007	11:38:23	06	15.79	26.4
11-09-2007	11:40:50	00	9.20	16.4
11-09-2007	11:41:05	01	9.33	16.7
11-09-2007	11:41:19	02	9.94	17.7
11-09-2007	11:41:34	03	10.01	17.8
11-09-2007	11:41:48	04	9.86	17.6
11-09-2007	11:42:05	05	1.22	-4.1
11-09-2007	11:42:19	06	18.37	29.8
11-09-2007	11:44:50	00	9.00	16.1
11-09-2007	11:45:05	01	9.18	16.4
11-09-2007	11:45:19	02	9.74	17.4
11-09-2007	11:45:34	03	9.81	17.5
11-09-2007	11:45:48	04	9.54	17.0
11-09-2007	11:46:04	05	1.11	-4.6
11-09-2007	11:46:28	06	40.97	55.0
11-09-2007	11:48:50	00	18.94	30.5
11-09-2007	11:49:04	01	18.06	29.4
11-09-2007	11:49:19	02	18.89	30.4
11-09-2007	11:49:34	03	18.68	30.2
11-09-2007	11:49:48	04	19.67	31.4
11-09-2007	11:50:03	05	1.54	-2.6
11-09-2007	11:50:17	06	1.03	-5.0
11-09-2007	11:52:50	00	23.76	36.0
11-09-2007	11:53:04	01	21.67	33.7
11-09-2007	11:53:19	02	22.61	34.8
11-09-2007	11:53:33	03	21.71	33.7
11-09-2007	11:53:48	04	23.69	36.0
11-09-2007	11:54:04	05	1.18	-4.3
11-09-2007	11:54:18	06	1.32	-3.6
11-09-2007	11:56:50	00	21.75	33.8
11-09-2007	11:57:04	01	20.16	31.9
11-09-2007	11:57:19	02	20.24	32.0
11-09-2007	11:57:33	03	18.74	30.2
11-09-2007	11:57:48	04	22.26	34.4
11-09-2007	11:58:04	05	2.61	1.4
11-09-2007	11:58:20	06	24.30	36.6

7.4 Rohdaten der Raumtemperaturmessung

Der folgende Ausschnitt aus der Datei „T-210508_HE.TXT“ zeigt die ersten 6 Stunden nach Beginn der Raumtemperaturmessung für den Versuch mit Kabelsand UK4. Die gesamte Datei beinhaltet 27341 Messwerte aus dem Zeitraum vom 13.11.2007 11:54 bis 21.05.2008 08:34.

Ecolog TN4 ID:50434
Modulbeschreibung: Versuchraum Henögl Dissertation
Datenbeschreibung: Temp-Messungen_21-05-08-He
Lesezeit: 21.05.2008 09:34:28
Zeit des ersten Messwertes: 13.11.2011 11:54:21
Aufzeichnungsintervall: 600s
Ordnung der Fühler und Einheiten: S1:°C
@HEADER ENDS

1	"13.11.2011"	"11:54:21"	
2	"13.11.2011"	"12:04:21"	22.31
3	"13.11.2011"	"12:14:21"	19.88
4	"13.11.2011"	"12:24:21"	18.44
5	"13.11.2011"	"12:34:21"	17.56
6	"13.11.2011"	"12:44:21"	17.13
7	"13.11.2011"	"12:54:21"	16.88
8	"13.11.2011"	"13:04:21"	16.75
9	"13.11.2011"	"13:14:21"	16.69
10	"13.11.2011"	"13:24:21"	16.63
11	"13.11.2011"	"13:34:21"	16.63
12	"13.11.2011"	"13:44:21"	16.63
13	"13.11.2011"	"13:54:21"	16.63
14	"13.11.2011"	"14:04:21"	16.63
15	"13.11.2011"	"14:14:21"	16.63
16	"13.11.2011"	"14:24:21"	16.63
17	"13.11.2011"	"14:34:21"	16.63
18	"13.11.2011"	"14:44:21"	16.63
19	"13.11.2011"	"14:54:21"	16.63
20	"13.11.2011"	"15:04:21"	16.69
21	"13.11.2011"	"15:14:21"	16.69
22	"13.11.2011"	"15:24:21"	16.75
23	"13.11.2011"	"15:34:21"	16.75
24	"13.11.2011"	"15:44:21"	16.75
25	"13.11.2011"	"15:54:21"	16.75
26	"13.11.2011"	"16:04:21"	16.81
27	"13.11.2011"	"16:14:21"	16.81
28	"13.11.2011"	"16:24:21"	16.81
29	"13.11.2011"	"16:34:21"	16.88
30	"13.11.2011"	"16:44:21"	16.94
31	"13.11.2011"	"16:54:21"	16.94
32	"13.11.2011"	"17:04:21"	16.94
33	"13.11.2011"	"17:14:21"	16.94
34	"13.11.2011"	"17:24:21"	16.94
35	"13.11.2011"	"17:34:21"	17.00
36	"13.11.2011"	"17:44:21"	17.00
37	"13.11.2011"	"17:54:21"	17.00

**7.5 Plan 1: Ganglinie des Laborversuches
Kabelsand UK4**

**7.6 Plan 2: Ganglinie des Laborversuches
Thermosand**