

	<p>SuedOstLink - BBPIG Vorhaben Nr. 5 und Nr. 5a –</p>	
	<p>Abschnitt D2 Nittenau bis Pfatter</p> <p>Unterlagen gemäß § 21 NABEG</p>	<p>Das Vorhaben Nr. 5 im SuedOstLink ist von der Europäischen Union gefördert; sie haftet nicht für die Inhalte.</p>  <p>Kofinanziert von der Fazilität „Connecting Europe“ der Europäischen Union</p>
<h2>Anlage E4.1.1 Wärmetransportberechnung</h2>		

00	29.06.2023	Unterlage gemäß § 21 NABEG	ARGE U S. Beck-Broichsitter	ARGE U F. Wuttke	TenneT M. Schafhirt
Rev.	Datum	Ausgabe	Erstellt	Geprüft	Freigegeben

Festgestellt nach §24 NABEG
Bonn, den

INHALTSVERZEICHNIS

INHALTSVERZEICHNIS	2	
ABBILDUNGSVERZEICHNIS	3	
1	EINLEITUNG	4
1.1	Einordnung der Unterlage	4
1.2	Inhalt und Zweck des Dokuments	4
2	RECHTLICHE REGELUNGEN UND FACHLICHER RAHMEN	5
3	VORGEHENSWEISEN	6
3.1	Allgemeines	6
3.2	Modellierung der Wärmeausbreitung	6
3.2.1	Beschreibung der Methodik	6
3.2.1.1	Beschreibung physikalischer Prozesse	6
3.2.1.2	Auswahl und Überprüfung der physikalischen Modelle	7
3.2.1.3	Randbedingungen des Modells zur Oberfläche	9
3.2.1.4	Berücksichtigung der Evapotranspiration im Modell	11
3.2.1.5	Numerische Berechnung	12
3.2.1.6	Eingangswerte für die Wärme- und Massentransport-Simulation	12
3.2.1.7	Wärmeleitfähigkeiten	13
3.2.1.8	Ungesättigte hydraulische Leitfähigkeit	14
3.2.1.9	Diffusionskoeffizienten	15
3.2.2	Vorbereitende Arbeiten: Aufbereitung Wetterdaten, Kalibrierung	15
3.2.2.1	Wetterdaten	15
3.2.2.2	Kalibrierung	16
3.2.2.3	Sensitivitätsanalyse	16
3.2.2.4	Berücksichtigung der Streuung	16
3.2.2.5	Definition der Initial- und Randbedingungen für die numerische Simulation	17
3.2.3	Technische und physikalische Parameter	17
3.2.3.1	Technische Parameter des HGÜ-Kabels	17
3.2.3.2	Umgebender Boden	18
3.3	Allgemeine potenzielle Auswirkungen	19
3.3.1	Änderungen Boden- und Wasserhaushalt	19
3.4	Auswahl der repräsentativen Leitprofile und Extremstandorte im betrachteten Abschnitt	19
4	LITERATURVERZEICHNIS	21
5	ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS	23
6	SYMBOLVERZEICHNIS	24

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

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:	Potenzielle Verdunstungshöhen unterschiedlicher Vegetationstypen während eines Jahres (Quelle: GeoAnalysis-Engineering GmbH).	11
Abbildung 6:	Exemplarischer Aufbau des 525 kV DC-Erdkabels (Quelle: Arcadis Germany GmbH).	17
Abbildung 7:	Schematische Darstellung der Regelgrabenprofile (380 kV AC-Erdkabel) für die Vorhaben Nr. 5 (oben) sowie Nr. 5 und Nr. 5a (unten).	18
Abbildung 8:	Wärme- und Wassertransport in der ungesättigten Bodenzone (verändert nach WESSOLEK et al. 2016).	19

1 Einleitung

1.1 Einordnung der Unterlage

Das vorliegende Dokument stellt die Anlage 1 zum Wärmeimmissionsgutachten des SOL, Abschnitt D2 dar.

1.2 Inhalt und Zweck des Dokuments

Das vorliegende Dokument „Anlage E4.1.1 Wärmetransportberechnung“ beschreibt die physikalischen und mathematischen Grundlagen der Wärmeimmission, die zur Verbesserung der Lesbarkeit des Teils E4 – Wärmeimmissionen ausgegliedert und in die vorliegende Anlage überführt wurden.

2 Rechtliche Regelungen und fachlicher Rahmen

Obwohl es keine konkreten Grenzwerte für die Temperaturverhältnisse im Boden gibt, so sind die Beeinträchtigungen der natürlichen Bodenfunktion, der Nutzungsfunktion für die Land- und Forstwirtschaft sowie der Archivfunktion soweit wie möglich zu vermeiden. Gemäß § 22 BImSchG sind nicht genehmigungsbedürftige Anlagen so zu errichten und zu betreiben, dass vermeidbare schädliche Umwelteinwirkungen (z. B. durch Wärmeimmissionen) verhindert werden und ergänzt durch § 1 Bundesbodenschutzgesetz (BBodSchG) sind nach dem Stand der Technik nicht vermeidbare schädliche Umwelteinwirkungen auf ein Mindestmaß zu beschränken.

Grundsätzlich sind die Bestimmungen gemäß Bundesnaturschutzgesetz (BNatSchG) und Bundesbodenschutzgesetz (BBodSchG) und Bodenschutzgesetze des Landes Bayern (BayBodSchG) zu berücksichtigen.

Im Rahmen des Fachgutachtens sind die in den Unterlagen gemäß § 21 NABEG relevanten Eingangparameter heranzuziehen, sodass sich daraus Aussagen über die Bodenerwärmung für die umliegenden Bodenbereiche ableiten lassen. Die Wirkreichweite der betriebsbedingten Wärmeimmissionen ist in den Berechnungen zu ermitteln. Wirkreichweite und Wirkintensität bilden die Grundlage für die Auswirkungsprognose auf die einzelnen Schutzgüter gemäß UVP. Die abschnittswisen Ergebnisse aus diesem Fachgutachten sind die Grundlage für die Beschreibung und Bewertung der zu erwartenden Beeinträchtigung der Böden durch den Wirkfaktor „Veränderung des Bodentemperaturhaushaltes“ in der Unterlage § 21 NABEG-Unterlage UVP-B Schutzgut Boden.

Gemäß § 4 Abs. 2 Satz 1 26. BImSchV sind bei Errichtung von Gleichstromanlagen die Möglichkeiten auszuschöpfen, die von der jeweiligen Anlage ausgehenden elektrischen, magnetischen und elektromagnetischen Felder nach dem Stand der Technik unter Berücksichtigung von Gegebenheiten im Einwirkungsbereich zu minimieren. Bei HGÜ-Erdkabeln besteht eine solche Minimierungsmaßnahme in der Verlegung der Kabel mit möglichst geringem Abstand zueinander (vgl. Nr. 5.1.2.1 26. BImSchVVwV). Zugleich weist Nr. 5.1.2.1 26. BImSchVVwV darauf hin, dass Mindestkabelabstände erforderlich sein können, um thermische Belastungen der Kabel zu begrenzen.

3 Vorgehensweisen

3.1 Allgemeines

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

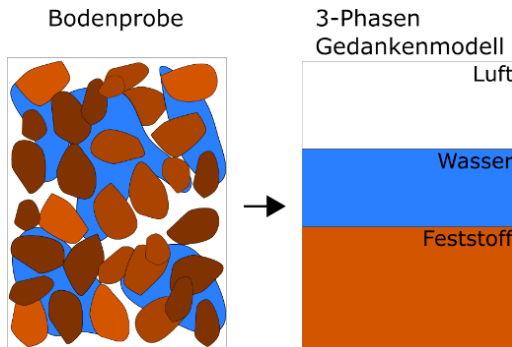


Abbildung 1: Modell 3-Phasen-System (Quelle: GeoAnalysis-Engineering GmbH).

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 SuedOstLink 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 dem VHT abgestimmt, die in dem vorliegenden Gutachten vorgestellt und durchgeführt wird.

3.2 Modellierung der Wärmeausbreitung

3.2.1 Beschreibung der Methodik

3.2.1.1 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.

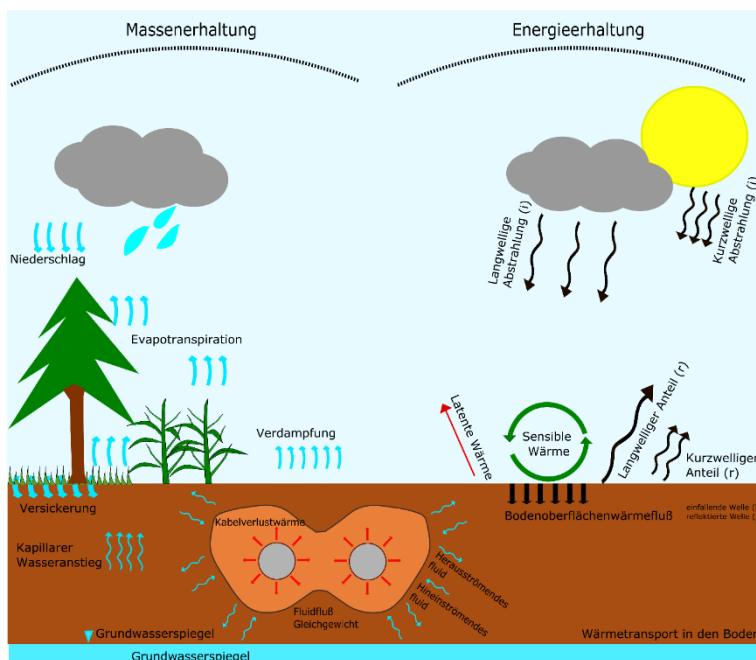


Abbildung 2: Einflussgrößen, Massen- und Energiebilanz (Quelle: GeoAnalysis-Engineering GmbH).

3.2.1.2 Auswahl und Überprüfung der physikalischen Modelle

Für die Modellierung gilt, dass der Betrag der Masse und Energie im betrachteten Gebiet konstant bleiben, also die Massenerhaltung und Energieerhaltung gelten. 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 von 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“ 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.

elektrotechnischen Planer zur Verfügung gestellt.² 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's 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's 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's - 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 Dampf Widerstandsfaktor.

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

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

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:

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

- Energieerhaltung:

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

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.

3.2.1.3 Randbedingungen des Modells zur Oberfläche

Der Wärmefluss an der Obergrenzengrenze 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, kurzwelligigen Strahlung der Sonne R_{sun} , der Langwellenstrahlung aus der Atmosphäre R_{atm} und der langwelligen Strahlung, die von der Bodenoberfläche R_{soil} emittiert wird:

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

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

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

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).

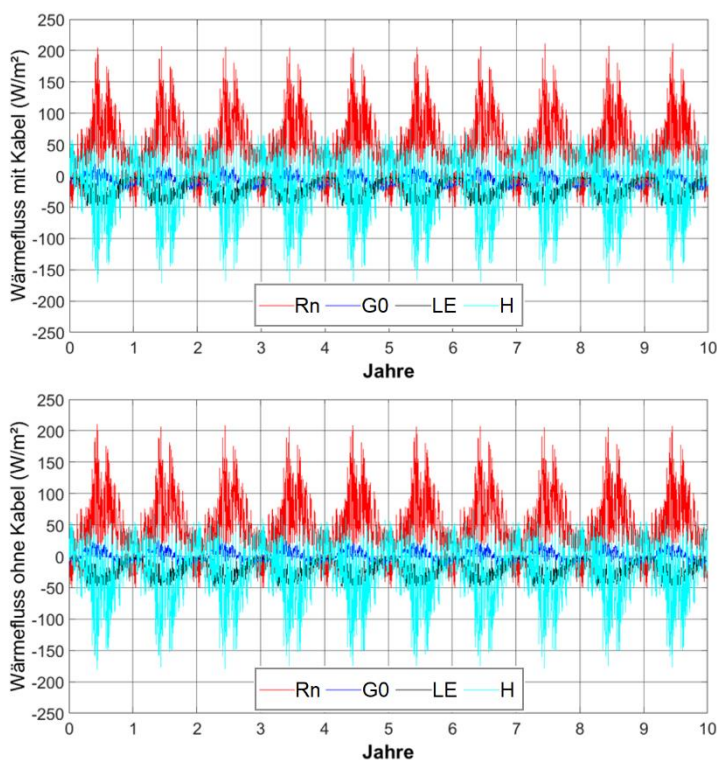


Abbildung 3: Wärmefluss an der Geländeoberkante mit Kabel (Bild oben) und ohne Kabel (Bild unten) im Zeitraum von 10 Jahren (Quelle: GeoAnalysis-Engineering GmbH).

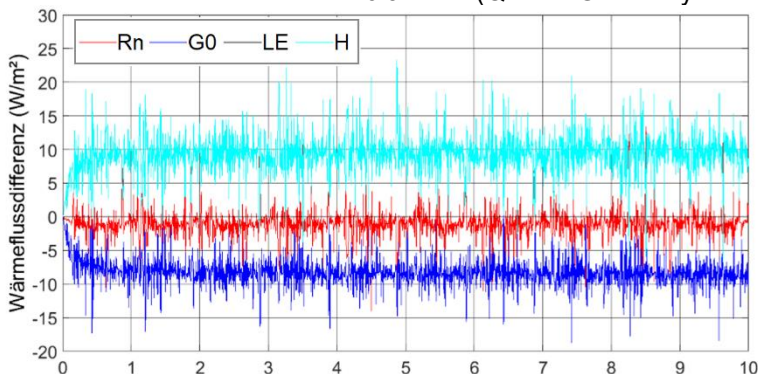


Abbildung 4: Wärmeflussdifferenz an der Geländeoberkante (Wärmefluss mit Kabel/Wärmefluss ohne Kabel) im Zeitraum von 10 Jahren (Quelle: GeoAnalysis-Engineering GmbH).

3.2.1.4 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 $r_a = 208/v_{wind}$ (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):

$$v_{Wind2m} = v_{Wind} \frac{4,87}{\ln(67,8 \cdot z - 5,42)} \quad \text{Gl. 12}$$

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

$$r_s = \frac{r_l}{LAI_{active}} \quad \text{Gl. 13}$$

LAI_{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 5).

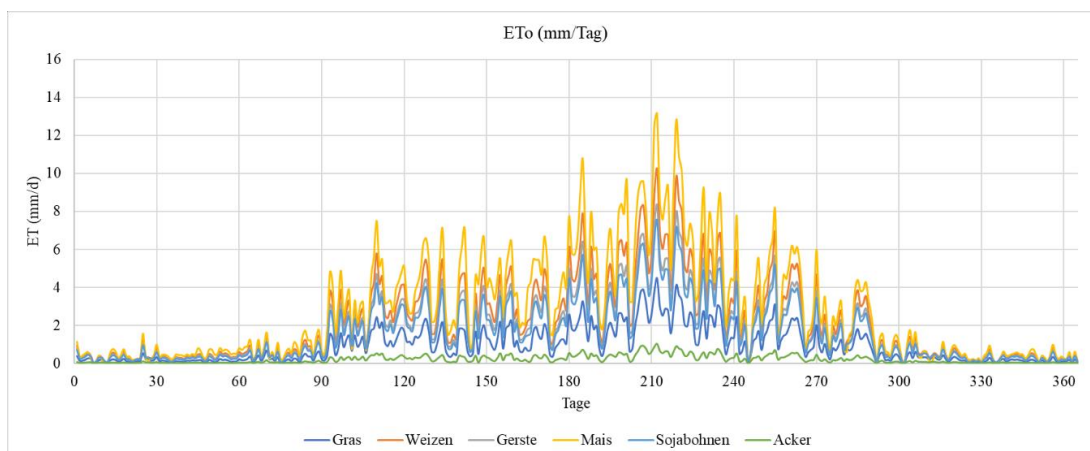


Abbildung 5: Potenzielle Verdunstungshöhen unterschiedlicher Vegetationstypen während eines Jahres (Quelle: GeoAnalysis-Engineering GmbH).

3.2.1.5 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-Element-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.

3.2.1.6 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.

3.2.1.7 Wärmeleitfähigkeiten

Um eine entsprechende Varianz der genäherten Wärmeleitfähigkeiten für jeden Bodentyp abbilden zu können, werden bei jedem Boden drei Annahmen für die Korngrößenverteilung getroffen (DIN ISO 11277, 2002):

- minimaler Sandgehalt bei maximalem Tongehalt
- maximaler Sandgehalt bei minimalem Tongehalt
- mittlerer Sand- und Tongehalt

Wärmeleitfähigkeiten von Böden sind vom Wassergehalt abhängig und variieren stark (RIZVI et al. 2018). Derzeit ist die allgemeine Datenlage noch zu gering, um ausschließlich aus projektbezogenen Messwerten die für die Modellierungen benötigten genauen Informationen zu erhalten. Aus diesem Grund werden Varianzen zu Wärmeleitfähigkeiten anhand von Pedotransferfunktionen ermittelt.

Exemplarisch werden für die Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit drei Methoden (Pedotransferfunktionen) verwendet. Diese sind das Modell von MARKERT et al. (2017), das Modell von KERSTEN (1952), welches von FAROUKI (1981) an die SI-Einheiten angepasst wurde, sowie das Modell von DeVries (1963) und Campbell (1985), entnommen aus CASSEL (1987) und ABU-HAMDEH AND REEDER (2000).

Pedotransferfunktion nach MARKERT et al. (2017):

$$\lambda = p_1 + p_2 * \phi + e^{\beta - \theta - \delta} \quad \text{Gl. 14}$$

$$\delta = p_3 * \%_{\text{Ton}} + p_4 \quad \text{Gl. 15}$$

$$\beta = p_5 * \%_{\text{Sand}} + p_6 * \text{TRD} + p_7 * \text{TRD} * \%_{\text{Sand}} + p_8 \quad \text{Gl. 16}$$

Dabei ist ϕ die Porosität des Materials, θ der Wassergehalt und TRD die Trockenrohddichte. Die Parameter p_1 bis p_8 sind empirische Parameter, abhängig von der Korngrößenfraktion des Materials.

Pedotransferfunktion nach KERSTEN (1952) und FAROUKI (1981):

- Für Sandanteil < 50 %:

$$\lambda = \left(0,1442 * \left(\frac{0,9 * \log \theta(\psi)}{\text{TRD}} \right) - 0,2 \right) * 10^{0,6243 * \text{TRD}} \quad \text{Gl. 17}$$

- Für Sandanteil > 50 %:

$$\lambda = \left(0,1442 * \left(\frac{0,7 * \log \theta(\psi)}{\text{TRD}} \right) + 0,4 \right) * 10^{0,6243 * \text{TRD}} \quad \text{Gl. 18}$$

Dabei ist ψ_m das Matrixpotenzial, bzw. die Saugspannung.

Das Matrixpotenzial ist das Potenzial des Bodenwassers unter dem Einfluss der Matrixkräfte. Es entspricht dem Betrag an Arbeit, der verrichtet werden muss, um dem Boden unter den Gasdruck- und Temperaturbedingungen in einer bestimmten Höhe eine Mengeneinheit Bodenlösung zu entziehen (HORN 2016).

Pedotransferfunktion nach DeVries (1963) und Campbell (1985), entnommen aus CASSEL (1987) und ABU-HAMDEH AND REEDER (2000):

$$\lambda = A + B * \theta(\psi) - (A - D) * e^{-(C * \theta(\psi)^4)} \quad \text{Gl. 19}$$

$$A = 0,65 - 0,78 * \text{TRD} + 0,6 * \text{TRD}^2 \quad \text{Gl. 20}$$

$$B = 1,06 * TRD \quad \text{Gl. 21}$$

$$C = 1 + \frac{2,6}{\%_{\text{Ton}}^{0,5}} \quad \text{Gl. 22}$$

$$D = 0,3 + 0,1 * TRD^2 \quad \text{Gl. 23}$$

Der Wassergehalt θ wurde nach der Gleichung von VAN GENUCHTEN (1980) auf Basis des Matrixpotenzials ψ_m (Saugspannung) bestimmt:

$$\theta(\psi_m) = \begin{cases} \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{[1 + (\alpha|\psi_m|)^n]^{1/m}}, & \psi_m < 0 \\ \theta_s, & \psi_m \geq 0 \end{cases} \quad \text{Gl. 24}$$

Dabei entspricht $\theta(\psi_m)$ dem Wassergehalt als Funktion des Matrixpotenzials (cm^3/cm^3), ψ_m dem Matrixpotenzial (hPa), θ_s dem Wassergehalt bei Sättigung (cm^3/cm^3) und θ_r ($\theta_r \geq 0$) dem Residualwassergehalt (cm^3/cm^3). Die van Genuchten-Parameter α , n und m sind rein empirische Parameter und dienen der Beschreibung des Verlaufs der Wasserretentions- und Wasserleitfähigkeitsfunktion.

Die Auswirkungen der Fließrichtung werden über die Berechnung der hydraulischen Gradienten analysiert. Der hydraulische Gradient i errechnet sich aus der Differenz der Matrixpotentiale ψ_m über die Bodentiefe z unter Berücksichtigung der Gravitationspotentials ψ_z (HORN 2016):

$$i = \frac{(d\psi_m + \psi_z)}{dz} \quad \text{Gl. 25}$$

Dabei hat das Matrixpotential ein negatives Vorzeichen, während das Gravitationspotential ein positives Vorzeichen hat. Die GOK dient als Bodenoberfläche.

Bei negativem hydraulischem Potential fließt das Wasser kapillar aufwärts (Kapillarer Aufstieg), während bei einem positiven Wert eine Versickerung (Infiltration) erfolgt. Bei einem Wert von Null findet keine Ausgleichsbewegung im Boden statt.

3.2.1.8 Ungesättigte hydraulische Leitfähigkeit

Neben den benannten thermischen Parametern gehen auch die hydraulischen Parameter als Eingangswert in die numerische Simulation ein. Dabei werden die Funktionen der ungesättigten hydraulischen Leitfähigkeit, die sättigungsabhängigen Diffusionskoeffizienten, der Wasserdampf Widerstandsfaktor und die Feuchtigkeitsspeicherkoeffizienten benötigt.

Die ungesättigte hydraulische Leitfähigkeitsfunktion $ku(\psi_m)$ mit $\psi_m < 0$ resultiert aus der Verknüpfung der Modellansätze von MUALEM (1976) und VAN GENUCHTEN (1980):

$$ku(\psi_m) = kf \cdot \frac{[1 - (\alpha|\psi_m|)^{n-1} (1 + (\alpha|\psi_m|)^n)^{-m}]^2}{[1 + (\alpha|\psi_m|)^n]^{ml}} \quad \text{Gl. 26}$$

Dabei entspricht $ku(\psi_m)$ der ungesättigten hydraulischen Leitfähigkeit als Funktion des Matrixpotenzials (m/s), kf der gesättigten hydraulischen Leitfähigkeit (m/s), ψ_m dem Matrixpotenzial (kPa) und α , n , m und l ($l = 0,5$) den dimensionslosen van Genuchten-Parametern.

Die sättigungsabhängigen Diffusionskoeffizienten, der Wasserdampf Widerstandsfaktor und die Feuchtigkeits-speicher-koeffizienten wurden unter Zuhilfenahme der Bodenkundlichen Kartieranleitung 5 (Ad-hoc-AG Boden, 2005) und bestimmt.

3.2.1.9 Diffusionskoeffizienten

Die effektiven Diffusionskoeffizienten wurden nach KOWALSKI AND PAWŁOWSKI (2010) für unterschiedliche Sättigungen S und Temperaturen T bestimmt.

Die Wasserdampfdiffusionsfähigkeit D_v hängt von der luftgefüllten Porosität und vom Diffusionskoeffizienten von Wasserdampf in Luft D_0 ab. Der Wert kann durch eine semiempirische Beziehung von PENMAN (1948) berechnet werden,

$$D_v = D_0 \beta (\chi_a)^m \quad \text{Gl. 27}$$

wobei β und m Anpassungsparameter sind und χ_a dem luftgefüllte Volumenanteil entspricht.

Eine andere Beziehung für den Diffusionskoeffizienten kann durch FEDOSEEV et al. (2018) für tonartigen Boden verwendet werden. In porösen Materialien wird die Diffusion durch die Verringerung des zugänglichen Querschnitts, Adsorptionseffekte an den Porenwänden und die Tortuosität der Porenwege behindert. Der Wasserdampf-Widerstandsfaktor (μ) repräsentiert das Verhältnis der Diffusionskoeffizienten von Wasserdampf in Luft und im porösen Material.

Messungen von μ , die bei unterschiedlicher relativer Luftfeuchtigkeit durchgeführt werden, können jedoch für ein und dasselbe Material zu unterschiedlichen Werten führen. Dies ist auf die Oberflächendiffusion zurückzuführen, die bei höher Luftfeuchtigkeit relevant wird, aber besser als Flüssigkeitstransport angesetzt werden könnte. Dieser zusätzliche Feuchtigkeitstransport wird bei der Auswertung der Messungen meist nicht berücksichtigt und reduziert zusammen mit der Dampfdiffusion den scheinbaren Diffusionswiderstand, was zu einem niedrigeren μ -Wert führt. In diesen Fällen ist es zweckmäßiger, einen konstanten μ -Wert zu verwenden und die Flüssigkeitstransportkoeffizienten so anzupassen, dass die Oberflächendiffusion berücksichtigt wird.

Die Speicherkapazität wird mit einer Sorptionswaage im hygroscopischen Bereich und mit Druckplatten- und Druckmembranextraktoren im superhygroscopischen Bereich gemessen. Die Werte können aus in der Literatur publizierten Messungen und Erfahrungen entnommen werden.

3.2.2 Vorbereitende Arbeiten: Aufbereitung Wetterdaten, Kalibrierung

3.2.2.1 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 niederschlagreichste und welcher der niederschlagärmste ist. Um angesichts des Klimawandels zukünftige Entwicklungen abzubilden, können besonders trocken 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, welche in das 10-Jahresmodell 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.

3.2.2.2 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.

3.2.2.3 Sensitivitätsanalyse

Eine physikalisch genaue Simulation der Wärme- und Massentransportmechanismen mit allen experimentell ermittelten Eingangsparametern würde einen sehr hohen, oft nicht vertretbaren Aufwand erfordern, u. a. weil die genaue Ermittlung sämtlicher möglicher Eingangswerte sehr umfangreiche und langwierige Untersuchungen erfordern würde.

Um den Aufwand an dieser Stelle effizienter zu gestalten und trotzdem möglichst gute, aussagefähige Ergebnisse zu erhalten, wird eine Sensitivitätsanalyse der variablen Modellparameter durchgeführt. So können aus der Vielzahl der vorhandenen Eingangsdaten diejenigen bestimmt werden, die einen signifikanten Einfluss auf das Berechnungsergebnis und damit die Abbildung des realen Bodenverhaltens haben.

Eingangsdaten, die einen eher geringen Einfluss auf das Ergebnis haben, können mit vergleichsweise geringem Aufwand festgelegt werden. Beispielsweise können in diesem Fall Erfahrungswerte herangezogen werden oder auf Grundlage vorhandener Daten können Varianzen einzelner Parameter ermittelt werden.

Die Sensitivitätsanalyse derartig komplexer, hochgradig nichtlinear gekoppelter physikalischer Systeme, wie die vorliegenden Simulationen, können nur numerisch durch Algorithmen der mathematischen Optimierung oder unter Verwendung neuronaler Netze erfolgen. Die GeoAnalysis-Engineering GmbH nutzt an dieser Stelle neuronale Netze, um diverse Szenarien zu analysieren und um zu bestimmen, welche Parameter die größten Auswirkungen auf das Ergebnis haben.

Als die am sensitivsten für die numerischen Berechnungen zu ermittelnden Kennwerten wurden dabei folgende Parameter identifiziert (Reihenfolge in abnehmender Sensitivität):

- Oberflächentemperatur
- Kabelverlustleistung
- Wärmeleitfähigkeit
- Diffusionskoeffizient

Die beiden oberen Parameter stellen dabei Randbedingung aus den klimatischen Einwirkungen und den technischen Planungen des Kabels dar. Als sensitive Parameter der porösen Bodenstruktur verbleiben die Wärmeleitfähigkeit und der Diffusionskoeffizient.

3.2.2.4 Berücksichtigung der Streuung

Bodenkennwerte weisen aufgrund der natürlich gegebenen Heterogenität im Untergrund eine gewisse Streubreite 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.

Die Vorgehensweise zur Erstellung der Varianzen für die Wärmeleitfähigkeit basierend auf Pedotransferfunktionen wird in Kapitel 3.2.1.7 näher beschrieben.

3.2.2.5 Definition der Initial- und Randbedingungen für die numerische Simulation

Folgende Initial- und Randbedingungen müssen für die numerische Simulation festgelegt werden:

- initiale Bodentemperatur mit 9,5 °C als mittlere Durchschnittstemperatur der aufgezeichneten Jahrestemperatur angenommen
- initiale Sättigung
- hydraulische Randbedingungen an den oberen, seitlichen und unteren Modellgrenzen (mit / ohne Wasserströmung)
- Ränder, an denen Wärme- und Massenaustausch stattfindet
- Meteorologische Randbedingungen an der Oberfläche (s. Kap. 3.2.1.3)
- Evapotranspirationsfunktion in Abhängigkeit von der jeweiligen Feldbepflanzung, z. B. Gras, Weizen, Mais (s. Kap. 3.2.1.4)

3.2.3 Technische und physikalische Parameter

3.2.3.1 Technische Parameter des HGÜ-Kabels

Das aufgeführte 525 kV DC-Erdkabel (DIN IEC 62067, VDE 0276-2067:2013-08) ist ein Musterbeispiel (Abbildung 6). Für die Modellierung wird der Oberflächenwärmefluss an der Schutzrohroberfläche verwendet. Für den inneren Ringraum zwischen dem Kabelschutzrohr und dem 525 kV DC-Erdkabel sowie dem 380 kV AC-Erdkabel wird entsprechend dem geplanten Herstellungsprozess die Existenz eines Luftspaltes angenommen.



* The measured thickness at any point may be smaller within the tolerances defined in the standard IEC 62067.

** ** A special mechanical test campaign as per § 6.3.3.6 shall validate these parameters. Most probably these parameters will be amended.

Abbildung 6: Exemplarischer Aufbau des 525 kV DC-Erdkabels (Quelle: Arcadis Germany GmbH).

In Abbildung 7 sind die geplanten Grabenprofile je nach Standfestigkeit der örtlich vorhandenen Böden für das Vorhaben Nr. 5 (1 Kabelsystem) sowie das Vorhaben Nr. 5 und Nr. 5a (2 Kabelsysteme) dargestellt:

1. Betrieb eines Kabelsystems bei Gleichstrom (DC) für die Leitprofile S0128 und B0204
2. Betrieb zweier Kabelsysteme bei Gleichstrom (DC) für die Leitprofile S0128 und B0204

Die Überdeckung beträgt 1,30 m (525 kV DC-Erdkabel) und der Abstand der Kabelgräben zueinander beträgt 8,0 m.

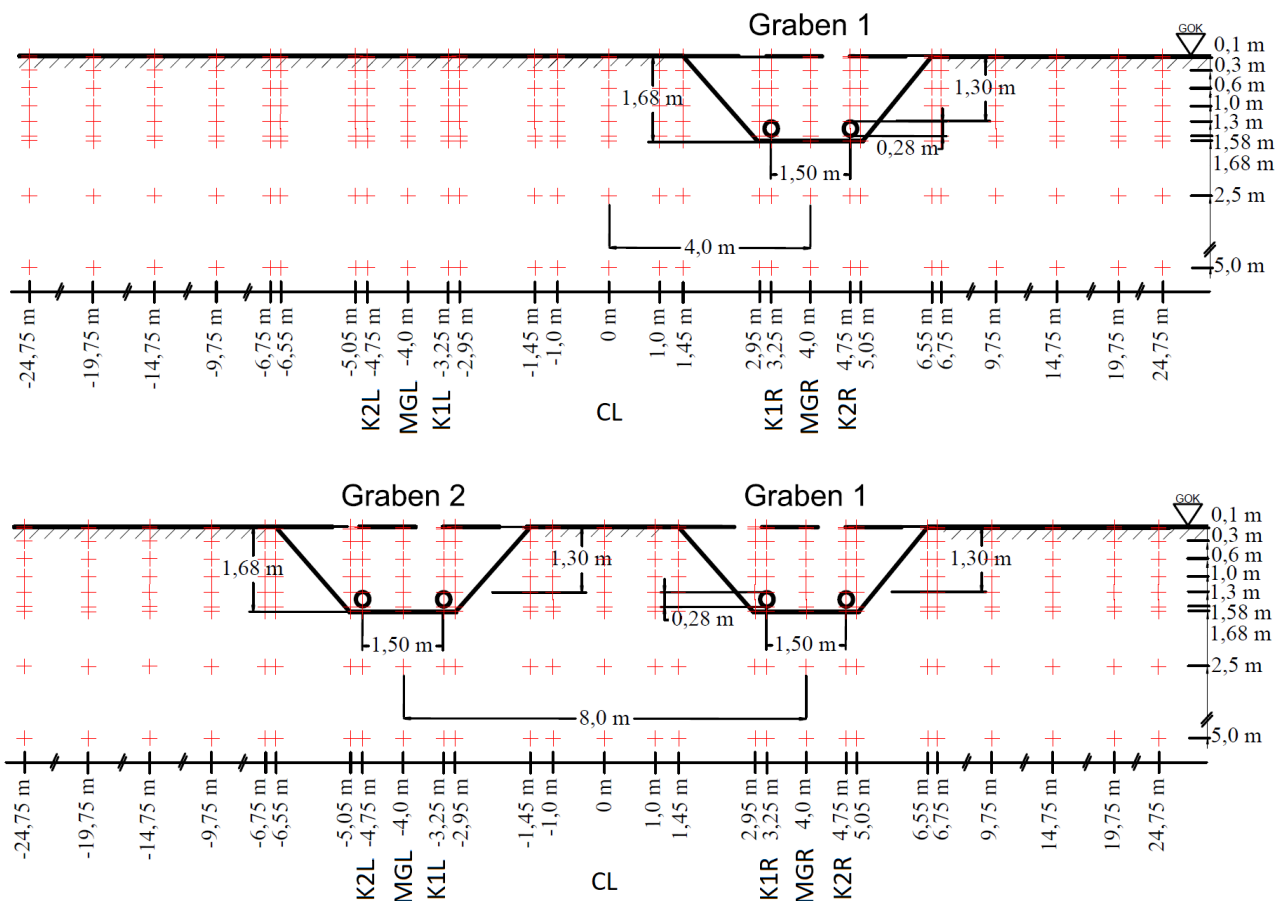


Abbildung 7: Schematische Darstellung der Regelgrabenprofile (380 kV AC-Erdkabel) für die Vorhaben Nr. 5 (oben) sowie Nr. 5 und Nr. 5a (unten).

3.2.3.2 Umgebender Boden

Die Erdkabel sind entweder direkt oder in einem zusätzlichen Schutzrohr oder HDD-Rohr o.ä. in ein Bodenmaterial bzw. Substrat (Kabelbettung) eingebettet. Zwischen dem Kabel und dem umgebenden Bodenmaterial findet eine „Interaktion“ statt. Dies bedeutet, dass durch die Kabelabwärme die Eigenschaften des umgebenden Bodens beeinflusst und verändert werden. Wie bereits beschrieben kann es durch die Erwärmung infolge des Kabelbetriebs zu einer partiellen Austrocknung oder einer Abnahme der Feuchtigkeit des umliegenden Bodens kommen. Diese würde die Wärmeleitfähigkeit des Bodens reduzieren.

Durch die Abnahme der Wärmeleitfähigkeit verlangsamt sich der Abtransport der Kabelabwärme. Dies führt dazu, dass sich das Kabel weiter aufheizt, was wiederum zu einer stärkeren Austrocknung führt. Aus diesem Grund bilden die Kabelanlage und der umgebende Boden eine technische Einheit. Die spezifischen Bodenparameter fließen als physikalische Größen sowohl in die Bemessung der Kabelanlage bei der technischen Planung als auch bei den im Rahmen dieser Arbeit erstellten Wärmeimmissionsbetrachtungen ein.

3.3 Allgemeine potenzielle Auswirkungen

3.3.1 Änderungen Boden- und Wasserhaushalt

Die mit den Kabeltrassen in Verbindung gebrachte Bodenerwärmung hat einen Einfluss auf den Naturhaushalt, die tatsächliche Verdunstung und das Wasserdargebot für Acker- und Grünlandkulturen (WESSOLEK et al. 2016). Die Wärmeleitfähigkeit eines Bodens ist abhängig von Bodenart (Sand > Schluff > Ton), Bodenfeuchte (feucht > trocken), Trockenrohdichte und Bodentemperatur (Abbildung 8).

Der Wasser- und Wärmetransport im Boden ist als gekoppelter thermisch-hydraulischer Prozess (STEGNER et al. 2017; AHMAD et al. 2021) zu betrachten, in dem a) der Wärmetransport durch den Wasserfluss und Dampftransport und b) der Wärmetransport durch den Matrix-Wärmetransport, Dampftransport von Wärme und dem Wasserwärmefluss bestimmt ist (HORN 2016; WESSOLEK et al. 2016).

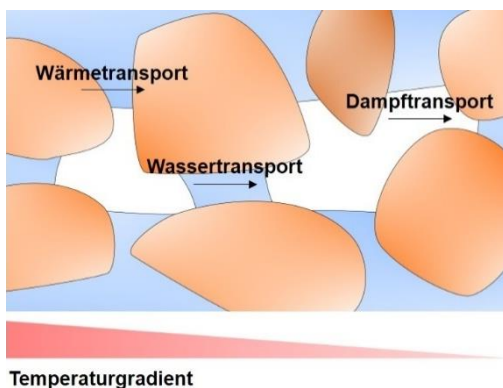


Abbildung 8: Wärme- und Wassertransport in der ungesättigten Bodenzone (verändert nach WESSOLEK et al. 2016).

Entlang der erdverlegten Kabel bildet sich in Folge eines negativen Temperaturgradienten (Abbildung 8) ein Wärmestrom zur Erdoberfläche hin aus. Der kabelnahe Unterboden wird dabei in der Regel wärmer als der kabelferne Oberboden (HORN 2016). Im Unterboden gespeichertes Wasser verdampft und wandert in Richtung des Oberbodens, wohingegen die Kapillarkräfte im Unterboden dafür sorgen, dass sich das kondensierte Wasser wieder zurückbewegt. Wärmeimmissionen über eine spezifische Grenztemperatur hinaus führen zu einem Ungleichgewicht in dieser Wechselwirkung und haben eine partielle Austrocknung des Ober- und Unterbodens zur Folge (TRINKS et al. 2013; (WESSOLEK et al. 2016).

Die aus der obigen numerischen Berechnung ermittelten tiefenabhängigen effektiven Sättigungsverläufe werden für die umweltfachliche bzw. landwirtschaftliche Analyse der Bodenkunde in temperaturabhängige Matrixpotenziale/Saugspannungen überführt. Dazu werden die Modelle von VAN GENUCHTEN (1980), GRANT AND BACHMANN (2002) und HRUSKA et al. (2018) verwendet:

$$\psi = -\frac{\beta_0 + T}{\alpha_r \beta_0 T_r} \left(S_e^{-\frac{1}{m}} - 1 \right)^{1-m} \quad \text{mit } S_e = \left[\frac{1}{1 + (\alpha |\psi|)^n} \right]^m \quad \text{mit } m = 1 - 1/n \quad \text{Gl. 27}$$

Die Variable β_0 ist eine empirische Konstante für die Abhängigkeit des Wasserdrucks abhängig von der Temperatur und den van Genuchten-Parametern α , n , m ($1 - 1/n$) und α_r bezogen auf die Referenztemperatur.

3.4 Auswahl der repräsentativen Leitprofile und Extremstandorte im betrachteten Abschnitt

Für die umweltfachlichen Betrachtungen sind die repräsentativen Leitprofile anhand flächenhaft häufig vorkommender Bodentypen (u. a. Braunerde, Podsol-Braunerde, Gley-Vega) im Trassenbereich für maßgeblich anstehende Bodenformen auszuwählen und gegebenenfalls vorhandene Extremstandorte (stark von flächenhaft häufig vorkommenden Bodentypen im Trassenbereich abweichend) zu identifizieren.

Je nach Datenlage und in Abstimmung mit dem VHT werden dazu folgende Vorgehensweisen ausgeführt:

1. Vorgehensweise - Kartenbasierte Informationen/geologische Landesämter /vorhandene ältere Standortinformationen
2. Vorgehensweise - bodenkundliche Erkundung / Erfahrung
3. Vorgehensweise - geotechnischen Baugrunduntersuchung / Messung Wärmeleitfähigkeit / bodenkundliche Erkundung und Informationen

Vorgehensweise 1: Liegen für einen Trassenabschnitt keinerlei direkte Untersuchungen vor, kann für die Abschätzung der Umweltauswirkungen auf Informationen in Form von Desktop-Studien zurückgegriffen werden.

Dazu können Informationen aus geologischen, hydrologischen, bodenkundlichen Karten gezogen und durch bereits vorhandene ältere Bohrungen bzw. Aufschlüsse ergänzt werden. Die notwendigen Eingangparameter für die Wärmetransportberechnung werden basierend auf der Karteninformation für die Profilhorizonte und Bodentypen als auch anhand von Literaturkennwerten bzw. Erfahrungswerten für Dichten, Porositäten, pF-Funktionen oder Pedotransferfunktionen für Wärmeleitfähigkeiten bestimmt.

Vorgehensweise 2: Liegen in einem konkreten Fall für ausgewählte Standorte bodenkundliche Informationen durch Aufschlüsse, aber noch keine weiteren bzw. nur wenig geotechnischen bzw. experimentellen Laborergebnisse vor, werden Näherungswerte für Wärmeleitfähigkeiten und Wärmespeicherkoeffizienten in Abhängigkeit von der Trockenrohdichte, Porosität, der Bodenart und dem Wassergehalt aus der Bodenkundlichen Kartieranleitung 5 (Ad-hoc-AG Boden, 2005) und weiteren Pedotransferfunktionen (u. a. DE VRIES, 1963; CASSEL 1987; ABU-HAMDEH AND REEDER 2000) abgeleitet.

Vorgehensweise 3: Liegen die Erkundungsdaten in einer ausreichenden Aufschlussdichte als Datenbank vor, so ist dies eine optimale Datenlage.

Mit Hilfe dieser Grundlage können „thermische Homogenbereiche“ gebildet werden. In der Datenbank werden diverse Ergebnisse und Parameter dokumentiert, die mit den Einflussgrößen korreliert sind, wie z. B.:

- CPT-Daten
- Sieblinien, Feinkorn und Grobkornanteil
- Bodentyp, Bodenhorizonte
- Dichte, Porosität
- Organischer Anteil
- Wasserspiegel
- Wassergehalt

Daraus können thermische, geotechnische oder andere Homogenbereiche abgeleitet werden. Aus den thermischen Homogenbereichen lassen sich wiederum Extremstandorte und Leitpro-file typischer Bodenformationen manuell oder automatisiert extrahieren, welche die Eigenarten entlang des Abschnitts in der Analyse widerspiegeln.

4 Literaturverzeichnis

- Abu-Hamdeh, N.H., Reeder, R.C., 2000. Soil Thermal Conductivity Effects of Density, Moisture, Salt Concentration, and Organic Matter. *Soil Science Society of America Journal* 64, 1285–1290. <https://doi.org/10.2136/sssaj2000.6441285x>
- Ahmad, S., Rizvi, Z.H., Arp, J.C.C., Wuttke, F., Tirth, V., Islam, S., 2021. Evolution of Temperature Field around Underground Power Cable for Static and Cyclic Heating. *Energies* 14. <https://doi.org/10.3390/en14238191>
- Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., Smith, M., 1998. Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage paper 56. Fao, Rome 300, D05109.
- Allgemeine Verwaltungsvorschrift zur Durchführung der Verordnung über elektromagnetische Felder (26. BImSchVVwV), 2016.
- Sechszwanzigste Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verordnung über elektromagnetische Felder - 26. BImSchV).
- Baugesetzbuch in der Fassung der Bekanntmachung vom 3. November 2017 (BGBl. I S. 3634), das zuletzt durch Artikel 2 des Gesetzes vom 8. August 2020 (BGBl. I S. 1728) geändert worden ist., 2020.
- Bayerisches Bodenschutzgesetz (BayBodSchG) vom 23. Februar 1999 (GVBl. S. 36, BayRS 2129-4-1-U), das zuletzt durch Gesetz vom 9. Dezember 2020 (GVBl. S. 640) geändert worden ist., 2020.
- Bundes-Bodenschutzgesetz vom 17. März 1998 (BGBl. I S. 502), das zuletzt durch Artikel 7 des Gesetzes vom 25. Februar 2021 (BGBl. I S. 306) geändert worden ist., 2021.
- Bundes-Immissionsschutzgesetz in der Fassung der Bekanntmachung vom 17. Mai 2013 (BGBl. I S. 1274; 2021 I S. 123), das zuletzt durch Artikel 1 des Gesetzes vom 18. August 2021 (BGBl. I S. 3901) geändert worden ist., 2021.
- Bundesnaturschutzgesetz vom 29. Juli 2009 (BGBl. I S. 2542), das zuletzt durch Artikel 1 des Gesetzes vom 18. August 2021 (BGBl. I S. 3908) geändert worden ist., 2021.
- Cassel, D.K., 1987. Soil physics with BASIC. Transport models for soil-plant systems: G.S. Campbell. (Developments in soil science, 14), Elsevier, Amsterdam, 1985, xvi + 150 pp., Dfl. 120.00/US \$41.50, ISBN 0-444-42557-8 (hardback). *Journal of Hydrology* 90, 359–360.
- DIN IEC 62067 VDE 0276-2067:2013-08. Starkstromkabel mit extrudierter Isolierung und ihre Garnituren für Nennspannungen über 150 kV (Um = 170 kV) bis einschließlich 500 kV (Um = 550 kV)., 2013.
- DIN VDE 0276-620:2018-04: Starkstromkabel - Energieverteilungskabel mit extrudierter Isolierung für Nennspannungen von 3,6/6 (7,2) kV bis einschließlich 20,8/36 (42) kV; Deutsche Übernahme HD 620 S2:2010, Teile 0, 1 und 10-C., 2018.
- Energiewirtschaftsgesetz vom 7. Juli 2005 (BGBl. I S. 1970, 3621), das zuletzt durch Artikel 84 des Gesetzes vom 10. August 2021 (BGBl. I S. 3436) geändert worden ist., 2021.
- Farouki, O.T., 1981. The thermal properties of soils in cold regions. *Cold Regions Science and Technology* 5, 67–75. [https://doi.org/10.1016/0165-232X\(81\)90041-0](https://doi.org/10.1016/0165-232X(81)90041-0)
- Fedoseev, A., Demin, N., Salnikov, M., Sukhinin, G., 2018. Numerical modelling of heat and moisture transfer in a clay-like porous material. *Journal of Physics: Conference Series* 1105, 012048. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1105/1/012048>
- Gesetz über die Umweltverträglichkeitsprüfung in der Fassung der Bekanntmachung vom 18. März 2021 (BGBl. I S. 540), das durch Artikel 14 des Gesetzes vom 10. September 2021 (BGBl. I S. 4147) geändert worden ist., 2021.
- Grant, S., Bachmann, J., 2002. Effect of temperature on capillary pressure. Washington DC American Geophysical Union Geophysical Monograph Series 129. <https://doi.org/10.1029/129GM18>
- Grundwasserverordnung vom 9. November 2010 (BGBl. I S. 1513), die zuletzt durch Artikel 1 der Verordnung vom 4. Mai 2017 (BGBl. I S. 1044) geändert worden ist., 2017.
- Horn, K.H.H.R., 2016. Essential Soil Physics. Schweizerbart Science Publishers, Stuttgart, Germany.

- Hruska, M., Clauser, C., Doncker, R., 2018. The Effect of Drying around Power Cables on the Vadose Zone Temperature. *Vadose Zone Journal* 17. <https://doi.org/10.2136/vzj2018.05.0105>
- Kersten, M.S., 1952. Thermal Properties of Soils. Highway Research Board Special Report.
- Kowalski, S., Pawłowski, A., 2010. Drying of Wet Materials in Intermittent Conditions. *Drying Technology* 28, 636–643. <https://doi.org/10.1080/07373931003788718>
- Markert, A., Bohne, K., a, M., Wessolek, G., 2017. Pedotransfer Functions of Soil Thermal Conductivity for the Textural Classes Sand, Silt and Loam. *Soil Science Society of America Journal* 81. <https://doi.org/10.2136/sssaj2017.02.0062>
- Merkblatt ATV-DVWK-M 504. 2002. Verdunstung in Bezug zu Landnutzung, Bewuchs und Boden. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V. (DVWK), Hennef., 2002.
- Merkblatt DWA-M 504-1. 2018. Ermittlung der Verdunstung von Land- und Wasserflächen – Teil 1: Grundlagen, experimentelle Bestimmung, Gewässerverdunstung. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V. (DWA), Henne., 2018.
- Monteith, J., 1965. Evaporation and environment. *Symposia of the Society for Experimental Biology* 19, 205-234.
- Netzausbaubeschleunigungsgesetz Übertragungsnetz vom 28. Juli 2011 (BGBl. I S. 1690), das zuletzt durch Artikel 4 des Gesetzes vom 8. Oktober 2022 (BGBl. I S. 1726) geändert worden ist.
- Oberflächengewässerverordnung vom 20. Juni 2016 (BGBl. I S. 1373), die zuletzt durch Artikel 2 Absatz 4 des Gesetzes vom 9. Dezember 2020 (BGBl. I S. 2873) geändert worden ist., 2020.
- Penman, H.L., 1948. Natural evaporation from open water, bare soil and grass. *Proc R Soc Lond A Math Phys Sci* 193, 120–145. <https://doi.org/10.1098/rspa.1948.0037>
- Pereira, L., Allen, R., Smith, M., 2015. Crop evapotranspiration estimation with FAO56: Past and future. *Agricultural Water Management* 147, 4–20. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2014.07.031>
- Rizvi, Z., Shrestha, D., Shoarian Sattari, A., Wuttke, F., 2018. Numerical modelling of effective thermal conductivity for modified geomaterial using Lattice Element Method. *Heat and Mass Transfer* 54. <https://doi.org/10.1007/s00231-017-2140-2>
- Stegner, J., Drefke, C., Hailemariam, H., Anbergen, H., Wuttke, F., Sass, I., 2017. Messtechnik für den Erdkabeltrassenbau. *Bauphysik* 39, 41–48. <https://doi.org/10.1002/bapi.201710003>
- Thüringer Bodenschutzgesetz (ThürBodSchG) vom 16. Dezember 2003 (GVBl. 2003, 511), zuletzt geändert durch Artikel 3 des Gesetzes vom 28. Mai 2019 (GVBl. S. 74, 121), 2019.
- Trinks, S., Kluge, B., Köhler, M., Wessolek, G., 2013. Optimierung der Strombelastbarkeit erdverlegter Energiekabel. *Netzpraxis* 12, 51–58.
- Van Genuchten, M., 1980. A Closed-form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils1. *Soil Science Society of America Journal* 44. <https://doi.org/10.2136/sssaj1980.03615995004400050002x>
- Verordnung zur Einführung einer Ersatzbaustoffverordnung zur Neufassung der Bundes-Bodenschutz und Altlastenverordnung und zur Änderung der Deponieverordnung und der Gewerbeabfallverordnung, Bundesgesetzblatt Jahrgang 2021 Teil I Nr. 43 ausgegeben zu Bonn am 09.07.2021., 2021.
- Walter, I.A., Allen, R., Elliott, R., Jensen, M., Itenfisu, D., Howell, T., Snyder, R.L., Brown, P., Echings, S., 2001. The ASCE Standardized Reference Evapotranspiration Equation. Final Report of the Task Committee on Standardization of Reference Evapotranspiration. [https://doi.org/10.1061/40499\(2000\)126](https://doi.org/10.1061/40499(2000)126)
- Wasserhaushaltsgesetz vom 31. Juli 2009 (BGBl. I S. 2585), das zuletzt durch Artikel 2 des Gesetzes vom 18. August 2021 (BGBl. I S. 3901) geändert worden ist., 2021.
- Wessolek, G., Kluge, B., Trinks, S., Bohne, K., 2016. Bewertung der Bodenerwärmung durch Erdkabeltrassen (Conference Paper), Bundesnetzagentur Wissenschaftsdialog. Bonn.

5 Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Erläuterung
AG	Auftraggeber
ATV-DVWK	Abwassertechnische Vereinigung-Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall
BBodSchG	Bundes-Bodenschutzgesetz
BBPIG	Bundesbedarfsplangesetz
BfN	Bundesamt für Naturschutz
BImSchVVwV	Allgemeine Verwaltungsvorschrift zur Durchführung der Verordnung über elektromagnetische Felder
BNatSchG	Bundesnaturschutzgesetz
BNetzA	Bundesnetzagentur
DIN	Deutsches Institut für Normung e.V.
FEM	Finite-Elemente-Methode
HAltBodSchG	Hessisches Gesetz zur Ausführung des Bundes-Bodenschutzgesetzes und zur Altlastensanierung
HDD	Horizontal Directional Drilling (Horizontalspülbohrverfahren)
HGÜ	Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung
LBodSchG	Landesbodenschutzgesetz
NABEG	Netzausbaubeschleunigungsgesetz Übertragungsnetz
NBodSchG	Niedersächsisches Bodenschutzgesetz
NEP	Netzentwicklungsplan
PFA	Planfeststellungsabschnitt
SOL	SuedOstLink
VHT	Vorhabensträger

6 Symbolverzeichnis

Symbol	Physikalische Bedeutung
k (m/s)	gesättigte hydraulische Leitfähigkeit
g (m/s ²)	Erdbeschleunigung
z (hPa)	hydraulisches Potential
qw (m ³ /s)	Wasserfluss
ψm (hPa)	Matrixpotential
θ (Vol.%)	volumetrische Wassergehalt
qv (J/kg)	gesamte strömende Wasserdampf
Dv (m ² /s)	effektive Dampf-Diffusionskoeffizient
cv (ml/m ³)	gesättigte Dampfkonzentration
w (g/m ³)	Dampfsättigungs-Konzentration zur Feuchtigkeit
δair (kg/m*s)	Dampf-Permeabilitätskoeffizient in der Luft
h (%)	relative Luftfeuchtigkeit
psat (hPa)	gesättigte Dampfdruck
μ (-)	Dampfdiffusionswiderstand
λ (W/m*K)	thermische Leitfähigkeit
L (°C)	latente Verdampfungswärme von Wasser
cw (J/kg,K)	Volumetrische spezifische Wärmekapazität
wφ (kg/m ³)	Feuchtigkeits-Speicherfunktion
Rn (W/m ²)	Nettostrahlung von der Bodenoberfläche
H (W/m ²)	Sensibler Wärmefluss
E (mm/d)	Evapotranspiration

Symbol	Physikalische Bedeutung
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