

Grundlagen der gekoppelten Wärmetransportberechnung mit der elektromagnetischen Kabelsimulation

-

Optimierung der Wärmeleitfähigkeiten und Kabelabstände für das elektrotechnische Zwei- Schichten-Modell

Auftraggeber:



Amprion GmbH
Robert-Schumann-Strasse 7
44263 Dortmund

Auftragnehmer:

GeoAnalysis-Engineering GmbH
Schauenburgerstrasse 116
24118 Kiel

Tel.: 0431 / 53032960
E-Mail: info@GeoAnalysis-Engineering.de

Projektleitung:

Dr.-Ing. Zarghaam Rizvi / Prof. Dr. Frank Wuttke

Bearbeiter:

Dr. Zarghaam Rizvi
Dr. Linwei Du
Dr. Guying Du
M.Sc. Johannes Nordbeck

Inhaltsverzeichnis

ABBILDUNGSVERZEICHNIS	5
1 BODENKUNDLICHE-GEOTECHNISCHE GRUNDLAGEN	6
1.1 Allgemeines	6
2 MODELLIERUNG DER MASSEN- UND WÄRMETRANSPORT INNERHALB DER PORÖSEN BODENSTRUKTUR	6
2.1 Beschreibung physikalischer Prozesse	6
2.2 Auswahl und Überprüfung der physikalischen Modelle	7
2.3 Randbedingungen des Modells zur Oberfläche	9
2.3.1 Berücksichtigung der Evapotranspiration im Modell	11
3 MODELLIERUNG DER ELEKTROTECHNISCHEN STRUKTUREN UND KOPPLUNG DER FELDGLEICHUNGEN ZWISCHEN ELEKTROTECHNIK UND DEN HYDRO-DIFFUSIVEN FELDGLEICHUNGEN IM PORÖSEN GEBIETEN.	12
3.1 Numerische Berechnung	14
3.1.1 Initial- und Eingangswerte für die Wärme- und Massentransport-Simulation	14
3.1.2 Modellrandbedingungen in der Simulation	15
3.2 Vorbereitende Arbeiten: Aufbereitung Wetterdaten, Kalibrierung	16
3.2.1 Wetterdaten	16
3.2.2 Kalibrierung	16
3.2.3 Berücksichtigung der Streuung	16
3.3 Bodenprofile / Leitprofile	16
3.3.1 Standortspezifische Eingangswerte und Varianzen des Leitprofils	16
4 PARAMETER UND STRUKTUREN IN DER TECHNISCHEN LEITUNGSZONE	18
4.1 Technische Parameter des HGÜ-Kabels	18
4.2 Technische Parameter der offenen und geschlossenen Bauweise	19
5 VERBESSERUNG DER ACHSABSTÄNDE BEI HDD – QUERUNGEN	20
6 ABLEITUNG DER OPTIMierten WÄRMELEITFÄHIGKEITEN BEI HDD VERLEGUNG FÜR DIE REDUKTION DER KABELACHSABSTÄNDE IM RML	22
7 ZUSAMMENSTELLUNG DER SICHERHEITEN IM BETRACHTETEN GESAMTSYSTEM VON DER ERKUNDUNG BIS ZUR SIMULATION UND DEM DESIGN	24
8 SYMBOLVERZEICHNIS	25

A B B I L D U N G S V E R Z E I C H N I S

Abbildung 1:	Modell 3-Phasen-System (Quelle: GeoAnalysis-Engineering GmbH).	6
Abbildung 2:	Einflussgrößen, Massen- und Energiebilanz (Quelle: GeoAnalysis-Engineering GmbH).	7
Abbildung 3:	Wärmefluss an der Geländeoberkante mit Kabel (Bild oben) und ohne Kabel (Bild unten) im Zeitraum von 10 Jahren (Quelle: GeoAnalysis-Engineering GmbH).	10
Abbildung 4:	Wärmeflussdifferenz an der Geländeoberkante (Wärmefluss mit Kabel/Wärmefluss ohne Kabel) im Zeitraum von 10 Jahren (Quelle: GeoAnalysis-Engineering GmbH).	10
Abbildung 5:	Veränderung der Tagesmitteltemperatur, Luftfeuchtigkeit, Niederschlagshöhe und Windgeschwindigkeit der DWD-Station 2009-2018. (Quelle: DWD, GeoAnalysis-Engineering GmbH).	11
Abbildung 6:	Potenzielle Verdunstungshöhen unterschiedlicher Vegetationstypen während eines Jahres (Quelle: GeoAnalysis-Engineering GmbH).	12
Abbildung 7:	Überblick über das thermische Gleichgewicht des Modells. Das Modell enthält die zugehörigen Inputs und Outputs sowie die Wechselbeziehungen zwischen den verschiedenen Modellen. (Quelle: GeoAnalysis-Engineering GmbH).	13
Abbildung 8:	Vernetzung des Thermo-Hydro-Electromagnetischen (THE) Model mit der Bereichsvernetzung von Kabelsystem und umgebender poröser Bodenstruktur (Quelle: GeoAnalysis-Engineering GmbH).	14
Abbildung 9:	a) Volumetrischer Wassergehalt θ und pF-Wert $[\log \psi_m]$, b) ungesättigten Wasserleitfähigkeit $K(\theta)$ [cm/s], c) Minimale Wärmeleitfähigkeit λ [W/m*K], d) Maximale Wärmeleitfähigkeit λ [W/m*K], e) spezifische Wärmekapazität C_p [J/kg*K], f) Feuchtigkeitsspeicherkoeffizient w_ϕ , g) Wasserdampfdiffusionswiderstände m [-], h) effektiver Diffusionskoeffizient D_v [m ² /s]	18
Abbildung 10:	Exemplarischer Aufbau des 525 kV DC-Erdkabels (Quelle: Arcadis Germany GmbH).	18
Abbildung 11:	Schematische Darstellung der Regelgrabenprofile und Bestromungsplan für die offene Verlegung im RML.	19
Abbildung 12:	Beispielhafte Verlegung des Kabels im HDD Profil des Rhein-Main-Links.	20
Abbildung 13:	Thermische Felder um die Kabel mit einem Abstand von 9,0 m berechnet mit dem ZSM Modell. (Quelle: GeoAnalysis-Engineering GmbH).	21
Abbildung 14:	Thermische Felder um die Kabel mit einem Abstand von 6,0 m berechnet mit dem THE Modell. (Quelle: GeoAnalysis-Engineering GmbH).	22
Abbildung 15:	Abbildung des Workflows zur Bestimmung der WLF – Korrekturfaktoren für die optimierte Bestimmung der Kabelachsabstände. (Quelle: GeoAnalysis-Engineering GmbH).	23

1 Bodenkundliche-Geotechnische Grundlagen

1.1 Allgemeines

Der Boden ist ein 3-Phasen System, bestehend aus Bodenmatrix (Feststoff), Bodenluft und Bodenwasser. Dies ist in Abbildung 1 dargestellt.

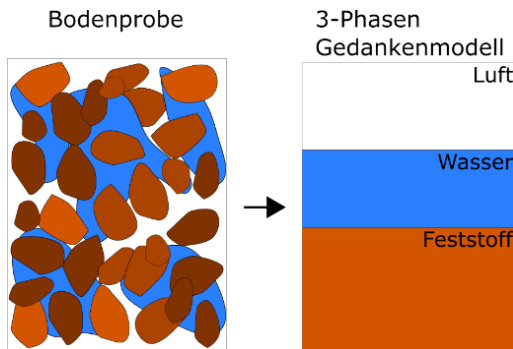


Abbildung 1: Modell 3-Phasen-System (Quelle: GeoAnalysis-Engineering GmbH).

Diese Prozesse sind in einer Modellbetrachtung zu berechnen, um realitätsnahe Prognosen über die Wärme- und Feuchtigkeitsveränderung im Boden zu ermitteln. Dabei sollen im Rahmen dieses Fachgutachtens die Intensität und Reichweite des Wärmetransports sowie deren Auswirkungen auf die Sättigungsverhältnisse prognostiziert werden.

Die gutachterliche Betrachtung von Wärmeimmissionen und Sättigungsverhalten im Bereich von Böden in der für die Betrachtung der großen Kabeltrassen wie Rhein-Main-Link erforderlichen Genauigkeit und Tiefe ist in der hier vorliegenden Form neu. Es existieren keine eindeutigen Festlegungen, Regeln, Merkblätter o.Ä., auf die in diesem Zusammenhang zurückgegriffen werden kann.

Um Prognosen hinsichtlich der Auswirkungen der Wärmeentwicklung ausarbeiten zu können, wurde eine wissenschaftlich fundierte Vorgehensweise basierend auf aktuellen wissenschaftlichen Ergebnissen mit der BNetzA abgestimmt, die in dem vorliegenden Gutachten vorgestellt und durchgeführt wird.

2 Modellierung der Massen- und Wärmetransport innerhalb der porösen Bodenstruktur

2.1 Beschreibung physikalischer Prozesse

Die Wärmeübertragung kann durch unterschiedliche physikalische Prozesse erfolgen. Es existieren grundsätzlich folgende Wärmetransportmechanismen:

- Wärmeleitung (Konduktion): Übertragung von Wärme ohne Massenbewegung durch „Berührung“. Die Wärme überträgt sich dabei vom wärmeren zum kälteren Bereich.
- Konvektion: Wärmeübertragung durch ein sich bewegendes Medium (Wind oder Wasserströmung)
- Wärmestrahlung: Elektromagnetische Strahlung

Bei Böden handelt es sich, wie bereits erwähnt, um ein sogenanntes „3-Phasen-System“. Das bedeutet, Böden bestehen aus Feststoffen (mineralische oder organische Bestandteile), aus Wasser und aus gasförmigen Bestandteilen (Luft / Wasserdampf). Wasser kann dabei die Zustandsformen flüssig, gasförmig oder fest annehmen und die Phasen wechseln. Die flüssigen und gasförmigen Phasen können sich im Porensystem des Bodens weitgehend frei bewegen und ggf. den Boden an der Oberfläche verlassen oder eindringen. Bei der Modellierung des Wärme- und Feuchtetransports müssen diese physikalischen Prozesse möglichst realitätsnah abgebildet werden.

In der Abbildung 2 sind exemplarische Einflussgrößen (Umwelteinflüsse) dargestellt, die sich auf die Temperaturentwicklung und Wassergehalte von Böden auswirken. Der Wärmehaushalt eines Bodens wird in

erster Linie durch die Wärmekapazität, die porenstrukturabhängige Wärmeleitfähigkeit des Bodens sowie die atmosphärische Wärmezufuhr (Sonneneinstrahlung) bestimmt. Dabei wird zwischen den einfallenden (I) und reflektierten (r) Wellen unterschieden.

Wie in der Abbildung dargestellt, trägt ein Kabelpaar zusätzliche Wärme in den Boden ein. Durch den Wärmeeintrag kommt es in der Umgebung der Kabel zu einer Abnahme des Wassergehalts im Boden. Der Austrocknung wirken Niederschläge aus der Atmosphäre entgegen, die in den Boden und somit auch in den Bereich des Kabels einsickern. Zusätzlich beeinflusst eventuell vorhandenes Grundwasser die Wärme- und Feuchteentwicklung. Auch durch kapillaren Aufstieg von Grundwasser können austrocknende Bereiche wieder befeuchtet werden. Der Boden wird jahreszeitenabhängig durch die Sonneneinstrahlung erwärmt (Merkblatt ATV-DVWK-M 504. 2002).

Sämtliche beschriebenen physikalischen Prozesse beeinflussen den Boden. In den vorliegenden Berichten wird dabei die Umgebung des Kabels hinsichtlich der Wärmeausbreitung und des Wassergehalts betrachtet.

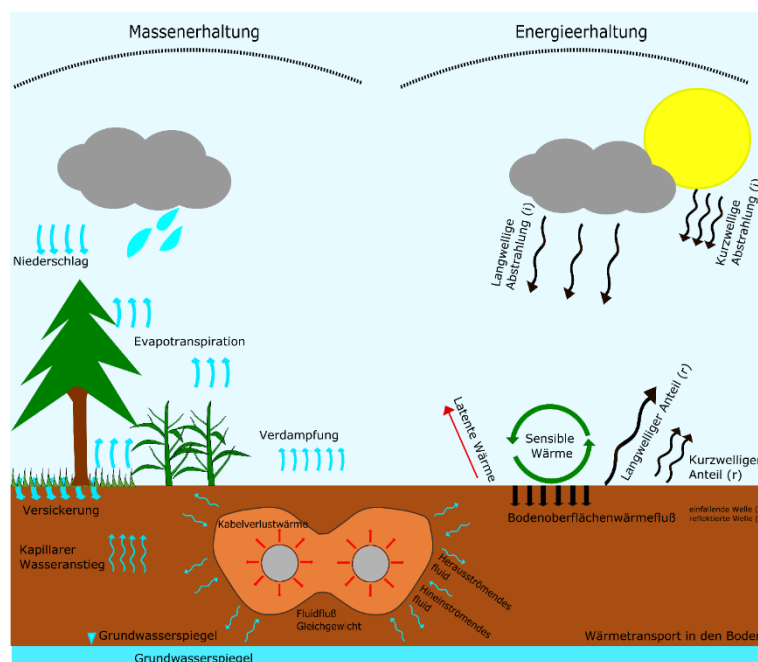


Abbildung 2: Einflussgrößen, Massen- und Energiebilanz (Quelle: GeoAnalysis-Engineering GmbH).

2.2 Auswahl und Überprüfung der physikalischen Modelle

Für die Modellierung gilt, dass der Betrag der Masse und Energie im betrachteten Gebiet konstant bleibt, also die Massenerhaltung und Energieerhaltung gilt. Auf der linken Seite in der Abbildung 2 sind Einflussgrößen aufgeführt, die hinsichtlich der Massenerhaltung berücksichtigt werden müssen. Rechts sind die Einflussgrößen dargestellt, welche in die Energiebilanz einfließen.¹

Um die physikalischen Vorgänge zu erfassen, die hinsichtlich Wärme- und Massentransport in Böden aktiv sind und Effekte bewirken, sollten physikalische Modelle genutzt werden, welche die physikalischen Beziehungen gekoppelt abbilden können. Erfasst werden müssen neben den Temperaturfeldern und Wärmeflüssen auch die Wasserbewegungen im gesättigten und im ungesättigten Boden und die Wasserdampfbewegungen, welche sich alle gegenseitig beeinflussen. Der Wärmeeintrag aus dem Kabel wird als Energieeintrag aus der Verlustleistung modelliert. Die dafür notwendigen Werte werden durch den

¹ Insofern weicht dieses Modell erheblich vom gängigen „Zweischichtenmodell“ der Elektrotechnik ab. Dieses dient lediglich für den technischen Nachweis der Kabel auf der „sicheren Seite“ und kann für eine Aussage zu den Effekten im Boden nicht herangezogen werden. Damit entfallen bei dem Zweischichtenmodell auch die günstig rückwirkenden Effekte aus dem Boden.

elektrotechnischen Planer zur Verfügung gestellt. Die mathematischen Prozesse sind in Form von unterschiedlichen Differentialgleichungen formuliert und müssen miteinander gekoppelt gelöst werden. Infolge der Abhängigkeit der Differentialgleichungen von der Temperatur T und dem matrixpotenzialabhängigen Wassergehalt $\theta(\psi_m)$ muss das Differentialgleichungssystem gekoppelt iterativ unter Einbeziehung aller Initial-, Rand- und Oberflächenbedingungen gelöst werden.

Für einen vollständig gekoppelten Wärme- und Massentransport in einem ungesättigten, porösen Boden werden i.d.R. folgende physikalische Grundgleichungen in den numerischen Simulationen verwendet.

Der Wassertransport wird im ungesättigten Boden über die Richard'sche Gleichung beschrieben:

$$q_w(\theta) = -k(\theta)\nabla(\theta(\psi_m) + gz) \quad \text{Gl. 1}$$

und in einem gesättigten Boden wird die Gleichung nach Darcy genutzt:

$$q_w = -k\nabla gz \quad \text{Gl. 2}$$

$k(\theta)$ ist die ungesättigte, bzw. k die gesättigte hydraulische Leitfähigkeit (cm/d), g die Erdbeschleunigung, z das hydraulische Potenzial und q_w der Wasserfluss.

Im ungesättigten Medium ist die Variable $k(\theta)$ stark nichtlinear abhängig von dem Matrixpotenzial, ψ_m . Für den Dampf-Massen-Transport wird eine Kombination der sättigungsabhängigen Fick'schen Gleichung und der temperaturgradient-abhängigen Ludwig-Soret-Gleichung genutzt:

$$q_v(\theta) = -D_v(\theta)c'_v\nabla h - D_v(\theta)hs\nabla T \quad \text{Gl. 3}$$

q_v ist der gesamte strömende Wasserdampf, D_v der effektive Dampf-Diffusionskoeffizient, c'_v die gesättigte Dampfkonzentration, s der Anstieg von Dampfsättigungs-Konzentration zur Feuchtigkeit und h ist das Verhältnis zwischen Dampfkonzentration c_v und gesättigter Dampf-Konzentration c'_v .

Unter Annahme der Fick's – Diffusion in den Poren der Bodenstruktur befindet sich die dominierende Dampfkonzentration in Poren von mehr als 10^{-6} m, was für Schluffe und Feinsande und Böden mit größeren Porenräumen relevant ist. Mit der Knudsen-Effusion wird der Dampftransfer in Nano-Poren kleiner 10^{-9} m beschrieben, welcher bei Tonen und tonigen Böden relevant ist.

Da an natürlichen Standorten alle beliebigen Bodenarten, wie Tone, schluffige Tone, Feinsande, aber auch Sande und Grobsande, Kiese usw. vorkommen, ist die Porengröße eine Variable. Aus diesem Grund wird eine Kombination der beiden physikalischen Gleichungen genutzt, um den Effekt der konzentrationsabhängigen Diffusion und Effusion in der Numerik berücksichtigen zu können. Die Fick'schen - Gleichung kann wie folgt ersetzt werden:

$$\delta_{air}\mu\nabla(hP_{sat}) = D_v(\theta)c'_v\nabla h \quad \text{Gl. 4}$$

δ_{air} ist der Dampf-Permeabilitätskoeffizient in der Luft, h ist die relative Luftfeuchtigkeit, P_{sat} der gesättigte Dampfdruck und μ der Dampfwiderstandsfaktor.

Für den Wärmetransport wird die folgende Gleichung in ungesättigten, porösen Böden genutzt:

$$q_h(\theta) = \underbrace{-\lambda\nabla T}_{\text{sensibler Wärmetransport}} + \underbrace{(L + TC_w)q_v(\theta)}_{\text{latenter Wärmetransport}} + \underbrace{TC_wq_w(\theta)}_{\text{konvektiver Wärmetransport}} \quad \text{Gl. 5}$$

λ ist die thermische Leitfähigkeit, L ist die latente Verdampfungswärme von Wasser, C_w ist die bekannte spezifische Wärmekapazität für das Wasservolumen.

Aus den obigen Gleichungen ergeben sich folgende gekoppelte partielle Differentialgleichungen zur Masse- und Energieerhaltung:

- Masseerhaltung:

$$\rho_w \frac{\partial}{\partial t} \theta(\psi) = \nabla \cdot \left[k(\theta) \nabla (\theta(\psi) + gz) + \frac{\delta_{air}}{\mu} \nabla (hP_{sat}) + D_v h s \nabla T \right] \quad \text{Gl. 6}$$

- Energieerhaltung:

$$(C_m \rho_m \chi_m + C_w \rho_w \theta(\psi)) \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot [\lambda \nabla T + (\nabla T C_w) k(\theta) \nabla (\psi + gz) + (L + \nabla T C_w) \delta_{air} \mu \nabla (hP_{sat}) + (L + \nabla T C_w) D_v h s \nabla T] \quad \text{Gl. 7}$$

Obige Gleichungen werden in COMSOL® mit den genutzten Anfangswerten und Randbedingungen gelöst. Die Variable w_ϕ stellt die Feuchtigkeits-Speicherfunktion dar.

Die Lösung des zeitabhängigen partiellen Differentialgleichungssystems mit entsprechenden Rand- und Initialbedingungen liefert die Änderungen und Verteilungen von Temperatur und Wassersättigung im betrachteten finiten Bodenbereich in der näheren Umgebung des Kabels.

In den Simulationen werden die thermischen Felder je nach Erfordernis in trockenen, ungesättigten und gesättigten porösen Materialien untersucht.

Liegen z.B. eine Grundwasserströmung oder andere hydraulische oder klimatische Randbedingungen in der Kabelumgebung vor, werden diese nach Bedarf in der Berechnung erfasst. Dabei wird die Abbildung der Sättigungsänderung von vollständiger Wassersättigung bis zur Austrocknung des Untergrunds durch ein entsprechendes Diffusionsmodell gewährleistet.

2.3 Randbedingungen des Modells zur Oberfläche

Der Wärmefluss an der Obergflächengrenze besteht aus fühlbarer Wärme, latenter Wärme, einem konvektiven Teil, der während des Niederschlags von flüssigem Wasser transportiert wird, und dem Strahlungsenergiefluss:

$$R_n + H - LE - G_0 = 0 \quad \text{Gl. 8}$$

H ist der sensible Wärmefluss (W/m^2), LE der latente Wärmefluss (W/m^2), G_0 der Bodenwärmefluss (W/m^2) und R_n ist die Nettostrahlung von der Bodenoberfläche in Richtung Geländeoberkante (W/m^2) (Merkblatt ATV-DVWK-M 504, 2002; Merkblatt DWA-M 504-1, 2018). Der Strahlungsenergieaustausch an der Bodenoberfläche besteht aus der absorbierten, kurzwelligen Strahlung der Sonne R_{sun} , der Langwellenstrahlung aus der Atmosphäre R_{atm} und der langwelligen Strahlung, die von der Bodenoberfläche R_{soil} emittiert wird:

$$R_n = R_{sun} - R_{soil} + R_{atm} \quad \text{Gl. 9}$$

Die absorbierte kurzwellige Sonnenstrahlung wird i.d.R. mit dem Absorptionsvermögen ($1 - albedo$) gewichtet. Die *albedo* hängt vom Oberflächentyp ab. Für die blanke Oberfläche gilt:

$$albedo = 0.35 - \theta_{top} \quad 0.1 < \theta_{top} < 0.25 \quad \text{Gl. 10}$$

θ_{top} ist der volumetrische Wassergehalt an der Oberfläche.

Der Energieverlust aus dem Boden wird nach dem Boltzmann-Gesetz berechnet (Walter et al., 2001). Die langwellige Strahlung aus der Atmosphäre, die in den Boden gelangt, wird durch die Strahlungs-Wärmeübertragung berechnet. Das atmosphärische Emissionsvermögen hängt von der Dampfkonzentration der Luft und der fraktionierten Wolkendecke ab und wird aus Standardgleichungen berechnet. Diese Implementierungen sind in COMSOL® Teil der Atmosphären- und Wettermodellierung und können im Modell zur Wärmeübertragung herangezogen werden.

Sowohl die Evapotranspiration als auch die Evaporation hängen von der Luftfeuchtigkeit, der Windgeschwindigkeit und der atmosphärischen Temperatur, jedoch weniger von der Oberflächentemperatur

des Bodens ab (Allen et al., 1998). Die Evapotranspiration entfernt eine erhebliche Menge an Wasser von der Oberfläche, wodurch die Wärmeleitfähigkeit im Boden verringert wird. Dies führt wiederum zu einer Temperaturerhöhung. Daraus ergibt sich, dass auch bei kleiner Bodenoberflächentemperatur und ausreichend hoher Lufttemperatur eine Evaporation stattfindet (Merkblatt DWA-M 504-1, 2018). In den Berechnungen wird die Verdunstung unter Berücksichtigung der äußeren Kraft als Konvektion in Abhängigkeit von Luftfeuchtigkeit, Windgeschwindigkeit und atmosphärischer Temperatur berücksichtigt. Die dafür notwendigen Daten stammen aus nahegelegenen DWD-Stationen (Wetterstationen des Deutschen Wetterdienstes). Die Daten sind öffentlich zugänglich.

Die unmittelbaren Vergleiche zu den einzelnen Termen zwischen den Betrachtungen mit und ohne Kabel ergeben die Wärmeflussdifferenzen (Abbildung 4), woraus ersichtlich wird, dass sich ausschließlich der Wärmefluss an der Bodenoberfläche durch die Einwirkung des Kabels ändert (Abbildung 3).

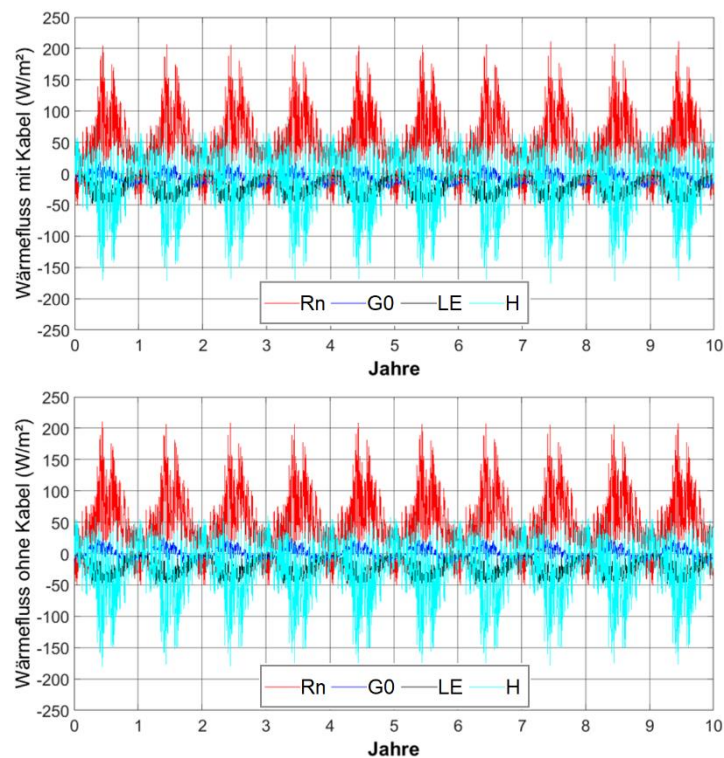


Abbildung 3: Wärmefluss an der Geländeoberkante mit Kabel (Bild oben) und ohne Kabel (Bild unten) im Zeitraum von 10 Jahren (Quelle: GeoAnalysis-Engineering GmbH).

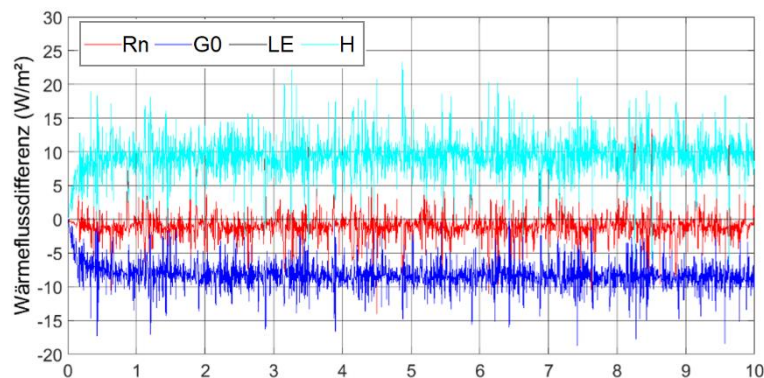


Abbildung 4: Wärmeflussdifferenz an der Geländeoberkante (Wärmefluss mit Kabel/Wärmefluss ohne Kabel) im Zeitraum von 10 Jahren (Quelle: GeoAnalysis-Engineering GmbH).

Die initiale Bodentemperatur wird für alle Leitprofile mit 9,5 °C als mittlere Durchschnittstemperatur der aufgezeichneten Jahrestemperatur angenommen. Für den Boden wurde eine initiale Sättigung von 60 % sowie eine initiale relative Luftfeuchtigkeit von 60 % angenommen.

Die erforderlichen Wetterdaten werden entsprechend des Standortes an der nächsten DWD-Station ermittelt und aufbereitet.

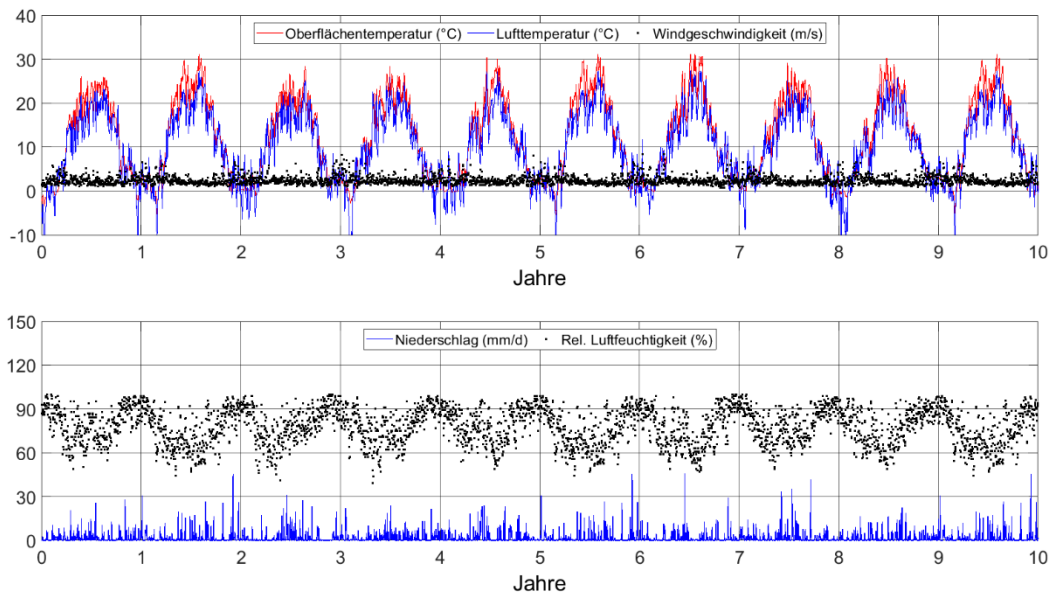


Abbildung 5: Veränderung der Tagesmitteltemperatur, Luftfeuchtigkeit, Niederschlagshöhe und Windgeschwindigkeit der DWD-Station 2009-2018. (Quelle: DWD, GeoAnalysis-Engineering GmbH).

2.3.1 Berücksichtigung der Evapotranspiration im Modell

Für die Analyse des verdunstungsbedingten Einflusses von Pflanzen auf den Wärme- und Massentransport wird an der Modellberandung (Geländeoberfläche) die Definition einer vom Pflanzentyp abhängigen Evapotranspiration verwendet.

Für die Berücksichtigung der Evapotranspiration an der Geländeoberfläche wurde die Penman-Monteith-Gleichung (Penman, 1948; Monteith, 1965) in den numerischen Berechnungen berücksichtigt und auf die entsprechende Vegetation (Mais, Weizen und Gras) angewendet.

Ausgehend von den Energiebilanzierungen auf der Geländeoberfläche ist die Penman-Monteith-Gleichung wie folgt definiert (ASCE-EWRI, 2005; (Pereira et al., 2015); Merkblatt DWA-M 504-1, 2018):

$$\lambda ET = \frac{\Delta(R_n - G_0) + \rho_a c_p \frac{(e_s - e_a)}{r_a}}{\Delta + \gamma \left(1 + \frac{r_s}{r_a}\right)} \quad \text{Gl. 11}$$

$(e_s - e_a)$ repräsentiert das Dampfdruckdefizit zur Luft, ρ_a ist die mittlere Luftdichte unter dem konstanten Luftdruck, c_p ist die spezifische Wärme der Luft, Δ kennzeichnet den Gradienten der gesättigten Dampfdruck-Temperaturbeziehung, γ ist die psychrometrische Konstante ($\gamma \approx 66 \text{ Pa K}^{-1}$), r_s ist der Oberflächenwiderstand und $r_a = 208/v_{\text{wind}}$ (mit v_{wind} der Windgeschwindigkeit) der aerodynamische Widerstand.

An meteorologischen Messstationen wird der Wind in 10 m Höhe (z) gemessen. Um die geforderte Höhe von 2 m über Grund zu erreichen, wird mit der Formel (v_{Wind2m}) ein logarithmisches Windgeschwindigkeitsprofil zur Anpassung verwendet (Merkblatt ATV-DVWK-M 504, 2002; Merkblatt DWA-M 504-1, 2018):

$$v_{\text{Wind}2\text{m}} = v_{\text{Wind}} \frac{4,87}{\ln(67,8 \cdot z - 5,42)}$$

Gl. 12

Der Oberflächenwiderstand r_s ist wie folgt definiert (Merkblatt ATV-DVWK-M 504, 2002):

$$r_s = \frac{r_I}{\text{LAI}_{\text{active}}}$$

Gl.13

$\text{LAI}_{\text{active}}$ ist der dimensionslose aktive-Blattflächen-Index.

Nachfolgend sind die potenziellen Verdunstungshöhen von verschiedenen Kulturpflanzen über ein Jahr angegeben. Diese werden als negative Massenbilanz in der numerischen Simulation berücksichtigt (Abbildung 6).

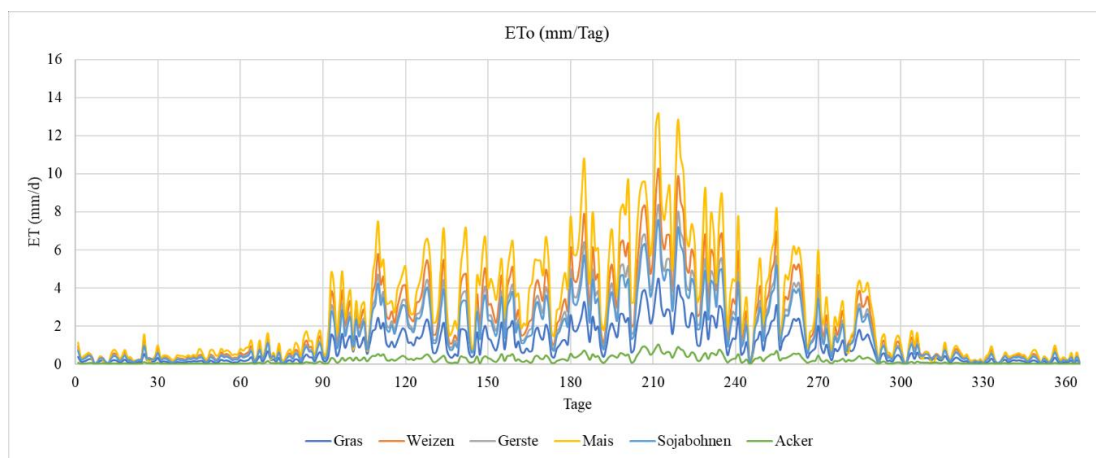


Abbildung 6: Potenzielle Verdunstungshöhen unterschiedlicher Vegetationstypen während eines Jahres (Quelle: GeoAnalysis-Engineering GmbH).

3 Modellierung der Elektrotechnischen Strukturen und Kopplung der Feldgleichungen zwischen Elektrotechnik und den hydro-diffusiven Feldgleichungen im porösen Gebieten.

In der betrachteten Gesamtfragestellung sind die elektromagnetischen Verluste die Hauptwärmequelle für die Erwärmung der erdverlegten Kabel. Die Erwärmung wird ausschließlich durch Widerstandsverluste verursacht, welche hauptsächlich Leiter-, Mantel- und Armierungsverluste umfassen. Im stationären Zustand kann der Widerstandsverlust (auch als Joule-Erwärmung bekannt) wie folgt beschrieben werden:

$$Q_{rh} = Re \frac{(\mathbf{J} \cdot \mathbf{E})}{2}$$

Dabei ist \mathbf{J} die Leitungsstromdichte, σ die elektrische Leitfähigkeit des Leiters und \mathbf{E}^* die komplex konjugierte Zahl von \mathbf{E} (\mathbf{E} steht für die elektrische Feldstärke). Der Schlüssel zur Lösung der Joule-Erwärmung liegt in der Bestimmung der Stromdichte und der elektrischen Feldstärke, die vom Gaußschen Gesetz, dem Stromerhaltungssatz, dem Maxwell-Ampere-Gesetz und dem Maxwell-Faradayschen elektromagnetischen Induktionsgesetz abhängen. Basierend auf dem Gaußschen Gesetz und dem Stromerhaltungssatz lässt sich die Beziehung zwischen Stromdichte und elektrischer Feldstärke wie folgt darstellen:

$$\mathbf{J} = (\sigma + j\omega\epsilon)\mathbf{E}$$

Dabei ist σ der spezifische Widerstand, \mathbf{E} die elektrische Feldstärke, ϵ die Permittivität, j die imaginäre Einheit und ω die Winkelfrequenz. Die Beziehung legt nahe, dass $\omega\epsilon$ als eine Art imaginäre Leitfähigkeit betrachtet werden kann. Die Beziehung zwischen dem Magnetfeld \mathbf{H} , das den Leiter umgibt, und dem durch ihn fließenden Strom lässt sich durch das Maxwell-Ampere-Gesetz beschreiben. Die zweidimensionale partielle Differentialgleichung für das magnetische Vektorpotential \mathbf{A} lautet:

$$-\omega^2\epsilon\mathbf{A} + j\omega\sigma\mathbf{A} + \nabla \times (\mu^{-1}\nabla \times \mathbf{A}) = 0$$

Der Wert von \mathbf{A} kann in den betrachteten Modellen durch Lösen der obigen Gleichung ermittelt werden. Damit kann die Joule-Erwärmung bestimmt werden, nachdem die elektrische Feldstärke \mathbf{E} , die magnetische Flussdichte \mathbf{B} und die Leitungsstromdichte \mathbf{J} aus den Gleichungen abgeleitet wurden.

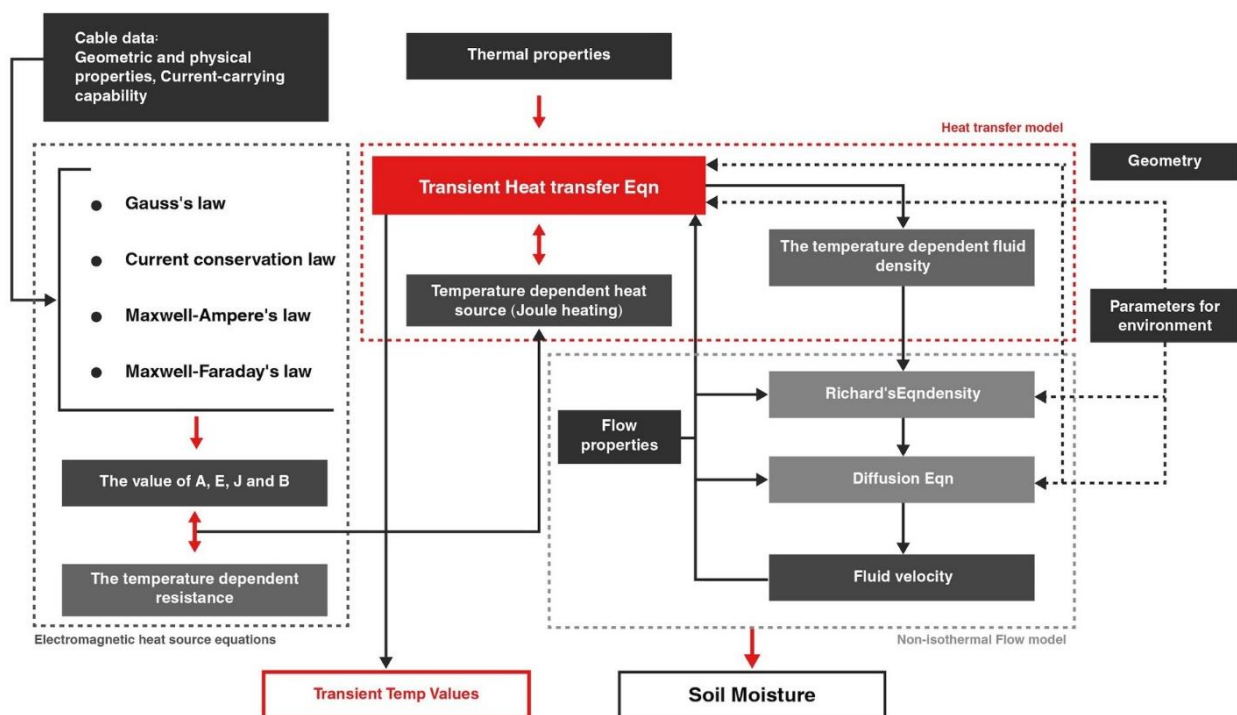


Abbildung 7: Überblick über das thermische Gleichgewicht des Modells. Das Modell enthält die zugehörigen Inputs und Outputs sowie die Wechselbeziehungen zwischen den verschiedenen Modellen. (Quelle: GeoAnalysis-Engineering GmbH).

Die Gleichungen werden in COMSOL® mit den genutzten Anfangswerten und Randbedingungen gelöst. Die Kopplung zwischen den elektrotechnischen Grundgleichungen und den in Kap. 1.2 beschriebenen Feldgleichungen für den Masse- und Wärmetransport in porösen Böden findet durch den Austausch der Temperatur und des Wärmeflusses an der Oberfläche des Kabels statt, siehe Abbildung 7.

Bei dem vollständig gekoppelten Modell werden die Kabel und der umgebende Boden gleichermaßen vernetzt, siehe Abbildung 8.

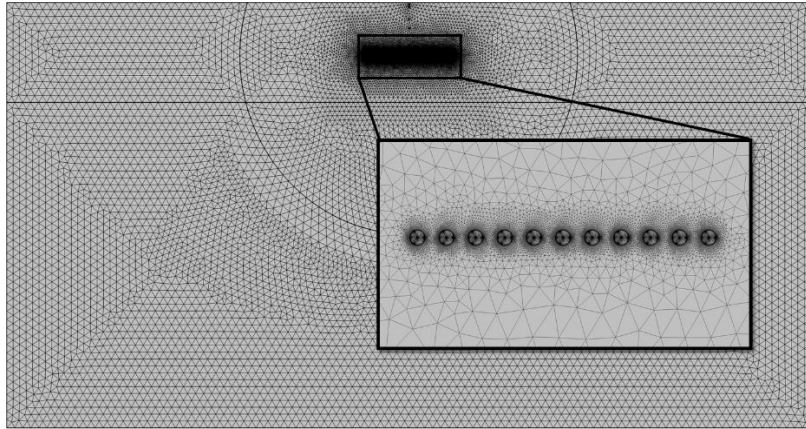


Abbildung 8 Vernetzung des Thermo-Hydro-Electromagnetischen (THE) Model mit der Bereichsvernetzung von Kabelsystem und umgebender poröser Bodenstruktur (Quelle: GeoAnalysis-Engineering GmbH).

3.1 Numerische Berechnung

Zur Lösung der definierten Grundgleichungen wird das Finite-Element-Programm COMSOL© genutzt. Damit ist eine vollständige Interaktion zwischen dem vom Kabel ausgehenden Wärmefluss, dem natürlichen Wassergehalt, den klimatischen Einflüssen (Temperatur, Niederschlag, etc.) und der induzierten Massenbewegung von Fluid und Dampf hinsichtlich der Aussagen zur Evolution von Temperatur und Wassergehalt um das Kabel im Boden möglich. Gleichzeitig ist das Programm so flexibel, dass beliebige Funktionen der Eingangsparameter (experimentell oder erfahrungsbasiert) und Ausgangsdarstellungen (1D, 2D, Isolinien, Differenzplot etc.) genutzt werden können.

Für die Berechnung mit der Finite-Elemente-Methode wird der betrachtete Bereich vernetzt und unter Ansatz der Randbedingungen die iterative Berechnung durchgeführt, bis die numerische Lösung konvergiert. Das Finite-Elemente-Programm speichert an ausgewählten Knotenpunkten im Netz die zeitabhängigen, temperatur- und sättigungsabhängigen Ergebnisse, sodass die zeitlichen Funktionen von Temperatur und Sättigung an diesen Punkten im betrachteten Modellbereich abgebildet werden können.

Um die entwickelten Berechnungsroutinen zu validieren, also hinsichtlich der Anwendbarkeit eine Prüfung durchzuführen, wurden anhand vorhandener Messungen unterschiedliche Validierungsberechnungen durchgeführt. Dafür wurden in der Literatur bekannte Versuche bzw. Publikationen, für die reale Messdaten vorliegen, nachgerechnet und die Messwerte bzw. Publikationsergebnisse mit den Modellergebnissen verglichen.

Die so durchgeführten Validierungen haben gezeigt, dass die vorhandenen Ergebnisse mit den numerischen Modellen sehr gut abgebildet und nachvollzogen werden können. Ausschlaggebend für die Genauigkeit der Berechnungen in Vergleich zu den tatsächlichen Vorgängen ist dabei vor allem, wie genau die Eingangsdaten bestimmt werden können, bzw. in welcher Genauigkeit die Eingangsdaten für die Berechnung vorliegen.

Für die elektrotechnischen Simulationen erfolgte eine Validierung des THE Modell mit den gängigen 2-Schichtmodellen aus der Elektrotechnik und anhand von Messungen im Freiland.

3.1.1 Initial- und Eingangswerte für die Wärme- und Massentransport-Simulation

Als Eingangsparameter für die Modellierungen werden folgende grundlegende Daten benötigt:

- Verlustleistung aus den elektrischen Höchstspannungskabeln, Kabeldaten
- Kabelabstände, Verlegetiefen (Verlege-Geometrie)
- Ggf. Kenndaten Kabelschutzrohr
- Klimaeinwirkungen: Temperatur, Niederschlag, Luftfeuchtigkeit, Windbewegung, Sonneneinstrahlung

- Bodenprofil (bodenkundlich und geotechnisch)
- Bepflanzung auf einem Feld, Wald oder Wiese, Oberflächenversiegelung
- Baugrundkennwerte wie Korngrößenverteilung, Porosität, Dichte, Konsistenz
- Hydrologische Situation, Gewässer, Fließgeschwindigkeit
- Fluidichte, Kompressibilität (Korn bzw. Festkörperskelett), Kompressibilität (Fluid)
- Thermische Leitfähigkeit / Spezifische Wärmekapazität
- Gesättigte und ungesättigte hydraulische Leitfähigkeit
- Feuchtigkeits-speicherkoeffizienten, Dampfwiderstandsfaktor, Diffusionskoeffizient

Mit Hilfe von bekannten Erfahrungswerten, Pedotransferfunktionen und bodenhydraulischen Modellen können folgende Parameter auf Basis von Literaturkenntnis bestimmt werden:

- Wärmeleitfähigkeiten
- Ungesättigte hydraulische Leitfähigkeiten
- Diffusionskoeffizienten unterschiedlich texturierter Böden

Notwendig für die Bestimmung der Kennwerte ist die bekannte Porosität ϕ der Bodenhorizonte.

3.1.2 Modellrandbedingungen in der Simulation

Für folgende physikalischen Einflüsse wurden Randbedingungen definiert, die näherungsweise den natürlichen Bedingungen entsprechen:

- Temperatur:
 - isotherme Randbedingung mit mittlerer natürlicher Bodentemperatur 9,5 °C für z.B. Mitten- und Süddeutschland
 - Wärmestrom-Randbedingungen an den seitlichen Rändern und dem unteren Rand als konstant angenommen,
- Hydraulisch:
 - No-Flow-Boundary-Condition an den Seiten, wenn kein Grundwasser im Profil vorhanden ist
 - Drainage- Randbedingung am unteren Rand des Modells
 - Oberer-Rand: meteorologische Einflüsse aus Luftfeuchtigkeit und Niederschlag
 - initiale Sättigung
 - hydraulische Randbedingungen an den oberen, seitlichen und unteren Modellgrenzen (mit / ohne Wasserströmung)
- Dampfbedingungen: seitliche und untere Ränder sind nicht dampfdurchlässig
- Modellgröße: Controlled Volume Study für die Größe des Modells
- Ränder, an denen Wärme- und Massenaustausch stattfindet
- Meteorologische Randbedingungen an der Oberfläche
- Evapotranspirationsfunktion in Abhängigkeit von der jeweiligen Feldbepflanzung, z.B. Gras, Weizen, Mais

3.2 Vorbereitende Arbeiten: Aufbereitung Wetterdaten, Kalibrierung

3.2.1 Wetterdaten

Um die Klimaeinflüsse auf den Wärmefluss im Boden über ein Jahr hinweg zu simulieren, werden Klimadaten genutzt, die aus dem öffentlich zugänglichen Datenarchiv des Deutschen Wetterdienstes (DWD) stammen. Für die Simulation werden Daten für Lufttemperatur, zu Niederschlag, Feuchtigkeit und Wind benötigt.

Für die Nutzung der zeitlich hochaufgelösten DWD-Daten werden diese zu jedem Tag des Jahres über eine definierte Zeitspanne im Tagesverlauf gemittelt. Weiterhin wird bestimmt, welcher Jahrgang der niederschlagsreichste und welcher der niederschlagsärmste ist. Um angesichts des Klimawandels zukünftige Entwicklungen abzubilden, können besonders trockene und heiße Jahre mehrfach berücksichtigt werden. So werden derzeit für aktuelle Berechnungen ein 10-Jahresmodell für eine Einbettung des Kabels bis ca. 5 m Tiefe (2009, 2018, 2011, 2012, 2013, 2018, 2015, 2016, 2017, 2018) und ein 40-Jahresmodell für eine Einbettung > 5 m Tiefe genutzt. Die feuchteren Jahre 2010 und 2014 wurden dementsprechend durch das Jahr 2018 ersetzt.

Das gemäß DWD trockenste und wärmste Jahr ist 2018, welches in das 10-Jahres-Modell an drei verschiedenen Zeitpunkten berücksichtigt wird, womit der zunehmenden Klimaerwärmung Rechnung getragen wird. Mit zunehmender Verlegetiefe des Kabels wird die Dauer zum Erreichen eines thermischen Gleichgewichtes in der Simulation stetig länger, so dass für Einbettungstiefen > 5 m das Jahresmodell von 10 Jahren auf 40 Jahre im Simulationszeitraum erweitert wird.

3.2.2 Kalibrierung

Um das digitale Modell in einem ersten Schritt standortabhängig zu kalibrieren, werden frei zugängliche Daten des Deutschen Wetterdienstes (DWD) genutzt. Dazu werden die Daten einer in der Nähe des betrachteten Standorts befindlichen Wetterstation herangezogen. An den Messstationen des DWD werden i.d.R. Temperaturganglinien in verschiedenen Bodentiefen unter GOK, teilweise bis zu rund 50 cm unter GOK, erhoben. Anhand dieser Ganglinien wird das Schichtmodell mit den Bodenkenndaten kalibriert.

Dazu werden z.B. vorhandene bodentypabhängige Parameter/Funktionen an den Bodentyp und die Bodenhorizonte angepasst, wenn noch keine experimentell erhobenen Bodenkenndaten vorliegen, so dass die Simulation die DWD-Messungen gut abbildet. Aus den bisherigen Erfahrungen heraus können die tatsächlich gemessenen Werte sehr gut durch die Modellierung abgebildet werden.

3.2.3 Berücksichtigung der Streuung

Bodenkennwerte weisen aufgrund der natürlich gegebenen Heterogenität im Untergrund eine gewisse Streuungsbreite auf. Die Streuung der Parameter als statistische Größe für die geplanten Berechnungen wird üblicherweise durch eine Vielzahl von experimentellen Versuchen über einen Bereich oder Abschnitt bestimmt. Die Analysen sind sehr zeitintensiv.

Alternativ kann basierend auf vorhandenen Erfahrungswerten und deren Modelle für einen Bodentyp eine Kurvenschar und deren Einhüllende bestimmt werden. Die Grenzen der Einhüllenden stehen stellvertretend für mögliche Varianzen der Bodenparameter.

3.3 Bodenprofile / Leitprofile

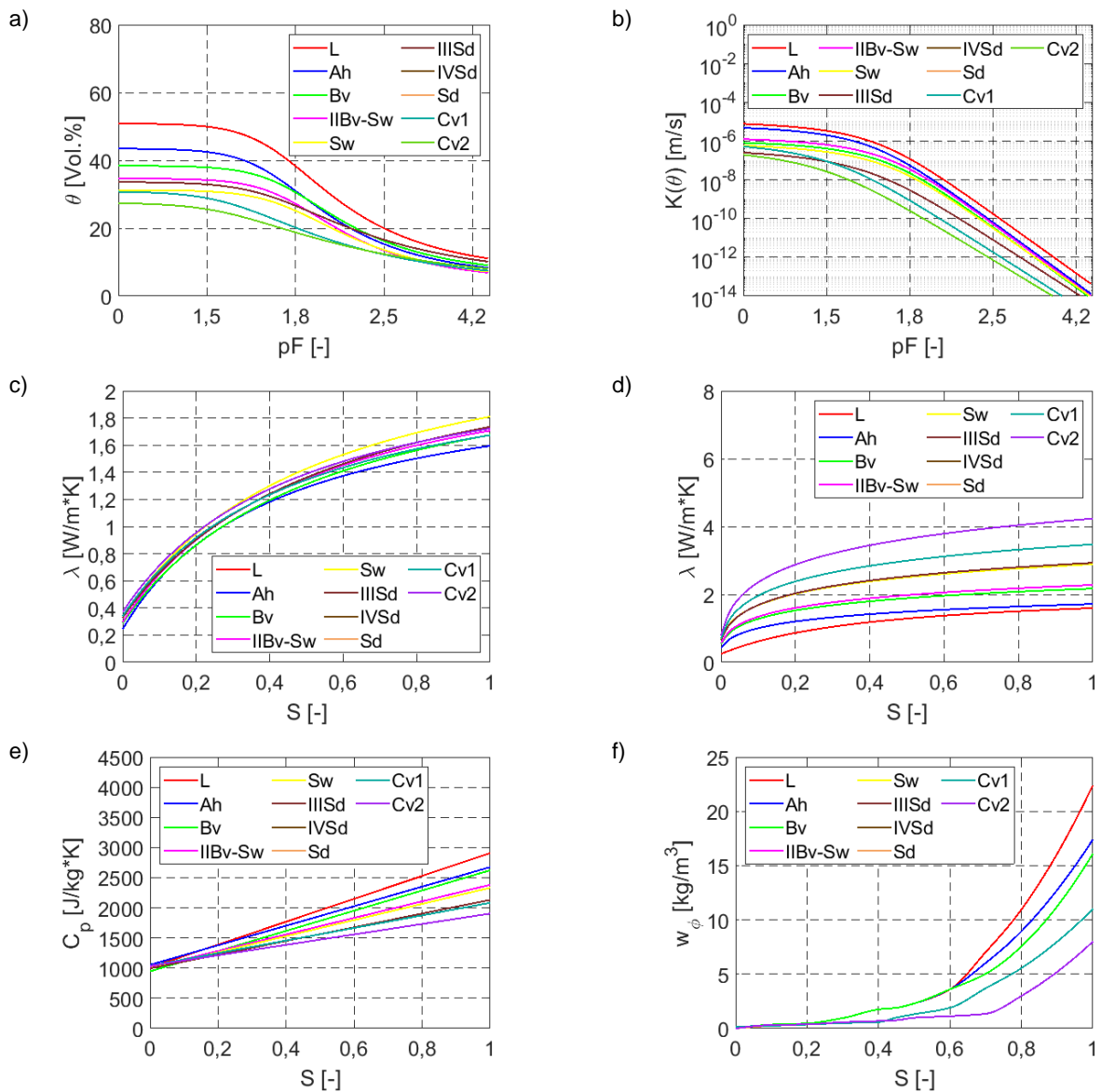
3.3.1 Standortsspezifische Eingangswerte und Varianzen des Leitprofils

Tabelle 1: Beispielhafte Eingangsparameter gemäß van Genuchten (1980) für ein Leitprofil (Quelle: GeoAnalysis-Engineering GmbH).

Horizont	Mächtigkeit [cm]	Bodenart	Skelettanteil	θ_s	Θ_r	α	n	K_f	m
----------	------------------	----------	---------------	------------	------------	----------	-----	-------	-----

			[Masse-%]	[Vol.-%]	[Vol.-%]	[1/cm]	[-]	[m/s]	[-]
Ah	0-40	SI4	30	0,435	0,054	0,019	1,456	6,87E-06	0,313
Bv	40-50	Ls3	10	0,384	0,060	0,013	1,449	1,11E-06	0,309
IIBv-Sw	50-60	Slu	20	0,347	0,042	0,013	1,466	1,66E-06	0,317
Sw	60-80	Uls	20	0,313	0,040	0,013	1,407	8,37E-07	0,289
IIISd1	80-120	Ls3	7	0,336	0,051	0,019	1,306	5,16E-07	0,234
IVSd2	120-270	SI3	5	0,309	0,035	0,050	1,292	1,54E-06	0,226
Sd3	270-390	SI3	5	0,309	0,035	0,050	1,292	1,54E-06	0,226
Cv1	390-470	SI3	5	0,309	0,035	0,050	1,292	1,54E-06	0,226
Cv2	470-500	SI3	5	0,275	0,033	0,060	1,238	8,19E-07	0,192

Die van-Genuchten-Werte können dabei messtechnisch oder aus der Literatur ermittelt werden.



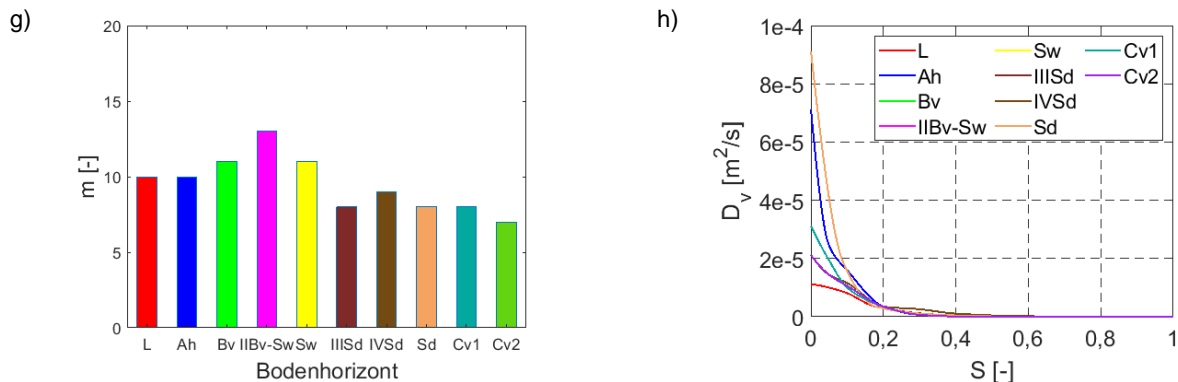


Abbildung 9: a) Volumetrischer Wassergehalt θ und pF-Wert $[\log \psi_m]$, b) ungesättigten Wasserleitfähigkeit $K(\theta) [cm/s]$, c) Minimale Wärmeleitfähigkeit $\lambda [W/m^*K]$, d) Maximale Wärmeleitfähigkeit $\lambda [W/m^*K]$, e) spezifische Wärmekapazität $C_p [J/kg^*K]$, f) Feuchtigkeitsspeicherkoeffizient w_ϕ , g) Wasserdampfdiffusionswiderstände $m [-]$, h) effektiver Diffusionskoeffizient $D_v [m^2/s]$

Die sensitivsten Parameter hinsichtlich des Mess- oder Simulationsergebnisses in dem gekoppelten Masse- und Wärmetransport sind die vorhandenen Wärmeleitfähigkeiten neben den Diffusionskoeffizienten. Die Wärmeleitfähigkeiten können dabei messtechnisch relativ einfach ermittelt werden. Die restlichen Parameter können auch aus vorhandenen Literaturanalysen entnommen werden.

4 Parameter und Strukturen in der technischen Leitungszone

4.1 Technische Parameter des HGÜ-Kabels

Das aufgeführte 525 kV DC-Erdkabel (DIN IEC 62067, VDE 0276-2067:2013-08) ist ein Musterbeispiel (Abbildung 10). Für die Modellierung wird der Oberflächenwärmefluss an der Schutzrohroberfläche verwendet. Für den inneren Ringraum zwischen dem Kabelschutzrohr und dem 525 kV DC-Erdkabel wird entsprechend dem geplanten Herstellungsprozess die Existenz eines Luftspaltes angenommen.



Abbildung 10: Exemplarischer Aufbau des 525 kV DC-Erdkabels (Quelle: Arcadis Germany GmbH).

Das Kabel ist ein 3000 mm² Kupferkabel mit einem 20°C Gleichstromwiderstand von 0,006 Ohm/km und einem Temperaturkoeffizienten von $0,00393 \text{ } ^\circ K^{-1}$. Die Spannung beträgt 525 kV DC und der Strom 2050 A DC (keine induzierten Ströme oder Ähnliches). Die Kabel werden auf Vollast betrieben ($m = 1$).

Die geometrischen Daten des Kabels und dessen thermische Materialparameter sind wie folgt:

Tabelle 2: Geometrie und Aufbau der HGÜ-Kabel im RML

	Durchmesser über Schicht laut Datenblatt in mm	Wärmeleitfähigkeit in W/(Km)	Volumetrische Wärmekapazität in J/(m ³ K)
Leiter	67.5	400	1.00E+06
Isolierung	137.6	0.213507714	2.00E+06
Alu- Außenmantel	140	238	1.00E+06
HDPE- Außenschicht	151.2	0.285722715	2.40E+06

Die Kabel befinden sich in luftgefüllten Schutzrohren mit:

- Innendurchmesser: 247 mm
- Außendurchmesser: 280 mm
- Wärmeleitfähigkeit: 0,28571 W/Km
- Volumetrische Wärmekapazität: 2,4E6 J/(m³K)

4.2 Technische Parameter der offenen und geschlossenen Bauweise

In Abbildung 11 sind die geplanten Grabenprofile je nach Standfestigkeit der örtlich vorhandenen Böden für das Vorhaben dargestellt:

Die Überdeckung beträgt 1,40 m (525 kV DC-Erdkabel), der Kabelabstand soll 0,75 m und der Systemabstand der Kabelgräben zueinander 5,0 m betragen.

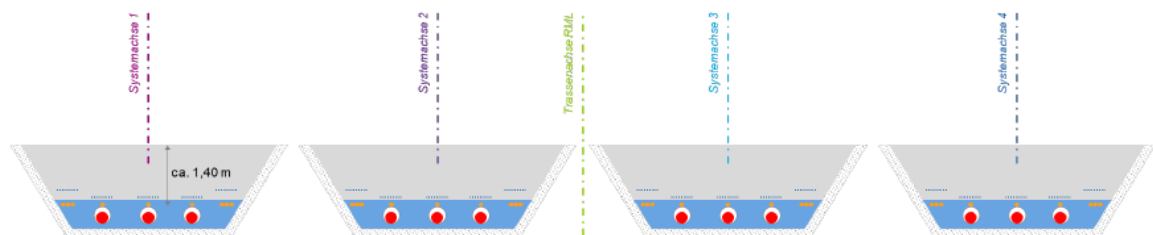


Abbildung 11: Schematische Darstellung der Regelgrabenprofile und Bestromungsplan für die offene Verlegung im RML.

Für die Verlegung in HDD oder Mikrotunnel in größeren Tiefen bei Unterquerungen wird die nachfolgende Tiefen- und Abstandsanordnung genutzt, siehe

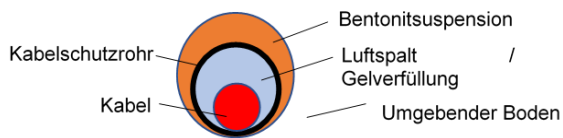


Abbildung 12: Beispielhafte Verlegung des Kabels im HDD Profil des Rhein-Main-Links.

Tabelle 3: Bestromungsplan der HGÜ-Kabel im RML

System	DC34	DC35	NOR-16-3	NOR-16-8
Legeanordnung	Pol – DMR – Pol	Pol – DMR – Pol	Pol – DMR – Pol	Pol – DMR – Pol
Bestromung	Aus – Ein – Ein	Ein – Ein – Aus	Ein – Ein – Aus	Ein – Ein – Aus
Max. Leitertemp.	90°C	90°C	90°C	90°C

Tabelle 4: Entwurf zu den Achsabständen bei HDD Querungen im RML

Legetiefe in m	Achsabstand $s_{k,HDD}$ in m NI 1-2	Achsabstand $s_{k,HDD}$ in m NI 3	Achsabstand $s_{k,HDD}$ in m NRW	Achsabstand $s_{k,HDD}$ in m HE 1-4	Achsabstand $s_{k,HDD}$ in m HE 5-6
5	4,5	4,5	3,0	3,0	4,5
8	8,5	8,0	5,5	5,0	8,0

Legetiefe in m	Achsabstand $s_{k,HDD}$ in m NI 1-2	Achsabstand $s_{k,HDD}$ in m NI 3	Achsabstand $s_{k,HDD}$ in m NRW	Achsabstand $s_{k,HDD}$ in m HE 1-4	Achsabstand $s_{k,HDD}$ in m HE 5-6
10	14,5	8,5	7,5	6,0	8,5
13	17,5	9,5	9,5	7,5	9,5
15	19,0	10,5	10,5	9,0	10,5
18	20,0	11,5	11	10,5	11,5
20	21,5	12,5	12	12,0	12,5
23	25,0	14,5	14	13,5	14,5
25	28,5	16,0	15,5	15,0	16,0
28	32,5	18,0	17	16,5	18,0
30	35,5	20,0	18,5	18,0	20,0

5 Verbesserung der Achsabstände bei HDD – Querungen

Um die grundsätzliche Leistungsfähigkeit des THE Modells zu dokumentieren, soll das nachfolgende Beispiel für eine HDD Querung dargestellt werden. In dem Beispiel wird das vollständig gekoppelte THE Modell dem 2-Schichten-Modell (ZSM) aus der Elektrotechnik gegenübergestellt.

Beispiel: 525 kV Gleichstromkabel, 2074 Ampere pro Kabel, 100 % NEP

Berücksichtigung der Massen- und Energiebilanz für das GAE II-Modell (**THE**)

Systemabstand S_a : 9,0 m; 8,0 m; 7,0 m; 6,0 m; Systemtiefe S_t : 13,0 m

Unter Nutzung des THE Modells konnte eine Verringerung der Systemabstände von 9,0 m auf 6,0 m bei Einhaltung der max. Leitertemperatur erreicht werden.

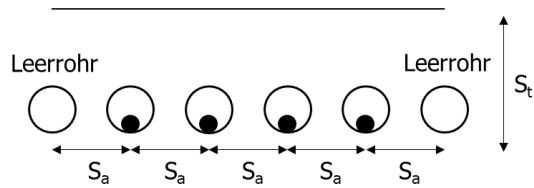


Tabelle 5: Ergebnisse im Vergleich von ZSM und THE als beispielhafte Simulation einer HDD Querungen

Model	Tiefe [m]	Abstand [m]	Leitertemperatur [°C]	Leiterquerschnitt [mm²]
ZSM	13	9	69,7	3000
THE	13	9	51,7	3000
THE	13	8	55,9	3000
THE	13	7	64,9	3000
THE	13	6	71,7	3000

In den Abbildungen 13 und 14 sind die 2D Temperaturfelder und -isolinien für die gleiche Leitertemperatur von 70 °C in dem 525kV Gleichstromkabeln aber mit unterschiedlichen Abständen dargestellt.

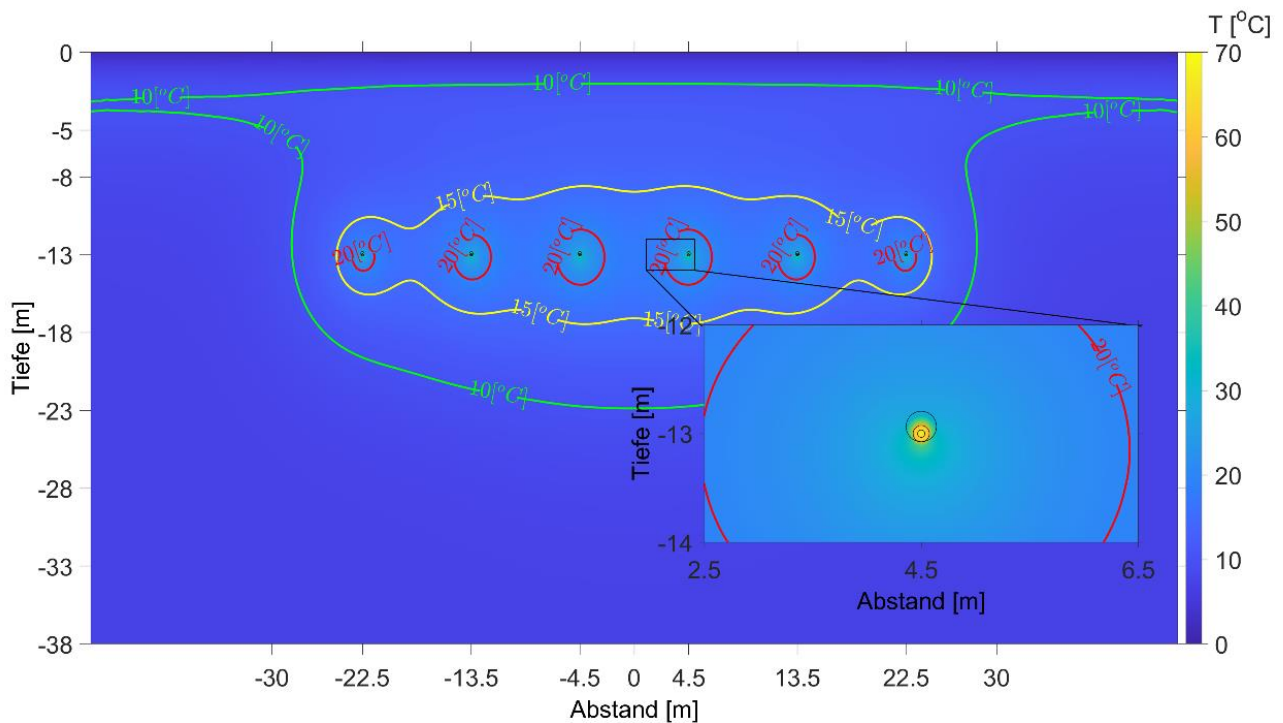


Abbildung 13: Thermische Felder um die Kabel mit einem Abstand von 9,0 m berechnet mit dem ZSM Modell. (Quelle: GeoAnalysis-Engineering GmbH).

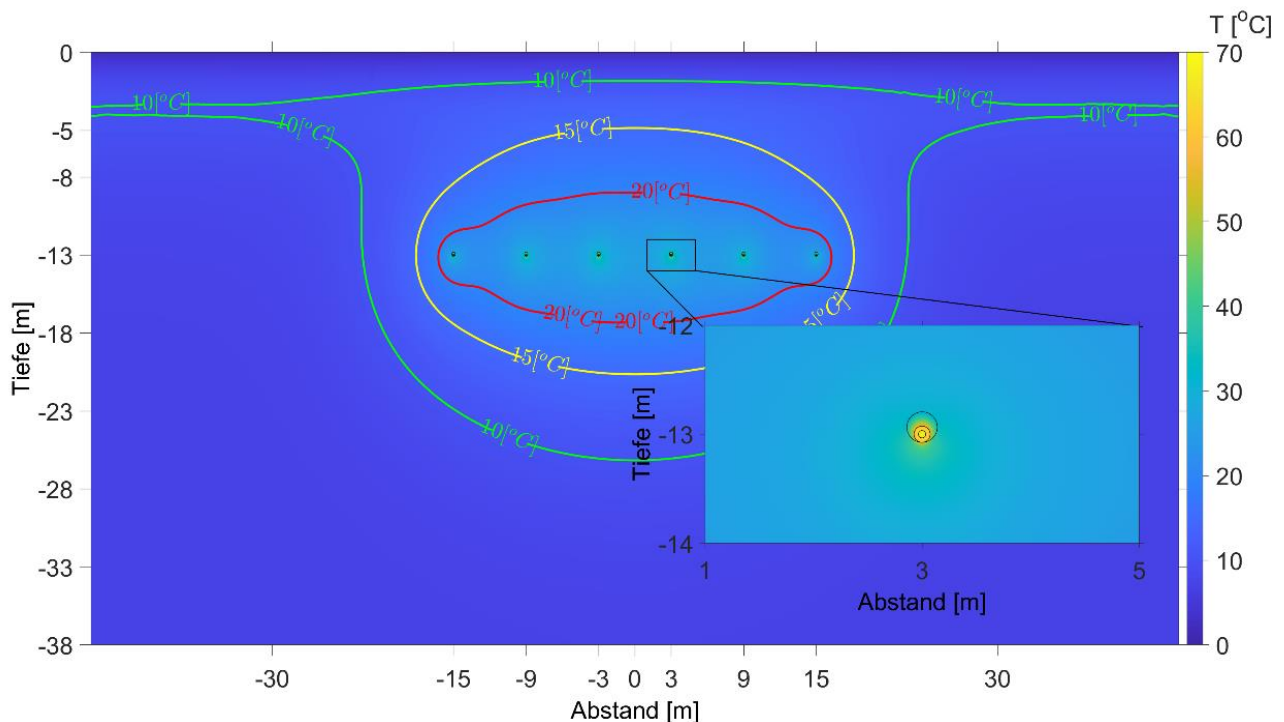


Abbildung 14: Thermische Felder um die Kabel mit einem Abstand von 6,0 m berechnet mit dem THE Modell. (Quelle: GeoAnalysis-Engineering GmbH).

6 Ableitung der optimierten Wärmeleitfähigkeiten bei HDD Verlegung für die Reduktion der Kabelachsabstände im RML

Nachfolgend soll die Ableitung der Wärmeleitfähigkeit (WLF) - Korrekturfaktoren für die Nutzung in den Zweischichten-Modellen (ZSM) erläutert werden, so dass die ZSM für die Bestätigung und Freigabe der optimierte Kabelachsabstände herangezogen werden können.

Grundlage der Betrachtungen ist der Ausgangspunkt, dass durch den Wärmestrom der Kabel die natürliche Feuchtigkeit im Boden im näheren Umfeld geändert wird.

Im Zweischichtenmodell wird nach einer Temperaturänderung von 15K die genutzte konstante Wärmeleitfähigkeit (i.d.R. feuchter Boden mit 1 W/mK) in die konstante WLF von 0,4 W/mK (Ofentrocken) der betroffenen Elemente im FE-Modell umgeändert. Ein Grundwasserstand oder die Erneuerung des Bodenwasserhaushaltes durch Niederschläge werden in dem Modell nicht berücksichtigt, wodurch unrealistisch hohe Temperaturen um eingerdete Kabel entstehen.

In dem THE-Modell werden alle klimatischen Einflüsse, wie Niederschläge, Lufttemperaturänderung (Winter, Sommer) oder anstehende Grundwasserspiegel, sowie der Einfluss von Pflanzen auf den Bodenwasserhaushalt mitberücksichtigt, wodurch eine realistische Sättigungsänderung um das Kabel im Boden und damit eine realistische Änderung der Wärmeleitfähigkeit im Boden abgebildet werden können. Neben der Abbildung der Sättigungsänderungen um die Kabel, werden zeitgleich auch die Größe der beeinflussten Zonen um die Kabel besser abgebildet.

Veränderlicher Wassergehalt um das Kabel (THE Model) zu einem Kabelachsabstand mit zulässigen Leitertemperaturen

Eingangsparameter (Kap.3.1.1), Geometrien (Kap. 4.1) & Sicherheitsfaktor

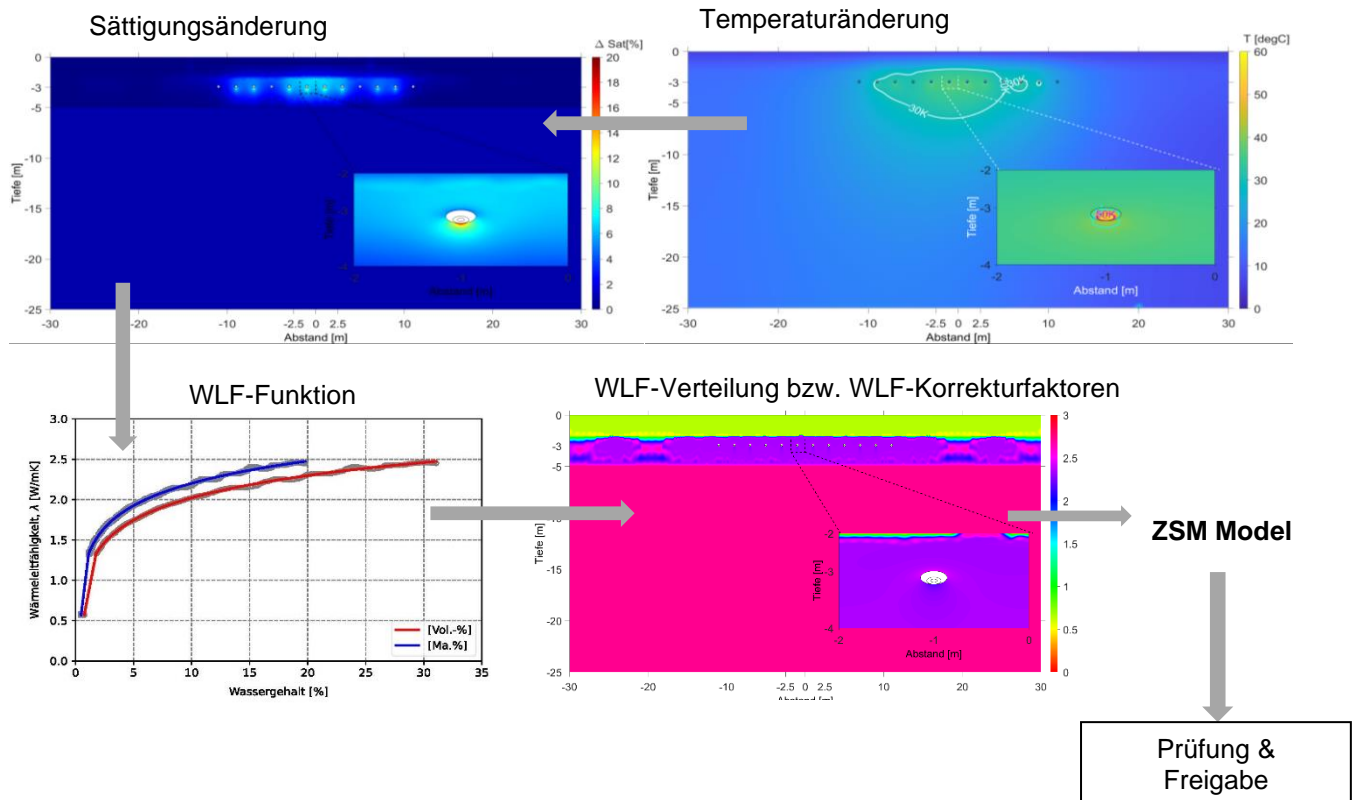


Abbildung 15: Abbildung des Workflows zur Bestimmung der WLF – Korrekturfaktoren für die optimierte Bestimmung der Kabelachsabstände. (Quelle: GeoAnalysis-Engineering GmbH).

Sicherheitsfaktoren

Um vorhandene Heterogenitäten im Untergrund und andere auftretende Varianzen abzufedern, wird ein Sicherheitsfaktor von 1,25 in die Berechnung der korrigierten WLF-Werte aufgenommen. Dieses geschieht zu Beginn des Workflows bei den Eingangsparametern. Die Werte der ursprünglichen WLF-Kurven werden durch den Faktor 1,25 abgemindert, so dass die Simulation zur Bestimmung der thermisch erforderlichen Kabelachsabstände mit den verminderten WLF-Werten durchgeführt wird.

Workflow zur Bestimmung der WLF-Korrekturfaktoren für die ZSM Nutzung

- 1) Ausgehend von den standortabhängigen Leitprofilen oder anstehenden Bodenprofilen mit den sättigungsabhängigen Eingangswerten in den Berechnungen (Wärmeleitfähigkeit, spez. Wärmekapazität etc.) werden die möglichen Kabelachsabstände berechnet.
- 2) Mit den in den jeweiligen Bodenschichten anstehenden WLF-Kurven lassen sich ausgehend von der berechneten Sättigungsänderung die reduzierten WLF-Werte in dem Modell berechnen.
- 3) Zuordnung der punktuellen korrigierten WLF-Werte in jeder Schicht für die Nutzung im ZSM
- 4) Listung aller WLF-Korrekturen für unterschiedliche Tiefen und Kabelachsabstände
- 5) Prüfung und Freigabe der Kabelachsabstände durch Amprion

Beispieldarstellung

Tabelle 6: Beispieldarstellung der aktuellen Eingangswerte: Leitprofile im RML

Geotechnischer Teilbereich [-]	Schichtmächtigkeit [m]	Bodengruppe [-]	Stratigraphie	Wärmeleitfähigkeit [W/mK]	Wärmekapazität [MJ/(m³*K)]
Leitboden 1	5,00	HZ	Torf	0,6	2,2
	bis UK max. Bohrtiefe BGU	SE	Sand	2,4	2,5
Leitboden 2	3,30	OT	organische Tone	1,1	2,5
	3,00	HN	Torf	0,6	2,2
	bis UK max. Bohrtiefe BGU	SE	Sand	2,4	2,5

Tabelle 7: Beispieldarstellung der korrigierten Eingangswerte: Leitprofile im RML mit korrigierten WLF-Werten

Geotechnischer Teilbereich [-]	Schichtmächtigkeit [m]	Bodengruppe [-]	Stratigraphie	Korrigierte WLF	
Leitboden 1	5,00	HZ	Torf	0,8	Eingangswerte für ZSM
	bis UK max. Bohrtiefe BGU	SE	Sand	2,3	
Leitboden 2	3,30	OT	organische Tone	1,1	
	3,00	HN	Torf	0,6	
	bis UK max. Bohrtiefe BGU	SE	Sand	2,4	

7 Zusammenstellung der Sicherheiten im betrachteten Gesamtsystem von der Erkundung bis zur Simulation und dem Design

- 1) Während der BGU werden die Proben zur Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit aus technischen und zeitlichen Gründen oft als gestörte Proben entnommen. Damit wird die bestehende Zementierung und Lagerung der Bodenmatrix komplett gestört. Nach dem Einbau von gestörtem Bodenmaterial in die Versuchsanlagen wird damit eine geringere Wärmeleitfähigkeit (WLF) als im natürlichen Zustand ermittelt. Die Bildung der Zementierung und Bodenmatrix wird nach einigen Jahren neu gebildet, wodurch die WLF zusätzlich verbessert wird.
- 2) Bei den messtechnisch analysierten Bodenproben erfolgt zuvor ein Aussieben der Grobbestandteile, welche mit dem Feinkorn für eine höhere Dichte und für eine höhere WLF sorgen.
- 3) In den klimatischen Randbedingungen beinhalten für einen 10-Jahres-Zyklus die dreimalige Wiederholung des Jahres 2018 als das bislang wärmste und trockenste Jahr entsprechend dem Deutschen Wetterdienst – DWD. Für tieferliegende Unterquerungen muss der Simulationszeitraum zum Teil bis auf 50 Jahre erweitert werden, um in ein thermisches Gleichgewicht zu gelangen. In dem Zeitraum von 50 Jahren ist das Jahr 2018 bereits 15-mal berücksichtigt.
- 4) In den Leitprofilen wird der auftretende ungünstigste Grundwasserstand von den unterschiedlich zusammengefassten Querungsprofilen angesetzt.
- 5) In der Berücksichtigung von Grundwasser wird ein sehr geringer Grundwasserfluss im Boden angesetzt.
- 6) In der Rückrechnung der Wärmeleitfähigkeit aus den numerischen gekoppelten Simulationen (siehe Kapitel 6) werden die Ergebnisse der sättigungsabhängigen Wärmeleitfähigkeit mit einem Sicherheitsfaktor von 1,25 reduziert.
- 7) Das Design der Kabelauslastung entsprechend einem NEP-Wert ist eine statische Auslastung mit einem konstanten Wärmefluss aus dem Kabelleiter. Die infolge der dynamischen Auslastung auftretende Abkühlung im Leiter wird in der Regel im Design nicht berücksichtigt.

8

Symbolverzeichnis

Symbol	Physikalische Bedeutung
k (m/s)	gesättigte hydraulische Leitfähigkeit
g (m/s ²)	Erdbeschleunigung
z (hPa)	hydraulisches Potential
q_w (m ³ /s)	Wasserfluss
ψ_m (hPa)	Matrixpotential
θ (Vol.%)	volumetrische Wassergehalt
q_v (J/kg)	gesamte strömende Wasserdampf
D_v (m ² /s)	effektive Dampf-Diffusionskoeffizient
c_v (ml/m ³)	gesättigte Dampfkonzentration
w (g/m ³)	Dampfsättigungs-Konzentration zur Feuchtigkeit
δ_{air} (kg/m*s)	Dampf-Permeabilitätskoeffizient in der Luft
h (%)	relative Luftfeuchtigkeit
p_{sat} (hPa)	gesättigte Dampfdruck
μ (-)	Dampfdiffusionswiderstand
λ (W/m*K)	thermische Leitfähigkeit
L (°C)	latente Verdampfungswärme von Wasser
c_w (J/kg,K)	Volumetrische spezifische Wärmekapazität
w_Φ (kg/m ³)	Feuchtigkeits-Speicherfunktion
R_n (W/m ²)	Nettostrahlung von der Bodenoberfläche
H (W/m ²)	Sensibler Wärmefluss
E (mm/d)	Evapotranspiration

G_0 (W/m ²)	Bodenwärmefluss
R_{sun} (W/m ²)	kurzwellige Strahlung der Sonne
R_{soil} (W/m ²)	Langwellige Strahlung von der Bodenoberfläche
R_{atm} (W/m ²)	Langwellenstrahlung aus der Atmosphäre
ρ_{air} (kg/m ³)	Luftdichte
Δ (kg/cm ³)	gesättigte Dampfdruck-Temperaturbeziehung
r_s (s/m)	Oberflächenwiderstand
r_a (m/s)	Windgeschwindigkeit
LAI (-)	Blattflächen-Index