

Einfluss des Wasser- und Wärmehaushaltes von Böden auf den Betrieb erdverlegter Energiekabel

vorgelegt von

Dipl-Ing. Steffen Trinks

aus Berlin Friedrichshain

von der Fakultät VI der Technischen Universität Berlin

zur Erlangung des akademischen Grades

- Dr. Ing. –

genehmigte Dissertation

Promotionsausschuss:

Vorsitzender: Prof. Dr. Joachim Erber

Gutachter: Prof. Dr. Gerd Wessolek

Prof. Dr. Klaus Bohne

Tag der wissenschaftlichen Aussprache: 14. Juli 2010

Berlin, 2010

D 83

Gliederung

Gliederung.....	2
Kurzfassung.....	4
Abstract	6
Danksagung.....	8
1 Einleitung und Problemstellung	10
2 Übersicht zu Theorie und Untersuchungsgegenstand.....	14
2.1 Transport von Wasser und Wärme im Boden.....	14
2.1.1 Wasser- und Wärmehaushalt.....	14
2.1.2 Bodeneigenschaften	18
2.2 Grundlagen zu Energiekabeln.....	27
2.2.1 Energieübertragung mit erdverlegten Energiekabeln	28
2.2.2 Kabelaufbau	29
2.2.3 Wärmeentwicklung des Kabels	30
2.3 Modellierung Transportvorgängen mit dem Delphin-Modell.....	36
2.3.1 Das physikalische Materialmodell	36
2.3.2 Transportprozesse für Wärme, Feuchte, Luft und Salz	37
2.3.3 Das Simulationsprogramm DELPHIN4.....	39
2.3.4 Materialeigenschaften und -funktionen.....	41
3 Wasser- und Wärmehaushalt der Monitoringstandorte	44
3.1 Material und Methoden.....	44
3.2 Temperatur- und Wasserhaushalt der Standorte	50
3.3 Temperatur- und Wasserhaushalt im Kabelraum.....	54
3.4 Standorteinfluss auf den Betrieb einer Kabeltrasse	58
4 Thermische und hydraulische Eigenschaften von Substraten.....	63
4.1 Material und Methoden.....	63
4.2 Physikalische Eigenschaften der Füllsubstrate	66
4.2.1 Partikelgrößenverteilung	66
4.2.2 Bodenhydraulische Eigenschaften	67
4.2.3 Thermische Bodeneigenschaften.....	69
4.3 Kabeltrassenbewertung über Substrateigenschaften	73
4.3.1 Überblick zu Trassenstandorten in Berlin	73
4.3.2 Bewertung des thermischen Widerstandes von Füllsubstraten	78
4.3.3 Bewertung einer existierenden 110kV-Trasse.....	83

5	Numerische Studien zu Betriebsszenarien.....	87
5.1	Modellbildung.....	87
5.1.1	Modellaufbau	87
5.1.2	Abbildung des Kabels und Trassenquerschnitts.....	88
5.1.3	Modelle des Standortmonitorings	92
5.1.4	Modell der Betriebszenarien	93
5.2	Ergebnisse des Modells des Standortmonitorings	97
5.2.1	Messstelle Wald	97
5.2.2	Messstelle Strasse.....	99
5.3	Bewertung des Einflusses von Klima und Standort auf die Kabeltemperatur	101
5.3.1	Ergebnisse mit konstanter Stromlast	101
5.3.2	Ergebnisse mit transienter Stromlast	108
6	Zusammenfassung und Schlussfolgerungen.....	114
	Literatur.....	118
	Tabellenverzeichnis.....	125
	Abbildungsverzeichnis	126

Kurzfassung

Die Festlegung der maximalen Strombelastbarkeit von erdverlegten Energiekabeln erfolgt anhand der Grenztemperatur des Leiters. Die Strombelastbarkeit der Kabel ist von entscheidender Bedeutung für die Dimensionierung eines Kabelnetzes und entscheidet über einen Trassenneu- oder -ausbau. Neben den thermischen Eigenschaften des Kabels und der Kabelanordnung bestimmen die thermischen Bodeneigenschaften und die Bodentemperaturen die Leitertemperatur. Diese Einflussgrößen haben sowohl räumlich als auch zeitlich eine hohe Variabilität. In den Berechnungsverfahren der Energiewirtschaft zur Strombelastbarkeit wird diese Variabilität nicht oder nur stark vereinfacht berücksichtigt, so dass Übertragungspotenziale von Trassen leicht unter- oder überschätzt werden können.

Die Zielsetzung der vorliegenden Forschungsarbeit bestand daher in der Optimierung des Systems „Erdkabel“, unter Berücksichtigung der Standort- und Bodenbedingungen. Dazu wurde ein Freilandmonitoring an einer 110kV Kabeltrasse in Berlin durchgeführt. An einem Strassen- und einem Waldstandort wurden für einen Zeitraum von 18 Monaten die Kabeltemperatur, sowie der Wärme- und Wasserhaushalt im Kabelraum gemessen. Ein zweiter Schwerpunkt der Arbeit bestand in der Ermittlung von thermischen und hydraulischen Eigenschaften von Bodensubstraten. Dazu wurden thermische und hydraulische Eigenschaften von verschiedenen Texturen im Labor gemessen und parametrisiert, sowie in ihrer Eignung für die Kabelverlegung bewertet. Ein dritter Punkt ist die Betrachtung der Wirkung von Witterung, Standort und Stromlastgang auf die Leitertemperatur. Dies erfolgte mit einem numerischen Modell für verschiedene Betriebsszenarien.

Das Standortmonitoring ergab, dass der Wärmehaushalt der Standorte und der Jahresgang der Bodentemperatur die Kabeltemperatur bestimmt. Am Straßenstandort war die gemessene Kabeltemperatur um 5 – 10 K höher als am Standort Wald. Die durch die Strombelastung verursachte Erwärmung des Kabelmantels betrug maximal 5 K gegenüber dem unbeeinflussten Boden. Im Winter wurde nur eine geringe Erwärmung von 2-3 K gemessen. Die Ausbildung von Trockenzonen im Kabelraum aufgrund der Kabelerwärmung ließ sich nicht feststellen. Am Standort Wald bildete sich aber durch Wasserentzug der Vegetation eine Trockenzone im Sommer, welche im Winter durch Versickerung vollständig verschwand.

Die Laboruntersuchungen der thermischen Eigenschaften der Füllsubstrate zeigten, dass Bodenart und Wassergehalt die ausschlaggebenden Faktoren für die Wärmeleitfähigkeit sind. Substrate mit hohem Sandanteil (>40%) weisen im feuchten Zustand eine hohe Wärmeleitfähigkeiten (>2 W/mK) auf. Erst bei Unterschreitung eines kritischen Wassergehaltes sinkt die Wärmeleitfähigkeit stark bis auf unter 0,7 W/mK ab. Bei Substraten mit geringerem Sandgehalt werden im feuchten Zustand geringe Wärmeleitfähigkeiten (< 1,3 W/mK) gemessen. Es wurde für drei Substratgruppen (Sande, lehmige Sande, Lehme) die Abhängigkeit des spezifischen thermischen Widerstands vom Wassergehalt abgeleitet. Ein neues Verfahren bewertet für fünf definierten Feuchtestufen, welche sich aus einem boden- und standortkundlichen Systemverständnis ableiteten, den thermischen Widerstand und die thermische Stabilität der Substrate im Kabelumfeld. Eine Bewertung mit dieses Verfahren zeigt, dass lehmige Sande deutlich bessere thermische Bedingungen für ein Kabelsystem gewährleisten, als ein Füllsubstrat aus reinem Sand.

Die numerischen Studien zur Strombelastbarkeit des Erdkabels wurde mit der Simulationssoftware DELPHIN4 realisiert. Im Modell wurde ein 110kV-Kabelstrang im Boden zweidimensional abgebildet und anhand des Standortminitorings erfolgte die Validierung der Berechnung. Für die Studie zur Strombelastbarkeit, wurden Varianten für drei Standortbedingungen und zwei Verlegetiefen definiert und Jahresgänge mit feucht-kühlen bis hin zu warm-trockenen Witterungsverlauf simuliert. Als Varianten der Strombelastung wurden eine konstante und drei transiente Stromlastgänge gewählt.

Die berechnete Leitertemperatur, als Zielgröße der Modellierung, zeigte deutliche Unterschiede in den Standortvarianten. Der unterschiedliche Temperatur- und Wasserhaushalt der Standortvarianten hat deutlichen Einfluss auf die Kabeltemperatur, und auch die Verlegetiefe wirkt sich darauf aus. In allen Varianten zeigt sich ein deutlicher Jahresgang der Temperatur. Während des Winterhalbjahres sind die Werte um 15-25 K niedriger als im Sommerhalbjahr. Die Berechnungen zeigen, dass der Wasserhaushalt des Standorts den Wassergehalt im Kabelraum stark beeinflusst und somit auch die thermischen Eigenschaften des Bodens standort- und jahreszeitabhängig sind. Bei hoher Stromlast verstärkt sich die Austrocknung des Substrates im Kabelraum, doch eine dauerhafte Trockenzone bildet sich nur bei fehlender Versickerung, sowie unter ungünstigen hydraulische Bodeneigenschaften.

Abstract

The definition of the maximum ampacity of a buried power line is limited by the temperature of the conductors. The knowledge of it is of significant interest for the dimensioning and determines a higher load or extension of a line. In addition to the thermal properties of a cable and their arrangement, the thermal soil conditions and the soil temperatures determines the temperature of the cable. While properties and arrangement of cables are constant the soil conditions and on-site influences have a wide spatial as well as temporal variability. The procedures and technical standards which are applied in the energy engineering to calculate the ampacity of cables hardly factor in the variability of soil properties, site conditions and climate. Therefore the ampacity of a power line may be under or over estimated. The work focused on the optimisation on the system cable, soil, site and climate.

For that purpose an existing 110kV power line in Berlin was monitored. Therefore the temperature of the cable as well as the heat and the water balance were measured in the cable trench for a period of 18 months. Two different sites at this line, a street and a forest location, were investigated. Another focus point was the determination of thermal and hydraulic properties of different backfill substrates in power cable trenches. The water retention, water conductivity and thermal conductivity of soils from different texture classes were measured and parameterised. To examine the impact of climate, location and soil properties as well as the influence of different levels of loads on the temperature of the cable, a physical numeric modelling was carried out.

The monitoring of sites had shown that the heat balance of the locations and the resulting soil temperature mainly determine the cable temperature. Because of higher soil temperatures at the street location we measured up to 5 — 10 K higher cable temperature than at the forest site. The heating of the cable in the summer caused by the heat loss of the conductor was maximum 5 K higher. Only a minor warming of 2 — 3 K was measured during winter time. A development of a drying zone in the surrounding soil caused by the heat loss of the cable was not observed. However, at the forest site in summer we detected a drying zone due to water uptake by roots. This completely disappeared in winter because of high infiltration.

The laboratory study of the thermal properties of backfill substrates had shown that soil texture and water content are the main factors of thermal conductivity. Substrates with a higher content of sand (>40%) shown a high heat conductivity (>2 W/mK) under wet conditions. Below critical water content (< 5 Vol%) the thermal conductivity decreased rapidly to less than 0.7 W/mK. In substrates with a minor content of sand lower heat conductivity (< 1.3 W/mK) was measured at a wet condition. The specific thermal resistance as a function of the water content was described for three texture classes (coarse sand, loamy sand and loam). A new assessment method evaluates the thermal resistance and the thermal stability of the filling substrates in the cable periphery. An evaluation with this method shows that loamy sands allow significantly better thermal conditions for a power cable than a filling substrate of pure coarse sands.

Different scenarios of loads, conditions and arrangements of buried cables were investigated with the numerical model Delphin4. The model was calibrated and validated by the data of the monitoring. The

modelled and measured cable temperatures were very similar. For the study options were defined for location, cable depth, climate and current load.

In the scenarios the calculated temperatures of the conductor showed significant differences between the different locations. This is caused by the different heat balances of the locations as well as by differences in the water content. The study also shows that deeper laying cables had significantly higher conductor temperatures. The temperatures of all locations show a clear seasonal cycle. During the winter period the values are lower than those in the summer by 15 — 25 K. The calculated soil moisture in the cable trench is influenced by the water balance of the location. An increasing dryness of the soil leads to increasing cable temperatures. At a high ampacity the drying up of the cable backfill substrate increases. Without infiltration events this results in a formation of a large drying zone around the cable.

The presented results of this research had shown that the transmission capacity of buried power lines can be optimized by an assessment of site and soil conditions. The using of a numerical model is a powerful tool for predicting the optimum loads for cable grids. It is also very useful for studies and analysis of critical cable laying and transfer situations.

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand in den Jahren 2006-2010 am Institut für Ökologie der Technischen Universität Berlin im Fachgebiet Standortkunde und Bodenschutz. Zum Gelingen dieser Arbeit haben vielen Menschen beigetragen, denen ich vielfach danken möchte.

Ein besonderer Dank gilt meinem Doktorvater, Herrn Prof. Dr. Gerd Wessolek. Durch seine Anregung, Förderung und Unterstützung fand ich meine wissenschaftliche Heimat in der Bodenkunde und konnte schließlich einen Arbeitsschwerpunkt zu Energiekabeln im Boden entwickeln.

Herrn Prof. Dr. Klaus Böhne von der Universität Rostock möchte ich vielfach für die Zeit und Sorgfalt danken, mit der er meine Arbeit begleitet und deren Begutachtung vorgenommen hat. Ich freue mich auf eine weitere anregende Zusammenarbeit mit ihm.

Allen meinen Kolleginnen und Kollegen von den bodenkundlichen Fachgebieten der TU Berlin danke ich vielfach für die Unterstützung, Begleitung und Förderung von mir und meinen Projekten. Mein ganz besonderer Dank gilt Björn Kluge, Michael Facklam, Helena Schmieschek und Moritz Werken-tin.

Eine erste Station für meine Promotion war das DFG Graduiertenkolleg 'Stadtökologische Perspektiven' der Humboldt Universität zu Berlin. Hier wurden mir grundlegende Kompetenzen zum wissenschaftlichen und interdisziplinären Arbeiten vermittelt. Herrn Prof. Dr. Willfried Endlicher gilt mein Dank dafür, dass er dieses Kolleg aufgebaut und geleitet hat.

Eine praxisnahe und anwendungsorientierte Gestaltung dieser Forschung war mir nur durch die enge Zusammenarbeit mit dem Netzbetreiber von Berlin, der Vattenfall Europe Distribution GmbH möglich. Durch seine engagierte und kooperative Zusammenarbeit trug Matthias Köhler ganz wesentlich zum Gelingen des Projektes bei. Bei Herrn Thomas Röstel und Herrn Olaf Ziemann möchte ich mich bedanken, da sie sich wesentlich für die Entstehung der Kooperation eingesetzt haben.

Bei der Realisierung der Messungen im Projekt war die UP GmbH ein wichtiger Partner. Ich danke Herrn Gerhard Kast und Frau Dr. Silke Schweighöfer vielfach für die Unterstützung bei Planung, Aufbau und Problemlösung an den Messstellen.

Die Idee für diese Forschungsfrage entstand in einem Gespräch mit Herrn Dr. Rudolph Plagge vom Institut für Bauklimatik an der TU Dresden. Ich danke ihm ganz herzlich dafür, dass er mich für die Thematik begeistert und die Realisierung des Projektes unterstützt hat.

Das Forschungsvorhaben wurde von der Investitionsbank Berlin (IBB) mit Mitteln aus dem Europäischen Fonds für regionale Entwicklung (EFRE) und des Landes Berlin finanziell gefördert. Ich möchte mich bei diesen Geldgebern und bei Herrn Björn Jäger von der IBB bedanken.

Zu guter Letzt möchte ich mich bei Jessica, Pauline und Leander für die Freude, Geduld, Ablenkung und Hilfe bedanken, die sie mir geben.

1 Einleitung und Problemstellung

Die ursprünglichen Aufgaben der Standort- und Bodenkunde waren Untersuchungen und Bewertungen der land- und forstwirtschaftlichen Ertragsfähigkeit, mit dem Ziel einer effizienten Nutzung. In der Folgezeit erweiterte die Disziplin ihr Arbeitsgebiet auf Fragen der Ökologie, des Umwelt- und Ressourcenschutzes, wie etwa zur Sicherung der Wasserqualität oder der Minderung von Treibhausgasemissionen. Auch die im urbanen Raum tätige Standort- und Bodenkunde befasst sich überwiegend mit Fragen zum anthropogenen Einfluss auf den Naturhaushalt. Demnach wäre folgerichtig zu vermuten, dass diese Forschungsarbeit auch die Auswirkungen von erdverlegten Energiekabeln auf die Standorteigenschaften und Bedingungen für dort lebende Organismen betrachtet. Diese Wirkungen sind, z.B. durch magnetische Felder oder die Erwärmung des Bodens durchaus vorhanden, stehen aber nicht im Fokus dieser Untersuchung.

Die Zielsetzung der vorliegenden Forschungsarbeit besteht vielmehr in der Optimierung des technischen Systems „Erdkabel“ unter Berücksichtigung der Standort- und Bodenbedingungen. Konkret bedeutet dies, die Strombelastbarkeit von erdverlegten Energiekabeln zu bestimmen. Dazu müssen einerseits bodenphysikalische Modellvorstellungen über Transportvorgänge für Wärme und Wasser und andererseits das Prozessverständnis zum Einfluss von Boden, Standort und Klima auf das Erdkabel genutzt werden.

Der Forschungsfrage liegt zugrunde, dass die Strombelastbarkeit eines Kabels durch eine maximal zulässige Leitertemperatur limitiert ist. Wird die Grenztemperatur des Leiters überschritten, vermindert sich die Isolationswirkung des Kabelmaterials, mit der Folge eines Kurzschlusses und anschließenden Netzausfalls. Die Eigenerwärmung des Kabels resultiert aus Verlusten bei der Stromübertragung. Dieser Verlust ist vor allem bei Kabeln im Mittel- und Hochspannungsbereich (10 – 110kV) von Bedeutung und steigt mit der Stromlast exponentiell an.

Neben den thermischen Eigenschaften des Kabels und der Kabelanordnung sind es die thermischen Bodeneigenschaften und die Bodentemperatur, welche die Leitertemperatur bestimmen. Während die Kabeleigenschaften und –anordnung als Konstanten anzusehen sind, haben Bodeneigenschaften und Standorteinflüsse sowohl räumlich, als auch zeitlich, eine hohe Variabilität. In Berechnungsverfahren der Energiewirtschaft zur Strombelastbarkeit wird diese Variabilität nicht oder nur stark vereinfacht berücksichtigt, so dass das Übertragungspotenzial einer Trasse leicht unter- oder überschätzt werden kann.

Aus Sicht des Netzbetreibers ist die Kenntnis der maximalen Strombelastbarkeit wichtig, denn diese bestimmt die Auslastung ihrer Netze. Mit einer höheren Auslastung können Investitionen für einen Trassenneu- und/oder -ausbau bei steigendem Strombedarf eingespart werden. Aus volkswirtschaftlicher Sichtweise sind eine hohe Ausfallsicherheit des Stromnetzes, sowie geringe Netzentgelte von Interesse. Der in Berlin tätige Betreiber des Verteilungsnetzes, die Vattenfall Distribution GmbH, stellte einen wichtigen Kooperationspartner zur Realisierung der Forschungsarbeiten dar. Sein Interesse richtet sich auf bessere Kenntnisse der Übertragungsfähigkeit der Energiekabel, denn insbesondere im urbanen Raum ist ein Netzausbau kostenintensiv bzw. räumlich limitiert. Gleichzeitig wurden im urbanen Raum Boden- und Standorteigenschaften stark verändert, so dass ungünstigen Bedingungen

für die Kabel vermutet werden. Eine alleinige Festlegung der Übertragungsfähigkeit mit den herkömmlichen Methoden ist somit für den Netzbetreiber unbefriedigend. Dies war Anlass für die Entwicklung von besseren Bewertungsverfahren.

Über die differenzierte Betrachtung der Standort- und Klimabedingungen von Kabeltrassen können bestehende und neu zu verlegende Trassen in ihrer Auslastung optimiert werden. Mit dieser Bewertung können a) die Netzauslastungen einzelner Systeme besser gesteuert und damit auch die Netzstabilität erhöht werden und b) Kosten eingespart werden, die letztendlich dem Verbraucher zu gute kommen. Dies ist auf einem liberalisierten Strommarkt, wie er in Deutschland seit Ende der 90er Jahre entstanden ist, besonders wichtig.

In dem durchgeführten Bewertungs- und Optimierungsansatz werden drei grundsätzliche Ebenen unterschieden und werden in Abb. 1-1 schematisch dargestellt.

a) Kabelraum: Er steht unter dem direktem Einfluss des Energiekabels. Die Eigenschaften des Bodens sind infolge der Kabelverlegung verändert. Die thermischen und hydraulischen Substrateigenschaften haben direkten Einfluss auf die Kabelerwärmung. Die räumliche Variabilität des Kabelraums kann stark wechseln und ist aufgrund der Wärmeentwicklung des Kabels und des Standorteinflusses zeitlich stark variabel.

b) Standort: Der Wasser- und Wärmehaushalt des Standorts stellt die Randbedingung für Bodenfeuchte und Temperatur im Kabelraum dar. Der Wasser- und Wärmehaushalt ist von Bodenart und -typ, Vegetation, Exposition und Grund- bzw. Stauwassereinfluss abhängig. Die Standortbedingen werden zwar auch bei der Kabelverlegung verändert, überwiegend bestimmen jedoch natürliche oder anthropogene Prozesse die Standortcharakteristik. Die Standortbedingungen verändern sich zeitlich und räumlich.

c) Klima: Der Einfluss des Klimas steuert als äußere Randbedingung den Wasser- und Wärmehaushalt des Standorts durch Einstrahlung, Temperatur, Verdunstung und Niederschläge. Dadurch hat das Klima einen nur mittelbaren Einfluss auf die Kabeltemperatur. Das Klima besitzt eine hohe zeitliche, jedoch räumlich geringe Variabilität.

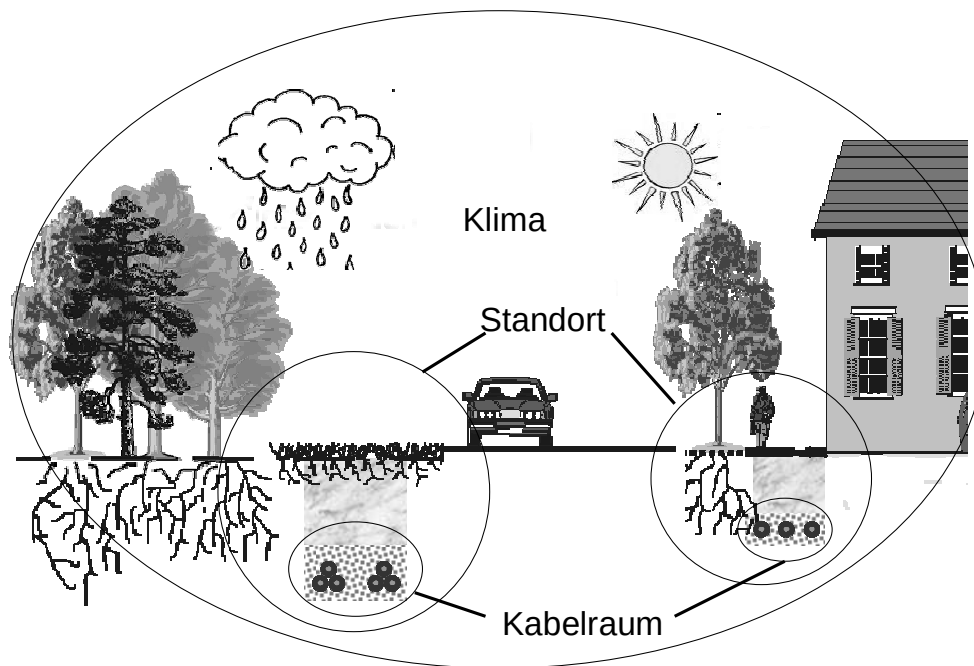


Abb. 1-1: Ebenen zur Bewertung der Übertragungsfähigkeit

Für die Untersuchung und Bewertung der Strombelastbarkeit des Kabels werden folgenden Hypothesen formuliert:

- I. Die Kabeltemperatur wird entscheidend vom Temperaturhaushalt des Standorts und den Witterungsbedingungen bestimmt.
- II. Der Wasserhaushalt des Standorts hat einen wesentlichen Einfluss auf den Wärmetransport im Kabelraum.
- III. Die thermischen Eigenschaften des Substrates im Kabelraum sind in Abhängigkeit von seinen hydraulischen Eigenschaften zu bewerten.
- IV. Der Einfluss einer Trockenzone im Kabelraum muss unter Berücksichtigung des Stromlastgangs, der Kabelanordnung und des Feuchtereimes des umgebenden Bodens bewertet werden.

Aus diesen Hypothesen leiteten sich drei verschiedene Arbeitsschwerpunkte der Untersuchung ab:

Mit einem **Standortmonitoring** an einer 110kV Kabeltrasse in Berlin wurden die Kabeltemperaturen, sowie der Wärme- und Wasserhaushalt im Kabelraum gemessen. Gleichzeitig wurden Messungen zum Wasser- und Wärmehaushalt des Standorts durchgeführt. Als Standorte für das Monitoring wurden zwei stark unterschiedliche Standorte (Straßenraum und Forst) gewählt. Dadurch kann der Einfluss unterschiedlicher Standortbedingungen auf die Kabeltemperatur bei einem realen Stromlastverlauf nachvollzogen werden. Die Ergebnisse liefern die relevanten Einflussgrößen von Standort und Klima auf die Kabeltemperatur. Gleichzeitig werden Daten zur Validierung eines Simulationsmodells gewonnen. Durchführung und Ergebnisse dieses Komplexes legt das 3. Kapitel dieser Arbeit dar.

Der zweite Schwerpunkt besteht in der **Ermittlung von thermischen und hydraulischen Eigenschaften von Kabelsubstraten**. Die Substrate wurden so gewählt, dass sie ein breites Spektrum von Bodenarten repräsentieren. In Laborexperimenten wurden thermische und hydraulische Eigenschaften gemessen und die Ergebnisse parametrisiert. Die Auswertung bewertet die thermischen Eigenschaften der Substrate unter Berücksichtigung ihres hydraulischen Verhaltens. Im 4. Kapitel wird ein Bewertungsverfahren der thermischen Bodeneigenschaften vorgeschlagen, welches das Feuchteregime des Standorts berücksichtigt. Das entworfene Verfahren wird für eine existierende Kabeltrasse angewendet.

Eine Betrachtung der Wirkung von Klima, Standort und Kabelraum, sowie der Einfluss verschiedener Stromlastgänge auf die Leitertemperatur erfolgt mittels einer **numerischen Modellierung**. Ein solches Modell muss die physikalischen Eigenschaften des Bodens und der Kabelwerkstoffe, die Transportprozesse für Wasser und Wärme, den Witterungseinfluss und die Wärmeentwicklung des Kabels abbilden. In Kapitel 5 werden Modellaufbau, Modellvalidierung und Ergebnisse dargelegt. Die Auswertung zeigt, welche Leitertemperaturen aus verschiedenen Klima-, Standort-, Kabelraum- und Stromlastvarianten resultieren.

Die Arbeitsschwerpunkte werden durch einen **Überblick zur Theorie und zum Untersuchungsgegenstand** ergänzt. Dabei wird zunächst auf die Modellvorstellungen zum Wasser- und Wärmetransport im Boden eingegangen. Anschließend wird in die Thematik der Energiekabel eingeführt. Der Schwerpunkt liegt dabei auf den Prozessen der Wärmeentwicklung und der Wärmeabfuhr. Den Abschluss bildet ein Überblick zur Simulationssoftware DELPHIN4, welche für die numerischen Modellierungen verwendet wurde.

2 Übersicht zu Theorie und Untersuchungsgegenstand

2.1 Transport von Wasser und Wärme im Boden

Die Temperatur des Bodens unterliegt räumlichen und zeitlichen Schwankungen. Das Temperaturregime im Boden wird durch den Tages- und Jahresgang der Temperatur geprägt, welcher wiederum durch den Tages- und Jahreszyklus der solaren Einstrahlung bestimmt ist. Schon lange ist bekannt, dass die Temperatur einen Einfluss auf die Wasserbewegung im Boden hat. Dabei sind zwei verschiedene Prozesse zu betrachten:

Zum Einen beeinflusst die absolute Temperatur die Speicher- und Transportprozesse für flüssiges Wasser. So beschrieb King (1892) den Einfluss der Temperatur auf den Wassergehalt im Feld. Unter anisothermen Bedingungen bewirkt zudem ein Temperaturgradient einen Wasserfluss, dies sagten bereits Briggs (1897) und Bouyoucos (1915-16) voraus. In den Theorien spielt die Dampfdiffusion aufgrund eines Temperaturgradienten eine bedeutende Rolle. Die Auswirkung der Temperatur auf die Wasserbewegung im Boden ist unter natürlichen Bedingungen gegenüber anderen Einflüssen gering. **Formelabschnitt 2**

In der Bodenphysik findet zumeist ein mechanistischer Ansatz Anwendung, bei dem die einzelnen Wasser- und Wärmeflüsse addiert werden und dann über Massen- bzw. Energieerhaltungsgesetze in ein gekoppeltes Gleichungssystem gebracht werden (Philip de Vries, 1957; Milly, 1982, Saito et al., 2006). Für die eindimensionale Beschreibung des Wasserhaushalts unter anisothermen Bedingungen wird dazu der Transport von flüssigem Wasser (q_w) und Dampf (q_d), sowie die Massenerhaltung verknüpft. Die Gleichung lässt sich wie folgt beschreiben:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = -\frac{\partial q_w}{\partial z} - \frac{\partial q_d}{\partial z} \quad (2.1)$$

Für den Wärmehaushalt gilt analog

$$\frac{\partial U}{\partial t} = -\frac{\partial q_H}{\partial z} + Q \quad (2.2)$$

mit: θ – Gesamtwassergehalt [m^3/m^3]; t – Zeit [s]; q_w – Wasserflussdichte [m/s]; q_d – Dampfflussdichte [m/s]; z – Länge [m]; U – Wärmemenge [J/m^3]; q_H Wärmeflussdichte [$\text{J}/\text{m}^3\text{s}$]; Q – Wärmeproduktion [$\text{J}/\text{m}^3\text{s}$]

Im folgenden Abschnitt werden zunächst die maßgeblichen Prozesse für den Wasser- und Wärmehaushalt dargelegt. Anschließend wird auf die entsprechenden Transportparameter eingegangen.

2.1.1 Wasser- und Wärmehaushalt

Wasserhaushalt

Der Wassergehalt des Bodens setzt sich bei einer Temperatur $> 0^\circ\text{C}$ aus einer flüssigen (θ_w) und einer dampfförmigen (θ_d) Komponente zusammen:

$$\theta = \theta_w + \theta_d \quad (2.3)$$

mit: θ_w – flüssiger Wassergehalt [m^3/m^3]; θ_d – Gehalt dampfförmigen Wassers [m^3/m^3]

Das Wasser wird von physikochemischen Kräften in der Festsubstanz gebunden, die Kraft wird über das Matrixpotenzial h ausgedrückt. Dieses ist als die Energiemenge definiert, die benötigt wird, um Wasser aus dem Boden in freies Wasser zu ziehen. Das Matrixpotenzial ist im ungesättigten Boden negativ definiert. In einem einfachen Kapillarbündelmodell entspricht das Matrixpotenzial der negativen Steighöhe der jeweils größten wassergefüllten Kapillare (Kutilek und Nielsen, 1994). Die Steighöhe kann dann aus dem Radius der Kapillare (r_K) berechnet werden.

$$h = - \left[\frac{2\sigma_{wa} \cos(\phi)}{\rho_{wa} g r_K} \right] \quad (2.4)$$

mit: σ_{wa} – Oberflächenspannung von Wasser [J/m^2]; T – Temperatur [$^{\circ}\text{C}$]; ϕ – Benetzungswinkel; ρ_{wa} – spezifische Dichte von Wasser [kg/m^3]; g – Gravitationskonstante [m/s^2]; r_K – Kapillarradius [m].

Mit Abnahme des Wassergehaltes werden die großen Kapillaren entleert und das Matrixpotenzial nimmt dadurch ab. Die Oberflächenspannung des Wassers σ_{wa} und der Benetzungswinkel ϕ sind als Variablen anzusehen, die spezifische Dichte des Wassers und die Erdbeschleunigung werden als Konstanten angesehen (Stoffregen, 1998).

Der Wasserdampf des Bodens ist in den luftgefüllten Bodenporen vorhanden. Zumeist liegt im Boden ein Gleichgewicht zwischen der flüssigen und der dampfförmigen Phase vor (Stoffregen, 1998). Der Dampfgehalt ergibt sich aus der Dampfdichte ρ_d in der Bodenluft.

$$\theta_d = \theta_l * \frac{\rho_d}{\rho_{wa}} \quad (2.5)$$

mit: θ_l – Bodenluftanteil [m^3/m^3]; ρ_d – Dampfdichte [kg/m^3]; ρ_{wa} – spezifische Dichte von Wasser [kg/m^3]

Die Sättigungsdampfdichte von Luft über freiem Wasser (ρ_{d0}) ist eine temperaturabhängige Größe, die mit der Temperatur ansteigt. Im Boden wirkt sich das Matrixpotenzial auf die Dampfdichte in der Bodenluft (ρ_d) aus, deshalb vermindert sich die Dampfdichte mit sinkendem Matrixpotenzial. Die Dampfdichte p_d in der Bodenluft kann durch folgende Gleichung beschrieben werden (Philip und de Vries, 1957):

$$\rho_d(h, T) = \rho_{d,0}(T) e^{\left(h \frac{M_{wa} g}{RT} \right)} \quad (2.6)$$

mit: $\rho_{d,0}$ – Sättigungsdampfdichte über Wasser [kg/m^3]; M_{wa} – Molmasse von Wasser [kg/mol]; R – allgemeine Gaskonstante [$\text{J}/\text{kg mol}$]; g – Gravitationskonstante [m/s^2]; T – Temperatur [K]; h – Matrixpotential [cm]

Die Temperaturabhängigkeit liegt vor allem hinsichtlich der Sättigungsdampfdichte $\rho_0(T)$ vor. Diese steigt mit der Temperatur stark an, sie nimmt von 5°C auf 50°C etwa um das 12fache zu. Eine Abhängigkeit vom Matrixpotenzial ist nur in trockenen Bereichen von Bedeutung. Am permanenten Welkepunkt des Bodens ($h = 15000\text{cm}$, $pF\ 4.2$) vermindert sich bei 20°C die Dampfdichte nur um 1,1% gegenüber des Wertes über freiem Wasser. Bei einem Matrixpotenzial von -100000 cm sind es $\sim 7\%$, erst

danach sinkt die Dampfdichte deutlich (Stoffregen, 1998). Die Änderung der Dampfdichte mit dem Matrixpotenzial ist die Grundlage zur Berechnung des anisothermen Dampfdiffusionskoeffizienten.

Der Fluss von flüssigem Wasser (q_w) erfolgt unter isothermen Bedingungen durch einen Gradienten des hydraulischen Potenzials ($q_{w,h}$). Unter anisothermen Bedingungen kommt ein Fluss entlang eines Temperaturgradienten ($q_{w,T}$) hinzu. Ursache dafür ist die Abnahme der Oberflächenspannung des Wassers bei steigender Temperatur. Das führt zu einem Matrixpotenzialgradienten entsprechend der Gleichung (2.4). Mit einer modifizierten Buckingham-Gleichung (Buckingham, 1907) haben Philip und de Vries (1957) diese Komponente im Wasserhaushalt folgend beschrieben:

$$q_w = q_{w,h} + q_{w,T} = K_{w,h} \left(\frac{\partial h}{\partial z} + 1 \right) + K_{w,T} \left(\frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (2.7)$$

mit: $K_{w,h}$ – isotherme Wasserleitfähigkeit [m/s]; $K_{w,T}$ – anisotherme Wasserleitfähigkeit [m²/Ks]

Der Wassertransport in der Dampfphase (q_d) hat auch eine isotherme und eine anisotherme Komponente. Grundsätzlich liegt dem Dampftransport ein Dampfdichteunterschied in der Bodenluft zugrunde. Wie in Gleichung (2.6) gezeigt wird, können solche Gradienten aus dem Matrixpotenzialgradienten ($q_{d,h}$) und der Temperatur ($q_{d,T}$) resultieren. Somit können auch die Komponenten des Dampftransports addiert werden:

$$q_d = q_{d,h} + q_{d,T} = -K_{d,h} \left(\frac{\partial h}{\partial z} \right) - K_{d,T} \left(\frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (2.8)$$

mit: $K_{d,h}$ – isotherme Dampfleitfähigkeit [m/s]; $K_{d,T}$ – anisotherme Dampfleitfähigkeit [m²/Ks]

Aus der Kombination der Gleichungen (2.1), (2.7) und (2.8) kann der Wassertransport im Boden in ein vom Potenzialgradienten und ein vom Temperaturgradienten bestimmter Fluss unterteilt werden, so dass die Wasserbilanz wie folgt ausgedrückt werden kann:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[K_h \frac{\partial h}{\partial z} + K_T \frac{\partial T}{\partial z} \right] \quad (2.9)$$

Philip und de Vries (1957) postulierten den kombinierten Transport von Wasser in flüssiger und dampfförmiger Form. Sie sagt weitaus höhere Transportraten voraus als Theorien, die den Wasserdampftransport nur auf die Gasphase beschränkten (Penman, 1940; Krischer & Rohnlalter, 1940). Die höheren Transportraten sind dadurch zu erklären, dass mit Wasser gefüllte Poren für Wasserdampf kein Hindernis darstellen. In Abb. 2.1-1 wird dieser Transportmechanismus veranschaulicht.

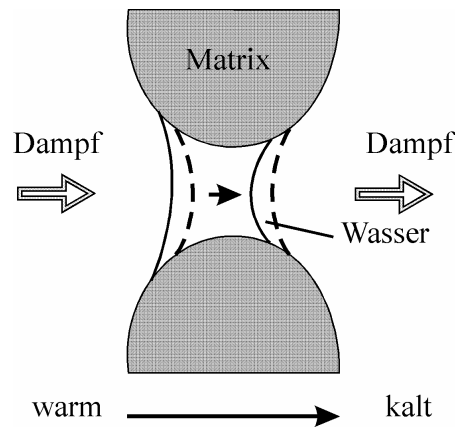


Abb. 2.1-1: Kombiniertes Transport von Wasser im Porenraum des Bodens (nach Stoffregen, 1998)

In der luftgefüllten Pore reichert sich aufgrund des Temperaturgradienten Wasserdampf am wärmeren Ende des Porenraums an und kondensiert am kälteren Meniskus der wassergefüllten Pore. Damit verändert sich der Meniskenradius und bewirkt den Transport des flüssigen Wassers in der Pore. Am anderen Ende der Pore erfolgt nun wieder der Übergang in die Dampfphase. Der hydraulische Gradient in der wassergefüllten Pore wird zudem durch die Temperaturabhängigkeit des Matrixpotenzials verstärkt.

Wärmehaushalt

Die im Boden enthaltene Wärmemenge (U) ist die Summe der in den drei Phasen (Matrix, Wasser und Bodeluft) gespeicherten Wärmemenge (c_{p_B}), sowie der beim Phasenübergang des Wassers umgesetzten latenten Wärmemenge (L_0):

$$U = c_{p_B}(\theta) \cdot T_a + L_0 \theta_d \quad (2.10)$$

mit: c_{p_B} – volumetrische Wärmekapazität des Bodens [J/m^3K]; T_a – absolute Temperatur [K]; L_0 – Verdampfungsenthalpie von Wasser [J/m^3].

Der Transport von Wärme im Boden erfolgt durch Wärmeleitung, durch Konvektion von Wasser und Wasserdampf, sowie durch Phasenübergänge. Die Wärmeflussmenge (q_H) setzt sich aus folgenden Komponenten zusammen:

$$q_H = -\lambda(\theta) \frac{\partial T}{\partial z} + c_{p_f} T_a q_w + c_{p_d} T_a q_d + L_0 q_d \quad (2.11)$$

mit: λ – Wärmeleitfähigkeitskoeffizient [W/mK]; T_a – absolute Temperatur [K]; c_{p_f} – volumetrische Wärmekapazität von Wasser [J/m^3K], c_{p_d} – volumetrische Wärmekapazität von Wasserdampf [J/m^3K].

Durch Einsetzen der Gleichungen (2.10) und (2.11) in Gleichung (2.2) ergibt sich:

$$\frac{\partial c_{p_B} T}{\partial t} + L_0 \frac{\partial \theta_d}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[\lambda(\theta) \frac{\partial T}{\partial z} \right] - c_{p_w} \frac{\partial q_w T}{\partial z} - c_{p_d} \frac{\partial q_d T}{\partial z} - L_0 \frac{\partial q_d}{\partial z} + Q \quad (2.12)$$

Für die Anwendung dieser Gleichungen in Modellen werden eine Reihe von Material- und Stoffeigenschaften benötigt. Um diese zu bestimmen, werden Kenntnisse über die Porenraumcharakteristik des Bodens und entsprechende Transportparameter benötigt. Im folgenden Abschnitt wird auf die Messung und Ableitung der Bodeneigenschaften eingegangen.

2.1.2 Bodeneigenschaften

Wasserretention

Die Ausprägung des Porenraums beschreibt die Wasserretentionscharakteristik (WRC). Die WRC stellt die Beziehung zwischen Matrixpotenzial h und volumetrischem Wassergehalt θ dar. Mit der durch Gleichung (2.4) hergestellten Beziehung zwischen Matrixpotenzial und Kapillarradius wird die WRC auch oft als Maß für die Porengrößenverteilung verwendet. Im Idealfall ist der Porenraum des Bodens bei einem Matrixpotenzial von 0 vollständig mit Wasser gefüllt, so dass gilt:

$$\theta_s = 1 - \frac{\rho_B}{\rho_M} \quad (2.13)$$

mit: θ_s – Wassergehalt des voll gesättigten Bodens [m^3/m^3]; ρ_B – Trockenrohichte des Bodens [kg/m^3]; ρ_M – spezifische Dichte der Bodenmatrix [kg/m^3].

Mit sinkendem Wassergehalt verringert sich das Matrixpotenzial der Bodens. Bei einem Matrixpotenzial von $-8 \cdot 10^6$ cm ist der Boden als trocken anzusehen (Rossi und Nimmo, 1994). Aufgrund des mehrere Größenordnungen umfassenden Bereichs des Matrixpotenzials, wird für die WRC oft der pF-Wert verwendet. Der pF-Wert ist als der negative dekadische Logarithmus des Matrixpotenzials definiert.

Für die Bestimmung der WRC existieren eine Vielzahl von Feld- und Labormethoden sowie Pedotransferfunktionen (vgl. Dane und Hoppmans, 2002). In der DIN/ISO 11274 ist die Bestimmung der WRC für Böden standardisiert. Zur Messung werden Stechzylinderproben auf keramischen Platten mit hängender Wassersäule bzw. im Drucktopf bei definierten pF-Werten entwässert und so der Wassergehalt beim jeweilig eingestellten Matrixpotenzial ermittelt. Bei sehr niedrigen Matrixpotenzialen (ab pF 5) erfolgt die Einstellung des Matrixpotenzials über die Luftfeuchte.

Eine alternative Bestimmung der WRC ist die instationäre Verdunstungsmethode nach Schindler (Schindler 1980). In diesem Verfahren werden die Veränderungen des Gesamtgewichtes und der Tension in zwei Tiefen eines Stechzylinders mit der Zeit erfasst. Die Potenzial- und Wassergehaltsverteilung wird über Zeit und Raum linearisiert und es ergeben sich diskrete Werte für die hydraulischen Funktionen (Wasserretention und ungesättigte Wasserleitfähigkeit). Die Methode bietet eine sehr hohe Auflösung, durch den Messbereich der Tensiometer reicht der Messbereich des Verfahrens bis maximal pF 3.

Für die Beschreibung der WRC durch einen Funktionsverlauf, existieren zahlreiche Modelle (Herbst 2008). Für bodenphysikalische Fragestellungen findet die Formulierung nach van Genuchten (1980) häufig Anwendung:

$$S_e(h) = \left[\frac{1}{1 + \alpha |h|^n} \right]^m \quad m = 1 - 1/n \quad (2.14)$$

$$\theta(h) = S_e(h)(\theta_s - \theta_r) + \theta_r$$

mit: S_e - relative Wassersättigung [-]; α - Formparameter [cm⁻¹]; n - Formparameter [-]; θ_r - residualer Wassergehalt [m³/m³]; $\theta(h)$ = absoluter Wassergehalt [m³/m³]

Die Formparameter α und n bestimmen den Kurvenverlauf, θ_s gibt den Wassergehalt bei voller Sättigung an und θ_r den Restwassergehalt des Bodens. Insbesondere für Fragestellungen zu thermischen Eigenschaften von Böden ist es notwendig, dass der Funktionsverlauf der WRC einen Wassergehalt von 0 Vol% bei pF 6,9 erreicht. Eine modifizierte Gleichung für die Sättigungsfunktion, die diese Bedingung erfüllt, entwickelten Fayer und Simmons (1995). Hier ist θ_a ein Formparameter, der das Abfallen des Wassergehaltes bei h_0 auf 0 erzwingt.

$$\theta(h) = S_e(h) \left[\theta_s - \theta_a (1 - \ln(h) / \ln(h_0)) \right] + \theta_a (1 - \ln(h) / \ln(h_0)) \quad (2.15)$$

$$h_0 = -8 \cdot 10^{-6} \text{ cm}$$

mit: θ_a - Formparameter des Wassergehalts [m³/m³]; h_0 - Matrixpotenzial bei Wassergehalt 0 [cm]

Um aus gemessenen Werten die Parameter für oben beschriebenen Funktionen zu bestimmen, stehen verschiedene Softwaretools zur Verfügung, z.B. RETC (van Genuchten et al. 1991, SHYPFIT (Durner 1995; Durner & Peters, 2009) KUPFER (Stoffregen, 1998). Das Programm SHYPFIT 2.0 (Durner & Peters, 2009) führt ein zweistufiges Optimierungsverfahren durch und liefert deshalb robuste Parameteranpassungen für eine Vielzahl von Retentions- und Leitfähigkeitsfunktionen.

Anhand Gleichung (2.4) wurde die Beziehung zwischen Kapillarradius und Matrixpotenzial im Kapillarbündelmodell hergestellt. Die Temperaturabhängigkeit der Dichte und des Benetzungswinkels ϕ können dabei vernachlässigt werden und nur die Temperaturabhängigkeit der Oberflächenspannung des Wassers (σ_{wa}) ist von Bedeutung (Stoffregen 1998). Mit steigender Temperatur nimmt σ_{wa} ab, d.h. mit steigender Temperatur nimmt das Matrixpotenzial zu. Nach Philip und de Vries (1957) kann damit folgende Beziehung hergestellt werden:

$$\frac{\partial h}{\partial T} = \frac{h}{\sigma_{wa}} \frac{d\sigma_{wa}}{dT} = \gamma(T)h \quad (2.16)$$

mit: γ - Temperaturabhängigkeitsparameter der Oberflächenspannung [1/K]

Da sich der Faktor $\gamma(T)$ über einen weiten Temperaturbereich nur geringfügig ändert, kann ein konstanter Faktor γ verwendet werden, so dass die Differentialgleichung durch eine Exponentialfunktion zu lösen ist:

$$h(T) = h(T_0) e^{\gamma(T-T_0)} \quad (2.17)$$

Der Faktor F_γ im Exponenten ist dabei ein Verstärkungsfaktor, der zur Anpassung von Messwerten an die Funktion verwendet wird. Die Temperaturabhängigkeit der Retentionsfunktion wurde von einer Reihe von Autoren bestimmt (Stoffregen 1998, Giakoumakis & Tsakiris 1991, Constanz 1991, Nimmo & Miller 1986, Hopmans & Dane 1986, Jury & Miller 1974, eine Übersicht in Döll 1996). Der Verstärkungsfaktor liegt fast immer über 1. Die temperaturabhängige WRC kann mit dieser Beziehung folgend ausgedrückt werden:

$$\theta_w(h, T) = \theta_w(h, T_0) e^{F_\gamma \gamma (T - T_0)} \quad (2.18)$$

Ein Temperaturgradient führt somit bei gleichem Wassergehalt zu einem Gradienten des Matrixpotenzials, was eine Komponente im anisothermen Wassertransport darstellt. Die Aspekte des Wassertransports sind Inhalt des folgenden Abschnitts.

Wasserleitfähigkeit

Die Wasserleitfähigkeit einer Röhre ist aus der Thermo- und Fluidodynamik bekannt. Für eine Röhre mit der Einheitslänge 1 ergibt sich nach der Hagen and Poiseuille (Bohne 2005):

$$\frac{V}{t} = \frac{\pi \rho g}{8\eta} r^4 \frac{dH}{z} \quad (2.19)$$

mit: V – Volumen [m^3], t – Zeit [s], η – dynamische Viskosität [kg/ms], z – Länge der Röhre [m].

Diese Gleichung zeigt, dass der Radius r der Röhre der entscheidende Faktor für ihre Leitfähigkeit ist. Für das Kapillarbündelmodell bedeutet dies, dass die größten wassergefüllten Poren die Leitfähigkeit bestimmen. Die Wasserleitfähigkeit des Bodens wird mit dem Parameter K aus dem Darcy Gesetz hergeleitet. Der Parameter K ist ein Proportionalitätsfaktor für den Wasserfluss (q_w) aufgrund eines hydraulischen Druckgradienten.

$$q_w = -K \frac{dH}{dz} \quad (2.20)$$

mit: Q – Flussrate [m^3/s]; A – Fläche [m^2]; K – Wasserleitfähigkeit [m/s]; dH – hydraulische Druckdifferenz [m].

Im gesättigten Zustand des Bodens ist die Wasserleitfähigkeit am höchsten und sie wird nur durch den Druckgradienten, z.B. aufgrund einer Wasserüberstandes bestimmt. In diesem Zustand ist das Matrixpotenzial 0 und der Leitfähigkeitsbeiwert wird als K_f oder K_s -Wert bezeichnet.

Für die Wasserleitfähigkeit sind prinzipiell Bodenart, Lagerungsdichte und Bodenstruktur ausschlaggebend. Bei sandigen und strukturierten Böden sind im gesättigten Zustand K_f -Werte von mehreren 100 cm/d möglich. In Böden mit feiner Textur und dichter Packung sind die Werte deutlich geringer.

Im ungesättigten Zustand wirken neben der Gravitation auch Matrixpotenzialgradienten als treibende Kraft für den Wasserfluss, so dass nun gilt:

$$q_w = -K(\theta) \left(\frac{\partial h}{\partial z} + \frac{\partial z}{\partial z} \right) \quad (2.21)$$

Im diesem Zustand verringert sich die Leitfähigkeit mit Abnahme des Wassergehaltes aufgrund der kleinere Poren, des geringeren Fließquerschnitts und der längere Fließwege stark. Es ergeben sich K-Funktionen, die stark vom Wassergehalt abhängen und über die WRC mit dem Matrixpotenzial verknüpft sind.

Eine Reihe von Autoren verwenden die Retentionsfunktion, um die Änderung der hydraulischen Leitfähigkeit bei Wasserentzug zu beschreiben (Childs & Collis-George 1950; Burdine 1953; Millington & Quirk 1961; Mualem 1976). Diese Modelle gehen davon aus, dass bei steigender Wasserspannung die größten wassergefüllten Poren entleert werden und dadurch die hydraulische Leitfähigkeit sinkt. Auf das Modell von Mualem (1976) soll eingegangen werden, da es in der Bodenphysik sehr häufig verwendet wird.

Mualem beschreibt den Boden als System zweier Röhrenbündel, die übereinander liegen. Die Tortuosität und räumliche Korrelation der beiden Röhrenbündel wird als Potenzfunktion der Sättigung bzw. des Wassergehalts beschrieben. Er stellt einen Zusammenhang zwischen der hydraulischen Leitfähigkeit als eine Potenzfunktion der Sättigung und einem Integral der Retentionsfunktion her. Durch Anwendung des van Genuchten Modells der WRC (2.14) konnte eine Lösung in geschlossener Form gefunden werden:

$$K(S_e) = K_s S_e^l \left[1 - \left(1 - \sqrt[l]{S_e} \right)^m \right]^2 \quad (2.22)$$

mit: $K(S_e)$ – ungesättigte Wasserleitfähigkeit [m/s]; K_s – gesättigte Wasserleitfähigkeit [m/s]; l - Tortuositätsparameter [-]

Damit sagt die Funktion aus einer bekannten gesättigten Wasserleitfähigkeit und den Parametern der van Genuchten Funktion die Leitfähigkeit im ungesättigten Bereich vorher. Der Einfluss der Tortuosität des Porenraums wird durch den Parameter l beschrieben. Dafür schlägt Mualem den Wert 0,5 vor.

Aus Messungen (Nimmo et al. 1987, Nimmo & Akstin 1988, Goss & Madlinger 2007) und theoretischen Betrachtungen (Toledo et al. 1990, Tuller & Or 2001) ist bekannt, dass die Wasserleitfähigkeit bei niedrigen Wassergehalten höher ist als die Vorhersage durch ein Kapillarbündelmodell. Ursache dafür ist der Wassertransport in Wasserfilmen. Einen praktikablen Ansatz zur Erweiterung von Leitfähigkeitsmodellen entwickelten Peters & Durner (2008). In ihrem Modell setzt sich der Wasserfluss aus Kapillar- und Filmfluss zusammen:

$$K(S_e) = (1 - \omega) K^{\text{Kapillar}} + \omega K^{\text{Film}} \quad (2.23)$$

$$K^{\text{Film}} = S_e^\tau$$

mit: ω – Wichtungsfaktor [-]; τ –Formparameter für Filmfluss [-]

Die hydraulische Leitfähigkeit ist ebenso wie die Retentionsfunktion temperaturabhängig. Das ist vor allem auf die Temperaturabhängigkeit der Viskosität von Wasser (η) zurückzuführen. Mit der in Gleichung (2.19) zugrunde gelegten Beziehung, kann die Temperaturabhängigkeit der Wasserleitfähigkeit abgeleitet werden:

$$K(T) = K(T_0) \frac{\eta(T_0)}{\eta(T)} \frac{\rho_w(T)}{\rho_w(T_0)} = K(T_0) \frac{\eta(T_0)}{\eta(T)} \quad (2.24)$$

mit: T_0 – Referenztemperatur [°C], ρ_w – spezifische Dichte von Wasser [kg/m³], η – dynamische Viskosität [kg/ms],

Die Temperaturabhängigkeit der Dichte von Wasser muss dabei nicht weiter berücksichtigt werden, da ihre Veränderung nur gering ist (Stoffregen 1998). Die Verringerung der Viskosität mit steigender Temperatur kann nach Weast et. al. (1987) durch eine Exponentialfunktion beschrieben werden. Daher wird angenommen, dass die Temperaturabhängigkeit der hydraulischen Leitfähigkeit der Temperaturabhängigkeit der Viskosität des Wassers entspricht:

$$\frac{\partial K(\theta, T)}{\partial T} = -\eta \frac{\partial \eta}{\partial T} K(\theta, T_0) \quad (2.25)$$

Wenn für diese Temperaturabhängigkeit ein konstanter Faktor κ verwendet wird (Stoffregen 1997), steigt die Wasserleitfähigkeit gegenüber einer Referenztemperatur T_0 exponentiell an:

$$K(\theta, T) = K(\theta, T_0) \exp(F_\kappa \kappa (T - T_0)) \quad (2.26)$$

mit: κ – Konstante der Temperaturabhängigkeit der Viskosität [1/K]; F_κ – Verstärkungsfaktor [-]

Es existiert eine Vielzahl von Methoden, um die Wasserleitfähigkeit zu messen. Ein Überblick über verschieden Methoden ist in Klute & Dirksen (1986), Plagge (1991) und Dirksen (2000) gegeben. Generell unterscheidet man zwischen Feld- und Labormessungen.

Bei Labormethoden wird zumeist mit einer automatisierten und kontinuierlichen Tensions- und Wassergehaltsmessung gearbeitet. Hier werden häufig instationäre Messungen durchgeführt (z.B. Wendroth, et al. 1993; Schindler 1980; Durner et al. 1996; Halberstma 1996; Plagge 1991), die direkt über die Darcy-Gleichung oder durch inverse Modelle mit Hilfe der Richards-Gleichung ausgewertet werden. Auch die Vorhersage der ungesättigten Wasserleitfähigkeit durch Pedotransferfunktionen ist möglich (Schaap et al. 2001, Wagner et al. 2001, Renger et al. 2008).

Dampftransport

Der Dampftransport im Boden als ein Diffusionsprozess aufgrund von Dampfdichteunterschieden wurde prinzipiell in Abschnitt 2.1.1 beschrieben. Die Dampfdichteunterschiede ergeben sich aus Gleichung (2.6) in Abhängigkeit von Matrixpotenzial und Temperatur. Der Dampfdiffusionskoeffizient (D_L) in der freien Luft ist eine temperaturabhängige Funktion:

$$D_L = 2,12 \cdot 10^{-5} \left(\frac{T_a}{273,15} \right)^2 \quad (2.27)$$

mit: D_L – Dampfdiffusionskoeffizient in freier Luft [m^2/s]; T_a – absolute Temperatur [K]

Der Dampfdiffusionskoeffizient D_B im Porenraum des Bodens hängt zusätzlich vom Anteil luftgefüllter Poren (θ_L) und der Tortuosität τ ab und ist das Produkt dieser drei Größen:

$$D_B = \tau \theta_L D_L \quad (2.28)$$

$$\text{mit: } \tau = \frac{\theta_L^{7/3}}{\theta_s^2}$$

mit: τ – Tortuositätsparameter [-]; θ_L – Anteil luftgefüllter Poren [m^3/m^3]; θ_s – Gesamtporenvolumen [m^3/m^3]

Die Tortuosität ergibt sich nach Millington und Quirk (1961) aus dem Verhältnis der luftgefüllten Poren zum Gesamtporenvolumen. Die Leitfähigkeit für Dampf unter isothermen Bedingungen ($K_{d,h}$) wird durch Gradienten im Matrixpotenzial ausgelöst und für diesen Fall, wie folgt bestimmt:

$$K_{d,h} = \frac{D_B}{\rho_w} \rho_0(T) \frac{M_w g}{RT} L_{F_{rel}}(h, T) \quad (2.29)$$

Dieser Transport ist gegenüber der isothermen Wasserleitfähigkeit sehr klein und nur in sehr trockenen Böden und bei niedrigen Matrixpotenzialen relevant. Für die anisotherme Leitfähigkeit ist der aus dem Temperaturgradienten resultierende Dampfdichtegradient ausschlaggebend.

$$K_{d,T} = \beta_d \frac{D_B}{\rho_w} \frac{dp_{d,0}}{dT} L_{F_{rel}}(h, T) \quad (2.30)$$

mit: β_d – Verstärkungsfaktor [-]

Aufgrund des gekoppelten Transports von Wasser und Wärme werden höhere Transportraten realisiert, als sie für den Transport in der Gasphase errechnet werden. Das wird durch einen Verstärkungsfaktor β_d in der Formel kompensiert. Nach Cass et al. (1984) kann die Bestimmung von β_d aus dem Wassergehalt, dem Sättigungswassergehalt und dem Tonanteil erfolgen.

thermische Bodeneigenschaften

Wärmekapazität (c_p) und Wärmeleitfähigkeit (λ) sind die für den Wärmetransport ausschlaggebenden Bodeneigenschaften. Grundsätzlich ist in einem Dreiphasensystem davon auszugehen, dass seine thermischen Eigenschaften von denen der einzelnen Bestandteile abhängen. Eine Übersicht dazu gibt Tab. 2.1-1.

Tab. 2.1-1: Thermische Eigenschaften von Bodenbestandteilen (de Vries 1963)

	spezifische Dichte ρ [10 ³ kg/m ³]	spezifische Wärmekapazität c_p [kJ/kgK]	volumetrische Wärmekapazität c_v [MJ/m ³ K]	Wärmeleitfähigkeit λ [W/mK]
Quarzminerale	2,66	0,8	2,1	8,8
andere Minerale	2,65	0,9	2,4	2,92
Humus	1,3	1,92	2,5	0,25
Wasser (20°C)	1,0	4,19	4,2	0,57
trockene Luft	0,0012	1,005	0,0012	0,025

Die volumetrische Wärmekapazität (c_p) errechnet sich aus Dichte ρ und spezifischer Wärmekapazität c_p eines Materials. Die Summe der Wärmekapazitäten multipliziert mit den Volumenanteilen x der Einzelkomponenten ergibt die Wärmekapazität des Bodens $c_{p,B}$ (de Vries 1963). Sie ist damit linear vom Wassergehalt des Bodens abhängig.

$$c_{p,B} = \sum_{i=1}^n x_i c_{p,i} \rho_i = (\rho_m - \rho_B) c_{p,m} + \theta c_{p,w} \rho_w + (\theta_s - \theta) c_{p,g} \rho_g \quad (2.31)$$

mit: c_p – volumetrische Wärmekapazität [kJ/m³K]; x – Volumenanteil [-]; ρ – spezifische Dichte [kg/m³]; c_p – spezifische Wärmekapazität [kJ/kgK]; Indizes: B – Boden; m – Festsubstanz; w – Bodenwasser, g – Bodenluft

Im Gegensatz dazu liegt die Wärmeleitfähigkeit λ in keiner linearen Abhängigkeit vom Wassergehalt. Grundsätzlich basiert die Wärmeleitfähigkeit auf der Theorie der Wärmeleitung von Fourier (1768-1830). Der Wärmefluss ist proportional zu dem Temperaturgradienten mit dem Proportionalitätsfaktor λ (Gleichung (2.32)).

$$q_H = -\lambda \frac{dT}{dz} \quad (2.32)$$

Wie im Abschnitt 2.1.2 dargelegt, erfolgt der Wärmetransport im Boden durch Wärmeleitung, Konvektion und Phasenübergänge. Der konvektive Transport erfolgt durch den Wassertransport in flüssiger und dampfförmiger Phase. Da Wasserdampf einen hohen Energiegehalt hat, ist sein Transportanteil sehr groß und daraus ergibt sich eine Abhängigkeit des Wärmetransports vom Wassergehalt und der Temperatur (Campbell, 1994; Hiraiwa und Kasubuchi, 2000; Momose und Kasubuchi, 2004). Da der Prozess von Wärmeleitung und Wassertransport im Boden nicht getrennt werden kann, handelt es sich bei Messungen immer um eine Ermittlung der ‚effektive‘ Wärmeleitfähigkeit.

Es sollen zunächst die Mechanismen dargelegt werden, welche die effektive Wärmeleitfähigkeit beeinflussen. Die verschiedenen Bodenbestandteile weisen deutliche Unterschiede in ihrer Wärmeleitfähigkeit auf (Tab. 1.1-1). Die mineralische Phase (vor allem Quarz) zeigt sehr hohe Werte, die von Wasser sind deutlich geringer und die Wärmeleitfähigkeit der Bodenluft ist sehr klein. Für die Berechnung der effektiven Wärmeleitung des Gesamtbodens existieren verschiedene Ansätze:

De Vries (1963) betrachtet die Wärmeleitung eines porösen Mediums als seriell-paralleles System, bei dem Teilchen einer bestimmten Geometrie in einer kontinuierlichen Phase vorliegen. Im feuchten Boden ist diese kontinuierliche Phase das Wasser. Die effektive Wärmeleitfähigkeit wird dann aus dem Volumenanteil der Phasen und deren Wärmeleitfähigkeit mit einem Geometriefaktor k gemittelt.

$$\lambda = \frac{\sum_{i=1}^n k_i x_i \lambda_i}{\sum_{i=1}^n k_i x_i} \quad \text{wenn } \theta \geq \theta_k \quad (2.33)$$

mit: k_i – Geometriefaktor der einzelnen Kompartimente [-]; θ_k – kritischer Wassergehalt [m^3/m^3], x_i – Volumenanteil [-].

Unterhalb eines kritischen Wassergehaltes θ_k ist die kontinuierliche Phase nun die Bodenluft und die Wärmeleitfähigkeit des Bodens nimmt stark ab. Dafür gibt es zwei Gründe: Zum Einen verschwindet das Wasser an den Kornkontaktpunkten zwischen den Bodenpartikeln. Zum Anderen nimmt bei sehr niedrigen Matrixpotenzialen die Dampfdichte ab und der Wärmetransport in den Luftporen wird geringer. Im Bereich unterhalb von θ_k verläuft die Funktion linear zwischen λ_{dry} und λ_{θ_k} .

$$\lambda = \lambda_{\text{dry}} + \frac{\lambda_{\theta_k} - \lambda_{\text{dry}}}{\theta_k} \quad \text{wenn } \theta < \theta_k \quad (2.34)$$

mit: λ_{dry} – Wärmeleitfähigkeit des trockenen Bodens [W/mK].

Das de Vries Modell wurde in der Bodenphysik häufig angewendet (Kimball et. al., 1976; Hopmans & Dane, 1986b; Wagner, 1991). Viele Autoren veränderten den Geometriefaktor in der Gleichung von de Vries, um eine bessere Übereinstimmung zwischen den gemessenen und vorhergesagten Wärmeleitungen zu erhalten.

Das semianalytische Modell von Johansen (1975) konnte in einem Vergleich von 11 verschiedenen Berechnungsmodellen (Farouki 1986) die Wärmeleitfähigkeit am besten vorhersagen. Im Johansen-Modell sind die Wärmeleitfähigkeiten des trockenen und des gesättigten Bodens die Eckpunkte des Funktionsverlaufes. Der Anstieg der Wärmeleitfähigkeit mit dem Wassergehalt wird durch den Kersten-Faktor (K_e) gesteuert, der aus dem Logarithmus der Wassersättigung (S_r) errechnet wird.

$$\lambda(\theta) = (\lambda_{\text{sat}} - \lambda_{\text{dry}}) K_e(\theta) + \lambda_{\text{dry}} \quad (2.35)$$

$$K_e \cong 0,7 \log S_r + 1,0 \quad (\text{für sandige Böden, } S_r \geq 0,05)$$

$$K_e \cong \log S_r + 1,0 \quad (\text{für feintexturierte Böden, } S_r \geq 0,10)$$

$$S_r = \frac{\theta}{\theta_s}$$

mit: K_e – Kerstenzahl [-]; λ_{sat} – Wärmeleitfähigkeit des gesättigten Bodens [W/mK]; S_r – Wassersättigung [-]; λ_{dry} – Wärmeleitfähigkeit des trockenen Bodens [W/mK].

Die Werte für λ_{sat} und λ_{dry} werden aus Trockendichte, der spezifischen Dichte und der Wärmeleitfähigkeit der Matrix (λ_m) und Wasser (λ_w) berechnet,

$$\lambda_{\text{dry}} = \frac{0,135 \rho_B + 0,0647}{\rho_m - 0,947 \rho_B}$$

$$\lambda_{\text{sat}} = \lambda_m^{1-\theta_s} \lambda_w^{\theta_s} \quad (2.36)$$

$$\lambda_m = \lambda_Q^q \lambda_O^{1-q}$$

mit: λ_m – Wärmeleitfähigkeit der Matrix [W/mK]; λ_w – Wärmeleitfähigkeit von Wasser [W/mK]; λ_Q – Wärmeleitfähigkeit von Quarz [W/mK]; λ_O – Wärmeleitfähigkeit anderer Minerale [W/mK]; q – Quarzanteil der Matrix [-].

Bei Berechnung von λ_m wird der Quarzanteil q berücksichtigt. Die Wärmeleitfähigkeit von Quarz (λ_Q) wird mit 7,7 W/mK und die von anderen Mineralien (λ_O) mit 2,0 bzw., 3,0 W/mK angesetzt.

Ein auf dem Johanssen Modell basierendes Berechnungsverfahren entwickelten Côté & Konrad (2005) und Lu et al. (2007). Das Modell von Lu et al. erweitert das Verfahren auf den trockenen Bereich des Bodens. Folgende Formel wird zur Bestimmung des Kersten-Faktors angewendet:

$$K_e = \exp \left\{ \beta \left[1 - S_r^{(\beta-1,33)} \right] \right\} \quad (2.37)$$

mit: β – Geometriefaktor [-].

Der Parameter β ist dabei ein texturabhängiger Faktor. Für sandige Böden wird er mit 0,96 und für feintexturierte Böden mit 0,27 angegeben. Hinsichtlich der Ermittlung von λ_{sat} wird die Rechenregel von Johansen genutzt. Der Wert für λ_{dry} wird durch eine einfache Gleichung berechnet:

$$\lambda_{\text{dry}} = 0,51 - 0,56 \theta_s \quad (2.38)$$

mit: θ_s – Wassergehalt des gesättigten Bodens [m³/m³].

Eine Reihe weiterer Autoren (Cosenza 2003, Usowicz 1993, Chung & Horton 1987) entwickelten Modelle zur Berechnung der Wärmeleitfähigkeit in Abhängigkeit vom Wassergehalt. Usowicz (2004)

vergleicht verschiedene Modelle und kommt zum Schluss, dass bei moderaten Temperaturgradienten und geringen Dampfflussraten die meisten Modelle gute Vorhersagen machen. Bei großen Temperaturgradienten und einem hohen Dampftransport liefern nur die Modelle von de Vries und das statistisch-physikalische Modell von Usowicz (1993) sichere Vorhersagen.

2.2 Grundlagen zu Energiekabeln

Um aus der Sicht der Bodenkunde die Wechselwirkungen zwischen dem ‚natürlichen System‘ Boden und dem ‚technischen System‘ Energiekabel zu verstehen und angemessen zu bewerten, ist es erforderlich einige Aspekte der Energietechnik zu betrachten.

Der Einfluss von Boden- und Standortbedingungen ist in der Energiewirtschaft allgemein bekannt. In Berechnungsverfahren zur Netzplanung bzw. der Strombelastbarkeit wird er mit einfachen Annahmen generell berücksichtigt. Nach Brakelmann (1985) wird ein „Zweischichtenmodell“ für eine stationäre Bodenaustrocknung angewendet. Dabei wird der Boden in der Kabelumgebung als ausgetrocknet angesehen und ihm eine Wärmeleitfähigkeit von 0,4 W/mK zugeschrieben. Der weiter entfernte Boden wird als feucht definiert und dessen Wärmeleitfähigkeit mit 1 W/mK festgesetzt.

Eine bodenphysikalisch basierte Untersuchung, sowie Modellierungen wurden von Koopmans et al. (1989) durchgeführt, um die Austrocknungsgefahr des Kabelraums zu bestimmen. Dafür wurden in den Niederlanden an Kabeltrassen Boden- und Standortaufnahmen durchgeführt, das Feuchteregime des Bodens der Kabeltrassen gemessen und modelliert. Schlussfolgerungen wurden für die Austrocknungsgefahr in Abhängigkeit von der klimatischen Wasserbilanz und der Wasserretentionscharakteristik gezogen. Die Auswirkungen des Witterungsverlaufs auf die Kabelerwärmung einer 115 kV Monitoringtrasse zeigen Callahan und Douglass (1988) und schlagen vor, diesen Einfluss in der Netzplanung stärker zu berücksichtigen. Mit einem Onlinemonitoring an einer Kabeltrasse beobachteten Zhao et al. (2000) die thermischen Eigenschaften des Bodens und stellten eine deutliche Abhängigkeit zu den Niederschlagsverläufen fest. Darauf aufbauend wird ein System zur dynamischen Festlegung der Übertragungsfähigkeit vorgeschlagen. Die thermischen Eigenschaften von Böden und Kabelsubstraten werden in zahlreichen Arbeiten untersucht (Martin et al., 1981; Foty et al. 1990; Hanna & Chikhani, 1993). Ein wichtiger Aspekt ist dabei die Austrocknung der Kabelumgebung aufgrund des anisothermen Wassertransportes (Miller & Lehtonen, 2002, Freitas et al., 1996; Anders & Radhakrishna, 1988). Für diese Fragestellung werden neben Messungen an Versuchsfeldern oder realen Kabeltrassen vor allem numerische Simulationsmodelle auf Basis der Finite-Element-Methode eingesetzt. Ein wichtiger Aspekt ist hierbei die Unterscheidung von stationären und transienten Stromlasten.

Im Weiteren soll aber keine Auseinandersetzung mit dem aktuellen Stand der Forschung der Energietechnik erfolgen. Vielmehr sollen dem fachfremden Leser die Grundsätze der Energieübertragung mit Erdkabeln darlegt werden. Die wesentlichen Aussagen wurden aus Lehrbüchern (Flosdorff & Hilgarth, 2008) und durch Erläuterungen zum Stand der Technik (mdl. Mitteilung Hr. M. Köhler VED-Berlin) gewonnen.

2.2.1 Energieübertragung mit erdverlegten Energiekabeln

Erdkabel besitzen gegenüber Freileitungen drei wesentliche Vorteile:

- sie sind gegen Beschädigungen, aufgrund von Sturm, Hagel und Blitze geschützt,
- im Boden werden die magnetischen Felder sehr gut abgeschirmt (Immissionsschutz),
- sie sind im Boden verborgen und stören das Landschaftsbild weniger als Freileitungen.

Diese Vorteile sprechen für die Verwendung, insbesondere im urbanen Raum. In Deutschland ist das gesamte Stromnetz über 1,7 Mio. km lang, davon fallen etwa 1,3 Mio. km auf unterirdisch verlegte Kabelnetze (2003). Ein wesentlicher Nachteil erdverlegter Kabel ist aus elektrotechnischer Sicht der deutlich höhere Blindleistungsanteil, welcher durch die Schirmstromverluste und den kapazitiven Belag des Kabels bedingt ist (wenn die Energieübertragung mit Wechselstrom erfolgt). Aufgrund dieses Effektes ist die maximale Kabellänge im Hochspannungsnetz auf etwa 50 bis 70 km begrenzt. Ein weiterer Nachteil sind die gegenüber Hochspannungskabeln, deutlich höheren Errichtungskosten einer Trasse. Bei Erdverlegung (ohne Tunnelbau o.ä.) betragen die Kosten etwa das drei- bis fünffache gegenüber einer Freileitung der gleichen Spannungsebene. Auch die Kontrolle des Erdkabelnetzes ist schwieriger. Während Freileitungen durch optische Kontrolle überprüft werden können, können bei Erdverlegung Beschädigungen oft nicht rechtzeitig erkannt werden. Kommt es zu einem Schaden oder Fehler, so ist die Reparatur des Kabels langwieriger und teurer. Aus diesem Grund müssen regelmäßige und aufwändige Überprüfungen beispielsweise der Teilentladung durchgeführt werden.

Innerhalb der Stadt liegen noch weitere Probleme hinsichtlich einer Erdverlegung von Kabeln vor. Vor allem im dicht bebauten innerstädtischen Bereich steht das Stromnetz in Konkurrenz zu Bauwerken und anderen erdverlegten Infrastrukturen (Wasser, Gas, Fernwärme, Telekommunikation). Abb. 2.2-1 versanschaulicht dies mit einen Trassenquerschnitt aus dem Bereich der Berliner Innenstadt. Hier wird der Bodenraum durch mehrerer Trassen verschiedener Spannungsebenen bis in 4m Tiefe genutzt und gleichzeitig von einer Fernwärmeleitung gekreuzt. Dadurch sind teilweise kaum noch Möglichkeiten für den Neubau von Trassen vorhanden. Gleichzeitig steigt durch häufige Erdarbeiten die Gefahr von Kabelbeschädigungen.

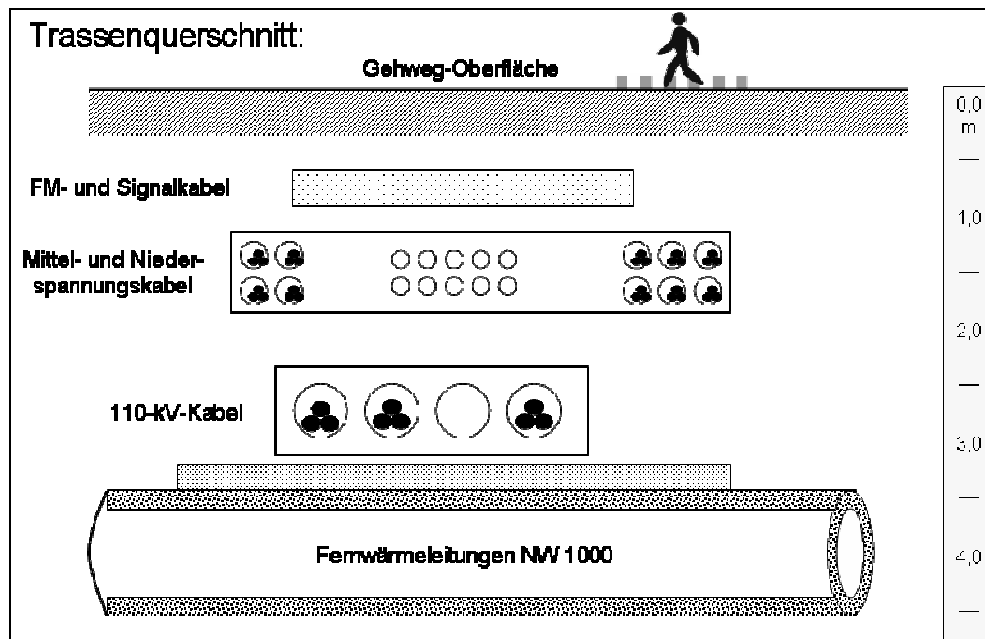


Abb. 2.2-1: Trassenquerschnitt Leipziger Strasse (Köhler, 2009)

2.2.2 Kabelaufbau

Der Kabelaufbau hat verschiedene Funktionen: eine möglichst verlustarme Übertragung des elektrischen Stromes, die Isolation zum Erdboden, die Abschirmung von elektromagnetischer Strahlung und der Schutz gegen Umwelteinflüsse. Heutzutage sind kunststoffisolierte einadrige Kupfer- oder Aluminiumkabel auch in der Mittel- und Hochspannungsebene Stand der Technik. Dabei wird vernetztes Polyethylen (VPE) als besonders verlustarmes Dielektrikum verwendet. Den Aufbau eines solchen VPE-Kabels stellt Abb. 2.2-2 beispielhaft dar. Im Folgenden soll dieser Aufbau und die Funktion dargelegt werden.

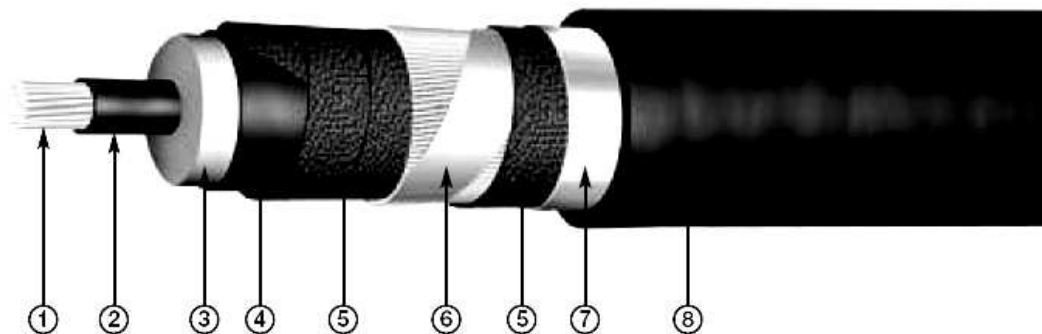


Abb. 2.2-2: Aufbau eines VPE Kabels (Quelle: Tele-Fonika Kable, Polen)

Legende: 1 - Aluminium- oder Kupferleiter; 2 - Innere Leitschicht; 3 - VPE-Isolierung; 4 - Äußere Leitschicht; 5 - Leitfähiges Quellfließ; 6 - Kupferschirm; 7 - Aluminiumband; 8 - PE-Mantel

Der Leiter des Kabels (1) besteht aus einem Bündel von Einzeldrähten, wobei die Summe der Einzelquerschnitte den effektiven Leiterquerschnitt (A_{eff}) bildet. Danach folgt ein vierschichtiger Aufbau der Isolation aus innerer Leitschicht (2), der VPE Isolierung (3), der äußeren Leitschicht (4) und einem Quellfließ. Die beiden Leitschichten erzwingen einen radialen Verlauf der elektrischen Feldlinien in der Isolierung und sorgen so für eine gleichmäßige dielektrische Belastung der Isolierung. Für eine gute Isolierwirkung und lange Lebensdauer der Isolierung sind eine große Reinheit und Hohlraumfreiheit des Isolationswerkstoffes, sowie eine homogene Bindung der Schichten ausschlaggebend. Bei der Fertigung werden deshalb alle Schichten der Isolierung durch Extrusion miteinander verbunden. Diese Isolierung umschließt ein Schirm (6) aus Kupfer-Runddrähten, der geerdet wird und dadurch das elektromagnetische Feld des Leiters abschirmt, sowie die Feldlinien gleichmäßig verteilt. Im Schirm wird dadurch ein Stromfluss (Schirmstrom) induziert, der gemäß der Lenz'schen Regel dem Stromfluss im Leiter entgegengesetzt ist. Ein Aluminiumband (7) über dem Schirm dient als Wassersperre. Die PE-Ummantelung (8) sorgt anschließend für den Schutz des Kabels gegen mechanische oder chemische Einflüsse.

Die Grundsätze der Verlegung von Kabeln werden in DIN-VDE normiert. Grundsätzlich muss ein System für die Drehstromübertragung aus drei Einzelkabeln bestehen, die nebeneinander oder in Dreiecksanordnung verlegt sind. Der Abstand der Kabel und Systeme, sowie die Verlegetiefe sind von der Spannungsebene abhängig. Für Mittelspannungskabel erfolgt die Verlegung ab einer Tiefe von 85cm unter der Bodenoberfläche. Systeme im Hochspannungsbereich werden ab einer Tiefe von 150cm verlegt. In Abb. 2.2-3 ist die Verlegung von Kabelsystemen prinzipiell dargestellt. Der Kabelgraben wird nach der Montage des Kabelstranges verfüllt und verdichtet. Dazu sollte ein steinfreies und sandiges Substrat verwendet werden.

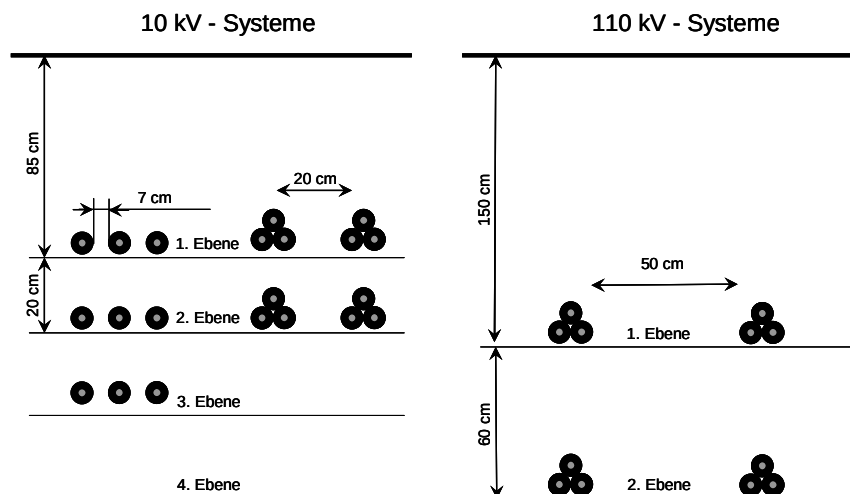


Abb. 2.2-3: Verlegung von Kabelsystemen im Mittel- und Hochspannungsbereich im Netz der VED Berlin (nach Köhler, 2009)

2.2.3 Wärmeentwicklung des Kabels

Der Stromfluss in einem Leiter ist zwangsläufig mit Verlusten verbunden, die in Verlustwärme (P_V) umgesetzt werden. Im Folgenden wird auf die Verluste bei der Übertragung von Wechselstrom eingegangen und diese mit einem einfachen Verfahren berechnet. Das soll verdeutlichen, woran die thermi-

sche Belastung von Kabeln bemessen wird und welche Wärmequellen bei der Modellierung eines Erdkabels berücksichtigt werden müssen. Dieses einfache Modell entspricht prinzipiell dem standardisierten Berechnungsverfahren nach Quelle.... Die berechneten Verluste sind Eingangsgrößen für das Wärmewiderstandsmodell (WWM), mit dem die Ableitung der entstehenden Verlustwärme innerhalb des Kabels und die Festlegung der Strombelastbarkeit des Kabels erfolgt.

Berechnungen in diesem Abschnitt werden immer für ein 110kV-VPE isoliertes Kabel der Bauart N2XS(FL2Y) durchgeführt.

Stromverluste

Aus dem im Leiter übertragenen Strom resultiert der Leiterverlust, welcher nach dem Ohm'schen Gesetz folgend zu definieren ist:

$$P_L = R_L \cdot I^2 \quad (2.39)$$

$$R_L = \rho_{\text{spez}} \cdot A_{\text{eff}}$$

mit: P_L – Leiterverlust [W/m]; R_L – Leiterwiderstand [Ω /m]; I - Stromfluß [A]; ρ_{spez} - spezifischer elektrischer Widerstand [Ω /mm²m]; A_{eff} - effektiver Leiterquerschnitt [mm²]

In der Berechnung des Verlustes stellt der Leiterquerschnitt A_{eff} eine bauartspezifische Konstante dar. Der spezifische elektrische Widerstand ρ_{spez} ist Material- und Temperaturabhängig. Für Kupfer beträgt der spezifische Widerstand bei 20°C 0,018 Ω /mm²*m und steigt mit dem Faktor 0,0036 Ω /K an. Eine Erhöhung der Leitertemperatur von 20 auf 90°C bewirkt demnach eine Erhöhung des Leiterverlustes um das 15-fache. Da eine rekursive Berechnung des Leiterverlustes unter Berücksichtigung der Temperatur in den Modellen nicht möglich ist, wird in Berechnungen von einem konstanten Widerstandswert bei 90°C ausgegangen.

Die zweite Verlustquelle im Kabel ist der dielektrische Verlust (P_I) der Isolation. Im Isolator entsteht ein elektrisches Feld, das entsprechend der Frequenz des Wechselstroms oszilliert. Aus der Arbeit die im elektrischen Feld geleistet wird, errechnet sich der Verlust. Er hängt von der Kabelgeometrie, den Eigenschaften des Isolators, der Stromfrequenz und der Spannung ab. Für eine bestehende Trasse können diese Größen als Konstante angesehen werden, so dass der Verlust eine konstante Größe darstellt. In den Berechnungen für ein 110 kV VPE-Kabel (Typ N2XS(FL)2Y) ist dies mit $P_I = 0,3$ W/m veranschlagt.

Die dritte Verlustquelle sind die Schirmverluste (P_S). Ebenso wie der Leiterverlust wird der Schirmverlust mit dem Ohmschen Gesetz berechnet und ist vom induzierten Schirmstrom abhängig. Der Schirmstrom steigt mit der Kabellänge an und kann durch Auskreuzen der Schirme reduziert werden. Für die Berechnung des Schirmverlustes wird dieser Aspekt nicht berücksichtigt. Stattdessen wird ein konstanter Proportionalitätsfaktor zum Leiterstrom ($I_S=0,15 \cdot I$) verwendet. Auch hinsichtlich des spezifischen elektrischen Widerstandes des Schirms wird eine Temperatur von 90°C angenommen. Damit errechnet sich der Schirmverlust wie folgt:

$$P_S = R_S I_S^2 = R_S (0,15 \cdot I)^2 \quad (2.40)$$

$$R_S = \rho_{\text{spez}} \cdot A_{\text{Schirm}}$$

mit: P_S – Schirmverlust [W/m]; R_S – Schirmwiderstand [Ω/m]; I_S – im Schirm induzierter Stromfluss [A]; A_{Schirm} – effektiver Leiterquerschnitt [mm^2]

Der Gesamtverlust des Kabels bildet die Summe aller drei Verlustquellen. Sie hängt in der Berechnung von der Stromlast des Kabels ab. In Abb. 2.2-4 ist der Verlust des 110kV-VPE Kabels in Abhängigkeit von der Strombelastung und bei drei verschiedenen Leitertemperaturen dargestellt.

Der exponentielle Anstieg verdeutlicht, wie eine Überlastung aufgrund einer steigenden Kabeltemperatur eintreten kann. Gleichzeitig wird klar, dass durch eine niedrige Leitertemperatur die Blindleistung vermindert wird.

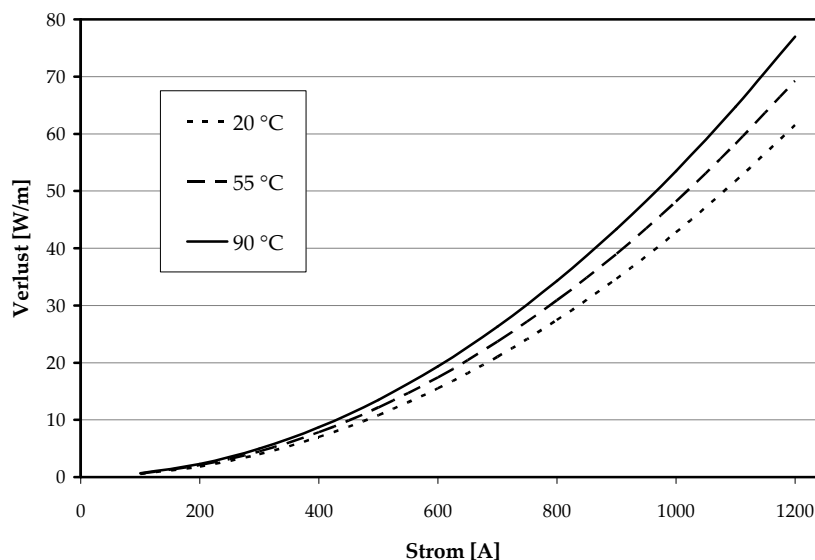


Abb. 2.2-4: Verluste eines 100 kV-Kabels in Abhängigkeit des Stromes und verschiedenen Kabeltemperaturen

Wärmetransport

Um die aus den Stromverlusten resultierende Erwärmung eines Einzelkabels zu bestimmen, kann für einen stationären Zustand mit dem Wärmewiderstandsmodell (WWM) eine analytische Lösung gefunden werden. Das WWM basiert auf dem Fourier-Gesetz der Wärmeleitung (Gleichung 2.32). Um eine Analogie zum elektrischen Widerstand herzustellen wird der spezifische Wärmewiderstand (σ_{th}) als Kehrwert der Wärmeleitfähigkeit definiert:

$$\sigma_{\text{th}} = \lambda^{-1} \quad (2.41)$$

mit: σ_{th} – spezifischer thermischer Widerstand [mK/W]; λ – Wärmeleitfähigkeit [W/mK].

Analog zum Ohmschen Gesetz gilt nun, dass der durch einen Temperaturgradienten hervorgerufene Wärmefluss (q_H) durch eine mehrschichtige eindimensionale Wand über in Reihe geschaltete Widerstände betrachtet werden kann. Der Fluss wird durch die Summe der Einzelwiderstände bestimmt:

Stromfluss:
$$I = \frac{U}{(R_1 + R_2 + \dots + R_n)} \quad (2.42)$$

mit: R_i – elektrischer Widerstand [Ω/m]; U - Spannung [V]

Wärmefluss:
$$R_{th} = \frac{\sigma_{th}}{dx} \quad (2.43)$$

$$q = \frac{\Delta T}{(R_{th,1} + R_{th,2} + \dots + R_{th,n})}$$

mit: R_{th} – Wärmewiderstand [K/W]; dx - Wanddicke [m]; ΔT - Temperaturdifferenz [K]

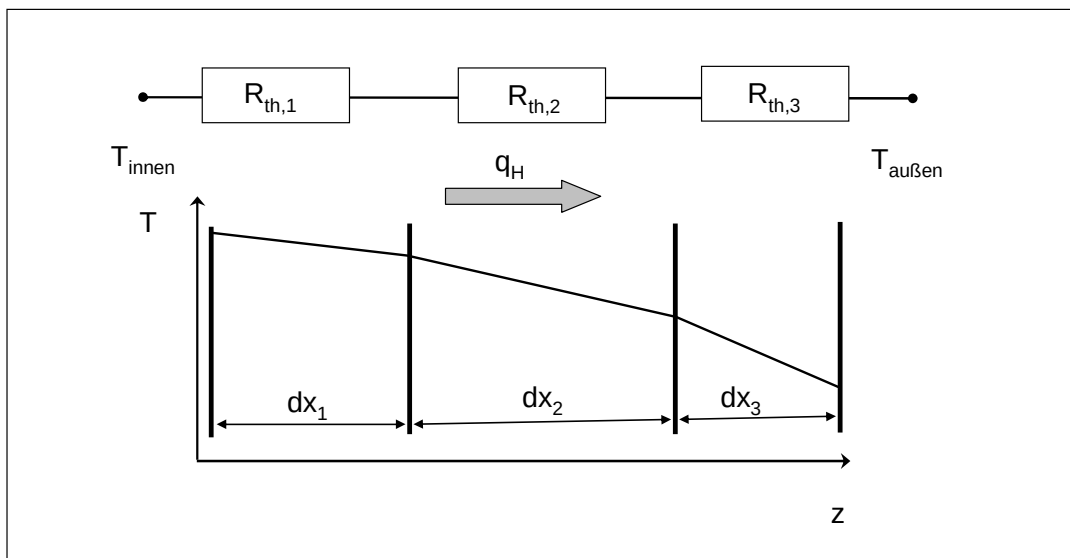


Abb. 2.2-5: Temperaturgradient und Wärmefluss in einer ebenen Wand

Um eines Kabel als linienförmige, rotationssymmetrische Wärmequelle zu analysieren, wird eine Lösung für die Geometrie eines Zylinders benötigt. Für einen Zylinder mit der Einheitslänge 1m beträgt der Umfang $2\pi r$. Die Materialschicht kann als die Schichtung von elementaren Wärmewiderständen aufgefasst und wie folgt berechnet werden:

$$R_{th} = \int_{r=r_1}^{r_2} \frac{\sigma_{th}}{2\pi dr} = \frac{\sigma_{th}}{2\pi} \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right) \quad (2.44)$$

mit: r_i – Radius [m]

Vereinfacht man den zuvor dargelegten Aufbau des VPE-Kabels auf nur vier Materialschichten (Leiter, Isolierung, Schirm und Mantel) und berücksichtigt noch den umgebenden Boden, so kann die Leitertemperatur wie folgt berechnet werden:

$$T_L = \frac{1}{2\pi} \left[\left(P_L + \frac{P_I}{2} \right) \sigma_{th,I} \ln \frac{r_I}{r_L} + P_V \sigma_{th,M} \ln \frac{r_M}{r_S} + P_V \sigma_{th,B} \ln \frac{r_B}{r_M} \right] + T_B \quad (2.45)$$

mit: T_L – Leitertemperatur [°C]; T_B – Temperatur des Bodens [°C]

In Abb. 2.2-6 ist das Prinzip des Modells veranschaulicht und ein entsprechendes Temperaturprofil dargestellt. Aus der Gleichung kann unter Annahme einer Bodentemperatur (T_B) und einer Grenztemperatur des Leiters ($T_{L,max}$) unter Verwendung der Gleichungen (2.39) und (2.40) die maximale Strombelastbarkeit (I_{max}) berechnet werden. Der spezifische thermische Widerstand des Bodens wird in folgende vier Klassen eingeteilt (nach DIN VDE 0276-1000):

- sehr feucht = 0,7 mK/W
- feucht = 1,0 mK/W
- trocken = 2,0 mK/W
- sehr trocken = 3,0 mK/W

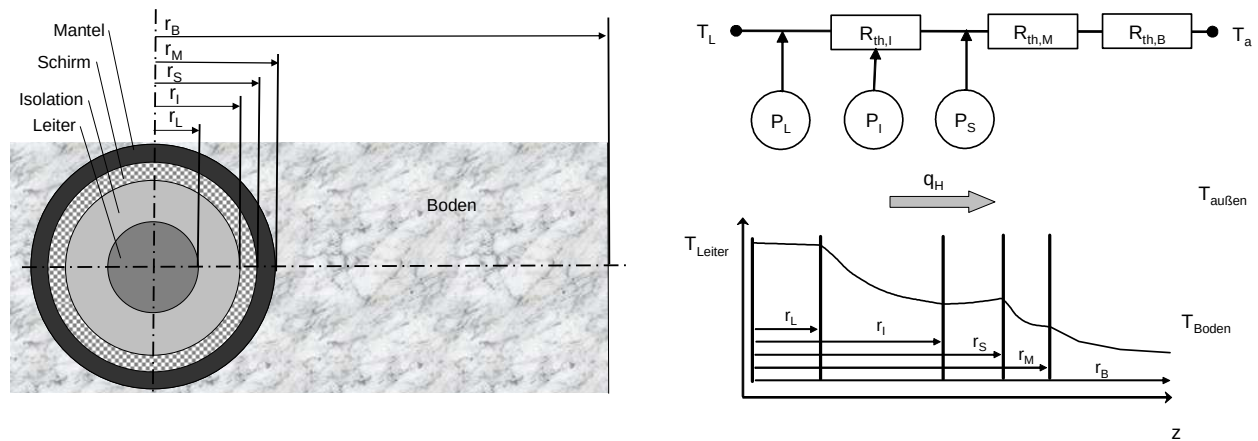


Abb. 2.2-6: Schematische Darstellung des Wärmewiderstandsmodell für ein Einleiterkabel im Boden

Um einen Kabelstrang von 3 Einzelkabeln mit der Verlegetiefe z und der Bodenoberflächentemperatur T_O abzubilden, erfolgt die Annahme, dass der Wärmetransport nur in Richtung der Bodenoberfläche stattfindet. Für diesen Fall stellt die Bodenoberfläche eine Symmetrieachse dar, an der die Wärmequelle gespiegelt wird. Für den Kabelstrang wird angenommen, dass die drei Einzelkabel dabei einen effektiven Außenradius von $2 \cdot r_M$ aufweisen. In Abb. 2.2-7 sind die Annahmen für dieses Berechnungsmodell skizziert. Aus dieser Modellvorstellung ergibt sich folgende Formel zur Berechnung der Leitertemperatur:

$$T_L = 1,5 \frac{1}{2\pi} \left[\left(P_L + \frac{P_I}{2} \right) \sigma_{th,I} \ln \frac{r_I}{r_L} + P_V \sigma_{th,M} \ln \frac{r_M}{r_S} \right] + 3 \frac{P_V \sigma_{th,B}}{2\pi} \ln \frac{z}{r_M} + T_B \quad (2.46)$$

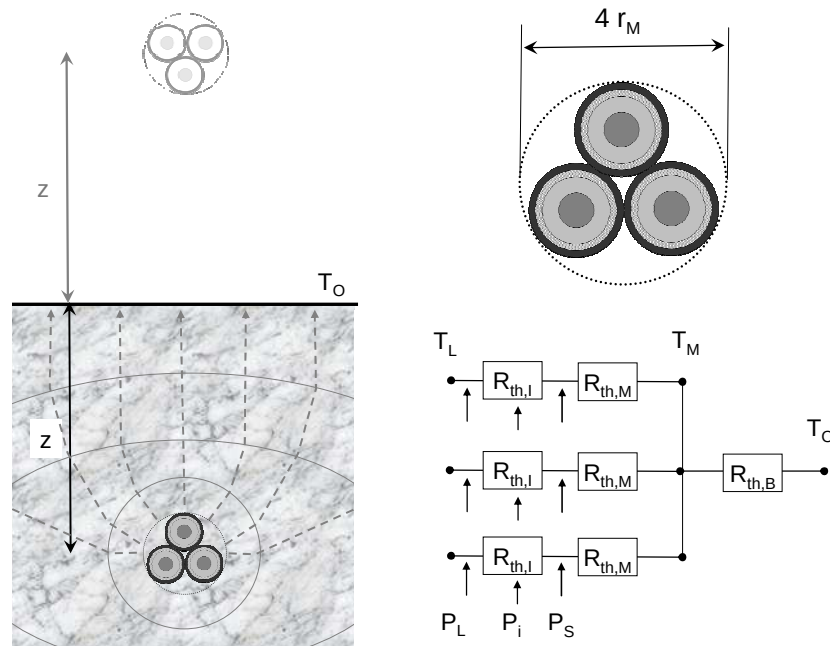


Abb. 2.2-7: Schematische Darstellung des WWM für einen Kabelstrang in Dreiecksanordnung

Die Berechnungsgleichung zeigt, dass mit einer Verdoppelung des spezifischen thermischen Widerstandes des Bodens, sich auch die Leitertemperatur verdoppelt. Die Verdoppelung der Verlegetiefe hat ebenfalls einen Anstieg zur Folge. In Abb. 2.2-8 ist der Anstieg der Leitertemperaturen mit der Stromlast für verschiedene thermische Widerstände des Bodens und Verlegetiefen dargestellt. Es wird deutlich, dass die Annahmen für den Wärmewiderstand des Bodens die Festlegung der Strombelastbarkeit deutlich beeinflussen.

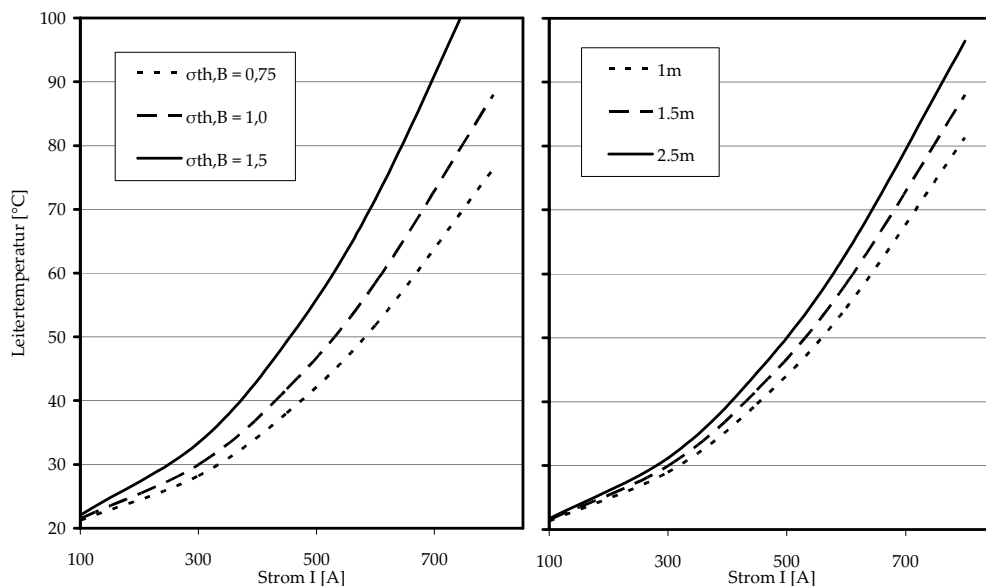


Abb. 2.2-8 Mit dem WWM berechnete Leitertemperatur eines Kabelstrangs (links bei verschiedenen thermischen Widerständen des Bodens ($z = 1\text{m}$, $T_O = 20^\circ\text{C}$), rechts bei verschiedenen Verlegetiefen ($\sigma_{th,B} = 1\text{mK/W}$, $T_O = 15^\circ\text{C}$))

2.3 Modellierung Transportvorgängen mit dem Delphin-Modell

Verschiedene natur- und ingenieurwissenschaftliche Disziplinen müssen Transportprozesse für Wärme, Wasser, Salze und Luft in kapillarporösen Materialien durch Modelle abbilden. Um Transportprozesse in Gebäudekomponenten zu untersuchen, wurde am Institut für Bauklimatologie (IBK) der Technischen Universität Dresden das numerische Simulationsmodell DELPHIN4 (Grunewald, 2000) entwickelt. Im Gegensatz zu den verbreiteten bodenphysikalischen Simulationsmodellen basiert es auf einem thermodynamischen Ansatz zur Modellierung des gekoppelten Wasser-, Wärme und Stofftransports (Grunewald 1997, Grunewald et al. 1997). Da es Energiequellen in zweidimensionalen Geometrien abbilden kann, wurde es in dieser Arbeit für die Abbildung der Transportprozesse in und um Energiekabel eingesetzt.

Eine Beschreibung von Feuchtetransport- bzw. Speichervorgängen in porösen, mineralischen Materialien setzt eine ausreichend zuverlässige Kenntnis der Porenstruktur voraus. Diese sind in der Regel an Fluid/Gas-Transportkoeffizienten zu koppeln. Hierzu existiert eine große Zahl von Arbeiten (Garrecht 1992; Everett & Haynes 1997; Perrin & Diaw 1999; Plagge 2002, 2004, 2005; Meng & Schiessl 1992; Hoffmann et al., 1996). Die Bestimmung von Ionen-Diffusions- und Dispersionskoeffizienten in kapillar porösen Materialien wurde von Buchwald und Kaps (1999) und Plagge & Grunewald (2002) erörtert. Mittlerweile liegen eine Reihe von Arbeiten als auch Simulationsmodelle zum gekoppelten Wärme-, Feuchte- und Stofftransport in porösen Materialien vor (Künzel 1994; Lunk & Wittmann 1996; Grunewald 1997; Schmidt-Döhl & Rostásy 1999).

2.3.1 Das physikalische Materialmodell

Die Betrachtung des gekoppelten Wärme-, Feuchte-, Luft- und Salztransports geht grundsätzlich davon aus, dass es sich um einen Transport von Erhaltungsgrößen (Energie, Wasser-, Luft- und Salz-molekülen) handelt. Wenn in einem Volumenkörper keine Quellen oder Senken vorhanden sind, müssen demnach alle zufließenden oder abtransportierten Größen im Volumenkörper erhalten bleiben. Aus diesen Erhaltungsgleichungen, in Verbindung mit den Gesetzen der Thermodynamik, ergibt sich eine Differentialgleichung mit der sich der zeitliche Verlauf der im Volumen vorhandenen Massen und der Energie bestimmen lässt. Während der Berechnung mittels des im Programm DELPHIN4 enthaltenen Solvers wird der Zustand der Konstruktion für die fortlaufende Zeit sukzessive berechnet. Je länger das betrachtete Zeitintervall und je komplexer die Konstruktion (d.h., je mehr Volumenelemente betrachtet werden), desto länger wird die Berechnungszeit.

Für die Herleitung der so genannten mikroskopischen Gleichungen muss davon ausgegangen werden, dass das Volumen $V_{\text{Microscopic}}$ hinreichend genau durch die Temperatur, den Druck (Gasdruck bzw. Flüssigkeitsdruck) und die Konzentration (Salzkonzentration bzw. Wasserdampfkonzentration) beschrieben wird. Beim Übergang auf das diskrete Volumenelement $V_{\text{Discretisation}}$, dass mehrere Phasen zugleich enthält, müssen zusätzlich die Wechselwirkungen zwischen den Phasen beschrieben werden. Dies geschieht durch Gleichgewichtsbedingungen der Stoffe und die Beziehung, die die Kapillarkräfte zwischen dem Gasdruck und dem Flüssigkeitsdruck herstellen. Die Druckdifferenz zwischen Gas- und Flüssigkeitsdruck wird durch die Kapillarkräfte bzw. die Oberflächenspannung des Wassers hergestellt. Da im Gleichgewicht der Druck innerhalb des Volumenelements überall gleich sein muss, wer-

den die Kapillaren bei gegebenem Wassergehalt bis zu einem bestimmten Radius r aufgefüllt. Dieser Radius ist für alle Poren im Diskretisierungsvolumen gleich. Damit erhält man eine Beziehung zwischen dem Wassergehalt, dem Kapillarradius und der Differenz zwischen Gasdruck und Flüssigkeitsdruck. Die Bedingungen, die das Mehrphasengleichgewicht betreffen sind im Festkörper nicht immer erfüllt, ferner findet bei geringeren relativen Luftfeuchten zunächst eine Adsorption der flüssigen Phase an die Porenwände statt. Weiterhin können durch die Einführung von Randbedingungen (Wärmequellen und –senken, Kontaktbedingungen an Materialgrenzen, Variation der Materialeigenschaften etc.) zahlreiche Gegebenheiten zusätzlich berücksichtigt werden.

Die Anwendung aller beschriebenen Gleichgewichtsbedingungen führt dazu, dass sich der Zustand jedes diskretisierten Volumenelementes durch insgesamt vier Zustandsgrößen beschreiben lässt. Alle anderen Größen lassen sich daraus berechnen. Das Volumenelement im kapillarporösen Baustoff kann durch die vier Größen vollständig beschrieben werden:

- Temperatur
- Wassergehalt
- Gasdruck (Druck in der Gasphase)
- Salzkonzentration

Diese Größen müssen im Delphin-Programm als Anfangsbedingungen festgelegt werden, die den Ausgangszustand der Materialien zu Beginn der Simulation charakterisieren.

2.3.2 Transportprozesse für Wärme, Feuchte, Luft und Salz

Die Berechnung der Transportprozesse ist die eigentliche Aufgabe der numerischen Simulation. Für das oben beschriebene System lassen sich zunächst die Transportprozesse innerhalb einer Phase bestimmen. Für das Dreiphasensystem formuliert Grunewald et al. (1997) folgende Gleichungen.

Wassertransport:

$$\frac{\partial(\rho_w \theta_w + \rho_d \theta_d)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_k} \left[\rho_w v_k^{m_l} \theta_l + (\rho_v v_k^{m_g} + j_{k,diff}^{m_v}) \theta_g \right] \quad (2.47)$$

Gastransport:

$$\frac{\partial(\rho_a \theta_g)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_k} \left[\rho_a v_k^{m_g} \theta_g - j_{k,diff}^{m_v} \theta_g \right] \quad (2.48)$$

Energietransport:

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_k} \left[j_{k,diff}^{m_v} + \rho_l u_l v_k^{m_l} \theta_l + (\rho_v u_v + \rho_a u_a) v_k^{m_l} \theta_g + j_{k,diff}^{m_v} (h_v - h_a) \theta_g \right] \quad (2.49)$$

mit: θ_i - Volumenanteil [m^3/m^3]; ρ_i - Dichte [kg/m^3]; x_k - Raumrichtung; V_k - Geschwindigkeit [m/s]; $j_{k,diff}$ - diffusiver Fluss; u - Energiegehalt [J]; Indizes: w - flüssiges Wasser; d - Wasserdampf; g - Gas; a - Luft.

Die Dynamik der Zustandsgrößen wird im Modell aus den so genannten Onsager- Beziehungen der Thermodynamik hergeleitet. Damit ist gemeint, dass in einem System, welches aus seinem Gleichgewicht, z.B. durch einen Temperaturgradienten ausgelenkt wird, eine thermodynamische, entgegengesetzte Kraft entsteht. Die Kraft verursacht einen Transportprozess, welcher das System ins Gleichgewicht zurückführt. Der Temperaturgradient wird z.B. durch einen Wärmestrom von der warmen zur kalten Seite ausgeglichen. Dabei wird eine Proportionalitätsannahme gemacht, die besagt, dass der sich ergebende Wärmestrom proportional zur Temperaturdifferenz ist. Der Proportionalitätsfaktor zwischen beiden wird „phänomenologischer Koeffizient“ genannt, d.h., er lässt sich im Konkreten nicht herleiten, sondern muss als Materialeigenschaft vorgegeben sein. Im Falle des Wärmestroms ist das gerade die bekannte Wärmeleitfähigkeit des Materials (Gleichung (2.32)). Analog zu dem Wärmestrom ergibt sich, dass ein Gesamtmassenstrom (Gasstrom, Flüssigkeitsstrom) proportional zu einem Druckgradienten ist. Ein Komponentenstrom (Wasserdampfdiffusion, Salzdifffusion) ist proportional zu einem Konzentrationsgradienten. Die erwähnte abstrakte Herleitungsweise des Gleichungssystems ermöglicht es, nicht nur die resultierenden Ströme, sondern auch die zugehörigen treibenden Kräfte (Temperaturgradient, Druckgradienten, Konzentrationsgradienten) direkt aus der Rechnung zu bestimmen. Es ergibt sich eine große Anzahl von unterschiedlichen Transportprozessen und –koeffizienten. Die Transportprozesse im mikroskopischen Volumenelement, d.h. innerhalb einer Phase, werden im Rahmen der zugrundeliegenden Theorie sehr genau erfasst.

Ein Druckgradient verursacht nicht nur einen Gesamtmassenfluss, sondern auch einen Diffusionseffekt. Ein Temperaturgradient bewirkt neben einen Wärmefluss auch einen Teilchenfluss und umgekehrt. Beim Übergang vom mikroskopischen auf das Diskretisierungsvolumen, ist man damit konfrontiert, dass einige Zustandsvariablen, insbesondere die Geschwindigkeit innerhalb des Volumenelementes, stark variieren. Die Transporteigenschaften hängen in komplexer Weise von der Mikrostruktur des Materials ab. Die Porenstruktur führt aber dazu, dass der Gesamttransport in linearer Näherung proportional zum Druckgradienten von Flüssigkeits- bzw. Gasdruck im Material ist. Zusätzlich kommt es zu einer verstärkten Durchmischung der unterschiedlichen Komponenten, wenn das Wasser durch die Poren strömt (Dispersionseffekt). Die relevanten Transportprozesse, die im Rahmen der theoretischen Modellierung eine Rolle spielen, lassen sich wie folgt klassifizieren:

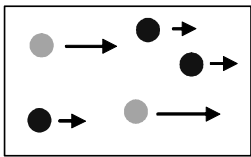
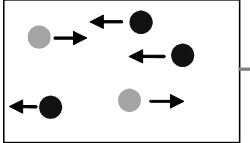
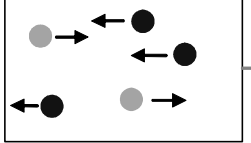
- **Advektiver Stofftransport:** Die Erhaltungsgröße (Masse, Energie) wird mit dem Gesamttransport aller Teilchen mittransportiert.
- **Diffusiver Stofftransport:** Er ist definiert als die Differenz zwischen dem tatsächlichen Gesamttransport und dem advektiven Transport. Daraus ergeben sich zwei Typen dieses Transportes:

Typ1: Die unterschiedlichen Komponenten (z.B. Salz, Wasser) in einer Phase bewegen sich unterschiedlich, z.B. aufgrund eines Konzentrationsgradienten, und es kommt zu einer Durchmischung der Substanzen und ihrer Eigenschaften.

Typ 2: Eine Eigenschaft (z.B. Energie) bleibt nicht an einem bestimmten Teilchen haften, sondern wird von einem Teilchen zum nächsten übertragen. So beruht beispielsweise der Wärmetransport im Festkörper nur auf diesem Mechanismus.

Die folgende Tabelle gibt eine qualitative Übersicht über die durch das Modell beschriebenen Transportprozesse:

Tab. 2.3-1: Überblick zu den im Modell berücksichtigten Transportvorgänge

	Advektiver Stofftransport	Diffusiver Stofftransport (Typ 1)	Diffusiver Stofftransport (Typ 2)
	Gemittelter Teilchenstrom (j_{adv}) aller Komponenten	unterschiedlicher Teilchenstrom $j_{diff,1} / j_{diff,2}$ der Komponenten	Transport der Erhaltungsgröße E ohne Teilchenbewegung
			
	$j_{advektion} = \rightarrow$	$j_{diffusion,1} = \rightarrow$ $j_{diffusion,1} = \leftarrow$	$j_{diffusion,1} = \rightarrow$ $j_{diffusion,1} = \leftarrow$
		In den Systemen Wasser-Salz, Wasserdampf-Luft: Salzdifffusion, Wasserdampfdifffusion.	
Massen- transport	Teilchenfluß infolge Druckgra- dient	Ursachen: Konzentrationsgradient (normale Diffusion), Druckgra- dient (Druckdiffusion, Dispersion).	Nicht vorhanden; Masse kann nicht unter den Teilchen ausge- tauscht werden.

2.3.3 Das Simulationsprogramm DELPHIN4

Das DELPHIN4 Modell ermöglicht die Simulation des thermischen und hygrischen Verhaltens für ein- und zweidimensionale Probleme. Auch radialsymmetrische Probleme lassen sich bearbeiten. Folgende Vorgänge können numerisch analysiert werden:

- Wärme- und Energietransport und Temperaturfelder in Konstruktionsdetails (z.B. in Wandaufbauten, Bodenaufbauten, Anschlüsse von Rohrleitungen, Wärmebrücken etc.)
- Feuchtetransport (Flüssigkeit und Dampf), innere Kondensatbildung, Oberflächenkondensat sowie Einbaufeuchte, etc.)
- Niederschlag und Bodenfeuchte in ihrem Einfluss auf die Konstruktion
- Salztransport, falls Salze in die Konstruktion gelangen oder darin vorhanden sind, kann der Transport durch die Bauteile beschrieben werden und Effekte wie Salzausblühungen etc. können untersucht werden.

Das Simulationsprogramm unterteilt sich in einen Numerikteil und ein Paket für Pre- und Postprozessing (Abb. 2.3-1). Der Preprozessor dient der grafischen Generierung und Vernetzung des geometrischen Modells, sowie zur Spezifikation und Zuordnung der Randbedingungen und Materialeigenschaften. Eine Boden und Baustoffdatenbank sind angeschlossen und deren Materialkennwerte werden in Form von feuchte- und temperaturabhängigen Materialfunktionen abgelegt. Die Klimadatenbank enthält die charakteristischen Wettersequenzen der wichtigsten deutschen Klimagebiete. Die dem numerischen Wärme-, Feuchte-, Luft- und Salztransportprogramm DELPHIN4 zugrunde liegende Theorie ist von thermodynamischen Prinzipien abgeleitet, welche die Transportprozesse und die Übergänge zwischen der festen, der flüssigen und der gasförmigen Phase beschreiben.

Im Modell können natürliche, klimatische Umgebungsbedingungen (z.B. Temperatur, relative Feuchtigkeit, Schlagregen, Windgeschwindigkeit, Windrichtung, kurz- und langwellige Strahlung) berücksichtigt werden. Zahlreiche Klimadatensätze sind vorhanden und Daten von weiteren Standorten können problemlos eingebunden werden. Eine beliebig erweiterbare Materialdatenbank steht zur Verfügung. Um die oben beschriebenen Effekte physikalisch korrekt zu erfassen, werden die in einer Konstruktion vorhandenen Materialien nach dem Modell der kapillarporösen Materialien behandelt. Die in dem Programm verwendete Theorie des Wärme- und Feuchtetransports differenziert den Feuchtetransport in flüssiges und gasförmiges Wasser.

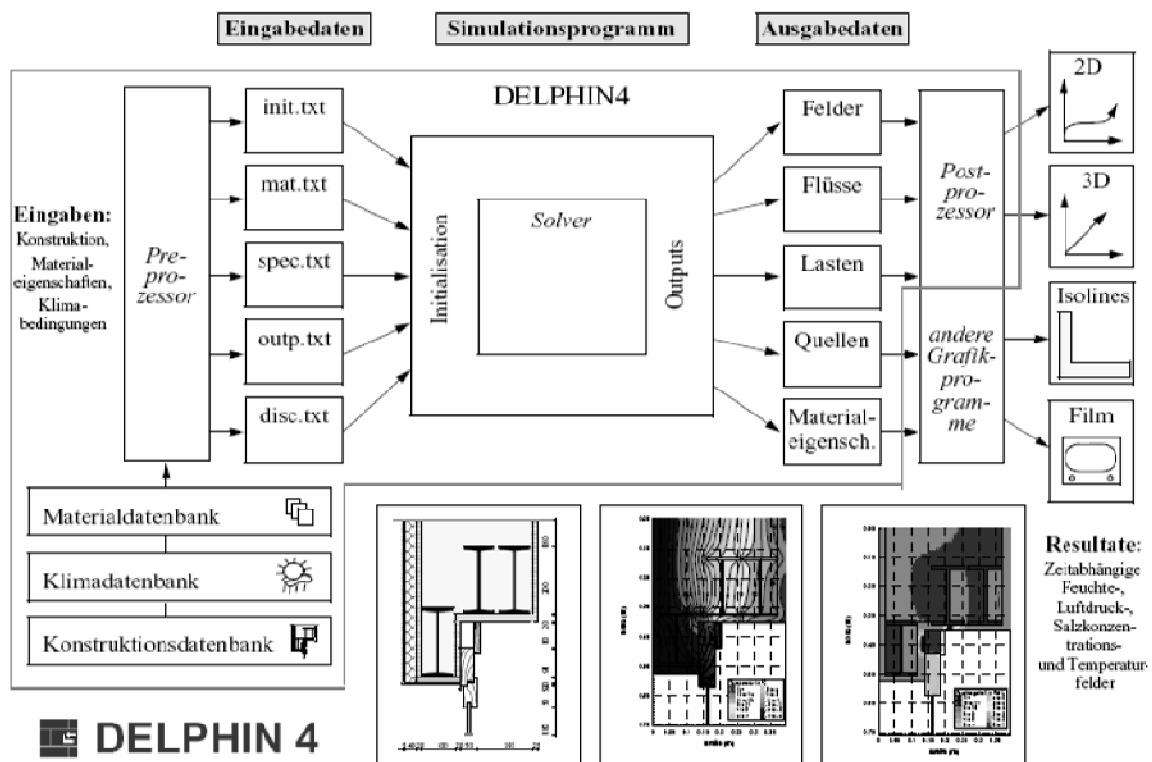


Abb. 2.3-1: Überblick über DELPHIN4-Programmkomponenten (nach Grunewald, 2000)

2.3.4 Materialeigenschaften und -funktionen

Die Simulation des hygrothermischen Verhaltens von porösen Materialien basiert auf der Theorie von Transportprozessen in Multiphasensystemen. Dabei existieren in allen drei Phasen mehrere Komponenten. In der festen Phase ist es das ausgefällte Salz, sowie das poröse Material selbst, in der flüssigen Phase Wasser und gelöstes Salz und in der gasförmigen Phase schließlich Luft und Wasserdampf. Bei einer genauen Behandlung des Transports dieser Bestandteile ergibt sich eine große Zahl von Transportvorgängen und zugehörigen Diffusions- bzw. Advektionskoeffizienten. Diese Transportkoeffizienten können in relativ freier Form als Materialeigenschaften abhängig vom Systemzustand beschrieben werden. Dafür müssen im Simulationsprogramm eine Anzahl von Materialmodellen zur Verfügung gestellt werden.

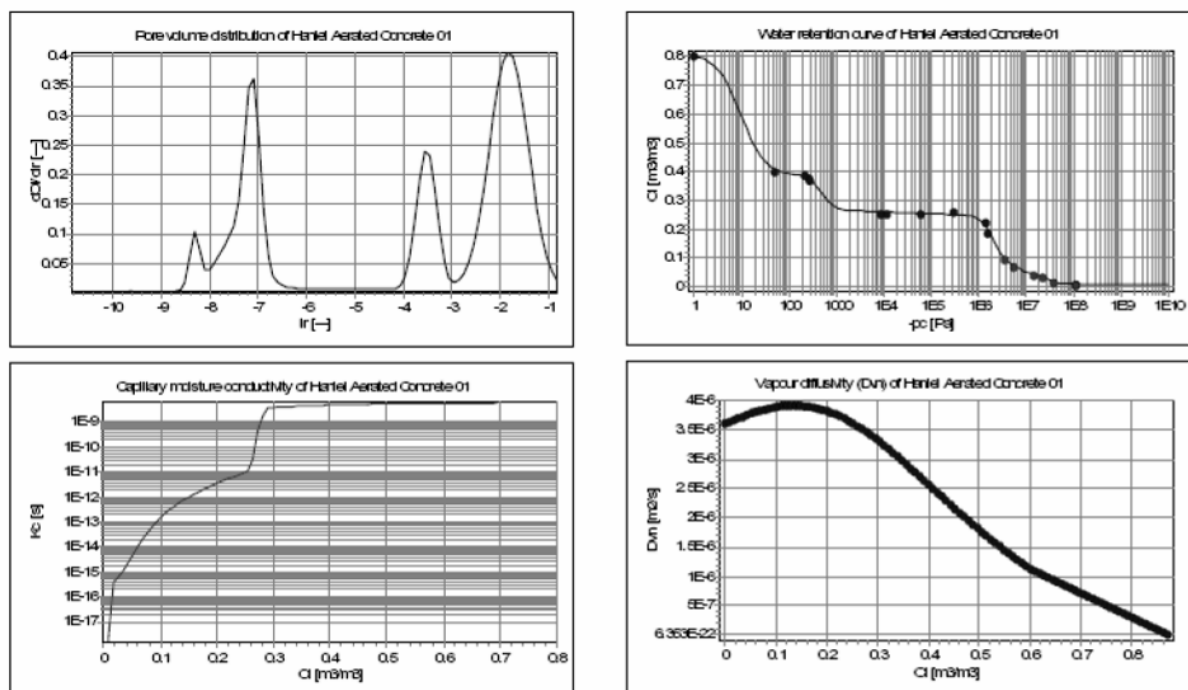


Abb. 2.3-2: Beispiel für typische Materialfunktionen, die vom Simulationsprogramm DELPHIN4 verwendet werden, Funktionen der Porenvolumenverteilung, Wasserretentionscharakteristik, Flüssigwasserleitfähigkeit und Wasserdampfdiffusion porösen Materials (Grunewald, 2000)

Die hygrischen Materialeigenschaften umfassen Bereiche von mehreren Größenordnungen. Aus der Porenvolumenverteilung wird ersichtlich, dass sowohl Poren im Nanoskalenbereich, als auch im Millimeterbereich die Speicher- und Transportprozesse bestimmen. Die Transportfunktionen durchwandern 9 Größenordnungen und stellen hohe Anforderungen sowohl an deren experimentelle Bestimmung, als auch an die numerische Mathematik. Zum Erhalt verlässlicher Funktionen sind diese über geeignete Experimente zu verifizieren. Eine Auswahl repräsentieren die Grafiken in Abb. 2.3-2.

Die vom Simulationsprogramm benötigten Materialfunktionen können auf der Grundlage von Labormessungen bestimmt werden.

- Porosität: Zur Charakterisierung des effektiven Porenvolumens, sowie der Roh- und Matrixdichte sind Messungen mittels Auftriebswägung bzw. Heliumpyknometrie vorgesehen.
- Wasserretention: Die Feuchtespeichercharakteristik im überhygroskopischen Bereich erfolgt über unterschiedliche Messmethoden. Im Bereich nahe der Sättigung wird die Retention über die Methode der hängenden Wassersäule realisiert. In den stärker ungesättigten Bereichen kommen Unterdrucksysteme mit Keramikplatten und Druckplattenapparaten zum Einsatz. Die Daten der Feuchtespeicherung dienen der Bestimmung der Porenvolumenverteilung als eine Funktion der Kapillarkräfte.
- Äquivalentporenradienverteilung: Die Wasserretentionscharakteristik wird verwendet um die Porenradienverteilung (Kapillar- und Mikroporen) zu beschreiben.
- Hygrische Sorptionsisotherme: Die Bestimmung der Feuchtespeicherfunktion im hygroskopischen Bereich erfolgt durch Sorptionsmessungen von Materialproben in Exsikatoren mit gesättigten Salz/Wasser Lösungen, bzw. in Klimakammern bei unterschiedlichen Temperaturen. Die Sorptionsanalytik dient der Erfassung der hygroskopischen Feuchtespeicherung und spiegelt die innere Oberfläche der verwendeten Materialien wider.
- Die kapillare Wasseraufnahme wird mittels des Sättigungsgrads (w -Wert) angegeben. Er repräsentiert den Anteil des Porenvolumens der unter Normalbedingungen mit Wasser gefüllt werden kann.
- Wasserdampfdiffusion: Die Untersuchung der Wasserdampfdiffusion soll der Charakterisierung der Wassermigration im Porenraum dienen. Sie wird durch Transportmechanismen infolge Dampfdruck und Kapillardruckgradienten gesteuert und kontrolliert damit das hygri-sche Wasseraufnahme- und abgabeverhalten.
- Wasseraufnahmefunktion und kapillare Sättigung: Die richtungsabhängige kapillare Wasseraufnahme dient der Erfassung der Vernetzung von Kapillarporen. Hierzu sollen Saugversuche im Labor durchgeführt werden, um den kapillaren Flüssigwassertransport quantifizieren zu können.
- Trocknungsexperimente: Diese Daten werden zur Kalibrierung der Feuchtetransportfunktionen benötigt.
- Wasserleitfähigkeit: Zur Bestimmung der kapillaren Wasserleitfähigkeit unter gesättigten und ungesättigten Bedingungen kommen Haubenpermeameter, Tensionsinfiltrrometer und Doppelmembranapparaturen zum Einsatz. Die zur Verfügung stehenden Technologien ermöglichen Wasserleitfähigkeitsmessungen bei definierten Wassergehalten, jedoch unterschiedlichen hydraulischen Gradienten und damit Kapillardrücken innerhalb der Probekörper.

- Die Kenngrößen Wärmeleitfähigkeit und die Wärmekapazität sind Basisparameter für die numerischen Berechnungen der Temperaturverteilung, Dabei variieren beide Parameter mit der mineralogischen Zusammensetzung und der Porosität.

3 Wasser- und Wärmehaushalt der Monitoringstandorte

3.1 Material und Methoden

Für das Monitoring des Wasser- und Wärmehaushaltes von Kabeltrassen wurden zwei Standorte an der 110kV-Trasse 629/630 im Verteilungsnetz der Vattenfall Deutschland Distribution GmbH (VED) ausgewählt. Die Trasse führt in Berlin vom Kraftwerk Reuter (Spandau) zum Umspannwerk Wittenau. Auswahlkriterium für diese Trasse war eine relativ starke ganzjährige Stromlast und ein ausgeprägter Tagesgang der Strombelastung. Die Trasse ist als 2-Strang System mit drei Kabeln des Typs N2XS(FL)2Y (630 mm²) in Dreiecksanordnung ausgeführt.

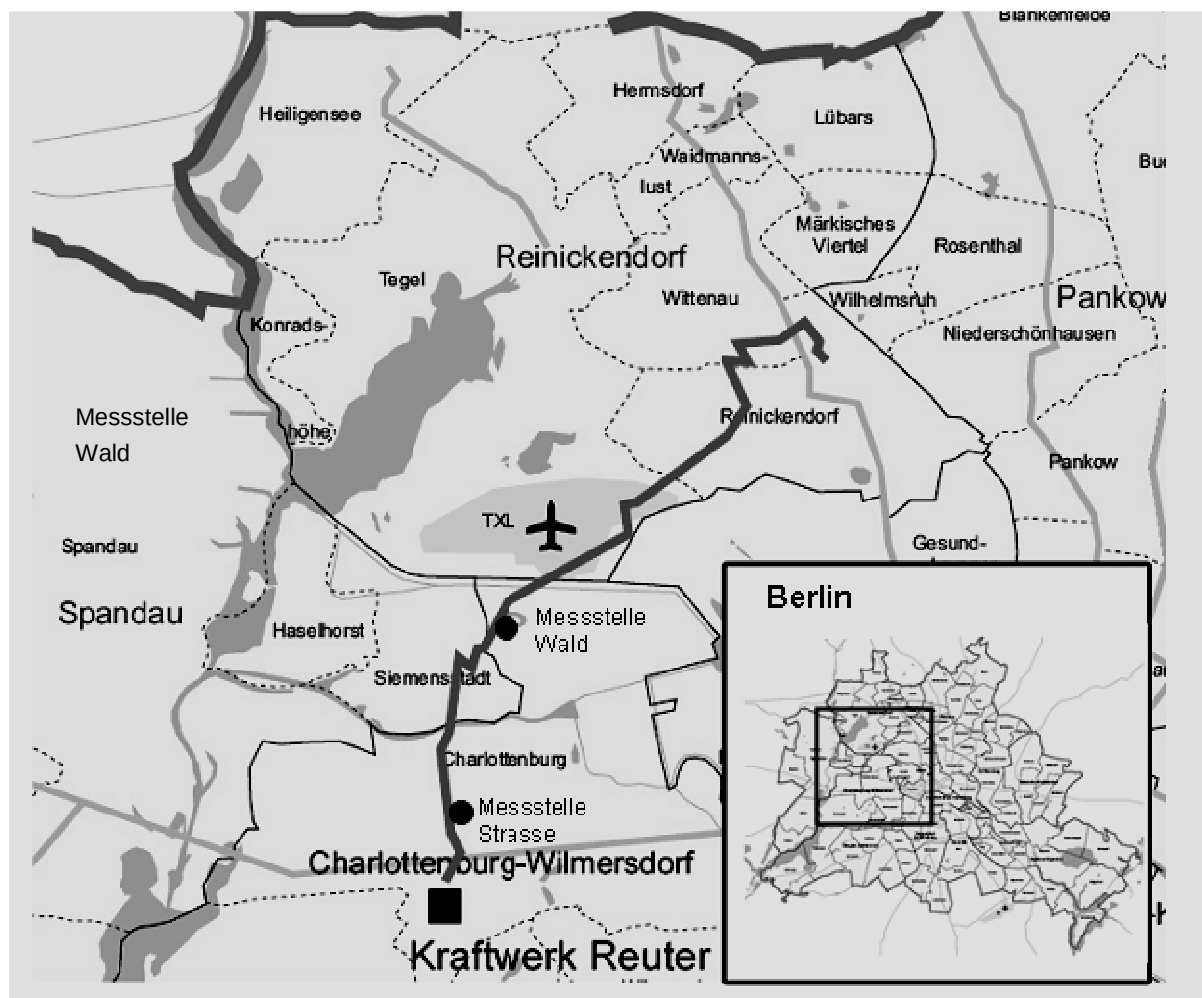


Abb. 3.1-1: Übersichtskarte zum Trassenverlauf

Im südlichen Bereich verläuft die Trasse im Berliner Urstromtal. In diesem Bereich wurden zwei Untersuchungsstandorte gewählt, die sich durch ihre Standortbedingungen unterscheiden:

(a) dem **Standort Strasse**, überdeckt mit Asphaltdecke und

(b) dem **Standort Wald** im Tegeler Forst mit einem Kiefer-Eichen Altholzbestand, neben einem Weg mit wassergebundener Decke.

Beide Standorte werden in Tab. 3.1-1 charakterisiert. Im Zuge des Messstellenaufbaus wurde eine vereinfachte Profilaufnahme und –beschreibung vorgenommen (Abb. 3.1-2).

Tab. 3.1-1: Standortcharakteristik der beiden Messstellen

Kriterien	Standort Strasse	Standort Wald
Lage	Motardstr./ Ecke Otternbuchtstr	Marienwerder Weg Nähe Flughafensee
Position	52°34'4.93"N 13°16'43.83"O	52°32'5.56"N 13°14'55.06"O
Nutzung/ Vegetation	Industriegebiet Asphaltierte Verkehrsfläche ohne Nutzung, ca. 1000m ² von Hecken und Bäumen umgeben	Waldgebiet Naturnaher Kiefern-Eichenforst (Altholzbestand), Trassenverlauf entlang eines Weges mit wassergebundene Decke
Ursprüngliche Bodengesellschaft	Rostbraunerde aus Talsand	Rostbraunerde aus Flugsand, reliktischer Gley
Grundwasserflurabstand	>6m	>10m
Verlegetiefe des Kabels	240cm	170cm
Substrat im Kabelraum	mS	Su2 (oberhalb des Kabel) mSfs (unterhalb des Kabels)

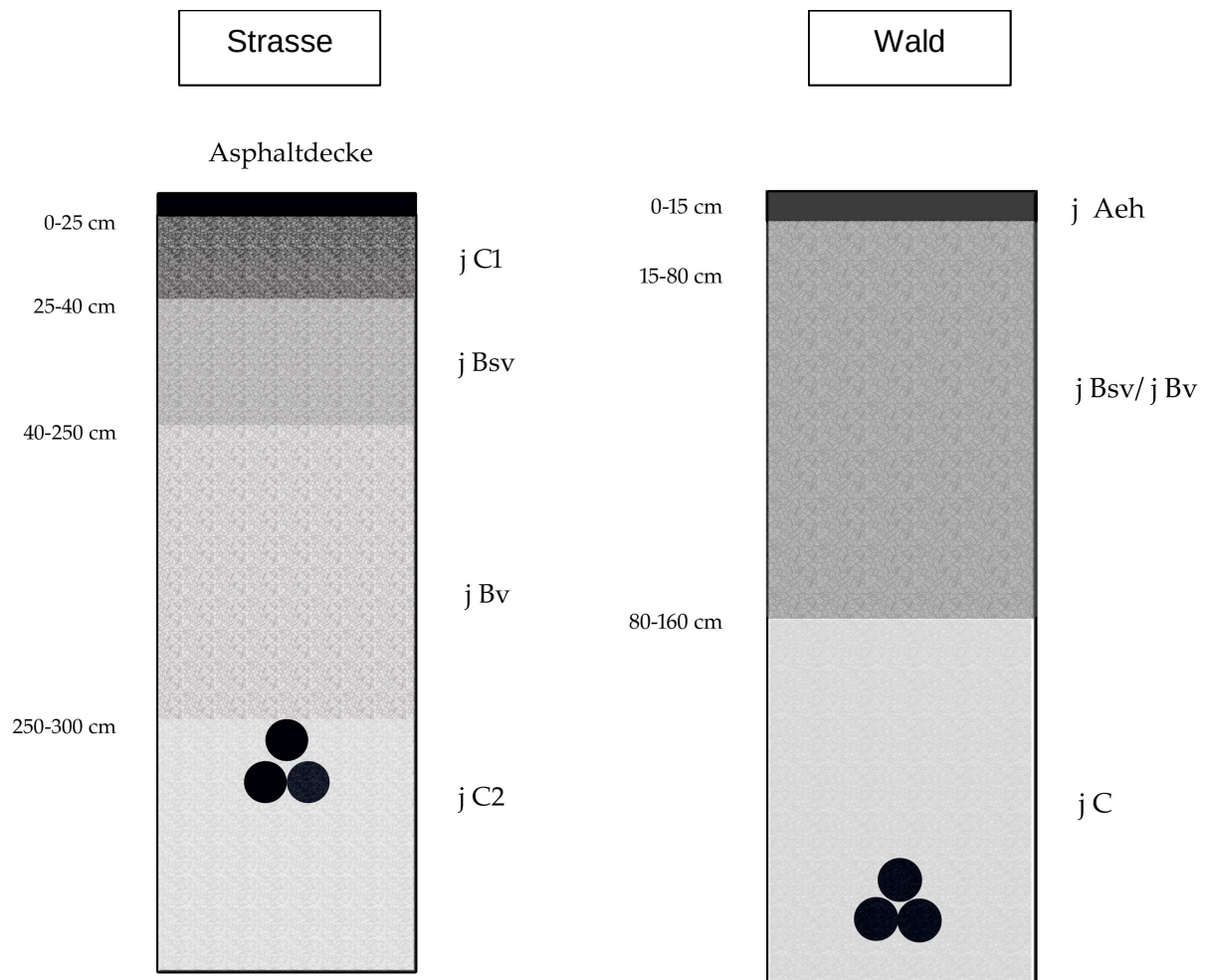


Abb. 3.1-2: Schematischer Aufbau des Kabelraumes und des Bodenprofils an den Messstellen Strasse (links) und Wald (rechts)

Tab. 3.1-2: Bodenphysikalische Profilkennwerte der Messstellen Strasse und Wald

Standort	Tiefe [cm]	Lage zum Kabel	Boden- art	TRD [g/cm³]	GPV [Vol.%]	Wassergehalt bei pF-Stufe: [Vol.%]		
						1.8	2.5	4.2
Strasse	220	Oben	mS	1.53	42.4	16.5	7.1	2.3
	260	Unten	mS	1.59	40.0	14.9	7.8	3.2
Wald	150	Oben	Su2	1.65	37.6	14.3	8.0	3.1
	190	Unten	mSfs	1.59	39.8	7.2	4.5	0.3

Beide Standorte wurden im Kabelraum und im Oberboden mit elektronischen Sensoren instrumentiert, in Tab. 3.1-3 sind die Sondentypen und Ausgabegrößen aufgeführt. Eine besondere Herausforderung für die bodenphysikalische Messtechnik stellt das starke magnetische Feld im Umfeld der Erdkabel dar. Dessen Einfluss auf die Funktionsfähigkeit der Sensoren wurde durch Probemessungen im Prüffeld des Netzbetreibers Vattenfall im Vorfeld des Aufbaus der Messstellen getestet. Bei den eingesetzten Temperatursensoren traten auch keine Störungen bzw. Ausfälle während des gesamten Messzeit-

raums auf. Bei den Wassergehaltssensoren im Kabelraum zeigten sich nach einer zuverlässigen Messung in den ersten Monaten immer häufiger Störungen des Messsignals. Nach ca. 12 Monaten Messzeit waren alle Wassergehaltssensoren am Standort Strasse ausgefallen und am Standort Wald lieferten nur drei Sensoren aus dem Kabelraum zuverlässige Messwerte.

Die Datenerfassung erfolgt mit 64-Kanal Datenloggern des Typs DL2e der Fa. DeltaT Devices in Aufzeichnungsintervallen von 30 Minuten. Durch den Einsatz eines GSM-Modems werden die Messwerte täglich abgerufen und stehen auf dem WebVis-Server der Fa. UP GmbH Online zur Verfügung. Im Messzeitraum 2008/2009 konnte die Messwerterfassung am Standort Wald ununterbrochen realisiert werden. Am Standort Strasse traten im Zeitraum Mai – September 2009 bei einem Teil der Messkanäle (u.a. Referenztemperaturen, Lufttemperatur, Niederschlag) Störungen auf, so dass hier Daten fehlen. Der allgemeine Aufbau, die Instrumentierung und Sondenordnung an den beiden Messstellen sind in Abb. 2.1-3 und Abb. 2.1-4 dargestellt.

Tab. 3.1-3: Liste der zum Monitoring eingesetzten Sensoren

Messgröße	Sensorentyp	Ausgabegröße	Messgenauigkeit
Temperatur der Kabeloberfläche	SKTS200U 10kΩ PTC	°C	0,1K
Bodentemperatur im Kabelraum	SKTS200 10kΩ PTC	°C	0,1K
Bodentemperatur (Referenz)	SEMI 833 ET 100 kΩ NTC	°C	0,5K
Wassergehalt im Kabelraum	ThetaProbe SM 200	Vol. %	2 %
Wassergehalt des Standortes	ThetaProbe ML2	Vol. %	3 %
Luftfeuchte und -temperatur	HygroClip MP100H/MP400H	% RH °C	1,5 % RH 0,3K
Niederschlag	MD532	mm	0,2 mm

3.2 Temperatur- und Wasserhaushalt der Standorte

Nachfolgend werden Messergebnisse des Wärme- und Wasserhaushalts des von der Kabeltrasse unbeeinflussten Bodens gezeigt. Im Anschluss folgen die Ergebnisse für den Kabelraum.

Der Temperaturhaushalt beider Standorte zeigt aufgrund des unterschiedlichen Energiehaushalts deutliche Unterschiede in der Bodentemperatur. In Abb. 3.2-1 und Abb. 3.2-2 sind die Verläufe der Bodentemperatur in verschiedenen Tiefen grafisch dargestellt. Die Standorte unterscheiden sich während des Winters nur geringfügig, im Sommer aber sind die Bodentemperaturen am Standort Strasse um bis zu 10K höher als im Wald. Hierfür sind Unterschiede im Strahlungs- und Energiehaushalt verantwortlich. Im Wald wird ein Grossteil der einfallenden Strahlung von der Vegetation durch Verdunstung in latente Wärme umgesetzt und der Bodenwärmestrom ist gering. Auf der Strasse ist aufgrund der fehlenden Verdunstung und des hohen Absorptionsgrades der Asphaltoberfläche der Bodenwärmestrom groß.

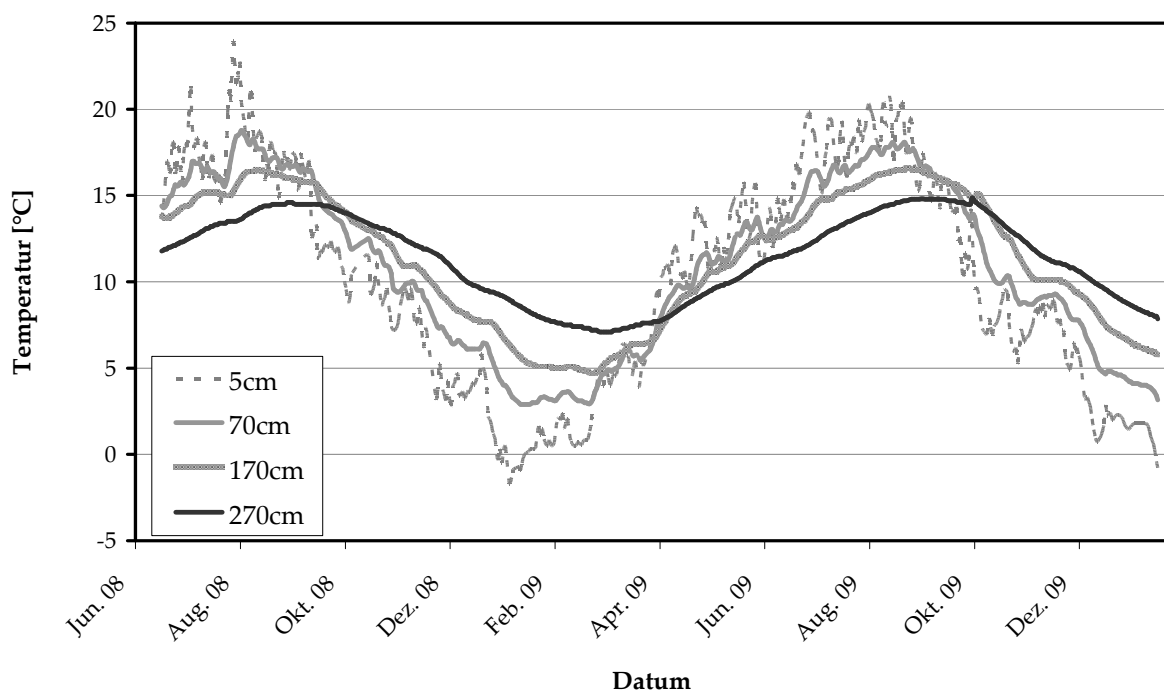


Abb. 3.2-1: Zeitlicher Verlauf der Bodentemperaturen in verschiedenen Tiefen am Standort Wald im Untersuchungszeitraum 2008/09

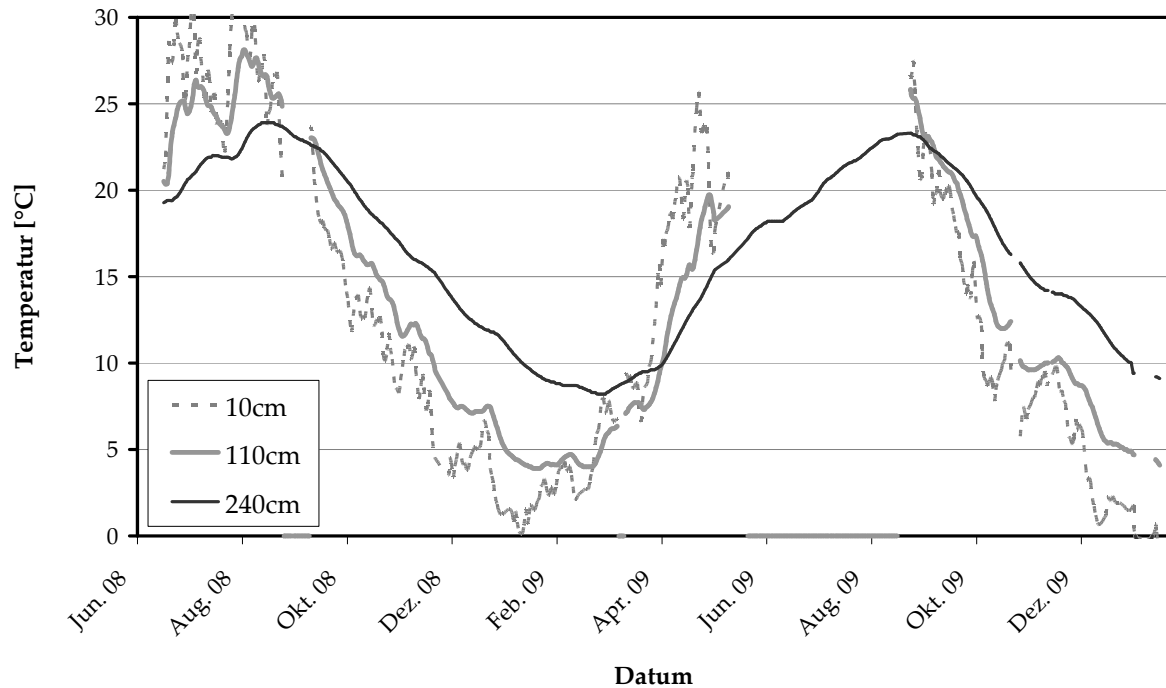


Abb. 3.2-2: Zeitlicher Verlauf der Bodentemperaturen in verschiedenen Tiefen am Standort Strasse im Untersuchungszeitraum 2008/09

Auch hinsichtlich der Wasserhaushaltskomponenten bzw. des Bodenwassergehaltes gibt es zwischen den Standorten deutliche Unterschiede. Eine grundsätzliche Betrachtung der Standortunterschiede erfolgt durch das TUB-BGR Verfahren (Wessolek et al. 2008) in Tab. 3.2-1. Für das Untersuchungsjahr 2009 wird mit dem Verfahren für beide Standorte eine etwa gleichgroße Versickerung vorhergesagt. Im langjährigen Mittel beträgt die Versickerung des Waldes nur die Hälfte der Strasse. Wie die Bilanzierung weiterhin zeigt, wird im Wald der überwiegende Teil der Niederschläge verdunstet, während auf der stark versiegelten Strasse die Niederschläge den Oberflächenabfluss bilden.

Tab. 3.2-1: Bilanzierung der Wasserhaushaltskomponenten beider Standorte (Berechnung nach Wessolek et al. 2008)

Jahr	Nd	Nd _{som}	ET _{pot}	Standort	ET _{real}	VS	Ro
2009	513	205	770	Wald	397	116	0
				Strasse	3	115	395
langjähr.	540	310	640	Wald	492	48	0
Mittel				Strasse	6	114	420

mit: Nd – Jahresniederschlag; Nd_{som} – Niederschlag im Sommerhalbjahr; ET_{pot} – potenzielle Verdunstung nach Haude; ET_{real} – reale Verdunstung; VS – Versickerung; Ro – Oberflächenabfluss [alle Werte in mm/a]

Die beim Standortmonitoring gemessenen Wassergehalte im Oberboden ergeben ein zeitlich und räumlich aufgelöstes Bild der Dynamik des Wasserhaushalts. Am Standort Wald variieren die Wassergehalte des Bodens erwartungsgemäß in Abhängigkeit von Jahreszeit und Niederschlag (Abb. 3.2-3). Es ist gut erkennbar, wie der Wassergehalt im Oberboden (30cm Tiefe) aufgrund der Nieder-

schläge stark variiert. Bei den Sensoren in 100cm und 130cm Tiefe zeichnen sich die Niederschläge aufgrund der Wasserspeicherung des Bodens nicht deutlich ab. Hier verzeichnen die Sensoren zwei Perioden: die Austrocknung während des Sommers und die Befeuchtung bzw. Versickerung im Spätherbst und Winter. Am Standort Strasse wurde im Boden in 130cm Tiefe ganzjährig Wassergehalte von 12 – 15 Vol% gemessen (vgl. Tab. 3.2 3). Dieser konstante Wert in Höhe der Feldkapazität des Bodens weist auf die fehlende Verdunstung, aber auch auf eine kontinuierlich stattfindende Versickerung hin.

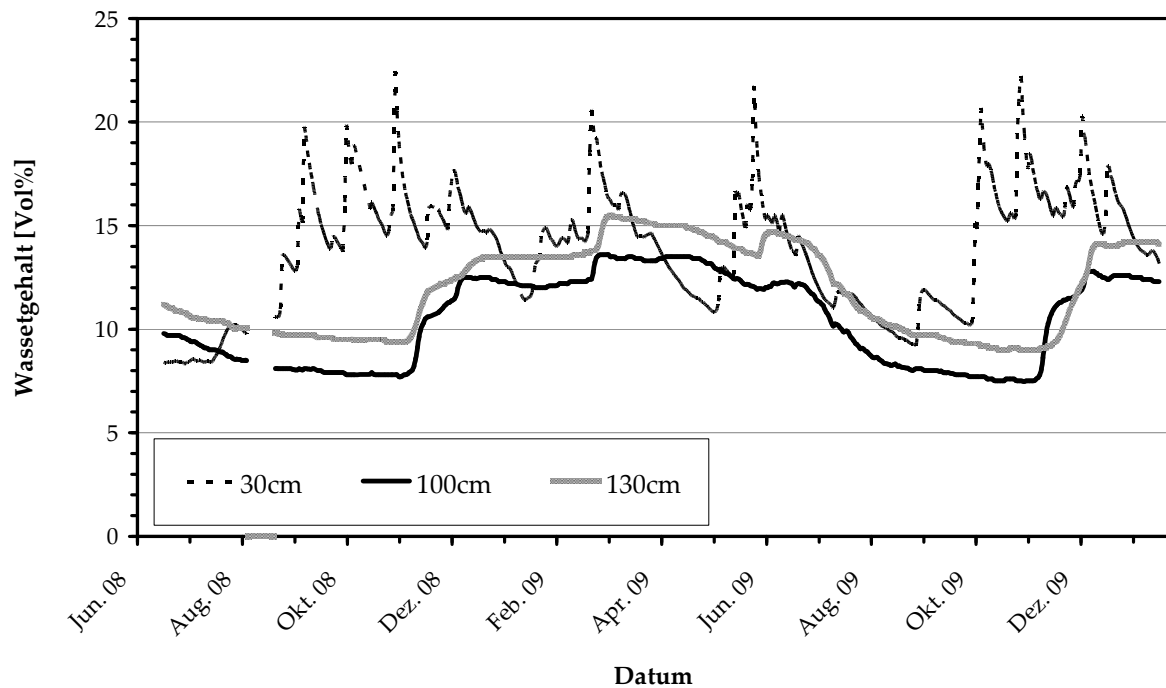


Abb. 3.2-3: Zeitlicher Verlauf des Bodenwassergehaltes in verschiedenen Tiefen am Standort Wald im Untersuchungszeitraum 2008/09

Tab. 3.2-2: Jahres- und Monatsmittelwerte der Bodentemperaturen der Standorte Strasse und Wald im Untersuchungszeitraum 2008/09

		2008								2009											2010	
	Tiefe	Mittel*	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	Jan	Feb	Mrz	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	Jan
Wald	5cm	9,6	16,6	18,1	18,0	13,9	9,6	7,3	3,5	0,1	1,4	5,0	10,4	13,0	14,1	17,9	19,1	15,4	9,5	7,5	3,4	1.5
	70cm	10,2	15,2	16,6	17,5	15,2	11,8	9,0	6,3	3,5	3,3	5,4	8,7	12,0	13,4	16,2	17,6	16,0	12,5	9,0	6,3	4.1
	170cm	10,6	14,0	15,1	16,3	15,3	13,0	10,5	8,2	5,9	4,9	6,0	8,0	11,1	12,7	14,8	16,2	15,9	14,5	10,5	8,5	6.4
	270 cm	10,8	12,1	13,1	14,3	14,4	13,4	12,1	10,3	8,6	7,4	7,3	8,1	9,9	11,4	12,9	14,3	14,7	14,2	11,8	10,1	8.5
Strasse	10cm	12,2	26,8	27,3	27,1	18,0	12,9	8,7	4,5	1,3	3,3	8,2	18,9	20,2	nb	nb	26,6	20,8	11,2	8,3	3,4	1.2
	110cm	13,0	23,3	25,0	26,7	20,7	16,3	11,4	7,4	4,6	4,2	6,9	13,3	19,1	nb	nb	25,8	22,3	14,6	9,9	7,2	4.8
	240cm	15,6	19,7	21,7	23,6	22,2	19,5	16,0	12,8	10,4	8,6	8,9	11,5	15,7	18,6	20,2	22,6	22,2	18,4	14,5	12,4	10.0
	Lufttemp**.	8,0	19,0	20,4	19,5	12,4	9,9	5,7	2,9	-2,4	1,3	6,4	14,8	nb	nb	nb	20,6	16,0	8,3	8,2	0,3	-6,0

* Mittelwert des Zeitraums September 08 – August 09; ** an der Messstelle Strasse in 2m Höhe gemessene Temperatur; nb – keine Messwerte

Tab. 3.2-3: Jahres- und Monatsmittelwert des Bodenwassergehaltes [Vol%] der Standorte Wald und Strasse im Untersuchungszeitraum 2008/09

		2008								2009											2010	
	Tiefe	Mittel*	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	Jan	Feb	Mrz	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	Jan
Wald	30cm	14,3	8,4	9,0	11,7	15,2	16,3	15,8	15,8	13,1	15,5	15,5	12,9	13,7	15,3	11,8	10,2	10,9	14,7	17,2	16,8	14,4
	100cm	11,0	9,7	9,0	8,2	8,0	7,8	9,2	12,0	12,1	12,4	13,4	13,4	12,6	12,1	10,6	8,5	7,9	7,7	8,9	12,3	12,5
	110cm	12,6	10,9	10,4	9,8	9,6	9,5	10,6	12,8	13,5	13,6	15,3	15,0	14,1	14,4	12,7	10,4	9,5	9,2	9,2	13,0	14,2
Strasse	140cm	13,9	11,3	12,1	12,4	13,4	13,5	14,2	14,2	13,8	13,8	14,7	14,1	nb	nb	nb	13,2	13,3	13,9	15,0	14,9	14,7
Nd**	Nd	644	21	43	67	57	140	34	75	53	53	51	3	35	92	51	2	42	72	46	67	31

* Mittelwert des Zeitraums September 08 – August 09; ** an der Messstelle Strasse in 2m Höhe gemessener Niederschlag; nb – keine Messwerte

3.3 Temperatur- und Wasserhaushalt im Kabelraum

Durch die Verlustwärme erwärmen sich Kabelstrang und der umliegende Boden. In Abb. 3.3-1 sind die Tagesmittelwerte der Stromlast und der resultierenden Verlustleistung je Kabelstrang im gesamten Untersuchungszeitraum dargestellt. Im Tagesmittel wird die Stromlast von 250A nicht überschritten, womit auch die Verlustleistung mit maximal 8 W/m (Tagesmittelwert) gering ausfällt.

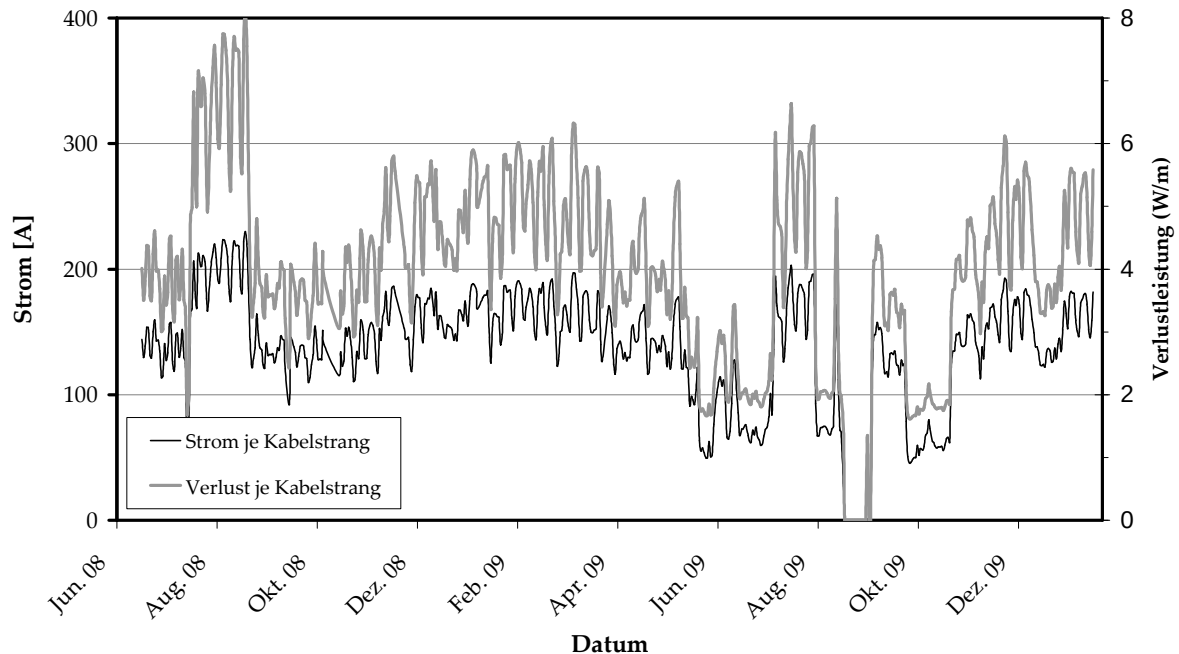


Abb. 3.3-1: Zeitlicher Verlauf der Stromlast und Verlustleistung eines Kabelstrangs (Tagesmittelwerte)

Die gemessene Temperatur der Kabeloberfläche ist vor allem von dem Bodentemperaturverlauf in der jeweiligen Bodentiefe ausschlaggebend (Abb. 3.3-2). Durch die Stromverluste erwärmt sich der Kabelmantel nur geringfügig. Aufgrund der Unterschiede im Temperaturhaushalt der Standorte und der unterschiedlichen Verlegetiefen ist die Kabeltemperatur am Standort Strasse meistens um 5K höher als am Standort Wald.

Die Differenz von Manteltemperatur und der Temperatur des unbeeinflussten Bodens wird als **Kabel-übertemperatur (KÜT)** bezeichnet. Die KÜT ermöglicht eine bessere Einschätzung, welche thermische Belastung für das Kabel besteht. Der zeitliche Verlauf der KÜT ist in Abb. 3.3-3 dargestellt. Es zeigt sich, dass im Winterhalbjahr die KÜT beider Standorte nahezu identisch ist und trotz hoher Stromlast nur eine geringe Erwärmung stattfindet (2-3K). Im Sommer zeigen sich hingegen Unterschiede. Am Waldstandort ist die KÜT im Sommer hoch, am Standort Strasse hingegen meistens niedrig.

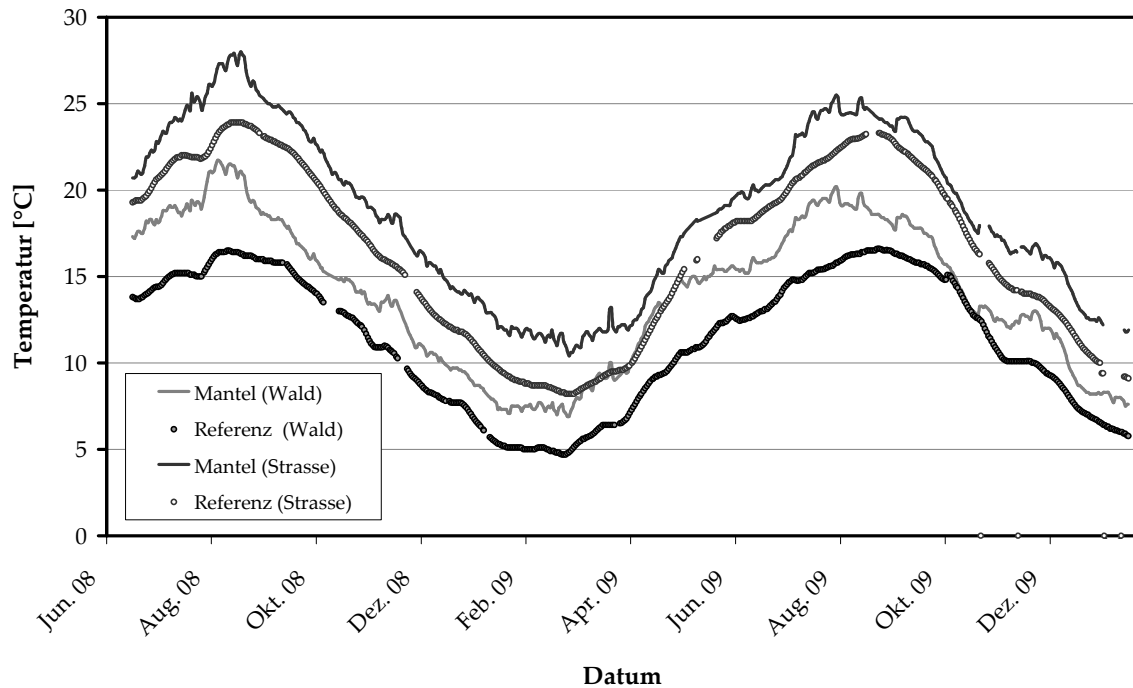


Abb. 3.3-2: Zeitlicher Verlauf der Temperaturen des Kabelmantels und die zugehörige Referenztemperatur an beiden Standorten im Untersuchungszeitraum 2008/09

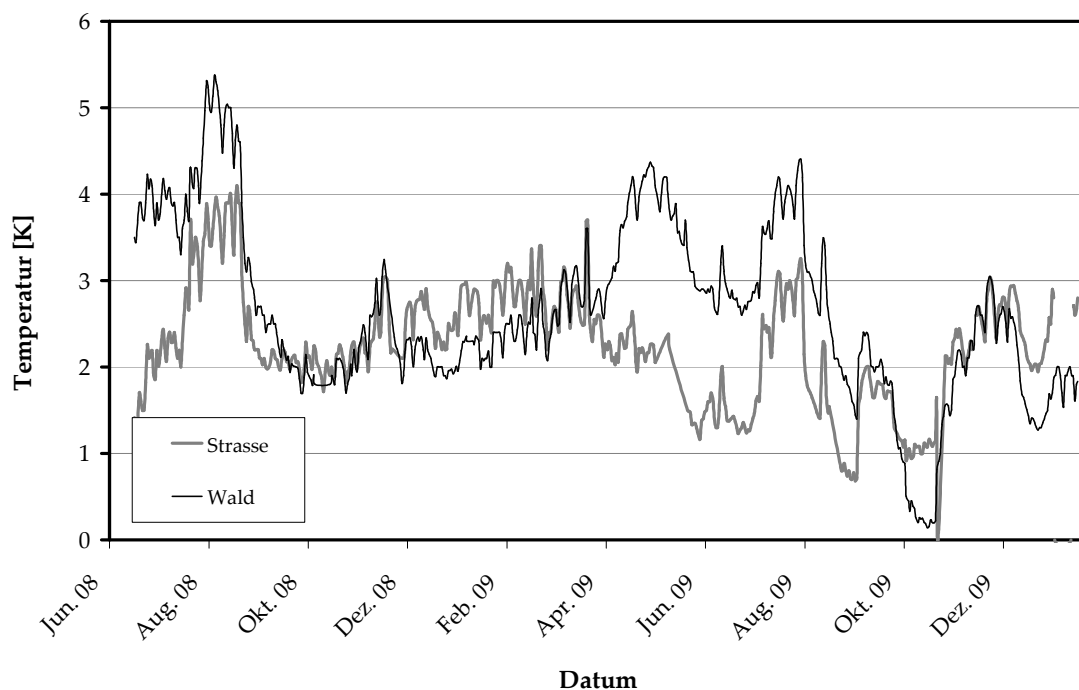


Abb. 3.3-3: Zeitlicher Verlauf der Kabelübertemperatur (KÜT) an den Standorten im Untersuchungszeitraum 2008/09

Der Wassergehalt im Kabelraum war eine wichtige Messgröße des Monitoring, um die aus der Kabelerwärmung resultierende Austrocknung des Kabelraums zu detektieren. Die Ergebnisse der Wasserge-

haltsmessung im Kabelraum des Standorts Wald sind in Abb. 3.3-4 dargestellt. Wie sich zeigt, wird der Wassergehalt im Kabelraum hauptsächlich durch den Wasserhaushalt des darüber liegenden Horizonts beeinflusst. So wie für den Standort beschrieben (siehe Kap. 3.1), ist der Boden in dieser Tiefe im Winter gut durchfeuchtet und trocknet im Frühjahr und Frühsommer aus. Anders aber, als bei den Sensoren in 100cm und 130cm Tiefe sinkt der Wassergehalt im Kabelraum (160cm Tiefe) im Spätsommer auf einen Wert in Höhe des permanenten Welkepunktes des Bodens (vgl. Tab. 3.1-2). Auf diesem Niveau bleiben die Wassergehalte bis in den Herbst, dann findet eine Befeuchtung durch Versickerung statt.

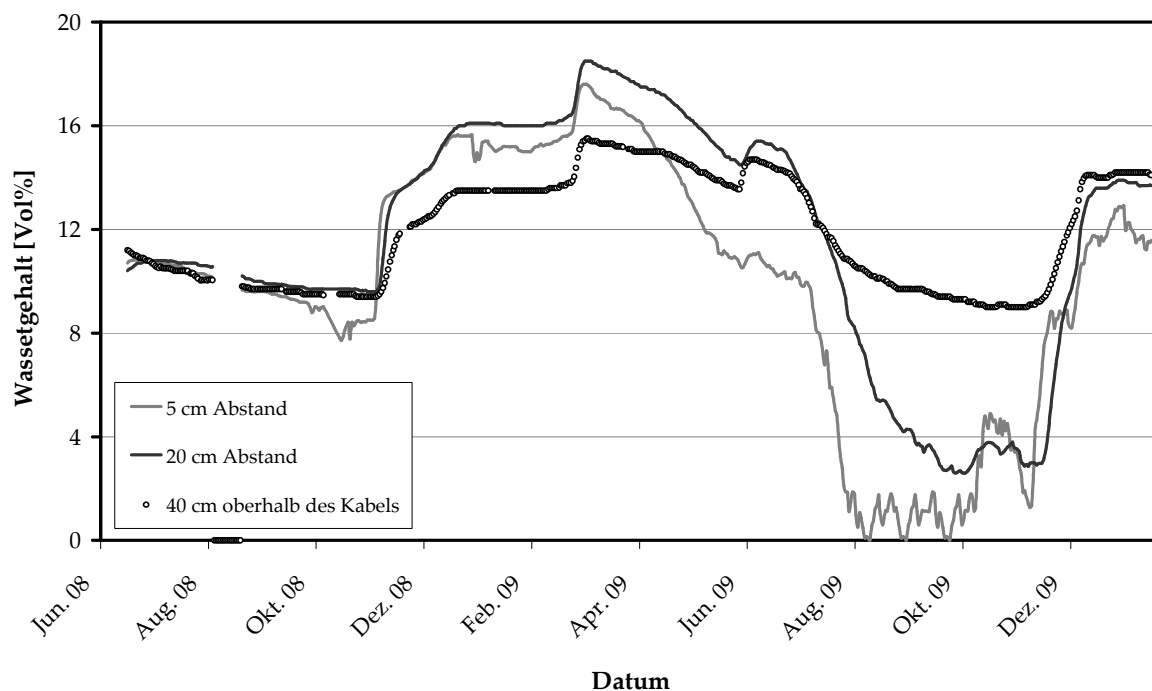


Abb. 3.3-4: Zeitlicher Verlauf des Wassergehaltes von Sensoren im Kabelraum am Standort Wald

Dieses Verhalten kann plausibel auf den Vegetationseinfluss zurückgeführt werden: Beim Aufbau der Messstelle zeigte sich, dass Baumwurzeln in den Zwischenräumen der Kabelstränge verlaufen. Die Bäume nutzen offensichtlich den Kabelstrang zur Durchwurzelung des Bodens und entnehmen Wasser aus dem Kabelraum. Da bei der Sondeninstallation die Wurzeln zerstört wurden, stellte sich im Sommer 2008 dieser Effekt nicht ein. Erst im Folgejahr 2009 fand im niederschlagsarmen und verdunstungsstarken August 2009 ein Wasserentzug aus der Kabelumgebung statt. Da im Monat September ebenfalls nur geringe Niederschlagsmengen fielen, setzte eine Befeuchtung erst Ende Oktober ein. Der Anstieg des Wassergehaltes auf das Winterniveau bestätigt auch, dass dieses Verhalten nicht auf einen Ausfall der Sonden zurückzuführen ist. Der Wassergehaltssensor in 130cm Tiefe weist dieses Verhalten nicht auf, denn dieser Bereich des Bodens ist aufgrund seiner Verdichtung nicht durchwurzelt. Der Boden in der unmittelbaren Kabelumgebung trocknet dauerhaft und umfassend aus, wie weit diese Austrocknungszone reicht, konnte nicht festgestellt werden. Das Wurzeln gezielt entlang von Rohren wachsen, um Wasser aus größeren Tiefen zu nutzen, berichten Renger et al. (2008) für eine Dauerbeobachtungsfläche in Berlin Grunewald.

Tab. 3.3-1: Monatsmittelwerte der Kabel- und die Referenztemperatur sowie der Kabelübertemperatur an den Standorte sowie die Strombelastung der Trasse im Untersuchungszeitraum 2008/09

Wert		2008							2009											2010	
		Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	Jan	Feb	Mrz	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	Jan
Wald	Mantel	17,5	18,7	20,2	17,3	14,6	12,5	10,0	7,7	7,0	8,4	10,9	14,5	15,3	17,8	18,8	17,6	15,0	12,2	10,3	7,7
	Ref	14,0	15,1	16,3	15,3	13,0	10,5	8,2	5,9	4,9	6,0	8,0	11,1	12,7	14,8	16,2	15,9	14,5	10,5	8,5	6,4
	KÜT	3,5	3,6	3,9	2,0	1,6	2,0	1,8	1,8	2,1	2,4	2,9	3,5	2,6	3,0	2,7	1,6	0,5	1,7	1,7	1,3
Strasse	Mantel	21,3	24,0	26,6	24,0	21,2	17,9	14,9	12,6	11,0	11,1	13,3	17,3	19,7	21,8	24,4	23,4	19,2	16,2	14,4	11,8
	Ref	19,7	21,7	23,6	22,2	19,5	16,0	12,8	10,4	8,6	8,9	11,5	15,7	18,6	20,2	22,6	22,2	18,4	14,5	12,4	10,0
	KÜT	1,5	2,4	3,1	1,8	1,7	1,9	2,1	2,2	2,4	2,2	1,9	1,6	1,2	1,6	1,8	1,2	0,7	1,7	2,0	1,9
Strom (A)		143	162	184	131	133	150	162	169	171	162	143	119	82	136	82	88	66	150	155	160

Mantel – Temperatur des Kabelmantels (Manteltemperatur) [°C]; Ref – Temperatur des unbeeinflussten Bodens in der jeweiligen Verlegetiefe (Referenztemperatur) [°C]; KÜT – Differenz von Mantel- und Refernztemperatur (Kabelübertemperatur) [K]; ; Strom – Stromlast des Kabelstrangs

3.4 Standorteinfluss auf den Betrieb einer Kabeltrasse

In Kapitel 3.2 wurde beschrieben, welcher Wasser- und Temperaturhaushalt an beiden Monitoringstandorten vorliegt und wie sich die Standorte voneinander unterscheiden. Es wurde festgestellt, dass der Betrieb des Energiekabels nur geringe Auswirkungen auf den Wasser- und Wärmehaushalt des Bodens hat. Aus den gemessenen Manteltemperaturen und der bekannten Stromlast kann mit dem Wärmewiderstandsmodell (vgl. Kap. 2.2) die Leitertemperatur als eigentliche Zielgröße der Untersuchung berechnet werden. Die Berechnung der Leitertemperatur erfolgte mit den Tagesmittelwerten der Stromlast und der Manteltemperatur. Der berechnete Verlauf ist für den Standort Wald in Abb. 3.4-1 dargestellt. Das Maximum der Leitertemperatur am Standort Wald beträgt 28°C, für den Standort Strasse 33°C. Damit liegen die maximalen Leitertemperaturen beider Standorte deutlich unter der Leitertemperaturgrenztemperatur von 90°C. Für die Bewertung der Übertragungsfähigkeit wird an der untersuchten Trasse somit nur ein unkritischer Bereich betrachtet.

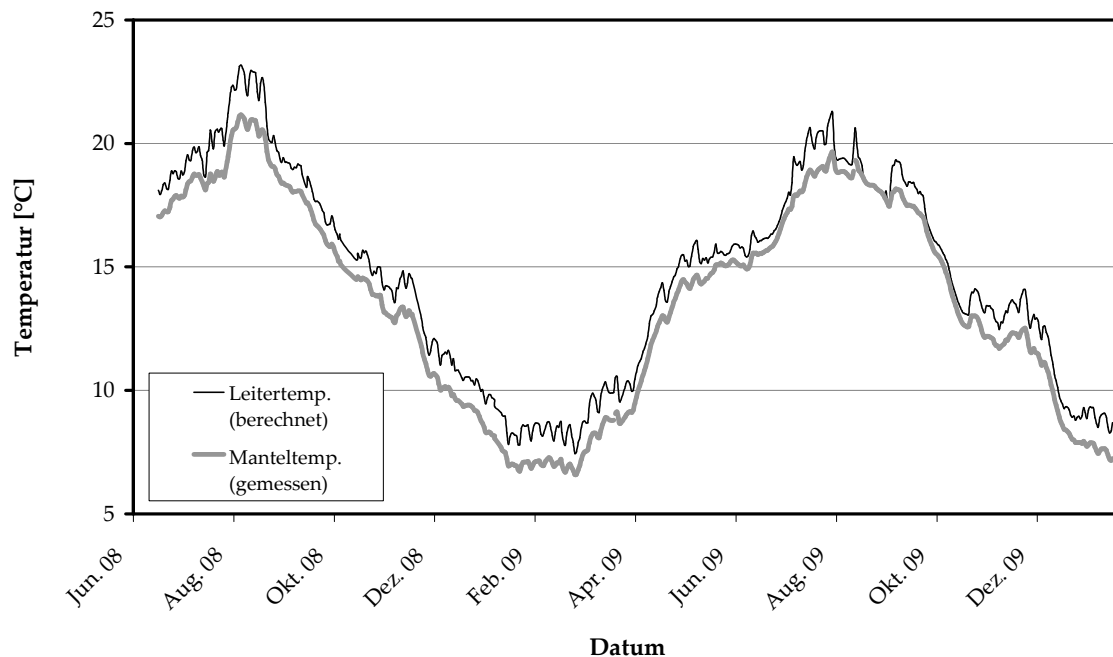


Abb. 3.4-1: Zeitlicher Verlauf der mit dem Wärmewiderstandsmodell errechneten Leitertemperatur am Standort Wald und gemessene Temperatur des Kabelmantels

Die Quantifizierung der Übertragungsreserven ist insbesondere auf eine Bewertung des Wärmetransportes in der Kabelumgebung angewiesen. Unter den auftretenden Stromlasten zeichnen sich diese Prozesse nicht deutlich ab. Im Folgenden werden die Messergebnisse genutzt, um qualitative Aussagen für die Transportprozesse im Kabelraum und die thermische Kabelbelastung zu treffen.

Dazu wird noch einmal die Temperatur des Kabelmantels betrachtet. Wird die Temperatur nicht in Form eines Mittelwertes von allen Sensoren dargestellt, sondern die Abweichung einzelner Sensoren vom Mittelwert betrachtet, so zeigt sich ein ausgeprägter Jahresgang (Abb. 3.4-2). An beiden Standorten beträgt dieser Unterschied zwischen den Sensoren bis zu 0,8K.

Wie die Grafik zeigt, erwärmt sich das untere Kabel im Winterhalbjahr stärker als im Sommerhalbjahr: Das obere Kabel verhält sich umgekehrt, allerdings sind hier die Abweichung nicht so groß. Aus diesem Verhalten kann geschlossen werden, dass im Winter die Wärme vor allem in Richtung Bodenoberfläche abfließt. Im Sommer findet der Wärmetransport in alle Richtungen statt

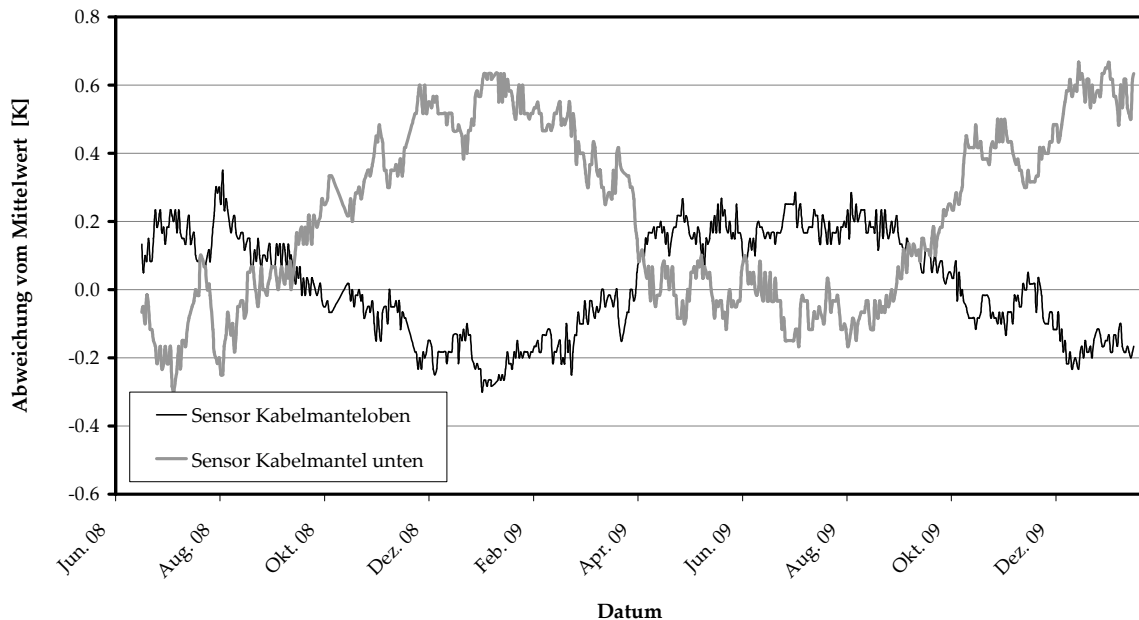


Abb. 3.4-2: Zeitlicher Verlauf der Abweichung der Temperatur von zwei Sensoren vom Mittelwert am Kabelmantel (Standort Wald)

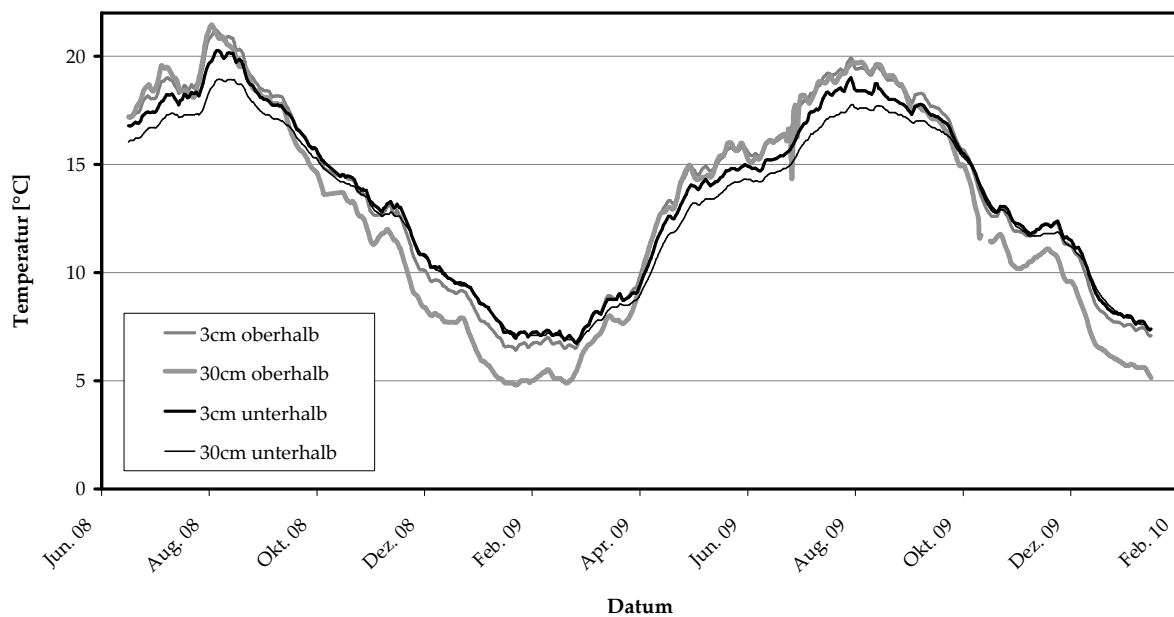


Abb. 3.4-3: Zeitlicher Verlauf der Temperaturen der Sensoren ober- und unterhalb des Kabels (Standort Wald)

Die Temperatursensoren im Umfeld der Kabelstränge zeigen anhand des Temperaturgradienten ebenfalls die Orientierung des Wärmeflusses an. Im Sommerhalbjahr ist der Temperaturgradient deutlich nach unten und im Winter nach oben gerichtet. Das stellt am Beispiel der Messstelle Wald die Abb. 3.4-2 dar. Legt man eine einheitliche Wärmeleitfähigkeit des Substrates zugrunde, bedeutet dies, dass der Energietransport im Winter stärker nach oben und im Sommer nach unten orientiert ist.

Dabei überlagern sich der ‚natürliche‘ Bodenwärmestrom und der vom Kabel induzierte Wärmestrom. Die Orientierung des Wärmestroms und der Einfluss des Kabels lassen sich anhand des Temperaturfeldes im Bodenprofil verdeutlichen (Abb. 3.4-4).

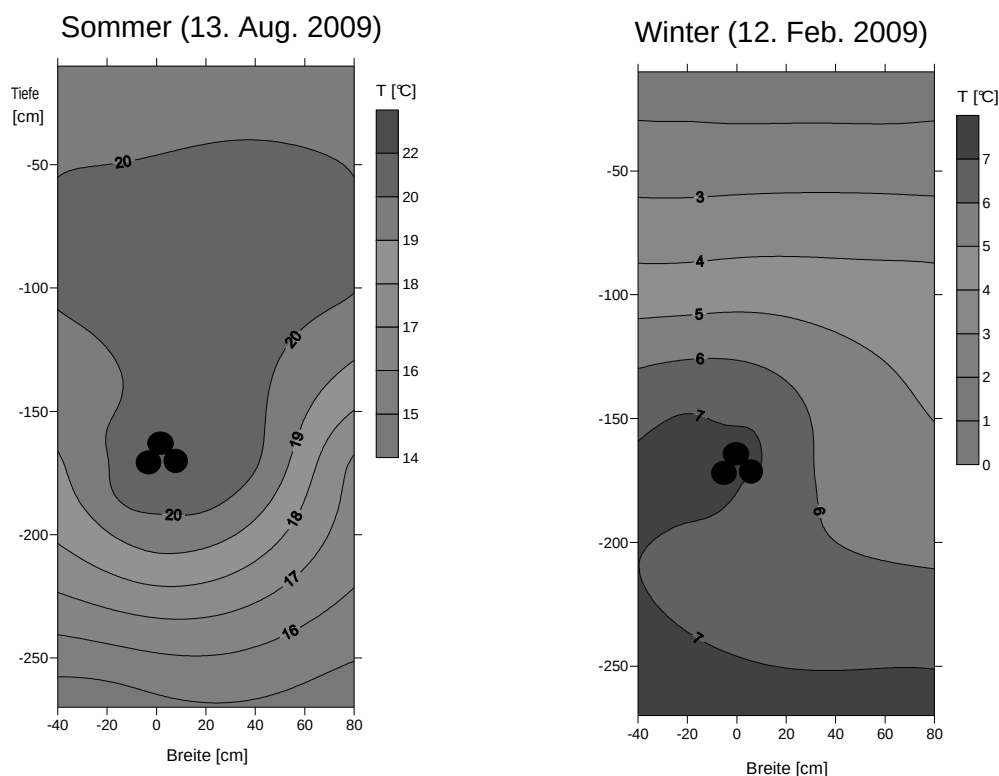


Abb. 3.4-4: Temperaturverteilung im Boden, Standort Wald (rechter Strang)

Der Tagesgang des Stromverbrauchs zeichnet sich als Ganglinie der Manteltemperatur und im umgebenden Boden ab. Dieses Verhalten erlaubt Rückschlüsse auf den Wärmetransport in der Kabelumgebung. In Abb. 3.4-5 sind für eine Wintersituation und in Abb. 3.4-6 für eine Sommersituation die Temperaturverläufe am Standort Wald dargestellt. Die Lastspitzen zeichnen sich in der Manteltemperatur klar ab. Aber schon im Abstand von >10cm zur Kabeloberfläche sind die Stromspitzen in der Wintersituation nicht mehr erkennbar. Im Sommer zeichnen sich diese Spitzen bis in 20cm Abstand ab. Auch hinsichtlich der Peakhöhe und des Temperaturgradienten zeigen sich in der Sommer- und Wintersituation klare Unterschiede. Im Sommer sind die Peaks und Temperaturgradienten größer. Als Ursache ist einerseits der ca. 20% höherer Wärmeverlust des Kabels anzusehen, aber auch schlechtere thermische Bodeneigenschaften sind eine Ursache dafür. Der geringere Wassergehalt im Sommer hat damit Auswirkungen auf die Wärmeabfuhr vom Kabelstrang.

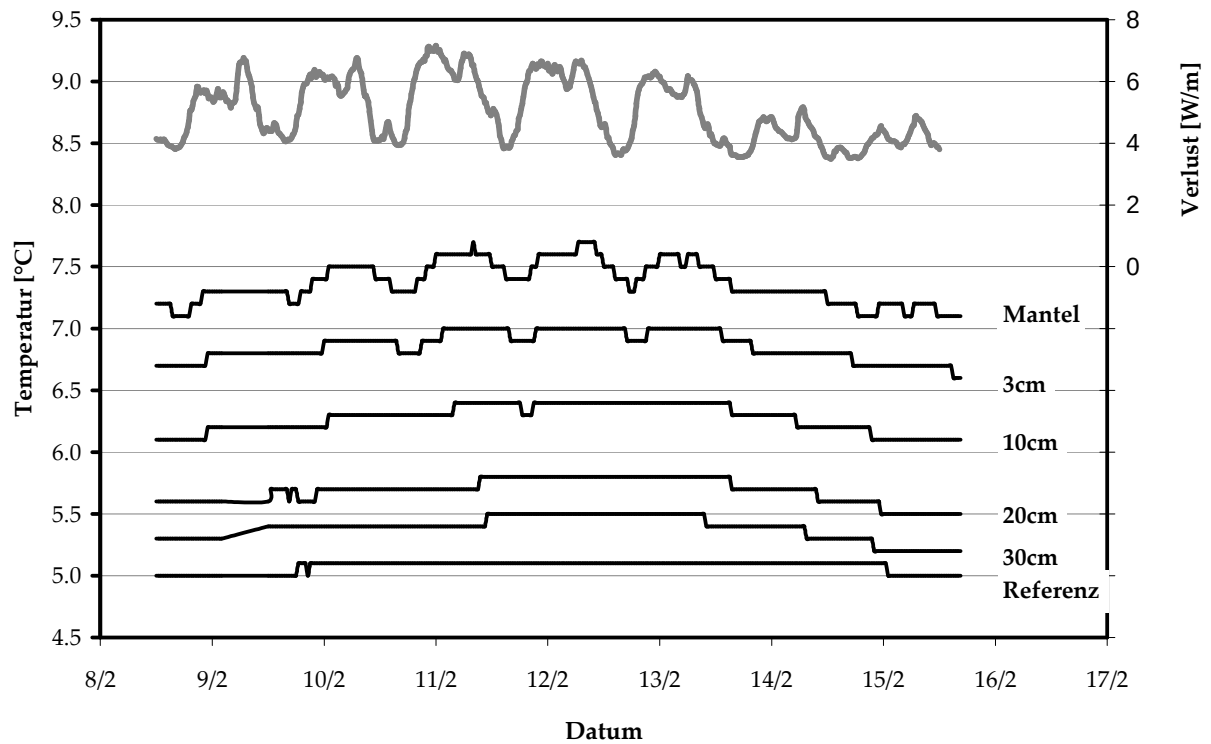


Abb. 3.4-5: Ganglinien der Temperaturen und Stromlast im Winter am Standort Wald

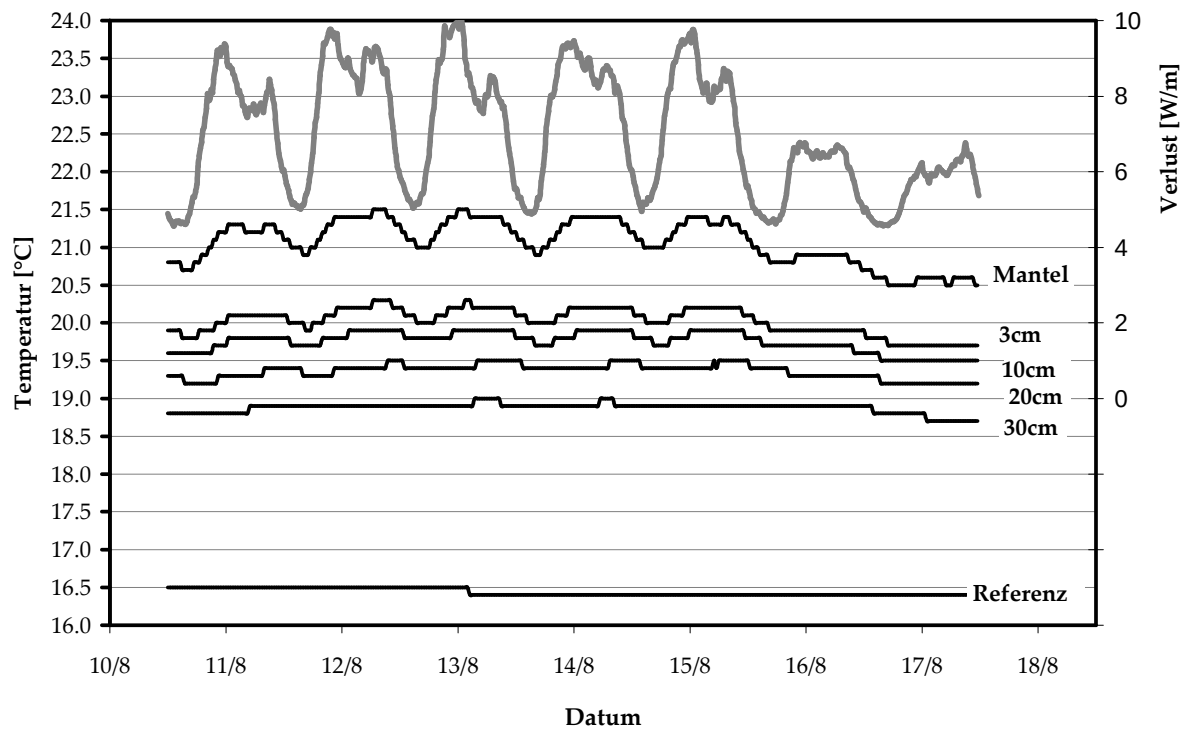


Abb. 3.4-6: Ganglinien der Temperaturen und Stromlast im Sommer am Standort Wald

Die thermischen Eigenschaften des Bodens wurden beim Monitoring zwar nicht gemessen, doch anhand des Wassergehaltes in der Kabelumgebung kann die Veränderungen der Wärmeleitfähigkeit des Bodens berechnet werden. Im Abschnitt 3.3 wird dargelegt, wie im Sommer 2009 der Wassergehalt im Kabelumfeld sehr stark abnimmt und auf diesem niedrigen Niveau bis zum Herbst verbleibt.

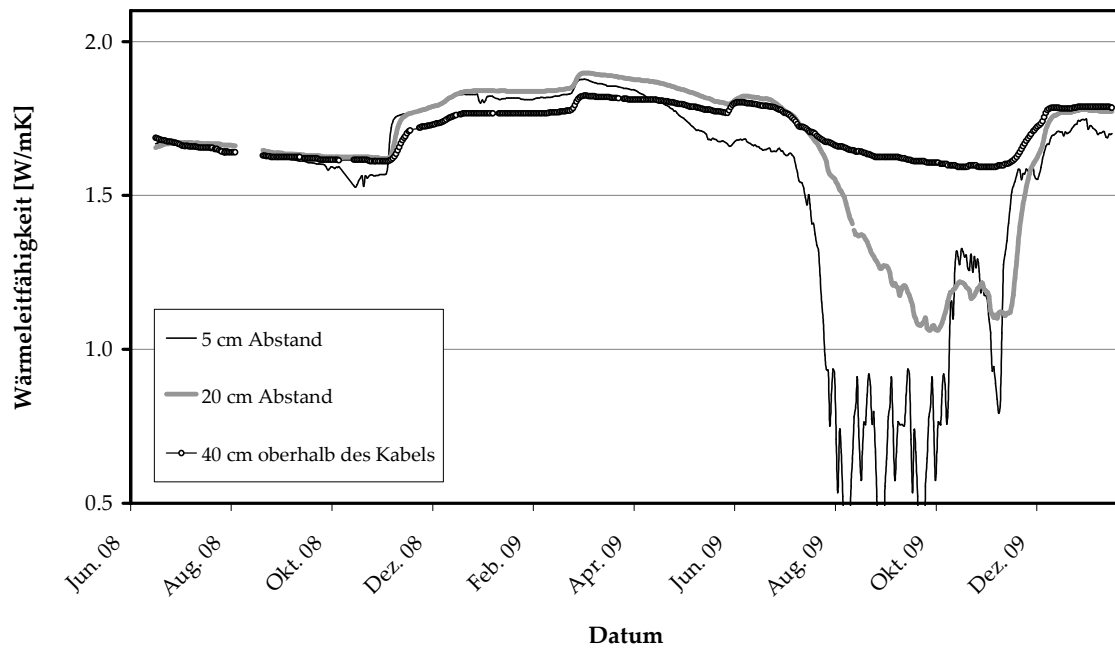


Abb. 3.4-7: Zeitlicher Verlauf der aus dem Bodenwassergehalt berechneten Wärmeleitfähigkeit im Kabelraum (Standort Wald)

Abb. 3.4-7 zeigt den jahreszeitlichen Verlauf der Wärmeleitfähigkeit in der Kabelumgebung, sowie des Bodens in 130cm Tiefe. Die Werte wurden aus den gemessenen Wassergehalten und mit der in Kapitel 3.3 bestimmten Johansen-Funktion für feinsandigen Mittelsand (mSfs) errechnet. Die Wärmeleitfähigkeit sinkt vom Zeitpunkt des Messstellenaufbaus zunächst leicht ab und steigt im Herbst 2008 auf ein Niveau $>1,7$ W/mK. Im Sommer 2009 sinkt die Wärmeleitfähigkeit im Kabelumfeld kontinuierlich ab, und erreicht eine minimale Wärmeleitfähigkeit von ca. 1 W/mK: Der Zeitraum erstreckt sich von Mitte August bis Ende November 2009. Durch die Wiederbefeuchtung erreicht der Boden dann sehr schnell wieder eine Wärmeleitfähigkeit von $>1,7$ W/mK. Im Spätsommer und Herbst liegt somit eine deutliche Verschlechterung der thermischen Leitfähigkeiten in der Kabelumgebung vor. Dies wird aber nicht in der Kabeltemperatur sichtbar, denn bei einer Strombelastung von durchschnittlich 95 A je Kabelstrang ist die Wärmeabfuhr als unproblematisch anzusehen.

4 Thermische und hydraulische Eigenschaften von Substraten

In diesem Teil der Arbeit werden die thermischen und hydraulischen Eigenschaften einer Auswahl unterschiedlicher Böden untersucht. Im Folgenden werden diese Böden als Füllsubstrate bezeichnet, da sie potenziell für die Rückverfüllung eines Kabelgrabens geeignet sind und einige Merkmale für natürliche Böden, wie z.B. ein Bodengefüge nicht ausgebildet sind. Es wurde eine möglichst große Bandbreite von Bodentexturen für die Untersuchung ausgewählt und sich nicht auf ein übliches Rückfüllsubstrat (Bausande) beschränkt. Dadurch soll eine große Bandbreite von hydraulischen und thermischen Eigenschaften abgebildet werden. Als Substrate wurden fünf natürliche Böden ausgewählt und durch die Mischung von Sand mit Löß bzw. Lehm wurden zwei weitere Substrate hergestellt, die das Spektrum der Texturen erweitern. Im Allgemeinen werden die thermischen und hydraulischen Eigenschaften von Bodenmaterial im Kabelraum vor allem von der Bodenart und der Lagerungsdichte bestimmt (siehe Kap.1.1). Bei der Verlegung von Erdkabeln werden diese Eigenschaften maßgeblich über die Wahl des Rückfüllsubstrates und dessen Einbau bestimmt. Die Lagerungsdichte wurde in der Untersuchung nicht variiert.

4.1 Material und Methoden

In Tab. 4.1-1 werden die Bezeichnung, Bodenart und Herkunft der untersuchten Substrate aufgeführt. Die Untersuchungen wurden an gestörtem Probenmaterial durchgeführt. Der Grobboden (> 2mm) wurde abgesiebt und die Probe homogenisiert. Für die Untersuchung der physikalischen Bodeneigenschaften wurden Stechzylinder aus feuchtem Bodenmaterial auf eine vorgegebene Trockenrohdichte (Lagerungsdichte) gepackt.

Tab. 4.1-1: Bezeichnung, Herkunft und Charakteristik der untersuchten Substrate

	Bezeichnung	Bodenart	Herkunft
1	Flugsand	mS	C Horizont, Grunewald, Berlin
2	Urbaner Talsand	mSfs	jC Horizont, Talsand, Berlin
3	Geschiebedecksand	Su2	Al-Horizont, Geschiebedecksand, Ahrendsfelde
4	Lösssand	Su3	Gemisch aus 1 und 4
5	Lehmsand	Sl4	Gemisch aus 1 und 5
6	Löss	Ut3	C Horizont, Bad Gandersheim
7	Lehm	Lu	Deponiedichtschichtmaterial, Karlsruhe

Um die Substrate umfassend zu charakterisieren, wurden im bodenphysikalischen Labor folgende Untersuchungen durchgeführt

- Bestimmung der Partikelgrößenverteilung in Mineralböden nach DIN / ISO 11277
- Bestimmung der Wasserdurchlässigkeit in wassergesättigten Stechzylinderproben nach DIN 19683-9.
- Bestimmung der Wasserretentionscharakteristik (nach DIN / ISO 11274) von im feuchten Zustand gepackten 100cm³ Stechzylinderproben auf keramischen Platten und im Drucktopf (pF-Stufen: 1,5; 1,8, 2,0, 2,5, 3,0, 4,2).
- Bestimmung der hydraulischen Leitfähigkeit mittels eines instationären Verdunstungsverfahrens und Tensiometermessung mit der Hyprop® Apparatur (UMS 2008).
- Bestimmung der thermischen Bodeneigenschaft mit dem Gerät ISOMET 2140 (Applied Precision, 2006).

Die angewendeten Methoden zur Bestimmung der hydraulischen Eigenschaften sind durch Normen bzw. Veröffentlichungen gut dokumentiert, so dass hier auf deren ausführliche Beschreibung verzichtet wird. Die Messung der thermischen Bodeneigenschaften ist hingegen weniger weit verbreitet und nicht standardisiert, deshalb wird die angewendete Methode ausführlich dargelegt.

Messung der Wärmeleitfähigkeit

Das für diese Messung eingesetzte Gerät arbeitet nach dem Prinzip des Heat-Dissipation-Needle Sensors (ASTM, 2000). Der eingesetzte Nadelsensor hat eine Länge von 10cm, einen Durchmesser von 3,0 mm und ist für den Messbereich von 1,0 – 2,0 W/mK ausgelegt. Das Messgerät verfügt über die Möglichkeit die Heizleistung automatisch zu optimieren. Dazu wird die Heizleistung so geregelt, dass sich die Sondennadel unabhängig von der Wärmeleitfähigkeit des Materials, immer um ca. 10 K erwärmt. Diese Erwärmung ist deutlich höher, als sie für die Messung in Böden empfohlen wird (ASTM, 2000). Vorversuche mit unterschiedlichen Heizleistungen bei verschiedenen Wassergehalten zeigten, dass der Einfluss auf das Messergebnis gering ist. Zudem können im Fall eines Energiekabels ähnliche Temperaturdifferenzen auftreten und die gemessene effektive Wärmeleitfähigkeit bewertet somit die Situation eines Kabels realitätsnah.

Um die Abhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit vom Wassergehalt zu bestimmen, wurde ein experimenteller Aufbau in Anlehnung an die Verdunstungsmethode der Hyprop-Apparatur gewählt. In Abb. 4.1-1 ist dieser Aufbau skizziert. Nach Aufsättigung der im PVC-Zylinder gepackten Bodenprobe (5cm hoch) wird der Sensor installiert und auf der Waage platziert. Die Wärmeleitfähigkeit wird nun automatisch im Intervall von 30min gemessen. Durch die Waage wird die Gewichtsabnahme im gleichen Intervall registriert. Ein Ventilator erhöhte die Verdunstungsrate der Probe und verkürzte damit die Dauer des Experiments. Wenn die Probe so stark getrocknet war, dass die stündliche Gewichtsabnahme unter 0,1 g gesunken war, wurde die Messung beendet und die Probe im Trockenschrank vollkommen getrocknet. Anschließend wurde das Trockengewicht bestimmt und an der Probe nochmals die Wärmeleitfähigkeit im absolut trockenen Zustand gemessen. Die Versuchsauswertung erfolgte mit

der Annahme, dass der Wassergehalt in der Probe linear verteilt ist und der mittlere Wassergehalt im Zentrum des Zylinders vorliegt.

Die Zeitreihen für den Wassergehalt und die Wärmeleitfähigkeit werden durch Splinefunktionen interpoliert und daraus die Beziehung zwischen beiden Variablen Wassergehalt und Wärmeleitfähigkeit hergestellt (Abb. 4.1-2).

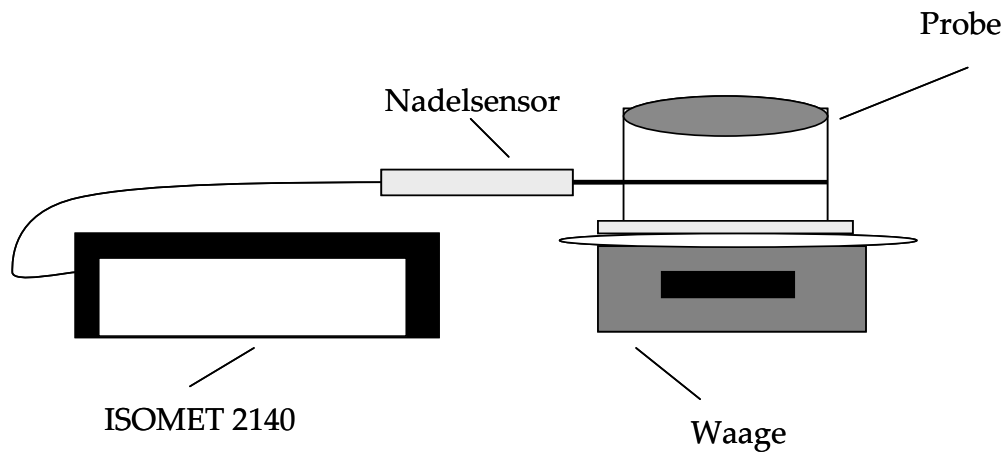


Abb. 4.1-1: Schematischer Aufbau des Experiments zur Bestimmung der thermischen Leitfähigkeit bei unterschiedlichen Wassergehalten

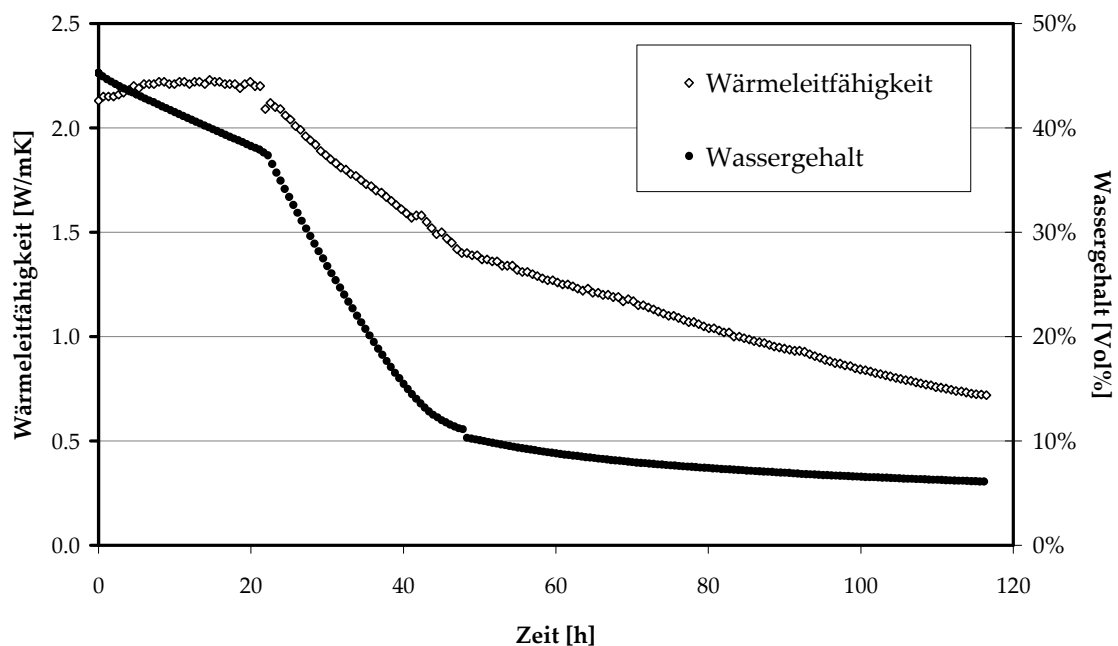


Abb. 4.1-2: Verlauf des Wassergehaltes und der Wärmeleitfähigkeit des Substrates mS während des Experimentes

Parametrisierung der gemessenen Bodeneigenschaften

Die Parametrisierung der Messergebnisse ist ein wichtiger Schritt zur Auswertung. Die so gewonnenen Parameter erlauben einen systematischen Vergleich der untersuchten Materialien und es sind zudem notwendige Eingabedaten für numerische Modelle. Für die Parametrisierung der hydraulischen Bodeneigenschaften fand das Modell von Fayer & Simmons (1996) Anwendung. Die Parameteranpassung wurde mit der Software SHYPPFIT 2.0 (Durner & Peters, 2009) durchgeführt.

Für die Parametrisierung der Wärmeleitfähigkeit wurde das Modell von Johansen (1975) in der Modifikation von Lu et al. (2006) angewendet. Mit Hilfe des Solvers der Excel-Tabellenkalkulation wurden die Parameter an die Messwerte angepasst.

4.2 Physikalische Eigenschaften der Füllsubstrate

4.2.1 Partikelgrößenverteilung

In Tab. 4.2-1 sind die ermittelten Anteile von Sand, Schluff und Ton der Füllsubstrate aufgeführt. Die Ergebnisse sind als kumulative Sieblinie in Abb. 4.2-1 dargestellt. In den Füllsubstraten natürlicher Herkunft sind die Partikelgrößen kontinuierlich verteilt, in den beiden gemischten Substraten (Su3, Sl4) liegt eine zweigipfelige Verteilung, entsprechend der Korngrößen der Ausgangssubstrate im Mittelsand- und im Mittelschluffbereich vor.

Tab. 4.2-1: Partikelgrößenverteilung der Substrate

	Substrat	mS	mSfs	Su2	Su3	Sl4	Ut3	Lu
Fraktion	Sand (2- 0,063mm)	96,6%	91,9%	76,7%	60,3%	55,0%	4,6%	8,9%
	Schluff (0,063- 0,002mm)	1,8%	5,0%	20,6%	34,6%	32,0%	82,6%	64,9%
	Ton (< 0,002mm)	1,5%	3,1%	2,7%	5,1%	13,0%	12,9%	26,2%

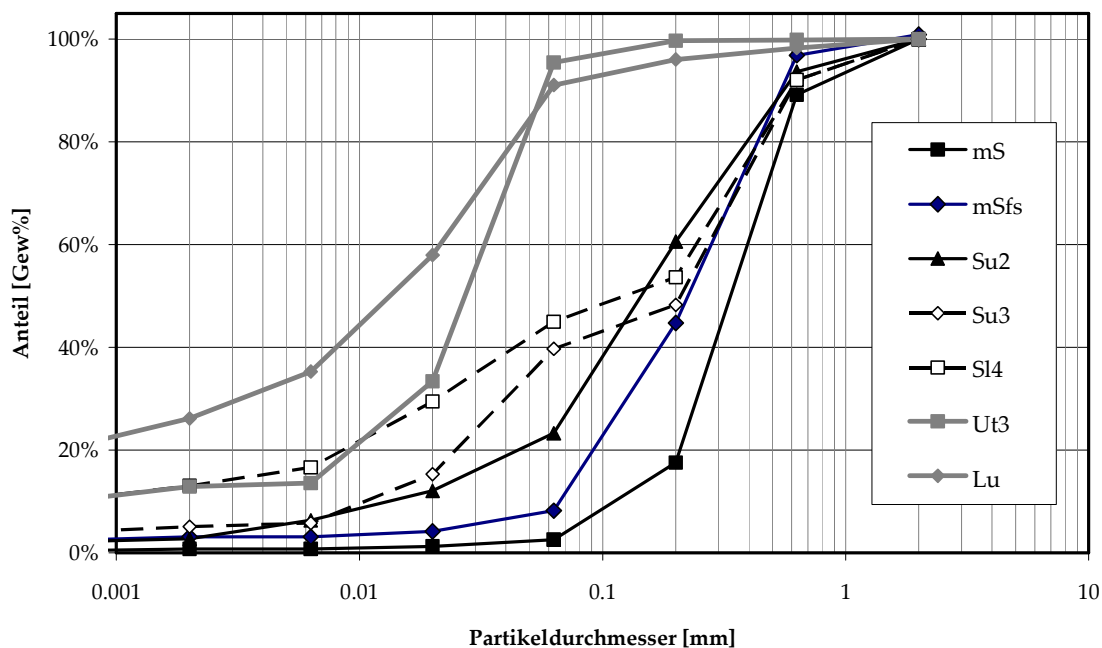


Abb. 4.2-1: Sieblinie der Füllsubstrate

4.2.2 Bodenhydraulische Eigenschaften

Die Ergebnisse der Untersuchung der hydraulischen Substrateigenschaften sind in Tab. 3.2-2 aufgeführt. Die in den pF-Stufen gemessenen Wassergehalte bzw. die Wassergehaltsdifferenzen entsprechen tendenziell den Erwartungen, die auf einer Schätzung anhand der Partikelgrößenverteilung beruhen (Ad-hoc AG Boden, 2005). Lediglich beim lehmigen Sand (Sl4) sind große Unterschiede vorhanden, hier wird im Bereich zwischen pF 1.8 und 4.2 nur sehr wenig Wasser gespeichert. Als Ursache wird hier die künstlich hergestellte Substratmischung angesehen.

Tab. 4.2-2: Wasserretention und Wasserleitfähigkeit der Substrate

Substrat		TRD [g/cm ³]	GPV [Vol%]	Wassergehalt bei pF [Vol.%]				Kf [cm/d]	Ku*
				1.8	2.5	4.2	nFK		
1	mS	1,61	39,2	6,8	2,5	1,1	5,7	822	0,13
2	mSfs	1,57	40,7	12,2	6,1	3,0	9,2	330	0,14
3	Su2	1,70	36,5	19,2	10,1	2,9	16,3	271	0,20
4	Su3	1,70	35,9	26,4	15,1	6,3	20,1	28	1,10
5	Sl4	1,63	38,5	21,7	17,3	15,0	6,7	3,2	1.0E-3
6	Ut3	1,50	43,4	38,7	23,4	9,0	29,7	1,3	nb
7	Lu	1,60	42,1	40,3	31,3	22,1	18,2	1,8	0,57

* ungesättigte Wasserleitfähigkeit bei Feldkapazität (h = 63cm)

Die stationären Experimente wurden durch instationäre Verdunstungsexperimente ergänzt, um die ungesättigte Wasserleitfähigkeit zu bestimmen. Es konnten Leitfähigkeiten im Bereich von $1 - 10^{-4}$ cm/d gemessen werden. In Abb. 4.2-2 sind die Messergebnisse dargestellt, hier ist der Logarithmus der Leitfähigkeit in Abhängigkeit vom Wassergehalt aufgetragen. In dieser Form der Darstellung liegt ein nicht linearer Verlauf vor. Anhand der Steigung sind die unterschiedlichen hydraulischen Eigenschaften der Substrate gut nachvollziehbar. Die Wasserleitfähigkeiten sind essentielle Materialparameter, die für die Simulationssoftware DELPHIN4 benötigt werden.

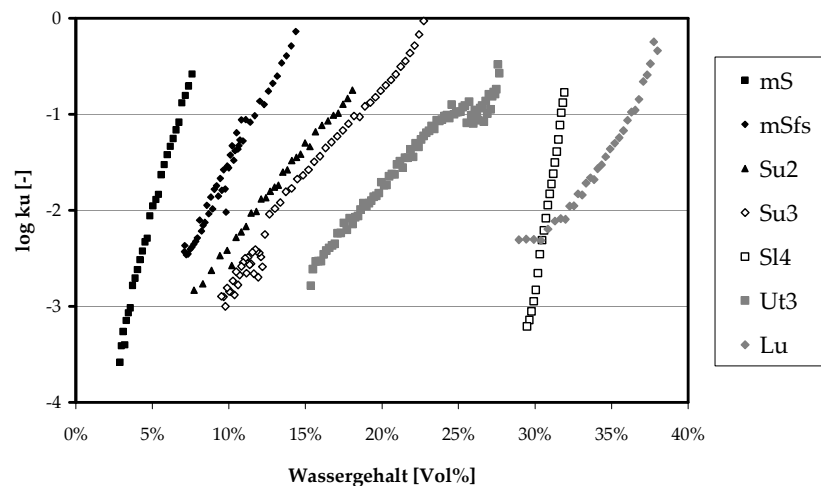


Abb. 4.2-2: Ungesättigte Wasserleitfähigkeit (log ku) der Substrate in Abhängigkeit vom Wassergehalt

Parametrisierung der Wasserretention der Substrate

Mit der Software Shyfit (Durner & Peters, 2009) wurden van Genuchten-Parameter für die hydraulischen Bodeneigenschaften anhand der gemessenen Wasserretentionen und Wasserleitfähigkeiten angepasst. Tab. 4.2-3 listet die Parameter eines Porenraummodells nach Fayer und Simmons (1996) für die instationären Experimente auf (Gleichung siehe Kap.2.1). Das gewählte Modell ermöglicht eine gute Anpassung der Messdaten. Das Modell bildet auch die vollkommene Austrocknung des Bodens physikalisch plausibel ab. Da aber für Matrixpotenziale ab pF 4,2 keine Messwerte vorliegen, ist der aufgetragene Kurvenverlauf eine Extrapolation, die sich nicht auf Messwerte stützen kann.

Tab. 4.2-3: Parameter der Wasserretentionsfunktion der Substrate

Substrat		θ_s	θ_a	α	n	m	RMSE
		[cm ³ /cm ³]		[cm ⁻¹]	[-]		
1	mS	0,395	0,027	0,094	2,1	0,53	7,6E-03
2	mSfs	0,408	0,075	0,032	3,1	0,68	9,4E-03
3	Su2	0,368	0,055	0,058	1,6	0,36	1,4E-02
4	Su3	0,358	0,087	0,042	1,4	0,29	1,2E-02
5	Sl4	0,385	0,286	0,061	4,4	0,77	1,5E-02
6	Ut3	0,429	0,216	0,010	1,9	0,46	1,7E-02
7	Lu	0,431	0,300	0,034	1,2	0,18	1,8E-02

θ_a = Fittingparameter nach Fayer und Simmons (1996)

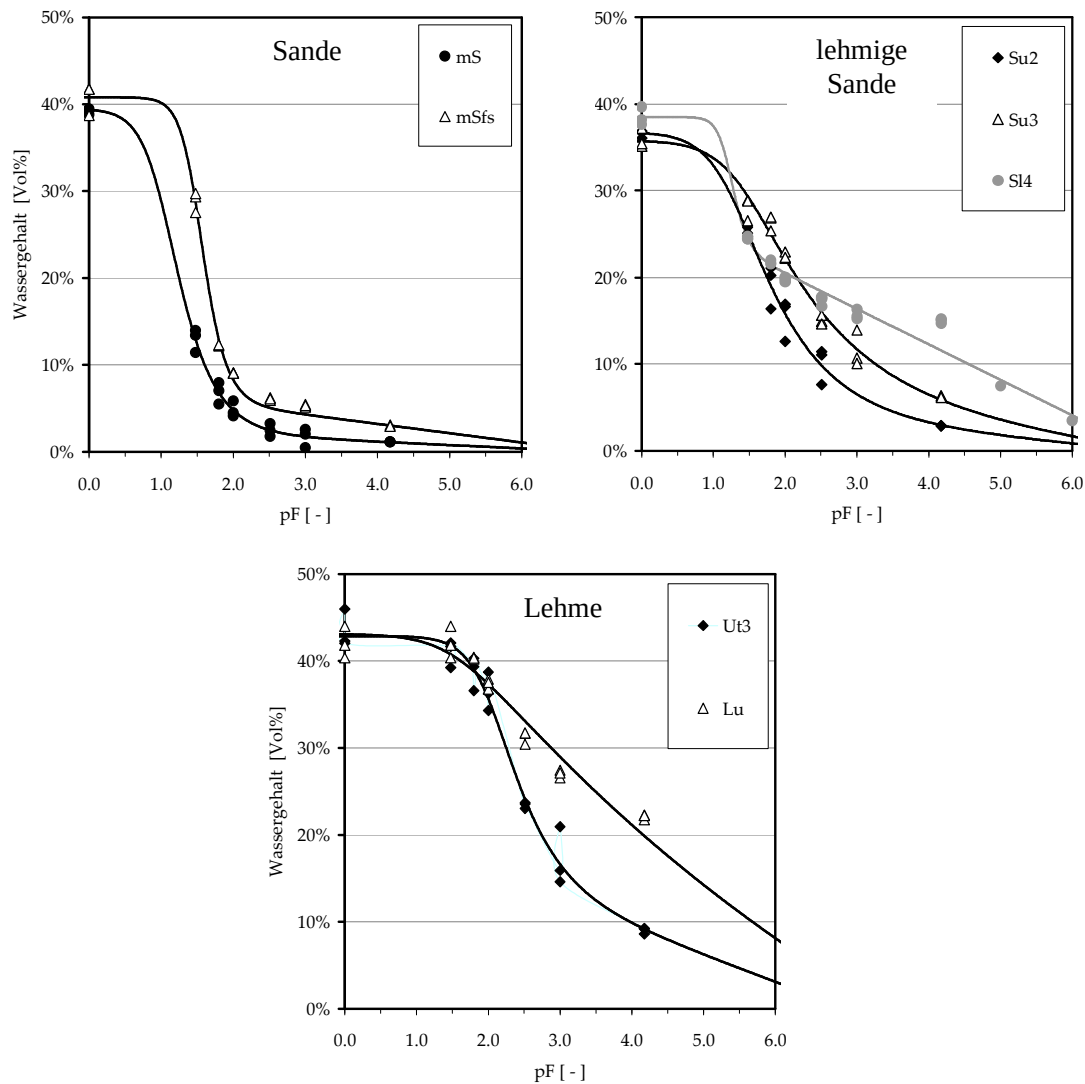


Abb. 4.2-3: Wasserretentionsfunktion der Substrate mit der Anpassung nach Fayer and Simmons (1995)

4.2.3 Thermische Bodeneigenschaften

Durch die Verdunstungsverfahren konnte die Wärmeleitfähigkeit hoch aufgelöst und weitgehend störungsfrei gemessen werden. Die Beziehung von Wassergehalt und Wärmeleitfähigkeit wird dadurch nahezu lückenlos für alle untersuchten Füllsubstrate hergestellt.

In Tab. 4.2-4 wird eine Übersicht zu den gemessenen Wärmeleitfähigkeiten aller Substrate bei verschiedenen Wassergehalten gegeben. Hier zeigen Sande im trockenen Zustand die geringste Wärmeleitfähigkeit und lehmige Sande die höchste. Sobald der Boden feuchter wird, steigt die Wärmeleitfähigkeit an. Ab einem Wassergehalt von 5% haben die sandigen Substrate bereits Werte von > 1 W/mK erreicht. Mit weiter zunehmendem Wassergehalt steigt ihre Wärmeleitfähigkeit kontinuierlich, aber nicht mehr so stark an. Bei einem Wassergehalt von etwa 30% erreichen mS, mSfs, Su2 und Su3

Wärmeleitfähigkeiten von $> 2 \text{ W/mK}$. Bei den Substraten mit einem geringen Sandanteil (Lu und Ut3) ist der Anstieg der Wärmeleitfähigkeit mit zunehmenden Wassergehalten schwächer ausgeprägt.

Tab. 4.2-4: Wärmeleitfähigkeit λ [W/mK] der Substrate bei verschiedenen Wassergehalten

Substrat	TRD	Wassergehalt [Vol.%]					
	[g/cm ³]	0%	2%	5%	10%	20%	30%
1 - mS	1,63	0,29	0,80	1,63	1,85	2,16	2,37
2 - mSfs	1,61	0,36	0,95	1,38	1,58	1,85	2,07
3 - Su2	1,61	0,37	0,44	1,19	1,50	1,90	2,10
4 - Su3	1,63	0,59	1,13	1,52	1,70	1,94	2,15
5 - Sl4	1,60	0,63	0,74	1,04	1,38	1,52	1,70
6 - Ut3	1,49	0,43	0,60	0,86	1,01	1,12	1,24
7 - Lu	1,44	0,46	0,49	0,60	0,82	1,00	1,06

In Abb. 4.2-4 ist die Abhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit vom Wassergehalt für die drei Substrate mS, Su3 und Lu grafisch dargestellt. Hier kann die oben beschriebene Abhängigkeit gut nachvollzogen werden und insbesondere der „Zusammenbruch“ der Wärmeleitfähigkeit mit Erreichen eines kritischen Wassergehaltes (WG_{crit}) fällt auf. Bei den Substraten mS und Su3 befindet sich dieser kritische Wassergehalt bei ca. 5 Vol%, die Wärmeleitfähigkeit sinkt dann um 1,5 bzw. 1 W/mK. Oberhalb des kritischen Wassergehaltes steigt die Wärmeleitfähigkeit um weitere 0,75 W/mK beim mS, bzw. um 0,6 W/mK beim Su3 an.

Für den schluffigen Lehm (Lu) zeichnet sich der kritische Wassergehalt nicht deutlich ab, er beträgt hier ca. 15 Vol%. Der Abfall der Wärmeleitfähigkeit unterhalb dieses Punktes ist beim Lu viel geringer als bei den Sanden und auch der Anstieg oberhalb des kritischen Wassergehaltes ist gering.

Dieses Verhalten kann gut mit den Prozessen des Wärmetransports in der Bodenmatrix und durch den Dampftransport erklärt werden:

Im feuchten Zustand (oberhalb des kritischen Wassergehaltes) bestimmen die Wärmeleitfähigkeit von Matrix und Bodenwasser, sowie der Dampftransport die effektive Wärmeleitung. Der Mittelsand (mS) besteht aus relativ großen Quarzkörnern, d.h. die Wärmeleitfähigkeit in den Partikeln ist groß und gleichzeitig müssen auf einer Transportstrecke nur wenige Übergänge realisiert werden. Beim Su3 müssen auf Grund der feineren Partikel auf einer Transportlänge mehr Übergänge stattfinden, dies erklärt die geringere Wärmeleitfähigkeit. Beim Lehm ist der Quarzanteil viel kleiner, was die deutlich geringere Wärmeleitfähigkeit begründet. Der Prozess des Dampftransportes kann im Kurvenverlauf nicht nachvollzogen werden.

Nach dem Unterschreiten des kritischen Wassergehalts verschwinden die Kontaktpunkte aus Wasser zwischen den Bodenpartikeln, so dass die hohe Wärmeleitfähigkeit der Matrix nicht mehr zum Tragen kommt. Gleichzeitig vermindert sich der Dampftransport, da der kombinierte Transportmechanismus in flüssiger und gasförmiger Phase unterbrochen ist. Beim Su3 bleibt aufgrund der feinen Texturkom-

ponenten ein besserer Kontakt bestehen und der Wärmetransport in der Matrix ist weniger eingeschränkt. Im wasserfreien Boden hat der Su3 deshalb eine doppelt so hohe Wärmeleitfähigkeit wie der reine Sand. Beim Lu ist kein ‚Zusammenbruch‘ unter dem kritischen Wassergehalt zu beobachten. Der Transport zwischen den Partikeln bleibt erhalten, doch hier kommt weiterhin die geringe Leitfähigkeit der Mineralien zum Tragen.

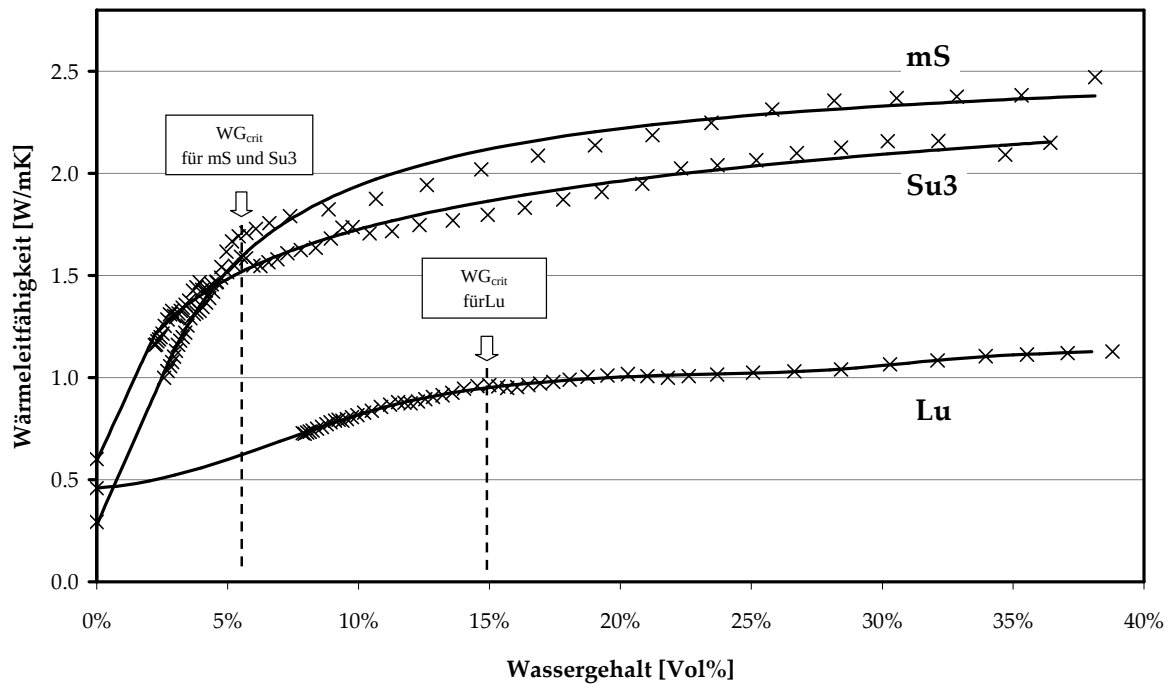


Abb. 4.2-4: Abhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit vom Wassergehalt der Füllsubstrate (Kreuze: Messdaten, Linie: Anpassung der Johansen-Funktion)

Parametrisierung der Wärmeleitfähigkeitsfunktion

Eine Parametrisierung der Wärmeleitfähigkeit-Wassergehalts Beziehung erfolgte für das empirische Modell von Lu et al. (2007), welches ausführlich in Kap.2.1 erläutert wird. Die ermittelten Parameter sind in Tab. 4.2 5 aufgeführt. Die Abweichung der gemessenen und berechneten Werte betrug maximal 8%. In Abb. 4.2-5 ist der Verlauf der Anpassung und die Messwerte für drei Substrate dargestellt. Es fällt auf, dass die Anpassung das Abknicken der Funktion beim kritischen Wassergehalt für mS nicht optimal darstellen kann. Dadurch kommt es beim mS zu einer Überschätzung der Wärmeleitfähigkeit.

Tab. 4.2-5: Parameter der Johansen-Funktion nach Lu et al. (2007) für die Substrate

Substrat	λ_{Dry} [W/mK]	λ_{Sat}	β [-]	b	θ_{Sat} [cm ³ /cm ³]	RMSE
1 - mS	0.28	2.38	0.10	1.00	0.39	2.1E-02
2 - mSfs	0.31	2.18	0.54	0.91	0.38	1.9E-02
3 - Su2	0.37	2.13	0.15	1.08	0.39	1.8E-02
4 - Su3	0.59	2.17	0.56	0.91	0.39	1.5E-02
5 - SI4	0.63	1.77	0.14	1.16	0.39	1.3E-02
6 - Ut3	0.41	1.31	0.28	0.88	0.44	1.1E-02
7 - Lu	0.45	1.15	0.17	1.21	0.46	6.8E-03

Ein Vergleich der an die eigenen Daten angepassten Parameter mit denen, die in der Arbeit von Lu et al. (2007) vorgeschlagen werden, zeigt deutliche Unterschiede zwischen den Verläufen. Vergleicht man den ermittelten Funktionsverlauf mit denen, die nach den Rechenregeln von Johanssen (1975) und Lu et al. (2007) ermittelt werden (Abb. 4.2-5), so wird die Wärmeleitfähigkeit sowohl für das Substrat mS als auch Lu im sehr feuchten Zustand überschätzt. Mit Abnahme des Wassergehaltes fällt die Wärmeleitfähigkeit deutlich stärker, als es die Messungen zeigen. Das 'Zusammenbrechen' der Wärmeleitfähigkeit an einem kritischen Wassergehalt sagen beide Modelle nicht voraus.

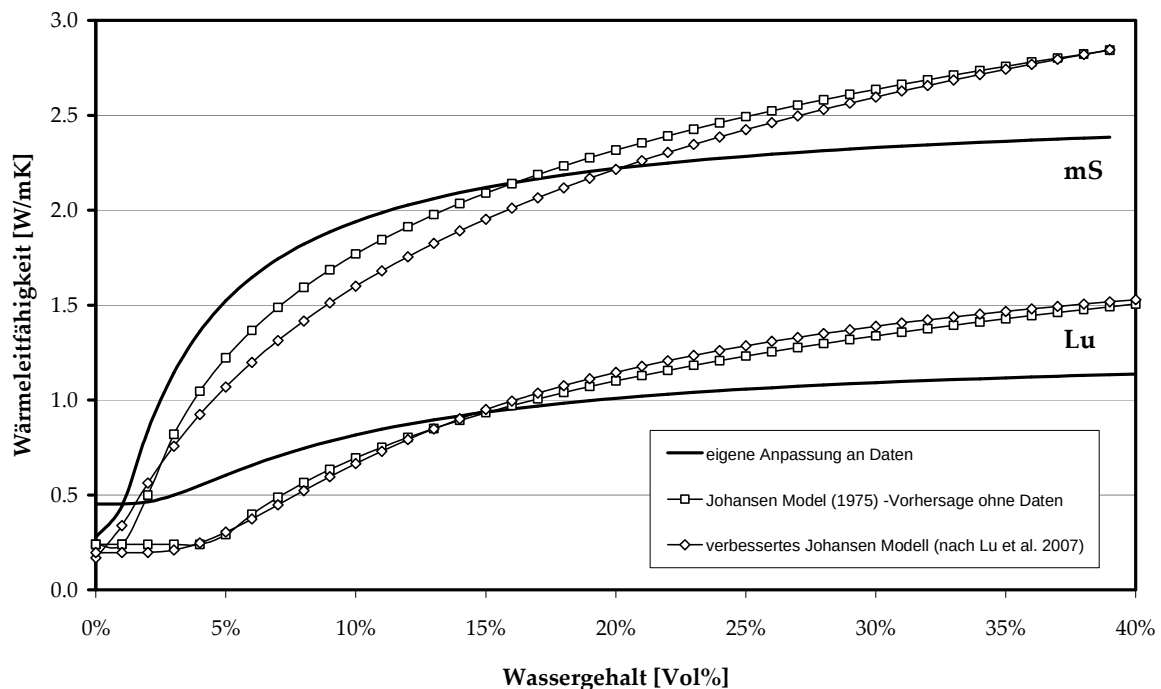


Abb. 4.2-5: Vergleich des an die eigene Daten angepassten Funktionsverlaufs mit Funktionsverläufen aus den Rechenregeln von Johansen (1975) und Lu et al. (2007)

Ein Vergleich der eigenen Messwerte mit denen anderer Autoren in Abb. 4.2-6 zeigt ebenfalls starke Unterschiede bei den Wärmeleitfähigkeiten bei unterschiedlichen Wassergehalten. Das betrifft vor Allem die tendenzielle Abnahme der Wärmeleitfähigkeit bei einer Austrocknung der Substrate.

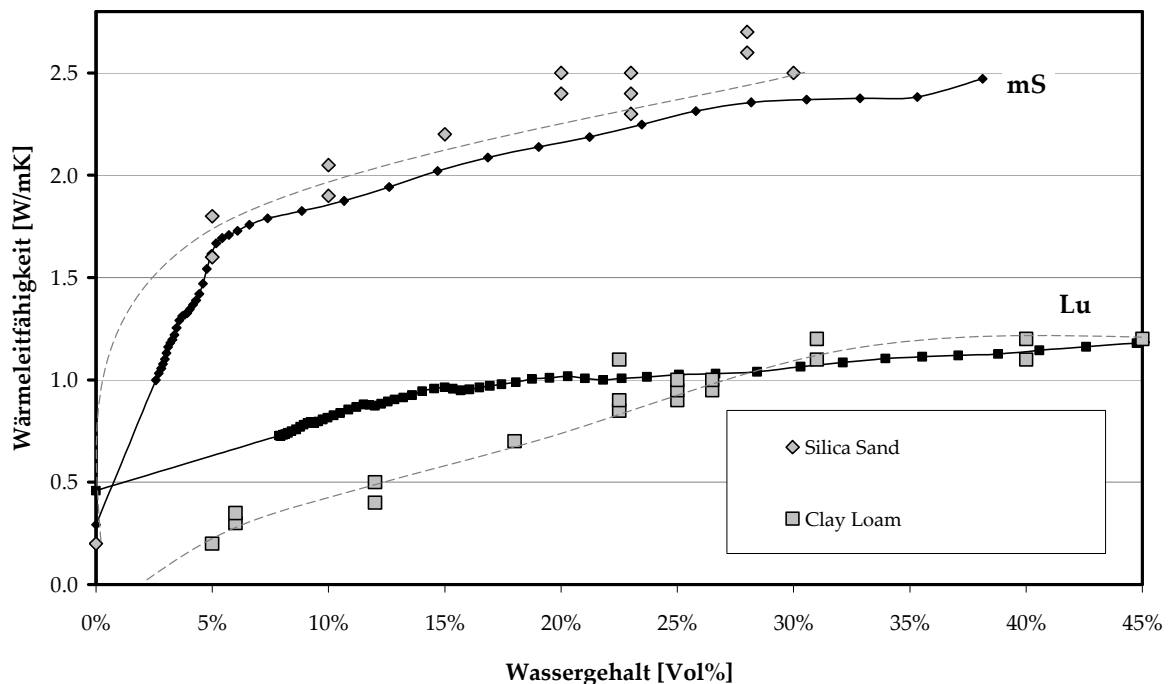


Abb. 4.2-6: Vergleich eigener Messungen mit Ergebnissen von Ren et. al. (1999)

4.3 Kabeltrassenbewertung über Substrateigenschaften

4.3.1 Überblick zu Trassenstandorten in Berlin

Um einen Überblick über die Bodenarten und Standorteigenschaften an Kabelstandorte im Berliner Stadtgebiet zu bekommen, wurden im Rahmen von Bauarbeiten und Aufgrabungen an Schadensfällen in Kooperation mit der Vattenfall Europe Netzservice GmbH, 18 verschiedene Standorte aufgenommen. Dabei wurden die Standorte nach der bodenkundlichen Kartieranleitung angesprochen, teilweise wurden Proben aus dem direkten Kabelumfeld entnommen.

Die Standorte wurden nach der Lage der charakteristischen geologischen Einheiten ausgewählt. Ein Ziel der Aufnahme war es, zu überprüfen, ob die Substrate im Kabelraum über die geologischen Einheiten des Berliner Raumes abzuleiten sind und welche anthropogenen Veränderungen der Bodensubstrate vorliegen.

In Abb. 4.3-1 sind auf einer Karte die geologische Gliederung des Berliner Stadtgebietes dargestellt und die Lage der 18 untersuchten Kabelstandorte markiert. Die untersuchten Standorte befinden sich überwiegend im Bereich des Urstromtals und am Rand der Hochflächen.

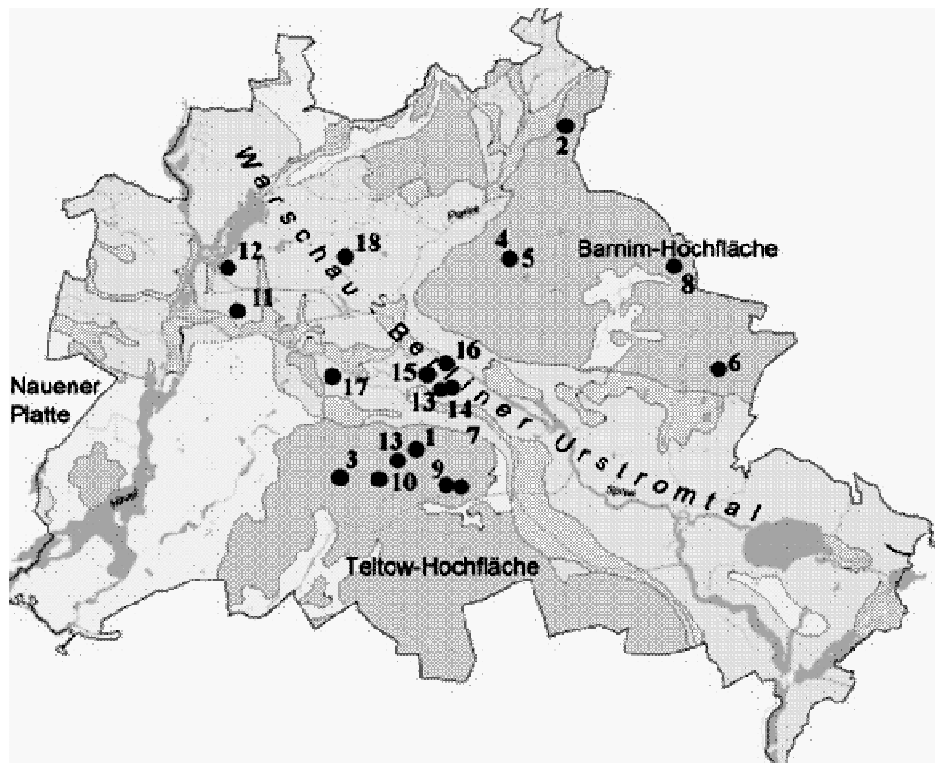


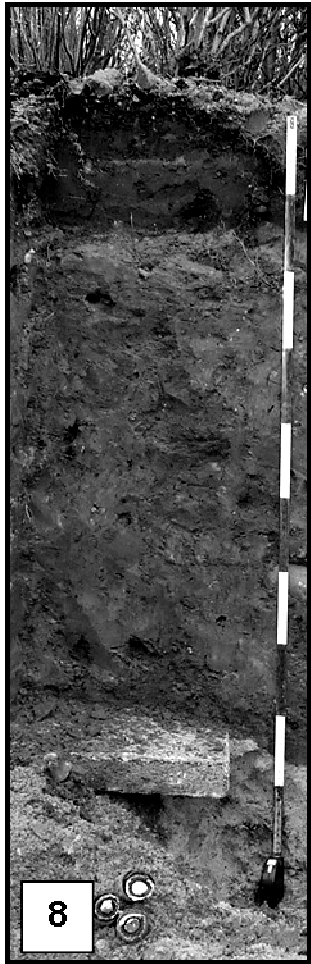
Abb. 4.3-1: Lage der untersuchten Profile in Berlin und Gliederung des Naturraums

In Tab. 4.3-1 werden die Standorte aufgeführt und hinsichtlich Kabel, Standort und Boden charakterisiert. Danach zeichnet sich der überwiegende Teil der Kabelstandorte durch eine teilversiegelte Oberfläche aus. Als Vegetation sind häufig Rasen und Alleegebäume anzutreffen. Die Mittelspannungskabel (10 kV) liegen zumeist in einer Tiefe unter 120cm und befinden sich damit im Wurzelraum von Bäumen. Hochspannungskabel (110 kV) sind tiefer als 150cm verlegt. Als Bodenart sind im direkten Kabelraum in fast allen Fällen stark sandige Substrate anzutreffen. Die Böden unterscheiden sich dadurch oftmals von den natürlich vorkommenden Substraten. Bei den Substraten der Standorte im Bereich des Berliner Urstromtals handelt es sich um Talsande mit der Bodenart Mittelsand (mS). Bei Standorten, die mit Flugsand überdeckt sind, liegt ein mittelsandiger Feinsand (fSms) vor. Im Bereich der Hochflächen sind die Böden aufgrund von Geschiebeablagerungen (Geschiebemergel) meist durch die Bodenartuntergruppen schwach bis stark lehmiger Sande geprägt (Sl3-Ls4).

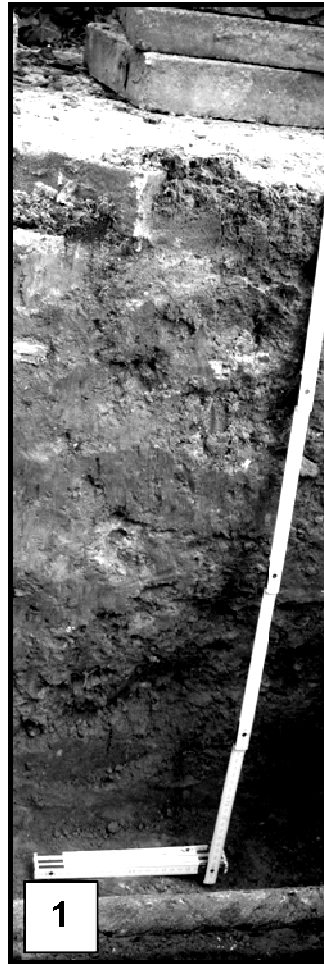
Durch das Verfüllen der Kabelgräben werden häufig Ober- und Unterboden aus Flugsand, Talsand, Geschiebedecksand und Geschiebemergel miteinander vermischt. Häufig befinden sich in diesen Mischsubstraten anthropogene Beimengungen, wie Ziegelreste, Kohle, Bauschutt oder Schotter.

In Abb. 4.3-1 werden 5 Bodenprofile von Kabelstandorten gezeigt, um einen Eindruck von den vorgefundenen Bedingungen zu vermitteln. Tab. 4.3-1 gibt einen Überblick zur Charakteristik der Standorte.

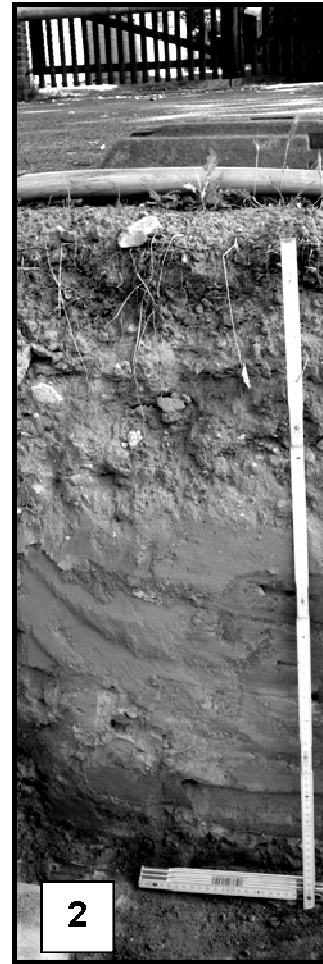
Barnimer Hochfläche



Teltow Hochfläche



Hochfläche (Decksand)



Talsandbereich



Talsandbereich



Abb. 4.3-2: Bodenprofile von Trassenstandorten der typischen geologischen Einheiten (rote Nummer= Standorte in Tab. 3.3-1)

Tab. 4.3-1: Aufnahme der Kabelstandorte im Berliner Stadtgebiet

Lfd. Nr.	Standort	Kabelart	Verlegetiefe (cm)	Standort	Versiegelungsart & Vegetation	Bodenart (Auf- nahme)	Bodenart (Umwelt- atlas)	Lage- rungs- dichte	GW Abstand (GOK)
1	Bäumerplan	10kV (NV)	80	Gehweg	40x40cm Platten	Ls3	Ls4	mäßig dicht	10- 20 m
2	Krähenfußzeile	10kV	80 -100	Straßen- rand	n.V. Gras, Allee-bäume	mSfs	Ls4	mäßig dicht	20 – 40m
3	Lepsiusstraße/ Treitschkestraße	1kV	50	Gehweg	40x40cm Platten, Allee- bäume	Ls4	Ls3	mäßig dicht	7 – 10 m
4	Berliner Straße 36	10kV	110	Grünfläche	Gras, Sträucher	mS	Ls3	mäßig dicht	
5	Berliner Straße 32	10 kV	110	Gehweg	40x40cm Platten, Gras	gSmS/Ls3	Ls3	dicht	
6	Wernerstraße 10	10kV	100	Gehweg	20 x 11 Knochenplaster	mS	Ls3	mäßig dicht	
7	Germaniastr. 137	10kV	115	Gehweg	40x40cm Platten	mSfs	mS	dicht	
8	Wittenberger-/ Flämingstraße	10kV	115	Gehweg	20 x 11 Pflaster	Ls3/ mS	mS	locker	

9	Teilestraße 19	10kV	80	Gehweg	40x40cm Platten, Allee- bäume	mSfs	mS	mäßig dicht	
10	Grazer Damm 205	10kV, 110 kV	100	Gehw.- Grünf.	40x40cm Platten, Klein- pflaster	mSfs	mS	dicht	12m
11	Motardstr.	110kV	250	Straße	Asphalt	mS	mS	mäßig dicht	4- 6m
12	Maierenwerder Weg	110kV	160	Waldrand	Wegrand, Schotter, Gras	mS	mS		
13	Heinrich-Heine-Str./ Köpenicker Str.	10kV, 110kV	160	Wohnanla- ge	n.V. Gras	mS	mS	locker	3,5 m
14	Annenstr. 20/ Neue Jakobstr	110kV	190	Grünfläche	n.V. Gras, Bäume u. Sträu- cher	mSfs	mS	mäßig dicht	4
15	Leipziger Str./ Jerusalemmer Str.	10kV, 110kV	130 - 160	Gehweg	1x1m Platten	mS	mS	locker	3,5m
16	Breite Straße/ Mühlendamm	1kV		Gehweg	40x40cm Platten, Allee- bäume	fSms	mS	dicht	
17	Hardenbergstr.	1kV, 10kV	- 120	Gehweg		mS	mS	mäßig dicht	
18	Schulenburgstr	110kV	190	Freizeitflä- che	n-V. Gras, Bäume in Um- gebung	fSms	mS	mäßig dicht	

4.3.2 Bewertung des thermischen Widerstandes von Füllsubstraten

Die Bemessung der Übertragungsfähigkeit von erdverlegten Energiekabeln erfolgt in der gängigen Praxis unter Berücksichtigung des spezifischen thermischen Widerstands (σ_{th}) des Bodens in vier Feuchtestufen (vgl. Kap. 2.2). Eine Differenzierung hinsichtlich der Bodenart und eine Konkretisierung der Bodenfeuchte gibt es dabei nicht. Im vorherigen Abschnitt wurden die Messergebnisse der Wärmeleitfähigkeiten der Füllsubstrate in Abhängigkeit vom Wassergehalt dargelegt

Zunächst wird die Betrachtung hinsichtlich der Substrate vorgenommen. Dafür werden die sieben Substrate zu drei Substratgruppen zusammengefasst:

- reine Sande (mS, mSfs)
- lehmige Sande (Su2, Su3, Sl4)
- Lehme (Ut3, Lu)

Der spezifische thermische Widerstand kann in seiner Abhängigkeit vom Wassergehalt durch eine Exponentialfunktion in der Form:

$$\sigma_{th,B} = A + B \cdot e^{(-C \cdot \theta)} \quad (2.50)$$

mit: $\sigma_{th,B}$ - spezifischer thermischer Widerstand des Bodens, A, B, C - Formparameter, θ - Wassergehalt des Bodens [m^3/m^3]

beschrieben werden. In Abb. 4.3-3 sind die an die Messwerte angepassten Kurvenverläufe der drei Substratgruppen dargestellt.

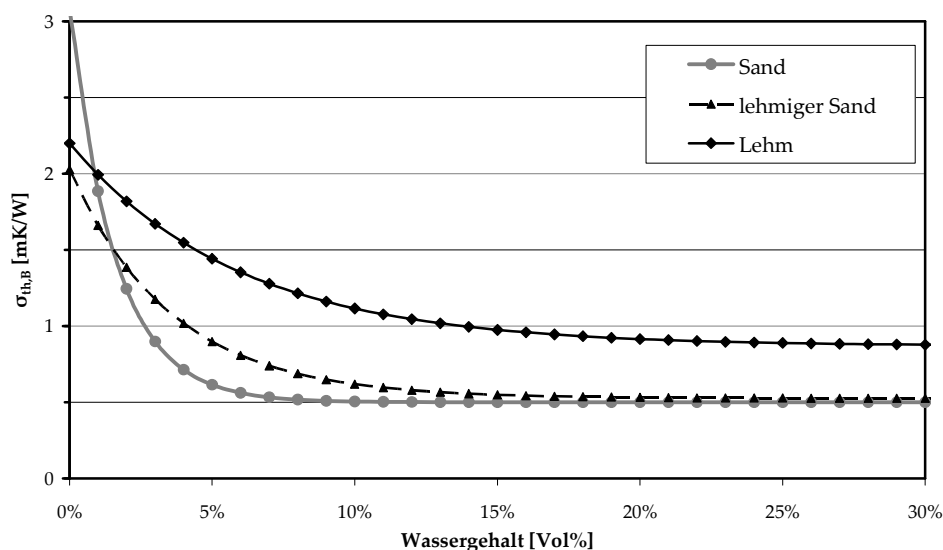


Abb. 4.3-3: Wassergehaltsabhängigkeit des thermischen Widerstandes der drei Substratgruppen

Anhand der Kurvenverläufe können die Substratgruppen gut untereinander verglichen werden:

Sande verfügen bei einem ausreichend hohen Wassergehalt (>7 Vol.%) über einen geringen thermischen Widerstand (0,5 mK/W). Sinkt der Wassergehalt unter diesen Wert, steigt der thermische Widerstand sehr schnell auf bis das 5 fache (2,5 mK/W) an. Die Gruppe der lehmigen Sande verfügt im feuchten Zustand über einen ähnlich geringen Widerstand wie die Gruppe der reinen Sande. Der Anstieg beginnt schon bei noch höheren Wassergehalten, verläuft aber weniger stark, und im trockenen Zustand hat sich der Wert etwa verdreifacht. Die Lehme haben schon im feuchten Zustand einen hohen thermischen Widerstand. Der Anstieg von $\sigma_{th,B}$ setzt ab 20 Vol.% ein und er steigt dann auf mehr als 2 mK/W.

Die ermittelten Parameter A, B, C der Gleichung (4.1) werden in Tab. 4.3-2 aufgelistet. Anhand dieser kann das thermische Verhalten der Substrate gut nachvollzogen werden. Parameter A gibt $\sigma_{th,B}$ im feuchten Zustand und Parameter B gibt σ_{th} im trockenen Zustand an. Die Steigung der Kurve wird durch Parameter C beschrieben.

Tab. 4.3-2: Parameter der Wassergehaltsabhängigkeit des spezifischen thermischen Widerstandes

Parameter in Gl.(3.1)	Sande	lehmige Sande	Lehme	Einheit
A	0.50	0.53	0.87	mK/W
B	2.6	1.5	1.3	mK/W
C	62	28	17	-

Eine bessere Bewertung des thermischen Widerstandes unter den herrschenden Standortbedingungen ist durch eine Zuordnung von bodenkundlichen Feuchtestufen möglich. Eine auf den Wassergehalt der Füllsubstrate bezogene Zuordnung ist dafür ungeeignet, da unter natürlichen Standortbedingungen das hydraulische Potenzial die steuernde Größe darstellt. Durch Verknüpfung der Wasserretentionsfunktion mit den oben gezeigten Wassergehaltsabhängigkeiten des thermischen Widerstandes, kann eine Beziehung zu den bodenkundlichen Feuchtestufen hergestellt werden. Im Folgenden wird diese Beziehung als **thermische Widerstandscharakteristik des Bodens (TWC)** bezeichnet. Für die Substrate mS, Su2, Su3 und Lu ist dieser Kurvenverlauf in Abb. 4.3-4 dargestellt.

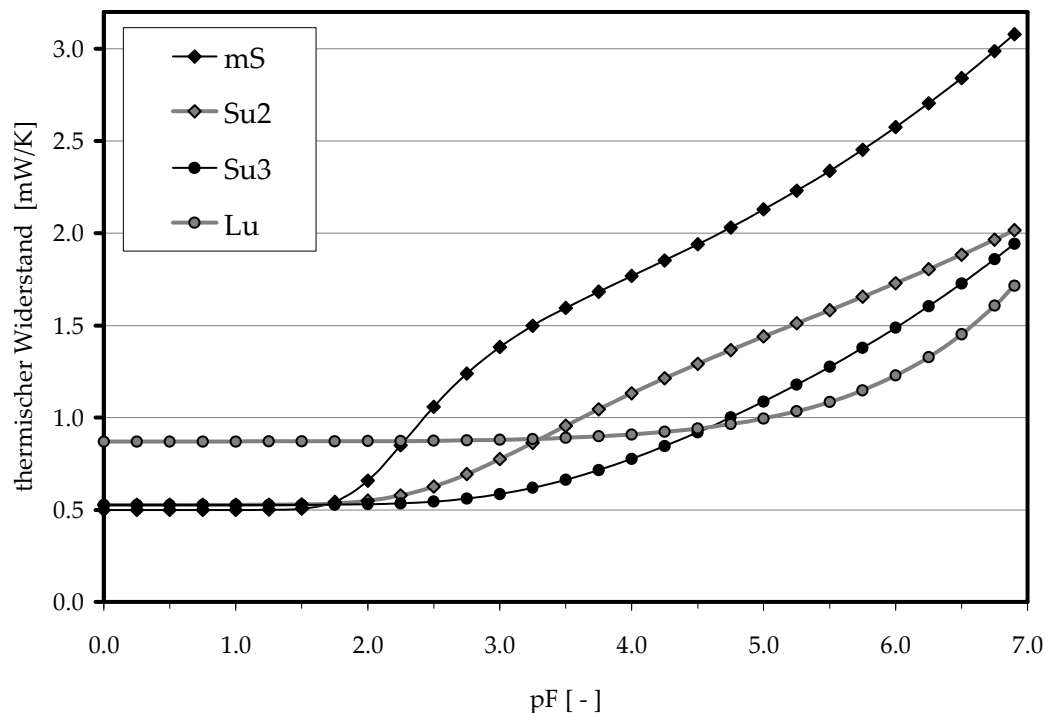


Abb. 4.3-4: Thermische Widerstandscharakteristik von vier Füllsubstraten

Der Kurvenverlauf zeigt, dass der geringe thermische Widerstand des reinen Sands (mS) nur bis zu einem Matrixpotenzial von pF 2 vorliegt. Danach steigt $\sigma_{th,B}$ sehr schnell an und hat bei pF 4 schon den Wert von 1,5 mK/W überschritten. Bei den lehmigen Sands (Su2, Su3) setzt der Anstieg des thermischen Widerstandes deutlich später ein, da mehr Wasser durch die kapillaren Kräfte gebunden ist. Das Substrat Su2 erreicht den thermischen Wärmewiderstand von 1,5 mK/W erst über pF 5. Das Substrat Su3 besitzt fast über den gesamten pF-Bereich einen thermischen Widerstand unter 1,5 mK/W. Das Substrat Lu weist hingegen schon im feuchten Zustand einen höheren thermischen Widerstand, der jedoch erst ab dem pF-Wert 5 weiter ansteigt.

Diese Bewertung verdeutlicht, dass Füllsubstrate mit einer besseren Wasserspeicherfähigkeit weniger Austrocknungsgefährdet und somit thermisch stabiler einzustufen sind, als reine Sande. Mittels der thermischen Widerstandscharakteristik kann eine am Feuchteregeime der Kabelumgebung orientierte Bewertung der Füllsubstrate und Böden erfolgen. In Tab.3.3-3 werden die Stufen definiert und das entsprechende Feuchteregeime des Standorts beschrieben. Aus Tabellen (z.B. Renger et. al. 2009; Ad hoc Boden, 2005) können bodenartspezifische Angaben zum Wassergehalt bei den entsprechenden pF-Werten entnommen werden.

Tab. 4.3-3: Standortspezifische Einstufung des Feuchteregimes

Stufe	pF - Wert	Feuchteregime
Nass	1,5	im Einflussbereich von Grund- und Stauwasser durchwurzelter Boden im Winterhalbjahr
Feucht	1,8	außerhalb des Wurzelraums ganzjährig unter versiegelte Flächen ohne Einschränkung des Wasserkontakt ganzjährig
Trocken	2,5	im Wurzelraum während des Sommers unter versiegelte Flächen mit eingeschränkten Wasserkontakt ganzjährig
Sehr trocken	4,2	bei Wurzelkontakt im Sommer
Ausgetrocknet	>>4,2	ohne Kontakt des Substrates zu feuchten Boden, Wassergehalt = 0 Vol%

Ein weiterer Aspekt zur Bewertung der thermischen Eigenschaften der Füllsubstrate kann ebenfalls aus der Wasserretention ableitet werden. Für den Wärmetransport in porösen Medien wurde in Kapitel 2.1 dargelegt, dass mit steigenden Temperaturen der Dampftransport stark zunimmt und dadurch die effektive Wärmeleitfähigkeit ansteigt, bzw. der thermische Widerstand verringert wird. Die Bedingung dafür ist aber, dass ein Teil der Poren luftgefüllt sind. Gleichzeitig muss auch noch genug Wasser im Boden vorhanden sein, damit der kombinierte Transport in der Dampf- und Flüssigphase erfolgt, ohne dass eine Austrocknung initiiert wird. Im Bereich der optimalen Wassersättigung ist davon auszugehen, dass bei einer starken Strombelastung des Kabels, die Verlustwärme bestmöglich abgeführt wird. Dies wird im folgenden als die **thermische Stabilität** des Füllsubstrates bezeichnet.

Mithilfe der Wassersättigung (S_e) der Retentionsfunktion wird ein Vergleich und eine Bewertung der Substrate vorgenommen. Da in dieser Arbeit keine Untersuchungen zur Temperaturabhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit erfolgten, wird ein optimaler Sättigungsbereich per Definition zwischen 25 – 75% Wassersättigung festgelegt. In einem Substrat mit der Lagerungsdichte von 1,6 g/cm³ liegen gemäß dieser Definition Wassergehalte von 10 – 30 Vol.% vor. In Abb. 4.3 5 ist die Abhängigkeit der prozentualen Wassersättigung vom pF-Wert für vier Substrate dargestellt. Es wird deutlich, dass die thermische Stabilität beim Sand (mS) nur in einem Bereich zwischen pF 0,5 bis 1,5 vorliegt. Bei den schluffigen Sanden (Su2 und Su3) liegt der Bereich zwischen pF 1,0 - 2,25 (Su2) bzw. 1,5 - 2,75 (Su3). Hier liegt die thermische Stabilität also in einem Feuchtebereich vor, welcher für einen grundwasserfernen Standort typisch ist. Bei Lehm (Lu) ist der Bereich von pF 1,9 – 4,1 zwar sehr groß, aber in diesem Fall beeinträchtigt ein geringer Luftanteil den Wärmetransport im feuchten Zustand.

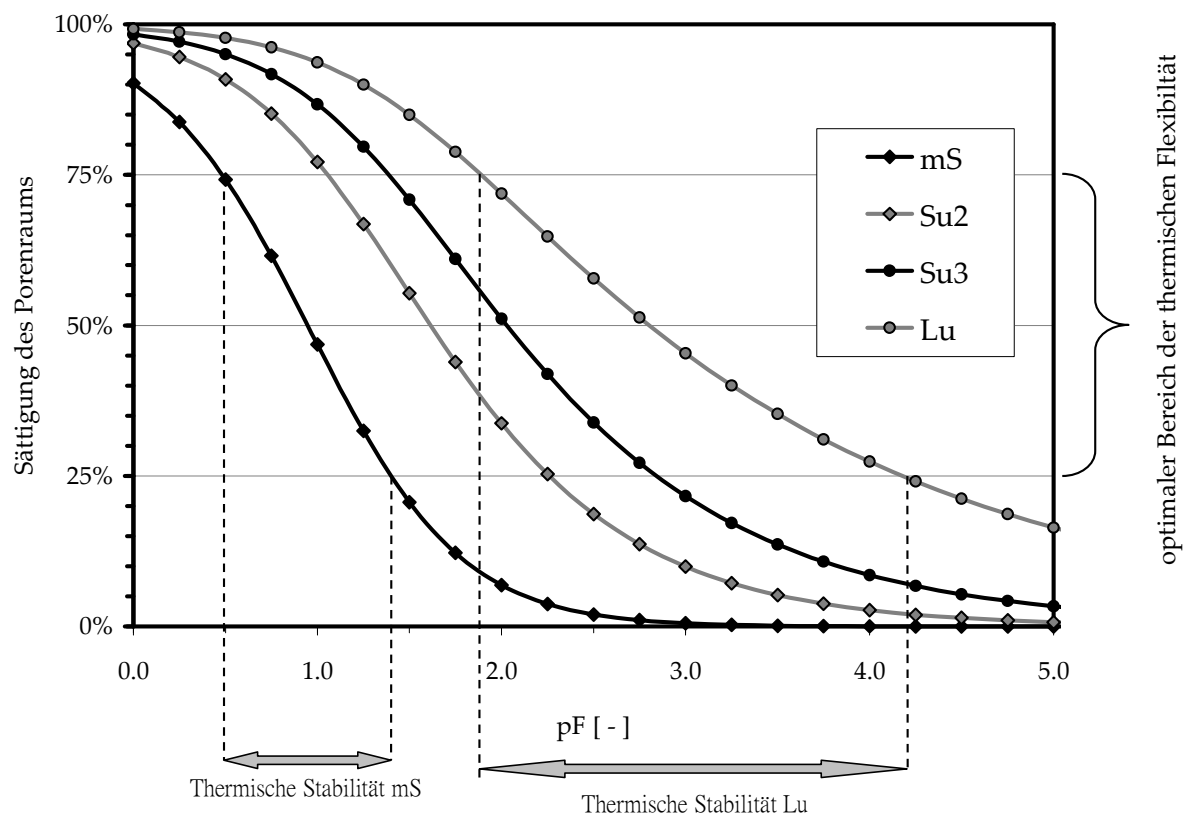


Abb. 4.3-5: Speicherkapazität der Substrate

Tab. 4.3-4: Thermischer Widerstand der Substrate in Abhängigkeit vom Feuchteregime und Bereich der optimalen thermischen Flexibilität

σ_{th} im Feuchteregime:	mS	mSfs	Su2	Su3	Sl4	Ut3	Lu
Nass	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,9	0,9
Feucht	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,9	0,9
Trocken	1,1	0,6	0,6	0,5	0,5	0,9	0,9
Sehr trocken	1,9	0,9	1,2	0,8	0,6	1,2	0,9
Ausgetrocknet	3,1	3,1	2,0	1,9	2,0	2,2	1,7
therm. Stabilität im pF-Bereich:	1,0 - 1,5	1,4 - 1,8	1,3 - 2,3	1,5 - 2,9	1,1 - 1,4	2,0 - 2,7	1,9 - 4,2

grau hinterlegte Felder = optimale thermische Stabilität

4.3.3 Bewertung einer existierenden 110kV-Trasse

Eine Bewertung der thermischen Eigenschaften von Füllsubstraten und Böden ist bei Berücksichtigung des thermischen Widerstandes und der Wasserretentionseigenschaften standort- und situationspezifisch möglich. Nachfolgend soll diese Methode für die Bewertung einer 110 kV-Trasse im Innenstadtbereich Berlins angewendet werden. Das Interesse des Netzbetreibers liegt in einer optimalen Auslastung der bestehenden Trasse. Aufgrund eines steigenden Strombedarfs und mangelnder Platzressourcen für einen Netzausbau ist er auf eine optimale Festlegung der Übertragungsfähigkeit angewiesen. Die Festlegung erfolgt bisher mit dem stationären Modell KATRAS und der Annahme eines thermischen Erdbodenwiderstandes in einem Bereich von 1,0 – 2,5 mK/W. Für eine bessere Bewertung der Übertragungsfähigkeit werden trassenspezifische thermische Widerstände bestimmt. Diese sollen in Abhängigkeit von bodenphysikalischen und standortspezifischen Faktoren bewertet werden.

Für diese Untersuchung wurden drei Kabelstandorte der Trasse (Abb. 4.3-6), die als Engpässe der Übertragungsfähigkeit eingeschätzt wurden, aufgegraben und bis zur Verlegetiefe von max. 2,7 m untersucht. Nach einer Boden- und Standortansprache wurden Bodenproben für Untersuchungen im bodenphysikalischen Labor entnommen. Im Folgenden werden die Ergebnisse dargelegt und bewertet.



Abb. 4.3-6: Standorte der Trassenbewertung in Berlin Mitte (Quelle: Google Maps 2010)

Thermische Eigenschaften

Mit dem entnommenen Bodenmaterial wurden Kunststoffzylinder mit Trockenrohdichten (TRD) von 1,4; 1,5 und 1,6 g/cm³ gepackt und verschiedene Wassergehalte im Bereich von ca. 0 - 20 Vol.% eingestellt. Anschließend erfolgte die Messung der Wärmeleitfähigkeit mit dem ISOMET-Messgerät und einem Plattensensor. Die gemessenen Wärmeleitfähigkeiten der Proben sind in Abb. 4.3-7 dargestellt. Es liegen für die Bodenart (feinsandiger Mittelsand) typische Werte vor.

Ein Vergleich der Messwerte mit dem Testsubstrat mSfs zeigt, dass die Wärmeleitfähigkeiten vor allem im trockenen Bereich gering sind und mit Zunahme des Wassergehalts stärker ansteigen. Als Ursache dafür werden die unterschiedlichen Sensoren (Testsubstrat - Nadelsensor; Kabelraumproben - Plattensensor), sowie den unterschiedlichen Trockenrohdichte angesehen.

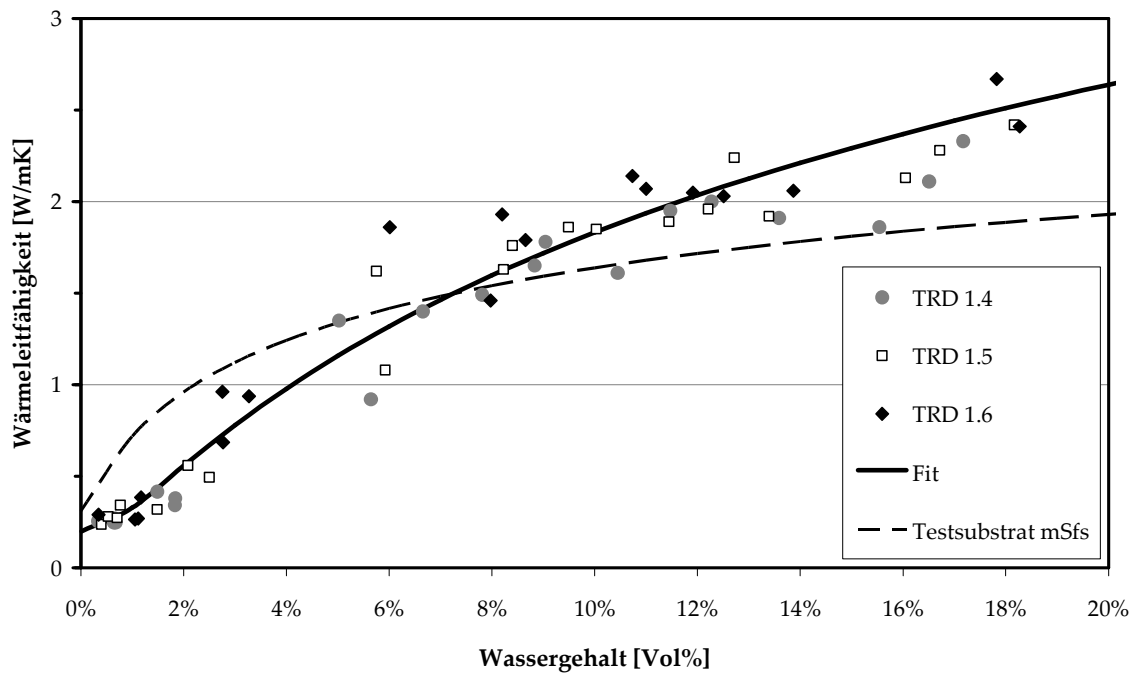


Abb. 4.3-7: gemessene Wärmeleitfähigkeit der Proben in Abhängigkeit vom Wassergehalt und der Trockenroh-dichte (TRD)

Für den spezifischen thermischen Widerstand des Bodens (Abb. 4.3-8), als Kehrwert der Wärmeleit-fähigkeit, bedeutet dieser Befund, dass im feldfeuchten Zustand Werte vorliegen die deutlich unter 1 mK/W liegen. Erst wenn kritische Wassergehalte in Höhe von 3 – 6 Vol. % auftreten, steigt $\sigma_{th,B}$ ex-ponentiell an. Im nahezu trockenen Zustand werden maximale Werte bis zu 4.2 mK/W erreicht.

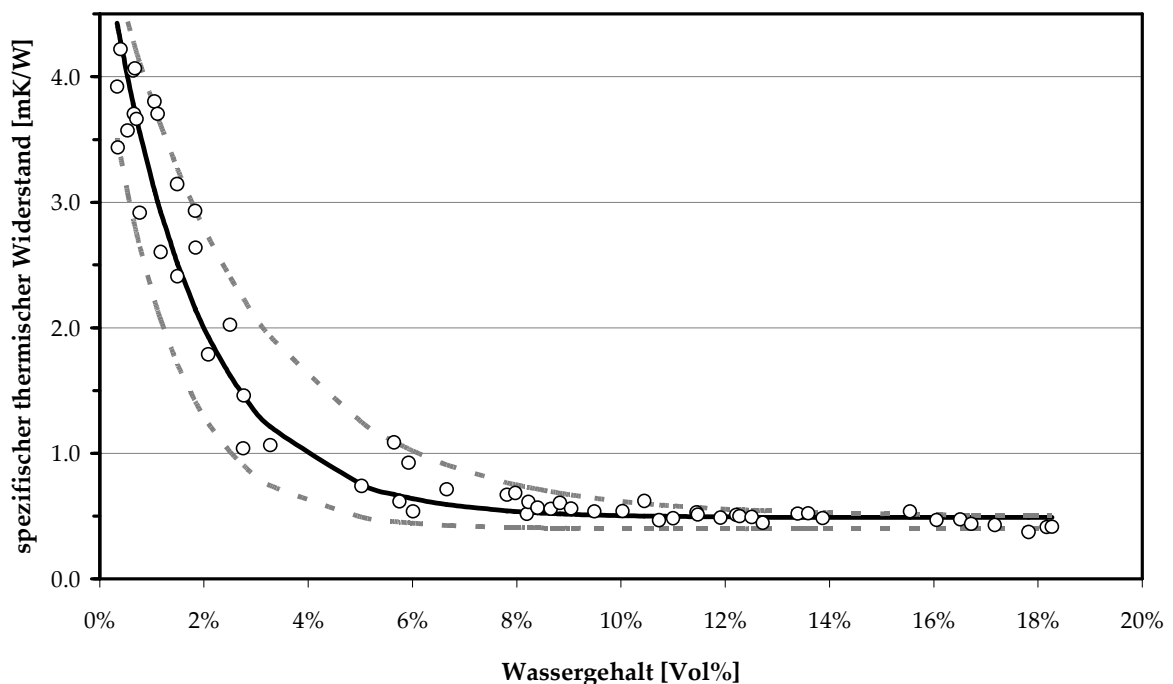


Abb. 4.3-8: Abhängigkeit des spezifischen thermischen Widerstands des Bodens vom Wassergehalt (durchge-hende Linie) und Unsicherheitsbereiche aufgrund von Heterogenität (gestrichelte Linien)

Der kritische Punkt des Wassergehalts ist zudem von der Trockenrohdichte abhängig. Je höher die TRD, desto niedriger liegt der kritische Punkt des Wassergehalts. Bei hohen Wassergehalten (11-18 %) treten $\sigma_{th,B}$ im Bereich von 0.4 - 0.5 mK/W auf.

Partikelgrößenverteilung

Die Analysen ergaben für alle entnommenen Proben eine Partikelgrößenverteilung, welche nach der Ad-hoc AG (2005) als feinsandiger Mittelsand (mSfs) anzusprechen ist. Innerhalb der unterschiedlichen Beprobungstiefen zeigen sich nur geringfügige Unterschiede der einzelnen Fraktionen. Die drei untersuchten Böden weisen somit sehr ähnliche Charakteristika auf.

Wassergehalt

Zum Zeitpunkt der Standortaufnahme wurden in den Profilwänden Wassergehalte mit einem TDR-Handmessgerät gemessen. Die gemessenen Werte (Mittelwert: 10,5 Vol%, Spannweite: 7,5 bis 14,2 Vol.%) entsprechen einem für die Bodenart im Zustand der Feldkapazität typischen Wassergehalt. Bei allen Standorten wurden keine Anzeichen von Grundwassereinfluss und/oder starker Austrocknung festgestellt.

Schlussfolgerungen und Standortbewertung

Aus den Ergebnissen der Messungen kann der Zusammenhang zwischen Wassergehalt und dem spezifischen thermischen Widerstand des Bodens hergestellt werden. Die Wasserretentionscharakteristik wird aus der Substratsprache nach Renger et al. (2009) abgeleitet. Abb. 4.3-9 stellt beide Funktionen gemeinsam dar. Hier sind die vier Bewertungsstufen der thermischen Widerstandscharakteristik eingezeichnet.

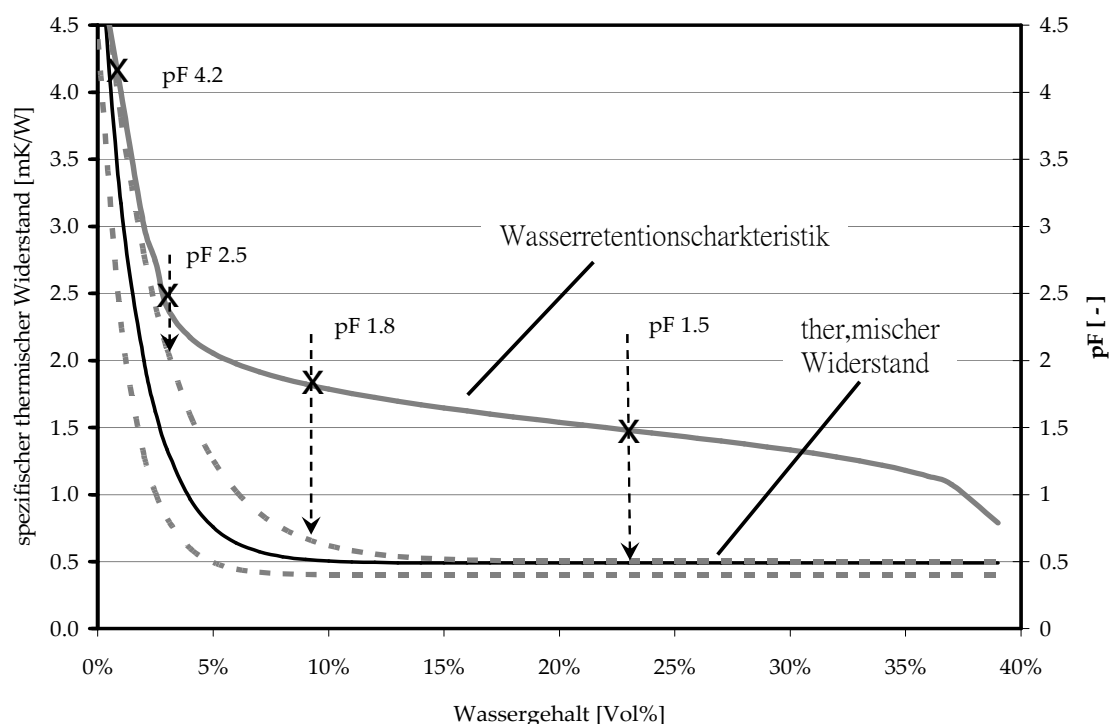


Abb. 4.3-9: Wasserretention und thermischer Widerstand des Bodensubstrates, verschiedenen Feuchtestufen sind eingezeichnet

Aus den Untersuchungen können folgende Schlussfolgerungen für die thermischen Bodeneigenschaften der untersuchten Standorte zusammengefasst werden:

- An allen drei Standorten liegt ein Boden aus feinsandigem Mittelsand (mSfs) vor. Dieses Substrat ist typisch für den Bereich des Berliner Urstromtales. Es können jedoch lokale Substratwechsel und technogene Beimengungen auftreten, so dass dieser Befund nicht pauschal auf den gesamten Trassenverlauf übertragen werden kann.
- Die thermischen Bedingungen für Energiekabel im feuchten Boden sind als sehr günstig zu bewerten: Es liegen niedrige thermische Widerstände ($<1 \text{ mK/W}$) vor. Bei Unterschreiten eines kritischen Wassergehaltes ($< 3\text{-}6 \text{ Vol. } \%$) steigt $\sigma_{\text{th,B}}$ stark an und erreicht im trockenen Zustand Werte von bis zu 4 mK/W .
- Die an den Standorten gemessenen Wassergehalte liegen zum Zeitpunkt der Beprobung über diesem kritischen Punkt. Entsprechend der Wasserretentionscharakteristik dieser Bodenart können kritische Wassergehalte zeitweise auftreten.
- Im gesamten Untersuchungsgebiet liegt der Grundwasserflurabstand zwischen $3,3 - 3,7 \text{ m}$. Kapillarkräfte des Bodens durchfeuchten das Substrat ausreichend bis in eine Tiefe von $2,6 - 3,1 \text{ m}$. Die Gefahr einer Austrocknung ist deshalb in diesen Tiefen sehr gering. Deshalb kann von konstant niedrigem $\sigma_{\text{th,B}}$ ausgegangen werden. Wenn infolge von Baumaßnahmen das Grundwasser zeitweise abgesenkt wird, ist lokal mit einer Verschlechterung der thermischen Bedingungen zu rechnen.
- Bei geringen Verlegetiefen der Kabeltrasse ($< 2 \text{ m}$) besteht außerdem die Gefahr, dass durch den Wasserentzug der Vegetation der Boden in den Sommermonaten austrocknet, der kritische Wassergehalt unterschritten wird und hohe $\sigma_{\text{th,B}}$ entstehen können.

Hinsichtlich der Standortbedingungen lassen sich die drei Standortbedingungen differenziert bewerten:

Tab. 4.3-5: Bewertungstabelle

Standort	Lage	Vegetation Verlegetiefe	Bedingung	$\sigma_{\text{th,B}}$	Bewertung
P1	Heinrich Heine Str./ Köpenicker Str.	Rasen (+) 2,7 m (-)	außerhalb des Wurzelraums (+) kein Grundwassereinfluss	0,75	++
P2	Annestr./ Alte Jakobstr.	Park m. Baum- bestand (-) 1,8 m (+)	im Wurzelraum (-) kein Grundwassereinfluss	Winter: 0,75 Sommer: 2,5	+/-
P3	Leipziger Str./ Jerusalemmer Str.	Gehweg (+) 3,5 m (-)	Grundwassereinfluss (++) Unterhalb Fernwärmetrasse (-) In Beton verlegt (+)	0,5	+

Standortbedingungen: - ungünstig; + mittel; ++ gut

5 Numerische Studien zu Betriebsszenarien

5.1 Modellbildung

5.1.1 Modellaufbau

Für die Simulation der thermischen Belastung erdverlegter Energiekabel in Abhängigkeit von klimatischen Randbedingungen und Standorteigenschaften wurde die Software DELPHIN4 eingesetzt. In Kapitel 2.3 sind die grundsätzlichen Prinzipien des numerischen Modells und der Simulation dargestellt. Um die Software für den speziellen Fall eines Energiekabels im Boden einzusetzen, waren Spezifikationen in folgenden Punkten notwendig:

- Materialeigenschaften des Kabels und der Kabelumgebung
- Klimabedingungen
- Modellgeometrie

Vorgehensweise, Spezifikationen und Annahmen werden im Folgenden dokumentiert.

Materialeigenschaften

Ein in DELPHIN4 verwendetes Material muss umfassend in seinen physikalischen Eigenschaften beschrieben bzw. parametrisiert werden. Die Parametrisierung betrifft:

- die physikalischen Eigenschaften der Festsubstanz (z.B. Porosität, Trockenrohddichte, Wärmekapazität und -leitfähigkeit),
- die Porenraumeigenschaften (Wasserretentionscharakteristik, Wasserleitfähigkeit und Dampfdiffusion),
- die thermische Leitfähigkeit in Abhängigkeit von Wassergehalt und Temperatur

Für das Modell wurde eine Materialdatenbank angelegt, die aus drei Materialien für den Kabelaufbau und drei Bodenmaterialien besteht:

- **Kabelwerkstoffe:** Kupfer, Vernetztes Polyurethan (VPE), Polyurethan (PE) und Polyvinylchlorid (PVC). Die Materialeigenschaften entstammen Herstellerangaben.
- **Bodensubstrate:** Mittelsand (mS), feinsandiger Mittelsand (mSfs), schwach schluffiger Sand (Su2), stark lehmiger Sand (Sl4). Die Bodeneigenschaften wurden durch eigene Messungen ermittelt.

Klimabedingungen

Delphin erlaubt die Generierung einer Vielzahl von unterschiedlichen Klimabedingungen und von physikalischen Zuständen. Die Klimabedingungen sind die globalen Variablen des Programms, aus denen Randbedingungen und Quellen erzeugt werden. Der zeitliche Verlauf der Klimabedingung kann über einen konstanten Wert, eine Sinusfunktion oder eine Datentabelle angegeben werden.

Für die 2D-Modellierung eines Bodenprofils werden als obere und untere Randbedingungen je eine Temperatur (Bodentemperatur) und ein Matrixpotenzial (Bodenfeuchte) zugewiesen. Da DELPHIN4 für bauphysikalische Fragen entwickelt wurde, kann hier, anders als z.B. bei der Modellierungssoftware HYDRUS, kein pflanzenphysiologisch gesteuerter Wasserentzug abgebildet werden. Deshalb wird in der Modellierung nur der Boden unterhalb des Wurzelraums betrachtet. Für diese Tiefe wird ein substrat-, nutzungs- und witterungsbedingter Temperatur und Matrixpotenzialverlauf beschrieben und dieser als Klimabedingung angelegt. Um das Kabel im Modell als Wärmequelle abzubilden, wird dem Kabel eine Energieproduktion in Höhe der aus der Stromlast errechneten Verlustwärme zugewiesen.

Modellgeometrie

Die entscheidende Größe zur Bewertung der Übertragungsfähigkeit eines Energiekabels ist die Erwärmung des Leiters. Aus diesem Grund wurde beim Aufbau der Modellgeometrie besonderer Wert darauf gelegt, die Ausbildung des thermischen Gradienten im Kabel und im umgebenden Boden gut abzubilden. Bei der Betrachtung eines einzelnen Kabelquerschnittes können mit einer eindimensionalen, rotationssymmetrischen Darstellung sowohl die einzelnen Materialschichten, als auch die verschiedenen Wärmequellen im Kabelquerschnitt gut abgebildet werden. Das zweite wichtige Anliegen der Bewertung ist es, den Einfluss von Standort- und Klimabedingungen und die Kabelanordnung abzubilden. Dies ist nur mit einem 2D-Modell möglich. Deshalb sind Abstraktionen hinsichtlich des Kabelaufbaus und -geometrien notwendig, denn nur so können alle Einflussfaktoren berücksichtigt und akzeptable Rechenzeiten realisiert werden. Die Modellgeometrien für die verschiedenen Szenarien werden in den entsprechenden Abschnitten vorgestellt.

5.1.2 Abbildung des Kabels und Trassenquerschnitts

Für die Abbildung eines Kabels, bzw. einer Kabelanordnung in einem Bodenprofil, ist eine Abstraktion notwendig. Das betrifft sowohl den Kabelaufbau, als auch die Kabelgeometrie und die Verteilung der Wärmequellen im Kabel. Um eine Vereinfachung vorzunehmen, wurde in mehreren Schritten aus einem detaillierten rotationssymmetrischen 1D Modell eines einzelnen Kabels ein 2D Modell für einen Kabelstrang entwickelt.

Ausgangspunkt für das Modell ist der in Kap. 2.2.2 dargelegte Aufbau des Kabels vom Typ N2XS(FL)2Y mit dem Leiterquerschnitt 630mm^2 . Dieser Kabelaufbau wird mit den 6 Materialschichten des Kabels und der umgebenden Bodenschicht abgebildet. Entsprechend der in Kapitel 2.2.3 dargelegten Wärmeentwicklung im Kabel werden dem Kupferleiter, der Isolierung und dem Schirm entsprechende Wärmequellen zugeordnet. Diese weisen eine der Stromlast entsprechende Energieproduk-

tion auf. Die Randbedingungen des Modells bestehen aus einer Bodentemperatur (20°C) und einem Wassergehalt (7 Vol%). Dieses Modell wird als das **detaillierte 1D-Modell** bezeichnet und bildet die Referenz für die folgenden Abstraktionen und Entwicklungsschritte:

- **Reduziertes 1D-Modell:** Hier besteht das Kabel nur noch aus zwei Materialien, dem Kupferleiter und einer Isolationsschicht aus VPE. Die Wärmeentwicklung des gesamten Kabels repräsentiert eine Wärmequelle im Kupferleiter.
- **Kreisrundes 2D-Modell:** Dafür wird der Aufbau des reduzierten 1D-Modells in einen 2D Kabelquerschnitt übertragen. Das Kabel bekommt dabei eine annähernd kreisrunde Form, der Leiter hingegen wird in einer quadratischen Form abgebildet. Die Wärmequelle wird in den Mittelpunkt des Leiters angeordnet.
- **Quadratisches 2D-Modell:** Nun wird das Kabel vollständig zu einer quadratischen Geometrie abstrahiert. Dieses Modell wird für die meisten Modellstudien in diesem Kapitel benutzt.

Abb.5.1-1 zeigt die Entwicklungsschritte der verwendeten Kabelmodelle.

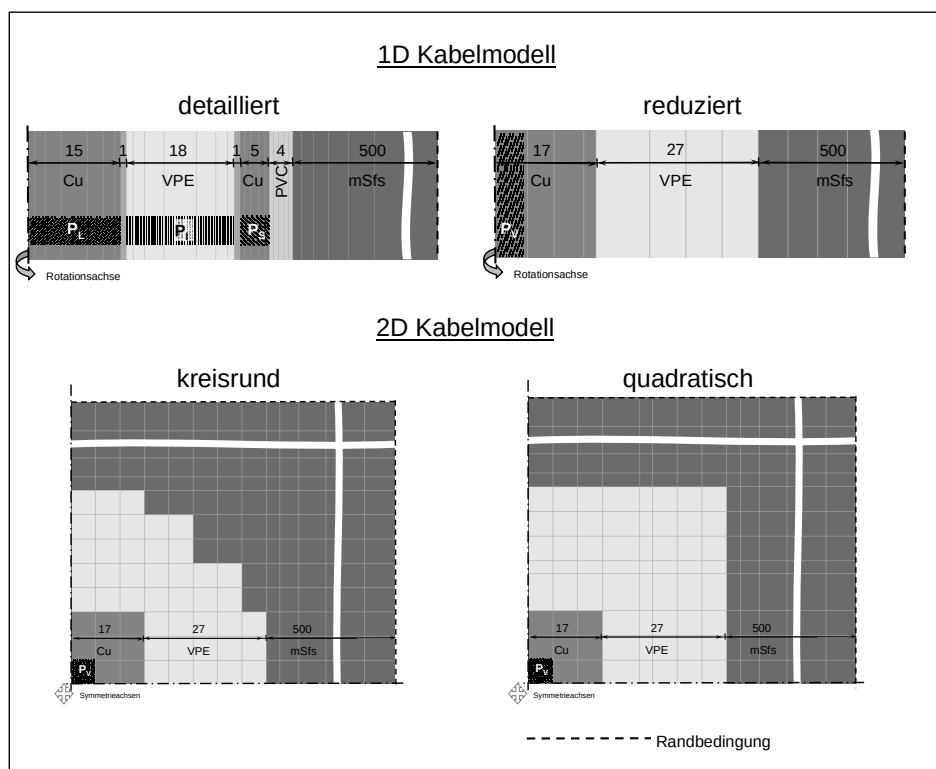


Abb.5.1-1: Aufbau der verschiedenen Modelle

Um die verschiedenen Abstraktionsstufen miteinander zu vergleichen, wurde der zeitliche Verlauf der Temperaturverteilung in Kabel und Boden bei verschiedenen Stromlasten miteinander verglichen.

Dabei wurden zwei prinzipielle Varianten unterschieden:

- **konstante Stromlast:** Das Kabel wird mit konstanter Energiequelle bis zum Erreichen der maximalen Leitertemperatur belastet. Die Ergebnisse können mit dem WWM verglichen werden.
- **transiente Stromlast:** Das Kabel wird mit sinoidalen Energiequelle belastet, so dass immer instationäre Bedingungen vorliegen.

Die Simulationsergebnisse der verschiedenen Modelle mit einer konstanten Stromlast stellt Abb. 5.1-2 dar. Hier wird der Temperaturanstieg des Leiters, auf dem Kabelmantel und im Boden (25cm Abstand vom Kabel) abgebildet. Die Kurven zeigen nahezu identische Verläufe. In Tab. 5.1-1 sind die berechneten Temperaturen nach 150h Strombelastung aufgeführt. Danach sind die Unterschiede der verschiedenen Abstraktionsstufen gering und im Vergleich zu den mit dem WWM berechneten Temperaturen sind keine erheblichen Abweichungen festzustellen.

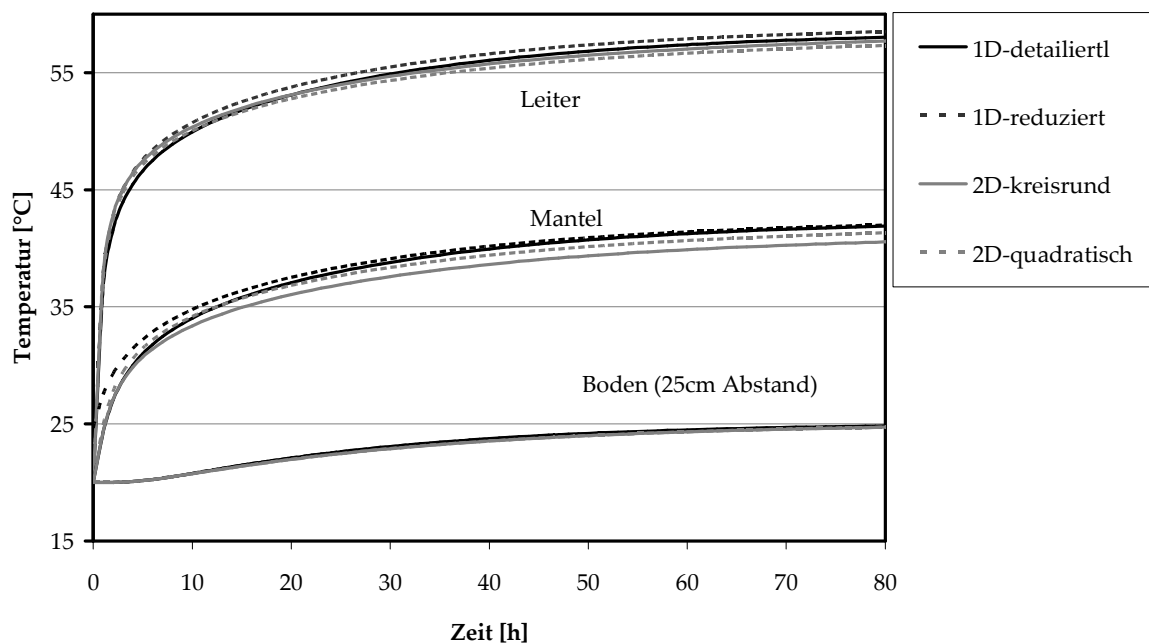


Abb. 5.1-2: modellierter Temperaturverlauf bei konstanter Wärmequelle mit verschiedenen Modellgeometrien

Tab. 5.1-1: Vergleich der mit verschiedenen Modellen berechneten Temperaturen von Leiter, Kabelmantel und im Boden (25cm Abstand vom Kabel) [°C]

	300A			600A			900A		
	Leiter	Mantel	Boden	Leiter	Mantel	Boden	Leiter	Mantel	Boden
1D real	23,4	21,9	20,5	33,1	27,4	21,9	49,5	36,6	24,2
1D reduz	23,3	22,0	20,4	32,7	27,7	21,6	48,4	37,3	23,7
2D kreis	23,7	22,2	20,8	34,6	29,0	23,2	49,5	38,2	26,4
2D quad	23,4	22,1	20,5	33,1	28,3	22,0	49,4	38,6	24,4
WWM	23,4	22,4	20,5	33,2	28,0	22,0	49,6	37,9	24,4

WWM= Wärme Widerstands Modell – Berechnung mittels analytischem Ansatz

Für eine transiente Strombelastung wird der Temperaturverlauf von Leiter, Mantel und Boden in Abb. 5.1-3 dargestellt. Hier sind vor Allem bei der Leitertemperatur etwas größere Unterschiede zu erkennen; der zeitliche Versatz des Temperaturmaximums und -minimums ist jedoch gering.

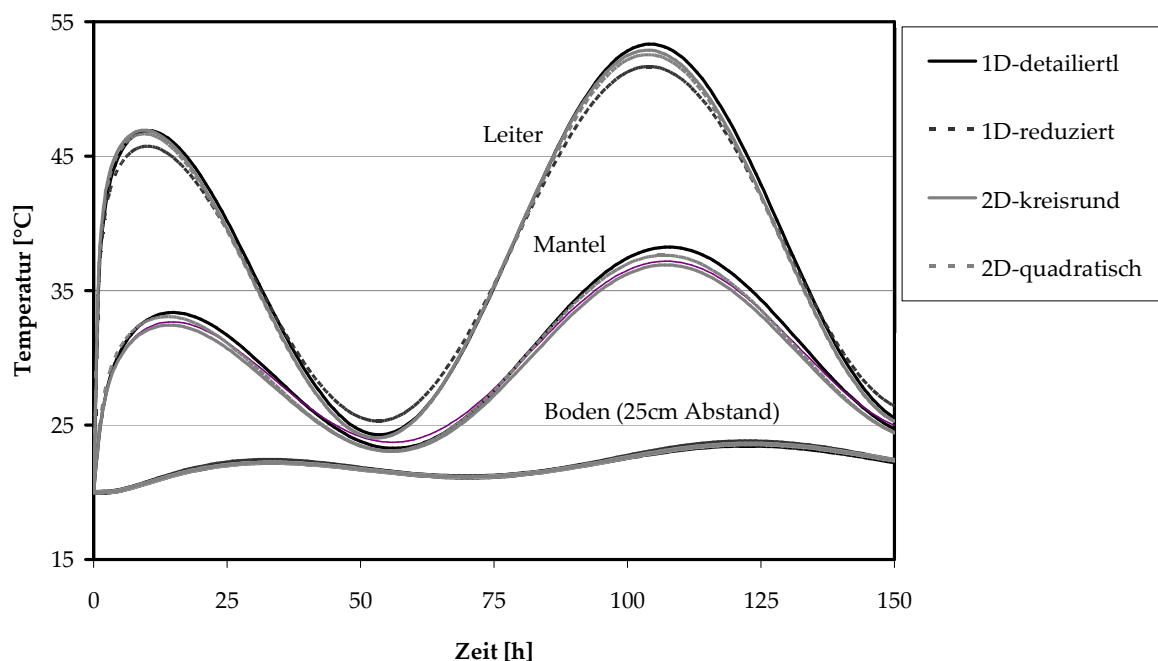


Abb. 5.1-3: modellierter Temperaturverlauf bei transientser Wärmequelle mit verschiedenen Modellgeometrien

Ein weiterer Schritt zur Entwicklung einer geeigneten Modellgeometrie ist die Abbildung eines Kabelstrangs in Dreiecksanordnung, so wie er an der Trasse 629/630 verlegt ist. Dazu wird aus dem kreisrunden und quadratischen 2D-Modellen des Einzelkabels ein Kabelstrang zusammengesetzt. In Abb. 5.1-4 ist dieser Aufbau dargestellt. Die geringere Anzahl von Diskretisierungselementen zur Abbildung des Kabels bei quadratischen Geometrien ist dabei gut zu erkennen. Die geringere Zahl an Elementen ist ausschlaggebend für die Modellierung von aufwändigen Betriebsszenarien. Zunächst werden jedoch beide Modellgeometrien verglichen.

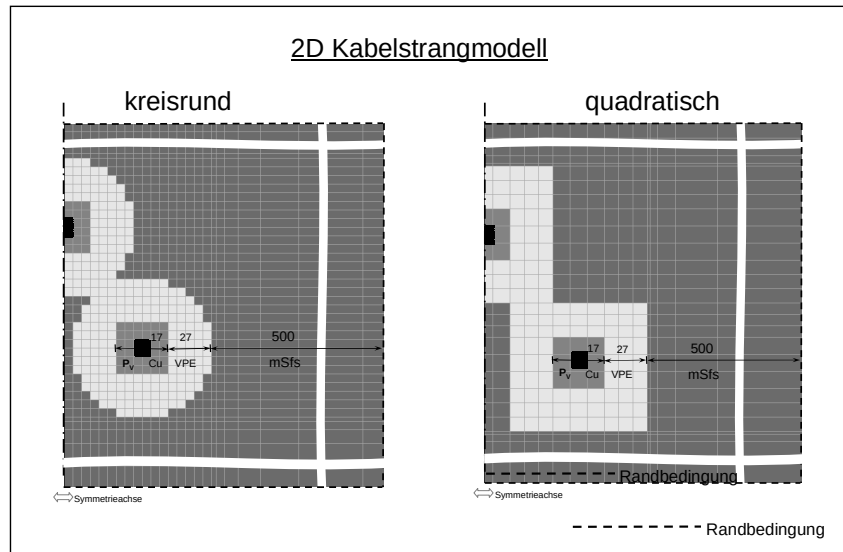


Abb. 5.1-4: Aufbau der Modellgeometrie der Kabelstrangmodelle

Dazu wird eine konstante Strombelastung simuliert, bis eine konstante Leitertemperatur erreicht ist. Die Ergebnisse für Leiter, Mantel- und Bodentemperatur sind in Tab. 5.1-2 aufgeführt. Als Referenz dient eine Berechnung mit dem Ansatz des WWM. Die beiden Modellvarianten liefern nahezu identische Ergebnisse, welche gut mit den Ergebnissen des WWM vergleichbar sind. Nur hinsichtlich der Temperatur der Bodens werden mit dem WWM geringere Temperaturen berechnet, was bedeutet, dass der angenommene thermische Widerstand des Bodens zu niedrig ist.

Tab. 5.1-2: Vergleich der Simulationsergebnisse der Kabelstrangmodelle [°C]

	300A			600A			900A		
	Leiter	Mantel	Boden	Leiter	Mantel	Boden	Leiter	Mantel	Boden
Kreisf.	23,6	22,5	20,8	46,8	38,2	26,0	79,5	61,5	33,4
Quadr.	23,4	22,5	20,7	44,7	38,4	25,2	76,3	61,6	31,5
WWM	26,7	24,7	20,8	46,0	38,1	23,0	78,1	60,5	26,7

5.1.3 Modelle des Standortmonitorings

Ein wichtiges Ziel des Monitoring der Kabeltrasse besteht darin, anhand der Messergebnisse das numerische Modell zu verifizieren. Dazu wurde für beide Standorte ein Modell eines Kabelstrangs aufgebaut und der Zeitraum von Juli 2008- August 2009 simuliert. Je Standort wurden zwei Bereiche abgebildet:

- **Das Kabelraummodell (KrM):** bildet das Kabelumfeld in einem Abstand von ca. 30 cm ab. Die Randbedingungen entstammen den Messungen im Kabelraum. Dieses Modell soll prüfen, ob die Prozesse hinsichtlich der Kabelerwärmung richtig abgebildet werden.

- **Das Standortmodell (StM):** bildet den Energiehaushalt im Kabelraum und des Standorts selbst ab. Deshalb wird ein Bodenkörper von 320cm Höhe und 100cm Breite dargestellt. Physikalisch-numerisch soll überprüft werden, ob das Modell den Standorteinfluss auf die Kabeltemperatur abbilden kann.

Die Modellgeometrien für beide Standorte sind in Abb. 5.1-5 dargestellt. Als Randbedingungen für das Kabelraummodell werden die gemessenen Temperaturen und Wassergehalte angegeben.

Die Verlustwärme des Kabels wird als Energie-Punktquelle im Kupferleiter erzeugt, der zeitliche Verlauf der Quellstärke wurde aus der Strombelastung errechnet (Abb. 3.3-1).

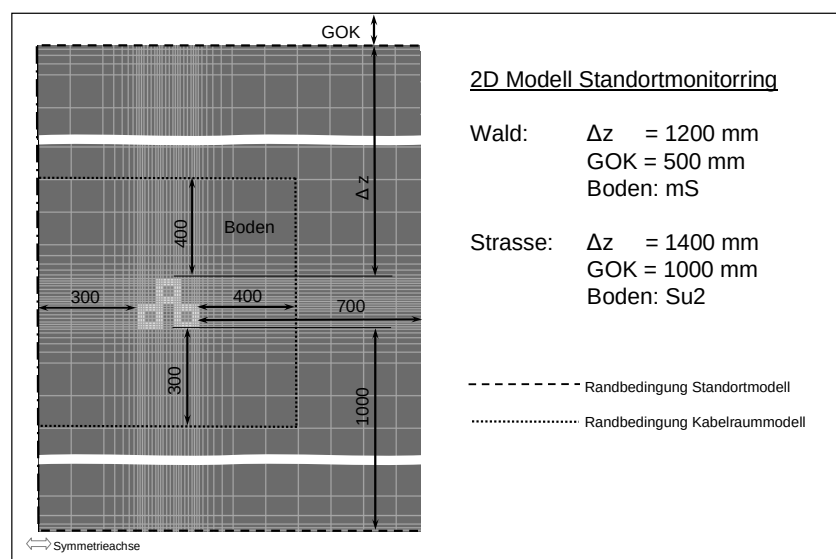


Abb. 5.1-5: Modellgeometrie der Monitoringstandorte

5.1.4 Modell der Betriebszenarien

Für die Bewertung der Übertragungsfähigkeit einer Trasse wird ein Modell in Anlehnung an die Bedingungen des Standortmonitorings verwendet und ein 110kV Kabelstrang in Dreiecksanordnung abgebildet. In Abb. 5.1-6 ist die Geometrie des 2D-Modells dargestellt. Im Gegensatz zu den Modellen des Standortmonitorings wird hier ein Kabelstrang durch eine Symmetrieachse vertikal geteilt. Dadurch halbiert sich die Anzahl der Diskretisierungselemente und die Rechengeschwindigkeit steigt deutlich. Durch das Modell wird ein Bodenprofil in einer Tiefe von 80 bis 400 cm abgebildet.

Der Lastgang der Normallastvariante wurde in Anlehnung an die reale Belastung der Monitoringtrasse 629/630 für einen Zeitraum von vier Wochen definiert. Dieser Zyklus bildet den für die Trasse typischen Tages- und Wochengang ab und wiederholt sich zyklisch über den gesamten Simulationszeitraum. Für die anderen beiden Varianten wurde die Quellenstärke entsprechend des Ohmschen Gesetzes ($P=R \cdot I^2$) etwa verdoppelt, bzw. vervierfacht. Abb. 5.1-7 stellt den Lastgang der drei Varianten dar.

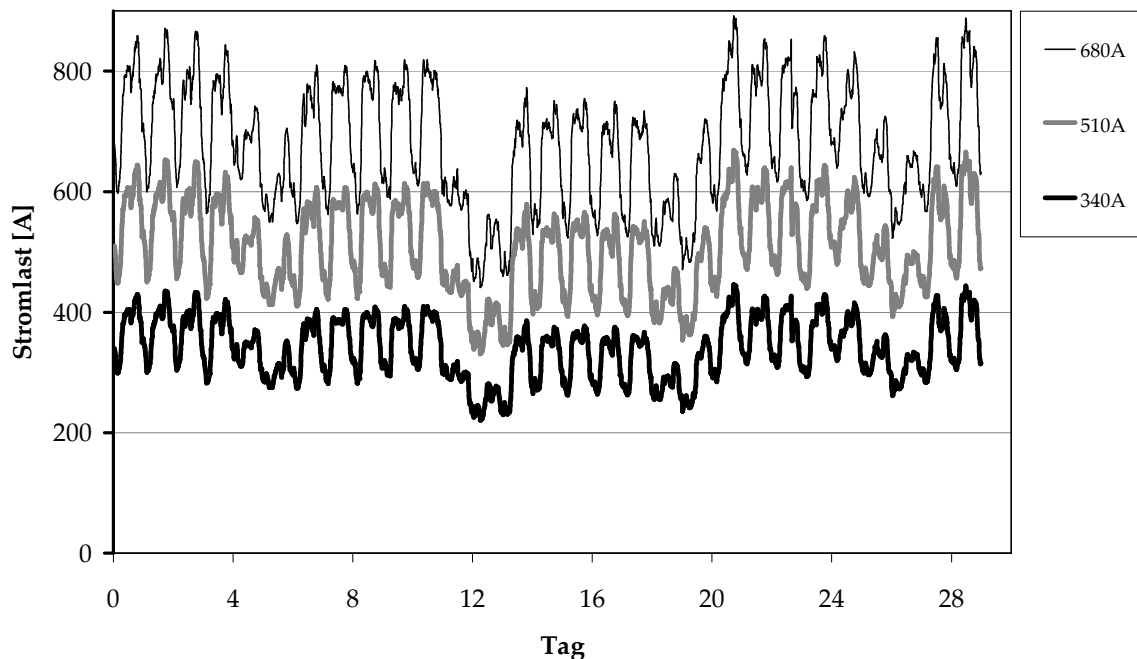


Abb. 5.1-7: 29-Tage Zyklus der Strombelastung in den verschiedenen Lastvarianten

Eine Übersicht zu allen Varianten der Betriebsszenarien gibt Abb. 5.1-8. Hier sind auch die Variantenbezeichnungen aufgeführt, die sich aus den Kürzeln für Standort, der Verlegtiefe und der Stromlast zusammensetzen.

Um den Klimaeinfluss auf die thermische Belastung des Kabels nachzuvollziehen, wurden vier Jahressgänge für Bodentemperatur und Matrixpotenzial als obere Randbedingung (d.h. in 80 cm Bodentiefe) abgebildet. Dafür wird eine Klimazeitreihe benutzt, bei der mit jedem Jahr die Temperatur und die Trockenheit zunimmt. Der Verlauf der Bodentemperatur für Grünland entstammt Zeitreihen der Bodentemperatur an der Säkularstation Potsdam für die Jahre 1987, 1991, 1997 und 2003. Der Verlauf des Matrixpotenzials am oberen Rand basiert auf Wasserhaushaltsmessungen von Dauerfeldversuchen im Raum Berlin und Hannover (Wessolek, 1989).

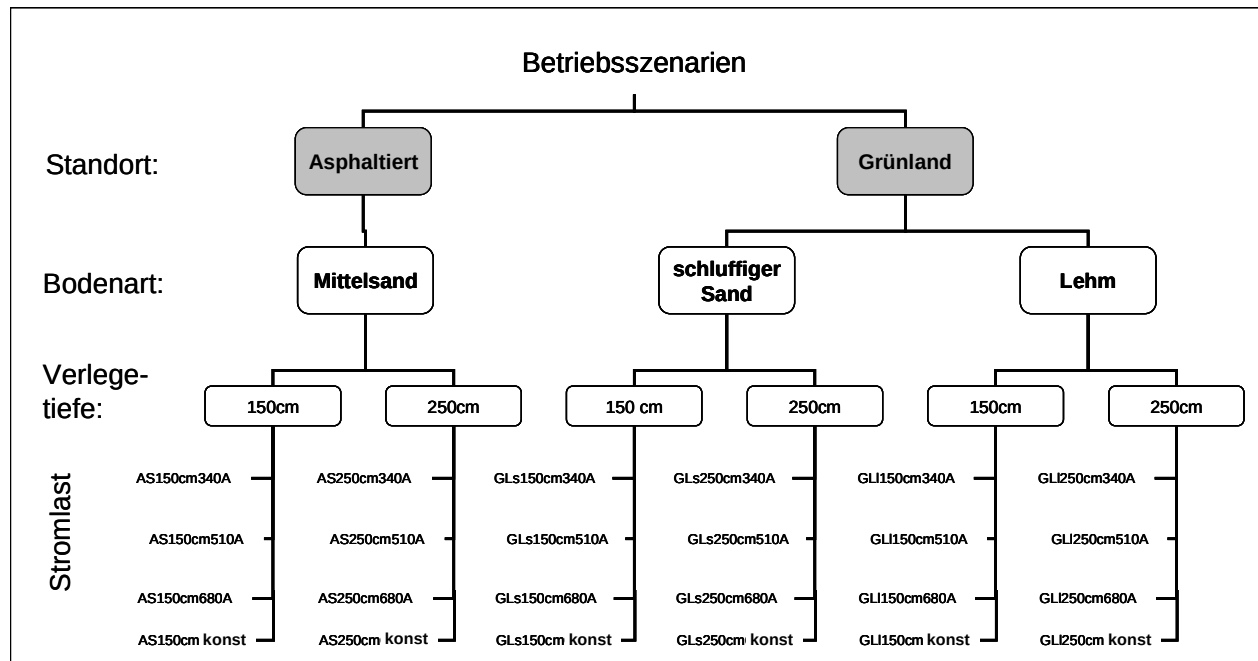


Abb. 5.1-8: Übersicht zu den Betriebsszenarien

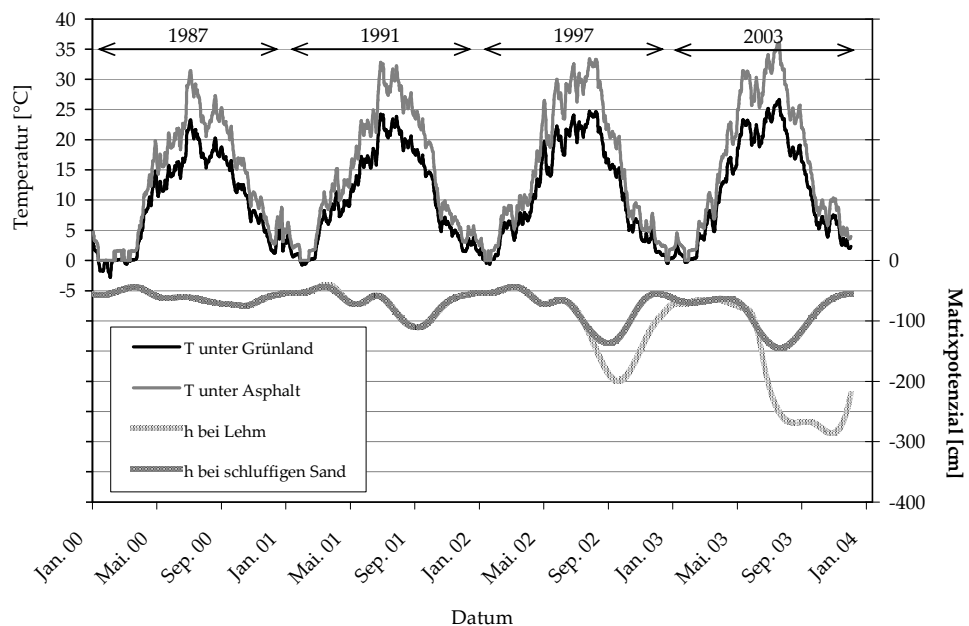


Abb. 5.1-9: Zeitlicher Verlauf der Bodentemperatur (T) und des Matrixpotenzials (h) als oberen Randbedingung der Betriebsszenarien

5.2 Ergebnisse des Modells des Standortmonitorings

5.2.1 Messstelle Wald

Ein Vergleich der Mess- und Modellierungsergebnisse erfolgt hinsichtlich der Kabelmanteltemperatur. In Abb. 5.2-1 sind die gemessenen Manteltemperaturen (Tagesmittelwert aller Sensoren), sowie die mit dem Kabelraum- und Standortmodell berechneten Temperaturen im Jahresgang dargestellt. Tab. 5.2-1 listet die gemessenen und berechneten Monatsmittelwerte auf. Der visuelle Vergleich der Kurvenverläufe und der Tabellenwerte zeigt, dass die simulierten Manteltemperaturen eine hohe Übereinstimmung zu den Messwerten aufweisen. Vor Allem bei Lastspitzen fällt auf, dass die Peaks von beiden Modellen gut abgebildet werden. Hinsichtlich der Referenztemperatur bestehen vor Allem im Frühjahr und Sommer größere Unterschiede. Hier überschätzt das Standortmodell die Bodenerwärmung deutlich, die resultierende KÜT ist somit geringer, als die Gemessene. In Abb. 5.2-2 sind gemessene und modellierte KÜT dargestellt. Es zeigt sich, dass das Kabelraummodell ganzjährig eine hohe Übereinstimmung zeigt. Beim Standortmodell ist dies nur für den Winter und den Herbst gegeben. Dies ist durch folgende Punkte zu erklären:

- Das Standortmodell bildet nicht den Wasserentzug von Baumwurzeln im Kabelraum ab. Daraus resultiert eine zu hohe Wärmeleitfähigkeit des Bodens im Sommer.
- Der Boden am Messort der Referenztemperatur erwärmt sich langsamer als am eigentlichen Kabelstandort, somit wird mit dem Standortmodell eine zu schnelle Bodenerwärmung im Frühjahr berechnet, woraus sich eine zu niedrige KÜT ergibt.

Tab. 5.2-1: : Vergleichstabelle der Monatsmittelwerte von Simulation und Messung Standort Wald

		2008							2009							
		Jun.	Jul.	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	Jan	Feb	Mrz	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug
Mantel	Mon	17,5	18,9	20,1	17,2	14,4	12,5	9,7	7,5	7,0	8,4	11,8	14,7	15,4	18,1	18,8
	StM	16,7	18,2	20,1	17,3	14,5	12,8	9,6	7,2	6,6	7,6	10,9	14,5	14,9	17,4	18,3
	KrM	17,2	18,8	20,3	17,4	14,8	12,8	10,1	7,9	7,4	8,5	11,6	14,6	15,3	17,8	18,8
Ref	Mon	14,0	15,2	16,3	15,2	12,7	10,3	7,9	5,6	4,9	6,0	8,6	11,2	12,9	14,9	16,2
	StM	15,5	15,9	16,8	15,5	12,9	10,9	7,6	5,1	4,3	5,5	9,2	13,0	14,0	15,7	16,7
KÜT	Mon	3,5	3,7	3,8	1,9	1,3	1,9	1,7	1,8	2,1	2,3	3,2	3,4	2,6	3,1	2,6
	StM	1,2	2,3	3,4	1,8	1,6	2,0	2,0	2,2	2,3	2,0	1,7	1,5	0,9	1,6	1,6
	KrM	3,2	3,7	4,0	2,2	2,0	2,4	2,2	2,3	2,4	2,5	3,0	3,3	2,4	2,9	2,6

Abk.: Mantel - Temperatur des Kabelmantels [°C]; Ref - Referenztemperatur des unbeeinflussten Bodens [°C]; KÜT - Differenz zwischen Kabelmantel- und Referenztemperatur (Kabelübertemperatur) [K]; Mon - beim Monitoring gemessene Temperatur; StM - mit dem Standortmodell berechnete Temperatur; KrM - mit dem Kabelraummodell berechnete Temperatur.

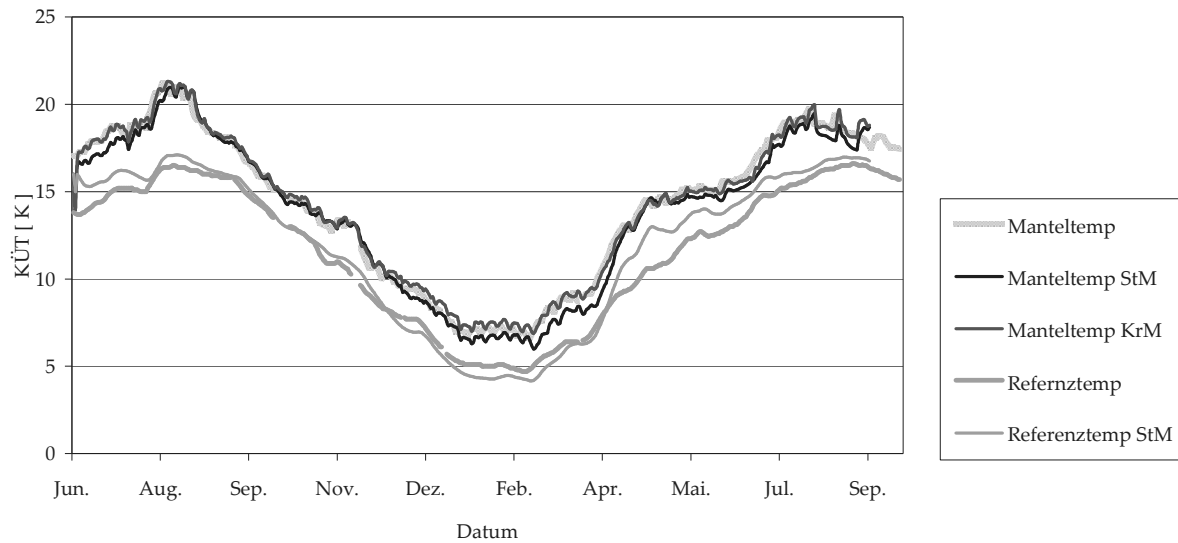


Abb. 5.2-1: Vergleich der modellierten und gemessenen Manteltemperatur

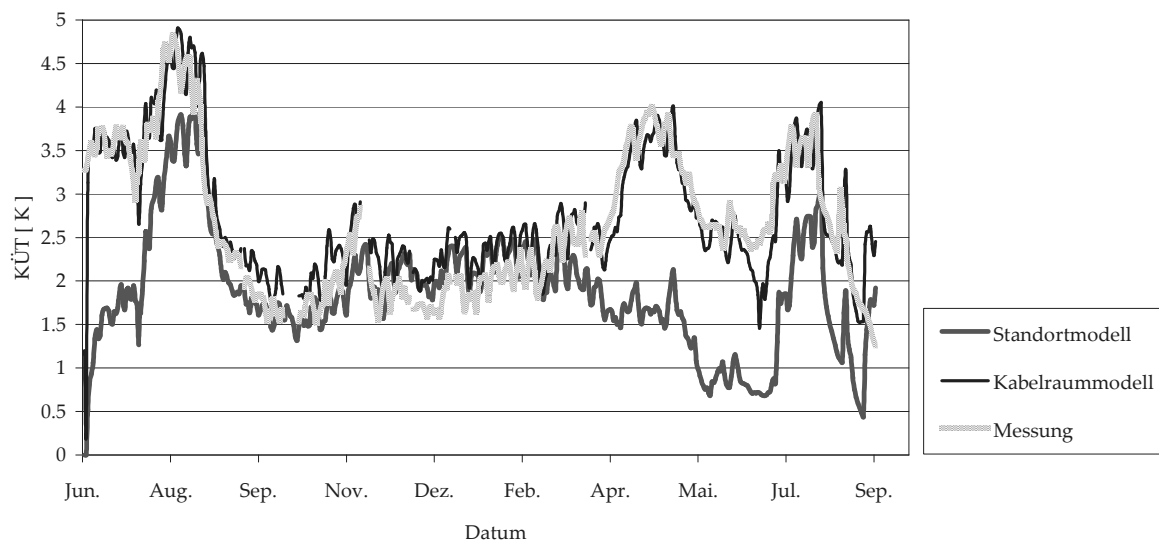


Abb. 5.2-2: Vergleich der simulierten und gemessenen Kabelübertemperaturen am Standort Wald

Für die Bewertung der Übertragungsfähigkeit ist die Leitertemperatur die entscheidende Größe. In Abb. 5.2-3 sind die für den Standort Wald simulierten Leitertemperaturen des Standort- und Kabelraummodells als Tagesmittelwerte dargestellt. Diese Ganglinien unterscheiden sich nur geringfügig. Im Vergleich ist die mit dem Wärmewiderstandsmodell berechnete Temperatur aufgetragen. In den ersten beiden Simulationsmonaten werden mit den Simulationsmodell Leitertemperaturen errechnet, die mit denen des WWM vergleichbar sind und zeitweise leicht übersteigen. Im weiteren Verlauf sind die simulierten Temperaturen deutlich geringer. Ein dem stationären Fall entsprechender Zustand stellt sich somit bei diesem Belastungsprofil nicht ein.

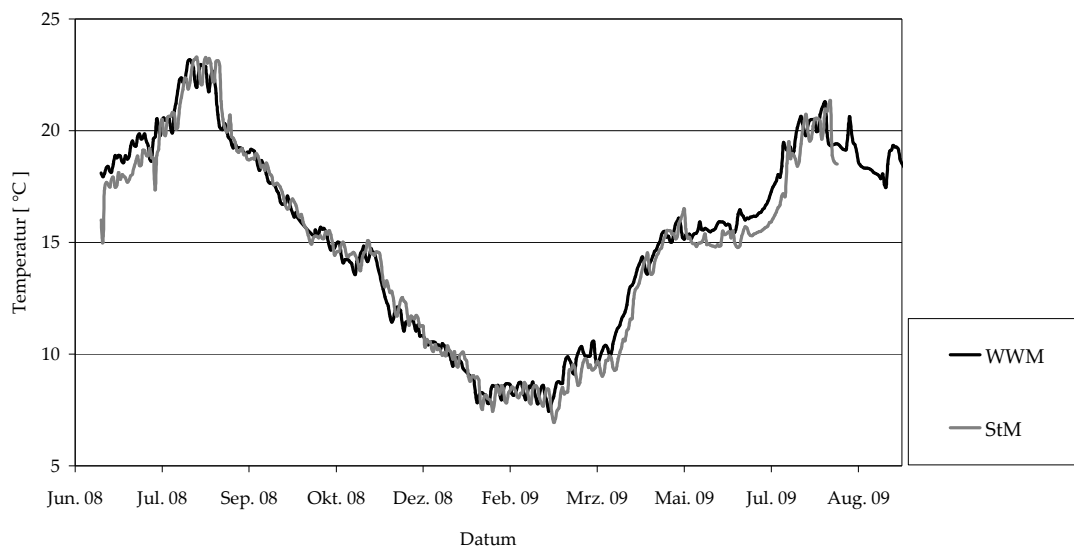


Abb. 5.2-3: Ganglinie der der Leitertemperaturen (Tagesmittelwerte): Berechnet mit dem WWM und dem Standortmodell

5.2.2 Messstelle Strasse

In Abb. 5.2-4 sind die gemessene Manteltemperatur (Tagesmittelwert aller Sensoren), sowie die mit dem Kabelraum- und Standortmodell berechneten Temperaturen im Jahresgang dargestellt. Es wird deutlich, dass die mit dem Kabelraummodell (KrM) berechnete Manteltemperatur eine gute Übereinstimmung zu den gemessenen Werten aufweist. Lediglich im Sommer 2009 wird die Temperatur durch das Modell unterschätzt. Die mit dem Standortmodell (StM) berechnete Manteltemperatur weist größere Unterschiede auf, zum Teil werden höhere und zum Teil niedrigere Temperaturen berechnet. Dabei deutet sich Zeitversatz zwischen Modellierung und Messung an. An der gemessenen und berechneten Referenztemperatur in der Verlegetiefe ist dieser Unterschied deutlich sichtbar. Das Standortmodell der Strasse kann somit den Wärmehaushalt des Bodens nicht optimal abbilden. Folgende Ursachen werden dafür angeführt:

- Für den Boden des Standortmodells wird ein homogener Aufbau aus Mittelsand im gesamten Profil angenommen und es liegt ein einheitlicher Wassergehalt vor. Diese vereinfachte Annahme weicht von den tatsächlichen Standortbedingungen ab, so dass vermutlich der Wärmeaustausch mit dem Oberboden unterschätzt wird.
- Die Bodentemperatur als untere Randbedingung des Standortmodells konnte nicht gemessen werden. Sie wurde aus den Messwerten der anderen Referenzsensoren abgeschätzt. Dadurch wird der Wärmetransport in den Unterboden möglicherweise fehlerhaft abgebildet.
- Durch Probleme in der Datenerfassung konnte im Sommer 200 die Bodentemperatur des Oberbodens der Strasse nicht gemessen werden. Die obere Randbedingung für diesen Zeit-

raum musste deshalb interpoliert werden. Dadurch wird der Wärmetransport mit Fehlern abgebildet.

Trotz der Abweichungen kann davon ausgegangen werden, dass die Simulation einer Kabeltrasse unter diesen Bedingungen plausible und realistische Ergebnisse liefert.

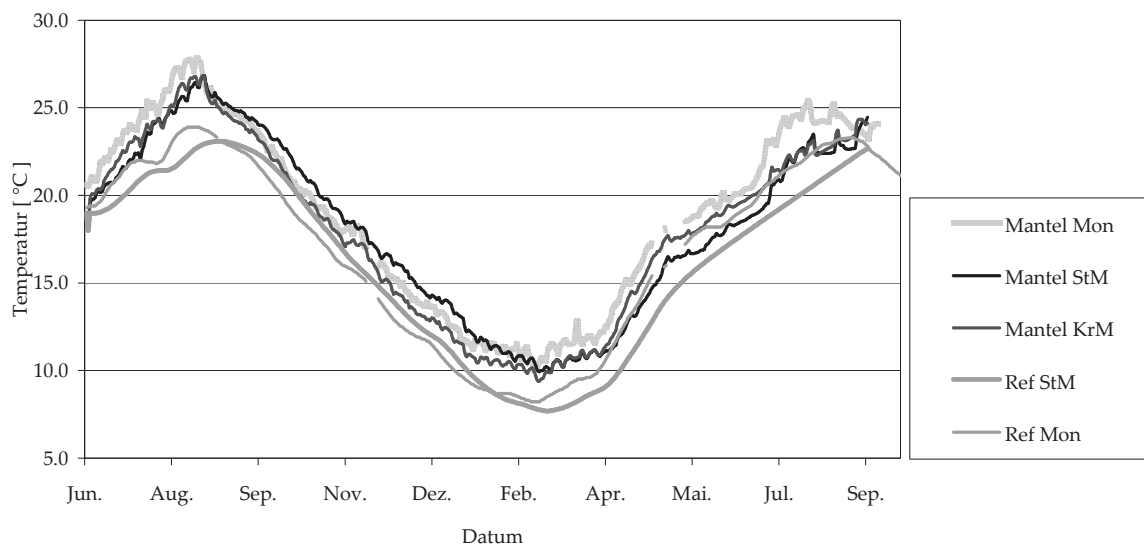


Abb. 5.2-4: Vergleich der modellierten und gemessenen Manteltemperatur

Die Monatswerte aus Monitoring, Standortmodell und Kabelraummodell sind in Tab. 5.2-2 aufgeführt. Hier zeigen sich die vorher diskutierten Unterschiede nicht und insbesondere bei der KÜT liegt eine gute Übereinstimmung zwischen Standortmodell und Messwerten vor. Der in Tab. 5.2-2 dargestellte Vergleich der KÜT zeigt, dass das Standortmodell über den gesamten Zeitraum eine sehr gute Übereinstimmung aufweist.

Tab. 5.2-2: : Vergleichstabelle der Monatswerte von Simulation und Messung Standort Strasse

		2008							2009							
		Jun.	Jul.	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	Jan	Feb	Mrz	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug
Mantel	Mon	21,6	24,4	26,7	23,9	20,4	17,9	14,6		11,1	11,4	13,8	17,9	19,7	23,0	24,3
	StM	20,1	22,9	25,7	24,4	21,4	18,2	15,5	12,9	10,9	10,5	12,0	15,8	17,8	20,6	22,7
	KrM	20,4	23,4	25,9	23,6	20,1	17,1	13,9	11,5	10,3	10,4	12,7	17,1	19,0	21,2	22,9
Ref	Mon	19,9	21,8	23,6	22,1	18,6	15,8	12,4	9,8	8,5	9,0	11,8	16,3	18,5	20,8	22,8
	StM	19,1	20,8	22,5	22,5	19,8	16,2	13,2	10,4	8,3	8,0	9,9	14,1	16,9	19,1	21,2
KÜT	Mon	1,7	2,6	3,1	1,9	1,8	2,1	2,2	2,4	2,5	2,4	2,0	1,6	1,2	2,1	1,5
	StM	1,0	2,1	3,2	1,9	1,6	2,0	2,3	2,5	2,6	2,5	2,0	1,7	0,9	1,5	1,5
	KrM	0,6	1,6	2,3	1,6	1,5	1,6	1,5	1,7	1,7	1,4	0,9	0,6	0,5	0,4	0,1

Abk.: Mantel - Temperatur des Kabelmantels [°C]; Ref - Referenztemperatur des unbeeinflussten Bodens [°C]; KÜT - Differenz zwischen Kabelmantel- und Referenztemperatur (Kabelüber Temperatur) [K]; Mon - beim Monitoring gemessene Temperatur; StM - mit dem Standortmodell berechnete Temperatur; KrM - mit dem Kabelraummodell berechnete Temperatur.

5.3 Bewertung des Einflusses von Klima und Standort auf die Kabeltemperatur

5.3.1 Ergebnisse mit konstanter Stromlast

Jede Simulation einer Variante ergab einen vier Jahre umfassenden zeitlichen Verlauf der Leiter-, Mantel- und Bodentemperaturen, sowie des Bodenwassergehalts im Kabelumfeld. Wie beim Standortmonitoring existiert auch hier ein deutlicher Jahresgang der Temperaturen: die höchsten Temperaturen treten im Sommer und die Niedrigsten im Winter auf. In Abb. 5.3-1 ist der Temperaturverlauf für die Variante Asphalt in 150 cm Verlegetiefe dargestellt. Anhand des ebenfalls dargestellten Monatsmittels der Lufttemperatur wird deutlich, dass die Kabeltemperatur sehr stark vom Witterungsverlauf gesteuert wird.

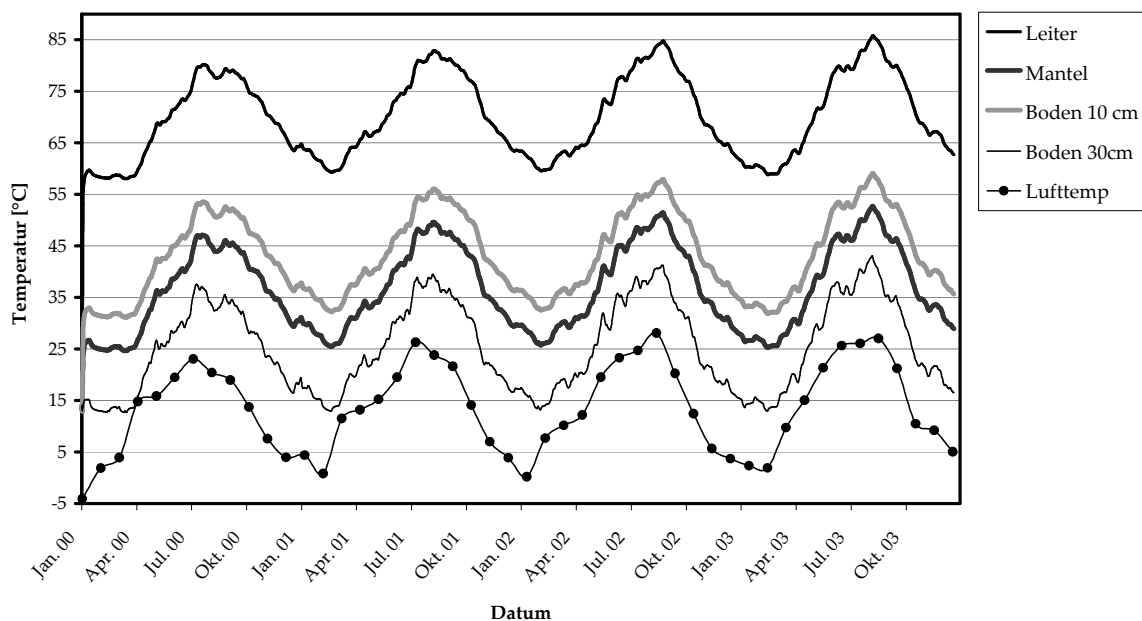


Abb. 5.3-1: Zeitlicher Verlauf der Temperatur des Leiters, des Mantels bei konstanter Stromlast und im Boden oberhalb des Kabelstrangs; Variante Asphalt in 150 cm Verlegetiefe (AS150)

Bei dieser Variante resultiert aus dem Witterungseinfluss eine Amplitude der Leitertemperatur von ca. 30 K. Der Witterungseinfluss tritt bei allen Standortvarianten auf, die daraus resultierende Kabeltemperatur wird von der Verlegetiefe und den Standortbedingungen beeinflusst. Die berechneten Leitertemperaturen sind in Abb. 5.3-2 dargestellt. Danach ist die Leitertemperatur unter Asphalt stets die Höchste und dies kann durch die höheren Bodentemperaturen im Sommer an diesen Standort erklärt werden. Weiterhin werden bei Kabeln mit größerer Verlegetiefe höhere Temperaturen erreicht. Hier zeigt sich, wie der Boden die Abfuhr der Verlustwärme vermindert. Anhand der unterschiedlichen Temperaturen bei den beiden Grünlandvarianten wird deutlich, dass die thermischen Eigenschaften der Bodenart und der Wasserhaushalt des Standorts einen Einfluss auf das Temperaturregime ausüben.

Die um ca. 3 – 4 K geringeren Kabeltemperaturen der Variante Grünland auf Sand gegenüber der auf Lehm sind demnach auf die geringere Wärmeleitfähigkeit der Bodenart zurückzuführen. Als Referenz für die Berechnungen des Wärmewiderstandsmodells (WWM, vgl. Kap. 2.2.3) verwendet. Die damit berechnete Leitertemperatur geht von einem $\sigma_{th,B} = 1 \text{ mK/W}$ und einer Oberflächentemperatur $T_O = 20^\circ\text{C}$ aus. Das WWM unterschätzt die Leitertemperatur für die Standortvariante Asphalt deutlich, für die Grünlandvarianten wird die Leitertemperatur überwiegend überschätzt.

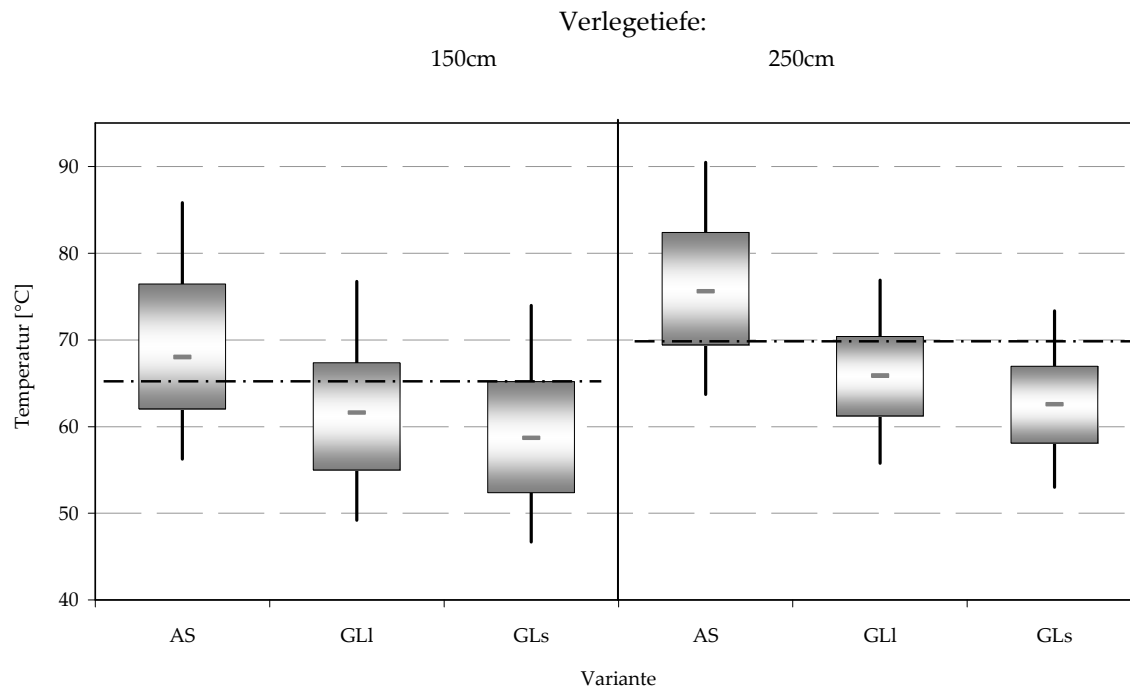


Abb. 5.3-2: Berechnete Leitertemperatur der drei Standortvarianten in zwei Verlegetiefen (AS – Asphalt, GLI – Grünland auf Lehm, GLs – Grünland auf Sand; gestrichelte Linie = mit WWM berechnet)

Anhand des Jahresgangs der Leitertemperatur kann der Einfluss des Witterungsverlaufes in Abhängigkeit der Standorteigenschaften und Verlegetiefe nachvollzogen werden. Die berechnete Leitertemperatur für die in 150 cm Tiefe (Abb. 5.3-3) und in 250 cm Tiefe (Abb. 5.3-4) verlegten Kabel zeigen die größten Unterschiede während des Winters (November - März). In dieser Zeit werden in 150 cm deutlich niedrigere Temperaturen erreicht. Während des Sommerhalbjahres ist der Unterschied zwischen den Verlegetiefen nur gering. Die höchsten Leitertemperaturen treten im August und September auf. Die mit dem WWM berechnete Leitertemperatur wird bei 150 cm Verlegetiefe im Sommer- und Herbst deutlich überschritten. In der Verlegetiefe 250 cm ist bei den Grünlandvarianten (GL1; GLs) die mit dem WWM errechnete Temperatur im Sommer und Herbst leicht überschritten. Während des Winters ist die Leitertemperatur der Asphaltvariante des Simulationsmodells ähnlich dem Wert des WWM; im Sommer wird die Temperatur sehr deutlich überschritten.

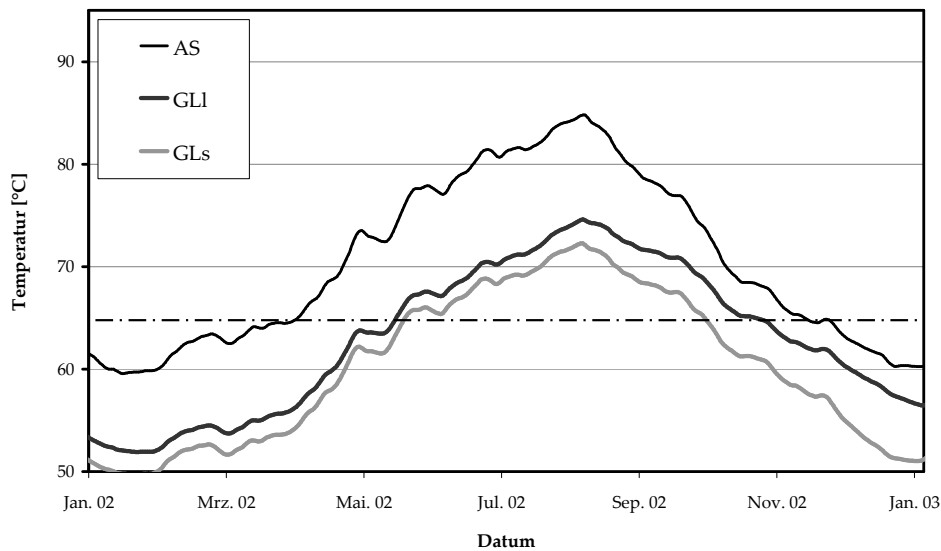


Abb. 5.3-3: Jahresgang der Leitertemperatur für ein Simulationsjahr der drei Standortvarianten mit 150 cm Verlegetiefe (gestrichelte Linie= Temperatur mit WWM berechnet)

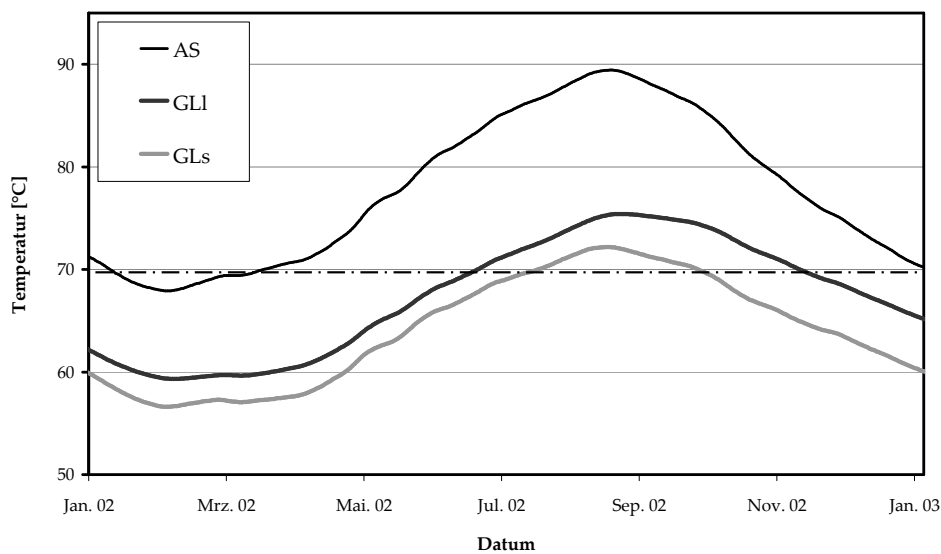


Abb. 5.3-4: Jahresgang der Leitertemperatur für ein Simulationsjahr der drei Standortvarianten mit 250 cm Verlegetiefe (gestrichelte Linie= Temperatur mit WWM berechnet)

Auch anhand der Temperaturverteilung im Bodenprofil kann der Einfluss des Standorts und der Witterung nachvollzogen werden. In Abb. 5.3-5 ist die Temperaturverteilung an einem Wintertag für die drei Standortvarianten dargestellt. Bei allen drei Standortvarianten liegt ein großer aufwärtsgerichteter Temperaturgradient vor, d.h. die Verlustwärme des Kabelstrangs kann gut abfließen. Der Temperaturgradient unterhalb des Kabels ist klein, d.h. der Wärmetransport in die Tiefe hat keine große Bedeutung. Unterschiede zwischen den Standortvarianten sind gut erkennbar. Bei der Asphaltvariante ergeben sich die höchsten Temperaturgradienten. Die thermischen Eigenschaften im Boden sind ungünstig für den Wärmetransport, mit der Konsequenz, dass diese Variante auch im Winter höhere Leitertempe-

raturen aufweist. Bei den Grünlandvarianten sind die Temperaturgradienten geringer, es liegen bessere thermische Substrateigenschaften vor.

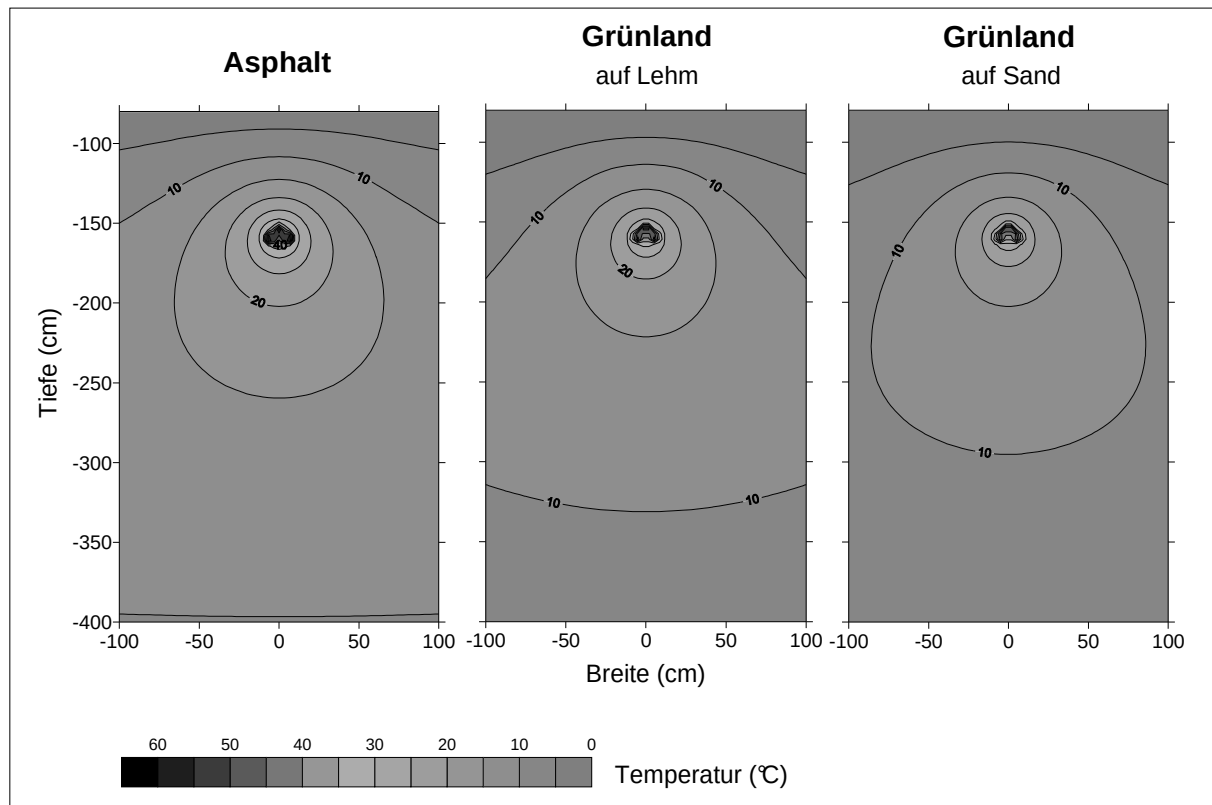


Abb. 5.3-5: Temperaturprofil des Bodens der drei Standortvarianten im Winter

In Abb. 5.3-6 ist die Temperaturverteilung an einem Sommertag dargestellt. Hier sind die nach oben und unten gerichteten Temperaturgradienten bei beiden Grünlandvarianten ähnlich groß, d.h. die Verlustwärme des Kabels wird sowohl an die Bodenoberfläche, als auch in den Unterboden abgeführt. Bei der Asphaltvariante ist der Temperaturgradient, bedingt durch die höheren Temperaturen im Oberboden, im unteren Bereich stärker ausgeprägt. Der Abtransport der Verlustwärme im Oberboden ist stark eingeschränkt. Dies führt wiederum zu höheren Kabeltemperaturen.

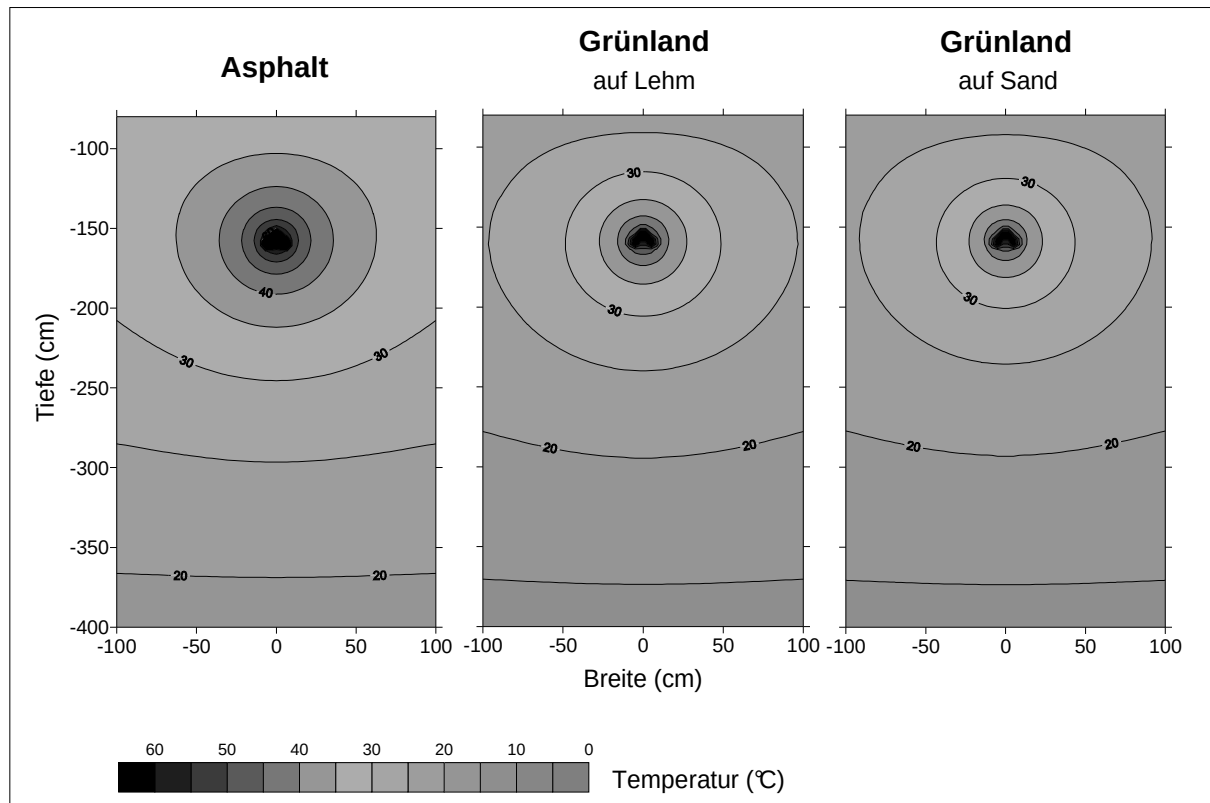


Abb. 5.3-6: Temperaturprofil des Bodens der drei Standortvarianten im Sommer

Um den Wärmetransport im Umfeld des Kabels zu betrachten, werden aus den Temperaturverläufen des Kabelmantels und des Bodens in 10 cm und 30 cm Abstand vom Kabel die Temperaturgradienten berechnet. In Abb. 5.3-7 ist der zeitliche Verlauf der Temperaturgradienten unter Asphalt dargestellt. Ganz deutlich erkennbar ist, dass der größte Gradient direkt unterhalb des Kabels vorliegt. Dies ist auf die Kabelanordnung (zwei untenliegende Leiter) zurückzuführen. Der Gradient ist im Sommer größer als im Winter, d.h. im Sommer muss ein größerer Teil der Verlustwärme über den Boden unterhalb des Kabels abfließen. Der Temperaturgradient in 20 cm Abstand unterhalb des Kabels ist deutlich geringer, d.h. für den Transport der Verlustwärme hat der Boden unterhalb des Kabels zwar eine untergeordnete Bedeutung, dieser Transport ist vor allem im Sommer bedeutend. Der Temperaturgradient oberhalb des Kabels ist im Winter größer als im Sommer, d.h. im Winter wird ein größerer Anteil der Verlustwärme auf direktem Weg zur Oberfläche transportiert. Während in der direkten Kabelumgebung der Temperaturgradient unterhalb des Kabels größer ist, ist er in 20 cm Abstand vom Kabel oberhalb größer.

Über den gesamten Simulationszeitraum ändert sich der Jahresgang der Gradienten kaum, die steigenden Bodentemperaturen zeigen somit keine Auswirkungen auf den Wärmetransport. Das bedeutet auch, dass kaum eine Veränderung der thermischen Eigenschaften des Substrates eintritt.

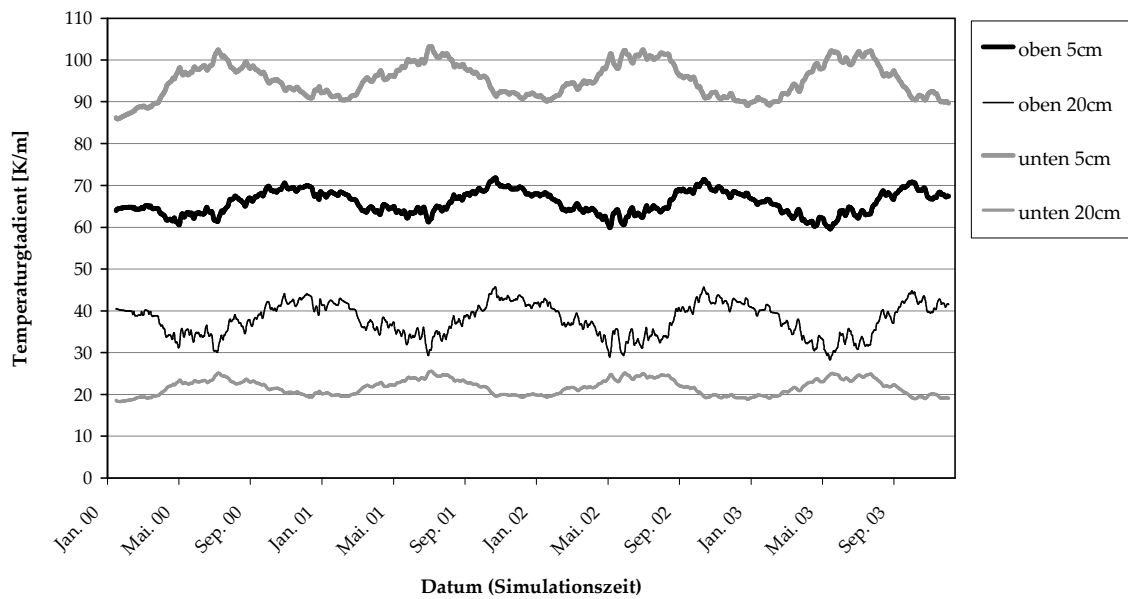


Abb. 5.3-7: Zeitlicher Verlauf der Temperaturgradienten ober- und unterhalb des Kabelstrangs, Variante Asphalt mit 150 cm Verlegetiefe

Bei der Standortvariante Grünland auf Sand mit der Verlegetiefe 150 cm sind die Temperaturgradienten geringer als in der Asphaltvariante (Abb. 5.3-8). Auch hier liegt direkt unterhalb des Kabels der größte Gradient vor. Die Gradienten zeigen im Gegensatz zur Asphaltvariante einen Anstieg mit der Simulationszeit. Das ist durch die zunehmende Trockenheit des Bodens zu erklären. Infolge der Austrocknung vermindert sich die Wärmeleitfähigkeit des Substrates. Insbesondere im Sommer wird der Wärmetransport im Oberboden eingeschränkt.

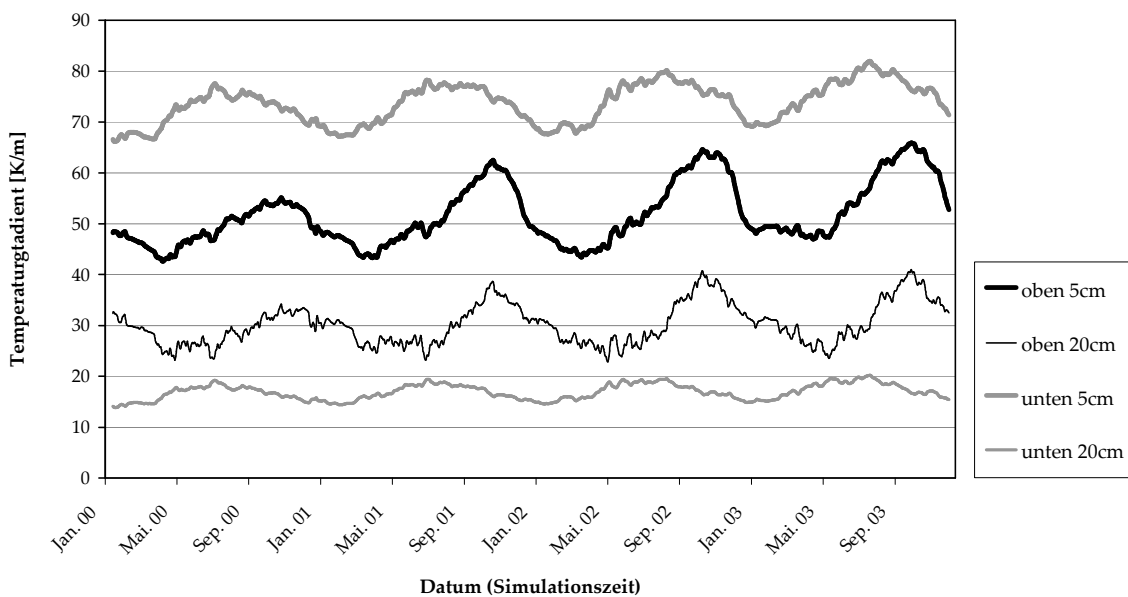


Abb. 5.3-8: Zeitlicher Verlauf der Temperaturgradienten ober- und unterhalb des Kabelstrangs, Variante Grünland auf Sand mit 150cm Verlegetiefe

Die Kabelerwärmung ist bei den Grünlandvarianten auch von der Wasserbilanz des Standorts geprägt. In Abb. 5.3-9 ist der berechnete Wassergehalt des Kabelsubstrates oberhalb des Kabels dargestellt. Bei der Asphaltvariante bleibt der Wassergehalt relativ konstant auf einem niedrigen Niveau. Die etwas geringeren Wassergehalte während des Sommers können durch den verstärkten Wasserdampftransport infolge der hohen Kabeltemperaturen im Sommer erklärt werden. Bei den beiden Grünlandvarianten variiert der Wassergehalt im Kabelsubstrat in Abhängigkeit vom Wassergehalt des Oberbodens. Durch Versickerung aus dem Oberboden wird das Kabelsubstrat in den Wintermonaten stark befeuchtet, während des Sommers trocknet der Kabelraum stärker aus. Im extrem trockenen letzten Simulationsjahr (03) reicht die Wassernachlieferung aus dem Boden nicht mehr für eine vollständige Wiederbefeuchtung des Füllsubstrates aus. Hier zeigen sich Unterschiede zwischen den Grünlandvarianten auf Lehm und Sand.

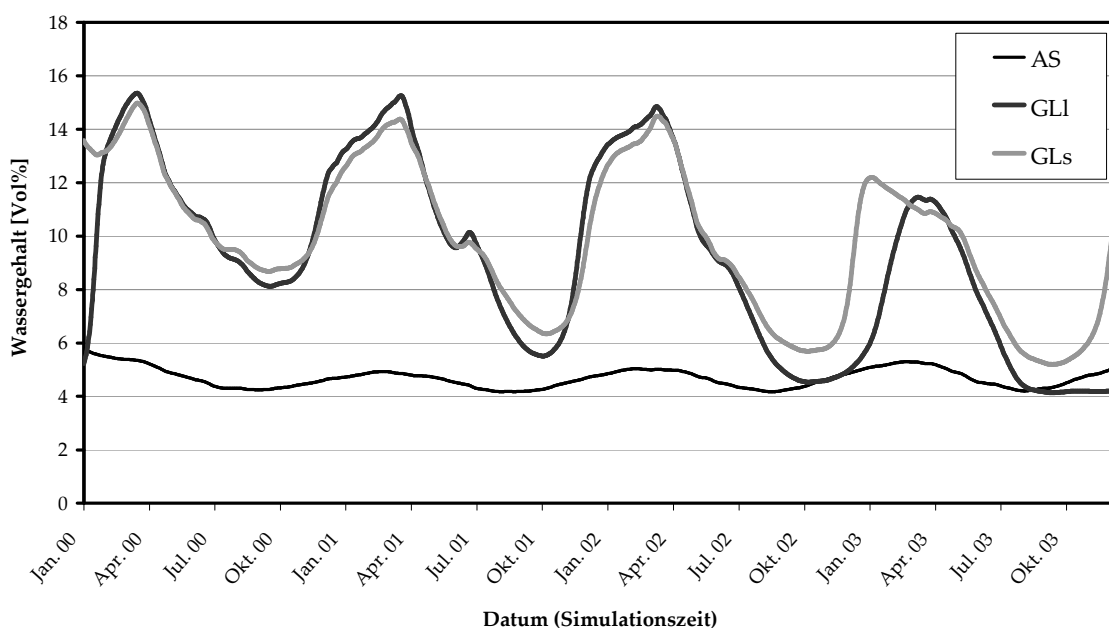


Abb. 5.3-9: Wassergehalt im Kabelsubstrat oberhalb des Kabelstrangs der Standortvarianten mit 150cm Verlegetiefe

Die Ausbildung einer Trockenzone im Umfeld des Kabels ist eine fundamentale Annahme zur Festlegung der Strombelastbarkeit von erdverlegten Kabeln (Brakelmann, 1986). In Abb. 5.3-10 ist die bei konstanter Stromlast berechnete Wassergehaltsverteilung im Boden dargestellt. Bei der Standortvariante Asphalt findet eine deutliche und weitreichende Austrocknung des Bodens statt. In einem Umkreis von 50 - 70 cm um das Kabel sinkt der Wassergehalt unter 5 Vol.%, was mit einer deutliche Zunahme des thermischen Widerstands des Substrates verbunden ist. Durch den anisothermen Wassertransport ist der Boden ausgetrocknet und aufgrund der hydraulischen Eigenschaften des Sandes bildet sich eine dauerhafte Trockenzone aus. Bei der Standortvariante Grünland auf Sand beschränkt sich die Austrocknung nur auf das direkte Kabelumfeld. Hier findet ein anisothermer Wassertransport statt, doch durch die Befeuchtung des Kabelraums im Winter und durch das höhere Wasserspeichervermögen des natürlichen Bodens, ist die Austrocknung nicht anhaltend und weit reichend. Dies ist Ursache für die bessere Wärmeleitfähigkeit des Substrates und die geringere Kabelerwärmung. Auch bei der Grünlandvariante auf Lehm ist keine ausgeprägte Trockenzone vorhanden. Dieses Ergebnis zeigt, dass

eine Austrocknung des Kabelraums sehr stark von den hydraulischen Eigenschaften des Bodensubstrats und dem Wasserhaushalt des Standortes abhängt.

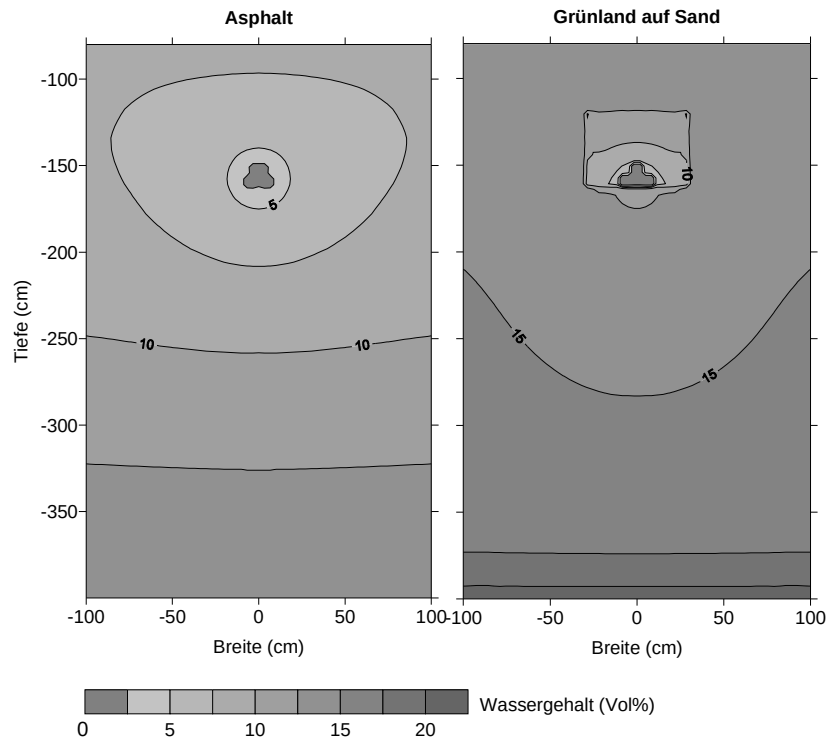


Abb. 5.3-10: Wassergehaltsverteilung im Boden der Standortvarianten Asphalt und Grünland auf Sand im Sommer

5.3.2 Ergebnisse mit transienter Stromlast

Im Folgenden werden die Simulationen mit einer transienten Stromlast für jede Variante vorgestellt. Hier wurde ebenfalls ein vier Jahre umfassender Verlauf der Leiter-, Mantel- und Bodentemperaturen, sowie des Bodenwassergehalts im Kabelumfeld berechnet.

Hinsichtlich der Temperaturverläufe existiert ein deutlicher Jahresgang: Die höchsten Temperaturen treten im Sommer und die Niedrigsten im Winter auf (vgl. Abb. 5.3-11). Ohne einer genauen Analyse der Einzeljahre und des Lastganges vorzugreifen, kann festgestellt werden, dass auch hier der Temperaturjahresgang im Boden die Kabeltemperatur bestimmt. Die Betrachtung der verschiedenen Simulationsvarianten wird zunächst für die Leitertemperatur dargelegt. Anschließend erfolgt eine Betrachtung der Bodentemperaturen und des Wasserhaushaltes.

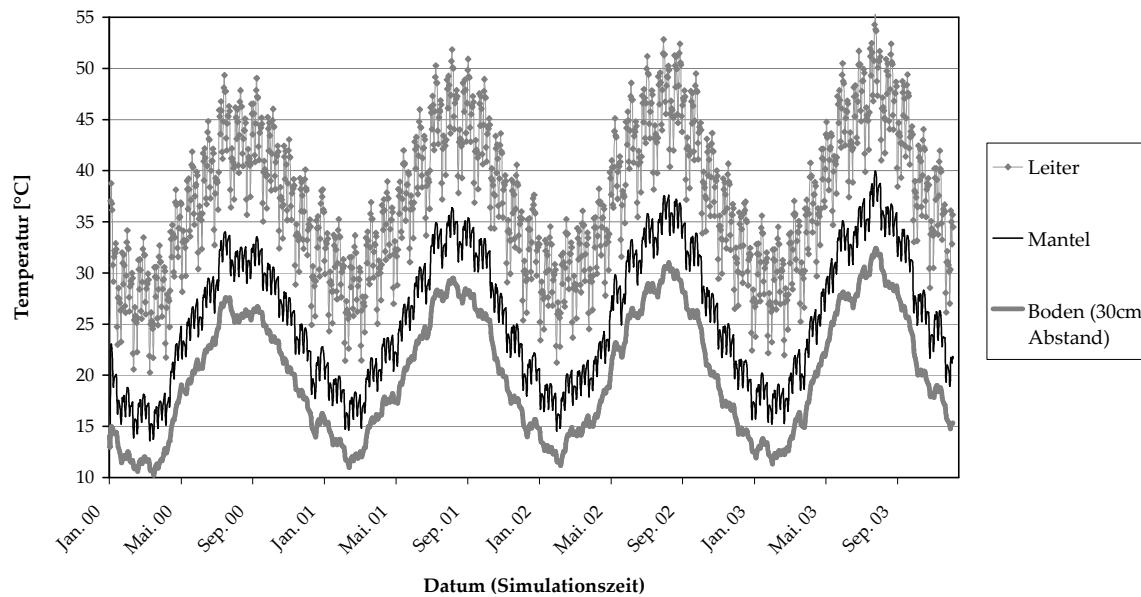


Abb. 5.3-11: simulierter Temperaturverlauf von Leiter, Kabelmantel und Boden der Variante GLs 150cm 510A

Leitertemperatur

Die Analyse und der Vergleich der Varianten erfolgen zunächst durch Boxplots. In Abb. 5.3-13 sind alle 18 Modellvarianten dargestellt, dabei werden die Leitertemperaturen für den gesamten Simulationszeitraum zusammengefasst. Die einzelnen Varianten sind nach dem Medianwert aufsteigend geordnet. Es bestehen hinsichtlich der Leitertemperatur in den Standort-, Stromlast- und Verlegetiefenvarianten deutliche Unterschiede.

Den größten Einfluss zeigt erwartungsgemäß die Stromlast. Die Verdoppelung der Stromlast erhöht die Leitertemperaturen um das Doppelte bis Dreifache. Der Temperaturanstieg ist somit geringer als die Zunahme der Verlustleistung, die sich dann vervierfacht hat. Der Wärmetransport im Boden nimmt überproportional zu und dies entspricht auch dem bodenphysikalischen Prozessverständnis.

Bezüglich des Maximalwertes der Leitertemperatur weisen die Asphaltvarianten die jeweils höchsten Temperaturen auf. Dieser Unterschied beträgt bei Spitzenlast mehr als 10K gegenüber den Grünlandvarianten. Auch bei der mittleren Leitertemperatur (Medianwert) und den Quartilsabständen sind diese Unterschiede der Varianten vorhanden.

Die Varianten mit der größeren Verlegetiefe (250 cm) haben in allen drei Standort- und Stromlastvarianten den höchsten Median der Leitertemperatur. In der Hoch- und Spitzenlastvariante werden sowohl beim Maximalwert, dem Median und auch in den oberen Quartilen die höchsten Temperaturen erreicht. Abb. 5.3-12 zeigt die Effekte des Jahresgangs der Bodentemperatur für die Variante AS150cm 680A. Dafür stellt der Boxplot die Leitertemperaturen nach Monaten sortiert dar. Hier ist zunächst klar erkennbar, dass in einer langen Periode des Jahres (Dezember – Mai) eine geringe thermische Belastung des Kabels vorliegt. In den Sommermonaten steigt die Leitertemperatur schnell an und erreicht im Spätsommer die höchsten Werte. Danach nimmt die Leitertemperatur langsam ab. Dieser Temperaturtrend entspricht dem Wärmehaushalt des Bodens. Auch in den Grünlandvarianten

liegt ein ähnlicher Jahresgang vor, allerdings auf geringerem Temperaturniveau. In den Varianten mit 250cm Verlegetiefe sinken die Leitertemperaturen erst einen Monat später ab, der sommerliche Anstieg erfolgt aber auch schon im Juni.

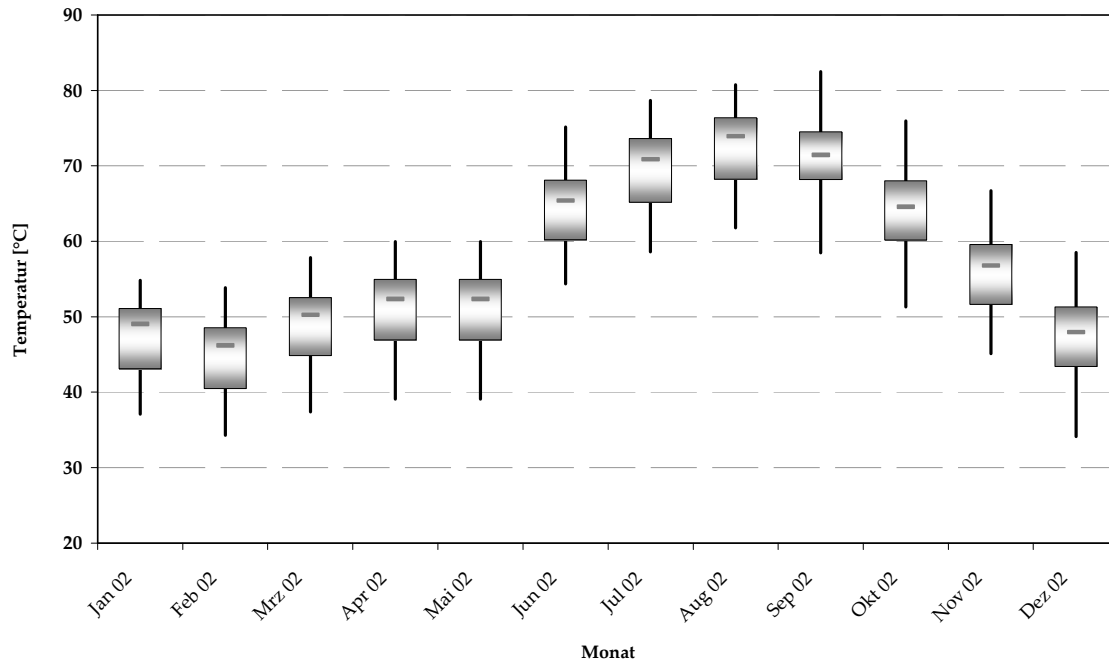


Abb. 5.3-12: Leitertemperatur der Asphaltvariante mit Spitzenlast und 150cm Verlegetiefe in den einzelnen Monaten.

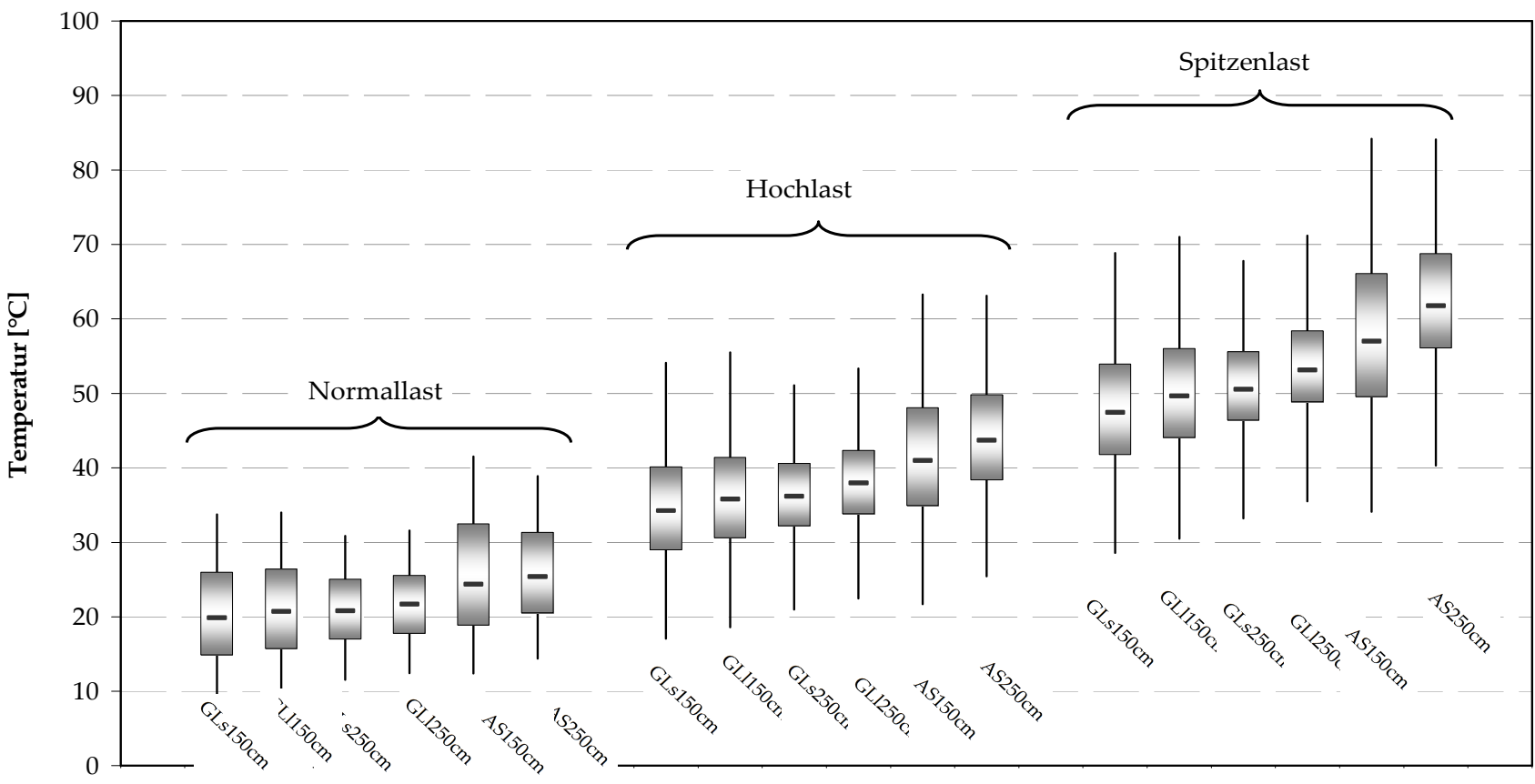


Abb. 5.3-13: Boxplots der Leitertemperaturen aller Varianten, aufsteigend nach dem Median geordnet

Die Auswirkungen des Erdkabels auf die Bodentemperatur im Kabelumfeld sind vor allem von der Lastvariante abhängig. Bei Normallast ist der Anstieg der Bodentemperaturen nur gering, unter Spitzenlast hingegen steigen die Bodentemperaturen stark an. Die dabei erreichten Werte sind mit den Temperaturfeldern unter konstanter Stromlast vergleichbar (vgl. Abschnitt 5.3.1). Am Beispiel der Standortvariante Grünland auf Sand und 150cm Verlegetiefe wird in Abb. 5.3-14 die Bodentemperatur in 30cm oberhalb des Kabelstrangs dargestellt. Danach steigt die Bodentemperatur in der Normallastvariante um 2-3 K gegenüber der unbeeinflussten Bodentemperatur an. Mit Steigerung der Stromlast erhöht sich die Erwärmung des Bodens um bis zu 10K in der Spitzenlastvariante. Unter hoher Stromlast werden damit Bodentemperaturen von über 30°C im Sommer erreicht. Bei der Grünlandvariante auf Lehm ist der Temperaturgang ähnlich, bei der Asphaltvariante steigt die Temperatur im Sommer auf über 40°C an.

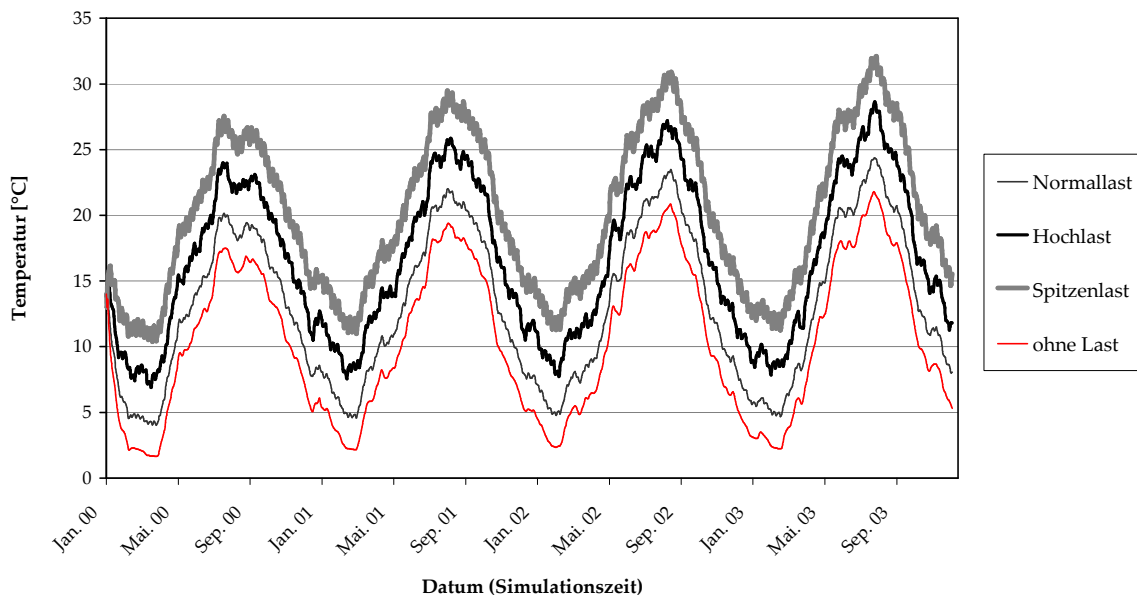


Abb. 5.3-14: Verlauf der Bodentemperatur in 30cm Abstand über dem Kabel bei den Lastvarianten in der Standortvariante Grünland auf Sand mit 150 Verlegetiefe

Abschließend wird der Wassergehalt im Rückfüllsubstrat betrachtet. Abb. 5.3-15 stellt die Ergebnisse für die Grünlandvariante auf Sand und 150 cm Verlegetiefe dar. Hier ist zunächst die grundsätzliche Abhängigkeit des Wassergehaltes vom Wasserhaushalt des Standorts erkennbar. Im Sommer trocknet das Substrat aus und im Winter wird es befeuchtet. Mit Anstieg der Stromlast vermindert sich der Wassergehalt um bis zu 3 Vol%. Der Beitrag des gekoppelten Wasser- und Wärmetransports an der Austrocknung ist damit im Gegensatz zum Standorteinfluss gering, und ein ausreichender Restwassergehalt bleibt auch in trockenen Sommern erhalten. Die Wassergehalte, die bei konstanter Stromlast erreicht werden zeigen, dass in dieser Variante noch geringere Wassergehalte als in der Spitzenlastvariante vorliegen. Bei transientem Betrieb kann somit immer wieder Wasser in das Kabelsubstrat zurückfließen. In der Asphaltvariante liegt kein Standorteinfluss auf den Wassergehalt im Kabelsubstrat vor (Abb. 5.3-16). Hier ist der gekoppelte Wasser- und Wärmetransport der bestimmende Prozess für den Wassergehalt. Im Mittel nimmt der Wassergehalt mit steigender Last ab, gleichzeitig vergrößert

sich die Schwankungsbreite. Vor allem bei der Spitzenlastvariante fällt dies auf, hier treten im Winter sehr hohe und im Sommer niedrige Wassergehalte auf. Dieser Vorgang ist mit dem Anstieg der Bodentemperaturen und der Zunahme des Dampfanteils im Boden zu erklären. Durch die transienten Wärmequellen kondensiert in der Kabelumgebung das Wasser und führt somit zu der deutlichen Ganglinie. Bei konstanter Last tritt ein solcher Prozess nicht auf, hier liegt die Austrocknung anhaltend vor.

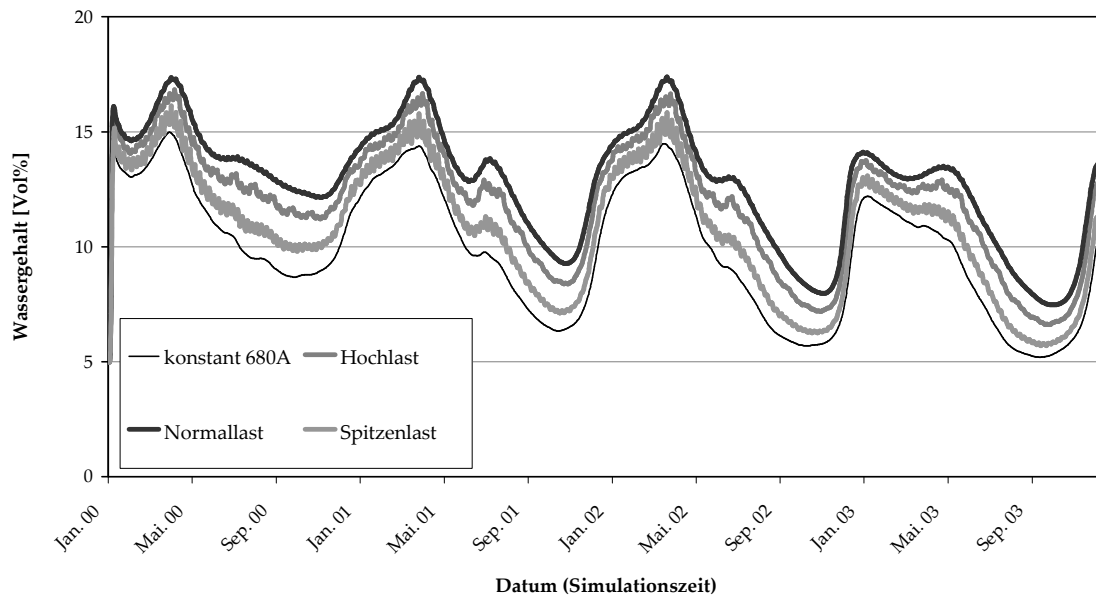


Abb. 5.3-15: Berechneter Wassergehalt im Kabelraum der Standortvariante Grünland auf Sand mit 150cm Verlegetiefe bei den Lastvarianten

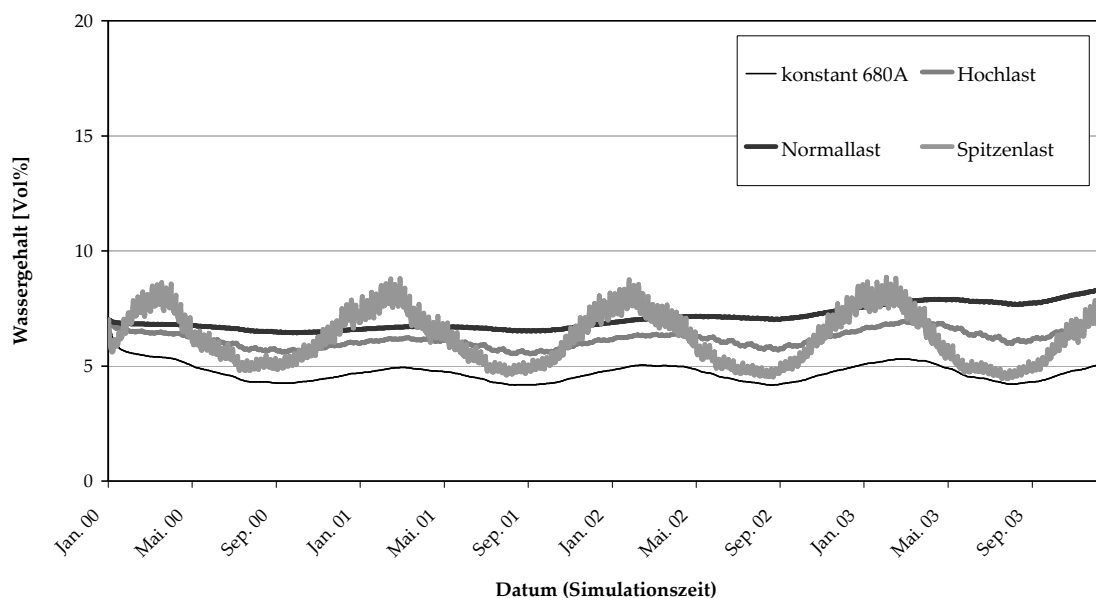


Abb. 5.3-16: Berechneter Wassergehalt im Kabelraum der Standortvariante Asphalt mit 150cm Verlegetiefe bei den Lastvarianten

6 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Das Ziel dieser Arbeit besteht in der Bewertung des Einflusses von Standort- und Bodeneigenschaften auf die Strombelastbarkeit erdverlegter Energiekabel, welche durch die Leitergrenztemperatur limitiert ist. Dafür ist die Abfuhr der Verlustwärme des Kabels im Boden ein ausschlaggebender Faktor. In der Netzplanung werden Bodeneigenschaften und Standorteinflüsse durch stark vereinfachte Annahmen berücksichtigt. Mit Messungen und Modellierungen werden die Einflüsse von Standort- und Bodeneigenschaften auf das Kabel untersucht und neue Bewertungsansätze entwickelt.

Um grundlegende Vorstellungen zu entwickeln, wie erdverlegte Energiekabel von den Standortbedingungen beeinflusst werden, wurden an einer Kabeltrasse zwei Messstellen eingerichtet. Dieses **Standortmonitoring** zeigte, dass vor allem der Wärmehaushalt der Standorte und der daraus resultierende Jahresgang der Bodentemperaturen für die Kabeltemperaturen ausschlaggebend ist. Die Temperaturen der unter einer Strasse verlegten Kabel waren um 5 – 10 K höher als die Temperatur der Kabel am Waldstandort. Die von der Strombelastung hervorgerufene Erwärmung des Kabels betrug maximal 5 K gegenüber dem unbeeinflussten Boden. Im Winter und bei niedriger Stromlast betrug die Erwärmung maximal 2-3 K. Der Boden in der Kabelumgebung erwärmt sich im Winter nur wenig, im Sommer hingegen stieg dort die Temperatur vor Allem am Standort Wald deutlich an. Die Temperaturgradienten zeigen, dass der Wärmetransport aus dem Kabelraum im Winter zur Bodenoberfläche gerichtet ist. Im Sommer findet auch ein Wärmetransport in die Tiefe statt.

Die **Ausbildung einer Trockenzone** aufgrund der Kabelerwärmung ließ sich beim Monitoring nicht feststellen. Am Standort Wald sank der Wassergehalt im Sommer stark ab, dies kann allerdings nur durch den Wasserentzug von Baumwurzeln plausibel erklärt werden. Diese Austrocknung vermindert die Wärmeleitfähigkeit des Bodens deutlich, aufgrund der geringen Stromlast in diesem Zeitraum wirkt sich das aber nicht deutlich auf die Kabeltemperatur aus. Im Winter verschwindet diese Trockenzone durch Sickerwasser vollständig. Die Austrocknung folgt somit der klimatischen Wasserbilanz und ist vom Feuchteregime des Standorts abhängig.

Die beim Standortmonitoring beobachteten Prozesse können mit dem Wärme- und Wasserhaushalt des Standorts erklärt werden. Der Einfluss des Kabels bzw. dessen Wärmeproduktion ist nur gering. Kritische Übertragungssituationen sind an beiden Standorten eher im Sommerhalbjahr zu erwarten. Bei der Verlegung unter Asphalt ist dies durch höhere Bodentemperaturen bedingt. Am Standort Wald dagegen wird der eingeschränkte Wärmetransport infolge des ausgetrockneten Bodens bei hoher Stromlast ein Problem darstellen.

Die **Labormessungen der Wärmeleitfähigkeit** von Füllsubstraten zeigen, dass Bodenart und Wassergehalt die ausschlaggebenden Einflussgrößen sind. Mit der eingesetzten Messmethode konnte die Abnahme der Wärmeleitfähigkeit mit dem Wassergehalt hoch aufgelöst bestimmt werden. Die Substrate mit einem hohen Sandanteil weisen im feuchten Zustand hohe Wärmeleitfähigkeiten ($\lambda > 2$ W/mK) bzw. einen niedrigen spezifischen thermischen Widerstand ($\sigma_{th} < 0,5$ mK/W) auf. Erst bei Unterschreitung eines kritischen Wassergehaltes (<5 Vol.%) sinkt die Wärmeleitfähigkeit schnell und stark bis unter 0,7 W/mK ($\sigma_{th} > 1,5$ mK/W). Substrate mit feiner Textur haben schon im feuchten Zustand eine niedrigere Wärmeleitfähigkeit: Die gemessenen Werte sind mit den Ergebnissen anderer

Untersuchungen vergleichbar. Der Vergleich zu Modellen für die Vorhersage der Wärmeleitfähigkeit zeigt, dass sich die gemessenen und vorhergesagten Verläufe deutlich voneinander unterscheiden.

Aus den gemessenen Werten wurde für drei Substratgruppen (Sande, lehmige Sande, Lehme) die Abhängigkeit des spezifischen thermischen Widerstands als Funktion des Wassergehaltes abgeleitet. Anhand dieser Funktionen und mithilfe der ebenfalls gemessenen hydraulischen Substrateigenschaften wird der Boden durch eine **thermische Widerstandscharakteristik** beschrieben. Anhand von fünf definierten Feuchtestufen, die sich aus boden- und standortkundlichem Systemverständnis ableiten, wird das Wasserhaushaltsregime des Standorts in einem **neuentwickelten Bewertungsschema** beschrieben. Um zusätzlich die Austrocknungsgefährdung in der Bewertung zu berücksichtigen, wird ein Bereich der Bodenfeuchte festgelegt, der eine optimale thermische Stabilität gewährleistet. Damit liegt ein standortkundliches Verfahren zur Festlegung des thermischen Widerstandes vor. Dieser Ansatz zur Substratbewertung zeigt, dass **lehmige Sande** unter dem Einfluss von Vegetation **deutlich bessere thermische Bedingungen** für das Kabel gewährleisten **als reine Sande**.

Zur Durchführung der **numerischen Studien** wurde die Simulationssoftware DELPHIN4 eingesetzt. Für das Modell wurde ein Kabelstrang im Boden zweidimensional abgebildet. Anhand von Modellen der beiden Messstellen des Standortminitorings erfolgte die Erprobung und Validierung der Berechnung. Hier zeigten sich im Vergleich von gemessenen Werten, zu den berechneten Ergebnissen, eine gute Übereinstimmung. Für die Studie zur Strombelastbarkeit wurde ein einzelner 110kV-Kabelstrang im Boden abgebildet und Varianten für drei Standortbedingungen und zwei Verlegetiefen definiert. Durch die obere Randbedingung wurden der Wasser- und Wärmehaushalt der Standorte für vier Simulationsjahre mit feucht-kühlem bis hin zu warm-trockenem Witterungsverlauf simuliert. Als Varianten der Strombelastung wurden eine konstante und drei transiente Stromlastgänge gewählt.

Die in den **Modellstudien berechnete Leitertemperatur**, als Zielgröße der Untersuchung, zeigt deutliche Unterschiede in den Standortvarianten. Unter einer Asphaltoberfläche sind die Leitertemperaturen des Kabelstrangs um ca. 10K höher als unter Grünland. Dies ist auf den unterschiedlichen Temperaturhaushalt der Standort, sowie auf die geringeren Wassergehalte des Bodens unter Asphalt zurückzuführen. Hinsichtlich der Verlegetiefe zeigte sich, dass aus einer tieferen Verlegung höhere Kabeltemperaturen resultieren, der Bodenkörper schränkt die Wärmeabfuhr an die Atmosphäre ein. Die Temperaturen aller Standortvarianten weisen einen deutlichen Jahresgang auf: während des Winterhalbjahres (Dezember - Mai) sind die Leitertemperaturen um 15-25 K niedriger als im Sommerhalbjahr. Bei Verlegung unter Asphalt wird der stärkste Anstieg verzeichnet, Grund dafür ist die deutlich höhere Temperatur der Asphaltoberfläche, was die Abfuhr der Verlustwärme des Kabels vermindert. Anhand der Temperaturgradienten im Boden kann nachvollzogen werden, dass während der Winters die Verlustwärme gut zur Bodenoberfläche abfließt. Der Boden unterhalb des Kabelstrangs hat dann kaum Einfluss auf den Wärmetransport. Während des Sommers bildet sich das Temperaturfeld auch unterhalb des Kabels aus und der Boden unterhalb des Kabels nimmt direkten Einfluss auf die Kabeltemperatur.

Die berechneten Wassergehalte im Kabelumfeld werden vom Wasserhaushalt des Standorts beeinflusst. Bei beiden Grünlandvarianten ist der Wassergehalt im Füllsubstrat während des Winterhalbjahres hoch und sinkt im Sommer aufgrund der Bodenaustrocknung stark ab. Eine zunehmende Aus-

trocknung führt zu steigenden Kabeltemperaturen. Bei hoher Stromlast verstärkt sich die Austrocknung des Füllsubstrates. Eine dauerhafte Trockenzone bildet sich nur in der Asphaltvariante aus, wofür fehlende Versickerung, sowie ungünstige hydraulische Bodeneigenschaften die Ursache sind. Unter konstanter Stromlast dehnt sich die Trockenzone (Wassergehalt <5 Vol%) unter Asphalt auf einen Umkreis von c. 50cm aus und schränkt die Wärmeabfuhr vom Kabel ein. Bei den Grünlandstandorten findet diese Austrocknung in einem kleinen Bereich statt: Die höhere Wasserspeicherung des umgebenden Bodens und die Befeuchtung durch Sickerwasser verhindern, dass eine umfangreiche und dauerhafte Trockenzone entsteht.

Hinsichtlich der einleitend für die Untersuchung aufgestellten Hypothesen werden folgende Schlussfolgerungen gezogen:

- Zu I: Auf die gemessenen und simulierten Kabeltemperaturen hat der Temperaturhaushalt des Bodens einen großen Einfluss. Klima und Strahlungshaushalt, hydrologische und bodenphysikalische Gegebenheiten bestimmen den Temperaturhaushalt und wirken so mittelbar auf die Kabeltemperatur. Der Standorteinfluss ist insbesondere für die thermische Belastung des Kabels in den Sommermonaten von Bedeutung.
- Zu II: Durch die Abhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit vom Wassergehalt müssen die thermischen Bedingungen für das Energiekabel im Zusammenhang mit dem Wasserhaushalt des Standorts betrachtet werden. In den Sommermonaten verursacht die Vegetation des Standorts unter Umständen eine Austrocknung des Kabelraums und vermindert die Wärmeabfuhr vom Kabel. Durch Versickerung wird dem Boden in der Kabelumgebung im Winterhalbjahr Wasser zugeführt, so dass die Trockenzone aufgehoben werden.
- Zu III: Wenn in der Bewertung der Substrateigenschaften neben dem Wassergehalt auch die hydraulischen Eigenschaften des Substrates berücksichtigt werden, ist eine bessere Bewertung möglich. Der Wassergehalt in der Kabelumgebung kann damit standortspezifisch bewertet und die Gefahr der Austrocknung der Kabelumgebung genauer eingeschätzt werden.
- Zu IV: Die Ausbildung einer Trockenzone im Kabelumfeld hat die stromlastabhängige Verlustwärme als Ursache. Für die räumliche Ausprägung bestehen Abhängigkeiten zu hydraulischen Substrateigenschaften, dem Feuchteregime des Standorts und dem Stromlastgang. Bei sehr hoher Stromlast und unter ungünstigen Boden- und Standortbedingungen, bildet sich eine weiträumige und dauerhafte Trockenzone aus, eine vollkommene Austrocknung konnte nicht nachgewiesen werden.

Mit den vorliegenden Ergebnissen zeigte die Forschungsarbeit, dass die Übertragungsfähigkeit von erdverlegten Energiekabeln im Mittel- und Hochspannungsbereich durch eine standort- und bodenkundliche Betrachtung optimiert werden kann. Die maximale Strombelastbarkeit kann besser eingeschätzt werden, als es mit den bislang stark vereinfachten Annahmen und Berechnungsverfahren der Energietechnik möglich ist. Es wurde ein Verfahren zum Monitoring der realen thermischen Bedingungen einer Trasse entwickelt, welches zeigt, wie der Energie- und Wasserhaushalt der Standorte die Übertragungsfähigkeit der Trasse als Funktion von Zeit und Tiefe beeinflussen. Mit der kombinierten Beschreibung von thermischen und hydraulischen Substrateigenschaften konnte ein differenzierter

Bewertungsansatz entwickelt werden. Dieser berücksichtigt sowohl das Feuchteregime, als auch die Austrocknungsgefahr der Kabelumgebung. Durch die Anwendung eines numerischen Modells konnte ein leistungsfähiges Werkzeug für die Betrachtung der Strombelastbarkeit zur Verfügung gestellt werden, welches sich insbesondere für die Betrachtung von kritischen Übertragungssituationen und für Fallstudien anbietet.

Aus der Arbeit leiten sich weitere Aufgaben der Boden- und Standortkunde im Bereich der Energiekabel ab, die einen wichtigen Beitrag für den zukünftigen Ausbau des Kabelnetzes darstellen:

- Entwicklung einer räumlichen Bewertungsmethode zur Planung von Kabeltrassen, welche den Einfluss des Energie- und Wasserhaushalts von natürlichen und urbanen Standorten berücksichtigt.
- Entwicklung eines Verfahrens zur kombinierten Messung von thermischen und hydraulischen Eigenschaften und Ableitung von 'technischen Pedotransferfunktionen'.
- Implementierung weiterer energietechnischer Modellvorstellungen in das numerische Simulationsmodell, um z.B. die stromlastabhängige Wärmeproduktion des Energiekabels, in Wechselwirkung mit den thermischen Bedingungen im Kabelraum, zu berücksichtigen.

Diese Aufgaben erfordern eine stärkere Zusammenarbeit der Standort- und Bodenkunde mit technischen Disziplinen und rücken das Aufgabenspektrum weiter in Richtung der Ingenieurwissenschaften.

Literatur

- Ad-hoc AG Boden (2005): (2005): bodenkundliche Kartieranleitung, Hrsg.: Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe und Niedersächsisches Landesamt für Bodenforschung, 5. Auflage, Hannover.
- Anders, G. J., H. S. Radhakrishna (1988): Power cable thermal analysis with consideration of heat and moisture transfer in the soil. IEEE Transactions on Power Delivery, 3 (4), 1280-1288.
- Applied Precision (2006): User Guide - ISOMET Model 2104 Heat Transfer Analyzer. Bratislava.
- ASTM (2000) Standard test method for determination of thermal conductivity of soil and soft rock by thermal needle probe procedure. ASTM 5334-00.
- Bohne, K. (2005): An introduction into applied soil hydrology. Catena Verlag, Reiskirchen.
- Bouyoucos, G.J. (1915-16): Effect of temperature on movement of water vapour and capillary moisture in soils. J. agric. Res. 5, 141-172
- Brakelmann, H. (1982): Einfluß eines natürlichen Temperaturgradienten im Boden auf die Belastbarkeit von Energiekabeln. Elektrizitätswirtschaft Jg. 81 323 - 327.
- Brakelmann, H. (1985): Belastbarkeiten der Energiekabel – Berechnmethoden und Parameteranalysen – VDE Verlag Berlin.
- Brakelmann, H. (1988): Thermische Stabilisierung von Kabelgräben. Elektrizitätswirtschaft Jg. 87 H.9: 486 – 492.
- Brakelmann, H. (2006): Kabelerwärmungen in Häufungstrassen für den Windenergietransport. Elektrizitätswirtschaft Jg. 105 H. 20. 14 – 18.
- Briggs, L.J. (1897): The Mechanics of Soil Moisture. U.S.A. Dep. Agric. Div. of Soils Bull. 10.
- Buchwald, A. & C. KAPS (1999): Zum Ionentransport bauschädlicher Salze in feuchtebelasteten Bauwerkstoffen, Einfluß der Porenmorphologie, Materials Science an Restoration Aedificatio Publishers, Freiburg, 1999.
- Buckingham, E. (1907): Studies on the movement of soil moisture. Bull. No. 38. Bureau of Soils, USDA, Washington, DC.
- Burdine, N.T. (1953): Relative permeability calculation from size distribution data. Trans. AIME, 198, 71-78, 1953.
- Callhan, P. M., D. A. Douglas (1987): An experimental evaluation of a thermal line uprating by conductor temperature and weather monitoring.
- Campbell G. S., J. D. Jungbauer, W. R. Bidlake, R.D. Hungerford (1994): Predicting the effect of temperature on soil thermal conductivity. Soil Science 158(5), 307 - 313.
- Cass, A., G.S. Campbell, T.L. Jones (1984): Enhancement of thermal water vapor diffusion in soil. Soil Sci. Soc. Am. J. 48: 25-32.
- Childs, E.C., and N. Collis-George (1950): The permeability of porous materials. Proc. Roy. Soc., Ser. A., 201, 392-405.

- Chung, S.-O., R. Horton (1987): Soil heat and water flow with a partial surface mulch. *Water Resour. Res.* 23: 2175–2186.
- Constantz, J. (1982): Temperature dependence of unsaturated conductivity of two soils. *Soil Sci. Soc. Am J.* 46, 466–470.
- Constantz, J. (1991): Comparison of isothermal and isobaric water retention paths in nonswelling porous media. *Water Resour. Res.* 27, 3165–3170.
- Cosenza, P., R. Guerin, A. Tabbagh (2003): Relationship between thermal conductivity and water content of soils using numerical modelling. *European Journal of Soil Science*, 54: 581–587.
- Côté, J., J. M. Konrad (2005): A generalized thermal conductivity model for soils and construction materials. *Can. Geotech. J.* 42: 443–458.
- Dane, J. H., J. W. Hopmans (2002): Water Retention and Storage In: Dane, J. H. und G. C. Topp (Hrsg.): *Methods of Soil Analysis. Part 4: Physical Methods*, 671–717.
- de Vries, D.A. (1963): Thermal properties of soils. In: Van Wijk, W.R. (Hrsg.), *Physics of Plant Environment*. John Wiley & Sons, Inc., New York: 210–235.
- DIN / ISO 11277(2002): Bodenbeschaffenheit - Bestimmung der Partikelgrößenverteilung in Mineralböden - Verfahren mittels Siebung und Sedimentation. Beuth Verlag, Berlin.
- DIN 19683-9 (1998): Bodenuntersuchungsverfahren im Landwirtschaftlichen Wasserbau - Physikalische Laboruntersuchungen - Teil 9: Bestimmung der Wasserdurchlässigkeit in wassergesättigten Stechzylinderbodenproben. Beuth Verlag, Berlin.
- DIN ISO 11274 (2001): Bodenbeschaffenheit - Bestimmung des Wasserrückhaltevermögens - Laborverfahren. Beuth Verlag, Berlin.
- Dirksen, C. (2000): Unsaturated Hydraulic Conductivity. In: Smith, K. S., C. E. Mullings (Hrsg.) *Soil and Environmental Analysis: Physical Methods*. CRC Pres, 183–236.
- Döll, P. (1996): Modeling of moisture movement under the influence of temperature gradients: desiccation of mineral liners below landfills. Dissertation. Schriftenreihe Bodenökologie und Bodengeneese der FG Bodenkunde und Regionale Bodenkunde der TU Berlin, Heft 20.
- Durner W., Halbertsma J., Cislerova, M. (Hrsg.) (1996a): European Workshop on Advanced Methods to Determine Hydraulic Properties of Soils, Thurnau, June 10–12, 1996, Department of Hydrology, University of Bayreuth
- Durner, W. (1995): SHYPPFIT 0.22 User's Manual. Research Report 95.1, Department of Hydrology, University of Bayreuth.
- Durner, W., A. Peters (2009) SHYPPFIT 2.0 – Software zur Anpassung hydraulischer Funktionen an Messdaten. In: *Böden - eine endliche Ressource*, September 2009, Bonn.
- Everett, D. H. & J. M. Haynes (1997): The Thermodynamics of Fluid Interface in a Porous Medium. Part II. Capillary Condensation, Surface Area and Pore Size Distribution Determination, and Hysteresis. *Z.f. Physikalische Chemie*, Neue Folge 1997, p. 301 – 312.
- Fayer, M.J., C.S. Simmons (1995): Modified soil water retention functions for all matric suctions. – *Water Resour. Res.* 31, 1233–1238.

- Flodsdorff, R., G. Hilgarth (2009): Elektrische Energieverteilung. 9. Auflage GWV Fachverlag Wiesbaden.
- Foty, M. S., G. J. Anders, S. C. Croall (1990): Cable environment analysis and the probabilistic approach to cable rating. *IEEE Transactions on Power* 5 (3): 1628 - 1633.
- Freitas D. S., A. T. Prata, A. J. de Lima (1996): Thermal performance of underground power cables with constant and cyclic currents in presence of moisture migration in the surrounding soil. *IEEE Transactions on Power Delivery* 11 (3), 1159-1170.
- Garrecht, H. (1992): Porenstrukturmodelle für den Feuchtehaushalt von Baustoffen mit und ohne Salzbefrachtung und rechnerische Anwendung auf Mauerwerk. Diss. Universität Karlsruhe.
- Giakoumakis, S.G., Tsakiris, G.P. (1991): Eliminating the effect of temperature from unsaturated soil hydraulic functions. *J. Hydrol.* 129, 109-125.
- Grunewald, J. (1997): Diffusiver und konvektiver Stoff- und Energietransport in kapillarporösen Baustoffen, Diss. TU Dresden.
- Grunewald, J. (2000): Documentation of the numerical simulationprogram DIM3.1., TU Dresden.
- Grunewald, J., R. Plagge, P. Häupl (1997): Prediction of coupled heat, air and moisture transfer in porous materials. In: van Genuchten M. Th., Leij, F. J., Wu, L. (Hrsg.): *Proceedings of the International Workshop on Characterization and Measurement of the Hydraulic Properties of Unsaturated Porous Media*. Riverside California, Part 2, 1561 – 1571.
- Halbertsma, J (1996): Wind's evaporation methode, determination of water retention characteristics and unsaturated hydraulic conductivity of soil samples; possibilities, advantages and disadvantages. In: Durner W., Halbertsma J., Cislerova, M. (Hrsg.), *European Workshop on Advanced Methods to Determine Hydraulic Properties of Soils*, Thurnau, June 10-12, 1996, Department of Hydrology, University of Bayreuth, 55-58
- Hanna, M. A., A. Y. Chikhani, M. M. A. Salama (1993): Thermal analysis of power cables in multi-layered soil. Part 2: Practical considerations. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 8 (3): 882-778.
- Herbst, M. (2008): Modellvergleich für Funktionen zur Beschreibung von Wasser-Retentionskurven. Diplomarbeit, Abteilung für Bodenkunde und Bodenphysik, Institut für Geoökologie, TU Braunschweig (unveröffentlicht), 61 Seiten.
- Hiraiwa, Y., T. Kasubuchi, (2000): Temperature dependence of thermal conductivity of soil over a wide range of temperature (5–75 °C). *European Journal of Soil Science*, 51: 211–218.
- Hoffmann, D., K. Niesel, R. Plagge (1996): Relationship between pore structure and other physico-technical characteristics of stone. *Congress Proceedings of the 8th. International Congress on Deterioration and Conservation of Stone in Berlin 1996*, Vol. 1, 461-472.
- Hopmans, J.W., Dane, J.H. (1986): Temperature dependence of soil hydraulic properties. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 50, 4-9.
- Hopmans, J.W., Dane, J.H. (1986b): Temperature dependence of soil water retention curves. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 50, 562-567.
- Johansen, O. (1975): Thermal conductivity of soils. Ph.D. diss. Norwegian University of Science and Technology., Trondheim (CRREL draft transl. 637).

- Jury, W.A., Miller, E.E. (1974): Measurement of the transport coefficients for coupled flow of heat and moisture in a medium sand. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 38, 551-557.
- King, F.H. (1892): Fluctuations in the Level and Rate of Movement of Ground-Water. U.S. Dep. Agric. Weather Bur. Bull 5.
- Klute, A., and C. Dirksen (1986): Hydraulic conductivity and diffusivity: Laboratory methods. p. 687-734. In A. Klute (ed.) *Methods of Soil Analysis. Part 1.* 2nd ed. Agron. Monogr. 9. ASA and SSSA, Madison, WI.
- Koopmans, G., G. M. L. van de Wiel, L. J. M. van Loon, C. L. Palland (1989): Soil physical route survey and cable thermal design procedure. : *IEE Proceedings, Part C*, 136 (6), 341-346
- Krischer, O., Rohnlalter, H. (1940): Wärmeleitung und Dampfdiffusion in feuchten Gütern. *VDI Forschungsheft* 11, 402-419.
- Künzel, H. M. (1994): Verfahren zur ein- und zweidimensionalen Berechnung des gekoppelten Wärme- und Feuchtetransportes in Bauteilen mit einfachen Kennwerten. Dissertation, Universität Stuttgart, 1994.
- Kutilek M., D.R. Nielsen (1994): *Soil Hydrologie. Geoecolgy textbook*, Catena Verlag.
- Lai, S.-H., J.M. Tiedje, A.E. Erickson (1976): In situ measurement of gas diffusion coefficient soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 40, 3-6.
- Lu, S., T. Ren, Y. Gong, R. Horton (2007): An Improved Model for Predicting Soil Thermal Conductivity from Water Content at Room Temperature. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 78: 8 - 4.
- Lunk, P. & F. H. Wittmann (1996): Feuchtigkeits- und Salztransport in Beton, Versuchsergebnisse und analytisches Modell, *Materials Science and Restoration Vol. III.*, Aedificatio Publishers, IRB-Verlag 1996.
- Martin, M. A., W.Z. Black, R. A. Bush, J. G. Hartley (1981): Practical Aspects of Applying Soil Thermal Stability Measurements to the Rating of Underground Power Cables. *IEEE Trans. Power Appar. and Sys. Vol.* 100 (9), 4236-4249.
- Meng, B. & Schiessl, P. (1992): Wechselseitige Beziehungen zwischen Parametern des Porenraumes und des Feuchtetransportes bei Sandstein, *Jahresbericht Steinzerfall – Steinkonservierung*, Ernst + Sohn, Berlin.
- Millar, R. J., M. Lethonen (2002): The effect of moisture migration, native soil environment and trough cement quality on the steady-state rating of HV power cables. *Tesla Report Nr. 66/2002*, Helsinki University of Technology.
- Millington, R.J. and J.P. Quirk (1961): Permeability of porous solids. *Trans. Faraday Soc.*, 57, 1200-1206, 1961
- Millington, R.J. and J.P. Quirk (1961): Permeability of porous solids. *Trans. Faraday Soc.*, 57, 1200-1206, 1961
- Milly, P.C.D. (1982): Moisture and heat transport in hysteretic, inhomogeneous porous media: a matrix head-based formulation and a numerical model. *Water Resour. Res.* 18, 489-498.
- Momose, T., T. Kasubuchi (2004): Estimation of the thermal separation of soil particles from the thermal conductivity under reduced air pressure. *European Journal of Soil Science*, 55: 193–199.

- Nimmo, J. R., J. Rubin, D. P. Hammermeister (1987), Unsaturated Flow in a Centrifugal Field: Measurement of Hydraulic Conductivity and Testing of Darcy's Law, *Water Resour. Res.*, 23(1), 124–134.
- Nimmo, J. R., K. A. Winfield (2002): Miscellaneous Methods In: Dane, J. H. und G. C. Topp (Hrsg.): *Methods of Soil Analysis. Part 4: Physical Methods*, 710-714.
- Nimmo, J. R., K. C. Akstin (1988): Hydraulic conductivity of a sandy soil at low water content after compaction by various methods. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 52, 303– 310.
- Nimmo, J.R., Miller, E.E. (1986): The temperature dependence of isothermal moisture vs. potential characteristics of soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 50, 1105-1113.
- Penman (1940): Penman, H.L. 1940. Gas and vapor movement in soil: The diffusion of vapors through porous solids. *J. Agric. Sci.* 30:437–462.
- Perrin, B. & M. Diaw (1999): Salt transport in porous materials, Report 10. Bauklimatisches Symposium, Band 2, TU Dresden 1999.
- Peters, A., W. Durner (2008): A simple model for describing hydraulic conductivity in unsaturated porous media accounting for film and capillary flow, *Water Resour. Res.*, 44.
- Philip, J.R., de Vries, D.A. (1957): Moisture movement in porous materials under temperature gradients. *Trans. AGU* 38(3), 222-232.
- Plagge, R. & J. Grunewald (2002): Determination of solute transport from laboratory tracer experiments. *Proceedings of the International Symposium on Building Physics in Nordic Countries*, University of Trondheim, Norway, 531-538.
- Plagge, R. (1991): Bestimmung der ungesättigten hydraulischen Leitfähigkeit. *Bodenökologie und Bodengenese Heft 3*, Institut für Ökologie, FG Bodenkunde, TU Berlin.
- Plagge, R. (2002): Application of multi-modal pore size distribution models to describe water storage and transfer in capillary porous building materials. *Symposium on: Measurement of water flow in porous material and its numerical simulation*, National Research Institute of Cultural Properties, Tokyo, Japan. 60-71.
- Plagge, R. (2004): Experimental technique to measure material parameters related to moisture flow. *Symposium on: Study of moisture problems related to the conservation of historical stone monuments and buildings*, National Research Institute for Cultural Properties, Tokyo, Japan, 19-32.
- Plagge, R. (2005): Hygrothermal Characterization of Building Materials. In: *Study of moisture movement in building material and its simulation analysis*, Seminar Book of Kyoto University, Katsura Campus, Japan, 20-41.
- Renger, M. , K. Bohne, M. Fcklam, T. Harrach, W. Riek, Schafer, W., G. Wessolek, S. Zacharias, (2008): Ergebnisse und Vorschläge der DBG-Arbeitsgruppe „Kennwerte des Bodengefüges zur Schätzung bodenphysikalischer Kennwerte. – In: Wessolek, G., Kaupenjohann, M., Renger, M. (Hrsg.): *Bodenphysikalische Kennwerte und Berechnungsverfahren für die Praxis*. *Bodenökologie und Bodengenese*, 40. Technische Universität Berlin: 5-51.
- Renger, M., M. Facklam, B. Kluge, L. Schlenter, G. Wessolek (2008): Wurzelwachstumsanomalien als Ursache fehlerhafter Ergebnisse bei langjährigen Wassergehalts- und Wasserspannungsmessungen von Waldstandorten. In: *Bodenzoologie und Ökologie. 30 Jahre Umweltforschung an der*

- Freien Universität Berlin. Jopp, F., S. Pieper. (Hrsg.). Theorie in der Ökologie, Band 12, Peterlang Verlag, Frankfurt am Main.
- Rossi, C., J.R. Nimmo (1994): Modeling of soil water retention from saturation to oven dryness: Water Resources Research, v.30, 701-708.
- Saito, H., J. Simunek, B. P. Mohanty (2006): Numerical Analysis of Coupled Water, Vapor, and Heat Transport in the Vadose Zone. Vadose Zone Journal 5:784–800.
- Schaap, M.G., Leij, F.J., van Genuchten, M.Th. (2001): Rosetta: a computer program for estimating soil hydraulic parameters with hierarchical pedotransfer functions. J. Hydrol. 251: 163-176.
- Schindler, U. (1980): Ein Schnellverfahren zur Messung der Wasserleitfähigkeit im teilgesättigten Boden an Stechzylinderproben. Arch. Acker- u. Pflanzenbau u. Bodenk., Berlin 24, 1-7.
- Schmidt-Döhl, F. & F. S. Rostasy (1999): A model for the calculation of combined chemical reactions and transport processes and its application to the corrosion of mineral building materials. I. Simulation model, II. Experimental Verification. Cement and Concrete Research, Bd. 29, S. 1039-1054.
- Stoffregen, H. (1998): Hydraulische Eigenschaften deponiespezifischer Materialien unter Berücksichtigung der Temperatur - Dissertation . Schriftenreihe Bodenökologie und Bodengenese der FG Bodenkunde und Regionale Bodenkunde der TU Berlin, Heft 32
- Stoffregen, H., Wessolek, G., Plagge, R., Renger, M. (1997): Effect of Temperature on Hydraulic Conductivity. In: van Genuchten M. Th., Leij, F. J., Wu, L. (Hrsg.): Proceedings of the International Workshop on Characterization and Measurement of the Hydraulic Properties of Unsaturated Porous Media. Riverside California, Part 1, 497 – 506.
- Toledo, P. G., R. A. Novy, H. T. Davis, L. E. Scriven (1990): Hydraulic Conductivity of Porous Media at Low Water Content. Soil Sci. Soc. Am. J. 54:673-679.
- Tuller, M. & D. Or (2001): Hydraulic conductivity of variably saturated porous media: Film and corner flow in angular pore space. Water Resour. Res., Vol.37, No.5, 1257-1276.
- UMS (2009): HYPROP Bedienungsanleitung. UMS GmbH München.
- Usowicz B. (1993): A method for the estimation of thermal properties of soil. Int. Agrophysics, 7(1): 27-34.
- Uther, D., H. Brakelmann, J. Stammen, E. Aldinger, P. Trüby (2009): Wärmeemission bei Hoch- und Höchstspannungskabeln. Zeitschrift für Energiewirtschaft Jg. 108 (10): 66 - 74.
- van Genuchten, M. Th. (1980): A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. Soil Sci. Soc. Am. J. 44, 892-898.
- van Genuchten, M. Th., F. J. Leij, S. R. Yates (1991): The RETC Code for Quantifying the Hydraulic Functions of Unsaturated Soils, Version 1.0. EPA Report 600/2-91/065, U.S. Salinity Laboratory, USDA, ARS, Riverside, California.
- Wagner, B. (1991): Bodenphysikalische, ingenieur- und hydrogeologische Untersuchungen zur Speicherung und zum Entzug von Niedertemperaturwärme in der wasserungesättigten Bodenzone mit vertikalen Wärmetauschern. Dissertation; Fakultät für Geowissenschaften der Ludwig-Maximilians-Universität, München.

- Wagner, B., V.R. Tarnawski, V. Hennings, U. Müller, G. Wessolek and R. Plagge, 2001. Evaluation of pedo-transfer functions for unsaturated soil hydraulic conductivity using an independent data set. *Geoderma*, 102: 275-297.
- Weast R.C. (Hrsg) (1987): Handbook of Chemistry and Physics, 68th edition.
- Wendroth, O., W. Ehlers, J.W. Hopmans, H. Kage, J Halbertsma und L.H.M. Wösten (1993): Re-valuation of the evaporation method for determining hydraulic functions in unsaturated soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 57:1436-1443.
- Wessolek, G. (1989): Einsatz von Wasserhaushalts-und Photosynthesemodellen in der Ökosystemanalyse. Schriftenreihe Landschaftsentwicklung und Umweltforschung Nr. 61 der Technischen Universität Berlin.
- Wessolek, G., W. H. M. Duijnisveld, S. Trinks (2008): Hydro-pedotransfer functions (HPTFs) for predicting annual percolation rate on a regional scale. *J. Hydrology* 356, 17– 27.
- Zaho, H.C., J. S. Lyall, G. Nourbakhsh (2000): Probabilistic cable rating based on cable thermal environment studying. *Proc. Power Syst. Technol.*: 1071–1076.

Tabellenverzeichnis

Tab. 2.1-1: Thermische Eigenschaften von Bodenbestandteilen (de Vries 1963).....	24
Tab. 2.3-1: Überblick zu den im Modell berücksichtigten Transportvorgänge.....	39
Tab. 3.1-1: Standortcharakteristik der beiden Messstellen.....	45
Tab. 3.1-2: Bodenphysikalische Profilkennwerte der Messstellen Strasse und Wald.....	46
Tab. 3.1-3: Liste der zum Monitoring eingesetzten Sensoren.....	47
Tab. 3.2-1: Bilanzierung der Wasserhaushaltskomponenten beider Standorte (Berechnung nach Wessolek et al. 2008).....	51
Tab. 3.2-2: Jahres- und Monatsmittelwerte der Bodentemperaturen der Standorte Strasse und Wald im Untersuchungszeitraum 2008/09	53
Tab. 3.2-3: Jahres- und Monatsmittelwert des Bodenwassergehaltes [Vol%] der Standorte Wald und Strasse im Untersuchungszeitraum 2008/09	53
Tab. 3.3-1: Monatsmittelwerte der Kabel- und die Referenztemperatur sowie der Kabelübertemperatur an den Standorte sowie die Strombelastung der Trasse im Untersuchungszeitraum 2008/09	57
Tab. 4.1-1: Bezeichnung, Herkunft und Charakteristik der untersuchten Substrate	63
Tab. 4.2-1: Partikelgrößenverteilung der Substrate.....	66
Tab. 4.2-2: Wasserretention und Wasserleitfähigkeit der Substrate.....	67
Tab. 4.2-3: Parameter der Wasserretentionsfunktion der Substrate	68
Tab. 4.2-4: Wärmeleitfähigkeit λ [W/mK] der Substrate bei verschiedenen Wassergehalten	70
Tab. 4.2-5: Parameter der Johansen-Funktion nach Lu et al. (2007) für die Substrate	72
Tab. 4.3-1: Aufnahme der Kabelstandorte im Berliner Stadtgebiet	76
Tab. 4.3-2: Parameter der Wassergehaltsabhängigkeit des spezifischen thermischen Widerstandes.....	79
Tab. 4.3-3: Standortspezifische Einstufung des Feuchtereigimes	81
Tab. 4.3-4: Thermischer Widerstand der Substrate in Abhängigkeit vom Feuchtereigime und Bereich der optimalen thermischen Flexibilität	82
Tab. 4.3-5: Bewertungstabelle	86
Tab. 5.1-1: Vergleich der mit verschiedenen Modellen berechneten Temperaturen von Leiter, Kabelmantel und im Boden (25cm Abstand vom Kabel) [°C]	91
Tab. 5.1-2: Vergleich der Simulationsergebnisse der Kabelstrangmodelle [°C].....	92
Tab. 5.1-3: Varianten der Standortbedingungen für die Betriebsszenarien	94
Tab. 5.2-1: : Vergleichstabelle der Monatsmittelwerte von Simulation und Messung Standort Wald	97
Tab. 5.2-2: : Vergleichstabelle der Monatswerte von Simulation und Messung Standort Strasse	100

Abbildungsverzeichnis

Abb. 2.1-1: Kombiniertes Transport von Wasser im Porenraum des Bodens (nach Stoffregen, 1998)	17
Abb. 2.2-1: Trassenquerschnitt Leipziger Strasse (Köhler, 2009)	29
Abb. 2.2-2: Aufbau eines VPE Kabels (Quelle: Tele-Fonika Kable, Polen).....	29
Abb. 2.2-3: Verlegung von Kabelsystemen im Mittel- und Hochspannungsbereich im Netz der VED Berlin (nach Köhler, 2009)	30
Abb. 2.2-4: Verluste eines 100 kV-Kabels in Abhängigkeit des Stromes und verschiedenen Kabeltemperaturen.....	32
Abb. 2.2-5: Temperaturgradient und Wärmefluss in einer ebenen Wand.....	33
Abb. 2.2-6: Schematische Darstellung des Wärmewiderstandsmodell für ein Einleiterkabel im Boden.....	34
Abb. 2.2-7: Schematische Darstellung des WWM für einen Kabelstrang in Dreiecksanordnung	35
Abb. 2.2-8 Mit dem WWM berechnete Leitertemperatur eines Kabelstrangs (links bei verschiedenen thermischen Widerständen des Bodens ($z = 1\text{m}$, $T_0=20^\circ\text{C}$), rechts bei verschiedenen Verlegetiefen ($\sigma_{th,B} = 1\text{mK/W}$, $T_0=15^\circ\text{C}$).....	35
Abb. 2.3-1: Überblick über DELPHIN4-Programmkomponenten (nach Grunewald, 2000).....	40
Abb. 2.3-2: Beispiel für typische Materialfunktionen, die vom Simulationsprogramm DELPHIN4 verwendet werden, Funktionen der Porenvolumenverteilung, Wasserretentionscharakteristik, Flüssigwasserleitfähigkeit und Wasserdampfdiffusion porösen Materials (Grunewald, 2000)	41
Abb. 3.1-1: Übersichtskarte zum Trassenverlauf	44
Abb. 3.1-2: Schematischer Aufbau des Kabelraumes und des Bodenprofils an den Messstellen Strasse (links) und Wald (rechts)	46
Abb. 3.1-3: Aufbau der Messstelle Strasse	48
Abb. 3.1-4 Aufbau Messstelle Wald	49
Abb. 3.2-1: Zeitlicher Verlauf der Bodentemperaturen in verschiedenen Tiefen am Standort Wald im Untersuchungszeitraum 2008/09	50
Abb. 3.2-2: Zeitlicher Verlauf der Bodentemperaturen in verschiedenen Tiefen am Standort Strasse im Untersuchungszeitraum 2008/09	51
Abb. 3.2-3: Zeitlicher Verlauf des Bodenwassergehaltes in verschiedenen Tiefen am Standort Wald im Untersuchungszeitraum 2008/09	52
Abb. 3.3-1: Zeitlicher Verlauf der Stromlast und Verlustleistung eines Kabelstrangs (Tagesmittelwerte)	54
Abb. 3.3-2: Zeitlicher Verlauf der Temperaturen des Kabelmantels und die zugehörige Referenztemperatur an beiden Standorten im Untersuchungszeitraum 2008/09	55
Abb. 3.3-3: Zeitlicher Verlauf der Kabelübertemperatur ($K\ddot{U}T$) an den Standorten im Untersuchungszeitraum 2008/09	55
Abb. 3.3-4: Zeitlicher Verlauf des Wassergehaltes von Sensoren im Kabelraum am Standort Wald.....	56
Abb. 3.4-1: Zeitlicher Verlauf der mit dem Wärmewiderstandsmodell errechneten Leitertemperatur am Standort Wald und gemessene Temperatur des Kabelmantels	58
Abb. 3.4-2: Zeitlicher Verlauf der Abweichung der Temperatur von zwei Sensoren vom Mittelwert am Kabelmantel (Standort Wald)	59
Abb. 3.4-3: Zeitlicher Verlauf der Temperaturen der Sensoren ober- und unterhalb des Kabels (Standort Wald)	59
Abb. 3.4-4: Temperaturverteilung im Boden, Standort Wald (rechter Strang)	60

Abb. 3.4-5: Ganglinien der Temperaturen und Stromlast im Winter am Standort Wald	61
Abb. 3.4-6: Ganglinien der Temperaturen und Stromlast im Sommer am Standort Wald.....	61
Abb. 3.4-7: Zeitlicher Verlauf der aus dem Bodenwassergehalt berechneten Wärmeleitfähigkeit im Kabelraum (Standort Wald).....	62
Abb. 4.1-1: Schematischer Aufbau des Experiments zur Bestimmung der thermischen Leitfähigkeit bei unterschiedlichen Wassergehalten	65
Abb. 4.1-2: Verlauf des Wassergehaltes und der Wärmeleitfähigkeit des Substrates mS während des Experimentes	65
Abb. 4.2-1: Sieblinie der Füllsubstrate.....	67
Abb. 4.2-2: Ungesättigte Wasserleitfähigkeit (log ku) der Substrate in Abhängigkeit vom Wassergehalt.....	68
Abb. 4.2-3: Wasserretentionsfunktion der Substrate mit der Anpassung nach Fayer and Simmons (1995).....	69
Abb. 4.2-4: Abhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit vom Wassergehalt der Füllsubstrate (Kreuze: Messdaten, Linie: Anpassung der Johansen-Funktion)	71
Abb. 4.2-5: Vergleich des an die eigene Daten angepassten Funktionsverlaufs mit Funktionsverläufen aus den Rechenregeln von Johansen (1975) und Lu et al. (2007).....	72
Abb. 4.2-6: Vergleich eigener Messungen mit Ergebnissen von Ren et. al. (1999).....	73
Abb. 4.3-1: Lage der untersuchten Profile in Berlin und Gliederung des Naturraums	74
Abb. 4.3-2: Bodenprofile von Trassenstandorten der typischen geologischen Einheiten (rote Nummer= Standorte in Tab. 3.3-1)	75
Abb. 4.3-3: Wassergehaltsabhängigkeit des thermischen Widerstandes der drei Substratgruppen	78
Abb. 4.3-4: Thermische Widerstandscharakteristik von vier Füllsubstraten.....	80
Abb. 4.3-5: Speicherkapazität der Substrate	82
Abb. 4.3-6: Standorte der Trassenbewertung in Berlin Mitte (Quelle: Google Maps 2010).....	83
Abb. 4.3-7: gemessene Wärmeleitfähigkeit der Proben in Abhängigkeit vom Wassergehalt und der Trockenrohdichte (TRD)	84
Abb. 4.3-8: Abhängigkeit des spezifischen thermischen Widerstands des Bodens vom Wassergehalt (durchgehende Linie) und Unsicherheitsbereiche aufgrund von Heterogenität (gestrichelte Linien)	84
Abb. 4.3-9: Wasserretention und thermischer Widerstand des Bodensubstrates, verschieden Feuchtestufen sind eingezeichnet	85
Abb.5.1-1: Aufbau der verschiedenen Modelle	89
Abb. 5.1-2: modellierter Temperaturverlauf bei konstanter Wärmequelle mit verschiedenen Modellgeometrien.....	90
Abb. 5.1-3: modellierter Temperaturverlauf bei transienter Wärmequelle mit verschiedenen Modellgeometrien.....	91
Abb. 5.1-4: Aufbau der Modellgeometrie der Kabelstrangmodelle.....	92
Abb. 5.1-5: Modellgeometrie der Monitoringstandorte	93
Abb. 5.1-6: Geometrie des 2D-Modells der Betriebsszenarien.....	94
Abb. 5.1-7: 29-Tage Zyklus der Strombelastung in den verschiedenen Lastvarianten	95
Abb. 5.1-8: Übersicht zu den Betriebsszenarien	96
Abb. 5.1-9: Zeitlicher Verlauf der Bodentemperatur (T) und des Matrixpotenzials (h) als oberen Randbedingung der Betriebsszenarien.....	96

Abb. 5.2-1: Vergleich der modellierten und gemessenen Manteltemperatur	98
Abb. 5.2-2: Vergleich der simulierten und gemessenen Kabelübertemperaturen am Standort Wald	98
Abb. 5.2-3: Ganglinie der der Leitertemperaturen (Tagesmittelwerte): Berechnet mit dem WWM und dem Standortmodell.....	99
Abb. 5.2-4: Vergleich der modellierten und gemessenen Manteltemperatur	100
Abb. 5.3-1: Zeitlicher Verlauf der Temperatur des Leiters, des Mantels bei konstanter Stromlast und im Boden oberhalb des Kabelstrangs; Variante Asphalt in 150 cm Verlegetiefe (AS150).....	101
Abb. 5.3-2: Berechnete Leitertemperatur der drei Standortvarianten in zwei Verlegetiefen (AS – Asphalt, GLI – Grünland auf Lehm, GLs – Grünland auf Sand; gestrichelte Linie = mit WWM berechnet)	102
Abb. 5.3-3: Jahresgang der Leitertemperatur für ein Simulationsjahr der drei Standortvarianten mit 150 cm Verlegetiefe (gestrichelte Linie= Temperatur mit WWM berechnet).....	103
Abb. 5.3-4: Jahresgang der Leitertemperatur für ein Simulationsjahr der drei Standortvarianten mit 250 cm Verlegetiefe (gestrichelte Linie= Temperatur mit WWM berechnet).....	103
Abb. 5.3-5: Temperaturprofil des Bodens der drei Standortvarianten im Winter	104
Abb. 5.3-6: Temperaturprofil des Bodens der drei Standortvarianten im Sommer.....	105
Abb. 5.3-7: Zeitlicher Verlauf der Temperaturgradienten ober- und unterhalb des Kabelstrangs, Variante Asphalt mit 150 cm Verlegetiefe	106
Abb. 5.3-8: Zeitlicher Verlauf der Temperaturgradienten ober- und unterhalb des Kabelstrangs, Variante Grünland auf Sand mit 150cm Verlegetiefe	106
Abb. 5.3-9: Wassergehalt im Kabelsubstrat oberhalb des Kabelstrangs der Standortvarianten mit 150cm Verlegetiefe	107
Abb. 5.3-10: Wassergehaltsverteilung im Boden der Standortvarianten Asphalt und Grünland auf Sand im Sommer	108
Abb. 5.3-11: simulierter Temperaturverlauf von Leiter, Kabelmantel und Boden der Variante GLs 150cm 510A	109
Abb. 5.3-12: Leitertemperatur der Asphaltvariante mit Spitzenlast und 150cm Verlegetiefe in den einzelnen Monaten.....	110
Abb. 5.3-13: Boxplots der Leitertemperaturen aller Varianten, aufsteigend nach dem Median geordnet	111
Abb. 5.3-14: Verlauf der Bodentemperatur in 30cm Abstand über dem Kabel bei den Lastvarianten in der Standortvariante Grünland auf Sand mit 150 Verlegetiefe.....	112
Abb. 5.3-15: Berechneter Wassergehalt im Kabelraum der Standortvariante Grünland auf Sand mit 150cm Verlegetiefe bei den Lastvarianten	113
Abb. 5.3-16: Berechneter Wassergehalt im Kabelraum der Standortvariante Asphalt mit 150cm Verlegetiefe bei den Lastvarianten	113