

Bodenkundliche Bewertung der Bodenerwärmung bei Teilerdverkabelungen

380 kV Kreis Segeberg – Raum Lübeck

Aufgestellt: Bayreuth, den 06.04.2020 <div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;"> <div style="text-align: center;">  i. V. </div> <div style="text-align: center;">  i. A. </div> </div>	Unterlagen zum Planfeststellungsverfahren																																				
Materialband 14.10 Neubau der 380 kV Leitung Kreis Segeberg – Raum Lübeck, Nr. LH-13-328																																					
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="width: 30%;">Prüfvermerk</th> <th style="width: 20%;">Ersteller</th> <th style="width: 10%;"></th> <th style="width: 10%;"></th> <th style="width: 10%;"></th> <th style="width: 10%;"></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Datum</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Unterschrift</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Änderung(en):</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Datum</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Unterschrift</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table>		Prüfvermerk	Ersteller					Datum						Unterschrift						Änderung(en):						Datum						Unterschrift					
Prüfvermerk	Ersteller																																				
Datum																																					
Unterschrift																																					
Änderung(en):																																					
Datum																																					
Unterschrift																																					
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th colspan="3" style="text-align: left;">Änderung(en):</th> </tr> <tr> <th style="width: 30%;">Rev. -Nr.</th> <th style="width: 20%;">Datum</th> <th style="width: 50%;">Erläuterung</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td> </td> <td> </td> <td> </td> </tr> </tbody> </table>		Änderung(en):			Rev. -Nr.	Datum	Erläuterung																														
Änderung(en):																																					
Rev. -Nr.	Datum	Erläuterung																																			
	Anhänge:																																				



Studie Teil I: Erwärmung des Erdbodens im Bereich der 380-kV-Zwischenverkabelung „Henstedt- Ulzburg“ und „Kisdorferwohld“

Neukirchen-Vluyn und Aschaffenburg im Februar 2020

Dr.-Ing. Jörg Stammen
sta-fem GmbH
Josef-Fehler-Str 57
46397 Bocholt
Tel.: ++49(0)1523 85 83 181
joerg.stammen@sta-fem.de

Dr.-Ing. Tao Dong
Aschaffstr.85
63741 Aschaffenburg
Tel.: ++49(0)173 54 07 847
dongchch@hotmail.com

Änderungsübersicht

Art der Änderung	Version	Datum	Bearbeiter
Anlegen des Berichts und Dokumentation des Kapitels 3	0.1	08.12.2019	T. Dong
Hinzufügen der stationär berechneten Bodenerwärmungen	0.2	09.01.2020	J. Stammen
Hinzufügen der transienten Bodenerwärmungen	0.3	16.01.2020	J. Stammen
Umrechnungswerte in Tabellen korrigiert	0.4	17.01.2020	J. Stammen
Hinzufügen der Zwei-Jahres-Simulationen	0.5	13.02.2020	J. Stammen
Einfügen des Abbildungs- und Tabellenverzeichnisses, redaktionelle Änderungen	1.0	20.02.2020	J. Stammen

Inhalt

1	Einleitung und Problemstellung	1
2	Beschreibung der Kabelanlage	4
2.1	Grabenprofile	4
2.2	Phasenreihenfolge:	5
2.3	Strombelastungsprofil:	5
2.4	Schirmbehandlung:	6
2.5	Aufbau und Materialparameter der Kabel	7
2.6	Materialparameter der technischen Kabelumgebung	9
2.7	Bodeneigenschaften	12
2.7.1	Bodenbeschreibung:	15
2.7.2	Wärmetransport im Erdreich	17
3	Berechnungen der elektrischen Eigenschaften	19
3.1	Nachbildung des Kabelsystems in ATP-EMTP	21
3.2	Berechnung der Stromaufteilungen	22
4	FEM-Berechnung thermischer und magnetischer Felder in Kabelanlagen	27
4.1	Erläuterungen zu den Berechnungen	27
4.2	Dielektrische Verluste	28
4.3	Berechnung des Magnetfeldes und der Wirbelströme mit der Finite-Elemente Methode	28
4.4	Gekoppelte Wirbelstrom- und Temperaturfeldberechnung	30
4.5	Transiente Berechnung des Temperaturfeldes	32
4.6	Berücksichtigung von Millikenleitern in der 2D-FEM	32
5	Ergebnisse der magnetisch-thermischen Berechnungen	35
5.1	Sandiger Boden	35
5.1.1	Mittlere Erwärmungen bei dynamischer Last und thermischer Grenzlast	36
5.1.2	Zyklische Belastungen	40
5.1.3	Temperaturen der Kabelanlage bei saisonalen Schwankungen	42
5.2	Lehmiger Boden	49
5.2.1	Mittlere Erwärmungen bei dynamischer Last und thermischer Grenzlast	49
5.2.2	Zyklische Belastungen	52
5.2.3	Temperaturen der Kabelanlage bei saisonalen Schwankungen	54

5.3	Moorboden	59
5.3.1	Mittlere Erwärmungen bei dynamischer Last und thermischer Grenzlast	61
5.3.2	Zyklische Belastungen	66
5.4	Abschließende Bemerkungen zu den Erwärmungen	66
5.4.1	Einfluss der Bodenerwärmung auf das Keimverhalten und das Pflanzenwachstum.....	67
6	Zusammenfassung.....	69
7	Anhang	71
7.1	Schrifttum.....	71
7.2	Über die Autoren	73

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Trassenverlauf der 380-kV-Ostküstenleitung zwischen Kreis Segeberg und Raum Lübeck [Ten2020]	1
Abb. 2: Aufteilung eines Freileitungssystems auf zwei Kabelsysteme [Ten2017]	2
Abb. 3: Regelgrabenprofil mit 45-Grad-Böschung und 12 erdverlegten 380-kV-Kabeladern [Ten2019].....	4
Abb. 4: Strombelastungsprofil „thermische Grenzlast“ [Ten2019]	5
Abb. 5: Strombelastungsprofil „dynamische Last“ [Ten2019].....	6
Abb. 6: Einleiter-Hochspannungskabel [Nex2001].....	7
Abb. 7: Kabel mit der Mantelfläche $A_{1\text{Kabel}}$ im zylindrischen Rohr mit der Fläche A_{Rohr} [Boe2006]	11
Abb. 8: Boden Nr. 1: Braunerde bis podsolige Braunerde aus Sand [Wes2019].....	13
Abb. 9: Boden Nr. 2: Pseudogleye aus Lehmsand über Geschiebelehm/-mergel [Wes2019] .	14
Abb. 10: Boden Nr. 3: Niedermoor über Sand [Wes2019]	15
Abb. 11: Korngrößen und Bodenarten [SPE2018]	16
Abb. 12: Feuchtigkeitstransport im Bereich einer Pore des Erdreichs unter Einwirken eines Temperaturgradienten [Sta2001]	17
Abb. 13: Schematische Darstellung der Cross-Bonding-Unterabschnitte im Bereich Henstedt-Ulzburg	19
Abb. 14: Schematische Darstellung der Cross-Bonding-Unterabschnitte im Bereich Kisdorferwohld.....	20
Abb. 15: Aufteilung der Leiterströme zwischen den Teilsystemen beider Stromkreise bei Normalbetrieb von 3150 A pro Stromkreis im Kabelabschnitt Henstedt-Ulzburg	23
Abb. 16: Induzierte Schirmströme bei Normalbetrieb von 3150 A pro Stromkreis im Kabelabschnitt Henstedt-Ulzburg	23
Abb. 17: Aufteilung der Leiterströme zwischen den Teilsystemen beider Stromkreise bei Normalbetrieb von 3150 A pro Stromkreis im Kabelabschnitt Kisdorferwohld.....	24
Abb. 18: Induzierte Schirmströme bei Normalbetrieb von 3150 A pro Stromkreis im Kabelabschnitt Kisdorferwohld	24
Abb. 19: Millikenleiter mit sechs Segmenten [Joa1996]	33
Abb. 20: Näherungsweise Nachbildung eines Millikenleiters.....	34
Abb. 21: Finite-Elemente-Modell der Kabelanlage im sandigen Boden.....	35
Abb. 22: Finite-Elemente-Modell, Ausschnitt im Bereich der Kabelanlage und der Bodenschichten, sandiger Boden (vergleiche Abb. 8).....	36
Abb. 23: Finite-Elemente-Modell, Ausschnitt im Bereich einer Kabelader im PE-Rohr	36

Abb. 24: Temperaturverteilung im Gesamtmodell, Kabelanlage im sandigen Boden, $I = 2333 \text{ A}$	37
Abb. 25: Temperaturabtastungen an der GOK, in 0,2 m 0,5 m und 1,0 m Tiefe im sandigen Boden, $I = 2333 \text{ A}$	38
Abb. 26: Temperaturabtastungen an der GOK, in 0,2 m 0,5 m und 1,0 m Tiefe im sandigen Boden, $I = 2625 \text{ A}$	38
Abb. 27: Temperaturabtastungen durch die Leiterachsen, sandiger Boden, $I = 2333 \text{ A}$ und 2625 A	39
Abb. 28: Verlauf der Temperatur im Leiter L33 und in diversen Tiefen bei dynamischer Last, sandiger Boden	40
Abb. 29: Verlauf der Temperatur im Leiter L33 und in diversen Tiefen bei Grenzlaster, sandiger Boden.....	41
Abb. 30: Finite-Elemente Modell des sandigen Bodens ohne Kabelanlage	43
Abb. 31: Temperaturverläufe in diversen Tiefen im thermisch ungestörten sandigen Boden .	43
Abb. 32: Temperaturverteilung im sandigen Boden a) im Sommer, b) im Winter	45
Abb. 33: Temperaturverteilung in Abhängigkeit der Tiefe, sandiger Boden.....	45
Abb. 34: Temperaturverteilung im sandigen Boden mit Kabelanlage, thermische Grenzlaster .	46
Abb. 35: Temperaturverteilung im sandigen Boden mit Kabelanlage, dynamische Last.....	47
Abb. 36: Finite-Elemente-Modell, Ausschnitt im Bereich der Kabelanlage und der Bodenschichten, lehmiger Boden (vergleiche Abb. 9)	49
Abb. 37: Temperaturabtastungen an der GOK, in 0,2 m 0,5 m und 1,0 m Tiefe im lehmigen Boden, $I = 2333 \text{ A}$	50
Abb. 38: Temperaturabtastungen an der GOK, in 0,2 m 0,5 m und 1,0 m Tiefe im lehmigen Boden, $I = 2625 \text{ A}$	50
Abb. 39: Temperaturabtastungen durch die Leiterachsen, lehmiger Boden, $I = 2333 \text{ A}$ und 2625 A	51
Abb. 40: Wärmeleitfähigkeiten des Sandbetts und der Bodenschichten, lehmiger Boden, $I = 2625 \text{ A}$	51
Abb. 41: Verlauf der Temperatur im Leiter L33 und in diversen Tiefen bei dynamischer Last, lehmiger Boden	53
Abb. 42: Verlauf der Temperatur im Leiter L33 und in diversen Tiefen bei Grenzlaster, lehmiger Boden	53
Abb. 43: Temperaturverläufe in diversen Tiefen im thermisch ungestörten lehmigen Boden.	55
Abb. 44: Temperaturverteilung in Abhängigkeit der Tiefe, Vergleich lehmiger und sandiger Boden.....	56

Abb. 45: Temperaturverteilung im lehmigen Boden mit Kabelanlage, thermische Grenzlast	56
Abb. 46: Temperaturverteilung im lehmigen Boden mit Kabelanlage, dynamische Last	58
Abb. 47: Finite-Elemente-Modell, Ausschnitt im Bereich der Kabelanlage und der Bodenschichten, Moorboden (vergleiche Abb. 10)	60
Abb. 48: Wärmeleitfähigkeiten des Sandbetts und der Bodenschichten, Moorboden ohne Grundwasserströmung, thermische Grenzlast	61
Abb. 49: Temperaturabtastungen an der GOK, in 0,2 m 0,5 m und 1,0 m Tiefe, Moorboden ohne Strömung, $I = 2333 \text{ A}$	62
Abb. 50: Temperaturabtastungen an der GOK, in 0,2 m 0,5 m und 1,0 m Tiefe im Moorboden ohne Strömung, $I = 2625 \text{ A}$	62
Abb. 51: Temperaturabtastungen durch die Leiterachsen, Moorboden ohne Strömung, $I = 2333 \text{ A}$ und 2625 A	63
Abb. 52: Temperaturabtastungen an der GOK, in 0,2 m 0,5 m und 1,0 m Tiefe, Moorboden mit Strömung, $I = 2333 \text{ A}$	64
Abb. 53: Temperaturabtastungen an der GOK, in 0,2 m 0,5 m und 1,0 m Tiefe im Moorboden mit Strömung, $I = 2625 \text{ A}$	64
Abb. 54: Temperaturabtastungen durch die Leiterachsen, Moorboden mit Strömung, $I = 2333 \text{ A}$ und 2625 A	65

Tabellenverzeichnis

Tab. 1: Aufbauelemente, Materialien und Abmessungen des 380-kV-Kabels	8
Tab. 2: Verlegungsparameter zur Ermittlung der Stromaufteilung im Kabelabschnitt Henstedt-Ulzburg.....	20
Tab. 3: Verlegungsparameter zur Ermittlung der Stromaufteilung im Kabelabschnitt Kisdorferwohld.....	21
Tab. 4: Leiterströme und induzierte Schirmströme im Kabelabschnitt Henstedt-Ulzburg bei Höchstlast, 3150 A je Stromkreis	25
Tab. 5: Leiterströme und induzierte Schirmströme im Kabelabschnitt Kisdorferwohld bei Höchstlast, 3150 A je Stromkreis	26
Tab. 6: Maximale Temperaturen (°C) und Erwärmungen (K) im sandigen Boden, stationäre Berechnung	39
Tab. 7: Maximale Temperaturen (°C) und Erwärmungen (K) im sandigen Boden, transiente Berechnung	42
Tab. 8: Temperaturschwankungen in diversen Tiefen im thermisch ungestörten sandigen Boden.....	44
Tab. 9: Temperaturschwankungen in diversen Tiefen im sandigen Boden mit Kabelanlage, thermische Grenzlast.....	46
Tab. 10: Vergleich der Temperaturen des ungestörten Bodens und mit Kabelanlage bei thermischer Grenzlast, sandiger Boden	47
Tab. 11: Temperaturschwankungen in diversen Tiefen im sandigen Boden mit Kabelanlage, dynamische Last.....	48
Tab. 12: Vergleich der Temperaturen des ungestörten Bodens und mit Kabelanlage bei dynamischer Last, sandiger Boden.....	48
Tab. 13: Maximale Temperaturen (°C) und Erwärmungen (K) im lehmigen Boden, stationäre Berechnung	52
Tab. 14: Maximale Temperaturen (°C) und Erwärmungen (K) im lehmigen Boden, transiente Berechnung	54
Tab. 15: Temperaturschwankungen in diversen Tiefen im thermisch ungestörten lehmigen Boden.....	55
Tab. 16: Temperaturschwankungen in diversen Tiefen im lehmigen Boden mit Kabelanlage, thermische Grenzlast.....	57
Tab. 17: Vergleich der Temperaturen des ungestörten Bodens und mit Kabelanlage bei thermischer Grenzlast, lehmiger Boden	57
Tab. 18: Temperaturschwankungen in diversen Tiefen im lehmigen Boden mit Kabelanlage, dynamische Last.....	58

Tab. 19: Vergleich der Temperaturen des ungestörten Bodens und mit Kabelanlage bei dynamischer Last, lehmiger Boden.....	59
Tab. 20: Maximale Temperaturen (°C) und Erwärmungen (K) im Moorboden ohne Grundwasserströmung, stationäre Berechnung.....	61
Tab. 21: Maximale Temperaturen (°C) und Erwärmungen (K) im Moorboden mit Grundwasserströmung, stationäre Berechnung.....	66
Tab. 22: zu erwartenden Temperaturerhöhungen an den wärmsten Stellen im Boden bei mittlerer Belastung.....	67
Tab. 23: maximal mögliche Temperaturerhöhungen an den wärmsten Stellen im Boden bei thermischer Grenzbelastung	67
Tab. 25: Zusammenfassung aller Bodenerwärmungen	69

1 Einleitung und Problemstellung

Die Übertragung der erzeugten Leistung aus erneuerbaren Energien erfordert den Netzausbau in Schleswig-Holstein. Die TenneT TSO GmbH (AG) plant den Neubau der 380-kV-Höchstspannungsleitung zwischen den Umspannwerken Kreis Segeberg, Lübeck, Siems und Göhl („380-kV-Ostküstenleitung“). Die Ostküstenleitung wurde als ein Pilotprojekt für Teilerdverkabelungen zur Höchstspannungs-Drehstromübertragung eingestuft.

TenneT plant nach jetzigem Stand einen rund 4,4 km langen Erdkabelabschnitt bei Henstedt-Ulzburg sowie eine ca. 3,04 km lange Teilstrecke in Kisdorferwohld (Abb. 1).

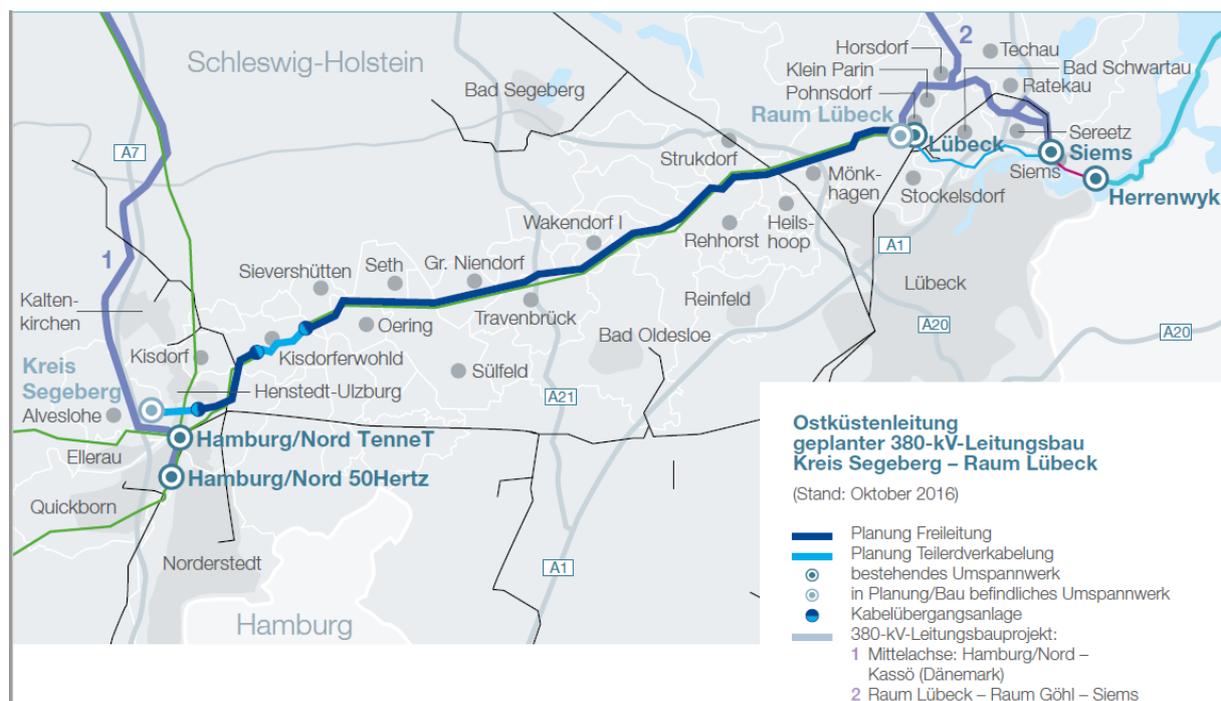


Abb. 1: Trassenverlauf der 380-kV-Ostküstenleitung zwischen Kreis Segeberg und Raum Lübeck [Ten2020]

Die beiden Zwischenverkabelungen werden im Folgenden kurz „Henstedt-Ulzburg“ und „Kisdorferwohld“ genannt. Für den Wechsel zwischen Freileitung und Erdkabel werden je Abschnitt i.d.R. zwei Kabelübergangsanlagen gebaut und an jedes Freileitungssystem der 380-kV-Höchstspannungsfreileitung werden zwei parallel geschaltete Drehstromkabelsysteme angeschlossen (siehe Abb. 2).

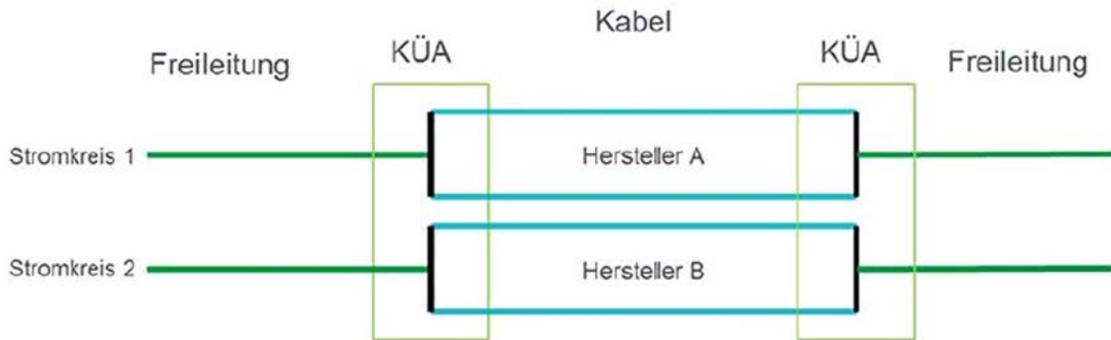


Abb. 2: Aufteilung eines Freileitungssystems auf zwei Kabelsysteme [Ten2017]

Die beiden linken Systeme (Stromkreis 1) und die beiden rechten Systeme (Stromkreis 2) sind parallelgeschaltet. Aufgrund der magnetisch unsymmetrischen Legeanordnung bei Flachverlegung wird sich eine von Leiter zu Leiter unterschiedliche Stromaufteilung einstellen, was bei den Erwärmungsberechnungen in dieser Studie berücksichtigt wird.

Es handelt sich bei der Kabelanlage also um insgesamt 12 Kabeladern, welche einzeln in HDPE-Rohren (HDPE-High-Density-Polyethylen) eingezogen sind. Die ringförmigen Spalte zwischen Kabeladern und Rohrwand bleiben luftgefüllt. Die PE-Rohre liegen in einer Sandbettung.

Bei den hier vorliegenden Böden kommt im Bereich der offenen Verlegung das TenneT-Regelprofil mit einem Böschungswinkel von 45° (siehe Abschnitt 2.1) zum Einsatz. Die Legetiefe im Regelgraben beträgt 1,6 m mit einer Toleranz von -0,1 m bis +0,2 m.

Das Amt für Planfeststellung Energie (AfPE) fordert im Rahmen des Vorhabens ein „*Gutachten zur thermischen Berechnung von Wärmestrahlung durch Erdkabel*“. Es soll die Wärmeverteilung im Boden bei Normalbetrieb und bei Höchstlast berechnet werden. Weiterhin soll der Einfluss der thermischen Emissionen auf den Wasserhaushalt, Bodenorganismen und Pflanzen (Keimverhalten, Reifeentwicklung, Ertragsfähigkeit) untersucht werden.

Diese Studie befasst sich mit der Berechnung der thermischen Felder der Kabelanlage. Auf diese Ergebnisse aufbauend, werden von Prof. Wessolek die Auswirkungen auf den Boden untersucht.

Um die thermischen Felder möglichst präzise berechnen zu können, müssen ebenfalls die elektrischen und magnetischen Eigenschaften betrachtet werden, die abgegebene thermische Leistung der Kabelanlage (im Folgenden auch Verlustleistung genannt) ist wesentlich von diesen Eigenschaften abhängig.

Elektrische Eigenschaften:

Zur Unterdrückung der Schirmverluste bei Einleiterkabeln größerer Übertragungsleistung werden Kabelschirme speziell behandelt. In der geplanten Kabelstrecke ist das Auskreuzen der Kabelschirme (Cross-Bonding) vorgesehen. Schirmströme aufgrund eines nicht idealen Cross-Bondings können bis zu 5 % der Leiterverluste ausmachen und müssen daher für eine präzise Berechnung der thermischen Felder berücksichtigt werden.

Zunächst werden die ungleichmäßige Leiterstromaufteilung und die induzierten Schirmströme aus den mittleren geometrischen Abständen der Leiter im Bereich des letzten Mastfeldes und der Zwischenverkabelung ermittelt.

Zur Berechnung der elektrischen Eigenschaften wird das auf der Knotenpotentialanalyse basierende Programmsystem ATP-EMTP (ATP-EMTP: Alternative Transients Program - Electromagnetic Transients Program) [ATP] eingesetzt.

Thermische und magnetische Eigenschaften:

Anhand der ermittelten Leiter- und Schirmströme werden die Temperatur- und Magnetfelder der Kabelanlage berechnet. Es werden drei unterschiedliche Bodenprofile mit unterschiedlichen Wärmeleitfähigkeiten, austrocknende sowie nichtaustrocknende Bereiche betrachtet.

Für die gekoppelte Berechnung der Magnetfelder und der Temperaturverteilung kommt der vom Autor speziell für Problemstellungen der Energiekabeltechnik entwickelte Finite-Elemente Simulator „stafem“ [Sta2001] zum Einsatz, welcher auch das nichtlineare Verhalten von Materialparametern, wie zum Beispiel temperaturabhängige elektrische Leiterwiderstände, feldabhängige Permeabilität bei ferromagnetischen Armierungen bei Seekabeln und Stahlrohrkapselungen sowie partielle Bodenaustrocknungen berücksichtigt.

Neben gekoppelten elektromagnetisch-thermischen Berechnungen für den stationären Zustand, werden auch transiente Erwärmungsberechnungen durchgeführt, um saisonale Einflüsse zu berücksichtigen und jahreszeitlich unterschiedliche Temperaturprofile im Boden zu betrachten

Zwei Belastungsszenarien sind für 380-kV-Zwischenverkabelungen nach [Ten2019] vorgesehen und werden in dieser Studie rechnerisch untersucht:

- Bei der thermischen Grenzlast sollen die Kabel einen Strom von 3.150 A bei einem Lastgrad von $m = 0,8$ übertragen. Der Lastfaktor soll über drei direkt aufeinanderfolgende jeweils 8-stündige konstante Stromstärken von 1890 A, 2520 A und 3150 A realisiert werden.
- Bei der dynamischen Belastung sollen die Kabel Stromstärken von 1680 A, 2240 A und 2800 A jeweils acht Stunden übertragen. Abschließend folgt ein Sprung auf 4000 A, welches den (n-1)-Fall simulieren soll.

Die thermische Grenzlast stellt dabei die größte anzunehmende Belastung der Kabelanlage dar (Höchstlast). Bei der dynamischen Belastung ist die Belastung geringer. Klammert man den (n-1)-Fall aus, stellt die dynamische Belastung die durchschnittliche Belastung der Kabelanlage dar.

Die beiden Lastszenarien (genaue Beschreibung, siehe Abschnitt 2.3) werden durch zeitaufgelöste, transiente Erwärmungsberechnungen abgebildet.

2 Beschreibung der Kabelanlage

Die Eigenschaften einer Kabelanlage hängen wesentlich von der Ausführung der Anlage wie Leitermaterial, Leiter- und Schirmquerschnitt, Legeabstände und -tiefen, Schirmbehandlung, Phasenreihenfolge, etc. ab. Von großer Bedeutung für die Belastbarkeit ist ebenfalls die Umgebung, wie zum Beispiel eine Verlegung der Kabeladern in PE-Rohren (PE-Polyethylen) oder in einer thermischen Stabilisierung (z.B. Magerbeton oder Sandbettung) sowie die thermischen Eigenschaften des umgebenden Erdreichs.

Gleichbleibende Eigenschaften der Anlage entlang der Trasse werden in diesem Abschnitt beschrieben, variierende Eigenschaften wie z.B. Bodenprofile werden im jeweiligen Kapitel des untersuchten Querschnitts betrachtet.

2.1 Grabenprofile

Regelgraben:

Aufgrund der vorkommenden Böden wird das Profil mit 45°-Böschung (siehe Abb. 3) verwendet.

Regelgrabenprofil für Böschungsnäigung von 45°

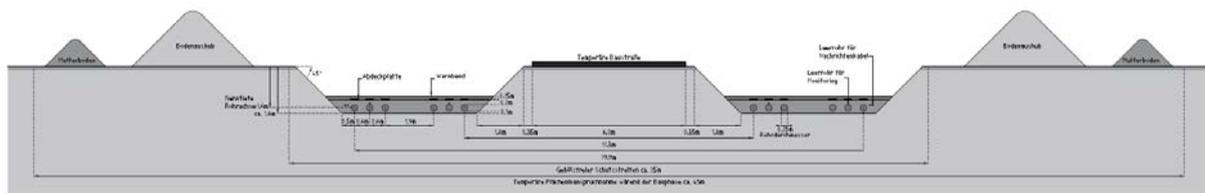


Abb. 3: Regelgrabenprofil mit 45-Grad-Böschung und 12 erdverlegten 380-kV-Kabeladern [Ten2019]

Ein Freileitungssystem wird mit zwei Kabelsystemen verbunden, die parallelgeschaltet sind. Aus zwei Freileitungssystemen werden also vier Kabelsysteme. Zu unterscheiden sind im Regelgraben die drei Abstandsarten:

- Phasenabstand: Aderachsabstand zwischen zwei Kabeladern innerhalb eines Dreileitersystems, hier ca. 0,6 m.
- Systemabstand: Aderachsabstand der zwei benachbarten Kabeladern von System 1 und System 2 (bzw. System 3 und System 4), hier: ca. 1,90 m. Beide Systeme hängen am selben Freileitungssystem und liegen im selben Kabelgraben.
- Stromkreisabstand: Aderachsabstand zwischen den benachbarten Adern von Stromkreis 2 und 3 also Abstand zwischen der rechten Ader im linken Kabelgraben und der linken Ader im rechten Graben, hier: ca. 11,3 m.

2.2 Phasenreihenfolge:

Die beiden linken Teilsysteme 1 und 2 und die beiden rechten Teilsysteme 3 und 4 in Abb. 3 sollen parallelgeschaltet sein. Abweichend von der üblichen Phasenfolge L1, L2, L3 - L3, L2, L1 - L1, L2, L3 - L3, L2, L1 wurde die Phasenzuordnung der einzelnen Kabelsysteme nach [Ten2018] bewusst nicht spiegelsymmetrisch, sondern gleichbleibend (L1, L2, L3 - L1, L2, L3 - L1, L2, L3 - L1, L2, L3) gemäß [Ten2018] gewählt.

Aufgrund dieser Phasenfolge wird sich an der Erdoberfläche und darüber die kleinste magnetische Induktion ergeben, die magnetischen Emissionen also minimiert. Aufgrund der magnetisch unsymmetrischen Flachverlegung der Einleiterkabel wird sich jedoch auch ungleichmäßige Stromaufteilung der beiden parallelgeschalteten Systeme ergeben.

2.3 Strombelastungsprofil:

Gemäß der neuesten Version von [Ten2019] werden folgende zwei Lastprofile definiert: die thermische Grenzbelastung mit maximal 3150 A, $m = 0,8$ und die dynamische Belastung mit maximal 2800 A, $m = 0,8$. Beide Lastprofile werden in den folgenden Abbildungen dargestellt:

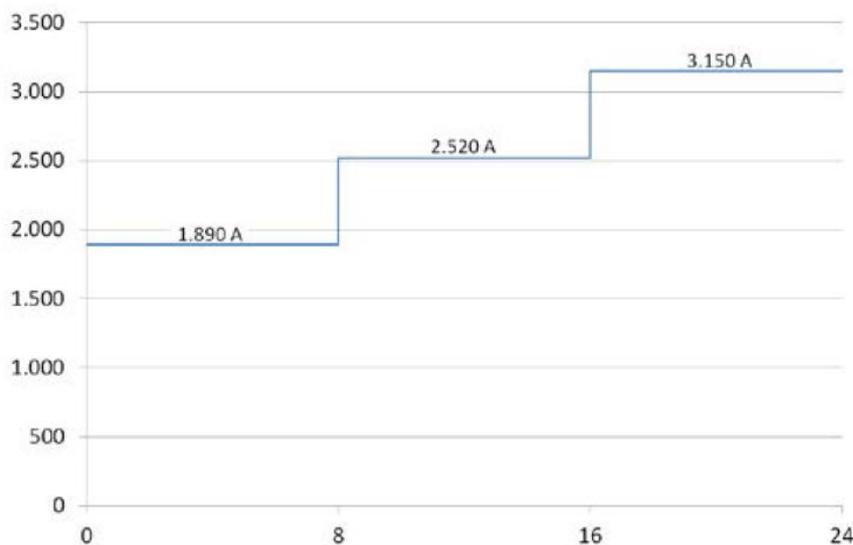


Abb. 4: Strombelastungsprofil „thermische Grenzlast“ [Ten2019]

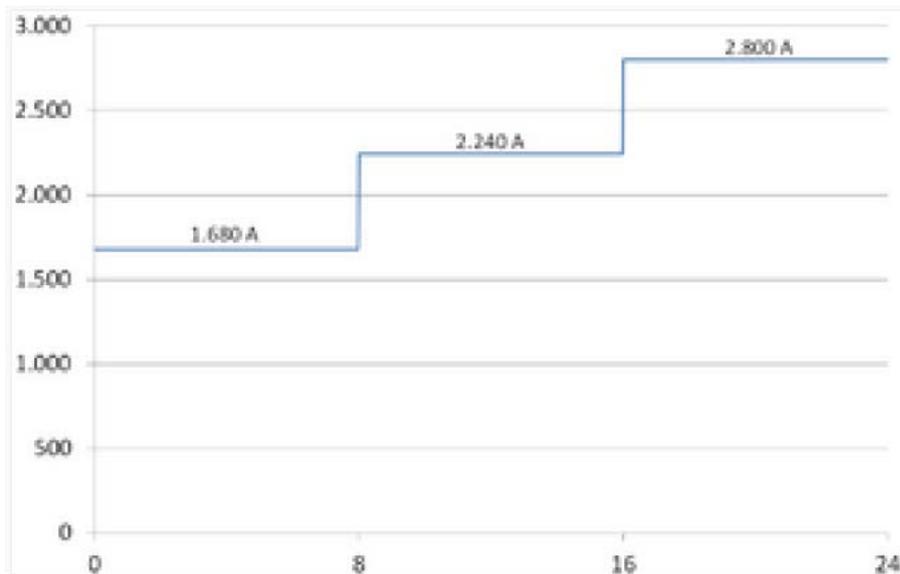


Abb. 5: Strombelastungsprofil „dynamische Last“ [Ten2019]

Thermische Grenzlast:

Das in [Ten2019] aufgeführte Lastprofil „thermische Grenzlast“ stellt die höchste Auslastung der Kabelanlage dar, bei der die Belastbarkeit gewährleistet sein muss. Somit liefern die Simulationen mit thermischer Grenzlast die **maximal zu erwartenden Erwärmungen, unter der Voraussetzung, dass die thermische Grenzlast über Jahre ansteht.** Da dies in der Regel nicht der Fall ist, wird die tatsächliche Erwärmung der Kabelanlage deutlich unterhalb der berechneten Temperaturen liegen.

Dynamische Last:

Die dynamische Last in [Ten2019] liegt von den Strömen her unterhalb der thermischen Grenzlast und beschreibt **die zu erwartende Belastung der Kabelanlage.** Sie ist daher mit der in [AfPE2017] geforderten **„mittleren Belastung“** gleichzusetzen. Dies ist auch anhand von [Ten2019] erkennbar: Um die zulässige Überlastdauer für einen Strom im (n-1)-Fall zu ermitteln (hier 4000 A), ist von einer realistischen Belastung als Vorzustand auszugehen. Der Sprung auf den (n-1)-Fall ist hier im Anschluss an die dynamische Belastung zu simulieren. Somit stellt die dynamische Belastung, natürlich ohne den Sprung auf den (n-1)-Fall, die mittlere anzunehmende Belastung dar.

Sowohl für die thermische Grenzlast als auch für die dynamische Last wird das 24-h-Intervall (welches in den obigen Abbildungen aus Platzgründen nur einmal dargestellt ist) bei der Simulation dreimal durchlaufen, um zu zeigen, dass sich der Temperaturverlauf wiederholt und sich die Kabelanlage somit im eingeschwungenen Zustand befindet.

2.4 Schirmbehandlung:

Bei den beiden Zwischenverkabelungsabschnitten Henstedt-Ulzburg und Kisdorferwohld wird jeweils ein Cross-Bonding-Hauptabschnitt geplant. Der Cross-Bonding-Hauptabschnitt besteht aus drei Unterabschnitten mit unterschiedlichen Längen. An den Cross-Bonding-Verbindung-Muffen (CB-

Muffen) werden die Kabelschirme jeder Ader aufgetrennt, gegeneinander isoliert und durch Mantelspannungsbegrenzer (SVL = Sheath Voltage Limiter) geschützt. Dabei wird ein Auskreuzen der Schirme der jeweiligen, angrenzenden Unterabschnitte ausgeführt. Eine zyklische Verdrillung der Kabelleiter innerhalb eines Hauptabschnittes ist nicht vorgesehen. Ebenso ist ein ECC (Erdleiter) für alle Cross-Bonding-Hauptabschnitte nicht vorgesehen.

2.5 Aufbau und Materialparameter der Kabel

Bei den eingesetzten Kabeln handelt es sich um ein einadriges 400-kV-Hochspannungskabel mit einem RMS-Kupferleiter (RMS- Rundleiter, mehrdrätig, segmentiert, auch Millikenleiter genannt) mit einem Leiterquerschnitt von 2500 mm². Die folgende Abbildung zeigt den Aufbau des einadrigen Hochspannungskabels.

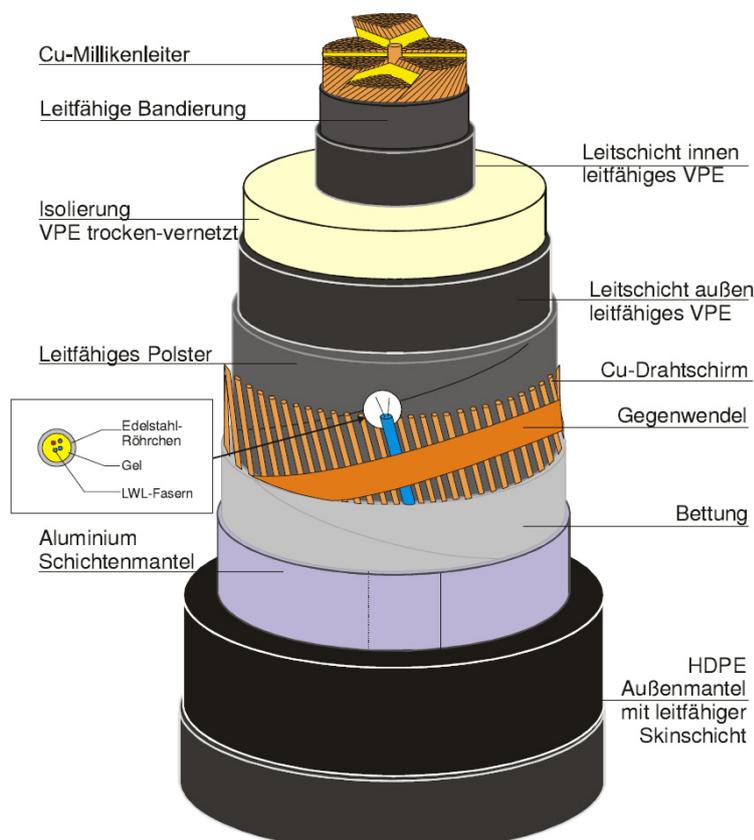


Abb. 6: Einleiter-Hochspannungskabel [Nex2001]

Das Kabel weist folgende Abmessungen auf:

Aufbauelement	Material / <u>D</u> urchmesser bzw. <u>W</u> andstärke
Millikenleiter	2500 mm ² -Kupfer, D = 63,7 mm
Leiterglättung	VPE mit Ruß/Graphit, W=2 mm, D = 68,5 mm
Isolierung	VPE, W = 26,8 mm, D = 122,5 mm
äußere Leitschicht	VPE mit Ruß/Graphit, W = 1,7 mm, D = 126,5 mm
Bänder	Vlies, W = 0,3 mm, D = 127,5 mm
Schirmdrähte	Kupfer, D _{Draht} = 2,03 mm, D = 131,8 mm Schirmquerschnitt 252 mm ²
Bettung	Vlies, W = 0,3 mm, D = 132,8 mm
Bänder	Aluminium, W=0,2 mm, D = 133,2 mm
Mantel	High Density Polyethylen, W = 5,0 mm, D = 145,0 mm

Tab. 1: Aufbauelemente, Materialien und Abmessungen des 380-kV-Kabels

Die Beschreibung wurde dem Datenblatt [Nex2001] entnommen.

Im Folgenden werden die Materialdaten der einzelnen Aufbauelemente des Kabels angegeben.

Leiter:

Kupfer, $\lambda = 372 \text{ W/mK}$, $c = 389 \text{ Ws/kgK}$, $\rho = 8900 \text{ kg/m}^3$, $\kappa = 56 \cdot 10^6 \text{ 1/}\Omega\text{m}$

Die elektrische Leitfähigkeit ist entsprechend dem Füllfaktor (hier $f = 0,784$) zu korrigieren.

Anmerkung: die elektrische Leitfähigkeit von Kupfer wird in der Literatur meistens zu $\kappa = 58 \cdot 10^6 \text{ 1/}\Omega\text{m}$ angegeben. Um deckungsgleich mit dem nach [VDE228] garantierten Widerstandswert von $0,0072 \text{ }\Omega\text{/km}$ für einen Kupferquerschnitt von 2500 mm^2 zu sein, wurde ein entsprechend geringere spezifische elektrische Leitfähigkeit von $\kappa = 55,56 \cdot 10^6 \text{ 1/}\Omega\text{m}$ verwendet.

Dielektrikum / Leitschichten:

VPE, $\lambda = 0,2857 \text{ W/mK}$, $c = 2300 \text{ Ws/kgK}$, $\rho = 930 \text{ kg/m}^3$.

Quellbänder:

Quellvlies, $\lambda = 0,166 \text{ W/mK}$, $c = 1700 \text{ Ws/kgK}$, $\rho = 2680 \text{ kg/m}^3$.

Schirm:

Kupferdrähte, $\lambda = 372 \text{ W/mK}$, $c = 389 \text{ Ws/kgK}$, $\rho = 8900 \text{ kg/m}^3$, $\kappa = 58 \cdot 10^6 \text{ 1/}\Omega\text{m}$

Die elektrische Leitfähigkeit der Schirmmaterialien ist entsprechend dem Füllfaktor (hier $f = 0,29$) zu korrigieren.

Bänder:

Aluminiumbänder, $\lambda = 237 \text{ W/mK}$, $c = 897 \text{ Ws/kgK}$, $\rho = 2707 \text{ kg/m}^3$, $\kappa = 35 \cdot 10^6 \text{ 1/\Omega}$.

Mantel:

PE, $\lambda = 0,2857 \text{ W/mK}$, $c = 2300 \text{ Ws/kgK}$, $\rho = 930 \text{ kg/m}^3$

2.6 Materialparameter der technischen Kabelumgebung

Im Folgenden werden die Materialdaten der technischen Umgebung des Kabels angegeben. Die Bodeneigenschaften werden in einem gesonderten Kapitel beschrieben.

HDPE-Rohre:

PE, $\lambda = 0,40 \text{ W/mK}$, $c = 1900 \text{ Ws/kgK}$, $\rho = 950 \text{ kg/m}^3$

Bentonit:

Bentonit wird als Bohrsuspension verwendet und füllt den Spalt zwischen Bohrung und Rohraußenwand auf. Es kann ebenfalls zur Verfüllung des Ringspaltes zwischen Kabel und Rohrrinnenwand verwendet werden. Der Wert für den Wärmewiderstand von Bentonit, z.B. des hier verwendeten Drill-Mix® 160 des Herstellers HeidelbergCement [HC2017], wird mit $1,66 \text{ m K/W}$ angegeben.

Luftspalte:

Die Kabel werden in Schutzrohre eingezogen. Die dabei verbleibenden Ringspalte werden als mit Luft gefüllt angenommen. Der Wärmeübergang in Luft wird dominiert von Konvektion und Strahlung, so dass der Wärmeübergang in Luft um ein Vielfaches größer ist als der Wärmeübergang mittels Wärmeleitung in stehender Luft.

Im FEM-Programm wird für den Wärmeübergang im Luftspalt das Modell nach [VDI2013] verwendet. Das Modell ist im FEM-Programm implementiert und iteriert automatisch die äquivalente Wärmeleitfähigkeit der Luft in Abhängigkeit der Kabeloberflächentemperatur und der Rohrrinnenwandtemperatur:

Die meisten Stoffwerte von Luft sind stark temperaturabhängig. Deshalb wurden auf der Grundlage von Stoffwertetabellen in [VDI2013] Interpolationsgleichungen für die kinematische Viskosität ν , die Dichte ρ und Wärmeleitfähigkeit der ruhenden Luft λ aufgestellt $\vartheta_0 = 20 \text{ }^\circ\text{C}$:

$$\nu = 15,3 \cdot 10^{-6} \frac{\text{m}^2}{\text{s}} + 0,1 \cdot 10^{-6} \frac{\text{m}^2}{\text{K} \cdot \text{s}} (\vartheta - \vartheta_0) \quad (2.1)$$

$$\rho = 1,189 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} - 0,036 \frac{\text{kg}}{\text{K} \cdot \text{m}^3} (\vartheta - \vartheta_0) \text{ und} \quad (2.2)$$

$$\lambda = 0,02587 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}} + 72,5 \cdot 10^{-6} \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}^2} (\vartheta - \vartheta_0). \quad (2.3)$$

Die Wärmekapazität von Luft ist nahezu temperaturunabhängig und beträgt:

$$c_p = 1007 \frac{\text{Ws}}{\text{Kg} \cdot \text{K}}. \quad (2.4)$$

Die folgenden Berechnungsgleichungen wurden [Boe2006 und VDI2013] entnommen.

Im ersten Schritt wird die Temperaturleitfähigkeit berechnet

$$a = \frac{\lambda}{\rho \cdot c_p}, \quad (2.5)$$

um daraus die Prandtl-Zahl zu bestimmen:

$$\text{Pr} = \frac{\nu}{a}. \quad (2.6)$$

Danach wird die Grashof-Zahl ermittelt:

$$\text{Gr} = \frac{g \cdot L^3 \cdot (\vartheta_{\text{Kabel}} - \vartheta_{\text{MP}})}{\nu^2} \quad (2.7)$$

mit $g = 9,81 \text{ m/s}^2$ der Erdbeschleunigung und L der charakteristischen Länge (hier Umfang) des Kabels im PE-Rohr.

Das Produkt aus Grashof-Zahl und Prandtl-Zahl ergibt die Rayleigh-Zahl

$$\text{Ra} = \text{Pr} \cdot \text{Gr}. \quad (2.8)$$

Mit den bisher bestimmten Kennzahlen wird die Nusselt-Zahl für das waagerechte Kabel [VDI2013, F2] bestimmt:

$$\text{Nu} = \left(0,752 + 0,387 \cdot (\text{Ra} \cdot f_3(\text{Pr}))^{1/6} \right)^2 \quad (2.9)$$

mit

$$f_3(\text{Pr}) = \left(1 + \left(\frac{0,559}{\text{Pr}} \right)^{9/16} \right)^{-16/9}. \quad (2.10)$$

Aus der Nusselt-Zahl kann schlussendlich der Wärmeübergangskoeffizient für freie Konvektion berechnet:

$$\alpha_K = \frac{\text{Nu} \cdot \lambda}{L} \quad (2.11)$$

Zur Konvektion kommt der Wärmeübergang durch Strahlung. Die durch Strahlung übertragene Wärmeleistung berechnet sich allgemein zu:

$$\dot{q}_S = C_{12} \cdot (T_{\text{Kabel}}^4 - T_{\text{MP}}^4) \quad (2.12)$$

Es handelt sich hier um absolute Temperaturen. Es gilt: $T = \vartheta + 273,15 \text{ K}$. Der Faktor C_{12} setzt sich aus den Emissionskoeffizienten ε der beteiligten Strahler, der Stefan-Boltzmann-Konstante $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{K}^4}$ und der Einstrahlzahl, die von der Geometrie der Anordnung (den sogenannten Sichtfaktoren) abhängt, zusammen.

Für ein zylindrisches Kabel in einem zylindrischen Rohr ergibt sich nach [Boe2006]:

$$C_{12} = \frac{\sigma}{\frac{1}{\varepsilon_{\text{Kabel}}} + \frac{A_{\text{Kabel}}}{A_{\text{MP}}} \cdot \left(\frac{1}{\varepsilon_{\text{MP}}} - 1 \right)} \quad (2.13)$$

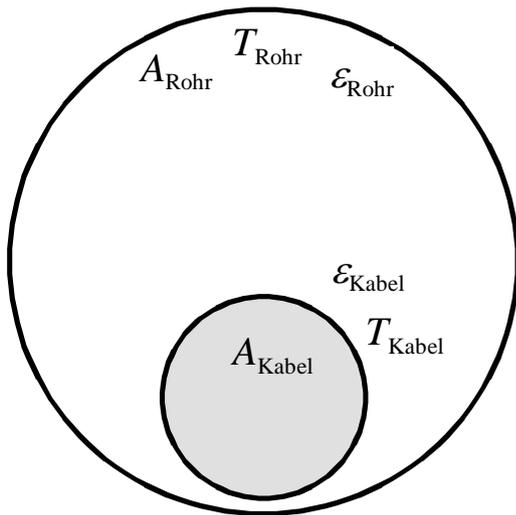


Abb. 7: Kabel mit der Mantelfläche A_{Kabel} im zylindrischen Rohr mit der Fläche A_{Rohr} [Boe2006]

Die Gleichungen (2.12) und (2.13) ergeben:

$$\dot{q}_S = \frac{\sigma}{\frac{1}{\varepsilon_{\text{Kabel}}} + \frac{A_{\text{Kabel}}}{A_{\text{Rohr}}} \cdot \left(\frac{1}{\varepsilon_{\text{Rohr}}} - 1 \right)} \cdot (T_{\text{Kabel}}^4 - T_{\text{Rohr}}^4) \quad (2.14)$$

Durch Anwendung der dritten binomischen Gleichung ergibt sich

$$q_S = \frac{\sigma}{\frac{1}{\varepsilon_{\text{Kabel}}} + \frac{A_{\text{Kabel}}}{\varphi \cdot A_{\text{Rohr}}} \cdot \left(\frac{1}{\varepsilon_{\text{Rohr}}} - 1 \right)} \cdot (T_{\text{Kabel}}^2 + T_{\text{Rohr}}^2) \cdot (T_{\text{Kabel}} + T_{\text{Rohr}}) \cdot (T_{\text{Kabel}} - T_{\text{Rohr}}) \quad (2.14a)$$

Nimmt man für den Wärmeübergangskoeffizienten α_S

$$\alpha_S = \frac{\sigma}{\frac{1}{\varepsilon_{\text{Kabel}}} + \frac{A_{\text{Kabel}}}{A_{\text{Rohr}} \cdot \left(\frac{1}{\varepsilon_{\text{MP}}} - 1 \right)}} \cdot (T_{\text{Kabel}}^2 + T_{\text{Rohr}}^2) \cdot (T_{\text{Kabel}} + T_{\text{Rohr}}) \quad (2.15)$$

an, so lässt sich der Wärmeübergang zusammenfassen zu:

$$\dot{q} = (\alpha_K + \alpha_S) \cdot (\vartheta_{\text{Kabel}} - \vartheta_{\text{Rohr}}) \quad (2.16)$$

Anmerkung: bei der Differenzbildung gilt: $(\vartheta_{\text{Kabel}} - \vartheta_{\text{Rohr}}) = (T_{\text{Kabel}} - T_{\text{Rohr}})$.

Mit den obigen Gleichungen wird beginnend mit beliebigen Startwerten für α_K und α_S mittels FEM eine Temperaturverteilung berechnet. Danach werden die Wandtemperaturen des Rohres sowie die Kabeloberflächentemperaturen ausgelesen und neue Wärmeübergangskoeffizienten α_K und α_S berechnet. Die Berechnung der Temperaturverteilung wird solange iteriert, bis sich die Wärmeübergangskoeffizienten innerhalb einer Fehlertoleranz nicht mehr ändern.

Im Fall des unbelüfteten PE-Rohres werden die Wärmeübergangskoeffizienten mittels der Gleichung

$$\lambda_{\text{äquivalent}} = (\alpha_K + \alpha_S) \cdot r_{\text{Kabel}} \cdot \ln \left(\frac{r_{\text{Rohr}}}{r_{\text{Kabel}}} \right) \quad (2.17)$$

in eine äquivalente, temperaturabhängige Wärmeleitfähigkeit des Luftspalts umgerechnet.

Sandbettung/ thermische Stabilisierung:

Die PE-Rohre werden in Sand gebettet. Die Höhe der Sandbettung beträgt 0,8 m und beginnt 10 cm unter der Unterkante der Schutzrohre.

Es sollen nach [Ten2019] folgende Sandqualität angenommen werden:

- Thermischer Widerstand feucht 0,67 Km/W.
- Thermischer Widerstand trockene Sand-Kies-Mischung 1,4 Km/W.
- Kritische Übertemperatur bei Vollast für Austrocknung 15 K.

2.7 Bodeneigenschaften

Die Wärmeleitfähigkeit des Bodens hat großen Einfluss auf die Erwärmung der Kabelanlage, weshalb die Bodenprofile im Berechnungsmodell nachgebildet werden. Entlang der Trasse wurden (siehe auch [BGA2019, BGA2019a]) sandige Böden, lehmige Böden und auch Sandböden mit einer darüber liegenden Torfschicht gefunden. Aus den geotechnischen Baugrunduntersuchungen [Buc2016, BGA2019, BGA2019a]) wurden von Prof. Wessolek drei typische Bodenprofile abgeleitet, die im Folgenden kurz vorgestellt werden:

Bodenprofil 1: „sandiger Boden“



0,0 m bis -0,37 m: humoser schwach schluffiger Sand (Su2)

Trockenrohdichte 1440 kg/m^3 , Wärmeleitfähigkeit $2,37 \text{ W/(m K)}$ bei Feldkapazität, $1,4 \text{ W/(m K)}$ bei Totwassergehalt, $c_p = 1420 \text{ Ws/(kg K)}$

-0,37 m bis -0,68 m: feinsandig bis mittelsandig (fSms)

Trockenrohdichte 1590 kg/m^3 , Wärmeleitfähigkeit $2,16 \text{ W/(m K)}$ bei Feldkapazität, $1,05 \text{ W/(m K)}$ bei Totwassergehalt, $c_p = 1180 \text{ Ws/(kg K)}$

-0,68 m bis -1,00 m: feinsandig bis mittelsandig (fSms)

Trockenrohdichte 1620 kg/m^3 , Wärmeleitfähigkeit $2,22 \text{ W/(m K)}$ bei Feldkapazität, $1,07 \text{ W/(m K)}$ bei Totwassergehalt, $c_p = 1160 \text{ Ws/(kg K)}$

> -1,00 m: mittelsandig bis feinsandig (mSfs)

Trockenrohdichte 1700 kg/m^3 , Wärmeleitfähigkeit $2,17 \text{ W/(m K)}$ bei Feldkapazität, $0,95 \text{ W/(m K)}$ bei Totwassergehalt, $c_p = 922 \text{ Ws/(kg K)}$

Abb. 8: Boden Nr. 1: Braunerde bis podsolige Braunerde aus Sand [Wes2019]

Im Folgenden wird das Bodenprofil Nr. 1 vereinfachend „sandiger Boden“ genannt.

Als zweites Bodenprofil wurde ein lehmiger Boden gewählt:

Bodenprofil 2: „lehmiger Boden“



0,0 m bis -0,10m: humoser, schwach schluffiger Sand (Su2)
Trockenrohddichte 1370 kg/m^3 , Wärmeleitfähigkeit $2,38 \text{ W/(m K)}$ bei Feldkapazität, $1,42 \text{ W/(m K)}$ bei Totwasser-
sergehalt, $c_p = 1361 \text{Ws/(kg K)}$

-0,10 m bis -0,27 m: humoser, schwach schluffiger Sand (Su2)
Trockenrohddichte 1310 kg/m^3 , Wärmeleitfähigkeit $2,42 \text{ W/(m K)}$ bei Feldkapazität, $1,42 \text{ W/(m K)}$ bei Totwas-
sergehalt, $c_p = 1273 \text{Ws/(kg K)}$

-0,27 m bis -0,51 m: sandiger Lehm (Ls3)
Trockenrohddichte 1340 kg/m^3 , Wärmeleitfähigkeit $1,48 \text{ W/(m K)}$ bei Feldkapazität, $1,23 \text{ W/(m K)}$ bei Totwas-
sergehalt, $c_p = 1265 \text{Ws/(kg K)}$

-0,51 m bis -1,00 m: sandiger Lehm (Ls3)
Trockenrohddichte 1780 kg/m^3 , Wärmeleitfähigkeit $1,96 \text{ W/(m K)}$ bei Feldkapazität, $1,62 \text{ W/(m K)}$ bei Totwas-
sergehalt, $c_p = 813 \text{Ws/(kg K)}$

> -1,00 m: mittelsandiger Lehm (Ls3)
Trockenrohddichte 1800 kg/m^3 , Wärmeleitfähigkeit $1,96 \text{ W/(m K)}$ bei Feldkapazität, $1,62 \text{ W/(m K)}$ bei Totwas-
sergehalt, $c_p = 806 \text{Ws/(kg K)}$

Abb. 9: Boden Nr. 2: Pseudogleye aus Lehmsand über Geschiebelehm/-mergel [Wes2019]

Im Folgenden wird das Bodenprofil Nr. 2 vereinfachend „lehmiger Boden“ genannt.

Bodenprofil 3: „Moorboden“

Zusätzlich wurde als drittes Profil das Bodenprofil „Moorboden“ mit in die Studie aufgenommen. Es handelt sich um Niedermoor auf Sand, wie es z.B. in der Pinnauniederung vorkommt und unter Aspekten des Naturschutzes eine wichtige Rolle spielt. In einem Tiefenbereich von 1,0 m bis 2,0 m befindet sich eine Grundwasserströmung. Hier fließt das Grundwasser mit einer Geschwindigkeit von ca. $0,5 \text{ m/d}$ bis $1,0 \text{ m/d}$. Der Einfluss des Grundwassers auf die thermischen Emissionen soll in dieser Studie ebenfalls untersucht werden.



0,0 m bis -0,23 m: Niedermoortorf (nH)
Trockenrohddichte 360 kg/m^3 , Wärmeleitfähigkeit $0,40 \text{ W/(m K)}$ bei Feldkapazität, $0,23 \text{ W/(m K)}$ bei Totwassergehalt, $c_p = 3692 \text{ Ws/(kg K)}$

-0,23 m bis -0,70 m: Niedermoortorf (nH)
Trockenrohddichte 310 kg/m^3 , Wärmeleitfähigkeit $0,44 \text{ W/(m K)}$ bei Feldkapazität, $0,25 \text{ W/(m K)}$ bei Totwassergehalt, $c_p = 4030 \text{ Ws/(kg K)}$

-0,70 m bis -1,00 m: Niedermoortorf (nH)
Trockenrohddichte 200 kg/m^3 , Wärmeleitfähigkeit $0,50 \text{ W/(m K)}$ bei Feldkapazität, $0,30 \text{ W/(m K)}$ bei Totwassergehalt, $c_p = 5194 \text{ Ws/(kg K)}$

> -1,00 m: feinsandig bis mittelsandig (fSms)
Trockenrohddichte 1700 kg/m^3 , Wärmeleitfähigkeit $2,60 \text{ W/(m K)}$ bei Feldkapazität, $2,20 \text{ W/(m K)}$ bei Totwassergehalt, $c_p = 1581 \text{ Ws/(kg K)}$

Abb. 10: Boden Nr. 3: Niedermoor über Sand [Wes2019]

Im Folgenden wird das Bodenprofil Nr. 3 vereinfachend „Moorboden“ genannt.

Bei allen drei Böden ist in einer Tiefe von mehr als 1,0 m keine Durchwurzelung mehr festzustellen. In dieser Tiefe ist von einem jahreszeitunabhängigen Feuchtigkeitsgehalt bei Feldkapazität auszugehen. Als konservative Annahme und in Übereinstimmung mit [Ten2019] wurde eine durch die Kabelanlage hervorgerufene Bodenaustrocknung ab einer Tiefe von 2,0 m ausgeschlossen. Ein etwaiger erwärmungsbedingter Feuchtigkeitsverlust unterhalb der Wurzeltiefe würde bei dieser Durchfeuchtung des Umgebungserdreich sofort durch Kapillarkräfte wieder ausgeglichen (siehe auch Abschnitt 2.7.2).

2.7.1 Bodenbeschreibung:

Der Erdboden besteht aus Erdkrumen und Bodenporen. Der Anteil fester Bestandteile wird über die Trockenrohddichte (TRD) ausgedrückt. Da mineralische Bestandteile eine hohe Wärmeleitfähigkeit (z.B. Quarzsand mit rund 8 W/(m K)) besitzen, weist bei gleichem Feuchtegehalt ein Boden mit hoher TRD eine größere Wärmeleitfähigkeit auf als einer mit vielen Poren, also mit geringerer TRD.

Mineralische Böden werden anhand ihrer Korngrößen eingeteilt. Mit abnehmender Korngröße kommt man von Kies zu Sand (S) über Schluff (U) zu Ton (T). Gemische aus Sand, Schluff und Ton werden als Lehm (L) bezeichnet. Je größer die Körner sind, umso größere Poren enthält das Gefüge und umso mehr Wasser kann es aufnehmen. Allerdings besitzen solche Böden auch ein geringes Wasserhaltevermögen. Die Kontaktflächen zwischen den Körnern sind aufgrund der Korngröße entsprechend gering. Deshalb wird Sand als nicht bindiger Boden bezeichnet, dessen Wärmeleitfähigkeit stark mit dem Wassergehalt schwankt. Je bindiger (feinkörniger) ein Boden ist, umso geringer ist sein Wasseraufnahmevermögen aber umso besser sein Wasserhaltevermögen. Die Wärmeleitfähigkeit toniger Böden schwankt entsprechend geringer mit dem Feuchtegehalt. Die folgende Tabelle [SPE2018] gibt eine Übersicht über die Korngrößen:

[μm]	Φ	①	DIN 4022		[mm]
63.000	-6	Cobble	Steine		63
32.000	-5	Gravel	Kies	grob	20
16.000	-4			mittel	
8000	-3			fein	
4000	-2	Sand	Sand	grob	2
2000	-1			mittel	
1000	0			fein	
500	1	Silt	Schluff (Silt)	grob	0,063
250	2			mittel	
125	3			fein	
63	4	Clay	Ton	grob	0,002
32	5			mittel	
16	6			fein	
8	7				
4	8				
2	9				

① Udden & Wentworth mod. nach Doeglas

$\Phi = \text{Phi-Grad} = -\log_2(d/d_0)$; $d = \text{Durchmesser}$, $d_0 = 1 \text{ mm Einheitsdurchmesser}$

Abb. 11: Korngrößen und Bodenarten [SPE2018]

Die Abkürzungen in Abb. 8 bis Abb. 10 sind zu erläutern: Böden kommen in der Regel nicht nur als reiner (S) Sand- oder (U) Schluff- oder (T) Tonboden vor. Mischungen werden so beschrieben, dass der Hauptanteil des Bodens mit einem Großbuchstaben beschrieben wird, der kleinere Anteil mit einem Kleinbuchstaben. Us ist also ein sandiger Schluffboden. Ziffern bilden Abstufungen: 2 für schwach, 3 für normal, 4 für stark. Zum Beispiel ist Su4 die Kurzbezeichnung für einen stark schluffigen Sandboden.

2.7.2 Wärmetransport im Erdreich

Die im Erdreich enthaltene Feuchtigkeit bildet einen Wasserfilm auf den Erdkrumen und aufgrund der Oberflächenspannung des Wassers bilden sich Kapillarbrücken (Wassermenisken) aus. Der Wärmetransport im Erdreich geschieht durch Wärmeleitung und Konvektion. Die Wärmeleitung erfolgt durch die Wärmeleitfähigkeit der Erdbestandteile. Die Konvektion erfolgt, indem Feuchtigkeit in der warmen Umgebung der Kabelanlage verdampft. Der Dampf transportiert Wärmeenergie in kühlere Erdschichten, um dort zu kondensieren. Es entsteht ein Feuchtegradient (geringerer Feuchteanteil in der warmen Kabelumgebung, höherer Feuchteanteil in der kühleren Region), welcher über die Kapillarbrücken ausgeglichen wird, so dass das Wasser wieder in Richtung Kabelanlage transportiert wird, um dort erneut zu verdampfen. Abb. 12 veranschaulicht diesen Kreislauf.

Der Feuchtegehalt des Bodens hat also neben der TRD wesentlichen Einfluss auf die resultierende, makroskopische Wärmeleitfähigkeit des Bodens. Eine ausführliche und quantitative Beschreibung der Vorgänge mittels Diffusionsgleichungen ist in [KH81] zu finden.

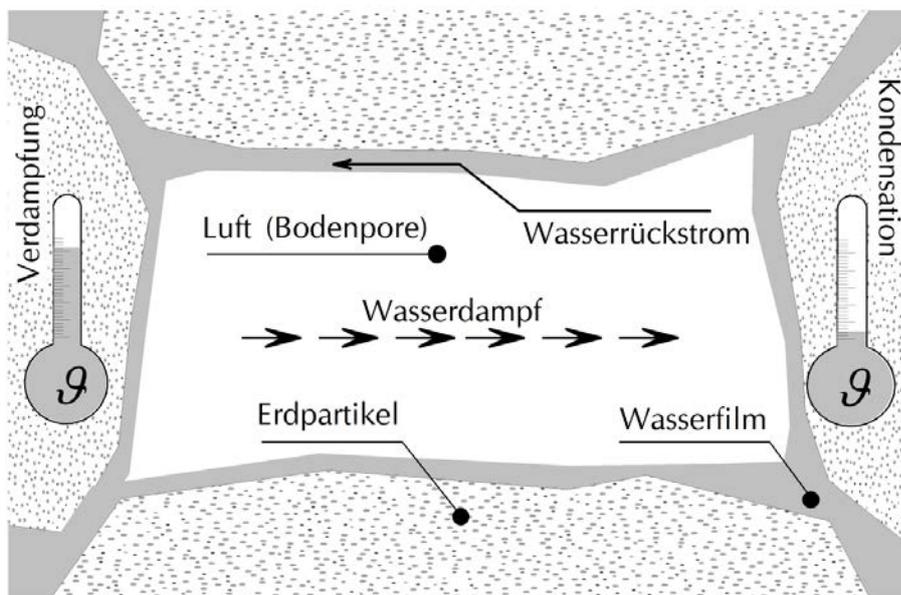


Abb. 12: Feuchtigkeitstransport im Bereich einer Pore des Erdreichs unter Einwirken eines Temperaturgradienten [Sta2001]

Wenn mehr Wasser verdampft, als über die Kapillarbrücken zurücktransportiert werden kann, kann der Feuchtegehalt in Kabelnähe soweit absinken, dass die Kapillarbrücken abreißen und der Boden austrocknet. Zurück bleibt der sogenannte Totwassergehalt in kleineren Poren. Der Austrocknungsprozess soll nach [VDE1995] ab einer bestimmten Temperatur oberhalb der ungestörten Bodentemperatur einsetzen.

Die Temperatur der ungestörten Erdoberfläche und des thermisch ungestörten Erdreichs wird hier zu 15 °C angenommen. Die Grenzerwärmung für Bodenaustrocknung wird für $m = 0,8$ nach [HS1999, S. 290] zu

$$\Delta \vartheta_{\text{Bodenaustrocknung}} = \frac{(1-0,80)}{3} \cdot 100 \text{ K} + 15 \text{ K} = 21,67 \text{ K} \quad \text{Gl. 2.7}$$

angenommen. Bei einer ungestörten Bodentemperatur von 15 °C ergibt sich somit eine Grenztemperatur von 36,67 °C.

Diese Grenztemperatur wurde bei allen drei Böden angewendet. Sie stellt eine konservative Annahme dar, da sie nicht die spezifischen Eigenschaften der unterschiedlichen Böden berücksichtigt. So ist zum Beispiel beim Lehmboden aufgrund der Staunässe grundsätzlich nicht -auch nicht bei thermischer Belastung- von einer Bodenaustrocknung auszugehen.

3 Berechnungen der elektrischen Eigenschaften

Die Aufgabe der elektrischen Berechnungen in der vorliegenden Studie liegt bei der Ermittlung der Leiter- und Schirmstromaufteilung, die als Eingangsgrößen für die nachfolgenden Finite-Elemente-Simulationen verwendet werden

Zur Herabsetzung der Schirmverluste bei Einleiterkabeln größerer Übertragungsleistungen müssen Kabelschirme speziell behandelt werden. In der geplanten Kabelstrecke ist das Auskreuzen der Kabelschirme (Cross-Bonding) vorgesehen. Beim Cross-Bonding werden die Schirme an beiden Enden des Zwischenverkabelungsabschnittes starr geerdet und auf der Strecke die einzelnen Kabelschirme ausgekreuzt. Die Auskreuzung findet an den Muffenstandorten statt und soll den Cross-Bonding-Abschnitt üblich in eine durch drei teilbare Anzahl von Unterabschnitten teilen. Die einzelnen Unterabschnitte sollen idealerweise elektrisch gleichwertig sein; Die induzierten Spannungen in den Kabelschirmen sollen sich so möglichst zu Null aufaddieren, um die elektrischen Ströme und damit die Verluste zu verringern.

Bei realen Kabeltrassen ist jedoch wegen Verlegungsunsymmetrien, unterschiedlicher Grabenprofilen sowie weiterer Randbedingungen nicht möglich, einen Cross-Bonding-Hauptabschnitt in drei elektrisch gleichlangen Unterabschnitten aufzuteilen. Die Aufteilung der Kabelstrecke in Unterabschnitte in den Bereich Henstedt-Ulzburg und Kisdorferwohld ist aus der aktuellen Kabelliste [TenKL2018] abgeleitet und in Abb. 13 und Abb. 14 schematisch dargestellt:

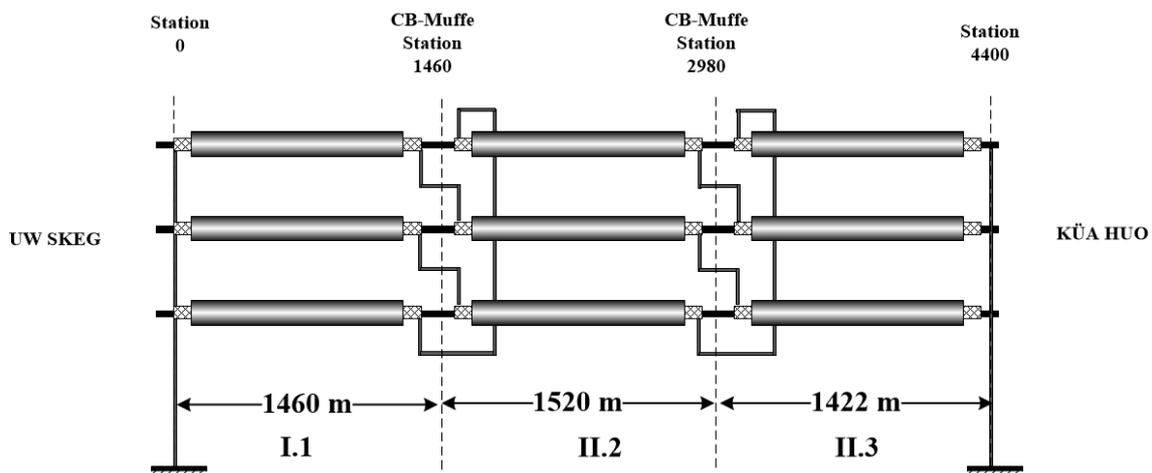


Abb. 13: Schematische Darstellung der Cross-Bonding-Unterabschnitte im Bereich Henstedt-Ulzburg

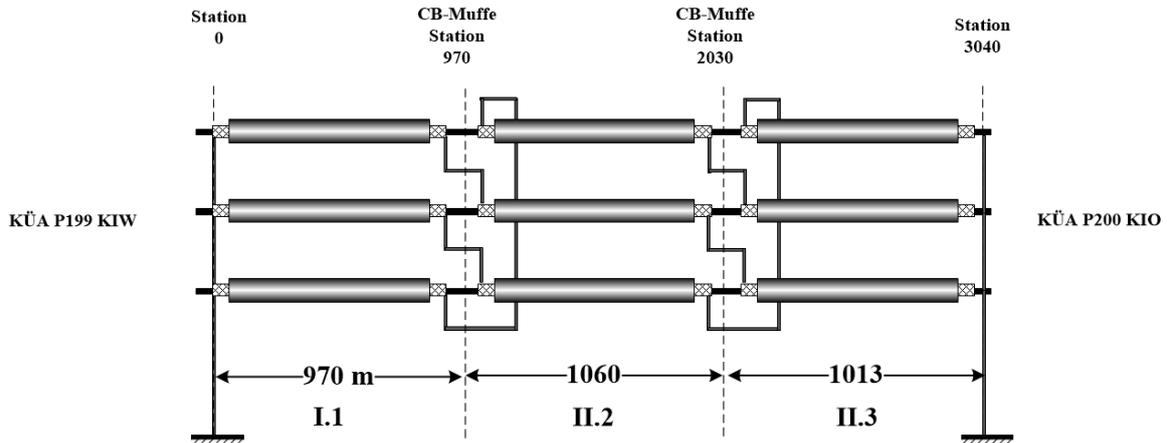


Abb. 14: Schematische Darstellung der Cross-Bonding-Unterabschnitte im Bereich Kisdorferwohld

In den beiden Kabelabschnitten werden die metallischen Schirme der einzelnen Kabel an den Cross-Bonding-Muffen (CB-Muffen) aufgetrennt, gegeneinander isoliert und durch Mantelspannungsbegrenzer (SVL = Sheath Voltage Limiter) geschützt. Dabei wird ein Auskreuzen der Schirme der jeweiligen, angrenzenden Unterabschnitte ausgeführt. Die für die elektrische Berechnung relevanten Verlegungsparameter sind in Tab. 2 und Tab. 3 zusammengestellt.

Unterabschnitt	Länge [m]	Geometrische Mittelwerte der Ader- und System- Abstände [m]										
		System 1			System 2			System 3			System 4	
		S_{L1-L2}	S_{L2-L3}	S_{S1-S2}	S_{L1-L2}	S_{L2-L3}	S_{L2-L3}	S_{L1-L2}	S_{L2-L3}	S_{L3-L4}	S_{L1-L2}	S_{L2-L3}
I.1	1460	0,63	0,63	1,94	0,63	0,63	11,15	0,63	0,63	1,94	0,63	0,63
I.2	1520	0,99	0,99	1,95	0,99	0,99	9,54	0,99	0,99	1,95	0,99	0,99
I.3	1422	0,61	0,61	1,9	0,61	0,61	11,23	0,61	0,61	1,9	0,61	0,61

Tab. 2: Verlegungsparameter zur Ermittlung der Stromaufteilung im Kabelabschnitt Henstedt-Ulzburg

Unterabschnitt	Länge [m]	Geometrische Mittelwerte der Ader- und System- Abstände [m]										
		System 1			System 2			System 3			System 4	
		S_{L1-L2}	S_{L2-L3}	S_{S1-S2}	S_{L1-L2}	S_{L2-L3}	S_{L2-L3}	S_{L1-L2}	S_{L2-L3}	S_{L3-L4}	S_{L1-L2}	S_{L2-L3}
I.1	970	0,65	0,65	2,02	0,65	0,65	11,1	0,65	0,65	2,02	0,65	0,65
I.2	1060	0,65	0,65	1,97	0,65	0,65	11,1	0,65	0,65	1,97	0,65	0,65
I.3	1013	0,62	0,62	1,5	0,62	0,62	11,1	0,62	0,62	1,5	0,62	0,62

Tab. 3: Verlegungsparameter zur Ermittlung der Stromaufteilung im Kabelabschnitt Kisdorferwohld

3.1 Nachbildung des Kabelsystems in ATP-EMTP

Der Umfang des modellierten elektrischen Netzes wird durch die zu untersuchenden elektrischen Phänomene bestimmt. In Bezug auf die Ermittlung der Stromaufteilung im Normalbetrieb werden die folgenden Netzkomponenten im Simulationsmodell nachgebildet:

- Drehstromnetzeinspeisung,
- Kabelanordnung im Bereich Henstedt-Ulzburg,
- Kabelanordnung im Bereich Kisdorferwohld

Zur Ermittlung der stationären Stromaufteilung im Normalbetrieb ist es ausreichend, nur die Kabelanlage detailliert zu modellieren. Andere Netzkomponenten wie die angeschlossenen Freileitungen, Erdungsanlage sowie SVL werden nicht explizit modelliert.

Modellierung der Drehstromnetzeinspeisung

Die Drehstromnetzeinspeisung wird als eine symmetrisch eingeprägte Stromquelle modelliert. Die Stromstärke sowie die Phasenreihenfolge aller zwölf 380-kV-Kabel sind bereits in den Abschnitten 2.2 und 2.3 angegeben.

Modellierung der Kabelanordnungen in den Bereichen Henstedt-Ulzburg und Kisdorferwohld

Die Aufteilung der Kabelstrecke in Unterabschnitte bezüglich der vorgegebenen Positionen der Cross-Bonding-Muffen ist in Abb. 13 für den Kabelabschnitt Henstedt-Ulzburg und in Abb. 14 für den Kabelabschnitt Kisdorferwohld schematisch dargestellt.

Die Kabelanlage wird mithilfe des im ATP-EMTP integrierten Hilfsprogramms CABLE CONSTANTS (CP) modelliert. Die Abmessungen des Kabels sowie die elektrischen Eigenschaften von Leiter, Schirm, VPE-Isolierung und PE-Außenmantel sind bereits in Tab. 1 angegeben.

Da die Trasse weitgehend geradlinig ohne große Richtungsänderungen verläuft, werden die angegebenen Unterabschnitte aus je einer physischen Kabellänge modelliert. Jeder Unterabschnitt wird dann

mit den geometrischen Mittelwerten der horizontalen Abstände (Tab. 2 und Tab. 3) modelliert. Der spezifische Erdwiderstand wird als $100 \Omega \text{ m}$ angenommen.

Für die zu untersuchenden Phänomene werden die Netzzustandsgrößen hinreichend genau durch „ruhende“ Effektivwertzeiger beschrieben werden. Die Kabel werden somit als mehrpolige π -Glieder modelliert. Dynamische Übergangszustände werden nicht betrachtet.

3.2 Berechnung der Stromaufteilungen

Für alle Unterabschnitte erfolgten Untersuchungen zur Stromaufteilung zwischen Teilsystemen der beiden Stromkreise sowie zur Höhe der induzierten Ströme in Kabelschirmen. Die Untersuchungen wurden für die thermische Grenzlast mit maximal 3150 A pro Stromkreis durchgeführt

Die Stromaufteilung und die Schirmströme für die dynamische Last lassen sich durch einfache Umrechnung mit dem Faktor 2800 A/ 3150 A ermitteln.

Die Aufteilung der Leiterströme sowie die verbleibenden sind im Folgenden graphisch dargestellt.

Kabelabschnitt Henstedt-Ulzburg

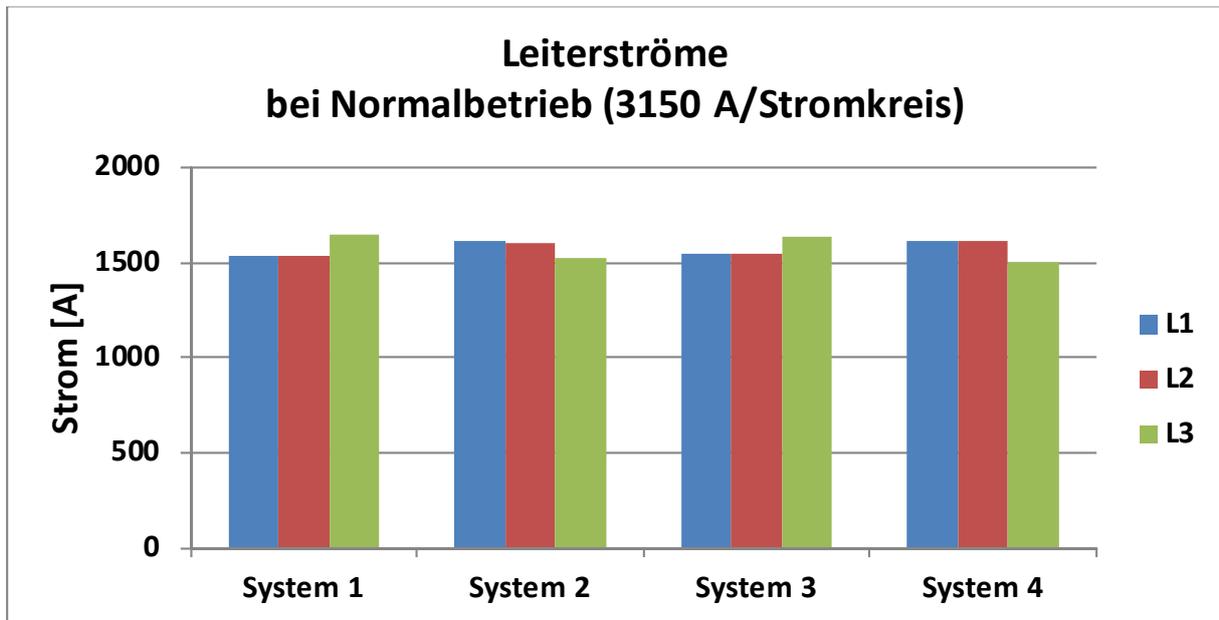


Abb. 15: Aufteilung der Leiterströme zwischen den Teilsystemen beider Stromkreise bei Normalbetrieb von 3150 A pro Stromkreis im Kabelabschnitt Henstedt-Ulzburg

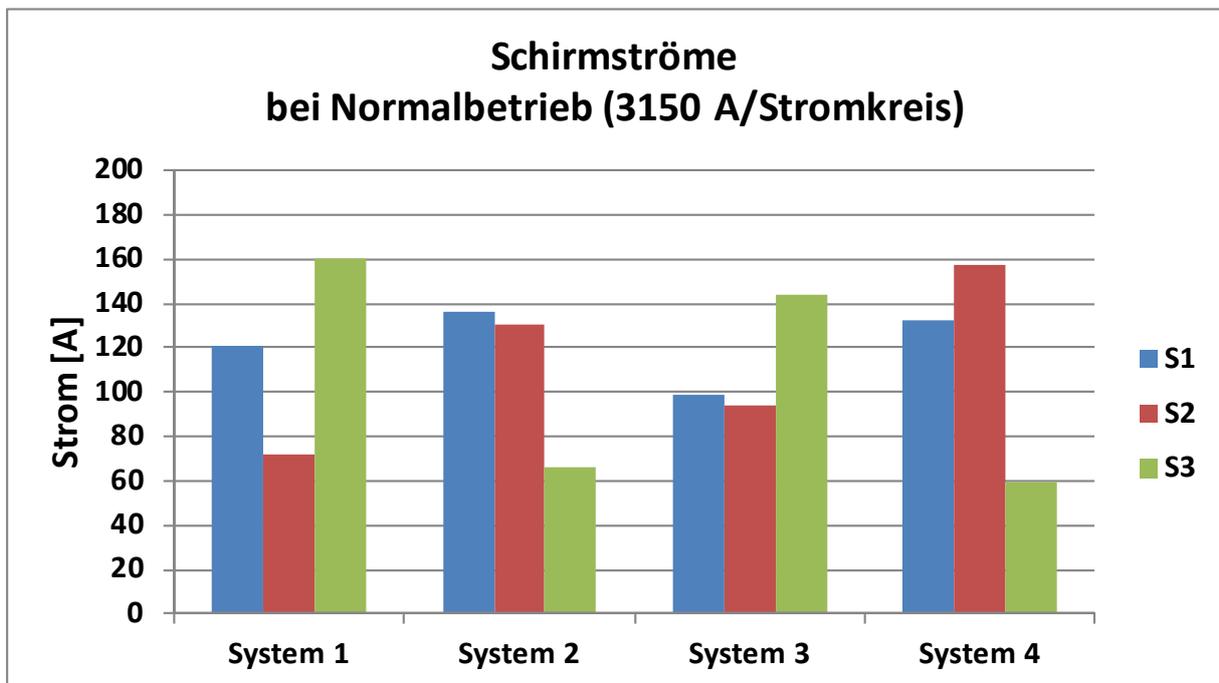


Abb. 16: Induzierte Schirmströme bei Normalbetrieb von 3150 A pro Stromkreis im Kabelabschnitt Henstedt-Ulzburg

Kabelabschnitt Kisdorferwohld

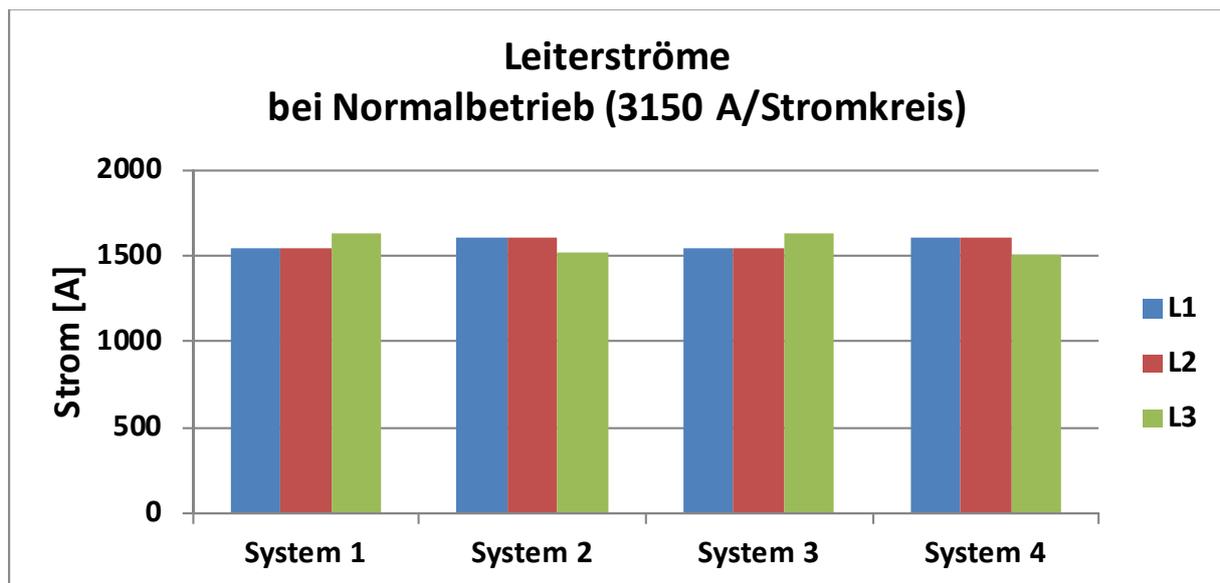


Abb. 17: Aufteilung der Leiterströme zwischen den Teilsystemen beider Stromkreise bei Normalbetrieb von 3150 A pro Stromkreis im Kabelabschnitt Kisdorferwohld

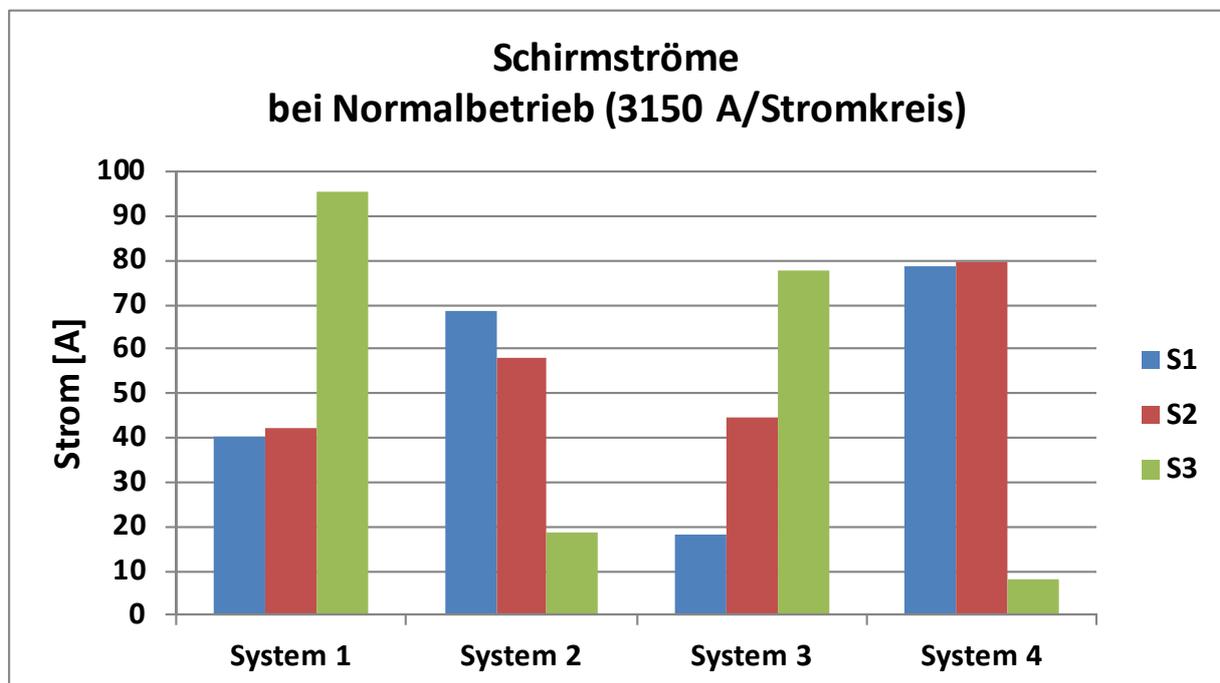


Abb. 18: Induzierte Schirmströme bei Normalbetrieb von 3150 A pro Stromkreis im Kabelabschnitt Kisdorferwohld

Als Eingangsgrößen für die magnetisch-thermischen Berechnungen sind nicht nur nicht nur die Beträge, sondern auch die Phasenlage der Leiter- und Schirmströme maßgeblich. Die vollständigen Ergebnisse sind für den Kabelabschnitt Henstedt-Ulzburg in Tab. 4 und für den Kabelabschnitt Kisdorferwohld in Tab. 5 zusammengefasst.

		Ströme beim Kabelabschnitt Henstedt-Ulzburg					
		L1		L2		L3	
		Betrag [A]	Winkel [Deg]	Betrag [A]	Winkel [Deg]	Betrag [A]	Winkel [Deg]
System 1	L1	1536,3	2,29	1536,3	2,29	1536,3	2,29
	L2	1543,2	-121,13	1543,2	-121,13	1543,2	-121,13
	L3	1638,3	120,29	1638,3	120,29	1638,3	120,29
	S1	120,3	119,98	159,8	-156,49	71,7	-62,86
	S2	71,7	-62,86	120,3	119,98	159,8	-156,49
	S3	159,8	-156,49	71,7	-62,86	120,3	119,98
System 2	L1	1616,1	-2,17	1616,1	-2,17	1616,1	-2,17
	L2	1607,4	-118,92	1607,4	-118,92	1607,4	-118,92
	L3	1511,7	119,69	1511,7	119,69	1511,7	119,69
	S1	136,5	77,43	65,9	-143,47	130,0	-14,93
	S2	130,0	-14,93	136,5	77,43	65,9	-143,47
	S3	65,9	-143,47	130,0	-14,93	136,5	77,43
System 3	L1	1541,4	2,18	1541,4	2,18	1541,4	2,18
	L2	1543,3	-121,13	1543,3	-121,13	1543,3	-121,13
	L3	1643,3	120,41	1643,3	120,41	1643,3	120,41
	S1	98,7	111,61	143,6	-147,69	94,1	-53,84
	S2	94,1	-53,84	98,7	111,61	143,6	-147,69
	S3	143,6	-147,69	94,1	-53,84	98,7	111,61
System 4	L1	1610,8	-2,08	1610,8	-2,08	1610,8	-2,08
	L2	1607,3	-118,92	1607,3	-118,92	1607,3	-118,92
	L3	1506,8	119,55	1506,8	119,55	1506,8	119,55
	S1	132,2	66,21	59,6	-120,45	157,5	-16,89
	S2	157,5	-16,89	132,2	66,21	59,6	-120,45
	S3	59,6	-120,45	157,5	-16,89	132,2	66,21

Tab. 4: Leiterströme und induzierte Schirmströme im Kabelabschnitt Henstedt-Ulzburg bei Höchstlast, 3150 A je Stromkreis

		Ströme beim Kabelabschnitt Kisdorferwohld					
		L1		L2		L3	
		Betrag [A]	Winkel [Deg]	Betrag [A]	Winkel [Deg]	Betrag [A]	Winkel [Deg]
System 1	L1	1540,6	1,99	1540,6	1,99	1540,6	1,99
	L2	1546,6	-121,03	1546,6	-121,03	1546,6	-121,03
	L3	1631,8	120,24	1631,8	120,24	1631,8	120,24
	S1	40,3	145,25	95,5	-173,13	42,2	-126,68
	S2	42,2	-126,68	40,3	145,25	95,5	-173,13
	S3	95,5	-173,13	42,2	-126,68	40,3	145,25
System 2	L1	1611,3	-1,91	1611,3	-1,91	1611,3	-1,91
	L2	1603,9	-119,00	1603,9	-119,00	1603,9	-119,00
	L3	1518,2	119,74	1518,2	119,74	1518,2	119,74
	S1	68,7	44,60	18,6	133,34	57,9	-8,80
	S2	57,9	-8,80	68,7	44,60	18,6	133,34
	S3	18,6	133,34	57,9	-8,80	68,7	44,60
System 3	L1	1544,4	1,92	1544,4	1,92	1544,4	1,92
	L2	1546,7	-121,04	1546,7	-121,04	1546,7	-121,04
	L3	1635,5	120,34	1635,5	120,34	1635,5	120,34
	S1	18,4	136,19	77,9	-163,77	44,5	-96,73
	S2	44,5	-96,73	18,4	136,19	77,9	-163,77
	S3	77,9	-163,77	44,5	-96,73	18,4	136,19
System 4	L1	1607,2	-1,84	1607,2	-1,84	1607,2	-1,84
	L2	1603,8	-119,00	1603,8	-119,00	1603,8	-119,00
	L3	1514,6	119,64	1514,6	119,64	1514,6	119,64
	S1	78,6	29,00	7,9	25,88	79,5	-13,81
	S2	79,5	-13,81	78,6	29,00	7,9	25,88
	S3	7,9	25,88	79,5	-13,81	78,6	29,00

Tab. 5: Leiterströme und induzierte Schirmströme im Kabelabschnitt Kisdorferwohld bei Höchstlast, 3150 A je Stromkreis

4 FEM-Berechnung thermischer und magnetischer Felder in Kabelanlagen

4.1 Erläuterungen zu den Berechnungen

Da nicht der über Jahre dauernde vollständige Erwärmungsvorgang des Kabels simuliert werden soll, wird ein stationärer Vorzustand als Arbeitspunkt mit einer durchschnittlichen Belastung berechnet. Da der Strom in die Verluste quadratisch eingeht, ist nicht das arithmetische Mittel des Stroms als Vorzustand anzunehmen. Dies soll am Beispiel der dynamischen Belastung gezeigt werden. Die Stromwärmeverluste berechnen sich nach:

$$P = R \cdot I^2 \quad (4.1)$$

Demnach berechnen sich die durchschnittlichen Verluste für eine zyklisch schwankende Last (nach Abb. 5) je zwei parallel geschalteten Adern zu:

$$\bar{P} = 7,2 \frac{\mu\Omega}{m} \cdot \frac{8 \text{ h} \cdot (1680 \text{ A})^2 + 8 \text{ h} \cdot (2240 \text{ A})^2 + 8 \text{ h} \cdot (2800 \text{ A})^2}{24 \text{ h}} = 37,632 \text{ W/m}. \quad (4.2)$$

Die Verlustleistung mit dem arithmetischen Mittelwert des Stroms ergibt sich zu:

$$P(\bar{I}) = R \cdot \bar{I}^2 = 7,2 \frac{\mu\Omega}{m} \cdot (2240 \text{ A})^2 = 36,127 \text{ W/m}. \quad (4.3)$$

Es ergibt sich ein Korrekturfaktor von:

$$\frac{\bar{P}}{P(\bar{I})} = \frac{R \cdot n^{-1} \sum_{i=1}^n I_i^2}{R \cdot \bar{I}^2} = \frac{37,632 \text{ W/m}}{36,127 \text{ W/m}} = 1,0417 \quad (4.4)$$

Und somit muss der stationäre Vorzustand mit

$$I_{\text{stat}} = 1,0417 \cdot 2240 \text{ A} = 2333,3 \text{ A} \quad (4.5)$$

berechnet werden. Für die thermische Grenzlast ergibt sich analog der Strom für den stationären Vorzustand zu 2625 A.

Anmerkungen zur Genauigkeit der Berechnung des stationären Vorzustands:

- in der obigen Berechnung wurde der Einfachheit halber der Gleichstromwiderstand des Leiters verwendet. Dies ist zulässig, da sich der Widerstand in Gleichung (4.4) zur Berechnung des Korrekturfaktors herauskürzt.
- Eine geringe Ungenauigkeit entsteht durch die Annahme, dass der Widerstand als temperaturunabhängig angenommen wird. Der Leiter wird sich jedoch bei 2625 A etwas stärker erwärmen als bei 2520 A und somit wird sein spezifischer elektrischer Widerstand geringfügig höher liegen, was geringfügige Abweichungen ($< 0,5 \text{ K}$) in den Bodentemperaturen zwischen der stationären und der transienten Erwärmungsberechnung erklärt. Um die Erwärmung bei schwankender Last genau zu ermitteln, werden die transienten Berechnungen durchgeführt.

Zur Berechnung des stationären Vorzustandes werden gekoppelte, thermische, magnetische Berechnungen durchgeführt (Erläuterungen hierzu, siehe Abschnitt 4.4). Aus der stationären Berechnung werden anhand der Verluste die Wechselstromwiderstandsbeläge der Leiter und der Schirme bestimmt und die Schirmströme an die Schirmtemperatur angepasst.

Es ist anzumerken, dass der Feldsimulator nicht auf die Stromverdrängungsfaktoren, den k_s und k_p - Faktoren, der IEC 60287 zurückgreift, sondern die tatsächlichen Stromverdrängungserscheinungen im Leiter berechnet. Da die Anlage aufgrund der Flachverlegung magnetisch unsymmetrisch ist, ergibt sich somit nicht nur eine ungleichmäßige Stromaufteilung der parallel geschalteten Systeme, sondern es ergibt sich auch in jedem Leiter eine andere Stromverteilung über den Leiterquerschnitt. Daher ist FEM-Simulation viel genauer als die Annahme gleicher k_s und k_p -Faktoren für alle Leiter. Die so ermittelten Größen werden dann für die transiente Berechnung verwendet (siehe Abschnitt 4.5). Im letzten Abschnitt 4.6 wird eine Möglichkeit erläutert, wie Millikenleiter mittels zweidimensionalen Feldsimulatoren berücksichtigt werden können.

Zuerst werden im nächsten Abschnitt die dielektrischen Verluste bestimmt. Diese sind nicht vom Strom, sondern von der Höhe der Leiter-Erde-Spannung abhängig.

4.2 Dielektrische Verluste

Das Kabel stellt mit seinem Leiter, seinem Schirm und sich dem dazwischen befindenden Dielektrikum einen Zylinderkondensator dar, dessen Kapazität 100-mal in der Sekunde (50 positive und 50 negative Halbwellen) geladen und wieder entladen wird. Daraus resultieren dielektrische Verluste, die als zusätzliche Wärmequellen in den numerischen Berechnungen berücksichtigt werden können.

Der dielektrische Verlustleistungsbelag berechnet sich anhand folgender Gleichung:

$$P'_D = U^2 \omega \cdot C' \cdot \tan \delta \quad \text{Gl. 4.6}$$

mit der Sternspannung U , dem Verlustfaktor des Dielektrikums $\tan \delta$ und dem Kapazitätsbelag für ein zylindrisches Kabel

$$C' = \frac{2\pi\epsilon}{\ln\left(\frac{r_a}{r_i}\right)} \quad \text{Gl. 4.7}$$

Der dielektrische Verlustleistungsbelag ergibt sich hier bei einer Leiter-Erde-Spannung von 230 kV je Ader zu $P'_d = 3,3 \text{ W/m}$ bei einem Kapazitätsbelag von $C' = 219,4 \text{ pF/m}$ und einem Verlustfaktor von $\tan \delta = 1 \cdot 10^{-3}$.

4.3 Berechnung des Magnetfeldes und der Wirbelströme mit der Finite-Elemente Methode

Eine ausführliche Einführung in der Berechnungsmethode der Finiten Elemente würde hier den Rahmen sprengen hier nicht gegeben werden. Ausführliche Informationen sind in [Sta2001] zu finden.

Der wichtigste Unterschied zur Berechnung nach Normen und/oder mit dem Verfahren der Knotenpotentialanalyse ist, dass zur Berechnung keine Informationen in Form konzentrierter Bauelemente wie Wechselstromwiderstände, Induktivitäts- bzw. Kapazitätsbeläge der Kabelanlage benötigt werden. Der Querschnitt der Anordnung wird orts aufgelöst modelliert, also in viele kleine Elemente endlicher Größe diskretisiert. Auch die Kabel mit allen Aufbauelementen werden auf diese Weise diskretisiert.

Da die Stromverteilung a priori noch unbekannt ist, wird als Startwert eine mittlere Stromdichte in den Leitern vorgegeben, die aber vom Programm anhand der Berechnung des magnetischen Feldes (genauer gesagt, einer Berechnung des magnetischen Vektorpotentials) verändert wird. Das magnetische Feld wird dergestalt berechnet, dass sich ein Energieminimum im betrachteten Gebiet einstellt.

Bei der zweidimensionalen Finite-Elemente-Methode wird die magnetische Induktion \vec{B} in der x, y-Ebene berechnet. Das magnetische Vektorpotential \vec{A} weist deshalb nur eine z-Komponente auf:

$$\begin{aligned}\vec{B} &= \text{rot } \vec{A} = \nabla \times (0, 0, A_z)^T = \\ \frac{\partial A_z}{\partial x} \cdot e_x + \frac{\partial A_z}{\partial y} \cdot e_y &= B_x \cdot e_x + B_y \cdot e_y.\end{aligned}\tag{Gl. 4.8}$$

Das Problem der Energieminimierung für das magnetische Vektorpotential lautet:

$$\begin{aligned}\frac{\partial W'_m}{\partial g_i} &= \nu \cdot \sum_{j=1}^n A_{z_j} \cdot \iint_{A_\Delta} (\alpha_{ix} \cdot \alpha_{jx} + \alpha_{iy} \cdot \alpha_{jy}) dA_\Delta \\ - \sum_{j=1}^n S_{z_j} \cdot \iint_{A_\Delta} (\alpha_i \cdot \alpha_j) dA_\Delta &= 0\end{aligned}\tag{Gl. 4.9}$$

mit $\nu = 1/\mu$ dem Kehrwert der magnetischen Permeabilität, mit A_{z_j} dem Vektorpotential auf einem Knoten (einer Ecke) des finiten Elements und S_{z_j} der Stromdichte. Bei α_i handelt es sich um die Koeffizienten der Formfunktionen, sie hängen also von der geometrischen Form des jeweiligen finiten Elements ab.

Die obige Gleichung muss zur Bestimmung des Energieminimums auf jeden Knoten des diskretisierten Gebiets angewendet werden.

Zur Berechnung der zu Anfang unbekanntesten Stromdichten S_{z_j} wird das Ampèresche Gesetz hinzugezogen. Die Integration der Stromdichte über den Leiterquerschnitt A_L muss den resultierenden Strom ergeben. Bei Leitern ist dies der vorgegebene Leiterstrom, bei anderen, nicht am Stromtransport beteiligten metallenen Aufbauelementen (Kabelpritschen, Stahlrohre, etc.), muss der resultierende Strom null ergeben. Dennoch treten in diesen Elementen Verluste durch in sich geschlossene Wirbelströme auf.

Das Ampèresche Gesetz für finite Elemente lautet:

$$\hat{i}_L = \iint \hat{S} dA_L = -\iint (\kappa \cdot \nabla \varphi) \cdot \vec{n} dA_L - j\omega \cdot \iint (\kappa \cdot \vec{A}_z) \cdot \vec{n} dA_L\tag{Gl. 4.10}$$

mit der resultierenden Stromstärke \hat{i}_L im Leiter, der elektrischen Leitfähigkeit κ des Leitermaterials und der Kreisfrequenz ω . Die durch den Potentialgradienten verursachten Stromdichten in den Dreiecksknoten des Leiters

$$\vec{S}_G = -\kappa \cdot \nabla \varphi \quad \text{Gl. 4.11}$$

sind unbekannt und werden dem Knotenvektorpotential-Vektor in Form zusätzlicher Koeffizienten hinzugefügt. Es ergibt sich Gleichung 3.7. Die Summation muss über alle m finiten Elemente des jeweiligen Leiters erfolgen:

$$\hat{i}_L = \sum_{i=1}^m \left(-j\omega\kappa \cdot \sum_{j=1}^6 \underline{A}_{zj} \cdot \iint (\alpha_i \cdot \alpha_j) dA_\Delta + \sum_{j=1}^6 \hat{S}_{zj} \cdot \iint (\alpha_i \cdot \alpha_j) dA_\Delta \right). \quad \text{Gl. 4.12}$$

Sind in der Anordnung mehrere nicht miteinander verbundene elektrische Leiter, Schirme, benachbarte metallene Aufbauelemente, usw. vorhanden, werden diese Gebiete durchnummeriert und Gl. 3.7 muss auf jedes dieser Gebiete angewendet werden. Diese Gebiete werden auch Wirbelgebiete genannt. Es ergibt sich das endgültige Gleichungssystem für Magnetfelder inklusive Leiter- und Wirbelströme:

$$\begin{pmatrix} \nu \cdot \iint_{A_\Delta} (\alpha_{ix} \cdot \alpha_{jx} + \alpha_{iy} \cdot \alpha_{jy}) dA_\Delta & - \iint_{A_\Delta} (\alpha_i \cdot \alpha_j) dA_\Delta \\ + j\omega\kappa \cdot \iint_{A_\Delta} (\alpha_i \cdot \alpha_j) dA_\Delta & \\ - j\omega\kappa \cdot \iint_{A_\Delta} (\alpha_i \cdot \alpha_j) dA_\Delta & \iint_{A_\Delta} (\alpha_i \cdot \alpha_j) dA_\Delta \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \underline{A}_{zj} \\ \hat{S}_{zj} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ \hat{i}_L \end{pmatrix} \quad \text{Gl. 4.13}$$

Die Anordnung der Kabeladern und auch die anderen nicht am Stromtransport beteiligten metallenen Aufbauelemente beeinflussen also die Verteilung der Ströme und des Magnetfeldes, so dass eine Berechnung von Induktivitätsbelägen überflüssig ist. Vor allem bei benachbarten metallenen Aufbauelementen wäre eine Bestimmung der daraus resultierenden Induktivitätsbeläge ohne weiteres nicht möglich.

4.4 Gekoppelte Wirbelstrom- und Temperaturfeldberechnung

Das Modul zur Magnetfeld- und Wirbelstromberechnung (siehe Abschnitt 4.3) wird abwechselnd mit dem Modul der Temperaturfeldberechnung aufgerufen. Hier soll zum besseren Verständnis die gegenseitige Abhängigkeit physikalischer Größen erläutert werden:

Ohm'sche Verluste, Wirbelstromverluste und dielektrische Verluste bei Wechselstromübertragung sowie Hystereseverluste bei ferromagnetischen Aufbauelementen verursachen als Heizleistung eine Erwärmung der Kabelanlage und deren Umgebung. Neben thermischen Auswirkungen, z. B. dem Phänomen der Bodenaustrocknung, bewirkt die Erwärmung auch eine Veränderung der elektrischen Leitfähigkeit des stromdurchflossenen Materials. Die hauptsächlich verwendeten Leitermaterialien, z.

B. Kupfer oder Aluminium, reagieren mit einem steigenden spezifischen Widerstand auf die Erwärmung. Entsprechend der Gleichung

$$P' = R' \cdot I^2 = \frac{S^2 \cdot A_L}{\kappa} \quad \text{Gl. 4.14}$$

erhöhen sich die Verluste pro Längeneinheit P' , wenn der spezifische elektrische Widerstand ρ steigt, bzw. die spezifische Leitfähigkeit κ sinkt. S ist die Stromdichte und A_L der Leiterquerschnitt. Nach der Gleichung

$$R'(\vartheta) = R'_0 \cdot (1 + \alpha_{20}(\vartheta - \vartheta_0)) \quad \text{Gl. 4.15}$$

bewirkt ein Temperaturanstieg von $\vartheta_0 = 20 \text{ °C}$ auf $\vartheta = 90 \text{ °C}$ eines Kupferleiters mit einem linearen Temperaturkoeffizienten von $\alpha_{20} = 3,93 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$ einen Verlustanstieg um 27,5 %. Bei Aluminium ist der Effekt mit $\alpha_{20} = 4,03 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$ noch etwas ausgeprägter, es ergibt sich ein Verlustanstieg von 28,2 %.

Auch verändert sich die Wirbelstromverteilung durch die veränderte elektrische Leitfähigkeit der metallenen Aufbauelemente und wirkt somit auf das magnetische Wechselfeld zurück.

Die Erwärmung muss deshalb in die magnetische FEM-Berechnung einbezogen werden, um zuverlässige Ergebnisse zu erhalten. Hierzu ist eine Kopplung der Berechnung thermischer und elektromagnetischer Felder erforderlich, die wie folgt abläuft:

Zuerst wird eine Wirbelstromberechnung mit den Materialparametern bei Umgebungstemperatur durchgeführt. Danach erfolgt eine Berechnung der Verlustleistungsbeläge P' , die dann als Wärmequellen in der nun folgenden Berechnung des thermischen Feldes eingetragen werden. Zusammen mit anderen Wärmequellen, z. B. Fernwärmerohre, ergibt sich eine neue Temperaturverteilung, die von der Umgebungstemperatur abweicht. Finite Elemente, die temperaturabhängige Materialeigenschaften wie zum Beispiel die temperaturabhängige elektrische Leitfähigkeit $\kappa(\vartheta)$ aufweisen, bekommen durch vorgegebene Kennlinien neue Größenwerte zugewiesen. Zum Beispiel wird die elektrische Leitfähigkeit mit Hilfe der Gleichung

$$\kappa(\vartheta) = \frac{\kappa_0}{1 + \alpha_{20} \cdot (\vartheta - \vartheta_0)} \quad \text{Gl. 4.16}$$

angepasst.

Eine erneute Wirbelstromberechnung liefert nun veränderte Leistungsbeläge, mit deren Hilfe wieder eine neue Temperaturverteilung berechnet wird. Diese iterative Berechnung wird so lange wiederholt, bis die Änderung der Materialparameter unter eine vorgegebene Abbruchschranke gefallen ist. Die Kopplung der Berechnungsverfahren ermöglicht es, die Temperaturverteilung und das elektromagnetische Feld von Anordnungen zu berechnen, in denen sowohl thermisch als auch magnetisch feldabhängige Materialien vorkommen. Da die Änderung der Wärmeleitfähigkeit die Temperaturverteilung beeinflusst und dies eine Veränderung der elektrischen Leitfähigkeit zur Folge hat, beeinflusst die Veränderung thermischer Materialgrößen indirekt auch das elektromagnetische Feld. Durch die Kopplung

der Berechnungsverfahren kann dieses komplizierte Zusammenwirken thermischer und magnetischer Größen berücksichtigt werden.

4.5 Transiente Berechnung des Temperaturfeldes

Auch bei Erwärmungsvorgängen kann nach jedem Zeitschritt der transienten Temperaturfeldberechnung das Modul zur Berechnung des Magnetfeldes aufgerufen werden, um die Verlustleistungen für die gerade aktuelle Strombelastung zu ermitteln. Diese Verlustleistungen werden dann wieder als Wärmequellen für den nächsten Zeitschritt der transienten Berechnung eingetragen.

In der Praxis wird allerdings wegen des hohen Rechen- und Zeitaufwandes meistens auf die nach jedem Zeitschritt der thermisch transienten Berechnung erneute Magnetfeldberechnung verzichtet. Stattdessen ermittelt man aus einer vorher durchgeführten stationären Berechnung (siehe Abschnitt 4.4) die sogenannten äquivalenten elektrischen Leitfähigkeiten κ_{AC} , die auch Wechselstromleitfähigkeiten genannt werden.

Die Stromdichte ist aufgrund des Wechselstroms inhomogen im Leiter verteilt, so dass sich bei Belastung mit Wechselstrom eine kleinere spezifische elektrische Leitfähigkeit

$$\kappa_{AC} = \frac{I^2}{P' \cdot A_L} \quad \text{Gl. 4.17}$$

ergibt als bei Belastung mit Gleichstrom. Gibt man für die thermisch transiente Berechnung einen zeitabhängigen Strom als Quelle vor, wird diese mit Hilfe der Gleichung

$$p(t) = \frac{I^2(t) \cdot (1 + \alpha \cdot (\vartheta_L - \vartheta_0))}{\kappa_{AC}} \quad \text{Gl. 4.18}$$

in eine Verlustleistungsdichte umgerechnet, welche dann als Wärmequelle für den nächsten Rechenschritt dient.

Die hierzu benötigte Leitertemperatur ϑ_L zur Anpassung der temperaturabhängigen Wechselstromleitfähigkeit wird aus dem Temperaturvektor des vorhergehenden Rechenschritts ausgelesen. Auf diese Weise lassen sich zügig transiente Erwärmungen mit beliebigen Lastprofilen berechnen, ohne dass das Modul zur Magnetfeldberechnung aufgerufen werden muss, um aus den vorgegebenen elektrischen Strömen die für das thermische Model benötigten Verlustleistungen zu ermitteln.

Für eine tiefergehende Beschreibung und eine Beschreibung der transienten Berechnung im Zeitschrittverfahren nach Crank-Nicolson wird auf [Sta2001] verwiesen.

4.6 Berücksichtigung von Millikenleitern in der 2D-FEM

Zur Reduzierung des Skin- und Proximity-Effekts werden Leiter großen Querschnitts in mehrere Segmente unterteilt, die voneinander isoliert sind. Diese aus Rundleitern bestehende mehrdrätige, seg-

mentierte Leiterkonstruktion wird auch Millikenleiter genannt. Die einzelnen Segmente sind miteinander verseilt, winden sich also um die Leiterachse, um so den Proximity-Effekt zu reduzieren. Die Drähte innerhalb eines Segments sind ebenfalls miteinander verseilt, um die Stromverdrängung in Richtung des Leitersaußenrandes zu reduzieren.

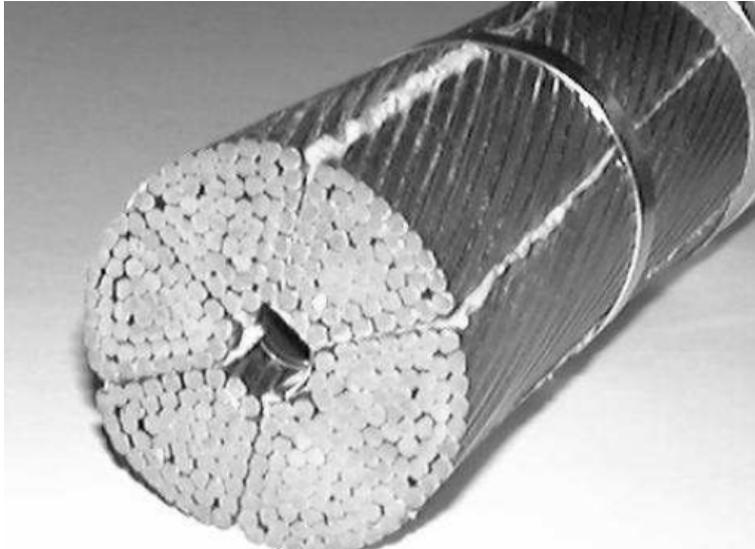


Abb. 19: Millikenleiter mit sechs Segmenten [Joa1996]

Die Berechnung von Stromverdrängungserscheinungen in Millikenleitern und den daraus resultierenden thermischen Verlusten gestaltet sich so problematisch, so dass es sogar Dissertationen zu diesem Thema gibt [Joa1996]. Die einzelnen Drähte sind nicht voneinander isoliert, so dass ein Übertritt des Stroms von einem Draht zum anderen prinzipiell möglich ist. Die im Laufe der Zeit entstehende Oxydschicht auf den Drähten erschwert dabei den Stromübertritt. Wird das Kabel aber bewegt, gebogen, etc., also irgendwelchen mechanischen Kräften ausgesetzt (auch erhöhter Druck), so werden die Oxydschichten beschädigt und der Stromübertritt wieder begünstigt. Die Hauptschwierigkeit in der oben genannten Dissertation bestand in der Bestimmung des resultierenden Wechselstromwiderstands, da dieser mit den Umgebungsbedingungen und der Vorgeschichte des Kabels variierte.

Mit dem hier verwendeten zweidimensionalen FEM-Programm ist die Nachbildung eines mehrfach verseilten und segmentierten Leiters nicht möglich. Mit einem 3-D-FEM-Programm wäre zwar die komplexe Anordnung der Leiterdrähte nachzubilden, aber eine genaue Berechnung dennoch nicht möglich, da die Übergangswiderstände zwischen den Einzeldrähten vollkommen unbekannt sind. Joachim beschreibt dies so: „Somit existieren zwischen den Einzeldrähten unbekannte Übergangswiderstände, deren Werte...einer stochastischen Verteilung unterliegen.“

Man kann den Übergangswiderständen in einem zweidimensionalen FEM-Programm näherungsweise Rechnung tragen, in dem man den kreisförmigen Leiter in Ringe (sogenannte Wirbelgebiete - WGB) unterteilt, die voneinander isoliert sind und prägt einen mittleren Strom ein, der sich nur innerhalb des einzelnen Rings verteilen darf. Die folgende Skizze verdeutlicht das Prinzip:

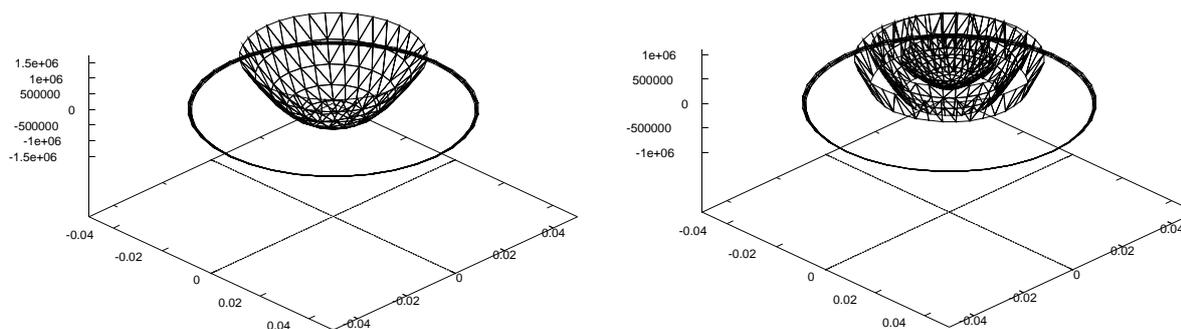
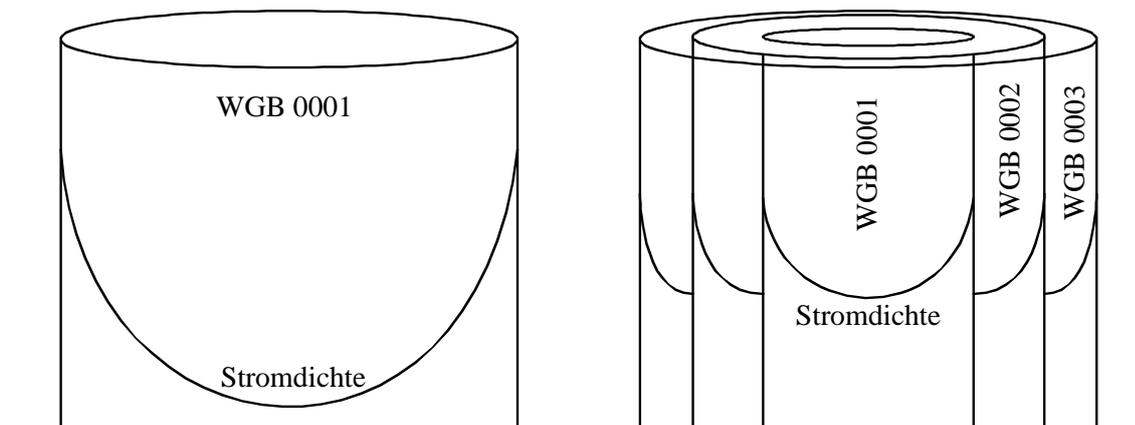


Abb. 20: Näherungsweise Nachbildung eines Millikenleiters

In je mehr Ringe der Leiter unterteilt wird, desto geringer sind die Stromverdrängungserscheinungen. Im Sinne einer konservativen Rechnung wird in dieser Studie nur eine Unterteilung (ein innerer Kreis und ein Ring) vorgenommen. Mit dieser Anordnung ergeben sich, wie in einer Vorstudie zum Regelgraben [Sta2015] gezeigt wurde, geringfügig niedrigere Temperaturen als bei der konservativen Näherungsberechnung nach [IEC2006].

Bei parallel geschalteten Kabeln, wie es hier der Fall ist (ein Freileitungssystem wird auf zwei Kabelsysteme überführt), werden jeweils die inneren Leiterkreise parallelgeschaltet und separat die Leiterringe, so dass die korrekten Flächen zwischen den Adern aufgespannt werden und sich somit die korrekte unsymmetrische Stromverteilung einstellt.

Die Leiterringe nach Abb. 20 wurden so eingestellt, dass sich der mittlere ks-Faktor zu 0,8 ergibt, was dem geforderten Größenwert für einen Standard-Millikenleiter in [Ten2019] entspricht.

5 Ergebnisse der magnetisch-thermischen Berechnungen

In diesem Abschnitt werden die Berechnungsergebnisse für die drei typischen Bodenprofile, sandiger Boden, lehmiger Boden und Moorboden (siehe Abschnitt 2.7.1) vorgestellt. Zuerst werden die Ergebnisse der stationären Berechnung gezeigt, gefolgt von den transienten Erwärmungsberechnungen.

5.1 Sandiger Boden

Die folgende Abbildung zeigt das gesamte Finite-Elemente-Modell. Im Bereich der Kabelanlage und der Sandbettung sind die Strukturen und damit die Diskretisierung so fein, dass im Folgenden Ausschnitte aus dem Modell gezeigt werden. Das thermische Problem stellt ein sogenanntes offenes Problem dar, bei dem die Temperaturen mit größer werdender Entfernung kontinuierlich gegen die ungestörte Umgebungstemperatur abklingen. Das Modell ist deshalb zu tieferen Bodenschichten hin keinen Randwert mit vorgegebener Temperatur sondern einen halbkreisförmigen offenen Rand, um die Temperaturverteilungen korrekt zu berechnen.

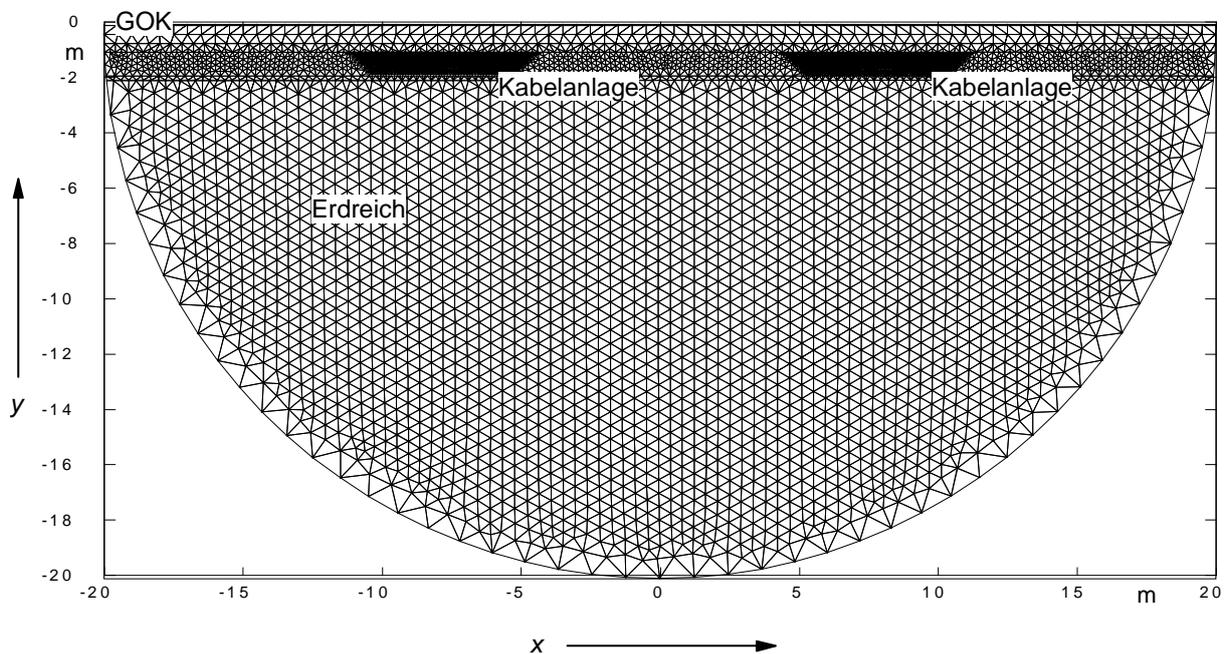


Abb. 21: Finite-Elemente-Modell der Kabelanlage im sandigen Boden

In der Ausschnittvergrößerung erkennt man die modellierten Bodenschichten des sandigen Bodens:

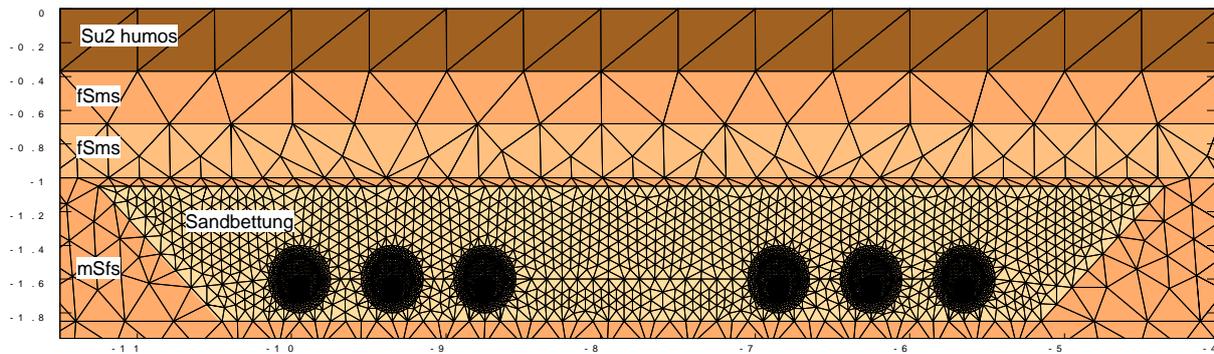


Abb. 22: Finite-Elemente-Modell, Ausschnitt im Bereich der Kabelanlage und der Bodenschichten, sandiger Boden (vergleiche Abb. 8)

Die letzte Ausschnittvergrößerung zeigt eine Kabelader im PE-Rohr. Der Wärmeübergang im Luftspalt zwischen Kabel und Rohrwand wurde mittels des in Abschnitt 2.7 beschriebenen Modells berechnet.

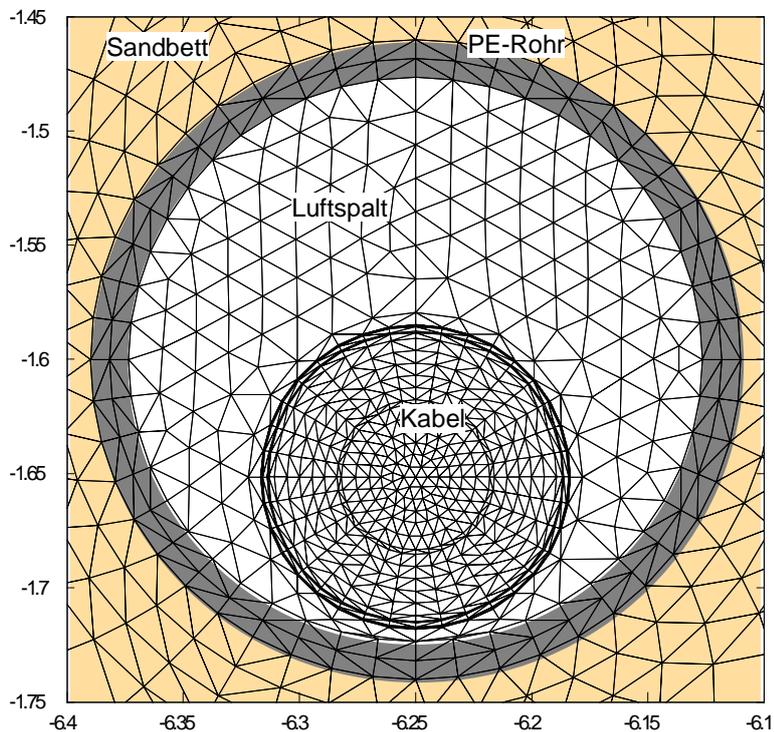


Abb. 23: Finite-Elemente-Modell, Ausschnitt im Bereich einer Kabelader im PE-Rohr

5.1.1 Mittlere Erwärmungen bei dynamischer Last und thermischer Grenzlast

Die folgende Abbildung zeigt die Temperaturverteilung in der Kabelanlage und im umgebenden sandigen Boden.

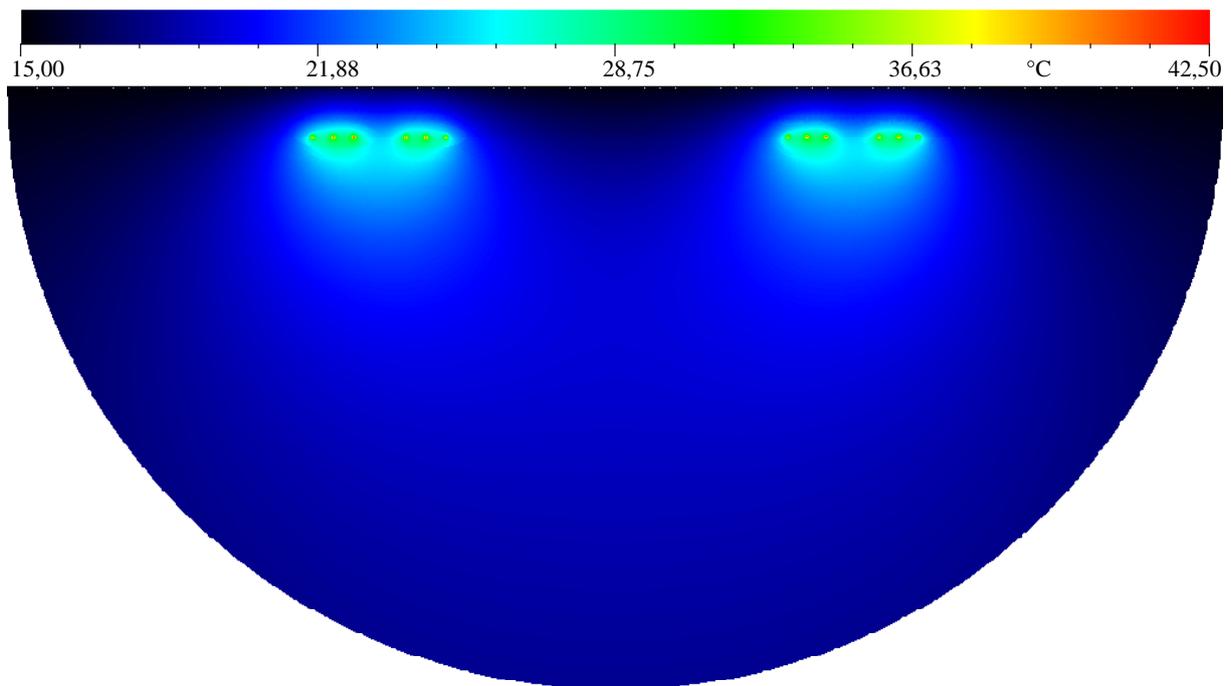


Abb. 24: Temperaturverteilung im Gesamtmodell, Kabelanlage im sandigen Boden, $I = 2333 \text{ A}$

Die Temperatur von $42,5 \text{ }^\circ\text{C}$ (siehe Skala in der obigen Abbildung) ist nicht im Boden anzutreffen, sondern stellt die Leitertemperatur der heißesten Kabelader dar.

Zur quantitativen Auswertung werden durch das Modell waagerechte Linienabstastungen gelegt, um die maximalen Temperaturen bzw. Erwärmungen in unterschiedlichen Erdschichten zu bestimmen. Durchwurzlungen kommen im Oberboden bis zu geringen Tiefen vor. Unterhalb von $1,0 \text{ m}$ wurden im Trassenbereich keine Wurzeln angetroffen. Temperaturabstastungen werden deshalb in Tiefen von $0,2 \text{ m}$, $0,5 \text{ m}$ und $1,0 \text{ m}$ durchgeführt (siehe Abb. 25 und Abb. 26). Zum Nachweis, dass sich die maximale Temperatur von $42,5 \text{ }^\circ\text{C}$ innerhalb der Kabeladern befindet, wird auch eine Temperaturabstastung durch die Leiterachsen (Tiefe $1,65 \text{ m}$) durchgeführt.

Der Ort $0,0 \text{ m}$ in den folgenden Diagrammen stellt die Achse der Doppeltrasse dar (die Mitte der Baustraße in Abb. 3). Die Kabeladern befinden sich in horizontalen Entfernungen von $\pm 5,65 \text{ m}$, $\pm 6,25 \text{ m}$, $\pm 6,85 \text{ m}$, $\pm 8,75 \text{ m}$, $\pm 9,35 \text{ m}$ und $\pm 9,95 \text{ m}$ zur Trassenachse. Die PE-Rohre befinden sich in einer Tiefe von $1,60 \text{ m}$.

Bei beiden Belastungen wird in der Kabelumgebung die Grenztemperatur für Bodenaustrocknung von $36,67 \text{ }^\circ\text{C}$ [Ten2019, VDE1995] nicht erreicht, demnach bildet sich keine Bodenaustrocknungszone aus.

Die maximalen Leitertemperaturen betragen $42,5 \text{ }^\circ\text{C}$ bei 2333 A und $49,0 \text{ }^\circ\text{C}$ bei 2625 A . VPE-Kabel sind bis zu $90 \text{ }^\circ\text{C}$ Leitertemperatur belastbar; somit ist aus technischer Sicht die Kabelanlage thermisch deutlich überdimensioniert. Entsprechend gering sind die thermischen Emissionen.

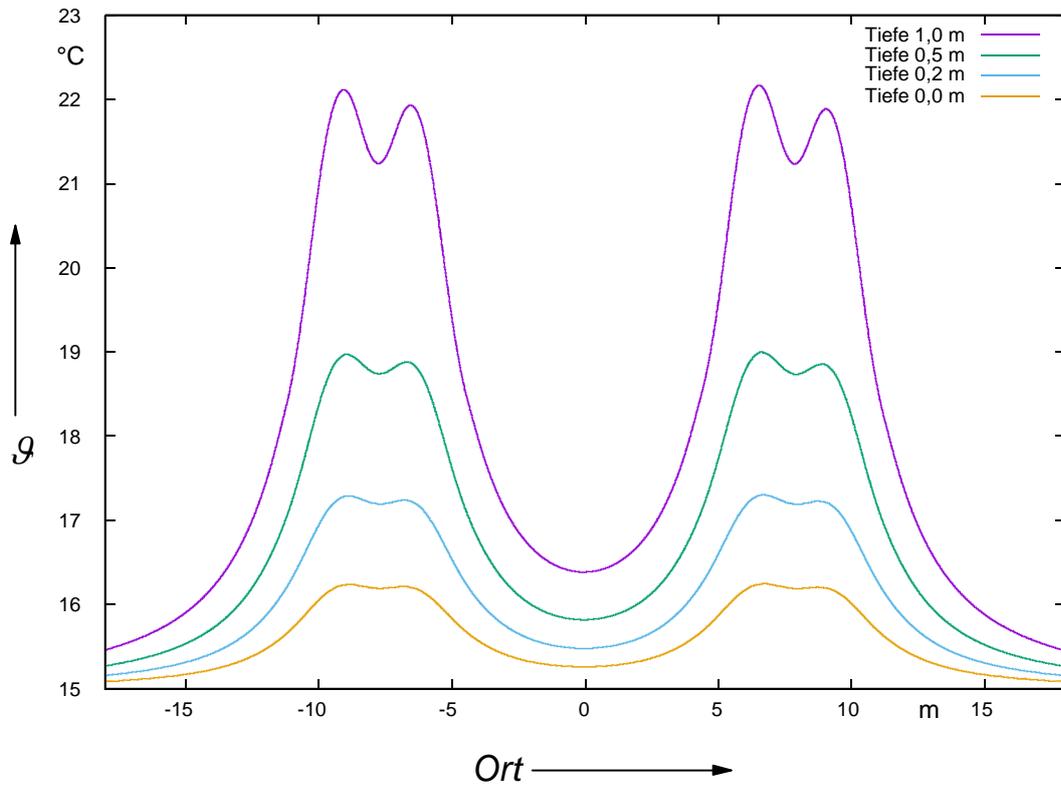


Abb. 25: Temperaturabastungen an der GOK, in 0,2 m 0,5 m und 1,0 m Tiefe im sandigen Boden, $I = 2333 \text{ A}$

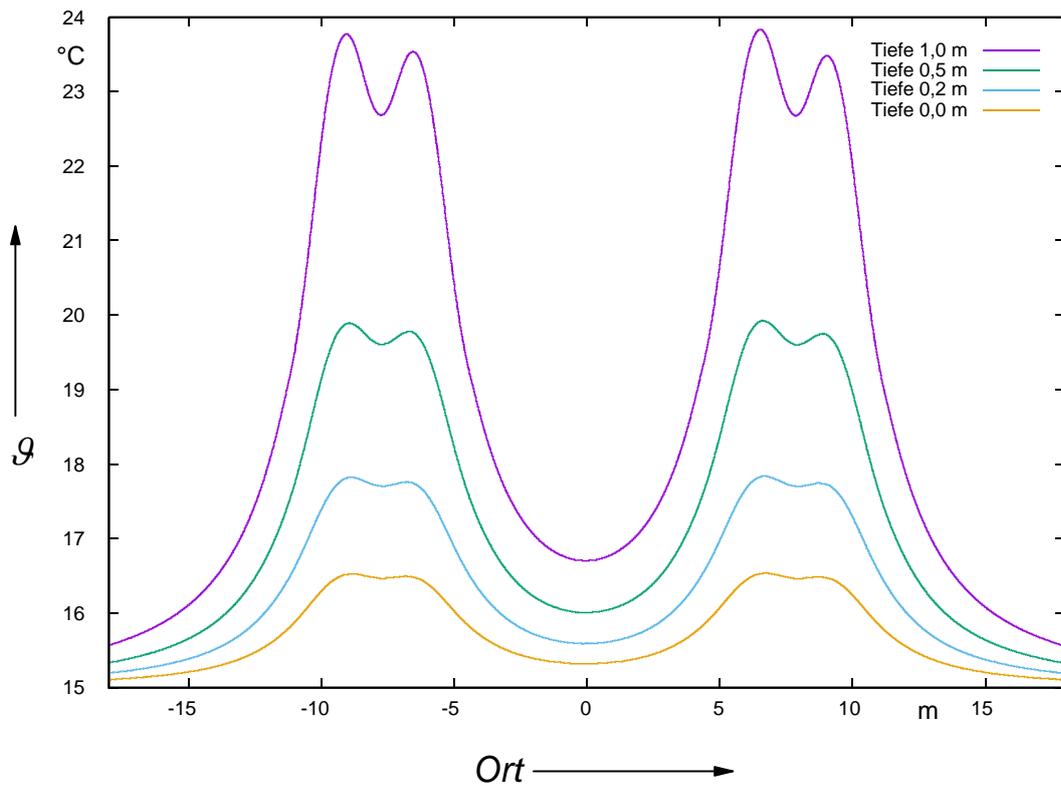


Abb. 26: Temperaturabastungen an der GOK, in 0,2 m 0,5 m und 1,0 m Tiefe im sandigen Boden, $I = 2625 \text{ A}$

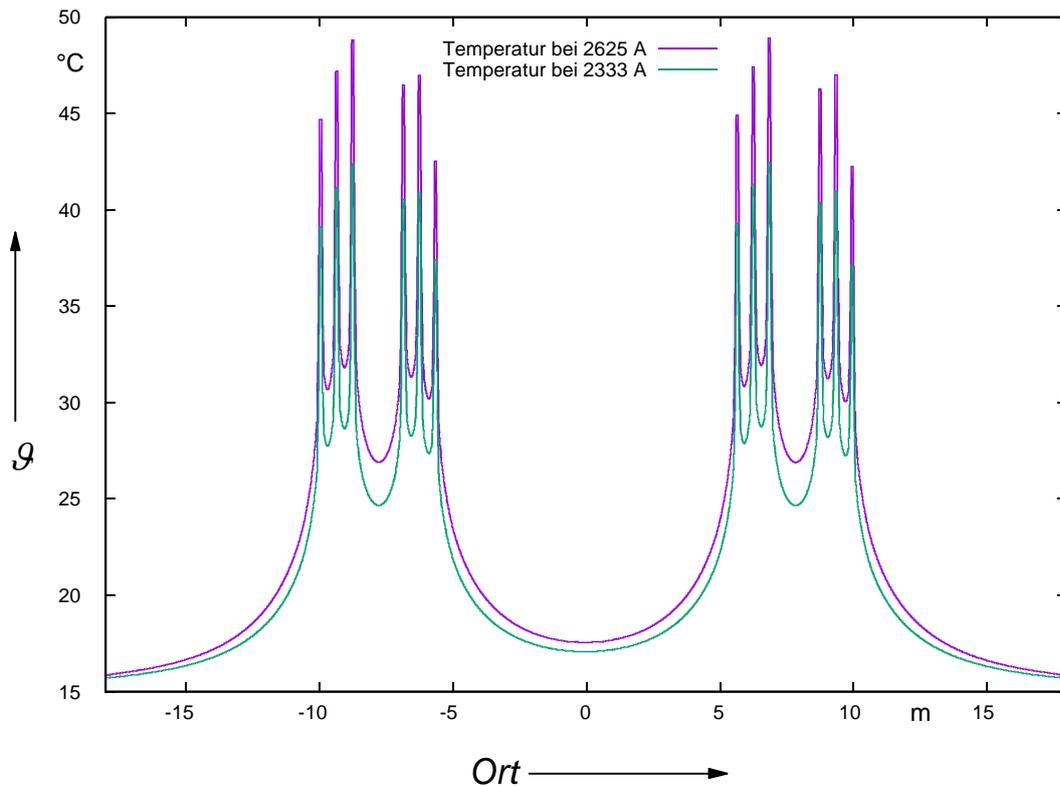


Abb. 27: Temperaturabtastungen durch die Leiterachsen, sandiger Boden, $I = 2333 \text{ A}$ und 2625 A

Die folgende Tabelle fasst die maximalen Temperaturen, die maximalen Erwärmungen und die Orte der Temperaturmaxima zusammen. Die Erwärmung (Temperatur abzüglich Umgebungstemperatur von 15 °C) ist in Kelvin angegeben:

Tiefe	0,0 m	0,2 m	0,5 m	1,0 m	L33
Dyn. Last Temp. / Erwärmung	16,2 °C/ 1,2 K	17,3 °C/ 2,3 K	19,0 °C/ 4,0 K	22,2 °C/ 7,2 K	42,5 °C
Grenzlast Temp. / Erwärmung	16,5 °C/ 1,5 K	17,8 °C/ 2,8 K	19,9 °C/ 4,9 K	23,8 °C/ 8,8 K	49,0 °C
Ort	6,75 m	6,68 m	6,61 m	6,53 m	6,85 m

Tab. 6: Maximale Temperaturen (°C) und Erwärmungen (K) im sandigen Boden, stationäre Berechnung

Es ist zu betonen, dass die obige Tabelle die **maximalen Erwärmungen** angibt. Rechts und links dieser Maxima fallen die Temperaturen schnell zu kleineren Größenwerten (siehe Abb. 25 und Abb. 26).

5.1.2 Zyklische Belastungen

Beginnend mit dem im vorigen Abschnitt beschriebenen stationären Arbeitspunkt werden die Kabel nun mit den Tageslastzyklen nach Abschnitt 2.3 belastet. Die Leitertemperatur wird nur für die Ader L33 (rechte Ader des dritten Systems) gezeigt, da L33 die wärmste Ader ist. In den darüber liegenden Tiefen werden die Orte der Temperaturmaxima aus Tab. 6 abgetastet.

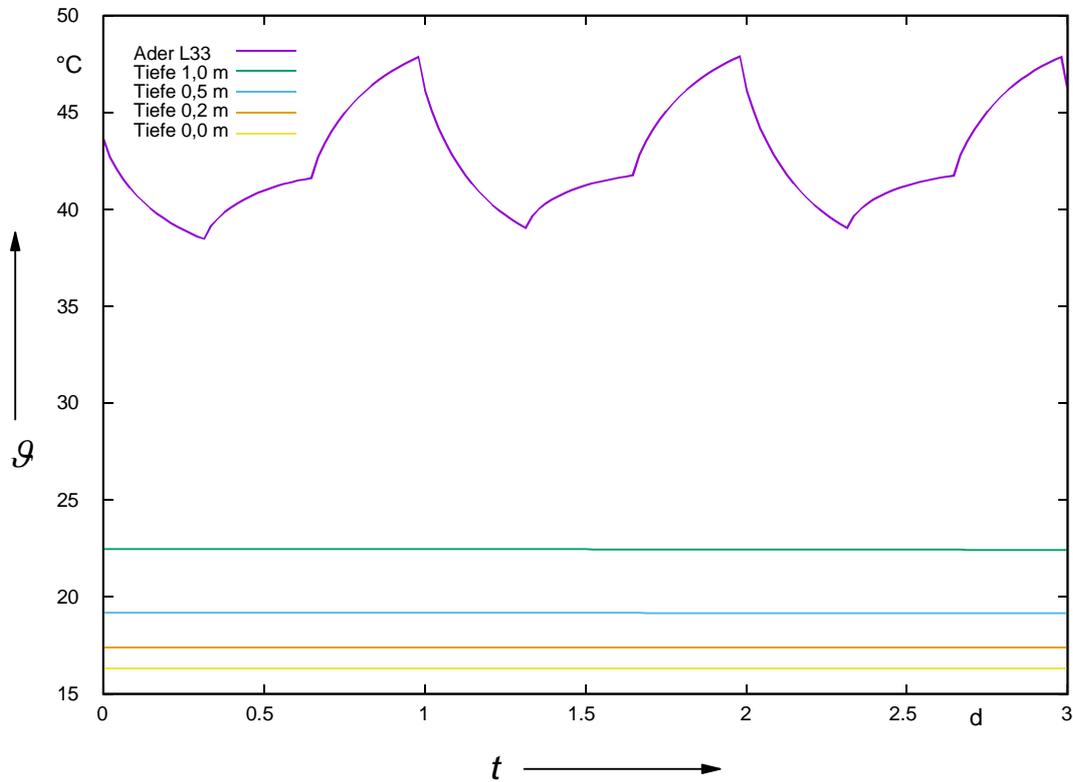


Abb. 28: Verlauf der Temperatur im Leiter L33 und in diversen Tiefen bei dynamischer Last, sandiger Boden

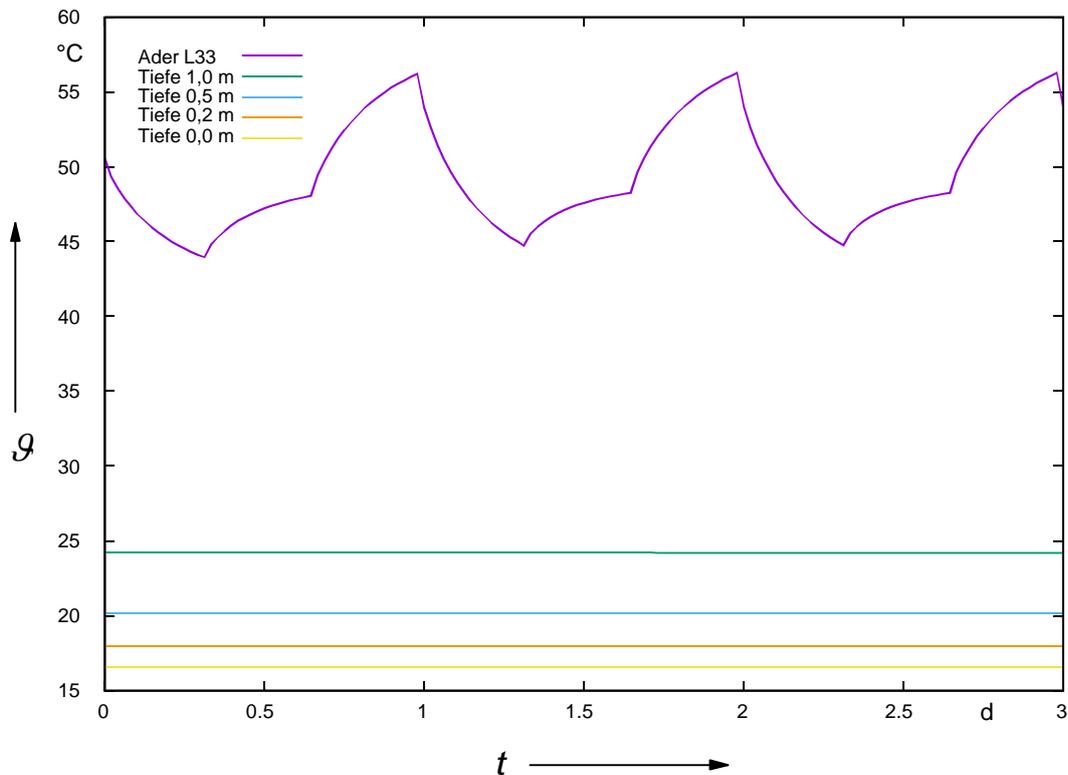


Abb. 29: Verlauf der Temperatur im Leiter L33 und in diversen Tiefen bei Grenzlast, sandiger Boden

Eine schwankende Temperatur ist nur im Leiter und seiner direkten Umgebung (in der Sandbettung) erkennbar. Bei dynamischer Belastung schwankt die Leitertemperatur um den stationären Arbeitspunkt von $43,7\text{ °C}$ mit einer Amplitude von $4,2\text{ K}$ und erreicht somit temporäre Spitzen von $47,9\text{ °C}$ bei dynamischer Last.

bei thermischer Grenzlast schwankt die Temperatur hier um den stationären Arbeitspunkt von $50,6\text{ °C}$ mit einer Amplitude von $5,7\text{ K}$ und erreicht temporäre Spitzen von $56,3\text{ °C}$

Bereits in einer Tiefe von $1,0\text{ m}$ unterhalb der GOK ist keine zeitliche Temperaturschwankung mehr erkennbar und die Bodentemperaturen entsprechen mit Abweichungen von unter $0,4\text{ K}$ den Bodentemperaturen in der Tab. 6. Die großen Wärmekapazitäten des Erdreichs glätten den Temperaturverlauf, so dass die Wurzeln einer Bepflanzung oberhalb der Kabelanlage keinen durch Tageslastzyklen bedingten Temperaturschwankungen, sondern zeitlich konstanten Temperaturen ausgesetzt sind. Die folgende Tabelle fasst die wichtigen Ergebnisse der transienten Berechnung zusammen:

Tiefe	0,0 m	0,2 m	0,5 m	1,0 m	L33
Dyn. Last Temp. / Erwärmung	16,3 °C/ 1,3 K	17,4 °C/ 2,4 K	19,1 °C/ 4,1 K	22,4 °C/ 7,4 K	38,5 °C- 47,9 °C
Grenzl原因 Temp. / Erwärmung	16,6 °C/ 1,6 K	18,0 °C/ 3,0 K	20,1 °C/ 5,1 K	24,2 °C/ 9,2 K	44,8 °C- 56,3 °C
Ort	6,75 m	6,68 m	6,61 m	6,53 m	6,85 m

Tab. 7: Maximale Temperaturen (°C) und Erwärmungen (K) im sandigen Boden, transiente Berechnung

5.1.3 Temperaturen der Kabelanlage bei saisonalen Schwankungen

Bei den bisherigen Berechnungen wurde die Temperatur im Erdreich und auf der Erdoberfläche konstant zu 15 °C angenommen. Jeder Einfluss einer Kabelanlage, der Abweichungen von dieser konstanten Temperatur verursacht, wird daher als bedeutend wahrgenommen.

In der Realität jedoch unterliegen die Temperaturen im Boden großen jahreszeitlich bedingten Schwankungen. Ebenfalls ist ein saisonal und mit der Bodentiefe schwankendes Temperaturgefälle zu beobachten.

Um den Einfluss der Kabelanlage vor dem Hintergrund saisonal schwankender Bodentemperaturen zu erfassen, wurden zunächst die Temperaturen im Boden ohne Kabelanlage mit Hilfe einer zeitaufgelösten Finite-Elemente-Simulation über eine Zeitdauer von zwei Jahren aufwändig berechnet. Das erste Jahr wird ausgehend von einer Starttemperatur simuliert, aber nicht ausgewertet, da anfängliche Einschwingvorgänge noch abklingen müssen. Das zweite Jahr wird dann als eingeschwungener Zustand ausgewertet.

Die Geländeoberkante (GOK) wird mit einem Randwert belegt, bei dem die Umgebungstemperatur sinusförmig von 0 °C (im Winter) auf 20 °C (im Sommer) steigt und wieder zu 0 °C über einen Zeitraum von 365 Tagen fällt.

Die Abb. 30 zeigt das FEM-Modell mit der Bodenschichtung des sandigen Bodens nach Abb. 8. Die Geländeoberkante (GOK) des Modells wird mit einer zeitlich schwankenden Lufttemperatur versehen. Die höchste Lufttemperatur wurde im Sommer mit 20 °C und die niedrigste Temperatur mit 0 °C angenommen. Die Lufttemperatur schwankt somit sinusförmig über einen Zeitraum von 365 Tagen. Bei dieser Annahme handelt es sich um durchschnittliche Tagestemperaturen. Temperaturschwankungen innerhalb eines Tages wurden nicht angenommen. Frühere Untersuchungen [BST2009] in Zusammenarbeit mit Herrn Prof. Peter Trüby, Albert-Ludwigs-Universität in Freiburg, haben gezeigt, dass diurnale Temperaturschwankungen, also Schwankungen innerhalb eines Tages, aufgrund der großen thermischen Kapazitäten des Erdreichs rasch geglättet werden und bereits in wenigen Dezimetern unterhalb der Geländeoberkante messtechnisch nicht mehr nachweisbar sind.

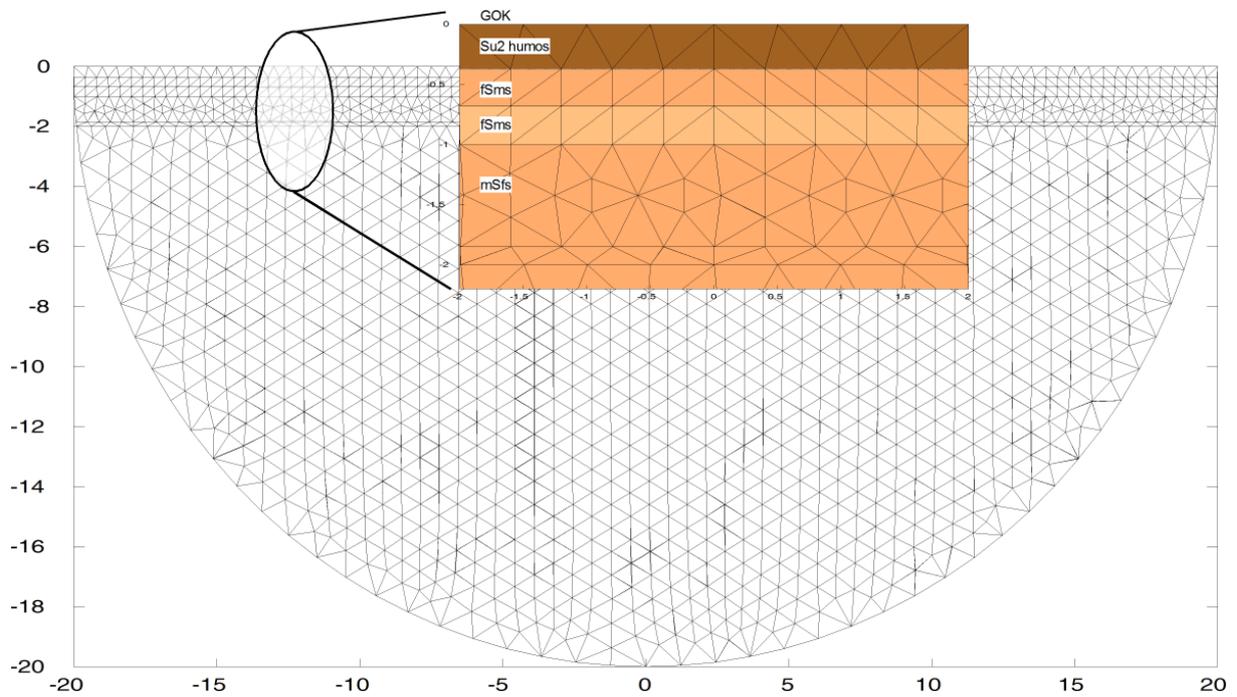


Abb. 30: Finite-Elemente Modell des sandigen Bodens ohne Kabelanlage

Die folgende Abbildung zeigt die sich einstellenden zeitlichen Temperaturverläufe in diversen Tiefen im thermisch ungestörten sandigen Boden:

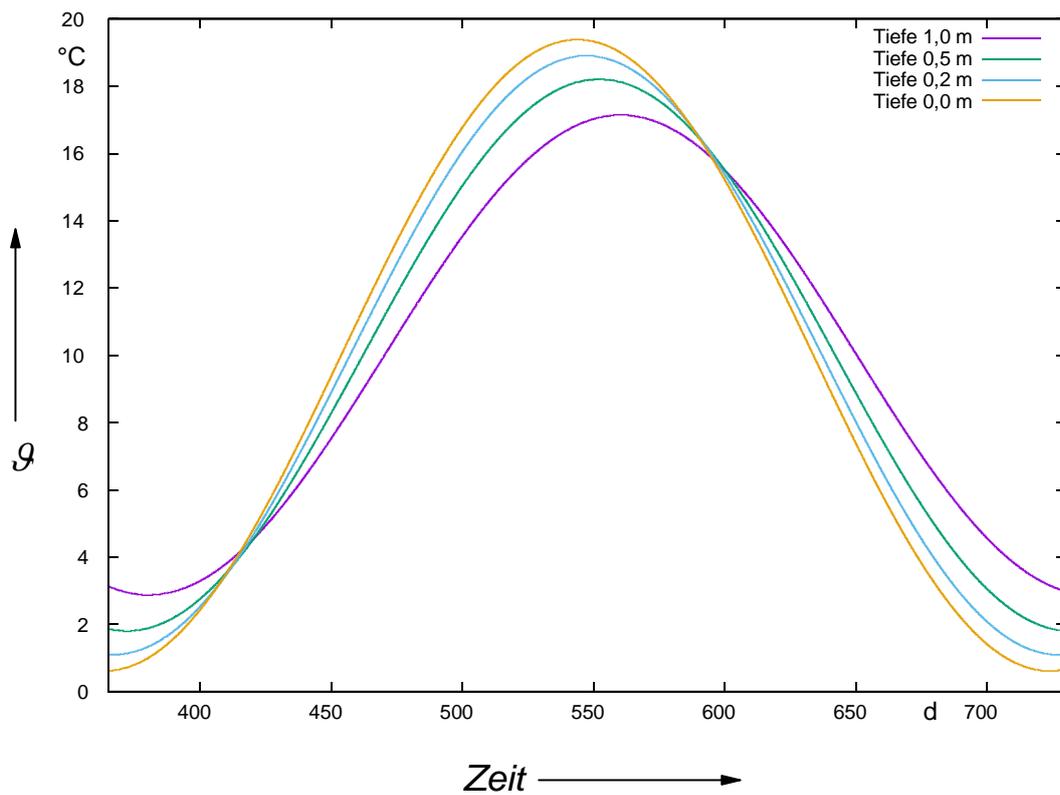


Abb. 31: Temperaturverläufe in diversen Tiefen im thermisch ungestörten sandigen Boden

Während die Geländeoberkante mit Temperaturen von 0,61 °C bis 19,38 °C der Lufttemperatur, die von 0 °C bis 20 °C schwankt, nahezu ungedämpft und unverzögert folgt, stellt sich bedingt durch die großen thermischen Kapazitäten mit zunehmender Tiefe eine deutliche zeitliche Verzögerung im Temperaturverlauf ein und die Temperaturschwankungen nehmen deutlich ab. Die folgende Tabelle zeigt die Temperaturen und die Schwankungsbreite in diversen Tiefen des sandigen, thermisch ungestörten Bodens.

Tiefe / m	0,0	0,2	0,5	1,0
Temperatur / °C	0,6 – 19,4	1,1 - 18,9	1,8 – 18,2	2,9 – 17,1
Schwankung / K	18,8	17,8	16,4	14,2
Tag der max. Bodentemperatur	543,8	547,2	552,2	560,4

Tab. 8: Temperaturschwankungen in diversen Tiefen im thermisch ungestörten sandigen Boden

Während die maximale Bodentemperatur an der GOK am Tag 544 erreicht wird, wird das Maximum in einer Tiefe von 1,0 m erst am Tag 560 erreicht, also um 16 Tage verzögert. Die Temperaturschwankung nimmt von der GOK bis zur Tiefe von 1,0 m um 4,5 Kelvin ab.

Die zeitliche Verzögerung mit zunehmender Tiefe hat zur Folge, dass sich innerhalb eines Jahres das Temperaturprofil im Boden umkehrt. Im Sommer sind die unteren Bodenschichten kälter als die oberen, im Winter ist es genau umgekehrt, die unteren Schichten sind wärmer als die GOK. Die folgenden Falschfarbenbilder zeigen die berechneten Temperaturprofile von der GOK mit zunehmender Tiefe im Sommer und im Winter.

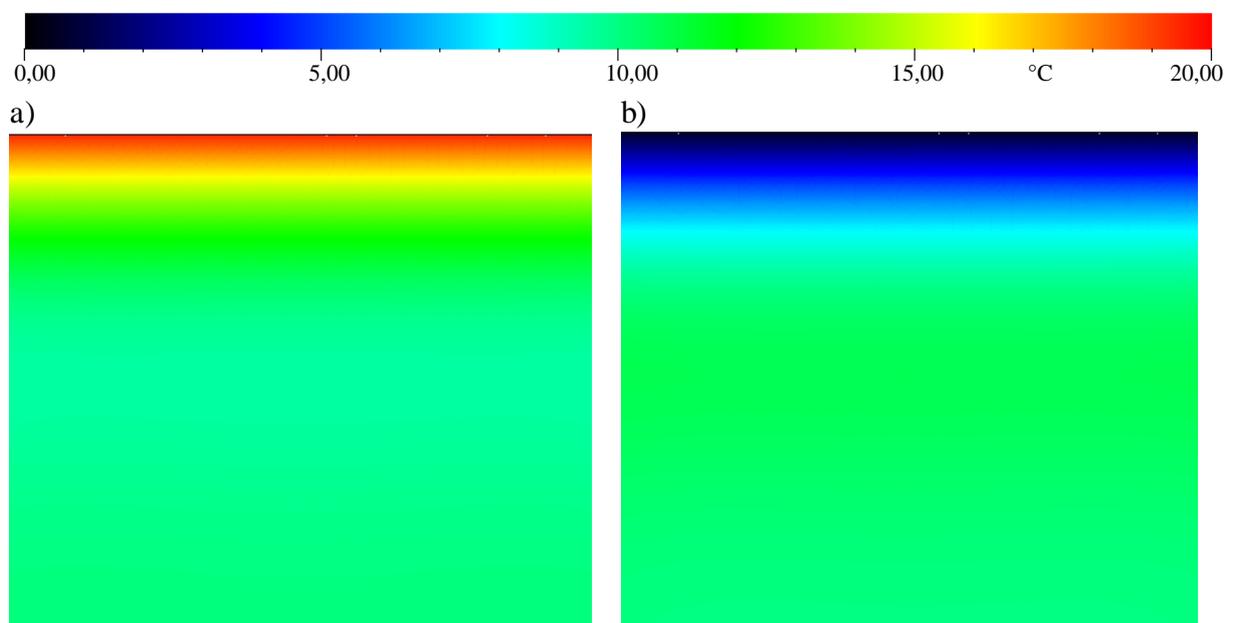


Abb. 32: Temperaturverteilung im sandigen Boden a) im Sommer, b) im Winter

Legt man eine senkrechte Linienabtastung durch das FEM-Modell erkennt man, dass die Temperatur mit zunehmender Tiefe gegen den Mittelwert von rund 10 °C konvergiert.

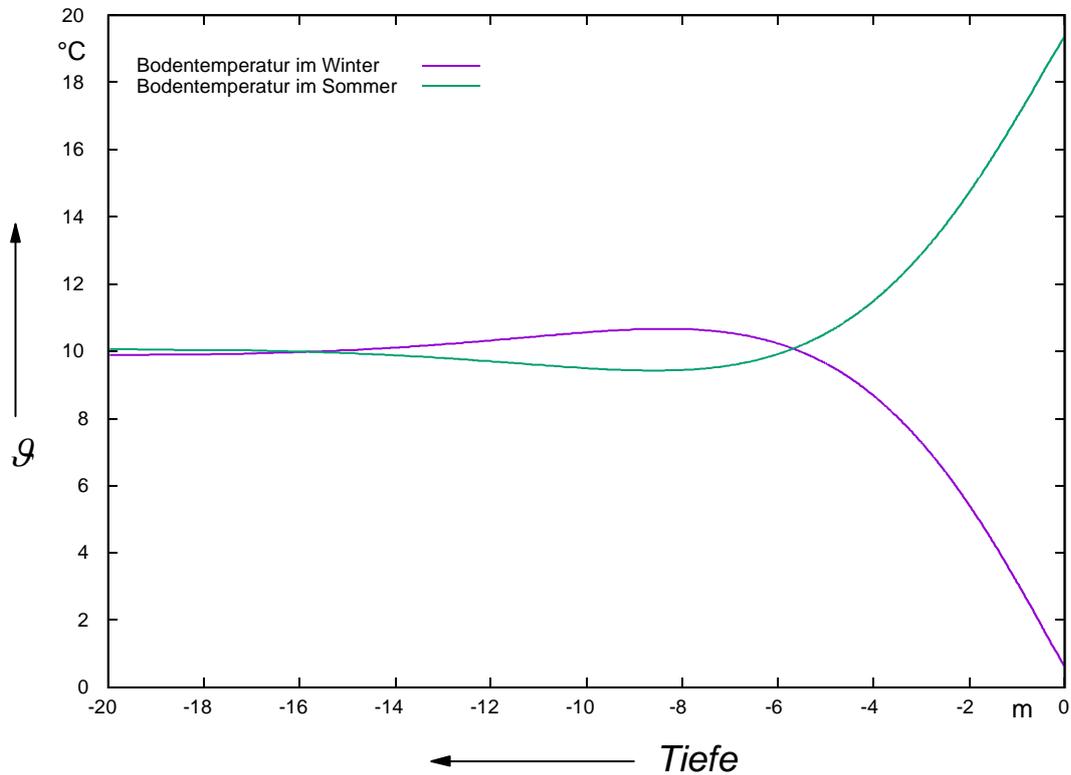


Abb. 33: Temperaturverteilung in Abhängigkeit der Tiefe, sandiger Boden

Nun wird die Zwei-Jahres-Simulation mit Kabelanlage wiederholt. Das Modell mit Kabelanlage ist in Abb. 21 bis Abb. 23 zu sehen. Verwendet werden wieder ausschließlich die Temperaturverläufe im zweiten Jahr. Als Orte der Temperaturabtastungen werden die Orte der maximalen Erwärmung aus Tab. 6 bzw. Tab. 7 gewählt:

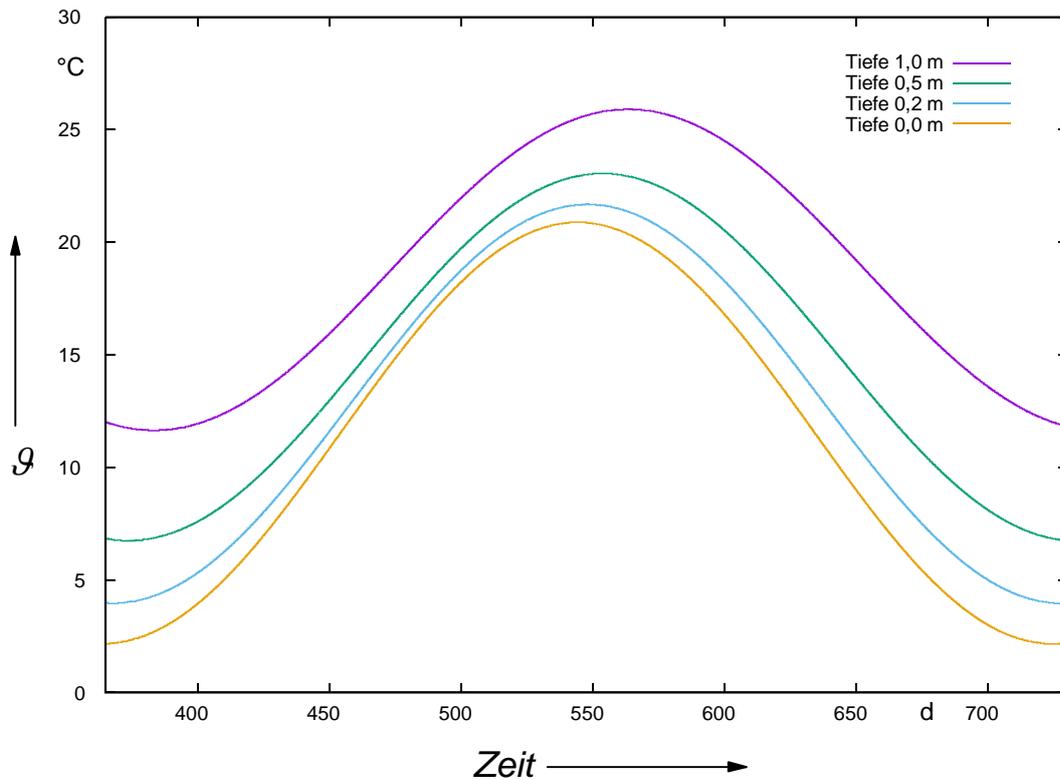


Abb. 34: Temperaturverteilung im sandigen Boden mit Kabelanlage, thermische Grenzlast

Tiefe und Ort/ m	0,0/ 6,75	0,2/ 6,68	0,5/ 6,61	1,0/ 6,53
Temperatur / °C	2,2 - 20,9	4,0 - 21,7	6,7 - 23,1	11,6 - 25,9
Schwankung / K	18,7	17,7	16,4	14,3
Tag der max. Bodentemperatur	544,2	547,9	553,5	562,9

Tab. 9: Temperaturschwankungen in diversen Tiefen im sandigen Boden mit Kabelanlage, thermische Grenzlast

Die Temperaturen des Bodens mit Kabelanlage in Tab. 9 werden mit den Temperaturen des ungestörten Erdreichs in Tab. 8 verglichen: Als erstes fällt auf, dass die Kabelanlage die jahreszeitlichen Temperaturschwankungen (Zeile 3 in beiden Tabellen) nicht verstärkt. Zum Beispiel ist die Schwankungsbreite in 0,5 m Tiefe 16,4 Kelvin sowohl im ungestörten Erdreich als auch bei Vorhandensein der Kabelanlage. Abgesehen von Rundungsungenauigkeiten, die hier bei 0,1 Kelvin liegen, ist es gleich, ob man die minimalen Temperaturen oder die maximalen Temperaturen voneinander subtrahiert, es ergeben sich übers Jahr konstante Erwärmungen (Zeile 4 in Tab. 10).

Die maximale Bodentemperatur wird auch nicht früher erreicht als im ungestörten Erdreich (siehe Tag der max. Bodentemperatur in Tab. 8 und Tab. 9). Die Kabelanlage hebt also den Temperaturverlauf um die Erwärmung gleichmäßig an.

Tiefe und Ort/ m	0,0/ 6,75	0,2/ 6,68	0,5/ 6,61	1,0/ 6,53
Ungestörte Temperatur / °C	0,6 – 19,4	1,1 - 18,9	1,8 – 18,2	2,9 – 17,1
Temperatur bei therm. Grenzlast / °C	2,2 - 20,9	4,0 – 21,7	6,7 - 23,1	11,6 – 25,9
Erwärmung/ K	1,6	2,9	4,9	8,8

Tab. 10: Vergleich der Temperaturen des ungestörten Bodens und mit Kabelanlage bei thermischer Grenzlast, sandiger Boden

Die obigen Untersuchungen wurden ebenfalls für die dynamische Last durchgeführt. Die folgenden Ergebnisse dürften, wie bereits zuvor ausgeführt, am ehesten den zu erwartenden Erwärmungen im Boden entsprechen.

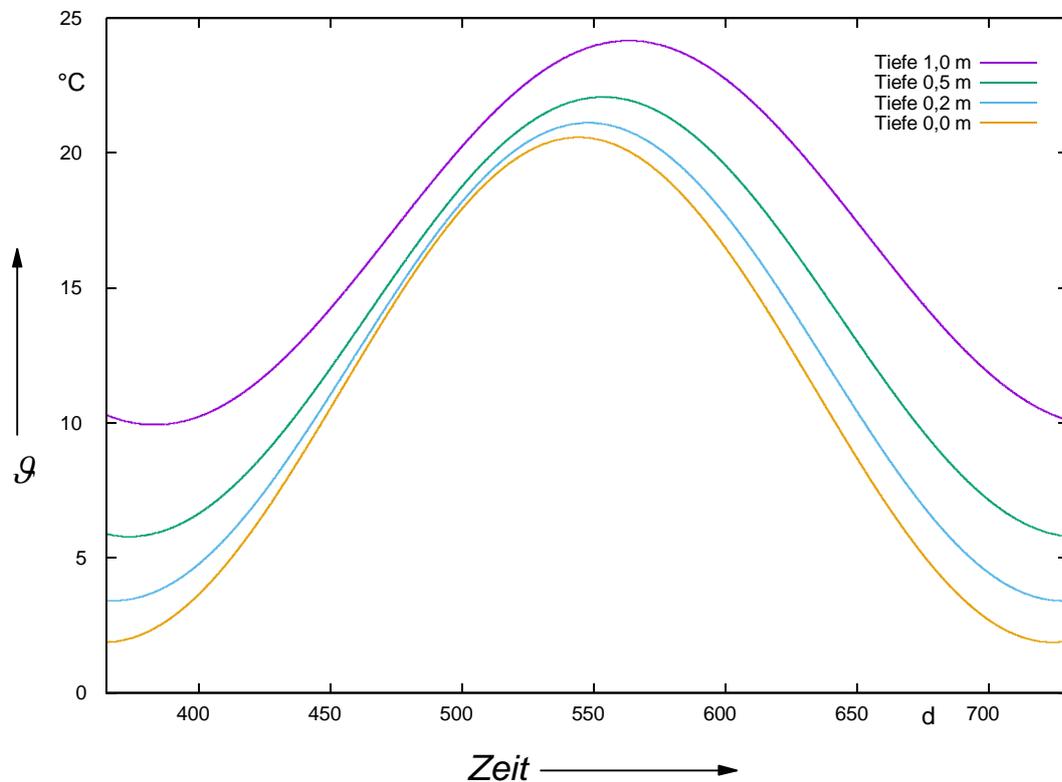


Abb. 35: Temperaturverteilung im sandigen Boden mit Kabelanlage, dynamische Last

Tiefe und Ort/ m	0,0/ 6,75	0,2/ 6,68	0,5/ 6,61	1,0/ 6,53
Temperatur /°C	1,9 – 20,6	3,4 – 21,1	5,8 - 22,1	9,9 - 24,2
Schwankung / K	18,7	17,7	16,3	14,3
Tag der max. Bodentemperatur	544,2	547,9	553,5	562,9

Tab. 11: Temperaturschwankungen in diversen Tiefen im sandigen Boden mit Kabelanlage, dynamische Last

Die Temperaturen des Bodens mit Kabelanlage und dynamischer Last werden ebenfalls mit den Temperaturen des ungestörten Erdreichs in Tab. 8 verglichen: Auch hier ergeben sich unveränderte Temperaturschwankungsbreiten, die Kabelanlage verstärkt also nicht die jahreszeitlichen Temperaturschwankungen.

Die folgende Tabelle zeigt die über das Jahr konstante Erwärmungen bei dynamischer Last:

Tiefe und Ort/ m	0,0/ 6,75	0,2/ 6,68	0,5/ 6,61	1,0/ 6,53
Ungestörte Temperatur /°C	0,6 – 19,4	1,1 - 18,9	1,8 – 18,2	2,9 – 17,1
Temperatur bei dyn. Last /°C	1,9 – 20,6	3,4 – 21,1	5,8 - 22,1	9,9 - 24,2
Erwärmung/ K	1,3	2,3	4,0	7,1

Tab. 12: Vergleich der Temperaturen des ungestörten Bodens und mit Kabelanlage bei dynamischer Last, sandiger Boden

Im Vergleich zeigen die Ergebnisse der Zwei-Jahres-Simulationen eine hervorragende Übereinstimmung mit den stationären und den Drei-Tages-Simulationen (siehe Tab. 6 und Tab. 7). Es konnte nachgewiesen werden, dass die Kabelanlage die natürliche Schwankungsbreite der Temperaturen im Boden nicht beeinflusst. Es findet eine saisonunabhängige Anhebung der Bodentemperatur an, die für den sandigen Boden bei mittlerer Belastung bei 2,3 K (in 0,2 m Tiefe) und 4,0 K (in 0,5 m Tiefe) liegt.

5.2 Lehmiger Boden

In diesem Abschnitt wird das Bodenprofil „lehmiger Boden“ untersucht. Die Vorgehensweise ist identisch zur Vorgehensweise beim sandigen Boden, weshalb hier die Ausführungen kürzer gefasst sind. Das FEM-Gesamtmodell entspricht, bis auf die Bodenschichtung, dem in Abb. 21, weshalb hier direkt eine Ausschnittvergrößerung gezeigt wird, in der die Bodenschichtung des lehmigen Bodens zu erkennen ist.

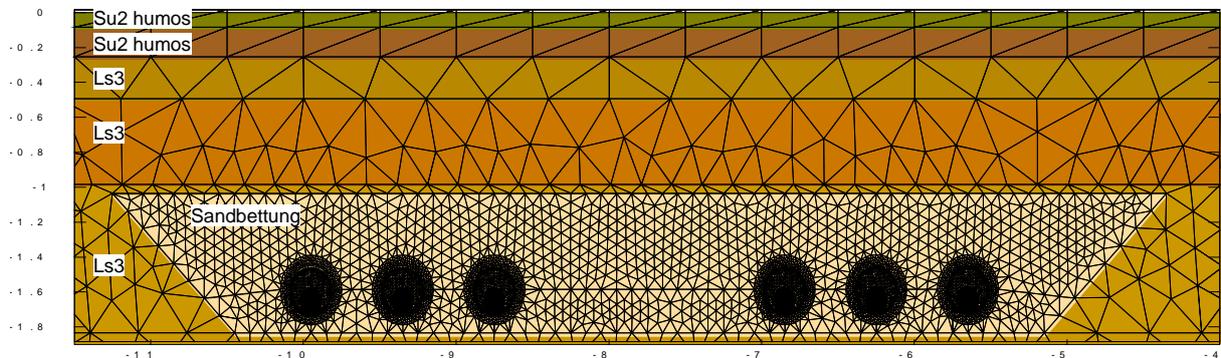


Abb. 36: Finite-Elemente-Modell, Ausschnitt im Bereich der Kabelanlage und der Bodenschichten, lehmiger Boden (vergleiche Abb. 9)

5.2.1 Mittlere Erwärmungen bei dynamischer Last und thermischer Grenzlast

Zur quantitativen Auswertung werden wieder waagerechte Linienabtastungen in Tiefen von 0,2 m, 0,5 und 1,0 m durch das Modell gelegt, um die Erwärmungen in unterschiedlichen Erdschichten zu bestimmen. Ebenfalls werden wieder die maximalen Leitertemperaturen ermittelt.

Die Geometrie der Trasse ist identisch zu der beim sandigen Boden: Der Ort 0,0 m stellt die Achse der Doppeltrasse dar, die Kabeladern befinden sich in horizontalen Entfernungen von $\pm 5,65$ m, $\pm 6,25$ m, $\pm 6,85$ m, $\pm 8,75$ m, $\pm 9,35$ m und $\pm 9,95$ m zur Trassenachse. Die PE-Rohre befinden sich in einer Tiefe von 1,60 m.

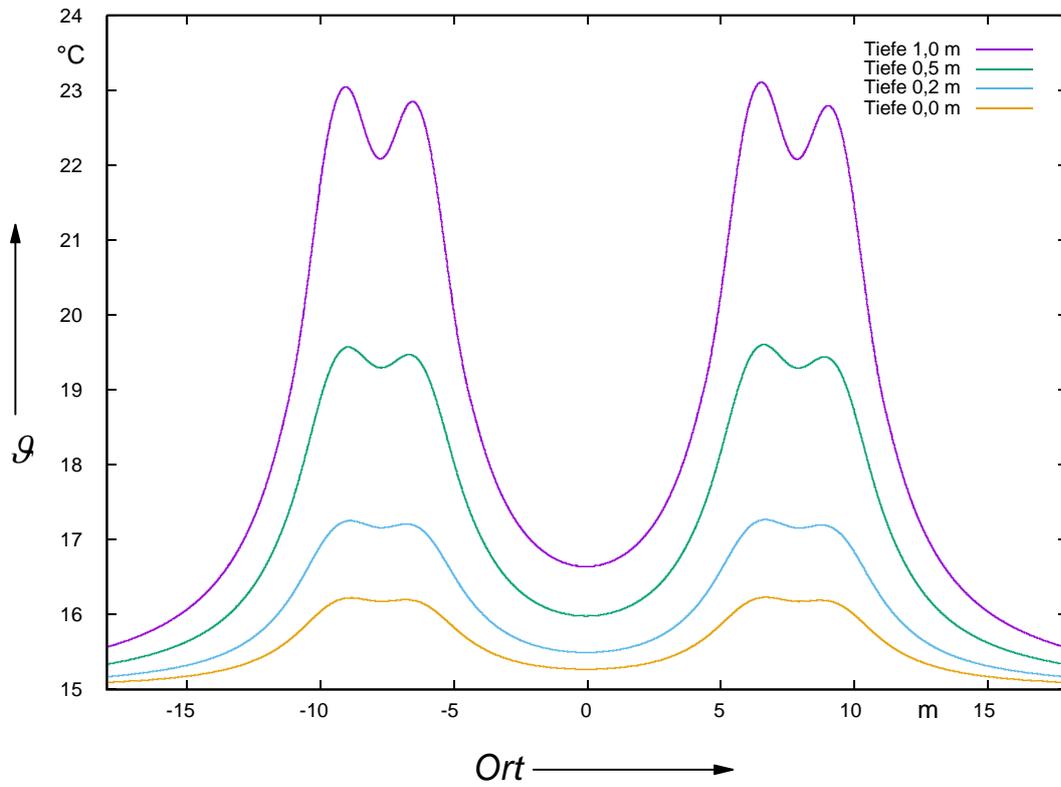


Abb. 37: Temperaturabastungen an der GOK, in 0,2 m 0,5 m und 1,0 m Tiefe im lehmigen Boden, $I = 2333 \text{ A}$

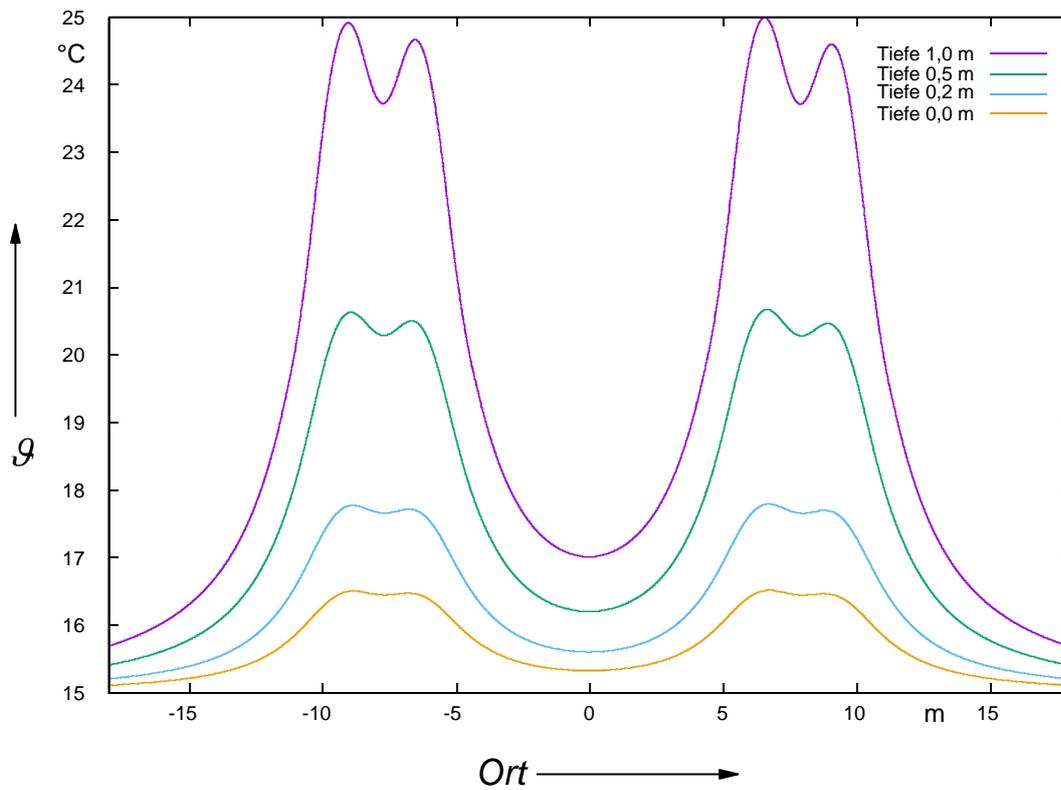


Abb. 38: Temperaturabastungen an der GOK, in 0,2 m 0,5 m und 1,0 m Tiefe im lehmigen Boden, $I = 2625 \text{ A}$

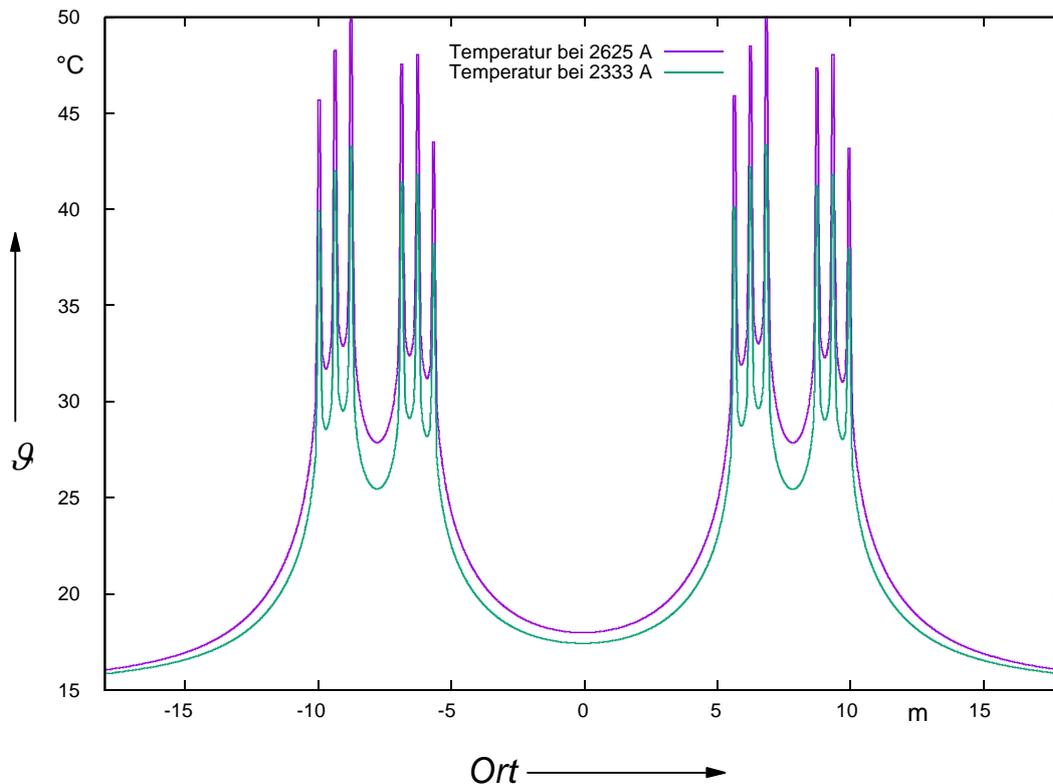


Abb. 39: Temperaturabtastungen durch die Leiterachsen, lehmiger Boden, $I = 2333 \text{ A}$ und 2625 A

Die maximalen Leitertemperaturen betragen $43,3 \text{ °C}$ bei 2333 A und $50,0 \text{ °C}$ bei 2625 A . Die Leitertemperaturen liegen im Vergleich zum sandigen Boden um rund ein Kelvin höher, was auf die etwas geringere Wärmeleitfähigkeiten von $1,48 \text{ W/(m K)}$ und $1,92 \text{ W/(m K)}$ der darüber liegenden Lehmschichten zurückzuführen ist. Im Vergleich: Die Wärmeleitfähigkeiten der Sandschichten betragen $2,16 \text{ W/(m K)}$ und $2,22 \text{ W/(m K)}$.

Auch für den lehmigen Boden ist aus technischer Sicht die Kabelanlage thermisch deutlich überdimensioniert. Entsprechend gering sind die thermischen Emissionen. Aufgrund der geringen thermischen Emissionen wird auch beim lehmigen Boden bei beiden Belastungen in der Kabelumgebung die Grenztemperatur für Bodenaustrocknung von $36,67 \text{ °C}$ nicht erreicht, es bildet sich keine Bodenaustrocknungszone aus. Die folgende Abbildung zeigt, dass alle Schichten die Wärmeleitfähigkeit bei Feldkapazität aufweisen:

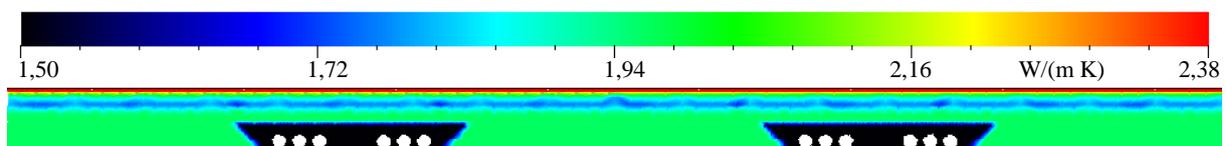


Abb. 40: Wärmeleitfähigkeiten des Sandbetts und der Bodenschichten, lehmiger Boden, $I = 2625 \text{ A}$

Die folgende Tabelle fasst die maximalen Temperaturen, Erwärmungen und die Orte der Temperaturmaxima zusammen. Die Erwärmung (Temperatur abzüglich Umgebungstemperatur von 15 °C) ist in Kelvin angeben:

Tiefe	0,0 m	0,2 m	0,5 m	1,0 m	L33
Dyn. Last Temp. / Erwärmung	16,2 °C/ 1,2 K	17,3 °C/ 2,3 K	19,6 °C/ 4,6 K	23,1 °C/ 8,1 K	43,3 °C
Grenzl原因 Temp. / Erwärmung	16,5 °C/ 1,5 K	17,8 °C/ 2,8 K	20,7 °C/ 5,7 K	25,0 °C/ 10,0 K	50,0 °C
Ort	6,73 m	6,69 m	6,62 m	6,53 m	6,85 m

Tab. 13: Maximale Temperaturen (°C) und Erwärmungen (K) im lehmigen Boden, stationäre Berechnung

Vergleicht man die obige Tabelle für den lehmigen Boden mit der Tab. 6 des sandigen Bodens, fällt auf, dass die Temperaturen bei 0,0 m und 0,2 m Tiefe unterhalb denen des Sandbodens liegen und ab 0,5 m Tiefe oberhalb denen des Sandbodens. Dies liegt an der relativ schlecht wärmeleitfähigen Lehmschicht zwischen 0,271 m und 0,51 m Tiefe (blaue Bodenschicht in Abb. 40), die den Wärmeübergang in Richtung GOK im Vergleich zum Sandboden verschlechtert.

5.2.2 Zyklische Belastungen

Auch für den lehmigen Boden wurden die Kabel wieder mit den Tageslastzyklen nach Abb. 4 und Abb. 5 belastet. Die Leitertemperatur wird wieder für die wärmste Ader L33 gezeigt. In den darüber liegenden Tiefen werden die Orte der Temperaturmaxima aus Tab. 13 abgetastet.

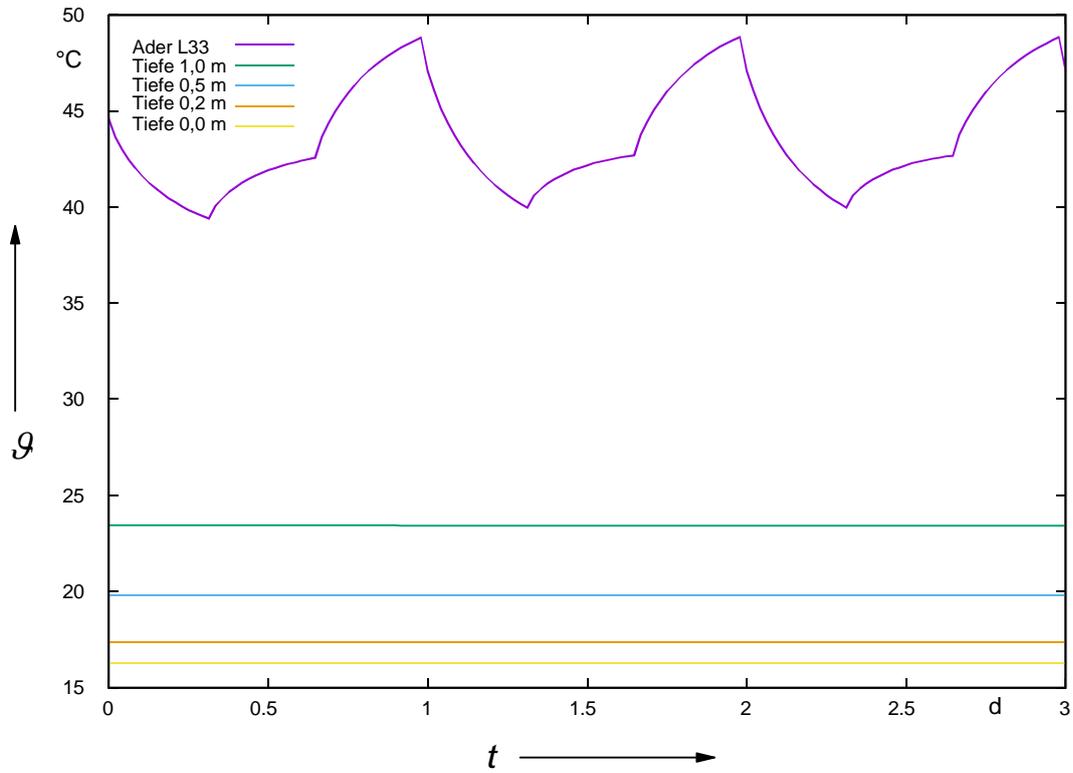


Abb. 41: Verlauf der Temperatur im Leiter L33 und in diversen Tiefen bei dynamischer Last, lehmiger Boden

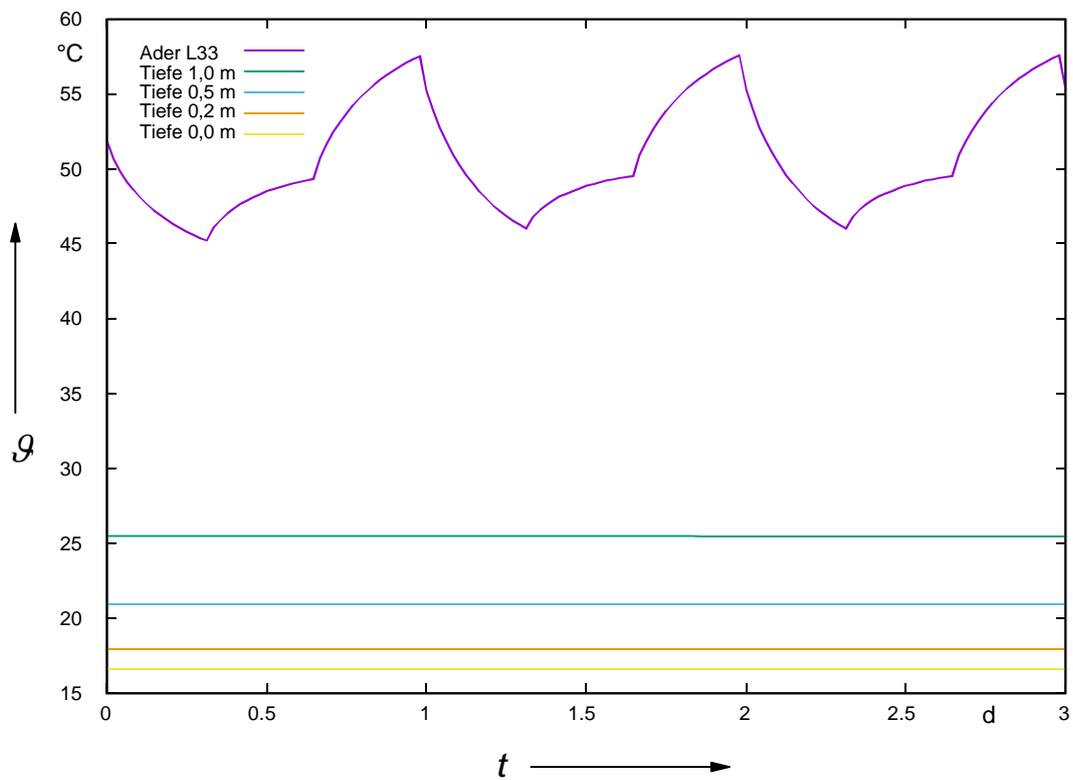


Abb. 42: Verlauf der Temperatur im Leiter L33 und in diversen Tiefen bei Grenzlast, lehmiger Boden

Auch hier ist eine schwankende Temperatur nur im Leiter und in der Sandbettung erkennbar. Bei dynamischer Belastung schwankt die Leitertemperatur um den stationären Arbeitspunkt von 44,6 °C mit einer Amplitude von 4,2 K und erreicht somit temporäre Spitzen von 48,8 °C bei dynamischer Last.

Bei thermischer Grenzlast schwankt die Temperatur hier um den stationären Arbeitspunkt von 51,9 °C mit einer Amplitude von 5,7 K und erreicht temporäre Spitzen von 57,6 °C.

Bereits in einer Tiefe von 1,0 m unterhalb der GOK ist keine zeitliche Temperaturschwankung mehr erkennbar. Auch hier glätten die großen Wärmekapazitäten des lehmigen Erdreichs den Temperaturverlauf, so dass die Wurzeln einer Bepflanzung oberhalb der Kabelanlage keiner durch Tageslastzyklen bedingten Temperaturschwankung ausgesetzt sind. Die folgende Tabelle fasst die wichtigsten Ergebnisse der transienten Berechnung zusammen:

Tiefe	0,0 m	0,2 m	0,5 m	1,0 m	L33
Dyn. Last Temp. / Erwärmung	16,3 °C/ 1,3 K	17,4 °C/ 2,4 K	19,8 °C/ 4,8 K	23,5 °C/ 8,5 K	40,0 °C- 48,8 °C
Grenzlast Temp. / Erwärmung	16,6 °C/ 1,6 K	17,9 °C/ 2,9 K	20,9 °C/ 5,9 K	25,4 °C/ 10,4 K	46,0 °C- 57,6 °C
Ort	6,73 m	6,69 m	6,62 m	6,53 m	6,85 m

Tab. 14: Maximale Temperaturen (°C) und Erwärmungen (K) im lehmigen Boden, transiente Berechnung

5.2.3 Temperaturen der Kabelanlage bei saisonalen Schwankungen

Auch für den lehmigen Boden wurden Zwei-Jahres-Simulationen durchgeführt, um den Einfluss der Kabelanlage vor dem Hintergrund saisonal schwankender Bodentemperaturen zu erfassen.

Zunächst wurden wieder die Temperaturen im lehmigen Boden ohne Kabelanlage mit Hilfe einer zeit aufgelösten Finite-Elemente-Simulation über eine Zeitdauer von zwei Jahren berechnet. Das zweite Jahr wurde wieder als eingeschwungener Zustand ausgewertet.

Die folgende Abbildung zeigt die berechneten Temperaturverläufe in diversen Tiefen im thermisch ungestörten lehmigen Boden:

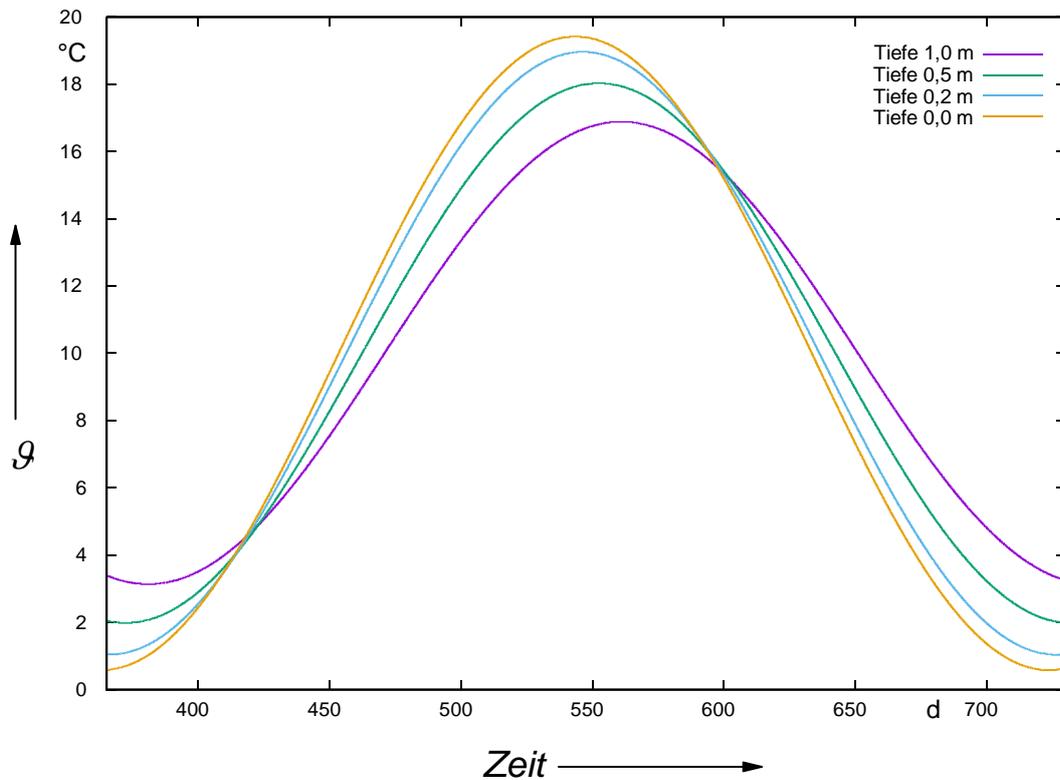


Abb. 43: Temperaturverläufe in diversen Tiefen im thermisch ungestörten lehmigen Boden

Die Geländeoberkante weist Temperaturen von 0,58 °C bis 19,42 °C auf, die mit 0,04 K kaum vom Sandboden abweichen. Die folgende Tabelle zeigt die Temperaturen und die Schwankungsbreite in diversen Tiefen des lehmigen, thermisch ungestörten Bodens:

Tiefe / m	0,0	0,2	0,5	1,0
Temperatur / °C	0,6 – 19,4	1,0 – 19,0	2,0 – 18,0	3,1 – 16,9
Schwankung / K	18,8	18,0	16,0	13,8
Tag der max. Bodentemperatur	543,3	546,2	552,3	560,8

Tab. 15: Temperaturschwankungen in diversen Tiefen im thermisch ungestörten lehmigen Boden

Während die maximale Bodentemperatur an der GOK am Tag 543 erreicht wird, wird das Maximum in einer Tiefe von 1,0 m erst am Tag 561 erreicht, also um 18 Tage verzögert. Die Temperaturschwankung nimmt von der GOK bis zur Tiefe von 1,0 m um 5,0 Kelvin ab.

Insgesamt unterscheiden sich die Temperaturprofile und -schwankungen des lehmigen Bodens nur geringfügig von denen des sandigen Bodens. Die folgende Abbildung zeigt die Sommer- und Winterprofile beider Böden im Vergleich:

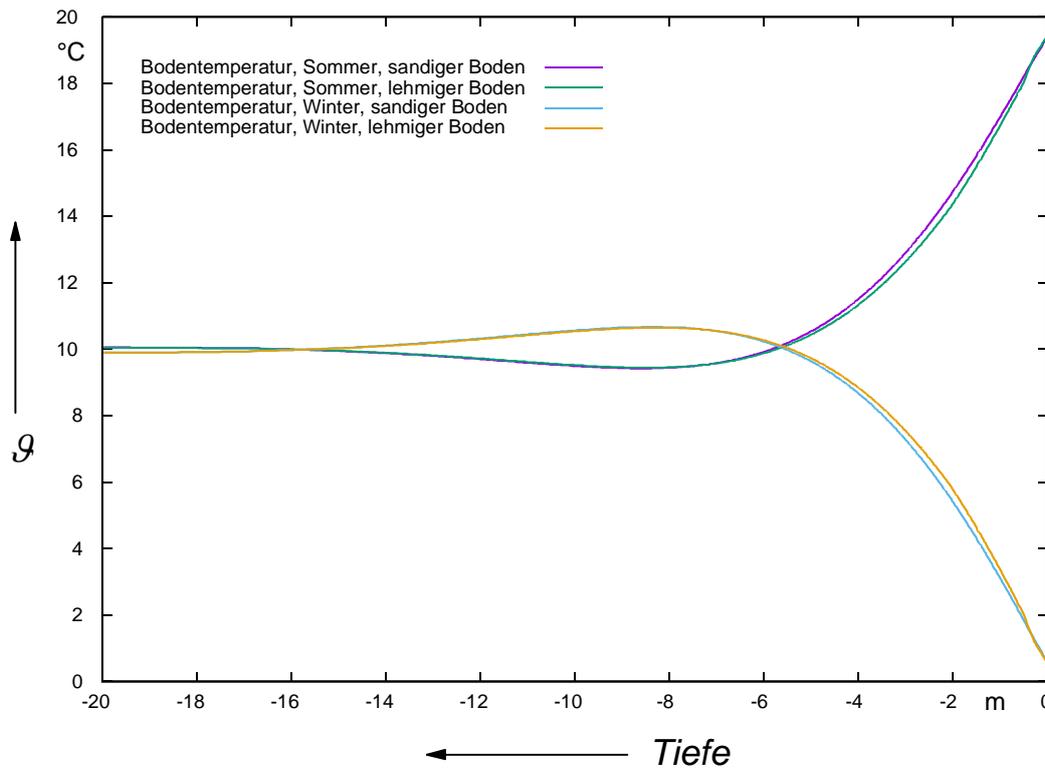


Abb. 44: Temperaturverteilung in Abhängigkeit der Tiefe, Vergleich lehmiger und sandiger Boden

Nun wird die Zwei-Jahres-Simulation mit Kabelanlage wiederholt. Das Modell mit Kabelanlage ist in Abb. 36 zu sehen.

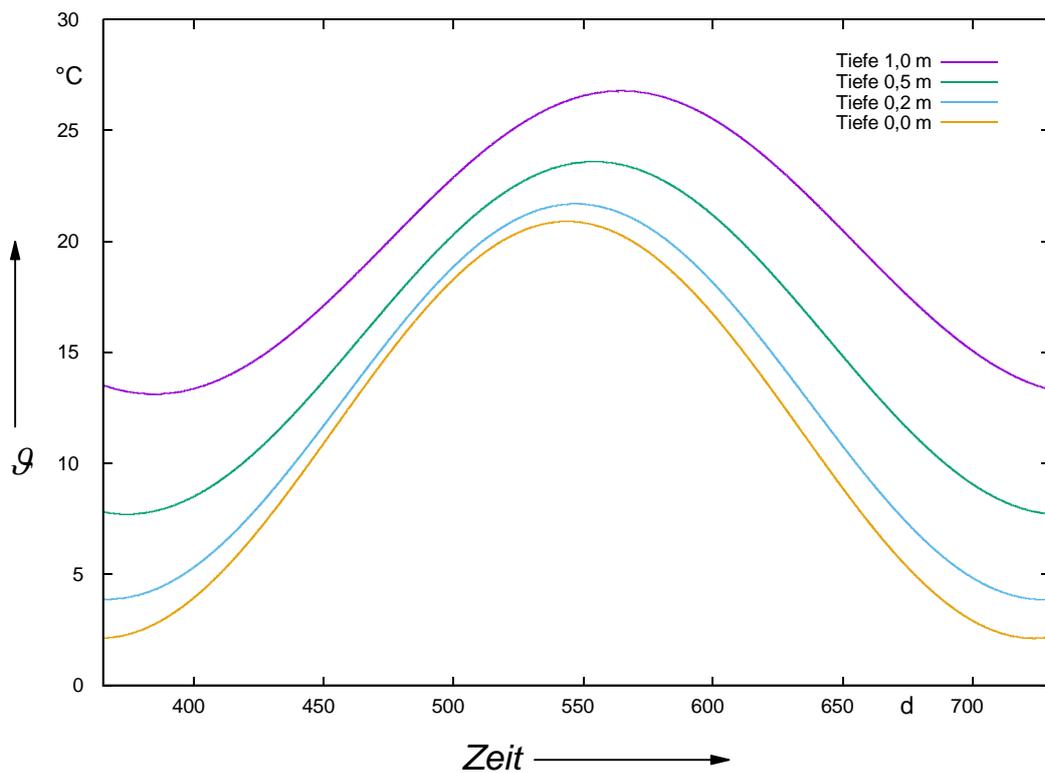


Abb. 45: Temperaturverteilung im lehmigen Boden mit Kabelanlage, thermische Grenzlast

Verwendet werden wieder ausschließlich die Temperaturverläufe im zweiten Jahr. Als Orte der Temperaturabtastungen werden die Orte der maximalen Erwärmung aus Tab. 13 bzw. Tab. 14 gewählt.

Tiefe und Ort/ m	0,0/ 6,73	0,2/ 6,69	0,5/ 6,62	1,0/ 6,53
Temperatur / °C	2,1 - 20,9	3,9 - 21,7	7,7 - 23,6	13,1 - 26,8
Schwankung / K	18,8	17,8	15,9	13,7
Tag der max. Bodentemperatur	543,7	547,0	554,1	564,8

Tab. 16: Temperaturschwankungen in diversen Tiefen im lehmigen Boden mit Kabelanlage, thermische Grenzlast

Die Temperaturen des Bodens mit Kabelanlage in Tab. 16 werden mit den Temperaturen des ungestörten lehmigen Bodens in Tab. 15 verglichen: Auch hier sieht man, dass die Kabelanlage die jahreszeitlichen Temperaturschwankungen (Zeile 3 in beiden Tabellen) nicht verstärkt. Zum Beispiel ist die Schwankungsbreite in 0,5 m Tiefe 16 Kelvin sowohl im ungestörten Erdreich als auch bei Vorhandensein der Kabelanlage. Auch hier liegen die Rundungungenauigkeiten bei 0,1 Kelvin.

Die Kabelanlage hebt den Temperaturverlauf im ungestörten Boden um die Erwärmung gleichmäßig an.

Tiefe und Ort/ m	0,0/ 6,73	0,2/ 6,69	0,5/ 6,62	1,0/ 6,53
Ungestörte Temperatur / °C	0,6 - 19,4	1,0 - 19,0	2,0 - 18,0	3,1 - 16,9
Temperatur bei therm. Grenzlast / °C	2,1 - 20,9	3,9 - 21,7	7,7 - 23,6	13,1 - 26,8
Erwärmung / K	1,5	2,7	5,7	10,0

Tab. 17: Vergleich der Temperaturen des ungestörten Bodens und mit Kabelanlage bei thermischer Grenzlast, lehmiger Boden

Die folgenden Ergebnisse für die dynamische Last dürften am ehesten den zu erwartenden Erwärmungen im Boden entsprechen.

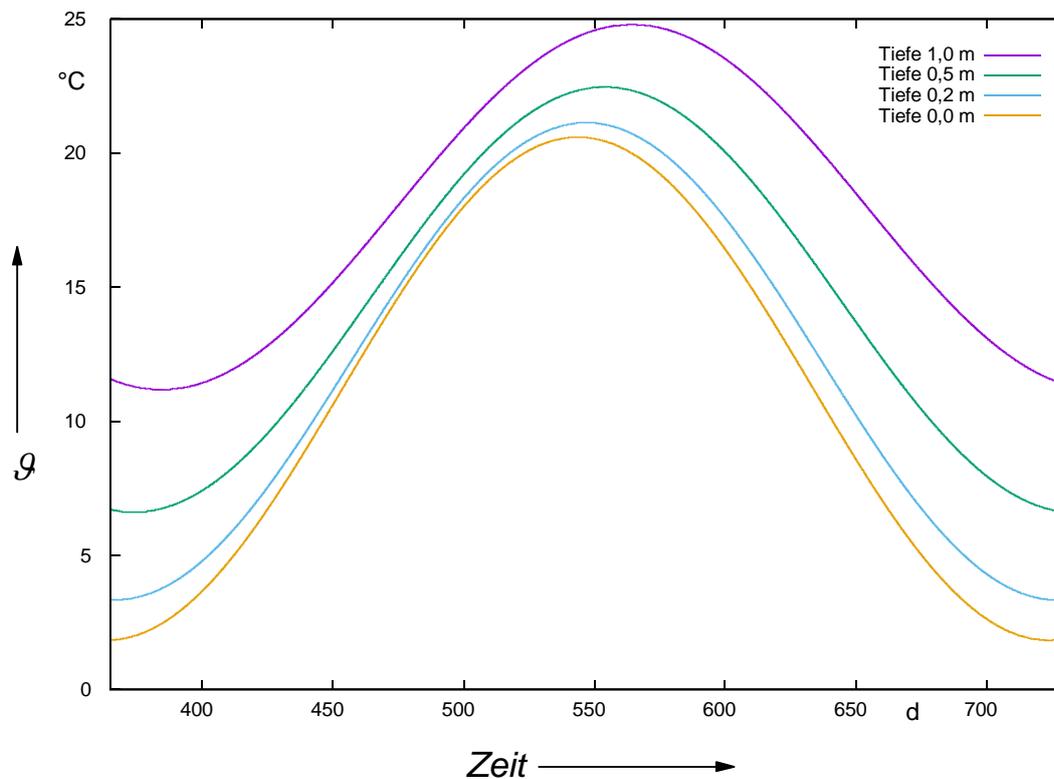


Abb. 46: Temperaturverteilung im lehmigen Boden mit Kabelanlage, dynamische Last

Tiefe und Ort/ m	0,0/ 6,73	0,2/ 6,69	0,5/ 6,62	1,0/ 6,53
Temperatur /°C	1,8 – 20,6	3,3 – 21,1	6,6 – 22,5	11,2 – 24,8
Schwankung / K	18,8	17,8	15,9	13,6
Tag der max. Bodentemperatur	543,7	546,9	554,1	564,8

Tab. 18: Temperaturschwankungen in diversen Tiefen im lehmigen Boden mit Kabelanlage, dynamische Last

Die Temperaturen des Bodens mit Kabelanlage und dynamischer Last werden ebenfalls mit den Temperaturen des ungestörten Erdreichs verglichen: Auch hier ergeben sich unveränderte Temperaturschwankungsbreiten, die Kabelanlage verstärkt also nicht die jahreszeitlichen Temperaturschwankungen. Die folgende Tabelle zeigt die über das Jahr konstante Erwärmung bei dynamischer Last:

Tiefe und Ort/ m	0,0/ 6,75	0,2/ 6,68	0,5/ 6,61	1,0/ 6,53
Ungestörte Temperatur / °C	0,6 – 19,4	1,0 – 19,0	2,0 – 18,0	3,1 – 16,9
Temperatur bei dyn. Last / °C	1,8 – 20,6	3,3 – 21,1	6,6 – 22,5	11,2 – 24,8
Erwärmung/ K	1,2	2,3	4,6	8,1

Tab. 19: Vergleich der Temperaturen des ungestörten Bodens und mit Kabelanlage bei dynamischer Last, lehmiger Boden

Im Vergleich zeigen die Ergebnisse der Zwei-Jahres-Simulationen eine hervorragende Übereinstimmung mit den stationären und den Drei-Tages-Simulationen (siehe Tab. 13 und Tab. 14). Auch für den lehmigen Boden konnte nachgewiesen werden, dass die Kabelanlage die natürliche Schwankungsbreite der Temperaturen im Boden nicht beeinflusst. Es findet eine saisonunabhängige Anhebung der Bodentemperatur an, die für den lehmigen Boden bei mittlerer Belastung bei 2,3 K (in 0,2 m Tiefe) und 4,6 K (in 0,5 m Tiefe) liegt.

5.3 Moorboden

In diesem Abschnitt wird das zusätzlich mit in die Studie aufgenommene Bodenprofil „Moorboden“ untersucht. Es handelt sich um Niedermoor auf Sand, wie es in der Pinnauniederung vorkommt.

In einem Tiefenbereich von 1,0 m bis 2,0 m befindet sich eine Grundwasserströmung. Hier fließt das Grundwasser mit einer Geschwindigkeit von ca. 0,5 m/d bis 1,0 m/d. Der kühlende Einfluss von Grundwasserströmungen wird bei Kabelbelastbarkeitsberechnungen in der Regel vernachlässigt. Daher wird hier der Einfluss der Grundwasserströmung ermittelt:

Die PE-Rohre liegen mit einer Legetiefe von 1,6 m in der 1,0 Meter mächtigen Grundwasserströmung (Tiefenbereich von 1,0 m bis 2,0 m). Thermodynamisch handelt es sich somit um ein quer angeströmtes Rohr. Die Gleichungen zur Berechnung der Wärmeübergangszahl sind in [VDI2013] zu finden. Die charakteristische Überströmungslänge beträgt:

$$L = \pi \cdot \frac{d_{a, \text{PE-Rohr}}}{2} = 0,44 \text{ m} \quad (5.1)$$

Die Reynoldszahl berechnet sich zu:

$$\text{Re} = \frac{v \cdot \rho \cdot \lambda}{\eta} = 1,312 \quad (5.2)$$

Mit der Geschwindigkeit v , dem spezifischen Gewicht ρ , der Wärmeleitfähigkeit des ruhenden Wassers λ und der Viskosität η . Aufgrund der kleinen Reynoldszahl handelt es sich um eine lamina-re Strömung.

Die Prandtl-Zahl, die dimensionslose Kennzahl für die Stoffwerte, kann [VDI2013] entnommen werden und ergibt sich für eine Wassertemperatur von 12 °C zu:

$$\text{Pr} = 8,876 \quad (5.3)$$

Es wurde in Absprache mit Herrn Prof. Wessolek eine Grundwassertemperatur zu 12 °C angenommen. Die Nusseltzahl bestimmt sich zu:

$$\text{Nu}_{\text{Lam}} = 0,664 \cdot \sqrt[3]{\text{Pr}} \cdot \sqrt[2]{\text{Re}} = 2,973 \quad (5.4)$$

Daraus ergibt sich eine Wärmeübergangszahl von:

$$\alpha = \frac{\text{Nu}_{\text{Lam}} \cdot \lambda}{d_{\text{a,PE-Rohr}}} = 3,94 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K}) \quad (5.5)$$

Dies ist die Wärmeübergangszahl für ein Rohr, was vollständig in einem strömenden Fluid liegt. Da hier der Volumenanteil des Fluids nur bei 16 % liegt, wurde der effektive Wärmeübergangskoeffizient abgeschätzt zu

$$\alpha_{\text{eff}} = 0,16 \cdot 3,94 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K}) = 0,63 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K}) \quad (5.6)$$

Dieser Wärmeübergangskoeffizient wird als ringförmiger Cauchy-Randwert um die PE-Rohre gelegt und sorgt so, neben der Wärmeleitung durch das feuchte Erdreich, für den zusätzlichen konvektiven Wärmeübergang aufgrund der Grundwasserströmung.

Zum Vergleich wurde die Anordnung ohne die zusätzlichen Randwerte für ruhendes Grundwasser berechnet, um den Einfluss der Strömung zu ermitteln. Die restliche Vorgehensweise ist identisch zu den anderen Böden.

Die folgende Abbildung zeigt eine Ausschnittvergrößerung des FEM-Modells, in der die Bodenschichtung zu erkennen ist. Die Kabelanlage liegt hier im tragfähigen Sand (fSms); die Torschichten darüber.

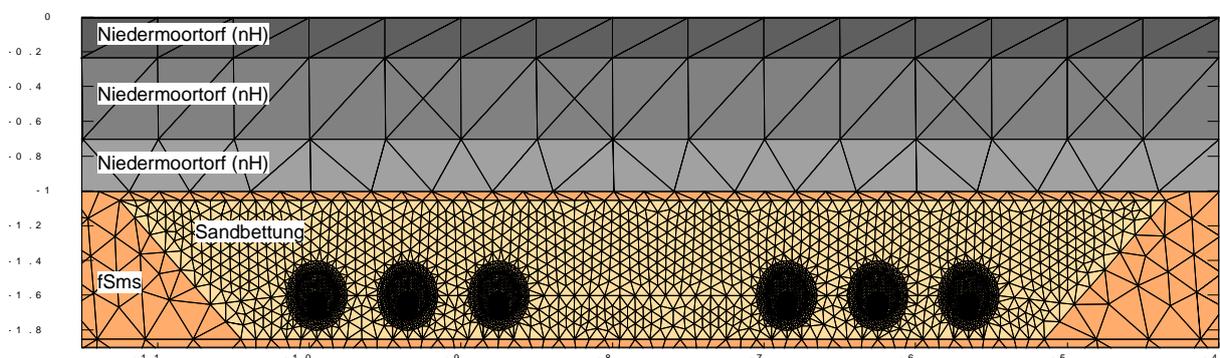


Abb. 47: Finite-Elemente-Modell, Ausschnitt im Bereich der Kabelanlage und der Bodenschichten, Moorboden (vergleiche Abb. 10)

Aufgrund des Grundwasservorkommens wurde ab einer Tiefe von 1,0 m keine Bodenaustrocknung angenommen.

5.3.1 Mittlere Erwärmungen bei dynamischer Last und thermischer Grenzlast

Zur quantitativen Auswertung werden wieder waagerechte Linienabtastungen in Tiefen von 0,2 m, 0,5 und 1,0 m durch das Modell gelegt, um die Erwärmungen in unterschiedlichen Erdschichten zu bestimmen. Ebenfalls werden wieder die maximalen Leitertemperaturen ermittelt.

Die Geometrie der Trasse ist identisch zu den anderen Böden: Der Ort 0,0 m stellt wieder die Achse der Doppeltrasse dar. Zunächst wurden die Simulationsergebnisse ohne Grundwasserströmung gezeigt, um den Einfluss der Grundwasserströmung herauszustellen. Für die naturschutzfachliche Bewertung sind ausschließlich die Erwärmungen mit Grundwasserströmung ausschlaggebend.

Tiefe	0,0 m	0,2 m	0,5 m	1,0 m	L33
Dyn. Last	15,8 °C/ 0,8 K	20,0 °C/ 5,0 K	25,8 °C/ 10,8 K	35,2 °C/ 20,2 K	53,2 °C
Grenzlast	16,0 °C/ 1,0 K	21,0 °C/ 6,0 K	27,9 °C/ 12,9 K	40,6 °C/ 25,6 K	62,6 °C
Ort	6,75 m	6,70 m	6,64 m	6,55 m	6,85 m

Tab. 20: Maximale Temperaturen (°C) und Erwärmungen (K) im Moorboden ohne Grundwasserströmung, stationäre Berechnung

Die maximalen Leitertemperaturen betragen 53,3 °C bei 2333 A und 62,6 °C bei 2625 A. Die Leitertemperaturen liegen im Vergleich zu den anderen Böden um rund 10 Kelvin und damit deutlich höher, was auf die schlechten Wärmeleitfähigkeiten der oberhalb der Kabelanlage liegenden Torfschichten von unter 0,5 W/(m K) zurückzuführen ist. Die thermische Grenzlast sorgt für einen kleinen Austrocknungsbereich in der unteren Torfschicht senkrecht oberhalb der Kabel. Hier sinkt die Wärmeleitfähigkeit der Torfschichten lokal auf 0,3 W/(m K) (vergleiche Schicht 3 von -0,70 m bis -1,00 m in Abb. 10) ab:

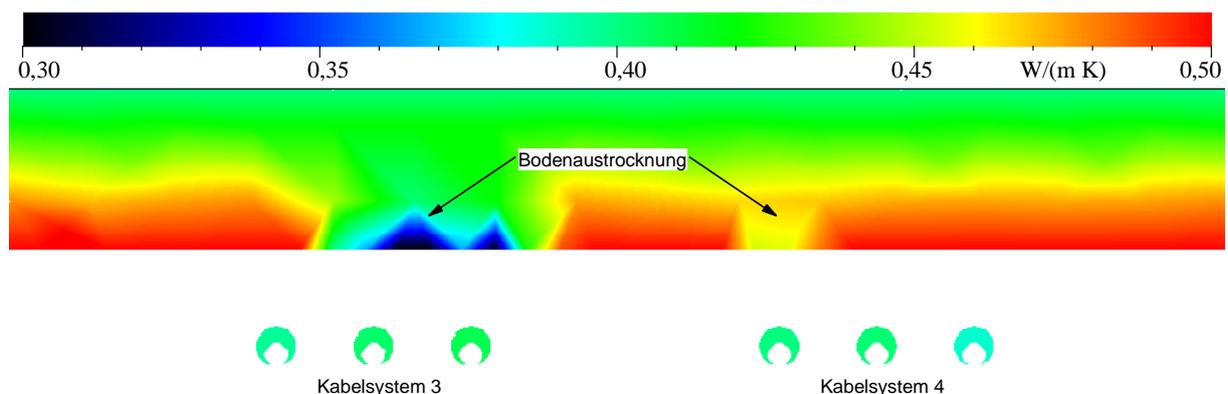


Abb. 48: Wärmeleitfähigkeiten des Sandbetts und der Bodenschichten, Moorboden ohne Grundwasserströmung, thermische Grenzlast

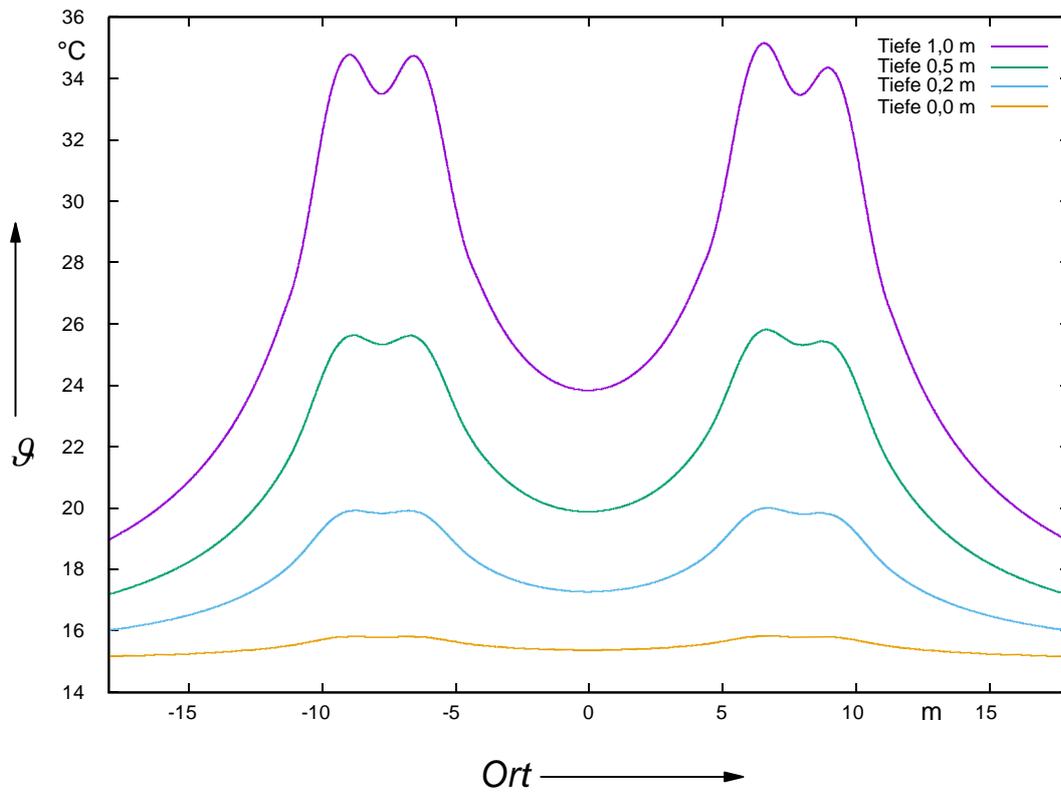


Abb. 49: Temperaturabastungen an der GOK, in 0,2m 0,5 m und 1,0 m Tiefe, Moorboden ohne Strömung, $I = 2333$ A

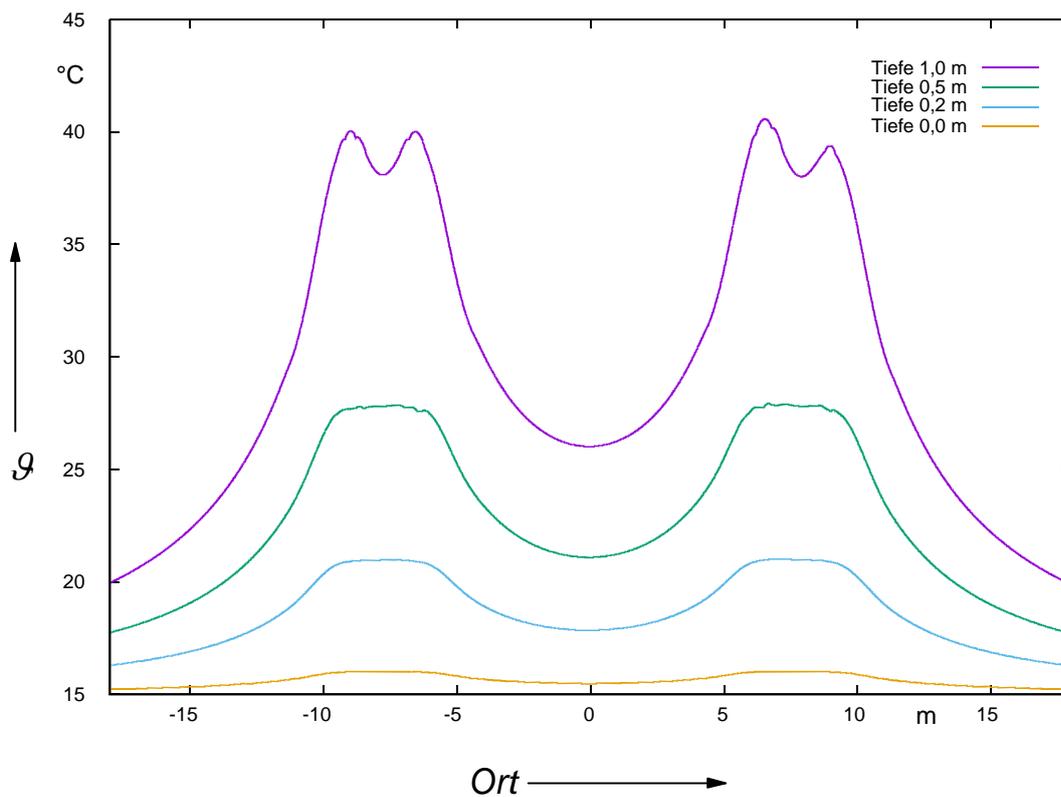


Abb. 50: Temperaturabastungen an der GOK, in 0,2m 0,5 m und 1,0m Tiefe im Moorboden ohne Strömung, $I = 2625$ A

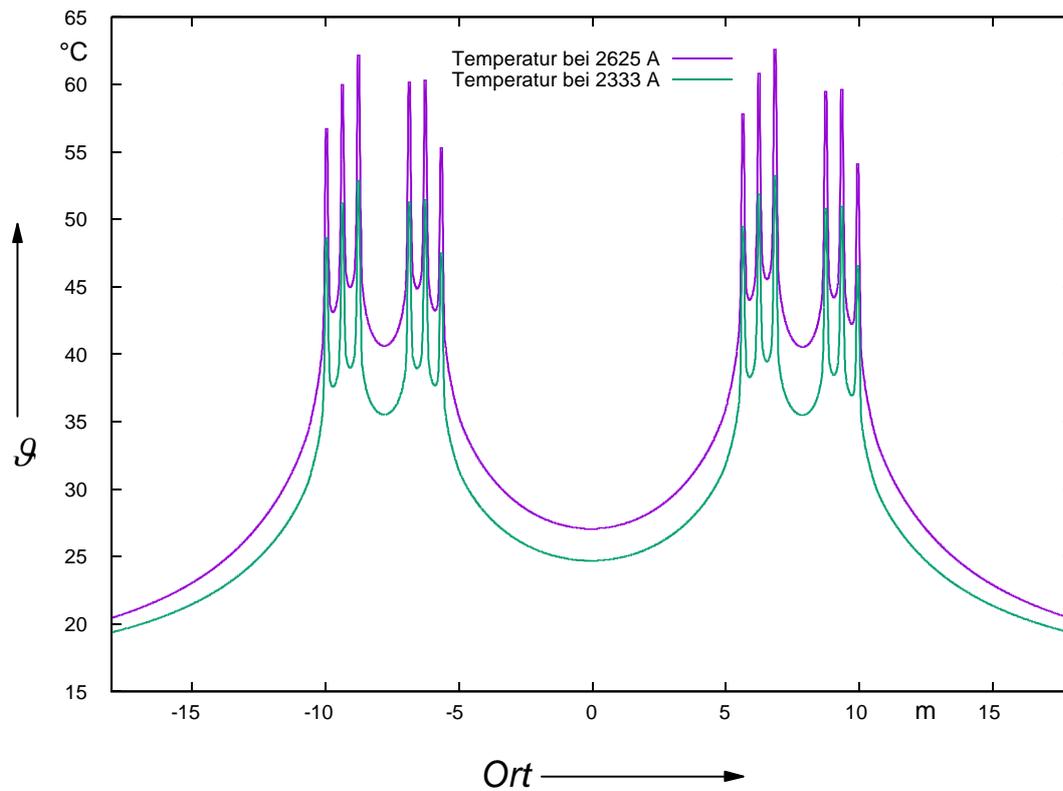


Abb. 51: Temperaturabtastungen durch die Leiterachsen, Moorboden ohne Strömung, $I = 2333$ A und 2625 A

Zum Vergleich werden schließlich die Temperaturabtastungen unter Berücksichtigung der Grundwasserströmung gezeigt. Zuerst die dynamische Belastung:

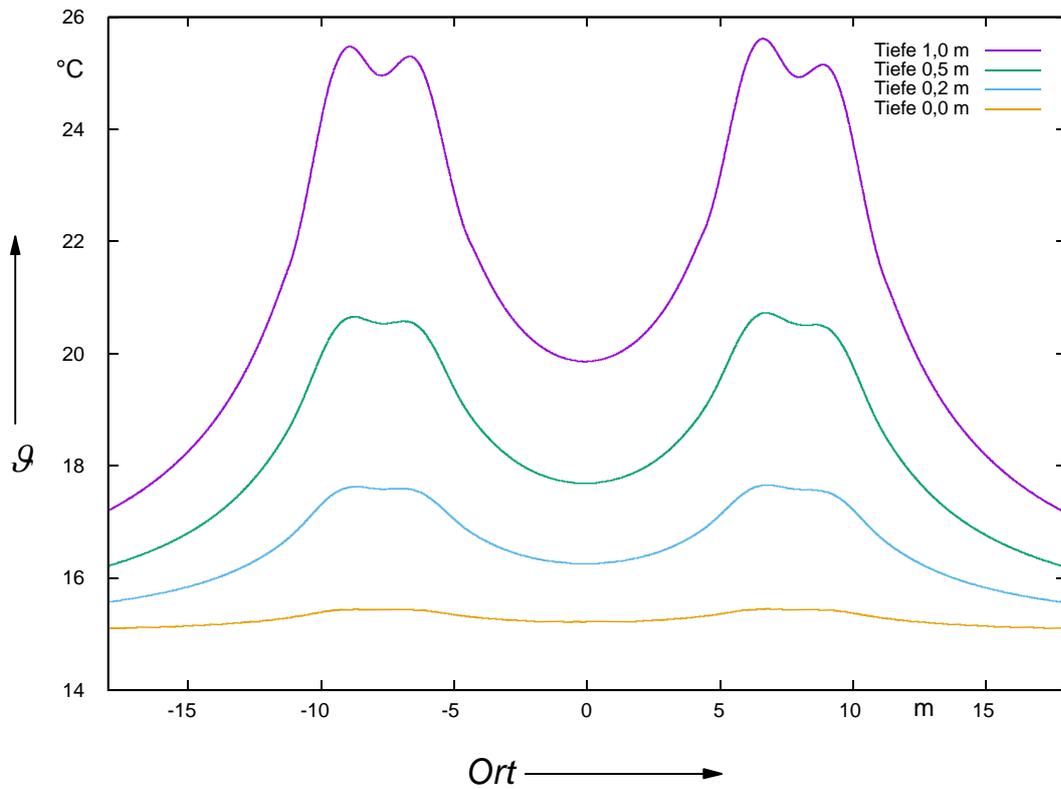


Abb. 52: Temperaturabastungen an der GOK, in 0,2 m 0,5 m und 1,0 m Tiefe, Moorboden mit Strömung, $I = 2333 \text{ A}$

Danach die thermische Grenzlast:

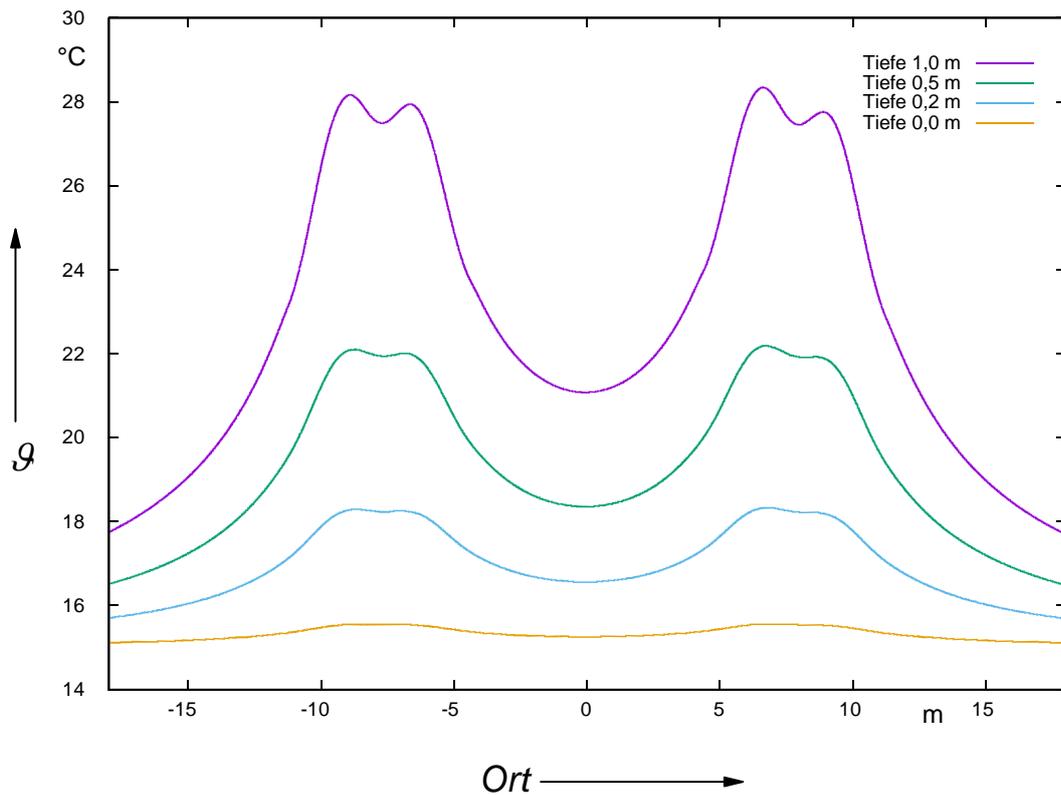


Abb. 53: Temperaturabastungen an der GOK, in 0,2 m 0,5 m und 1,0 m Tiefe im Moorboden mit Strömung, $I = 2625 \text{ A}$

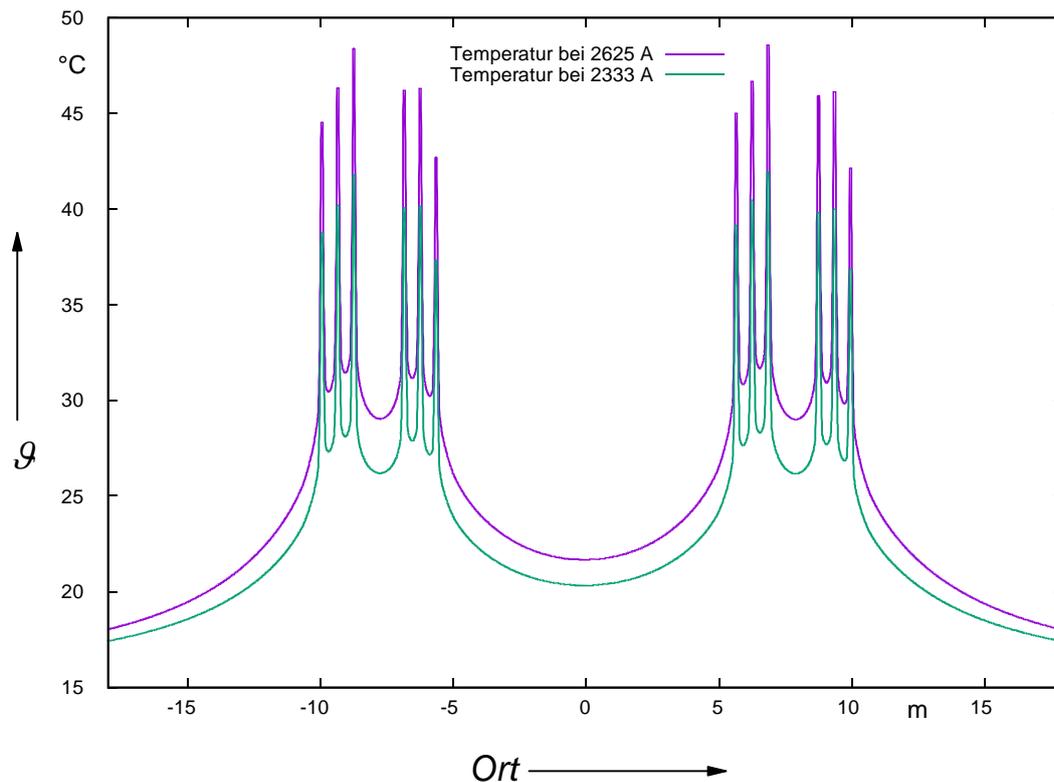


Abb. 54: Temperaturab tastungen durch die Leiterachsen, Moorboden mit Strömung, $I = 2333\text{ A}$ und 2625 A

Trotz der geringen Wärmeübergangszahl (bedingt durch die geringe Fließgeschwindigkeit) zeigt das fließende Grundwasser einen deutlich positiven Einfluss auf die Erwärmung der Kabelanlage.

Bei dynamischer Belastung sinkt die maximale Leitertemperatur um 11,3 Kelvin auf 41,9 °C. Bei thermischer Grenzlast sinkt sie um 14,1 K auf 48,5 °C, Bodenaustrocknung tritt bei Berücksichtigung der Grundwasserströmung nicht auf.

Die Ergebnisse machen deutlich, dass bei Vernachlässigung selbst langsam fließender Grundwasserströmungen die Kabelerwärmung deutlich überschätzt wird.

Auch für den schlecht wärmeleitfähigen Torfboden ist aus technischer Sicht die Kabelanlage thermisch überdimensioniert. Entsprechend gering sind in diesem ökologisch sensiblen Bereich die thermischen Emissionen. Feuchtigkeitsverlust durch wärmebedingte Bodenaustrocknung tritt nicht auf.

Die folgende Tabelle fasst die maximalen Temperaturen, Erwärmungen und die Orte der Temperaturmaxima bei Berücksichtigung der Grundwasserströmung zusammen. Die Erwärmung (Temperatur abzüglich Umgebungstemperatur von 15 °C) ist in Kelvin angeben:

Tiefe	0,0 m	0,2 m	0,5 m	1,0 m	L33
Dyn. Last	15,4 °C/ 1,4 K	17,7 °C/ 2,7 K	20,7 °C/ 5,7 K	25,6°C/ 15,6 K	41,9 °C
Grenzl原因	15,6 °C/ 1,6 K	18,3 °C/ 3,3 K	22,2 °C/ 7,2 K	28,3 °C/ 13,3 K	48,5 °C
Ort	6,79 m	6,78 m	6,70 m	6,62 m	6,85 m

Tab. 21: Maximale Temperaturen (°C) und Erwärmungen (K) im Moorboden mit Grundwasserströmung, stationäre Berechnung

Mit Berücksichtigung der Grundwasserströmung ergeben sich, trotz der schlechten Wärmeleitfähigkeiten der über der Kabelanlage liegenden Torfschichten, ähnlich positive Ergebnisse wie beim Sandboden (vergleiche Tab. 6).

5.3.2 Zyklische Belastungen

Die vorgehenden Berechnungen haben gezeigt, dass sich anhand stationärer Berechnungen die Erwärmungen im Boden mit einer Unsicherheit von weniger als 0,4 K (in 1,0 m Tiefe) bestimmen lassen. In Bodennähe liegt die Unsicherheit bei 0,2 K.

Temperaturschwankungen sind bei den anderen Böden selbst in 1,0 m Tiefe nicht festzustellen, da die Wärmekapazitäten die zeitlichen Schwankungen glätten. Der Moorboden weist noch deutlich größere spezifische Wärmekapazitäten auf als die anderen Böden (vergleiche Abb. 9 mit Abb. 7 und Abb. 8). Sowohl für den sandigen und den lehmigen Boden konnte nachgewiesen werden, dass die Kabelanlage zu einer zeitunabhängigen Erwärmung des Bodens führt und die saisonalen Temperaturschwankungen nicht verstärkt. Die anhand transients Berechnungen ermittelten Erwärmungen stimmen mit den stationär berechneten überein. Somit erübrigen sich an dieser Stelle weitere transiente Simulationen.

5.4 Abschließende Bemerkungen zu den Erwärmungen

Es wurden umfangreiche stationäre und transiente Erwärmungsberechnungen durchgeführt. Es konnte festgestellt werden, dass die Kabelanlage zu einem zeitunabhängigen Anheben der Temperaturverläufe führt und die saisonalen Temperaturschwankungen nicht verstärkt.

Die zu erwartenden Temperaturerhöhungen im Boden bei mittlerer Belastung werden in der folgenden Tabelle zusammengefasst. Es ist zu betonen, dass die angegebenen Temperaturerhöhungen Maximalwerte darstellen, die rechts und links schnell zu kleineren Temperaturen abfallen.

Tiefe/ Erwärmung bei mittlerer Last	0,0 m	0,2 m	0,5 m	1,0 m
sandiger Boden/ K	1,3	2,3	4,0	7,1
lehmiger Boden/ K	1,2	2,3	4,6	8,1
Moorboden/ K	1,4	2,7	5,7	15,6

Tab. 22: zu erwartenden Temperaturerhöhungen an den wärmsten Stellen im Boden bei mittlerer Belastung

Die maximal möglichen Temperaturerhöhungen im Boden bei thermischer Grenzlast werden in der folgenden Tabelle zusammengefasst:

Tiefe/ Erwärmung bei mittlerer Last	0,0 m	0,2 m	0,5 m	1,0 m
sandiger Boden/ K	1,6	2,9	4,9	8,8
lehmiger Boden/ K	1,5	2,7	5,7	10,0
Moorboden/ K	1,6	3,3	7,2	13,3

Tab. 23: maximal mögliche Temperaturerhöhungen an den wärmsten Stellen im Boden bei thermischer Grenzbelastung

5.4.1 Einfluss der Bodenerwärmung auf das Keimverhalten und das Pflanzenwachstum

Es stellt sich abschließend die Frage, inwieweit sich die in dieser Studie ermittelten Bodenerwärmungen auf den landwirtschaftlichen Ertrag auswirken. Insbesondere die Verschiebung des Keimzeitpunktes und die Geschwindigkeit des Pflanzenwachstums stehen im Fokus des Interesses.

Durch Vergleich der Kennlinien der Jahresbodentemperaturen ohne Kabelanlage und der Kennlinien mit Kabelanlage kann stundengenau das Erreichen des Keimzeitpunktes und natürlich auch die Verschiebung desselben abgelesen werden. Der weitere Verlauf der Bodentemperaturkennlinie mit saisonalen Schwankungen kann der Berechnung der Wachstumsdynamik zugrunde gelegt werden.

Es wurde dargelegt, dass

- die Kabelanlage einen über das Jahr gleichmäßigen Temperaturoffset der ungestörten Bodentemperaturkennlinien sorgt und
- die jahreszeitlich abhängigen Temperaturprofile nahezu unabhängig vom jeweiligen Modellboden sind.

Legt man diese Erkenntnisse zugrunde:

- können auch andere saisonale Temperaturkennlinien, als die her berechneten, durch Addition des jeweiligen Temperaturoffsets zugrunde gelegt werden. Somit ist es möglich, gemessene Temperaturkennlinien zu berücksichtigen.

- sind die Ergebnisse auch auf andere, ähnliche Böden übertragbar.

Die Auswirkungen der Bodenerwärmung auf das Keimverhalten und das Pflanzenwachstum werden auf der Grundlage der hier ermittelten Zusammenhänge im zweiten Teil dieser Studie umfassend untersucht.

6 Zusammenfassung

Die Übertragung der erzeugten Leistung aus erneuerbaren Energien erfordert den Netzausbau in Schleswig-Holstein. Die TenneT TSO GmbH (AG) plant den Neubau der 380-kV-Höchstspannungsleitung zwischen den Umspannwerken Kreis Segeberg, Lübeck, Siems und Göhl. Diese sogenannte 380-kV-Ostküstenleitung soll im Teilabschnitt Kreis Segeberg – Raum Lübeck zwei Erdkabelabschnitte, einen bei Henstedt-Ulzburg und einen in Kisdorferwohld aufweisen.

Das Amt für Planfeststellung Energie (AfPE) fordert im Rahmen des Vorhabens ein „*Gutachten zur thermischen Berechnung von Wärmestrahlung durch Erdkabel*“. Es soll die Wärmeverteilung im Boden bei Normalbetrieb und bei Höchstlast berechnet werden. Weiterhin soll der Einfluss der thermischen Emissionen auf den Wasserhaushalt, Bodenorganismen und Pflanzen (Keimverhalten, Reifeentwicklung, Ertragsfähigkeit) untersucht werden.

In dieser Studie wurden die thermischen Felder der Kabelanlage aufwändig berechnet. Neben gekoppelten elektromagnetisch-thermischen Berechnungen für den stationären Zustand, wurden auch transiente Erwärmungsberechnungen durchgeführt, um saisonale Einflüsse zu berücksichtigen und jahreszeitlich unterschiedliche Temperaturprofile im Boden zu betrachten.

Es wurden zwei Belastungsszenarien und drei unterschiedliche Bodenprofile untersucht. Bei der dynamischen Belastung handelt es sich um eine mittlere Belastung. Aus diesen Berechnungen resultieren die zu erwartenden Bodenerwärmungen, Die thermische Grenzbelastung stellt die größtmögliche Auslastung der Kabelanlage dar. Hieraus resultieren die maximal möglichen Bodenerwärmungen.

Bei den Bodenprofilen wurde ein sandiger und ein lehmiger Boden sowie ein Moorboden über Sand untersucht. Es wurde festgestellt, dass die Kabelanlage zu einem zeitunabhängigen Anheben der saisonalen Temperaturverläufe führt und die saisonalen Temperaturschwankungen nicht verstärkt. Es ergaben sich folgende maximale Erwärmungen oberhalb der Kabelanlage:

Tiefe	0,0 m	0,2 m	0,5 m	1,0 m
Erwärmung bei mittlerer Last				
sandiger Boden/ K	1,3	2,3	4,0	7,1
lehmiger Boden/ K	1,2	2,3	4,6	8,1
Moorboden/ K	1,4	2,7	5,7	15,6
Erwärmung bei thermischer Grenzlast				
sandiger Boden/ K	1,6	2,9	4,9	8,8
lehmiger Boden/ K	1,5	2,7	5,7	10,0
Moorboden/ K	1,6 K	3,3	7,2	13,3

Tab. 24: Zusammenfassung aller Bodenerwärmungen

Die Untersuchung des Moorbodens hat gezeigt, dass Grundwasserströmungen einen signifikanten Einfluss auf die Temperaturverteilung haben und somit bei der thermischen Berechnung berücksichtigt werden sollten.

In dieser Studie wurde dargelegt, dass die Kabelanlage für einen über das Jahr gleichmäßigen Temperaturoffset der ungestörten Bodentemperaturkennlinien sorgt.

Somit können auch andere Temperaturkennlinien, als die hier berechneten, zum Beispiel gemessene Temperaturkennlinien durch Addition des jeweiligen Temperaturoffsets berücksichtigt werden.

Die jahreszeitlich abhängigen Temperaturprofile sind nahezu unabhängig vom jeweiligen Modellboden, weshalb die Erkenntnisse auch auf andere, ähnliche Böden übertragbar sind.

Die Analyse der Jahresbodentemperaturen ohne und mit Kabelanlage erlaubt es, die Verschiebung des Keimzeitpunkts und den Einfluss auf die Wachstumsdynamik zu bestimmen. Die umfassende Untersuchung Auswirkungen der Bodenerwärmung und naturschutzfachliche Bewertung ist Gegenstand des zweiten Teils dieser Studie.

7 Anhang

7.1 Schrifttum

- [AfPE2017] AfPE: „Anforderungen an das Gutachten zur thermischen Berechnung von Wärmestrahlung durch Erdkabel“, Lübeck, 2017
- [ATP] ATP Website, www.emtp.org und www.eeug.org
- [BGA2019] Ingenieurbüro BGA: „380kV-Ostküstenleitung, Erdkabelstrecke Henstedt-Ulzburg Übersicht Baugrundverhältnisse bis ca. 1,50 m Tiefe“, Braunschweig, Dezember 2019
- [BGA2019a] Ingenieurbüro BGA: „380kV-Ostküstenleitung, Erdkabelstrecke Kisdorferwohld, Übersicht Baugrundverhältnisse bis ca. 1,50 m Tiefe“, Braunschweig, Dezember 2019
- [Boe2006] Peter von Böckh: „Wärmeübertragung, Grundlagen und Praxis“, 2. Auflage, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2006
- [Buc2016] Buchholz & Partner: „Geotechnischer Bericht, Baugrundvoruntersuchung Ostküstenleitung“, Schkeuditz 2016
- [Dong2012] T. Dong, „Modulares Analysesystem für Grundsatzuntersuchungen an langen Netzverbindungen mit Drehstrom-Hoch- und Höchstspannungskabeln“, Dissertation, Universität Duisburg-Essen, 2012
- [Sta2001] J. Stammen, „Numerische Berechnung elektromagnetischer und thermischer Felder in Hochspannungskabelanlagen“, Dissertation Universität Duisburg, Shaker Verlag, 2001
- [Sta2015] Stammen, Jörg: „Numerische Berechnung der Temperatur- und Magnetfelder eines Regelgrabenprofils mit vier 380-kV-Kabelsystemen“, Dezember 2015
- [Ten2017] TenneT: „Handbuch Bauen und Errichten“, Anlage3_TenneT BuE 2.2.1.1 380kV Zwischenverkabelungsabschnitt 20170712.pdf, Bayreuth 2017
- [Ten2019] TenneT: „TenneT - Berechnungen für 380 kV Zwischenverkabelungsabschnitte“, Version 1.0, Juli 2019, Revision vom: 15.10.2019
- [Ten2020] <https://www.tennet.eu/de/unsere-netz/onshore-projekte-deutschland/ostkuestenleitung/>, abgerufen am 09.01.2029
- [TenKL2017] TenneT: „A310 Henstedt-Ulzburg Schirmspannungsberechnung_02062017“ und „A310 Kisdorferwohld Schirmspannungsberechnung_27062017“, Bayreuth 06.2017
- [VDE1995] VDE 0276 Teil 1000: Starkstromkabel, Strombelastbarkeit, Allgemeines, Umrechnungsfaktoren, VDE-Verlag, Berlin, Juni 1995
- [VDE2005] VDE 0228: „Leiter für Kabel und isolierte Leitungen (IEC 60228:2004); Deutsche Fassung EN 60228:2005 + Corrigendum:2005“, VDE-Verlag, Berlin, 2005

- [VDI2010] VDI: „VDI-RICHTLINIEN, VDI 4640, Thermische Nutzung des Untergrunds“, Beuth Verlag, Berlin, Juni 2010
- [VDI2013] VDI, “VDI-Wärmeatlas”, *VDI-Verlag*, 11. Auflage, Düsseldorf, 2013

7.2 Über die Autoren

Tao Dong:

Dr.-Ing. Tao Dong, studierte Allgemeine Elektrotechnik an der Rheinischen Fachhochschule Köln mit dem Abschluss Diplom-Ingenieur (FH). Im Oktober 2012 wurde er von Prof. H. Brakelmann zum Dr.-Ing. mit Auszeichnung promoviert und für seine Dissertation „Modulares Analysesystem für Grundsatzuntersuchungen an langen Netzverbindungen mit Drehstrom-Hoch- und Höchstspannungskabeln“ mit dem Siemens-Energy-Thesis-Awards 2013 geehrt.

Seit 2012 arbeitet er als Spezialist für die Berechnung und Optimierung elektrischer Netze bei einer Firma für Netzleittechnik in Aschaffenburg. Sein Aufgabengebiet umfasst die Erforschung und Entwicklung von neuen Berechnungsverfahren für die computergestützte Analyse elektrischer Energieversorgungsnetze, Durchführung stationärer, dynamischer und transienter Netzberechnungen und Entwicklung von Software zum Lösen technischer Problemstellungen im Bereich elektrischer Energieübertragungstechnik.

Er ist Mitverfasser zahlreicher Studien, die sich mit den Untersuchungen von elektromagnetischen Eigenschaften realer Kabelanlagen befassen.

Jörg Stammen:

Dr.-Ing. Jörg Stammen, studierte Elektrotechnik an der Gerhard-Mercator-Universität Elektrotechnik mit dem Abschluss Diplom-Ingenieur. Im Januar 2001 wurde er von Prof. H. Brakelmann mit der Note „sehr gut“ zum Dr.-Ing. promoviert. Das Thema seiner Dissertation lautet: „Numerische Berechnung elektromagnetischer und thermischer Felder in Hochspannungskabelanlagen“. Im Rahmen dieser Arbeit entstand ein neuer, für Energiekabelanlagen optimierter Simulator auf der Basis der Finite-Elemente-Methode.

Nach dreijähriger Arbeit als Gruppenleiter und stellvertretender Abteilungsleiter am Fraunhofer Institut kehrte er zur Universität Duisburg-Essen zurück, um die Forschungsarbeiten im Bereich der Energiekabeltechnik bei Herrn Prof. Brakelmann fortzuführen. Wesentliche Teile der öffentlich geförderten Projekte „Naturschutzfachliche Analyse von küstennahen Stromleitungen“ (BfN, FKZ 80682070) und „Innovative Konzepte für die Entwicklung der elektrischen Infrastruktur zur systemtechnischen Einbindung großer Kapazitäten erneuerbarer Energie“ (BMU, FKZ 0327606) wurden von ihm bearbeitet.

Seit der Pensionierung von Herrn Prof. Brakelmann im Jahr 2012 führt er die Arbeiten am Fachgebiet „Energietransport und –speicherung“ weiter.

Zusätzlich zu seinen Forschungsarbeiten als wissenschaftlicher Mitarbeiter im Fachgebiet Energietransport und -speicherung ist er als Dozent und Prüfer an der Universität Duisburg-Essen tätig und hält die Vorlesungen „Elektrotechnik“ sowie „Elektrische Maschinen“.

Er ist Verfasser zahlreicher Studien, die sich mit den Belastbarkeiten sowie den thermischen und magnetischen Feldern realer Kabelanlagen befassen, darunter auch viele Studien zum Thema 2-Kelvin-Kriterium von Seekabeltrassen in der Nord- und Ostsee.

Zu den von ihm beratenen Firmen gehören Hellenic Cables, nkt cables, TenneT Offshore, TenneT TSO, Transnet BW, Innogy, BCC Cable Consulting, Avacon Netz GmbH, Uniper u.a..

Studie Teil II

Bodenkundliche Bewertung der Bodenerwärmung im Bereich der 380-kV- Zwischenverkabelung „Henstedt-Ulzburg“ und „Kisdorferwohld“

von

Prof. Dr. G. Wessolek* und Dr. habil. C. Kersebaum**

Anschriften der Verfasser

Prof. Dr. G. Wessolek*
Angewandte Bodenkunde
Münchener Str. 57b
13465 Berlin

Dr. habil. C. Kersebaum**
Leibnitz Zentrum für Agrarforschung
Research Platform for Models & Simulation
Eberswalder Str. 84
15374 Müncheberg

Berlin, im April 2020

INHALT

1 EINLEITUNG	9
2 MATERIAL UND METHODEN	11
2.1 <i>BODEN- UND STANDORTINFORMATIONEN.....</i>	<i>11</i>
2.2 <i>KLIMABEDINGUNGEN IM UNTERSUCHUNGSGEBIET.....</i>	<i>11</i>
2.3 <i>NUMERISCHE MODELLE UND BERECHNUNGSVERFAHREN.....</i>	<i>11</i>
3 BÖDEN IN DEN BEREICHEN DER ERDKABEL TRASSEN.....	17
3.1 <i>BODENTYPEN UND RÄUMLICHE SITUATION IM TRASSENBEREICH HENSTEDT-ULZBURG</i>	<i>21</i>
3.2 <i>BODENTYPEN UND RÄUMLICHE SITUATION AUF DER TRASSE KISDORFERWOHLD.....</i>	<i>24</i>
3.3 <i>BODENPHYSIKALISCHE BEWERTUNG UND ABLEITUNG VON MODELLBÖDEN.....</i>	<i>27</i>
3.4 <i>BODENREFERENZTEMPERATUREN (OHNE KABELINFLUSS).....</i>	<i>33</i>
4 KLIMABEDINGUNGEN UND BODENWASSERHAUSHALT	35
4.1 <i>LANGJÄHRIGE KLIMA- UND WASSERHAUSHALTSBEDINGUNGEN.....</i>	<i>35</i>
4.2 <i>KLIMAPROGNOSEN.....</i>	<i>39</i>
5 KABELBEDINGTE BODENERWÄRMUNG	43
5.1 <i>MODELLBODEN 1: SAND.....</i>	<i>43</i>
5.2 <i>MODELLBODEN 2: LEHM.....</i>	<i>44</i>
5.3 <i>MODELLBODEN 3: MOOR.....</i>	<i>45</i>
6 UMWELT- FOLGEABSCHÄTZUNG	49
6.1 <i>LANDWIRTSCHAFT UND ERTRÄGE.....</i>	<i>50</i>
6.2 <i>BODENWASSERHAUSHALT UND NITRATAUSWASCHUNG.....</i>	<i>56</i>
6.3 <i>MIKROBIELLE AKTIVITÄT IM BODEN (N-MINERALISIERUNG UND DENITRIFIKATION).....</i>	<i>60</i>
6.4 <i>MOORE UND STEUERGRÖßEN ZUM MOORSCHUTZ.....</i>	<i>62</i>
6.5 <i>FOLGEN EINER TEMPERATURERHÖHUNG AUF DIE CO₂-C FREISETZUNG BEI MOOREN.....</i>	<i>64</i>
7 GESAMTFAZIT UND EMPFEHLUNGEN	67
8 LITERATUR	69
9 ÜBER DIE AUTOREN	74
10 ANHANG	75

Dokumentation der Berichtsentwicklung

Art der Änderung	Version	Datum	Bearbeiter
Anlegen des Berichts	0.1	20.11.2020	Prof. G. Wessolek
Ableitung bodenphysikalischer Kennwerte	0.1	30.11.2020	Prof. K. Bohne Prof. G. Wessolek
Integration der transienten Bodenerwärmung	0.2	10.12.2019	Dr. J. Stammen & Prof. G. Wessolek
Fallstudien zum Ertrag und Stickstoffumsatz	0.3	14.01.2020	Dr. C. Kersebaum
Erster Entwurf des Berichts	0.4	06.02.2020	Prof. G. Wessolek
Integration der Grundwasserströmung für Moore	0.5	10.02.2020	Prof. Dr. I. Engelhardt
Moorumsetzung und Aspekte zum Klimawandel	0.6	15.2.2020	Prof. G. Wessolek
Überarbeitung des Berichts und Anpassung des Ertragsniveaus an lokale Verhältnisse	0.7	9.3.2020	Prof. G. Wessolek Dr. Kersebaum
Überarbeitung des Gesamtberichts unter Bezugnahme von Teil I (Dr. Stammen)	0.8	14.3.2020	Prof. G. Wessolek
Formale und inhaltliche Überarbeitung des Gesamtberichts nach fachlichen Anregungen aus den Bereichen Landschaftsplanung, Landschaftsarchitektur sowie Natur- und Gewässerschutz	0.9	3.4.2020	Prof. G. Wessolek

Abbildungsverzeichnis

Abb. 2.1: Schema des Bodenwasserhaushaltsmodells BO-WAS zur Berechnung von Verdunstung, Versickerung, kapillarer Aufstieg aus dem Grundwasser und CO₂-C Freisetzung

Abb. 2.2: Prinzip-Skizze des HERMES Modells

Abb. 3.1: Überblick zur Lage der Erdkabeltrassen Henstedt-Ulzburg (links) und Kisdorferwohld (rechts)

Abb. 3.2a: BÜK 250: Ausschnitt zu den Böden im Raum Henstedt-Ulzburg und Kisdorferwohld, die dazugehörige Legende ist in Abb. 3.3a dargestellt

Abb. 3.2b: Ausschnitt zu den Böden im Raum Kisdorferwohld im Maßstab 1:25.000, die relevanten Legende Einheiten sind in Abb. 3.3b aufgeführt

Abb. 3.3a: Legende zu den Bodentypen der Bodenübersichtskarte BÜK 250 (für beide Trassen)

Abb. 3.3b: Legende zur Bodenkarte 1:25.000 für die Trasse Kisdorferwohld

Abb. 3.4: Ausschnitt zur Lage des Trassenbereichs Henstedt-Ulzburg mit Böden dargestellt in Tabelle 3.1

Abb. 3.5: Lage im Raum, Trasse Henstedt-Ulzburg, Google Maps

Abb. 3.6: Bohrpunkte und Bodenarten gemäß Baugrunduntersuchungen entlang der Trasse Henstedt-Ulzburg (Daten vom Ing.-büro BGA, Braunschweig, 2019)

Abb. 3.7: Ausschnitt zur Lage des Trassenbereichs Kisdorferwohld

Abb. 3.8: Lage im Raum, Luftbild, Quelle: Google Maps

Abb. 3.9: Bohrpunkte und Bodenarten gemäß Baugrunduntersuchungen entlang der Trasse Kisdorferwohld

Abb. 3.10: Typisches Braunerde Bodenprofil, nach Burbaum et al., 2019

Abb. 3.11: Typisches Pseudogley Bodenprofil nach Burbaum et al., 2019

Abb. 3.12: Typisches Niedermoor Bodenprofil nach Burbaum et al., 2019

Abb. 3.13: Mittlere Bodentemperaturen im Jahresverlauf, ohne Einfluss einer Kabeltrasse (DWD)

Abb. 3.14: Mittlere Bodentemperaturen von 2018 im Jahresverlauf, ohne Einfluss einer Kabeltrasse (DWD)

Abb. 3.15: Tagesgang der Luft- und Bodentemperaturen für einen mineralischen (links) und organischen Standort (rechts) in Schleswig-Holstein (nach Miess, 1968)

Abb. 4.1 Klimatische Wasserbilanz (=Niederschläge minus potenzielle Verdunstung) in Deutschland anhand eines Durchschnittsjahres (links) und für das extreme Trockenjahr 2018 (rechts); Quelle: DWD

Abb. 4.2: Entwicklung der Maximum Temperaturen im Sommerhalbjahr für drei Zeitperioden: links für die Zeitreihe 1961-1990 (bisheriges langjähriges Mittel), Mitte: Entwicklung für 2021-2050 sowie rechts Entwicklung für 2071-2100. © Datensatz der WETTREG-Simulationsergebnisse, dargestellt mit dem IDP2006 Präsentationstool

Abb. 4.3: Entwicklung der Minimum Temperaturen im Winterhalbjahr für drei Zeitperioden: links für die Zeitreihe 1961-1990 (bisheriges langjähriges Mittel), Mitte: Entwicklung für 2021-2050 sowie rechts Entwicklung für 2071-2100. © Datensatz der WETTREG-Simulationsergebnisse, dargestellt mit dem IDP2006 Präsentationstool

Abb. 4.4: Entwicklung der Sommerniederschläge für drei Zeitperioden: links für die Zeitreihe 1961-1990 (bisheriges langjähriges Mittel), Mitte: Entwicklung für 2021-2050 sowie rechts Entwicklung für 2071-2100. © Datensatz der WETTREG-Simulationsergebnisse, dargestellt mit dem IDP2006 Präsentationstool

Abb. 4.5: Entwicklung der Winterniederschläge für drei Zeitperioden: links für die Zeitreihe 1961-1990 (bisheriges langjähriges Mittel), Mitte: Entwicklung für 2021-2050 sowie rechts Entwicklung für 2071-2100. © Datensatz der WETTREG-Simulationsergebnisse, dargestellt mit dem IDP2006 Präsentationstool

Abb. 5.1: Finite-Elemente-Modell, Ausschnitt im Bereich der Kabelanlage und der Bodenschichten des sandigen Bodens (aus dem Gutachten von Dr. Stammen, 2020)

Abb. 5.2: Finite-Elemente-Modell, Ausschnitt im Bereich der Kabelanlage und der Bodenschichten, lehmiger Boden (aus dem Gutachten von Dr. Stammen, 2020)

Abb. 5.3: Finite-Elemente-Modell, Ausschnitt im Bereich der Kabelanlage und der Bodenschichten, Moorboden (aus dem Bericht I von Dr. Stammen, 2020)

Abb. 5.4: Wärmeleitfähigkeiten des Sandbetts und der Bodenschichten, Moorboden ohne Grundwasserströmung, thermische Grenzlast (aus dem Bericht I von Dr. Stammen)

Abb. 5.5: Isolinien der kabelinduzierten Temperaturen im oberflächennahen Grundwasserbereich; die Strömung (1m/Tag) verläuft entlang des Gradienten von links nach rechts

Abb. 5.6: Wärmeeentwicklung in Boden und Grundwasser als Funktion der Entfernung von der Erdkabelanlage

Abb. 6: Temperaturen auf der Kabeltrasse in 0,2 m, 0,5 m und 1,0 m Tiefe im lehmigen Boden, I = 2333 A, ergänzt nach Bericht I, Dr. Stammen, 2020

Abb. 6.1: Entwicklung der mittleren Erträge in SW seit 1955 (Quelle: Landwirtschaftskammer Schleswig-Holstein)

Abb. 6.2: Berechnete Erträge für Winterweizen auf sandigen Böden (Modellboden 1) für den Referenzfall (ohne Kabel) im Vergleich zu Normallast- und Höchstlastbedingungen

Abb. 6.3: Berechnete Erträge für Winterweizen auf lehmigen Böden (Modellboden 2) für den Referenzfall (ohne Kabel) im Vergleich zu Normallast- und Höchstlastbedingungen

Abb. 6.4: Berechnete Erträge für Sommergerste auf sandigen Böden (Modellboden 1) für den Referenzfall (ohne Kabel) im Vergleich zu Normallast- und Höchstlastbedingungen

Abb. 6.5: Berechnete Erträge für Sommergerste auf lehmigen Böden (Modellboden 2) für den Referenzfall (ohne Kabel) im Vergleich zu Normallast- und Höchstlastbedingungen

Abb. 6.6: Berechnete Erträge für Winterraps auf sandigen Böden (Modellboden 1) für den Referenzfall (ohne Kabel) im Vergleich zu Normallast- und Höchstlastbedingungen

Abb. 6.7: Berechnete Erträge für Winterraps auf lehmigen Böden (Modellboden 2) für den Referenzfall (ohne Kabel) im Vergleich zu Normallast- und Höchstlastbedingungen

Abb. 6.8: Berechnete Erträge für Silomais auf sandigen Böden (Modellboden 1) für den Referenzfall (ohne Kabel) im Vergleich zu Normallast- und Höchstlastbedingungen

Abb. 6.9: Berechnete Erträge für Silomais auf lehmigen Böden (Modellboden 2) für den Referenzfall (ohne Kabel) im Vergleich zu Normallast- und Höchstlastbedingungen

Abb. 6.10: Berechnete reale Evapotranspiration (Eta-Basis) von Sand (Modellboden 1) für den Referenzfall (ohne Kabel) im Vergleich zu Normallast- und Höchstlastbedingungen

Abb. 6.11: Berechnete reale Evapotranspiration (Eta-Basis) von Lehm (Modellboden 1I) für den Referenzfall (ohne Kabel) im Vergleich zu Normallast- und Höchstlastbedingungen

Abb. 6.12: Berechnete jährliche Versickerung unter Sand (Modellboden 1) für den Referenzfall (ohne Kabel) im Vergleich zu Normallast- und Höchstlastbedingungen

Abb. 6.13: Berechnete jährliche Versickerung unter Lehm (Modellboden 1) für den Referenzfall (ohne Kabel) im Vergleich zu Normallast- und Höchstlastbedingungen

Abb. 6.14: Berechnete Stickstoffauswaschung (Nitrat) bei Sand (Modellboden 1) für den Referenzfall (ohne Kabel) im Vergleich zu Normallast- und Höchstlastbedingungen

Abb. 6.15: Berechnete Stickstoffauswaschung (Nitrat) bei Lehm (Modellboden 2) für den Referenzfall (ohne Kabel) im Vergleich zu Normallast- und Höchstlastbedingungen

Abb. 6.16: Berechnete Stickstoffmineralisation (N) bei Sand (Modellboden 1) für den Referenzfall (ohne Kabel) im Vergleich zu Normallast- und Höchstlastbedingungen

Abb. 6.17: Berechnete Stickstoffmineralisation (N) bei Lehm (Modellboden 1I) für den Referenzfall (ohne Kabel) im Vergleich zu Normallast- und Höchstlastbedingungen

Abb. 6.18: Berechnete Denitrifikation (Kg N) bei Sand (Modellboden 1) für den Referenzfall (ohne Kabel) im Vergleich zu Normallast- und Höchstlastbedingungen

Abb. 6.19: Berechnete Denitrifikation (Kg N) bei Lehm (Modellboden 2) für den Referenzfall (ohne Kabel) im Vergleich zu Normallast- und Höchstlastbedingungen

Abb. 6.20: Lage und Verteilung von Mooren in Deutschland (nach Hiederer, 2006)

Abb. 6.21: Jährliche CO₂-C Freisetzung verschiedener Moortypen in den gemäßigten Breiten nach einer Literatúrauswertung von Höper (2007). Die Fehlerbreiten stellen den höchsten und niedrigsten Wert dar

Abb. 6.22: Jährliche CO₂-C Freisetzung aus norddeutschen Niedermooren mit einer Moormächtigkeitsspanne von 150 cm unter Grünlandnutzung in Abhängigkeit vom mittleren Grundwasserstand; Zusammenstellung von Ergebnissen aus: (1) Mundel, 1976, (2) Wessolek et al., 1993, (3) Gensior und Zeitz, 1999, (4) Meyer et al., 2001, (5) Wessolek et al., 2002, (6a, 6b) Renger et al. 2002, (7) Kluge, 2003, (8) Kluge et al., 2008; n=28

Abb. 6.23: CO₂-C Freisetzungsfunktion von Niedermoororf der Zeretzungsstufe H9 (entspricht dem Modellbodens 3) bei unterschiedlichen Wasserspannungen (pF-Werte) und Bodentemperaturen (x), entnommen aus: Wessolek et al. 2003: Veränderungen des Bodenwasserhaushaltes, der Biomasseproduktion und der Degradierung von Niedermooren als Folgen des globalen Wandels, Endbericht „Globaler Wandel“ (GLOWA)

Abb. 6.24: Torfmineralisation für unterschiedliche Grundwasserstände unter gegenwärtigen Klimabedingungen (blaue Kurve) und bei prognostizierter Klimaänderung (rote Kurve)

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.1: Erforderliche Daten zur Berechnung von Verdunstung, Versickerung, kapillaren Aufstieg und CO₂-C Freisetzung bei Mooren mit dem W-MOD Modell (Wessolek et al., 2002)

Tabelle 3.1: Bodentypengesellschaft im Trassenbereich Henstedt-Ulzburg nach BÜK 250

Tabelle 3.2: Bodentypengesellschaften im Kisdorferwohld gemäß der BÜK 250 sowie der Bodenkarte 1:25.000, s. Abb. 3.2b.

Tabelle 3.3: Profileigenschaften von Leitprofil Nr. 1, nach Burbaum et al., 2019

Tabelle 3.4: Physikalische Bodeneigenschaften von Leitprofil Nr. 1

Tabelle 3.5: Profileigenschaften von Leitprofil Nr. 2, nach Burbaum et al., 2019

Tabelle 3.6: Physikalische Bodeneigenschaften von Leitprofil Nr. 2

Tabelle 3.7: Profileigenschaften von Leitprofil Nr. 3, nach Burbaum et al., 2019

Tabelle 3.8: Physikalische Bodeneigenschaften von Leitprofil Nr. 3

Tabelle 3.9: Hydraulische Bodenparameter (van Genuchten-Mualem-Modell) der Mineralbodensubstrate

Tabelle 3.10: Bodenphysikalische Kennwerte von Moorböden

Tabelle 3.11: Hydraulische Charakterisierung von Niedermoorböden

Tabelle 4.1: Langjährige Klimakennwerte von Bad Segeberg (Quelle: DWD, 2020), Mittelwerte und Schwankungsbreiten der Dekade 1981–1990

Tabelle 4.2: Langjährige Klimakennwerte von Hamburg-Fuhlsbüttel (Quelle: DWD, 2020), Mittelwerte und Schwankungsbreiten der Dekade 1981–1990

Tabelle 4.3: Klimatische Wasserbilanzen (mm) für: Gesamtjahr, Frühjahr, Sommer, Herbst und Winter

Tab.4.4: Durchschnittliche Veränderung der Klimakenntage in Schleswig-Holstein (nach Böhm, 2008)

Tabelle 5.1: Maximale Temperaturen (°C) und Erwärmungen (K) im sandigen Boden (Modellboden 1), stationäre Berechnung siehe Bericht I von Dr. Stammen, 2020

Tabelle 5.2: Maximale Temperaturen (°C) und Erwärmungen (K) im sandigen Boden (Modellboden 1), transiente Berechnung siehe Bericht I von Dr. Stammen, 2020

Tabelle 5.3: Maximale Temperaturen (°C) und Erwärmungen (K) im lehmigen Boden (Modellboden 2), stationäre Berechnung, siehe Bericht I von Dr. Stammen, 2020

Tabelle 5.4: Maximale Temperaturen (°C) und Erwärmungen (K) im lehmigen Boden (Modellboden 2), transiente Berechnung, siehe Bericht von Dr. Stammen, 2020

Tabelle 5.5: Maximale Temperaturen (°C) und Erwärmungen (K) im Moorboden (Modellboden 3) ohne Grundwasserströmung, stationäre Berechnung, siehe Bericht Dr. Stammen, 2020.

Tabelle 5.6: Maximale Temperaturen (°C) und Erwärmungen (K) im Moorboden (Modellboden 3) mit Grundwasserströmung, stationäre Berechnung, siehe Bericht I von Dr. Stammen, 2020

Tabelle 6.1: Relevante landwirtschaftliche Kulturen im Anbaugebiet sowie Erträge in zwei Vergleichsjahren (2013 und 2014), Quelle: Landwirtschaftskammer Schleswig-Holstein

Tabelle 6.2: Durchschnittliche simulierte Erträge der Hauptkulturarten (1981-2016) für die betrachteten Bodenprofile Sand und Lehm im Vergleich zu den mittleren Erträgen des Kreises Segeberg (2010-2016), Quelle: Statistische Ämter des Bundes und der Länder, Deutschland, 2020)

Tabelle 6.3: Zusammenstellung von CO₂-C Freisetzungsraten aus Mooren in Deutschland (aus Werkenthin, 2012)

Tabelle 6.4: CO₂-C- Freisetzungsfunktionen für unterschiedliche pF Stufen nach Kluge et al. 2013

Tabelle 6.5: Berechnete CO₂-C Freisetzung (Kg CO₂-C/ha a) von Niedermoor (Modellboden 3) für die Varianten: a) ohne Erdkabelerwärmung, b) unter Normallast und c) bei Höchstlast

Tabelle 7.1: Zusammenfassung aller Bodenerwärmungen, siehe Bericht Teil I, Dr. Stammen, 2020

Tabellen im Anhang

Tabelle 10.1: Berechnete Erträge (Trockenmasse, = 0% Feuchte) für Sandböden mit (Normallast, Höchstlast) und ohne Kabeleinfluss (Referenz)

Tabelle 10.2: Berechnete Erträge (Trockenmasse, = 0% Feuchte) für Lehm Böden mit (Normallast, Höchstlast) und ohne Kabeleinfluss (Referenz)

Tab. 10.3a: Wasserhaushaltskomponenten für drei Einzeljahre: 2016, 2017, 2018 Sandboden (Modellboden 1), AMPL: 1= Grundwasser in 1m unter GOF, AMPL: 6: Grundwasser >2m unter GOF, Kap. Aufstieg: kapillarer Aufstieg aus dem Grundwasser in den Wurzelraum (mm), EREAL+EI: reale Evapotranspiration (mm), GW-NEU: Grundwasserneubildung (mm) Epot: potenzielle Verdunstung, Niederschlag(mm), Et: Transpiration der Pflanze (ohne Interzeption und Evaporation)

Tab. 10.3b: Wasserhaushaltskomponenten für drei Einzeljahre: 2016, 2017, 2018 Lehm Boden (Modellboden 2), AMPL: 1= Grundwasser in 1m unter GOF, AMPL: 6: Grundwasser >2m unter GOF, Kap. Aufstieg: kapillarer Aufstieg aus dem Grundwasser in den Wurzelraum (mm), EREAL+EI: reale Evapotranspiration (mm), GW-NEU: Grundwasserneubildung (mm) Epot: potenzielle Verdunstung, Niederschlag(mm), Et: Transpiration der Pflanze (ohne Interzeption und Evaporation)

Tab. 10.3c: Wasserhaushaltskomponenten für drei Einzeljahre: 2016, 2017, 2018 von Niedermoor (Modellboden 3), AMPL: 1= Grundwasser in 1m unter GOF, AMPL: 6: Grundwasser >2m unter GOF, Kap. Aufstieg: kapillarer Aufstieg aus dem Grundwasser in den Wurzelraum (mm), EREAL+EI: reale Evapotranspiration (mm), GW-NEU: Grundwasserneubildung (mm) Epot: potenzielle Verdunstung, Niederschlag(mm), Et: Transpiration der Pflanze (ohne Interzeption und Evaporation)

1 Einleitung

Die TenneT TSO GmbH (Auftraggeber = AG) plant den Neubau der 380-kV-Höchstspannungsleitung zwischen den Umspannwerken Kreis Segeberg, Lübeck, Siems und Göhl (380-kV-Ostküstenleitung). Diese Ostküstenleitung wurde als ein Pilotprojekt für Teilerdverkabelungen zur Höchstspannungs-Drehstromübertragung eingestuft. Nach jetzigem Stand plant TenneT einen rund 4,4 km langen Erdkabelabschnitt bei „Henstedt-Ulzburg“ sowie eine ca. 3,04 km lange Teilstrecke in „Kisdorferwohld“.

Das Amt für Planfeststellung Energie (AfPE) fordert im Rahmen dieses Vorhabens eine Stellungnahme zur Berechnung der Wärmestrahlung im Boden, um die kabelbedingte Wärmeverteilung im Boden bei Normalbetrieb und bei Höchstlast nachvollziehen und daraus den Einfluss der thermischen Emissionen auf den Wasserhaushalt, Bodenorganismen und Kulturpflanzen (Keimverhalten, Reifeentwicklung, Ertragsfähigkeit) beurteilen zu können.

Während sich Teil I der Studie, erstellt von Dr. Stammen, vornehmlich mit der Berechnung der thermischen Felder der geplanten Kabelanlage befasst, werden in diesem Bericht die relevanten ökologischen Auswirkungen der Wärmeabstrahlung auf Bodenfunktionen, Wasser- und Stoffumsatz sowie Ertragsentwicklung untersucht. Für den Erdkabelabschnitt im Bereich der Pinnauwiesen werden zusätzlich die Auswirkungen auf die Moordynamik und ihre Schutzwürdigkeit betrachtet (FFH Verträglichkeit).

Mit diesen beiden umfassenden Studien soll eine nachvollziehbare und belegbare Abarbeitung der thermischen Auswirkungen bzw. Folgen des Erdkabels auf die Bodenfunktionen nach Stand des Wissens erreicht werden, um die zu erwartenden Folgen des Eingriffs auf Natur und Landschaft bei der Auseinandersetzung mit Landwirten und Vertretern des Naturschutzes zu dokumentieren und Rechtssicherheit zu geben.

Neben dem BBodSchG beinhaltet vor allem das Baugesetzbuch, Raumordnungsrecht sowie das Naturschutzrecht spezifische, bodenschützende Vorschriften durch:

Bodenschutzklausel

„Mit Grund und Boden soll sparsam und schonend umgegangen werden; dabei sind zur Verringerung der zusätzlichen Inanspruchnahme von Flächen für bauliche Nutzungen die Möglichkeiten der Entwicklung der Gemeinde insbesondere durch Wiedernutzbarmachung von Flächen, Nachverdichtung und andere Maßnahmen zur Innenentwicklung zu nutzen sowie Bodenversiegelungen auf das notwendige Maß zu begrenzen“ (§ 1a Abs. 2 BauGB).

Grundsätze der Raumordnung

„Die Naturgüter, insbesondere Wasser und Boden, sind sparsam und schonend in Anspruch zu nehmen“ (§ 2 Abs. 2 Nr. 8 Satz 3 ROG). „Bei dauerhaft nicht mehr genutzten Flächen soll der Boden in seiner Leistungsfähigkeit erhalten oder wiederhergestellt werden“ (§ 2 Abs. 2 Nr. 8 Satz 6 ROG).

Grundsätze des Naturschutzes

„Böden“ sind so zu erhalten, dass sie ihre Funktionen im Naturhaushalt erfüllen können. Natürliche oder von Natur aus geschlossenen Pflanzendecken sowie die Ufervegetation sind zu sichern. Für nicht land- oder forstwirtschaftlich oder gärtnerisch genutzte Böden, deren Pflanzendecke beseitigt worden ist, ist eine standortgerechte Vegetationsentwicklung zu ermöglichen. Bodenerosionen sind zu vermeiden“ (§ 2 Abs. 1 Nr. 3 BNatSchG).

Mit diesem Gutachten wird auf die relevanten bodenschützenden Vorschriften und Kriterien eingegangen, um die vom Amt für Planfeststellung Energie (AfPE) aufgeführten Fragen zu beantworten.

Zum Inhalt und Aufbau des Berichts: Im nachfolgenden Kapitel 2 werden zunächst alle benutzten Materialien, Karten und eingesetzten numerischen Modelle vorgestellt und behandelt, die für diesen Bericht herangezogen bzw. eingesetzt worden sind.

In Kapitel 3 wird dann auf die im Bereich der Kabeltrasse relevanten Bodentypen, Bodenarten und ihre Vergesellschaftung eingegangen. Aufbauend auf diesen Materialien werden drei repräsentative Modellböden bodenkundlich und physikalisch definiert, für die mit Hilfe von numerischen Modellen (nach Stand der Forschung) der langjährige Wasser- und Wärmehaushalt sowie die Mineralisation, Denitrifikation und Ertragsentwicklung für drei Szenarien berechnet werden: a) ohne Einfluss eines Kabels (Referenz), b) für Normallastbedingungen und b) für Höchstlast.

In Kapitel 4 wird auf das Klima, die zu erwartenden Klimaänderungen und auf den Wasserhaushalt im Planungsgebiet eingegangen, bevor in Kapitel 5 die kabelbedingte Bodenerwärmung für Normallast- und Höchstlastbedingungen für die drei Modellböden (Sand, Lehm, Moor) behandelt werden.

In Kapitel 6 werden schließlich die Konsequenzen der kabelbedingten Bodenerwärmung für die Umwelt und landwirtschaftlichen Produktionsbedingungen anhand des Ertrags, des Wasserhaushalts, der Nitratauswaschung sowie der Mineralisation und Denitrifikation vorgestellt. Darüber hinaus wird besonders auf die Rolle des Grundwassers und die für den Naturschutz relevanten Rahmenbedingungen zum Erhalt der Moore abgehoben.

In Kapitel 7 werden die wichtigsten Ergebnisse und Schlussfolgerungen zusammengefasst. Neben Informationen zu den Autoren des Berichts (Kapitel 8) und einem umfassenden Literaturverzeichnis (Kapitel 9) verfügt der Bericht auch über einen ausführlichen Anhang an Daten und Materialien (Kapitel 10).

2 Material und Methoden

Bei diesem Gutachten wurden folgende Materialien, Archive und Methoden verwendet sowie numerische Simulationsmodelle für die Standortbedingungen der Kabeltrassen angepasst und eingesetzt.

2.1 Boden- und Standortinformationen

- Die im Jahr 2019 vom Landesamt für Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume herausgegebene Veröffentlichung „Die Böden Schleswig-Holsteins“ (Burbaum et al., 2019).
- Angaben zu den Baugrundverhältnissen und Bodenarten der Trassenabschnitte, durchgeführt vom Ingenieurbüro BGA mit Sitz in Braunschweig.
- Bodenübersichtskarte 1: 250.000 (BÜK 250), 2016.
- Bodenkarte 1:25.000, Blatt 2126 Stukenborn, 2009.
- Die im Exkursionsführer der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft physikalisch, biologisch und chemisch beschriebenen, typischen Böden Schleswig-Holsteins,
- Die Deutsche Bodenkundliche Kartieranleitung (KA5) in Verbindung mit dem Sonderheft "Bodenphysikalische Kennwerte" für die Praxis (Renger et al., 2009)
- Informationen des digitalen Informationssystems über Geologie, Grundwasser, Böden und Nutzung in Schleswig-Holstein:
<https://www.schleswig-holstein.de/DE/Fachinhalte/B/boden/bodis.html>

2.2 Klimabedingungen im Untersuchungsgebiet

- Karten und Archiv des Deutschen Wetterdienstes (DWD):
https://www.dwd.de/DE/service/archiv/archiv_node.html
- Karten und Angaben des hydrologischen Atlas Deutschland (HAD):
<https://geoportal.bafg.de/mapapps/resources/apps/HAD/index.html?lang=de>
- Portal des Potsdamer Instituts für Klimafolgenforschung: <http://www.klimafolgenonline.com>
- Wetterarchiv von Kachelmann:
<https://kachelmannwetter.com/de/messwerte/deutschland/bodentemperatur-20cm/19620212-0000z.html>

2.3 Numerische Modelle und Berechnungsverfahren

Für die in diesem Gutachten getroffenen Aussagen wurden folgende numerische Simulationsmodelle eingesetzt:

I) Für die gekoppelte Berechnung der 2D-Magnetfelder und Temperaturverteilungen kommt der von Dr. Stammen speziell für Problemstellungen der Energiekabeltechnik entwickelte Finite-Elemente Simulator „stafem“ (Stammen, 2001) zum Einsatz, welcher das nichtlineare Verhalten von Materialparametern, wie z.B. temperaturabhängige elektrische Leiterwiderstände, feldabhängige Permeabilität bei ferromagnetischen Armierungen bei Seekabeln und Stahlrohrkapselungen sowie partielle Bodenaustrocknungen berücksichtigt.

II) Zur Berechnung der elektrischen Eigenschaften wird das auf der Knotenpotentialanalyse basierende Programmsystem ATP-EMTP (ATP-EMTP: Alternative Transients Program - Electromagnetic Transients- Program) benutzt.

Die unter I) und II) aufgeführten Modelle und ihre Anwendung auf die beiden Trassen werden ausführlich im Bericht von Stammes und Dong, 2020 erläutert, daher sollen sie an dieser Stelle nicht weiter behandelt werden. An dieser Stelle sei angemerkt, dass die in Kapitel 3 vorgestellten Bodeneigenschaften in das Modell von Herrn Dr. Stammes einfließen und Berücksichtigung fanden.

III) Zur Berechnung des Bodenwasserhaushalts für unterschiedliche Böden, Klimabedingungen, Nutzungen und Grundwasserstände wurde das Modell BO-WAS eingesetzt (Wessolek, 1986). Dieses Modell wurde u.a. zur Ableitung der Karten „Sickerwasser und reale Evapotranspiration“ im Rahmen des Hydrologischen Atlas Deutschland weiterentwickelt und eingesetzt. In BO-WAS wird im sogenannten effektiven Wurzelraum auf Tagesbasis der Wasserumsatz bilanziert, d.h. die reale Evapotranspiration als Funktion der Niederschläge, des Bodenwassergehaltes und der Klimabedingungen berechnet, s. Abb. 2.1.

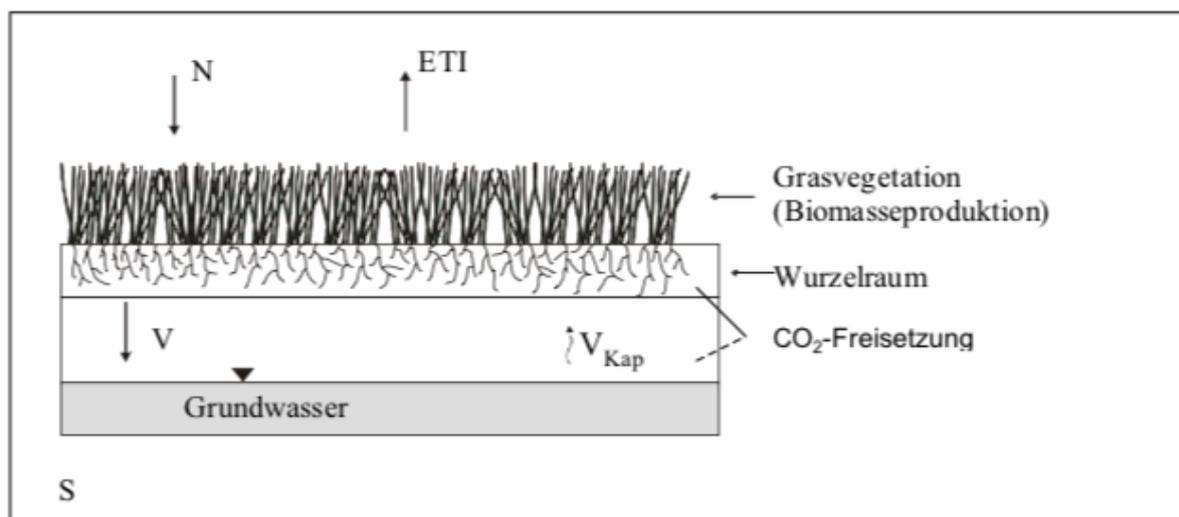


Abb. 2.1: Schema des Bodenwasserhaushaltsmodells BO-WAS zur Berechnung von Verdunstung, Versickerung, kapillarem Aufstieg aus dem Grundwasser und CO₂-C Freisetzung

Zur Verdunstungsberechnung wird eine modifizierte Penman-Monteith Formel benutzt. In dieser Gleichung wird der energetische Teil der Verdunstung mit den Eigenschaften und den Wasserflüssen der Pflanzen verbunden (s. ATV-DVWK, 1996, Böhm, 2001). Ausgangspunkt ist dabei die maximal mögliche Verdunstung (E_{pot}), die von einer nassen Pflanzenoberfläche ausgeht:

$$E_{pot} = \frac{\Delta R_n / L + \gamma f(z_o, d) u^{0.75} (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma} \quad (2.1)$$

mit

E_{pot} : maximale Evapotranspiration von einer nassen Oberfläche unter Berücksichtigung der Pflanzenhöhe (mm)

Δ : Steigung der Sättigungsdampfdruckkurve (hPa / °C)

R_n : Nettostrahlung (J / m² d)

L : Verdampfungswärme (J / m² d)

γ : Psychrometerkonstante (hPa / °C)

$f(z_o, d)$: Rauigkeitsparameter (-)

u : Windgeschwindigkeit in 2 m Höhe (im Freiland gemessen)

e_s : Sättigungsdampfdruck (hPa), e_a : aktueller Dampfdruck (hPa)

Die tatsächliche bzw. reale Evapotranspiration (ETI) wird dann aus E_{pot} unter Berücksichtigung eines pflanzenspezifischen Diffusionswiderstandes 'r' und der Interzeptionsverdunstung (E_i) berechnet, letzteres ist die unproduktive Verdunstung von an der Pflanzenoberfläche anhaftenden Regentropfen ist. ETI wird dann wie folgt berechnet:

$$ETI = \frac{\Delta + \gamma}{\Delta + \gamma(1 + f(z_o, d)u^{0.75}r)} (E_{wet} - E_i) \quad (2.2)$$

Der sogenannte Diffusionswiderstand 'r' setzt sich aus drei Teilwiderständen zusammen:

$$r = r_l + r_c + r_w \quad (2.3)$$

Unter r_l ist ein von der Strahlungsintensität abhängiger Diffusionswiderstand zu verstehen; r_c ist vom Bedeckungsgrad des Bodens und der Wasserspannung im Wurzelraum abhängig und r_w von der mittleren Wasserspannung im Blatt. Eine ausführliche Beschreibung der Widerstände findet sich bei Wessolek (1989). Die Interzeptionsverdunstung (E_i) wird in Abhängigkeit der Niederschläge, der Bodenbedeckung und der Höhe der potentiellen Verdunstung berechnet.

In Tabelle 2.1 sind die Eingabedaten für das Wasserhaushaltsmodell zusammengestellt. Dieses Wasserhaushaltsmodell wurde benutzt, weil es anhand von Geländedaten für Ackerkulturen wie Winterweizen und Zuckerrüben, Grünland und Wald kalibriert ist und im Rahmen des hydrologischen Atlas für ganz Deutschland verwendet wurde. Es wurde auch benutzt, um die CO_2 -C Freisetzung des Niedermoores der Pinnauwiesen zu berechnen.

Klima	Pflanze	Boden / Grundwasser
Niederschlag rel. Luftfeuchte Lufttemperatur	Bodenbedeckung Wuchshöhe Wurzelwiderstände	pF-Kurve ku-Beziehung Grundwasserstand CO ₂ -C- Freisetzung als eine Funktion von pF und Bodentemperatur
Windgeschwindigkeit Strahlung bzw. Sonnenscheindauer	effektiver Wurzelraum	

Tabelle 2.1: Erforderliche Daten zur Berechnung von Verdunstung, Versickerung, kapillaren Aufstieg und CO₂-C Freisetzung bei Mooren mit dem W-MOD Modell (Wessolek et. al., 2002)

IV) Zur Berechnung des Wärmetransports im Grundwasser unterhalb des Moores wurde das numerische MODFLOW-Modell benutzt, das sich seit ca. 15 Jahren sehr gut etabliert hat und für viele umweltrelevante Fragestellungen erfolgreich eingesetzt worden ist. MODFLOW ist ein modulares Finite-Differenzen-Strömungsmodell, das vom US Geological Survey entwickelt wurde. Es handelt sich um einen FORTRAN-Computercode, der die Darcy-Grundwasserströmungsgleichung numerisch löst.

Das Programm wird von Hydrogeologen verwendet, um die Grundwasserströmung sowie Stofftransport- und Temperaturprozesse im Grundwasserleiter zu simulieren. Es wurde kontinuierlich nach „State of the Art“ weiterentwickelt, ist Public Domain und eingehend beschrieben von McDonald (1988) und Neitsch (2005); es wird inzwischen weltweit als eine Art Standardmodell im Grundwasserbereich eingesetzt und genutzt.

Im Rahmen dieser Studie wurde das MODFLOW Modell für den grundwasserbeeinflussten Trassenbereich der Pinnauwiesen (mit Sand unterliegendes Niedermoor) für Henstedt-Ulzburg benutzt; die Berechnungen zur Wärmeausbreitung im Grundwasser wurden von Frau Prof. Dr. Irina Engelhardt (TU-Berlin, Fachgebiet Geohydrologie) unterstützt und begleitet.

Um die komplexen mikrobiologischen Vorgänge der Stoffumsetzungen im Boden zu bewerten, wurden in den letzten 30 Jahren kombinierte Boden-Wasserhaushalts-Klima-Stickstoff-Ertragsmodelle entwickelt und eingesetzt, die sich inzwischen für viele Fragen der N-Minderungsstrategien sowie zu Fragen des Klimawandels und Ernährungssicherheit bewährt haben. In Wessolek et al. (2008) wird ein Überblick zu den international verfügbaren und verwendeten Stickstoffmodellen gegeben, darunter auch das hier benutzte HERMES Modell.

In Deutschland hat sich das sog. HERMES Modell etabliert und bewährt, das von Kersebaum (2007) speziell für die nord- und nordostdeutschen Böden, Klima und Anbaubedingungen entwickelt worden ist.

Dieses Modell wurde für die Bewertung der landwirtschaftlichen Kulturen für die Modellböden Sand und Lehm eingesetzt; es berücksichtigt folgende Bedingungen:

- Klimabedingungen auf täglicher Basis
- Bodeneigenschaften: Textur, pF-Kurve, Leitfähigkeit, C_{org}-Gehalt, C/N Verhältnis
- Vegetation: Fruchtfolge, Bodenbedeckung, Wuchshöhe, Pflanzenentwicklung, Durchwurzelungstiefe, Ertragsbildung
- Stickstoff: Mineralisation, Aufnahme durch die Pflanze, Denitrifikation, Nitratgehalt im Boden und Auswaschung
- Wasserhaushalt: Verdunstung, Versickerung, kapillarer Aufstieg
- Wärme: Strahlungsbilanz der Atmosphäre und Bodentemperaturen

In Abb. 2.2 sind die Modellkomponenten und Ebenen von HERMES schematisch zusammengestellt.

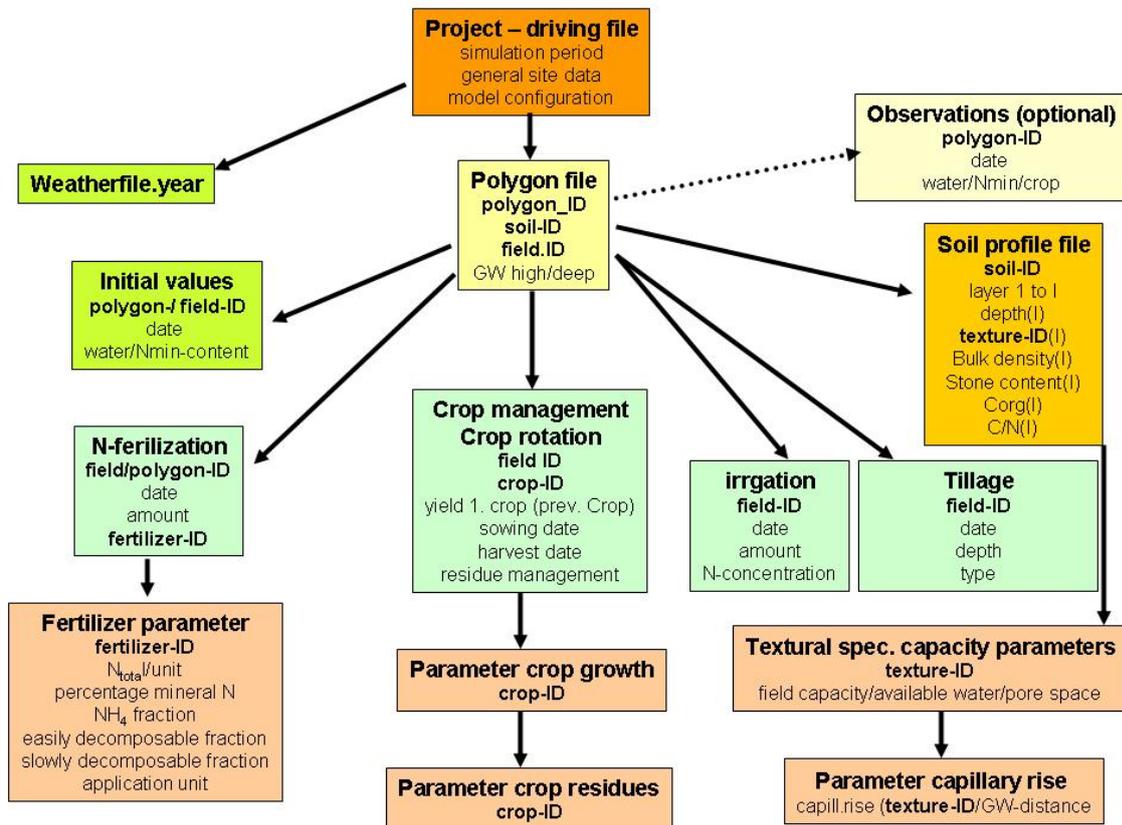


Abb. 2.2: Prinzip-Skizze des HERMES Modells

HERMES (Kersebaum, 2011) ist ein prozessbasiertes Agrarökosystemmodell, welches Pflanzenwachstum, Bodenwasser- und Bodenstickstoffdynamik in Abhängigkeit von Bodeneigenschaften, Witterung und Bewirtschaftung simuliert.

Das Modell zählt in zahlreichen internationalen Modellvergleichen (z.B. Asseng et al. 2013, 2015, Bassu et al. 2014, Rötter et al. 2012) zu den besten Ertragsdynamik Modellen und ist insbesondere im Hinblick auf seine Sensitivität gegenüber Bodenunterschieden ausgewiesen (Wallor et al. 2018). Das Modell simuliert die Bodenprozesse 1-dimensional vertikal mit einem Grundzeitschritt von einem Tag. Das Modell simuliert die Bodenwasserdynamik mittels eines modifizierten Kapazitätsansatzes. Bodenparameter zu Wasserspeicherkapazität und pflanzenverfügbarem Wasser wurden aus den Profilbeschreibungen in Kapitel 3 übernommen. Dies trifft auch auf die für den trockenen Boden angegebene Wärmekapazität zu, die zusammen mit der täglich simulierten Wasserverteilung die Grundlage für die Simulation der Temperaturausbreitung bildet. Die Temperaturleitfähigkeit wird für jede Bodenschicht nach einer Pedotransferfunktion nach Markert et al. (2017) aus der Textur und dem aktuellen Wassergehalt ermittelt. Die Wärmetransportgleichung wird in Stundenauflösung simuliert und auf den Tag aggregiert. Die potenzielle Evapotranspiration wird aus den täglichen Wetterdaten nach Penman-Monteith (Allen et al., 1998) berechnet und entsprechend der Wasserverfügbarkeit im Wurzelraum unter Berücksichtigung pflanzenspezifischer Verdunstungswiderstände auf eine aktuelle Verdunstung korrigiert. Die Verdunstung an der Bodenoberfläche wird anhand der jeweiligen Bodenbedeckung durch die Pflanzen berechnet. Der Kühlungseffekt geht ebenso wie die auf den Boden auftreffende Sonnenenergie in die Temperatursimulation der oberen Bodenschicht ein. Die tägliche Umsetzung des organischen Stickstoffs wird in Abhängigkeit von Temperatur und Bodenfeuchte aus zwei unterschiedlich schnell mineralisierbaren Stickstoffpools simuliert. (Richter et al., 1982), die sich aus dem Humusgehalt des Bodens sowie Ernterückständen und organischen Wirtschaftsdüngerzugaben ableiten. Denitrifikation wird für die oberen 30 cm mittels einer Michaelis-Menten Kinetik basierend auf den Nitratgehalt, der Bodentemperatur sowie dem wassergefüllten Porenraum simuliert. Für die Langzeitabschätzung der Veränderung der organischen Substanz im Boden wird ein konstantes Kohlenstoff- zu Stickstoff-verhältnis (C/N-Verhältnis) angenommen.

Das generische Pflanzenmodell basiert auf dem SUCROS Ansatz (van Keulen et al., 1982) und kann verschiedene Kulturarten, die über externe Dateien parametrisiert werden simulieren. Das Teilmodul simuliert die tägliche Netto-Biomasseentwicklung der Pflanzen auf Basis der täglichen Sonneneinstrahlung und Temperatur aus der Brutto-Fotosynthese abzüglich der Veratmung. Die Partitionierung der Biomasse auf Pflanzenorgane erfolgt entsprechend der Pflanzenentwicklung. Diese wird während der Keimungsphase durch die Bodentemperatur, nach dem Auflaufen durch die Lufttemperatur unter Berücksichtigung der pflanzenspezifischen Tageslängen- bzw. Vernalisationsansprüche gesteuert. Das Wachstum wird bei Wasser- bzw. Stickstoffmangel sowie bei auftretendem Luftmangel bei Wasserstau limitiert.

Simulation der Auswirkungen der Bodenerwärmung

Zur Simulation der Auswirkungen einer Bodenerwärmung wurde eine typische Fruchtfolge aus den wesentlichen Anbaukulturen (Winterweizen-Winterraps-Sommergerste-Silomais) zugrunde gelegt. Zur Vermeidung von Nitratauswaschungsverlusten wurde jeweils vor Sommergerste und Silomais eine winterharte Zwischenfrucht eingeschoben. Die Kalibrierung der Pflanzenparameter erfolgte unter Nutzung der für die Kulturen vorliegenden phänologischen Beobachtungsdaten des Deutschen Wetterdienstes (DWD) sowie anhand der agrarstatistischen Ertragsdaten für den Kreis Segeberg. Zur Erhaltung der organischen Substanz im Boden wurde eine regelmäßige Zufuhr von Stallmist angenommen. Die Mineraldüngung wurde über einen automatischen Düngealgorithmus entsprechend dem Nachlieferungsvermögen des Bodens und des Pflanzenbedarfs jährlich angepasst. Für die Simulation wurden Wetterdaten des Deutschen Wetterdienstes von 1969 bis 2016 verwendet (DWD, 2019).

Zur Equilibrierung des organischen Stickstoffpools in den Böden wurde zunächst eine Einschwingungssimulation von 1969-1990 dem eigentlichen auf Tagesbasis beruhenden Simulationszeitraum von 1990-2016 vorangestellt. Berechnet wurde auf täglicher Basis die jeweilige Pflanzenentwicklung (Höhe, Bodenbedeckung, Blattflächenindex, Blattmasse, Durchwurzelung), Ertrag, sowie der Wasser- und Stickstoffhaushalt für die ortstypische Fruchtfolgen.

Modellierung des Wärmetransports im Boden

Als obere Randbedingung wird die atmosphärische Wärmebilanz auf täglicher Basis in die Berechnungen einbezogen. Das Modell HERMES verwendet dazu die täglichen Wetterdaten der nahegelegenen DWD-Station Hamburg Fuhlsbüttel. Aus den täglichen Minimum- bzw. Maximumtemperaturen T_{\min} bzw. T_{\max} wird ein Stundenprofil der Lufttemperatur an der Bodenoberfläche berechnet. Für die Simulation der Temperaturverteilung im Boden wird als obere Randbedingung neben der Lufttemperatur auch die tägliche Sonneneinstrahlung sowie die durch die simulierte Verdunstung verbrauchte Energie berücksichtigt, d.h. eine Energiebilanz erstellt.

Die Energiebilanz an der Bodenoberfläche wird ferner durch die Albedo des Bodens bzw. den Grad der Bodenbedeckung (B_{cov}) durch die Vegetation beeinflusst. Letztere wird über den simulierten zeitlichen Verlauf des Blattflächenindex (LAI) täglich bestimmt:

$$B_{\text{cov}} = 1 - e^{-\text{LAI}} \quad (2.4)$$

Die Albedo des Bodens wird jeweils über den Wassergehalt der oberen Bodenschicht modifiziert.

Als untere Randbedingung wird im Falle der Referenz (ohne Erdkabel) eine konstante Bodentemperatur in 160 cm Tiefe von 9.2 °C entsprechend der aus den Wetterdaten abgeleiteten mittleren Jahrestemperatur für den Referenzzeitraum angenommen. Für die Simulation mit Erdkabel wurde die konstante Bodentemperatur von 9.2 °C in 160 cm Tiefe um 27.5 bzw. 34.0 °C entsprechend der Differenz zwischen der mittleren und maximalen Temperatur des Erdkabels zu 15 °C (entsprechend den Angaben von Dr. Stammen (s. Bericht I) auf 36.7 (Normallast) bzw. 43.2 °C (Höchstlast) erhöht.

Die vertikal eindimensionale Temperaturverteilung im Boden (T_s) wurde unter Berücksichtigung der instationären Bodenfeuchteverhältnisse mit einer vertikalen Auflösung von 10 cm für jede Schicht i berechnet nach:

$$T_s(i,t+\Delta t) = T_s(i,t) * \alpha_{i,t} * (T_s(i+1,t) - 2*T_s(i,t) + T_s(i-1,t)) * \Delta t / \Delta z^2 \quad (2.5)$$

wobei sich

$$\alpha_{i,t} = \lambda_{i,t} / c w_{i,t} \quad (2.6)$$

berechnet mit den schichtspezifischen Variablen Wärmeleitfähigkeit $\lambda_{i,t}$ und der Wärmekapazität $c w_{i,t}$ zum Zeitpunkt t anhand der physikalischen Angaben zu den Modellböden Sand und Lehm (s. nachfolgendes Kapitel 3). Das natürliche Bodenprofil wurde bei der Berechnung ab einer Tiefe von 90cm durch eine Sandbettung mit Eigenschaften des dort auftretenden feinsandigen Mittelsandes (mSfs), siehe Tab. 3.4 ergänzt.

Da die Simulation vertikal eindimensional erfolgt, entsprechen die simulierten Bodentemperaturen den Temperaturen der Situation vertikal direkt über dem Erdkabel. Aufgrund des fehlenden lateralen Wärmeflusses in die benachbarten Bodenregionen hinein, fallen dadurch die Temperaturerhöhungen in Richtung Bodenoberfläche höher aus als in einer 3D- Simulation. Daher sind die Berechnungen mit dem HERMES-Modell als eine worst-case Situation zu verstehen.

3 Böden in den Bereichen der Erdkabeltrassen

In Abb. 3.1 sind die beiden geplanten Erdkabeltrassen bzw. ihre Verläufe dargestellt. Für die Ableitung der relevanten Bodentypen und -formen konnte, wie in Kap. 2 bereits erwähnt, auf a) die Bodenübersichtskarte 1:250 000 (BÜK 250, 2015) zurückgegriffen werden und b) für den Trassenabschnitt Kisdorferwohld auf die Bodenkarte 1:25.000 (Blatt 2126, Stukenborn, 2009). Eine Bodenkarte im Maßstab 1: 25.000 für den Trassenbereich Henstedt-Ulzburg steht derzeit noch nicht zur Verfügung.

In Abb. 3.2a kann auf der Basis der BÜK 250 die für beide Trassen zu erwartenden Bodentypengesellschaften entnommen werden mit den in Abb. 3.3a dazugehörigen Legende- Einheiten.

Um die beiden Trassen auf die lokal zu erwartenden Bodentypen und ihre räumliche Verbreitung differenzierter zu bewerten, werden die beiden Trassen nachfolgend in die Trassenbereiche Henstedt-Ulzburg und Kisdorferwohld getrennt behandelt. Für beide werden zunächst die Bodentypen und -subtypen vorgestellt sowie die auftretenden Substrate erläutert. Für diesen Schritt wurden zusätzlich die Baugrunduntersuchungen des Ing.-Büros BGA, Braunschweig (2019) verwendet.

Darauf aufbauend werden in Kap. 3.4. drei repräsentative bodenkundliche Standardprofile festgelegt. Für sie bzw. mit diesen physikalisch-hydrologischen Bedingungen werden stellvertretend Berechnungen zum Wärmehaushalt, zum Wasserhaushalt, zum Ertrag sowie zur mikrobiellen Aktivität anhand der Mineralisierung von bodenbürtigem Stickstoff durchgeführt, die im Kapitel 6 vorgestellt werden.

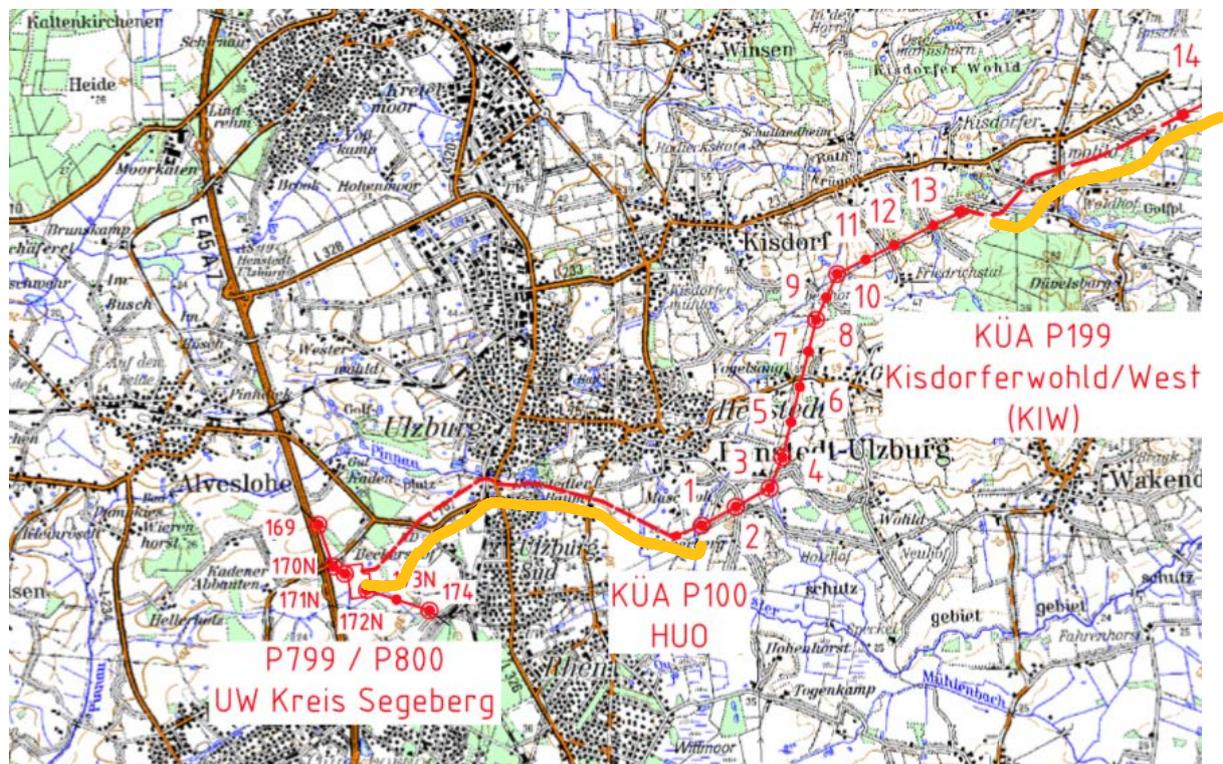


Abb. 3.1: Überblick zur Lage der Erdkabeltrassen Henstedt-Ulzburg (links) und Kisdorferwohld (rechts)

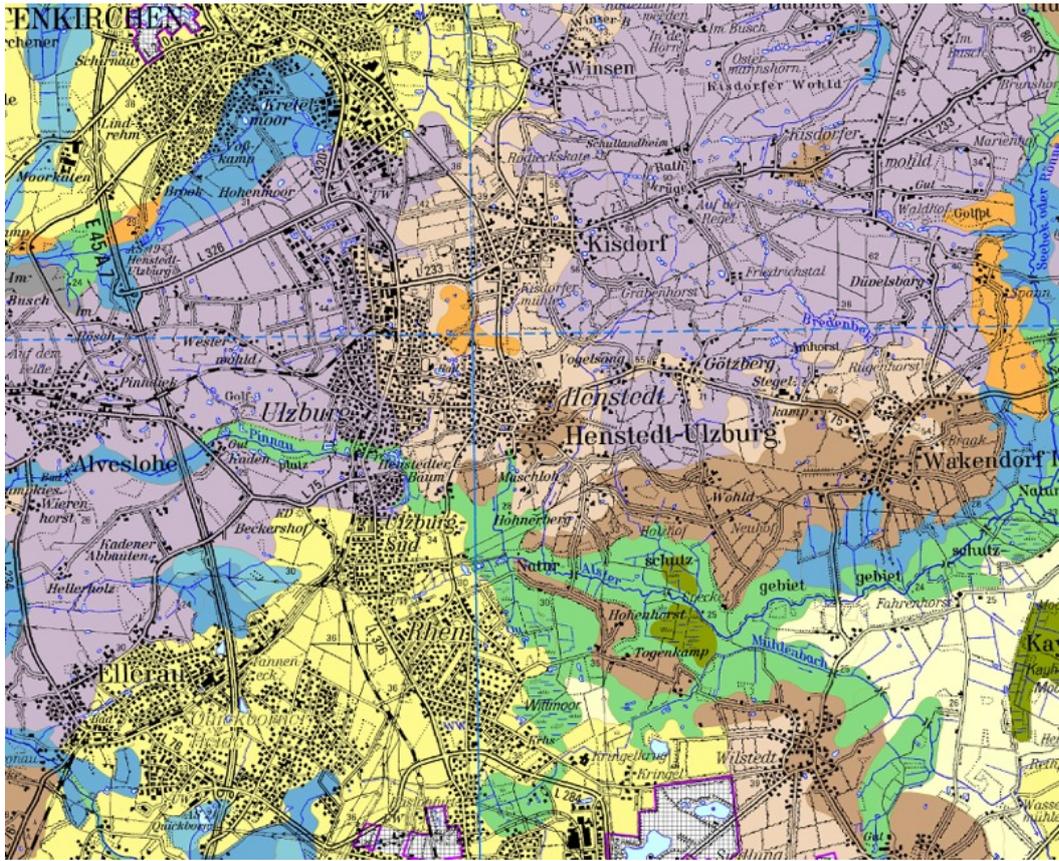


Abb. 3.2a: BÜK 250: Ausschnitt zu den Böden im Raum Henstedt-Ulzburg und Kisdorferwohld, die dazugehörige Legende ist in Abb. 3.3a dargestellt



Abb. 3.2b: Ausschnitt zu den Böden im Raum Kisdorferwohld im Maßstab 1:25.000, die relevanten Legende Einheiten sind in Abb. 3.3b aufgeführt

Bodentypengesellschaften

Bodentypengesellschaften ohne dominanten Wassereinfluss
 Bodentypengesellschaften mit überwiegend gering entwickelten Leitböden

- 1 Lockersyrosem (*Wanderdünen*)
- 2 Regosol (*junge Dünen*)
- 3 Gley-Regosol (*Strandwälle, Dünen*)
- 4 Pararendzina (*Helgoländer Oberland*)
- 5 Rendzina (*Segeberger "Kalkberg"*)

Bodentypengesellschaften mit überwiegend entwickelten Leitböden

- 6 Pseudogley-Tschernosem (*Fehmarn*)
- 7 Braunerde (*Hohe Geest, Vorgeest und Östliches Hügelland*)
- 8 Parabraunerde-Braunerde (*Westteil Östliches Hügelland*)
- 9 Pseudogley-Braunerde (*Hohe Geest, Östliches Hügelland*)
- 10 Gley-Braunerde (*Östliches Hügelland*)
- 11 Parabraunerde (*Östliches Hügelland*)
- 12 Braunerde-Parabraunerde (*Hohe Geest, Östliches Hügelland*)
- 13 Pseudogley-Parabraunerde (*Östliches Hügelland*)
- 14 Podsol (*Hohe Geest, Vorgeest*)
- 15 Braunerde-Podsol (*Hohe Geest, Vorgeest*)
- 16 Pseudogley-Podsol (*Hohe Geest*)
- 17 Gley-Podsol (*Vorgeest, Hohe Geest*)

Bodentypengesellschaften der Kulturosole

- 18 Plaggenesch (*Hohe Geest, Inseln mit Geestkern*)
- 19 Pseudogley-Plaggenesch (*Hohe Geest, Sylt*)
- 20 Gley-Kolluvisol (*Hohe Geest, Östliches Hügelland, Elbufer*)

Bodentypengesellschaften mit dominantem Wassereinfluss

Bodentypengesellschaften der Pseudogleye (Stauwasserböden)

- 21 Pseudogley (*Hohe Geest, Östliches Hügelland*)
- 22 Tschernosem-Pseudogley (*Fehmarn*)
- 23 Pelosol-Pseudogley (*Östliches Hügelland, Bungsberg-Gebiet*)
- 24 Gley-Pseudogley (*Hohe Geest, Östliches Hügelland*)

Bodentypengesellschaften der Marschen und Sände

- 25 Rohmarsch (*Vorland*)
- 26 Kalkmarsch, gering entwickelt (*junge Köge der Hohen Marsch*)
- 27 Kalkmarsch (*Hohe Marsch*)
- 28 Kleimarsch (*Hohe Marsch, Sietland*)
- 29 Dwogmarsch (*Sietland*)
- 30 Knickmarsch (*Sietland*)
- 31 Organomarsch (*Sietland*)
- 32 Strand (*Außensände und vegetationsfreie Strände*)

Bodentypengesellschaften der Gleye (Grundwasserböden) und Auenböden

- 33 Gley (*Hohe Geest, Vorgeest, Östliches Hügelland*)
- 34 flache Kleimarsch über Gley (*Übergang Marsch/Geest*)
- 35 Auengley (*Auenbereiche Hohe Geest und Vorgeest*)
- 36 Vega-Gley (*Auenbereiche der Geest und Östliches Hügelland*)
- 37 Gley-Vega (*Elbaue*)

Bodentypengesellschaften der Moore und Anmoore

Leitbodentyp (*Hauptverbreitungsgebiet*)

- 38 Anmoorgley (*Hohe Geest, Vorgeest, Östliches Hügelland*)
- 39 Niedermoor (*alle Naturräume*)
- 40 flache Kleimarsch über Niedermoor (*Übergang Marsch/Moor*)
- 41 flache Organomarsch über Niedermoor (*Übergang Marsch/Moor*)
- 42 Hochmoor (*alle Naturräume*)
- 43 flache Organomarsch über Hochmoor (*Übergang Marsch/Moor*)
- 44 Organomudde (*Übergang Marsch/Moor*)

Künstlich veränderte Flächen

Bodentypengesellschaften der künstlich veränderten Flächen

- 45 Böden der Abgrabungsflächen (häufig Lockersyroeme und Regosole, z.T. mit Grundwassereinfluss)
 - 46 Böden der Aufschüttungsflächen (häufig Regosole und Pararendzinen)
 - 47 Böden der Aufspülungsflächen (häufig Regosole und Pararendzinen, z.T. mit Grundwassereinfluss)
- Siedlungsgebiete sind grau gekennzeichnet und dunkeln die Flächenfarbe ab

Vertrieb:
 Landesamt für Landwirtschaft,
 Umwelt und ländliche Räume
 des Landes Schleswig-Holstein (LLUR)
 Öffentlichkeitsarbeit / Vertriebsstelle

Hamburger Chaussee 25
 24220 Flintbek
 Telefon: 04347/704-230 - Telefax: 04347/704-702
 e-mail: broschuere@llur.landsh.de
 Internet: <http://www.llur.schleswig-holstein.de>

Topographische Grundlagen:
 Vektordaten des Digitalen Landschaftsmodells 1:250 000 (Ebenen)
 Europäisches Terrestrisches Referenzsystem 1989 (ETRS 89),
 Universale Transversale Mercatorabbildung (UTM)

©GeoBasis-DE 2015

Inhalt:
 Geologischer Dienst
 im Landesamt für Landwirtschaft,
 Umwelt und ländliche Räume
 des Landes Schleswig-Holstein

Die Legendeinheiten sind nach den Leitbodentypen der Bodengesellschaften benannt. In Klammern wird das Hauptverbreitungsgebiet angegeben.

Die Benennung der Bodentypen erfolgt nach Ad-hoc-AG Boden, Bodenkundliche Kartieranleitung, 5. Auflage, Hannover 2005

Abb. 3.3a: Legende zu den Bodentypen der Bodenübersichtskarte BÜK 250 (für beide Trassen)



Abb. 3.3b: Legende zur Bodenkarte 1:25.000 für die Trasse Kisdorferwohld

3.1 Bodentypen und räumliche Situation im Trassenbereich Henstedt-Ulzburg

In Abb. 3.4 ist der genaue Verlauf der geplanten Erdkabeltrasse eingetragen; zur besseren Orientierung dient zusätzlich das Google Maps Bild in Abb. 3.5. Die Trasse führt über Beckershof durch den südlichen und feuchten Bereich der Pinnauniederung, kreuzt dann den weniger bebauten Bereich zwischen Ulzburg und Ulzburg Süd und führt dann weiter durch den grundwasserbeeinflussten Niederungsbereich hin zu den östlich und höher gelegenen Geest Bereichen nördlich des Hohnerbergs.

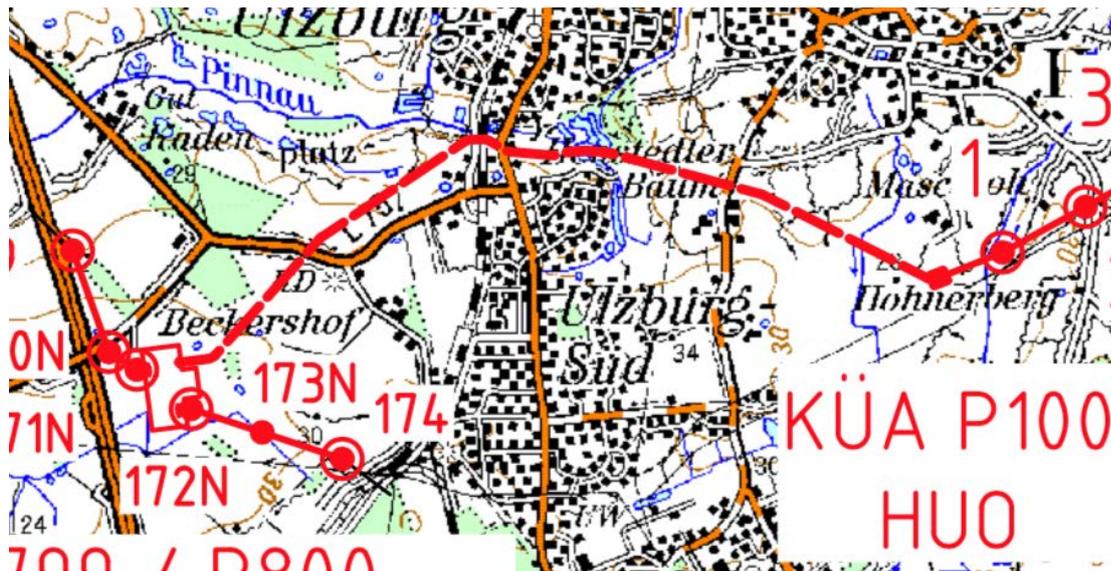


Abb. 3.4: Ausschnitt zur Lage des Trassenbereichs Henstedt-Ulzburg mit Böden dargestellt in Tabelle 3.1

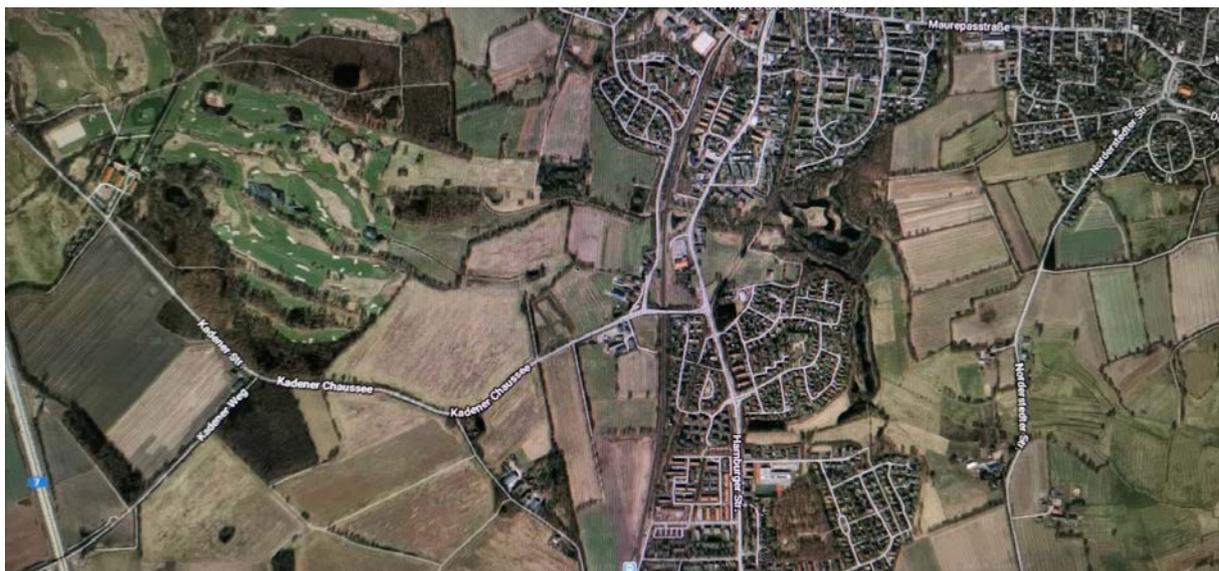


Abb. 3.5: Lage im Raum, Trasse Henstedt-Ulzburg, Google Maps

Die im Trassenbereich Henstedt-Ulzburg anzutreffenden Bodentypengesellschaft bzw. Leit- und Begleitböden gemäß der BÜK 250 (2015) sind in Tabelle 3.1 zusammengestellt.

Symbol Leitbodentyp	
Leitbodentyp 1 (vereinfacht)	Pseudogley-Braunerde
Beschreibung der Bodentypengesellschaft 1 von der Trasse Henstedt-Ulzburg	
Bodentypengesellschaft	Pseudogley-Braunerde mit Braunerde-Parabraunerde, Pseudogley und Pseudogley-Kolluvisol
Leitbodentyp ²⁾	Pseudogley-Braunerde
Flächenanteil des Leitbodentyps	50 %
1. Begleitbodentyp ³⁾	Braunerde-Parabraunerde
Flächenanteil des 1. Begleitbodentyps	15 %
2. Begleitbodentyp	Pseudogley
Flächenanteil des 2. Begleitbodentyps	15 %
3. Begleitbodentyp	Pseudogley-Kolluvisol
Flächenanteil des 3. Begleitbodentyps	20 %
Bodenartenschichtung bis 2m unter Gelände	Lehmsand über tiefem Sandlehm
Schichtung der Ausgangsgesteine der Bodenbildung	Geschiebedecksand über tiefem Geschiebelehm/ -mergel
Stratigraphie der Ausgangsgesteine der Bodenbildung	Weichsel
Symbol Leitbodentyp	
Leitbodentyp 2	Braunerde-Podsol
Beschreibung der Bodentypengesellschaft 2 von der Trasse Henstedt-Ulzburg	
Bodentypengesellschaft	Braunerde-Podsol mit Podsol-Braunerde und Gley-Podsol
Leitbodentyp ²⁾	Braunerde-Podsol
Flächenanteil des Leitbodentyps	60 %
1. Begleitbodentyp ³⁾	Podsol-Braunerde
Flächenanteil des 1. Begleitbodentyps	30 %
2. Begleitbodentyp	Gley-Podsol
Flächenanteil des 2. Begleitbodentyps	10 %
3. Begleitbodentyp	
Flächenanteil des 3. Begleitbodentyps	0 %
Bodenartenschichtung bis 2m unter Gelände	Sand
Schichtung der Ausgangsgesteine der Bodenbildung	Geschiebedecksand über Schmelzwassersand
Stratigraphie der Ausgangsgesteine der Bodenbildung	Weichsel über Saale
Fortsetzung von Tab. 3.1	
Symbol Leitbodentyp	
Leitbodentyp ²⁾ (vereinfacht)	Niedermoor

Beschreibung der Bodentypengesellschaft 3 von der Trasse Henstedt-Ulzburg	
Bodentypengesellschaft	Niedermoor mit Anmoorgley
Leitbodentyp ²⁾	Niedermoor
Flächenanteil des Leitbodentyps	90 %
1. Begleitbodentyp ³⁾	Anmoorgley
Flächenanteil des 1. Begleitbodentyps	10 %
2. Begleitbodentyp	
Flächenanteil des 2. Begleitbodentyps	0 %
3. Begleitbodentyp	
Flächenanteil des 3. Begleitbodentyps	0 %
Bodenartenschichtung bis 2m unter Gelände	Niedermoortorf
Schichtung der Ausgangsgesteine der Bodenbildung	Niedermoortorf
Stratigraphie der Ausgangsgesteine der Bodenbildung	Holozän

Tabelle 3.1: Bodentypengesellschaft im Trassenbereich Henstedt-Ulzburg nach BÜK 250

Baugrunduntersuchungen auf der Trasse Henstedt-Ulzburg nach BGA (2019)

Abb. 3.6 zeigt die Trasse mit den erfolgten Baugrundsondierungen, sie zeigen folgendes Bild:



Abb. 3.6: Bohrpunkte und Bodenarten gemäß Baugrunduntersuchungen entlang der Trasse Henstedt-Ulzburg (Daten vom Ing.-büro BGA, Braunschweig, 2019)

Die dominant auftretenden Bodenarten lassen sich in folgende Kategorien zusammenfassen:

- Kategorie I: Torf auf Sand bei insgesamt 6 Sondierungen in den Pinnauswiesen (violett-gelbe Kreise)
- Kategorie II: Sand: bei insgesamt 35 Sondierungen (gelbe Kreisflächen)
- Kategorie III: Sand auf Geschiebelehm: bei insgesamt 14 Sondierungen (gelb-blaue Kreisflächen)
- Kategorie IV: Geschiebemergel: bei 25 Sondierungen (blaue Kreisflächen)

Grundwasserverhältnisse auf der Trasse Henstedt-Ulzburg

Im Verbreitungsbereich des Geschiebemergels wurde kein zusammenhängender Grundwasserspiegel festgestellt; in den Sanden wurden zu verschiedenen Zeiten unterschiedliche Grundwasserstände gemessen:

- KRB 11-36: >3m
- KRB 43-55: 0,4-2,2m ("Pinnauer-Teiche")
- KRB 48-82: 0,5->3m

Fazit

Es lässt sich die bodenkundliche Situation wie folgt zusammenfassen: Die Trasse Henstedt-Ulzburg ist durch sehr abwechslungsreiche geologische Rahmenbedingungen geprägt und hat sowohl terrestrische, d.h. vom Grundwasser unbeeinflusste Standorte wie Braunerden, Podsol-Braunerden aus Sand als auch vom Stauwasser geprägte Böden, d.h. sandig-schluffige Oberböden über Lehme bis hin zu Geschiebemergel (Pseudogleye).

Darüber hinaus sind in der Pinnauniederung organische Böden in Form von Niedermooren typisch; diese sind im Oberboden stark zersetzt, im Unterboden deutlich geringer und in größeren Tiefen zumeist unterlagert von Sanden oder lehmig-schluffigen Sanden, die wiederum auf Geschiebelehm liegen können. Die Niedermoore sind vom Grundwasser sowie der nördlich verlaufenden Pinnau beeinflusst; vereinzelt und können Anmoor-Gleye und Gleye in den Randbereichen der Niederungen auftreten.

3.2 Bodentypen und räumliche Situation auf der Trasse Kisdorferwohld

Für die Trasse Kisdorferwohld konnte neben der BÜK 250 auch die Bodenkarte 1:25.000 genutzt werden. Zunächst wird in Abb. 3.7 die Lage des Trassenbereichs und in Abb. 3.8 die Lage im Raum verdeutlicht. In Tabelle 3.2 sind dann die vorherrschenden Bodentypen und Subtypen charakterisiert.

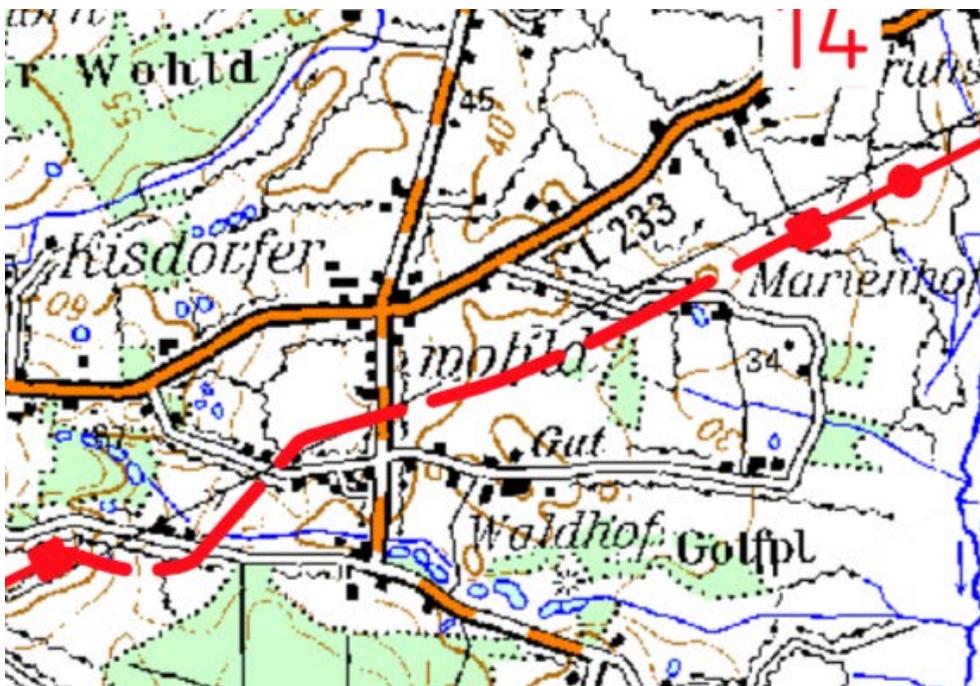


Abb. 3.7: Ausschnitt zur Lage des Trassenbereichs Kisdorferwohld



Abb. 3.8: Lage im Raum, Luftbild, Quelle: Google Maps

Symbol Leitbodentyp	
Leitbodentyp ²⁾ (vereinfacht)	Pseudogley
Beschreibung der Bodentypesgesellschaft 1 auf der Trasse Kisdorferwohld	
Bodentypesgesellschaft	Pseudogley mit Pseudogley-Parabraunerde und Kolluvisol
Leitbodentyp ²⁾	Pseudogley
Flächenanteil des Leitbodentyps	60 %
1. Begleitbodentyp ³⁾	Pseudogley-Parabraunerde
Flächenanteil des 1. Begleitbodentyps	20 %
2. Begleitbodentyp	Kolluvisol
Flächenanteil des 2. Begleitbodentyps	20 %
Bodenartenschichtung bis 2m unter Gelände	Lehmsand über Sandlehm
Schichtung der Ausgangsgesteine der Bodenbildung	Geschiebedecksand über Geschiebelehm/ -mergel
Stratigraphie der Ausgangsgesteine der Bodenbildung	Weichsel
Bodentypenname für die Farblegende	Pseudogley - Podsol
Bodensystematische Einheit	SS-PP
Dominante Gesteinsgruppe	Böden aus Ablagerungen des Glazials und Periglazials
Bodenartenschichtung	Böden aus Sand über Lehm

Bodenausgangsgestein	Sa-Sp//Sfl/Lg(Mg)
Grundwasserstufe	0: Grundwasser tiefer 2m unter Flur
Anthropogene Veränderungen, Besonderheiten	
Bodenform	Pseudogley-Podsol aus Flugsand bis Geschiebedecksand über tiefer sandiger Fließerde über tiefem Geschiebelehm, stellenweise Geschiebemergel
Symbol Leitbodentyp	
Leitbodentyp ²⁾ (vereinfacht)	Braunerde
Beschreibung der Bodentypengesellschaft 2 auf der Trasse Kisdorferwohld	
Bodentypengesellschaft	Braunerde mit Pseudogley-Braunerde und Kolluvisol
Leitbodentyp ²⁾	Braunerde
Flächenanteil des Leitbodentyps	60 %
1. Begleitbodentyp ³⁾	Pseudogley-Braunerde
Flächenanteil des 1. Begleitbodentyps	20 %
2. Begleitbodentyp	Kolluvisol
Flächenanteil des 2. Begleitbodentyps	20 %
3. Begleitbodentyp	
Flächenanteil des 3. Begleitbodentyps	0 %
Bodenartenschichtung bis 2m unter Gelände	Lehmsand über Sand
Schichtung der Ausgangsgesteine der Bodenbildung	Geschiebedecksand über Schmelzwassersand
Stratigraphie der Ausgangsgesteine der Bodenbildung	Weichsel

Tabelle 3.2: Bodentypengesellschaften im Kisdorferwohld gemäß der BÜK 250 sowie der Bodenkarte 1:25.000, s. Abb. 3.2b

Als zusätzliche Information wurden wiederum die Baugrunduntersuchungen des Ing.-büros BGA, Braunschweig genutzt (Abb. 3.9); sie zeichnen folgendes Bild:

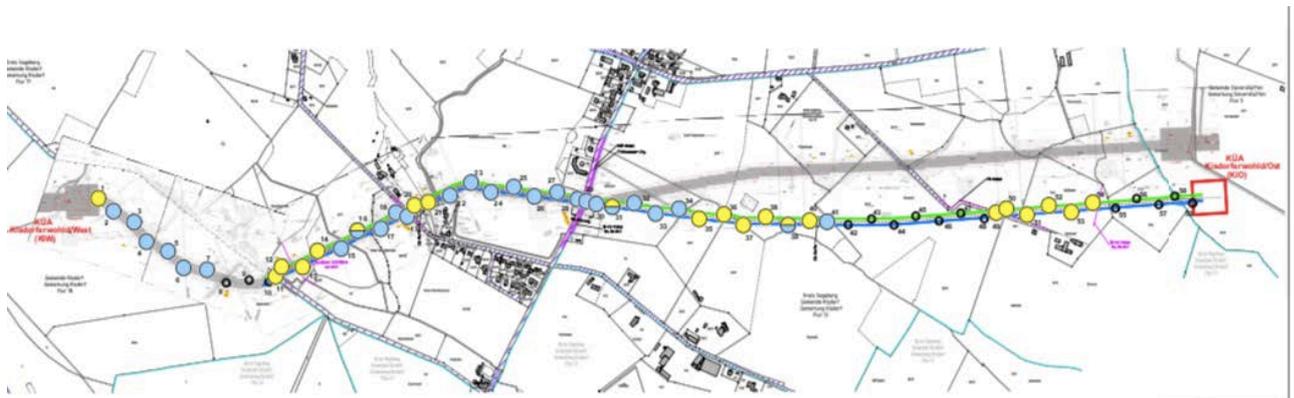


Abb. 3.9: Bohrpunkte und Bodenarten gemäß Baugrunduntersuchungen entlang der Trasse Kisdorferwohld

Die Baugrunduntersuchungen ergeben folgende drei Kategorien bei den Bodensubstraten:

Kategorie I: Sand bei insgesamt 18 Sondierungen (gelbe Kreisflächen)

Kategorie II: Sand auf Geschiebemergel: bei 3 Sondierungen (gelb-blaue Kreisflächen)

Kategorie III: Geschiebemergel: 23 Sondierungen (blaue Kreisflächen)

Grundwasserverhältnisse auf der Trasse Kisdorferwohld

Der Geschiebelehm bzw. -mergel ist bereichsweise mit geringer Grundwasserführung, Wasserstände von 0,4 bis 2,5 m unter Geländeoberfläche sind typisch, bei den Sanden treten Wasserstände von 0,4 bis 2,2 m, örtlich auch von >3 m auf. Die Grund- und Stauwasserstände können in beiden Kabelstrecken bereichsweise bis dicht unter Geländeoberfläche ansteigen, sofern keine Felldränungen vorliegen.

Fazit

Auf der geplanten Kabeltrasse Kisdorferwohld kann festgehalten werden, dass im Wesentlichen zwei dominante Bodentypen flächenhaft auftreten: Erstens von Stauwasser beeinflusste Pseudogleye aus Lehmsand und Geschiebelehm/-mergel sowie zweitens Sandstandorte aus Geschiebesanden bzw. Schmelzwassersanden, die z.T. mit Flugsanden aus dem Holozän überdeckt worden sind.

3.3 Bodenphysikalische Bewertung und Ableitung von Modellböden

Nachfolgend erfolgt für beide Trassenverläufe eine bodenphysikalische Bewertung der in den Tabellen 3.1 und 3.2 vorgestellten Bodentypen. Hauptkriterium dafür ist das dominant auftretende geogene Ausgangssubstrat der Bodenbildung und die dafür kennzeichnende Bodenart, d.h. die Zusammensetzung an Sand-, Schluff- und Tonanteilen. Hinzu kommen die von der Tiefenlage abhängige Lagerungsdichte und der Gehalt an organischer Bodensubstanz. Als weitere Kriterien für die Ableitung der Modellböden ist a) die Nutzungsform der Standorte (Acker oder Grasland) und b) ob die Standorte vom Grundwasser beeinflusst werden oder nicht.

Zur Entwicklung der Modellböden wurden im Wesentlichen folgende fünf Quellen genutzt:

1. Die im Jahr 2019 vom Landesamt für Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume herausgegebene Veröffentlichung „Die Böden Schleswig- Holsteins“ (Burbaum et al., 2019).
2. Angaben zu den Baugrundverhältnissen, durchgeführt vom Ingenieurbüro BGA mit Sitz in Braunschweig.
3. Die Bodenkarten BÜK 250 sowie die Bodenkarte 1:25.000, (Blatt 2126 Stukenborn, 2009).
4. Die im Exkursionsführer der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft physikalisch und chemisch beschriebenen, typischen Böden dieses Bundeslandes.
5. Die Deutsche Bodenkundliche Kartieranleitung (KA5) in Verbindung mit dem Sonderheft "Bodenphysikalische Kennwerte" für die Praxis (Renger et al., 2009)

Sandige und lehmige Böden treten in großer Dominanz auf beiden Trassen als Hauptbodenarten auf, daher wurden dafür repräsentative Substrathorizontgruppen und Tiefenverläufe abgeleitet. Zusätzlich treten organische Böden in der Pinnauniederung auf. Nach Auswertung der Bodentypen aus den Tabelle 3.1 und 3.2 entsprechend der o.a. Kriterien werden für diese Studie **drei** typische und repräsentative Modellböden bzw. Substrattypen ausgewiesen, für die im Weiteren detaillierte Modellstudien zum Wärmehaushalt vorgenommen werden, dies sind:

1. **Sande** mit sandig-schluffigen Oberböden (fsmS, Su2), die typisch sind für Braunerden, podsolige Braunerden und Podsole, entstanden aus Geschiebesanden, fluviatilen Sanden oder Flugsanden. In der Regel sind die Standorte grundwasserfern und werden als Acker genutzt, die Humusgehalte sind oft erhöht. In tieferliegenden Bereichen können die sandigen Standorte auch grundwasserbeeinflusst sein und haben dann den Charakter von Gleyen.

2. **Lehme** im Oberboden (Su2, Sl2, Sl3) 50cm bis 70 cm über Geschiebelehm bzw. Geschiebemergel (Ls3, Ls4), typisch sind Pseudogley und Pseudogley-Braunerden bis hin zu Pseudogley-Parabraunerden. Sie werden je nach Höhe und Mächtigkeit des wasserleitenden Horizonts und vorhandener Dränung als Acker- oder Grünland genutzt.
3. **Niedermoor** mit Sand unterlagert mit Grundwassereinfluss, als Grünland genutzt.

In einem zweiten Schritt wurden für diese drei Modellböden die physikalischen Kennwerte: Porengrößenverteilung, Lagerungsdichte und Wasserleitfähigkeit nach Angaben der Bodenkundlichen Kartieranleitung (KA5) sowie anhand der Ergebnisse des Arbeitskreises der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft (DBG) „Bodenphysikalische Kennwerte“ (Renger et al., 2009) abgeleitet. Die Wärmeleitfähigkeiten (λ) der Bodensubstrate wurde zugeordnet nach Textur und Lagerungsdichte nach einem neu entwickelten - und inzwischen sehr gut etablierten Mess- und Berechnungsverfahren von Markert et al. (2015, 2017).

Es werden nachfolgend die repräsentativen drei Modellböden vorgestellt, für die im Anschluss numerische Modellszenarien zum Bodenwasser- und Wärmehaushalt, zur mikrobiellen Aktivität und Ertragsentwicklung mit und ohne Einfluss einer 380 kV Erdkabelanlage berechnet worden sind. Bei den Berechnungen zum Wasserhaushalt der Sand- und Lehmstandorte wird zusätzlich unterschieden zwischen grundwassernahen (Gley) und fernen Bedingungen (Braunerde etc.).

Modellboden Nr. 1: Braunerde bis podsolige Braunerde aus Sand

Geologisches Ausgangsmaterial: Sandige eiszeitliche Ablagerungen, wie Schmelzwassersande, Geschiebedecksande, Geschiebesande, Beckensande bis -schluffe.



Abb. 3.10: Typisches Braunerde Bodenprofil, nach Burbaum et al., 2019

Tiefe, cm	Bodenart	Humusstufe	TRD	Gefüge	pH	Durchwurzelung	Geologie
0-37	Su2	h3	1,42	sub	5,9	sehr stark	qw, Sp
37-68	fSms	ho	1,59	sub-ein	6,1	mittel	qw, Sp
68-100	fSms	ho	1,62	ein	6,1	gering	qw, Sgf
>100	mSfs	ho	1,7	ein	6,1	keine	qw, Sgf

Tabelle 3.3: Profileigenschaften von Leitprofil Nr. 1, nach Burbaum et al., 2019

Aus der Beschreibung der Profileigenschaften wurden folgende physikalischen Eigenschaften nach KA5 und Renger et al. 2009 abgeleitet:

Tiefe, cm	Bodenart	TRD	GPV Vol. %	pF 1,8 Vol. %	pF 4.2 Vol. %	Kf cm/d (**)	Wärmeleitfähigkeit (λ) $W m^{-1} K^{-1}$			Wärmekapazität C $J cm^{-3} K^{-1}$
							θ_s	pF=1.8	pF=4.2	
0-37	Su2	1,44	45,6	32*)	5,7	125	2,61	2,37	1,4	2,5
37-68	fSms	1,59	40,0	19,0	3,0	125	2,72	2,16	1,05	2,1
68-100	fSms	1,62	38,9	19,0	3,0	100	2,78	2,22	1,07	2,1
>100	mSfs	1,7	35,8	14,4	2,0	150	2,92	2,17	0,95	1,7

Tabelle 3.4: Physikalische Bodeneigenschaften von Leitprofil Nr. 1

*) Unter Berücksichtigung des Humusgehalts nach Renger et al., 2009, Tab. 17A, S.38

**) wie oben, Tab. 13, S. 27, TRD: Trockenmasse ($g cm^{-3}$), GPV: Gesamtporenvolumen= Porosität, Vol. Wassergehalt bei den pF Stufen 1.8 und 4.2, Kf: gesättigte Wasserleitfähigkeit (cm/d), Wärmeleitfähigkeit λ ($W m^{-1} K^{-1}$) bei θ_s , pF 1,8 und pF 4.2, Vol. Wärmekapazität C, nach van Wijk and de Vries, 1963 sowie Hillel, 1998.

Modellboden Nr. 2: Pseudogleye aus Lehmsand über Geschiebelehm/-mergel

Geologisches Ausgangsmaterial: Schluffige bis lehmige Sande über Geschiebelehm/mergel.



Abb. 3.11: Typisches Pseudogley Bodenprofil nach Burbaum et al., 2019

Tiefe, cm	Bodenart	Humusstufe	TRD	Gefüge	pH	Durchwurzelung	Geologie
0-10	Su2	h3	1,37	sub	4,8	stark	qw, Sp
10-27	Su2	h3	1,31	sub	5,1	mittel	qw, Sp
27-51	Ls3	ho	1,34	sub	5,1	mittel	qw, Sgf
51-100	Ls3	ho	1,78	pol	5,1	gering	qs, Lg
>100	Ls3	ho	1,8	pol	6,1	keine	qs, Lg

Tabelle 3.5: Profileigenschaften von Leitprofil Nr. 2, nach Burbaum et al., 2019

Aus der Beschreibung der Profileigenschaften wurden folgende physikalischen Eigenschaften nach KA5 und Renger et al, 2009 abgeleitet:

Tiefe, cm	Bodenart	TRD g cm ⁻³	GPV Vol.%	pF 1,8 Vol.%	pF 4.2 Vol.%	Kf cm/d (**)	Wärmeleitfähigkeit (λ) W m ⁻¹ K ⁻¹			Wärme- kapazität C J cm ⁻³ K ⁻¹
							θ_s	pF 1.8	pF 4.2	
0-10	Su2	1,4	47,2	32*	6	150	2,63	2,38	1,42	2,3
10-27	Su2	1,3	50,9	34*	6	185	2,69	2,42	1,42	2,1
27-51	Ls3	1,3	50,9	32	16	60	1,65	1,48	1,23	2,1
51-100	Ls3	1,8	32,1	31	14	10	1,98	1,96	1,62	1,7
>100	Ls3	1,8	32,1	31	14	10	1,98	1,96	1,62	1,7

Tabelle 3.6: Physikalische Bodeneigenschaften von Leitprofil Nr. 2

*) Unter Berücksichtigung des erhöhten Humusgehalts nach Renger et al., 2009, Tab. 17A, S.38

**) Tab. 13, S. 27, TRD: Trockenmasse (g cm⁻³), GPV: Gesamtporenvolumen, Porosität, Theta: Wassergehalt bei den pF Stufen 1.8 und 4.2, Wärmeleitfähigkeit λ (W m⁻¹ K⁻¹) bei θ_s , pF 1,8 und pF 4.2

Vol. Wärmekapazität C, nach van Wijk and de Vries, 1963 sowie Hillel, 1998.
Modellboden Nr. 3: Niedermoor über Sand

Geologisches Ausgangsmaterial: Niedermoortorf über Sand, Nutzung als Grasland.

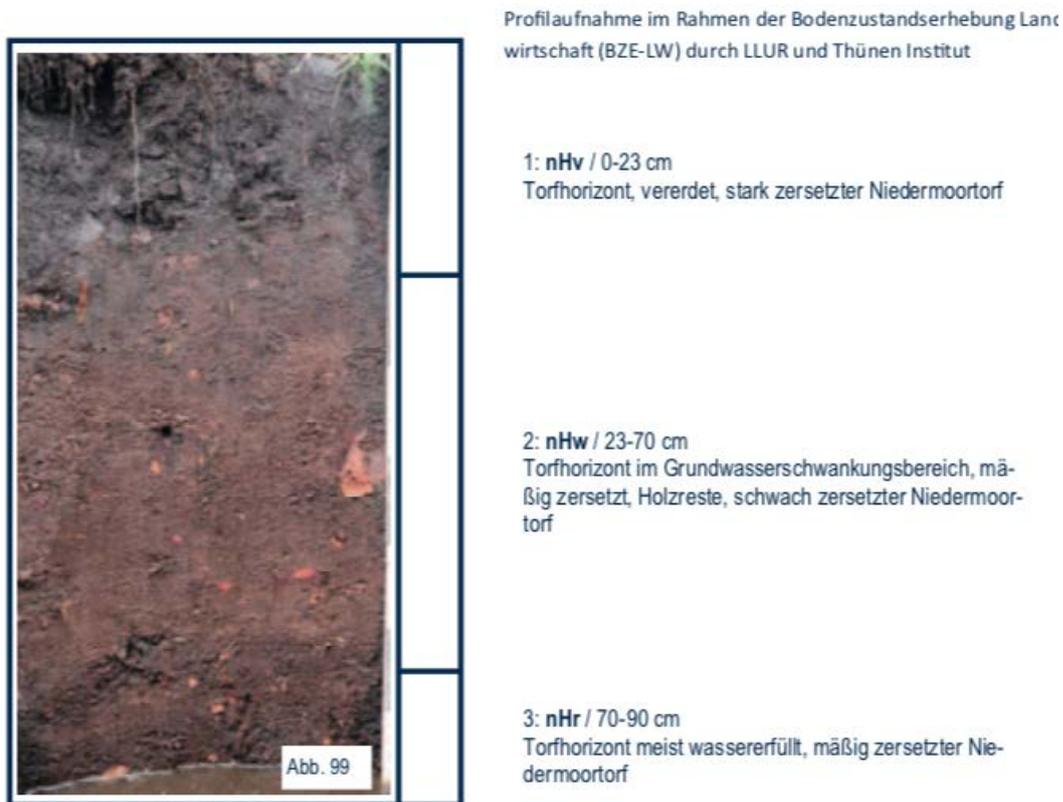


Abb. 3.12: Typisches Niedermoor Bodenprofil nach Burbaum et al., 2019

Tiefe, cm	Bodenart	Humus-stufe	Zersetzungs-stufe	Durchwurzelung	Geologie
0-23	Hn	h7	9-10	stark	qh, Hn
23-70	Hn	h7	5-6	gering	qh, Hn
70-100	Hn	h7	3-4	keine	qh, Hn
>100	S	h0	-	keine	qs, Lg

Tabelle 3.7: Profileigenschaften von Leitprofil Nr. 3, nach Burbaum et al., 2019

Aus der Beschreibung der Profileigenschaften wurden folgende physikalischen Eigenschaften nach KA5 und Renger et al, 2009 abgeleitet:

Tiefe, cm	Bodenart	TRD	GPV Vol. %	pF 1,8 Vol. %	pF 4.2 Vol. %	Kf cm/d	Wärmeleitfähigkeit λ $W m^{-1} K^{-1}$			Wärme-kapazität C $J cm^{-3} K^{-1}$
							θ_s	pF=1.8	pF=4.2	
0-23	Hn	0,36	79	55	28	10	0,60	0,40	0,23	3,36
23-70	Hn	0,31	82	68	30	40	0,55	0,44	0,25	3,99
70-100	Hn	0,20	88	73	39	10	0,58	0,50	0,30	4,83
>100	fSms	1,70	40	16	6	120	2,75	2,6	2,2	2,94

Tabelle 3.8: Physikalische Bodeneigenschaften von Leitprofil Nr. 3

TRD: Trockenrohgewicht (g cm^{-3}), GPV: Gesamtporenvolumen, Porosität, Theta: Wassergehalt bei den pF Stufen 1.8 und 4.2, Wärmeleitfähigkeit λ bei θ_s , pF 1,8 und pF 4.2, Vol. Wärmekapazität C, nach van Wijk and de Vries, 1963 sowie Hillel, 1998.

Die in den Bodenprofilen vorkommenden mineralischen Substrate wurden folgende van Genuchten-Mualem- Parameter bestimmt (Tabelle 3.9).

Name	θ_r	θ_s	α	n
Su2	0	0.3786	0.20387	1.23473
fSms	0	0.4095	0.15041	1.33576
mSfs	0	0.3886	0.26188	1.35331
Ls3	0.07284	0.4092	0.06835	1.20501

Tabelle 3.9: Hydraulische Bodenparameter (van Genuchten-Mualem) der Mineralbodensubstrate

Die Ableitung der physikalischen Eigenschaften der Niedermoorbodenhorizonte erfolgte unter Berücksichtigung von Forschungsergebnissen an Torfmodellsubstraten, dargestellt in Tabelle 3.10 und Tabelle 3.11. Die Zuordnung erfolgte entsprechend nach Substrattyp und Zersetzungsstufe, die bei den auftretenden Niedermooren von oben H9-10 (stark zersetzt) nach unten stark abnimmt (H4-5), siehe auch Burbaum et al., 2019.

Table . Soil physical parameters of substrate-horizon-groups of drained and agriculturally used fen soils (standard deviation in brackets).

X = ignition loss, P = porosity, AC = air capacity, AWC = available water capacity (pF 1.8 to pF 4.2), GPII = $\emptyset < 50 - 10 \mu\text{m}$, MPI = $\emptyset < 10 - 3 \mu\text{m}$

Tabelle . Bodenphysikalische Kennwerte von Substrat-Horizont-Gruppen entwässerter und landwirtschaftlich genutzter Niedermoore (in Klammern Standardabweichungen).

X = Glühverlust, P = Porosität, AC = Luftkapazität, AWC = nutzbare Feldkapazität (pF 1.8 bis pF 4.2), GPII = $\emptyset < 50 - 10 \mu\text{m}$, MPI = $\emptyset < 10 - 3 \mu\text{m}$

Horizon	Kind of peat	Source	n	X M.-%	dB g cm^{-3}	P V.-%	AC V.-%	AWC V.-%	GPII V.-%	MP V.-%
nHm	Strongly earthified	own	10	76 ^a (2)	0.36 ^a (0.04)	77 ^a (4)	13 ^{ab} (4)	29 ^a (5)	9 ^{ab} (4)	20 ^a (6)
	Peat, X < 70 M.-%	Zeitz (1992)	79	–	–	79 (3)	24 (8)	27 (6)	6 (9)	21 (7)
nHv	Earthified Peat, X < 70 M.-%	Own	24	80 ^b (3)	0.31 ^a (0.06)	80 ^a (3)	11 ^a (6)	31 ^a (9)	6 ^{ab} (4)	24 ^a (7)
		Zeitz (1992)	79	–	–	82 (5)	14 (6)	38 (13)	7 (6)	39 (12)
nHa	Reed-Sedge- Mixed-Peat, X < 80 M.-%	own	13	86 ^c (2)	0.20 ^b (0.03)	87 ^b (2)	13 ^{ab} (4)	43 ^b (8)	4 ^a (4)	38 ^b (6)
		Zeitz (1992)	49	–	–	88 (3)	16 (7)	42 (11)	7 (6)	35 (9)
nHt	Reed-Sedge- Mixed-Peat, X < 80 M.-%	own	16	86 ^c (2)	0.18 ^{bc} (0.03)	88 ^{bc} (2)	12 ^{ab} (3)	49 ^b (6)	8 ^{ab} (4)	39 ^b (4)
		Zeitz (1992)	30	–	–	88 (3)	15 (7)	44 (10)	9 (7)	35 (11)
nHr	Reed-Sedge- Mixed-Peat, X < 80 M.-%	own	13	85 ^c (2)	0.14 ^c (0.02)	91 ^c (1)	18 ^b (5)	50 ^b (8)	9 ^b (5)	30 ^b (10)
		Zeitz (1992)	29	–	–	91 (2)	14 (6)	58 (4)	17 (10)	42 (7)

Identical letters refer to statistically not confirmable differences between the characteristic values of peat groups from own evaluations ($p \geq 0.05$). Unequal letters refer to statistically secured differences between the respective characteristic values of peat groups from the own survey ($p \leq 0.05$).

Tabelle 3.10: Bodenphysikalische Kennwerte von Moorböden

Ungesättigte hydraulische Leitfähigkeit der untersuchten Torfe in Abhängigkeit der pedogenen Entwicklung.
Mittelwerte, in Klammern Standardabweichungen, n = Anzahl der Horizonte, a = 2 Horizonte, Hn = Torf geringer bis mittlerer Zersetzung, Hav = vererdeter Torf, Ham = vermulmter Torf

Kind of peat	n	P [Vol.-%]	X [M.-%]	dB [g cm ⁻³]	Hydraulic conductivity [mm d ⁻¹] at				
					30 hPa	60 hPa	100 hPa	150 hPa	300 hPa
Ham	6	75 (2)	75 (5)	0.39 (0.05)	10.4 (8.9)	4.9 (3.8)	1.6 (1.0)	0.5 (0.4)	0.05 (0.03)
Hav	6	78 (3)	77 (2)	0.34 (0.05)	7.3 (3.2)	3.6 (2.9)	0.9 (0.6)	0.4 (0.2)	0.08 (0.06)
Hn	8	87 (3)	83 (3)	0.20 (0.04)	7.4 (6.0)	2.2 (1.6)	0.9 (0.9)	0.4 (0.3)	0.12 (0.09)

Tabelle 3.11: Hydraulische Charakterisierung von Niedermoorböden

Quellen für die Angaben in Tabelle 3.10 und Tabelle 3.11: Schwärzel, K., M. Renger, R. Sauerbrey & G. Wessolek (2002): Soil physical characteristics of peat soils. J. Plant Nutr. Soil Sci., 165, 479-486.

3.4 Bodenreferenztemperaturen (ohne Kabeleinfluss)

In diesem Kapitel werden Angaben zu Bodentemperaturen im Untersuchungsgebiet getroffen, die als Referenz und zur Einordnung für den berechneten, kabelinduzierten Bodenerwärmung zu betrachten sind. Sie stammen von den hauptamtlich betriebenen Stationen des DWDs (nähere Erläuterungen finden sich in Kapitel 2 und 4).

In Abb. 3.13 sind die mittleren, langjährigen Bodentemperaturen dargestellt und in Abbildung 3.14 im Vergleich dazu die Bodentemperaturen eines extrem warmen Jahres (2018).

Im langjährigen Mittel sind die Bodentemperaturen im Untersuchungsgebiet im Vergleich zu anderen Regionen Deutschlands eher als relativ kühl und ausgeglichen einzuordnen: Bodenfröste treten kaum auf und sehr hohe Bodentemperaturen von >25 Grad C im belebten Oberboden (5-20 cm) nur in Hitzejahren. Natürlich können an vereinzelt Tagen- und Dekaden an der direkten Bodenoberfläche auch höhere Temperaturen auftreten, wie sie in Abb. 3.15 für einen Geeststandort und für ein Moor in Schleswig-Holstein gemessen worden sind.

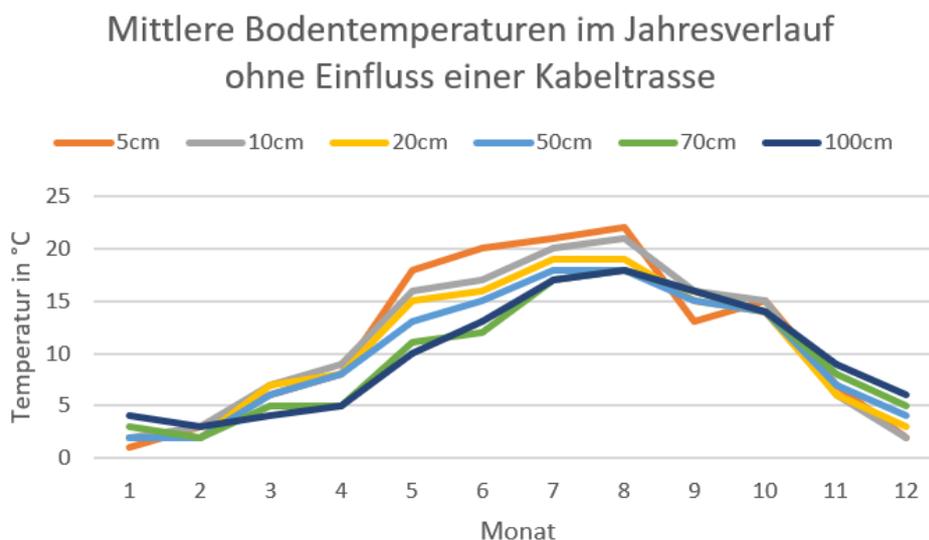


Abb. 3.13: Mittlere Bodentemperaturen im Jahresverlauf, ohne Einfluss einer Kabeltrasse (DWD)

Bodentemperaturen im Jahr 2018 ohne Einfluss einer Kabeltrasse

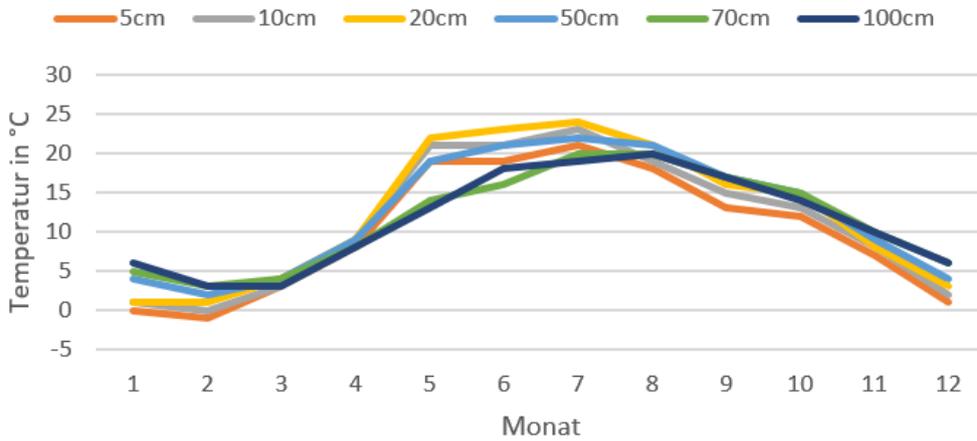


Abb. 3.14: Mittlere Bodentemperaturen von 2018 im Jahresverlauf, ohne Einfluss einer Kabeltrasse (DWD)

Abb. 3.15 zeigt einen typischen Tagesgang der Lufttemperatur und die daraus folgenden Bodentemperaturen im Hochsommer (August) für zwei unterschiedliche Böden bzw. Standorte: Ein sandiger Geeststandort (links) im Vergleich zu einem Hochmoorstandort. Es wird deutlich, dass bei beiden Standorten die Bodentemperaturen mit zunehmender Bodentiefe abnehmen und gedämpfter ausfallen; ab einer Bodentiefe von ca. 50 cm sind die Tageszeitunterschiede kaum noch zu erkennen. Im Mittel liegen die Bodentemperaturen im Moor etwas niedriger als beim Sand mit einer Ausnahme, der Oberflächentemperatur. Sie fällt höher aus und entsteht durch die dunkle Farbe des Torfs, der deutlich mehr Strahlung absorbiert als der relativ helle Sandboden.

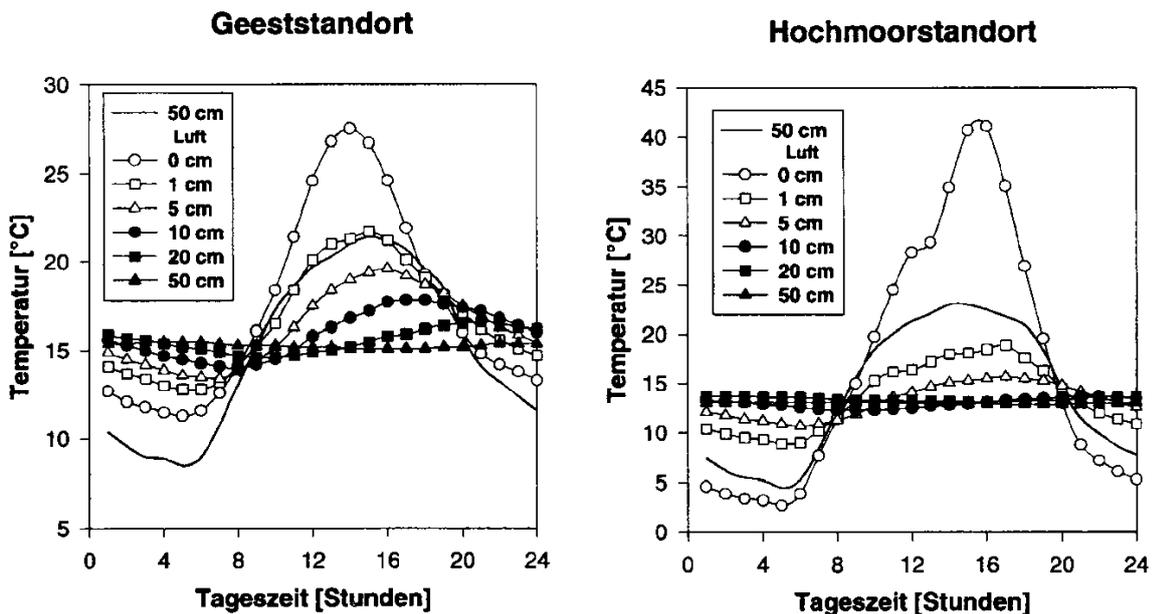


Abb. 3.15: Tagesgang der Luft- und Bodentemperaturen für einen mineralischen (links) und organischen Standort (rechts) in Schleswig-Holstein (nach Miess, 1968)

4 Klimabedingungen und Bodenwasserhaushalt

4.1 Langjährige Klima- und Wasserhaushaltsbedingungen

Das Klima im Untersuchungsgebiet gilt im deutschlandweiten Vergleich als relativ ausgeglichen (wenig Extreme) und ozeanisch geprägt; entsprechend den Angaben des Deutschen Wetterdienstes (DWD) ist es relativ feucht mit ungefähr 800 mm Jahresniederschlägen, einer Durchschnittstemperatur von 8.8 Grad C, einer positiven klimatischen Jahreswasserbilanz von 230,6 mm und einem relativ geringem Wasserbilanzdefizit im Sommer von -63,3 mm. Im langjährigen Mittel treten nur zwei Hitzetage im Jahr auf mit Temperaturen von >30 Grad C und im Winterhalbjahr liegen nur an 7-8 Tagen Schnee.

Dies führt dazu, dass im Mittel der Jahre das klimatische Wasserbilanzdefizit in der Vegetationszeit gut durch den Bodenwasservorrat ausgeglichen wird und nur in sehr trockenen Jahren (wie 2018) mit einer stärkeren Bodenaustrocknung und ggf. Ertragseinbußen zu rechnen ist. Abb. 4.1 zeigt diesen Zusammenhang anhand der Klimatischen Wasserbilanz (= Niederschlag minus potentielle Verdunstung) im Sommerhalbjahr für ein mittleres Jahr (2003) im Vergleich zum Extremjahr 2018 (links).

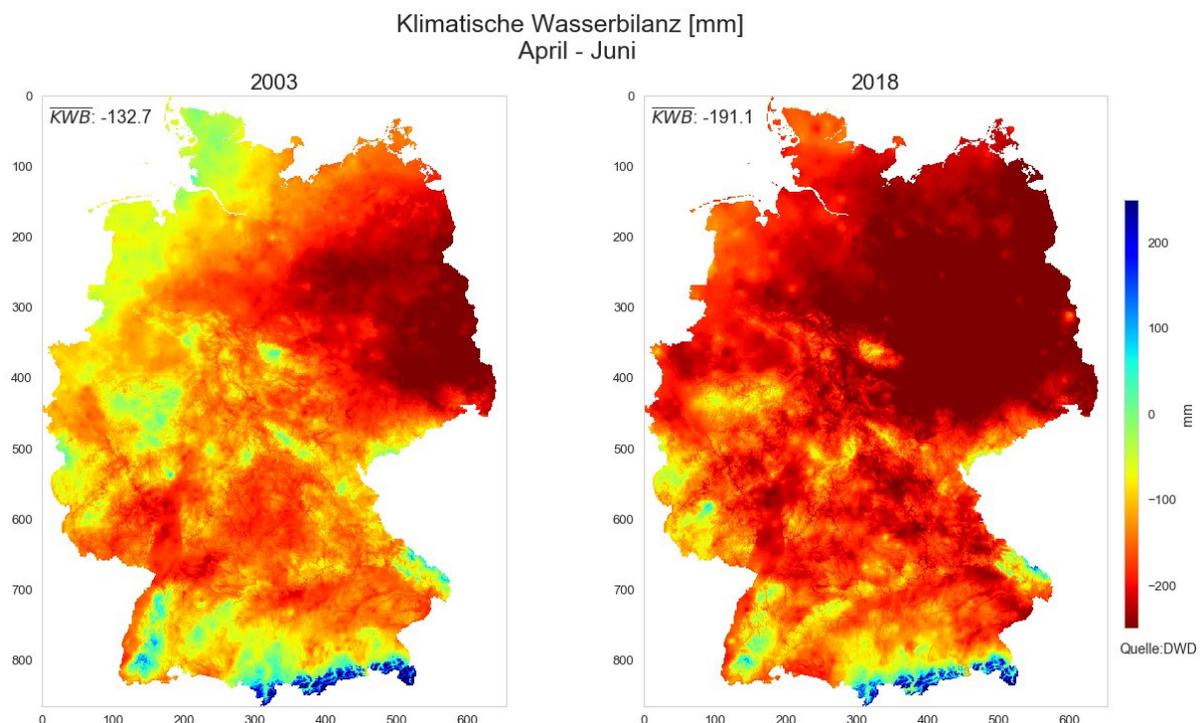


Abb. 4.1 Klimatische Wasserbilanz (=Niederschläge minus potenzielle Verdunstung) in Deutschland anhand eines Durchschnittsjahres (links) und für das extreme Trockenjahr 2018 (rechts); Quelle: DWD

Nachfolgend wird in Tabelle 4.1 und Tabelle 4.2 das langjährige Klima sowie die Schwankungsbreiten im Untersuchungsgebiet anhand zweier räumlich naher Klimastationen (Bad Segeberg und Hamburg-Fuhlsbüttel) näher erläutert. Beide Stationen sind sich grundsätzlich sehr ähnlich im Hinblick auf Temperatur, Niederschläge und Strahlung und verdeutlichen sehr anschaulich die klimatischen Rahmenbedingungen der norddeutschen Küstenregion.

Hier sind zunächst die Klimakenndaten für die Station Bad Segeberg (Quelle DWD) zusammengestellt:

Schwankungsbreiten

Parameter	Jahr	Frühjahr	Sommer	Herbst	Winter
Maximaltemperatur	12.4 11.0 ... 13.8	12.3 10.2 ... 14.3	20.8 19.1 ... 23.6	12.8 11.5 ... 14.3	3.6 0.4 ... 7.1
Mitteltemperatur	8.8 7.6 ... 10.1	8.1 6.2 ... 9.7	16.3 14.9 ... 18.0	9.4 8.2 ... 10.5	1.2 -2.0 ... 4.5
Minimaltemperatur	5.0 4.0 ... 6.2	3.7 1.9 ... 4.9	11.6 10.9 ... 12.1	6.1 5.1 ... 6.9	-1.6 -5.0 ... 1.7
Niederschlag	800.0 696.3 ... 961.7	166.8 89.5 ... 270.1	223.6 64.3 ... 341.7	215.4 93.0 ... 301.7	192.1 103.6 ... 265.6
Globalstrahlung	929.0 878.0 ... 1006.7	1256.0 958.9 ... 1381.2	1618.9 1412.2 ... 1951.1	579.5 510.9 ... 643.6	245.7 204.7 ... 272.7
Wasserbilanz	230.6 80.5 ... 398.7	-9.5 -83.3 ... 130.7	-63.3 -289.3 ... 86.7	136.4 4.0 ... 232.0	164.6 79.3 ... 236.6
Sonnenscheindauer	4.1 3.7 ... 4.7	5.2 3.0 ... 6.6	6.4 4.9 ... 8.6	3.1 2.8 ... 4.0	1.6 1.0 ... 1.9
Schneehöhe	6.1 2.4 ... 12.1	– – ... –	– – ... –	– – ... –	– – ... –
Anzahl Schneetage >10cm	7.6 0.0 ... 25.7	– – ... –	– – ... –	– – ... –	– – ... –
Andauer Schneetage >10cm	5.3 0.0 ... 16.8	– – ... –	– – ... –	– – ... –	– – ... –
Anzahl Schneetage >30cm	0.2 0.0 ... 1.5	– – ... –	– – ... –	– – ... –	– – ... –
Andauer Schneetage >30cm	0.0 0.0 ... 0.3	– – ... –	– – ... –	– – ... –	– – ... –
Sommertage	19.2 8.1 ... 39.7	– – ... –	– – ... –	– – ... –	– – ... –
Andauer Sommertage	5.1 2.0 ... 8.7	– – ... –	– – ... –	– – ... –	– – ... –
Tage ohne Niederschlag	163.4 133.6 ... 200.2	– – ... –	– – ... –	– – ... –	– – ... –
Andauer Tage ohne Niederschlag	15.8 9.4 ... 26.4	– – ... –	– – ... –	– – ... –	– – ... –
heiße Tage	1.9 0.0 ... 7.1	– – ... –	– – ... –	– – ... –	– – ... –
Andauer heiße Tage	1.1	–	–	–	–

Parameter	Jahr	Frühjahr	Sommer	Herbst	Winter
	0.0 ... 2.7	- ... -	- ... -	- ... -	- ... -
Frosttage	77.1 38.5 ... 95.7	- - ... -	- - ... -	- - ... -	- - ... -
Andauer Frosttage	22.0 6.0 ... 39.0	- - ... -	- - ... -	- - ... -	- - ... -
Eistage	20.6 4.3 ... 42.2	- - ... -	- - ... -	- - ... -	- - ... -
Andauer Eistage	9.8 2.7 ... 21.0	- - ... -	- - ... -	- - ... -	- - ... -
Starkniederschlag	19.7 13.7 ... 28.1	- - ... -	- - ... -	- - ... -	- - ... -
Andauer Tage mit Starkniederschlag	2.3 1.0 ... 3.7	- - ... -	- - ... -	- - ... -	- - ... -

Tabelle 4.1: Langjährige Klimakennwerte von Bad Segeberg (Quelle: DWD, 2020), Mittelwerte und Schwankungsbreiten der Dekade 1981–1990

Und nachfolgend die Klimakenndaten für die Station Hamburg-Fuhlsbüttel gezeigt (Quelle DWD):

Parameter	Jahr	Frühjahr	Sommer	Schwankungsbreiten	
				Herbst	Winter
Maximaltemperatur	12.8 11.3 ... 14.1	12.7 10.6 ... 14.6	21.1 19.4 ... 24.0	13.2 11.8 ... 14.6	3.9 0.7 ... 7.5
Mitteltemperatur	9.1 7.9 ... 10.4	8.4 6.6 ... 10.1	16.6 15.2 ... 18.3	9.7 8.5 ... 10.8	1.5 -1.7 ... 4.8
Minimaltemperatur	5.2 4.3 ... 6.5	4.0 2.3 ... 5.2	11.8 11.3 ... 12.3	6.3 5.5 ... 7.2	-1.3 -4.7 ... 2.0
Niederschlag	799.5 664.1 ... 945.0	181.3 131.8 ... 285.6	216.3 64.2 ... 284.1	210.9 97.3 ... 302.4	183.9 89.2 ... 251.3
Globalstrahlung	916.7 870.0 ... 990.3	1242.5 944.7 ... 1355.0	1594.6 1392.9 ... 1937.9	570.7 497.3 ... 633.0	242.6 199.1 ... 274.6
Wasserbilanz	229.1 25.5 ... 408.2	2.6 -55.8 ... 125.9	-69.0 -289.7 ... 23.5	131.9 8.4 ... 231.7	156.2 63.1 ... 221.4
Sonnenscheindauer	4.0 3.6 ... 4.6	5.0 3.0 ... 6.5	6.2 4.8 ... 8.5	3.0 2.7 ... 3.9	1.5 0.9 ... 1.9
Schneehöhe	6.1 1.9 ... 12.8	- - ... -	- - ... -	- - ... -	- - ... -
Anzahl Schneetage >10cm	7.1 0.0 ... 29.1	- - ... -	- - ... -	- - ... -	- - ... -
Andauer Schneetage >10cm	4.5	-	-	-	-

Parameter	Jahr	Frühjahr	Sommer	Herbst	Winter
	0.0 ... 29.1	- ... -	- ... -	- ... -	- ... -
Anzahl Schneetage >30cm	0.6 0.0 ... 5.6	- - ... -	- - ... -	- - ... -	- - ... -
Andauer Schneetage >30cm	0.3 0.0 ... 3.0	- - ... -	- - ... -	- - ... -	- - ... -
Sommertage	20.8 9.0 ... 42.0	- - ... -	- - ... -	- - ... -	- - ... -
Andauer Sommertage	5.6 2.0 ... 9.0	- - ... -	- - ... -	- - ... -	- - ... -
Tage ohne Niederschlag	169.4 139.0 ... 202.0	- - ... -	- - ... -	- - ... -	- - ... -
Andauer Tage ohne Niederschlag	16.1 12.0 ... 24.0	- - ... -	- - ... -	- - ... -	- - ... -
heiße Tage	2.5 0.0 ... 9.0	- - ... -	- - ... -	- - ... -	- - ... -
Andauer heiße Tage	1.3 0.0 ... 3.0	- - ... -	- - ... -	- - ... -	- - ... -
Frosttage	72.8 33.7 ... 91.4	- - ... -	- - ... -	- - ... -	- - ... -
Andauer Frosttage	20.9 6.0 ... 39.0	- - ... -	- - ... -	- - ... -	- - ... -
Eistage	19.2 3.1 ... 41.0	- - ... -	- - ... -	- - ... -	- - ... -
Andauer Eistage	9.0 2.1 ... 20.0	- - ... -	- - ... -	- - ... -	- - ... -
Starkniederschlag	20.6 16.0 ... 26.9	- - ... -	- - ... -	- - ... -	- - ... -
Andauer Tage mit Starkniederschlag	2.4	-	-	-	-

Tabelle 4.2: Langjährige Klimakennwerte von Hamburg-Fuhlsbüttel (Quelle: DWD, 2020), Mittelwerte und Schwankungsbreiten der Dekade 1981–1990

Wasserhaushaltsbedingungen

In Tabelle 4.3 sind Angaben zur mittleren, langjährigen Klimatischen Wasserbilanz, d.h. die Differenz aus Niederschlag minus potenzieller Verdunstung (Quelle: DWD) für Bad Segeberg aufgeführt, darunter sind die Spannen bzw. Schwankungsbreiten angegeben.

<u>Parameter</u>	<u>Jahr</u>	<u>Frühjahr</u>	<u>Sommer</u>	<u>Herbst</u>	<u>Winter</u>
Wasserbilanz (mm)	230.6	-9.5	-63.3	136.4	164.6
Schwankungsbreiten von bis (mm)	80.5 ... 398.7	-83.3 ... 130.7	-289.3 ... 86.7	4.0 ... 232.0	79.3 ... 236.6

Tabelle 4.3: Klimatische Wasserbilanzen (mm) für: Gesamtjahr, Frühjahr, Sommer, Herbst und Winter

Anhand der Zahlen wird deutlich, dass im Frühjahr und Sommer ein mittleres Defizit von -73mm zu erwarten ist, welches i.d.R. gut durch die gespeicherte Bodenfeuchte ausgeglichen werden kann. Im Herbst und Winter tritt dagegen ein mittlerer Wasserbilanzüberschuss von ca. 300mm auf, der zu einer hohen Grundwasserneubildung führt. Die Spannen bzw. Schwankungsbreiten zeigen aber auch, dass zwischen den Jahren große Unterschiede bestehen, so z.B. Jahre mit großer Sommertrockenheit oder Nässe, die zu entsprechender Trockenheit bzw. Wassermangelstress oder Wasserüberschüssen führen.

Ein extremes Trockenjahr war z.B. das Jahr 2018, während 2017 ein typisches Feuchtjahr mit hohen Sommerniederschlägen war. Das Jahr 2016 hingegen entsprach in etwa einem mittleren Jahr. Im Anhang sind in den Tabellen 9.3a, b, c die Wasserbilanzen dieser drei Jahre im Detail für die drei Modellböden sowie für die Nutzungen Grünland, Winterweizen, Sommergerste dargestellt, wobei zusätzlich zwischen grundwassernahen und -fernen Bedingungen unterschieden wird. Weitere Ergebnisse zum Bodenwasserhaushalt für die Modellböden, Fruchtfolgen und Fallstudien zum Temperatureinfluss der Erdkabeltrasse werden in Kapitel 6 vorgestellt und behandelt.

4.2 Klimaprognosen

Um die möglichen zukünftigen Entwicklungen für die Temperaturen und Niederschläge in Schleswig-Holstein in dieser Studie einfließen zu lassen, wurden die folgenden Abbildungen eines Forschungsprojektes des Umweltbundesamtes**¹⁾ miteinbezogen. Sie basieren auf dem Regionalmodell WETTREG, Szenario A1B, welches das globale Model ECHAM5 nutzt.

Das Szenario A1B charakterisiert eine mittlere Entwicklung, geht aus von einem leichten Rückgang der CO₂-Emissionen und der weltweiten Bevölkerung ab 2050 sowie einer schnellen Einführung neuer und effizienterer Techniken und einem starken globalen Wirtschaftswachstum. Für die südlichen Landesteile von Schleswig-Holstein - und damit auch für die geplanten Trassenbereiche stellen die Klimaprognosen des Max-Planck-Instituts eine deutliche Erwärmung und eine Abnahme der Sommerniederschläge heraus. In den nachfolgenden Abbildungen sind die wichtigsten Ergebnisse dieser Prognosen für die Entwicklung der Maximum/Minimumtemperaturen sowie für die Niederschläge (anhand der Sommer- und Winterhalbjahre) zusammengestellt. Zu beachten ist, dass sich die Werte auf den Skalen in jeder Abbildung ändern und die Farbe Blau nicht "kalt" bedeutet, sondern nur auf eine geringere Erwärmung als in den roten Bereichen hinweist.

WETTREG ; ECHAM5; A1B; Mittel; 1961_1990; 2021_2050; 2071_2100; Maximum-Temperatur; kalendarisches Sommerhalbjahr

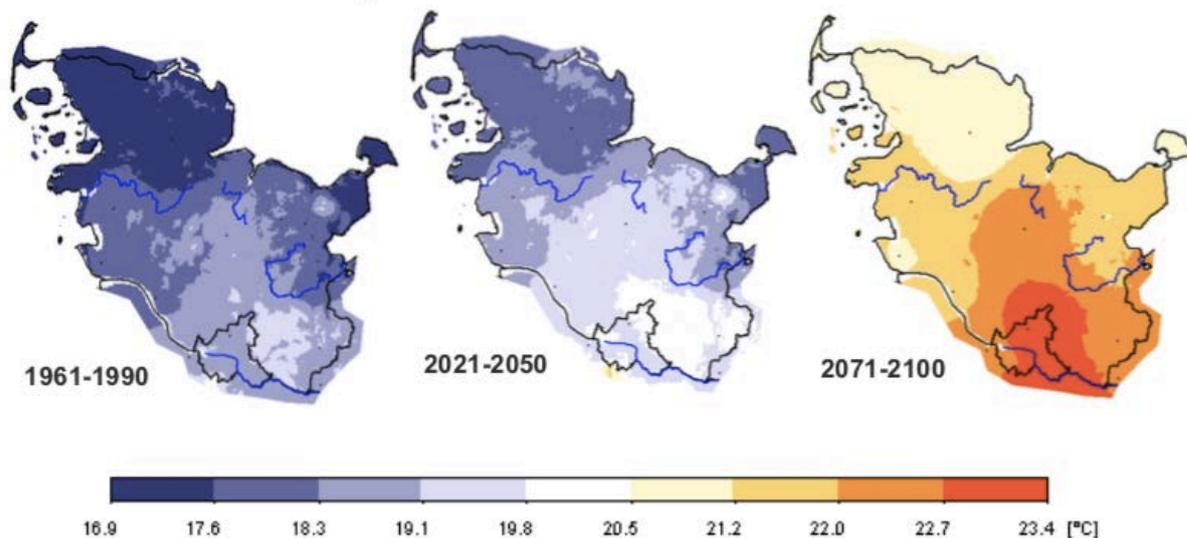


Abb. 4.2: Entwicklung der Maximum Temperaturen im Sommerhalbjahr für drei Zeitperioden: links für die Zeitreihe 1961-1990 (bisheriges langjähriges Mittel),Mitte: Entwicklung für 2021-2050 sowie rechts Entwicklung für 2071-2100. © Datensatz der WETTREG-Simulationsergebnisse, dargestellt mit dem IDP2006 Präsentationstool

WETTREG ; ECHAM5; A1B; Mittel; 1961_1990; 2021_2050; 2071_2100; Minimum-Temperatur; kalendarisches Winterhalbjahr

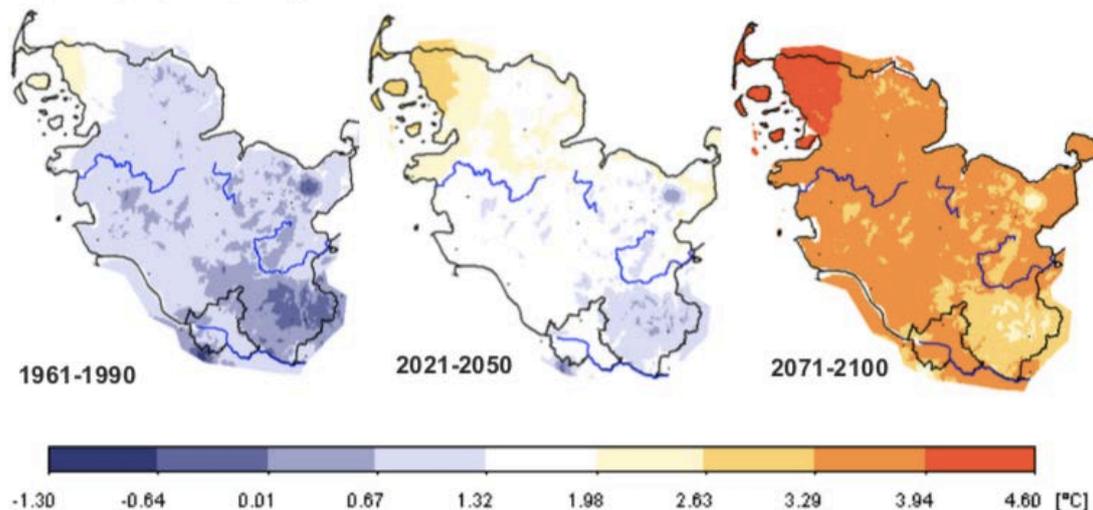


Abb. 4.3: Entwicklung der Minimum Temperaturen im Winterhalbjahr für drei Zeitperioden: links für die Zeitreihe 1961-1990 (bisheriges langjähriges Mittel),Mitte: Entwicklung für 2021-2050 sowie rechts Entwicklung für 2071-2100. © Datensatz der WETTREG-Simulationsergebnisse, dargestellt mit dem IDP2006 Präsentationstool

Für regionale Informationen zu künftigen Klimaänderungen wurden im Rahmen eines Forschungsprojektes im Auftrag des Umweltbundesamtes Klimaprojektionen für Deutschland bis zum Jahr 2100 unter Nutzung zweier verschiedener Modellansätze erstellt:

- das dynamische Regionalmodell REMO des Max-Planck-Instituts für Meteorologie in Hamburg
- das statistische Modell WETTREG der Firma CEC Potsdam

Für weitere Infos zum Modell WETTREG siehe

<http://www.umweltbundesamt.de/uba-info-presse/hintergrund/Regionale-Klimaaenderungen.pdf>

WETTREG ; ECHAM5; A1B; Mittel; 1961_1990; 2021_2050; 2071_2100; Niederschlag; kalendarisches Sommerhalbjahr

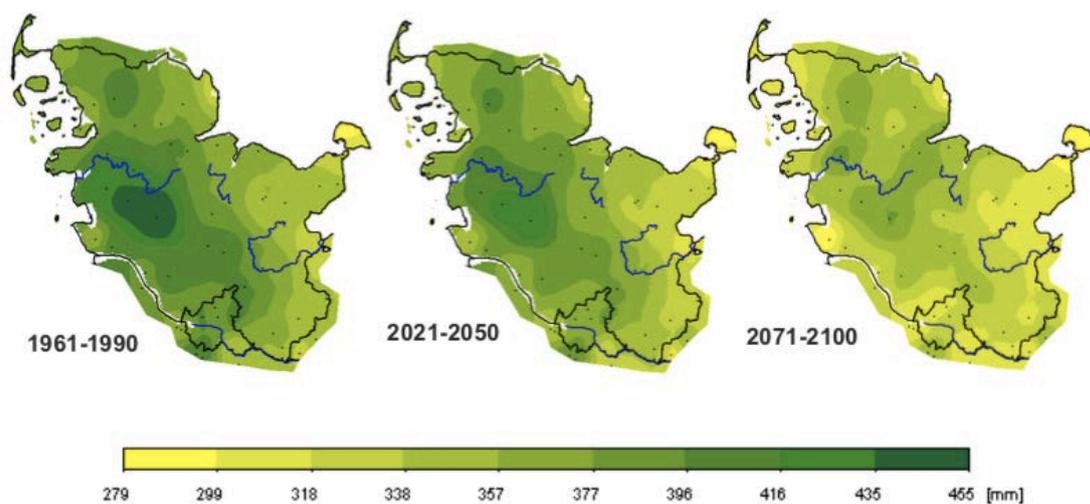


Abb. 4.4: Entwicklung der Sommerniederschläge für drei Zeitperioden: links für die Zeitreihe 1961-1990 (bisheriges langjähriges Mittel), Mitte: Entwicklung für 2021-2050 sowie rechts Entwicklung für 2071-2100. © Datensatz der WETTREG-Simulationsergebnisse, dargestellt mit dem IDP2006 Präsentationstool

WETTREG ; ECHAM5; A1B; Mittel; 1961_1990; 2021_2050; 2071_2100; Niederschlag; kalendarisches Winterhalbjahr

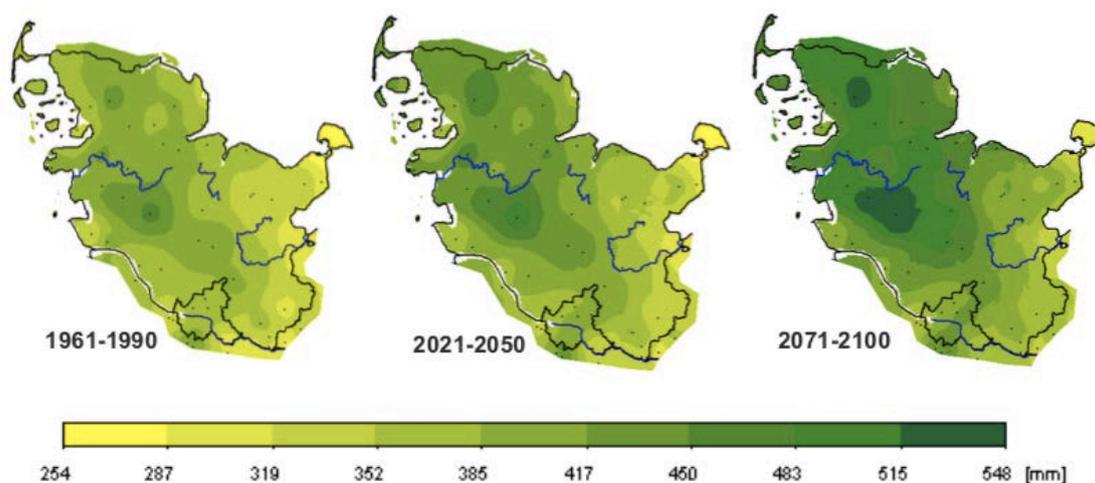


Abb. 4.5: Entwicklung der Winterniederschläge für drei Zeitperioden: links für die Zeitreihe 1961-1990 (bisheriges langjähriges Mittel), Mitte: Entwicklung für 2021-2050 sowie rechts Entwicklung für 2071-2100. © Datensatz der WETTREG-Simulationsergebnisse, dargestellt mit dem IDP2006 Präsentationstool

Die Auswertung der WETTREG-Simulationen zu diesen Kenntagen zeigt eine sehr deutliche Abnahme der kälteren Tage (Eis- und Frosttage) und eine Zunahme der wärmeren Tage (Sommertage, Heiße Tage und Tropennächte), wie aus Tabelle 4.2 entnommen werden kann.

Zeitraum	Klimakenntage				
	Eistage	Frosttage	Sommertage	Heiße Tage	Tropennächte
1961-1990	17,6	69,2	14,8	2,1	0,2
2021-2050	12,3	55,1	20,1	3,0	0,4
2071-2100	4,6	31,3	32,0	6,2	1,9

Tabelle 4.4: Durchschnittliche Veränderung der Klimakenntage in Schleswig-Holstein (nach Böhm, 2008)

Es ändert sich nicht nur die Häufigkeit der Klimakenntage, sondern auch die Anzahl der Tage, an denen bestimmte Ereignisse hintereinander vorkommen können. Wärmere Tage werden in Zukunft nicht nur häufiger, sondern auch in längeren Serien auftreten. Die kälteren Tage werden hingegen nicht nur seltener, sondern auch an weniger Tagen in Folge auftreten. Es kann folgendes Fazit bis Mitte des 21. Jahrhunderts (Zeitraum 2021-2050) gezogen werden:

- Ein Anstieg der mittleren Jahrestemperatur um 0,6 bis 0,9°K
- Stärkster Temperaturanstieg in den Wintermonaten um 0,9 bis 1,3°K
- Mittlerer Temperaturanstieg in den Herbstmonaten (0,7 bis 0,9°K) sowie in den Sommermonaten (0,6 bis 1°K), moderater Anstieg in den Frühjahrsmonaten (0,4 K°C)
- Zunahme der Niederschlagsmenge im Winter um 12-15 %
- Abnahme der Niederschlagsmenge im Sommer um 7-9 %
- Geringe Änderungen der Niederschläge im Herbst und im Frühjahr

Fazit

Das Klima wird in den nächsten 30 Jahren etwas milder, die Niederschläge bleiben aber immer noch für Deutschland auf einem vergleichsweise hohen Niveau, allerdings mit etwas geringeren Niederschlägen im Sommerhalbjahr, dafür einer Zunahme der Winterniederschläge. Bezogen auf die Kabelumgebungsbedingungen unterhalb des Wurzelraums ändern sich jedoch die Bodenfeuchte und Bodentemperaturen im Kabelbereich nicht grundsätzlich von den heutigen Bedingungen.

5 Kabelbedingte Bodenerwärmung

Nachfolgend werden die wichtigsten Ergebnisse der Studie von Dr. Stammen im Hinblick auf kabelbedingte Bodenerwärmung der Modellböden 1-3 zusammengestellt. Bei den Ergebnissen werden stationäre und transiente Bedingungen wiedergegeben.

5.1 Modellboden 1: Sand

Abbildung 5.1 zeigt den Aufbau des Bodens für die Trassenverhältnisse für Sande.

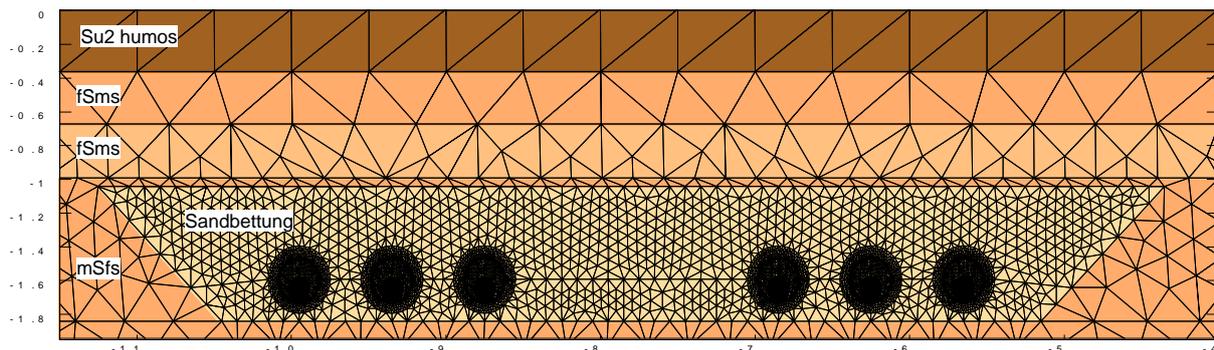


Abb. 5.1: Finite-Elemente-Modell, Ausschnitt im Bereich der Kabelanlage und der Bodenschichten des sandigen Bodens (aus dem Gutachten von Dr. Stammen, 2020)

Tabelle 5.1 fasst die stationären Berechnungen der maximalen Temperaturen, Erwärmungen und Orte zusammen, Tabelle 5.2 für die transienten Berechnungen. Die Erwärmung (Temperatur abzüglich Umgebungstemperatur von 15 °C) ist in Kelvin angegeben. Die Leitertemperatur wird nur für die Ader L33 (rechte Ader des dritten Systems) gezeigt, da L33 die wärmste Ader ist. In Rot sind die kabelbedingten Bodenerwärmungen für unterschiedliche Bodentiefen zusammengestellt.

Tiefe	0,0 m	0,2 m	0,5 m	1,0 m	L33
Dyn. Last (Normallast)	16,2 °C/ 1,2 K	17,3 °C/ 2,3 K	19,0 °C/ 4,0 K	22,2 °C/ 7,2 K	42,5 °C
Grenzlast (Höchstlast)	16,5 °C/ 1,5 K	17,8 °C/ 2,8 K	19,9 °C/ 4,9 K	23,8 °C/ 8,8 K	49,0 °C
Ort	6,75 m	6,68 m	6,61 m	6,53 m	6,85 m

Tabelle 5.1: Maximale Temperaturen (°C) und Erwärmungen (K) im sandigen Boden (Modellboden 1), stationäre Berechnung siehe Bericht I von Dr. Stammen, 2020

Tiefe	0,0 m	0,2 m	0,5 m	1,0 m	L33
Dyn. Last (Normallast)	16,3 °C/ 1,3 K	17,4 °C/ 2,4 K	19,1 °C/ 4,1 K	22,4 °C/ 7,4 K	38,5 °C- 47,9°C
Grenzlast (Höchstlast)	16,6 °C/ 1,6 K	18,0 °C/ 3,0 K	20,1 °C/ 5,1 K	24,2 °C/ 9,2 K	44,8°C- 56,3 °C
Ort	6,75 m	6,68 m	6,61 m	6,53 m	6,85 m

Tabelle 5.2: Maximale Temperaturen (°C) und Erwärmungen (K) im sandigen Boden (Modellboden 1), transiente Berechnung siehe Bericht I von Dr. Stammen, 2020

Fazit

Im Oberboden (bis ca. 0,2m Tiefe) erhöht sich demzufolge die Temperatur um 1,2 bis 3 K und an der Untergrenze des Wurzelraums (ca. 0,5m Tiefe) um 4 bis 5,1 K, die Unterschiede zwischen stationärer und transienter Berechnung sind nur gering.

5.2 Modellboden 2: Lehm

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse für das Bodenprofil „lehmiger Boden“ vorgestellt. Die Vorgehensweise ist identisch zur Vorgehensweise beim sandigen Boden, nur dass Profilaufbau, Bodenart und Schichtung gemäß den Ergebnissen in Kap. 3 angepasst worden sind.

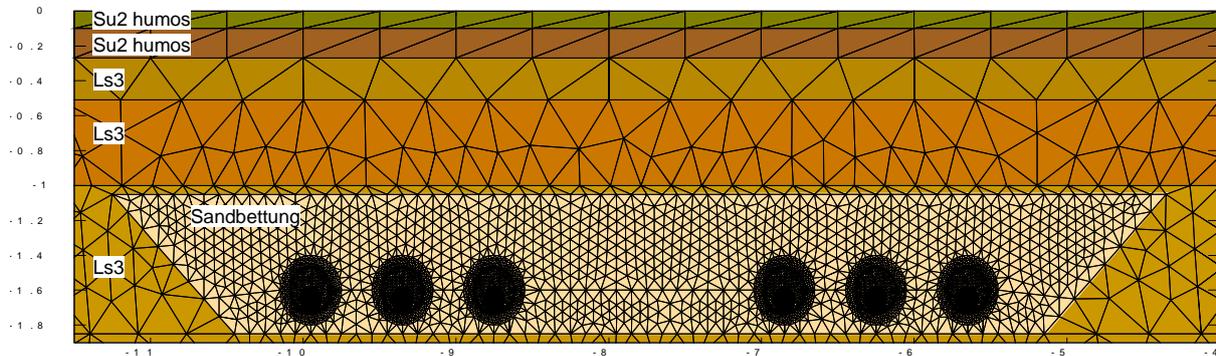


Abb. 5.2: Finite-Elemente-Modell, Ausschnitt im Bereich der Kabelanlage und der Bodenschichten, lehmiger Boden (aus dem Gutachten von Dr. Stammen, 2020)

Tabelle 5.3 fasst die maximalen Temperaturen, Erwärmungen und Orte der Temperaturmaxima für stationäre Berechnungen zusammen, Tabelle 5.4 die für transiente Bedingungen. Die Erwärmung (Temperatur abzüglich Umgebungstemperatur von 15 °C) ist in Kelvin angeben:

Tiefe	0,0 m	0,2 m	0,5 m	1,0 m	L33
Dyn. Last (Normallast)	16,2 °C/ 1,2 K	17,3 °C/ 2,3 K	19,6 °C/ 4,6 K	23,1 °C/ 8,1 K	43,3 °C
Grenzlast (Höchstlast)	16,5 °C/ 1,5 K	17,8 °C/ 2,8 K	20,7 °C/ 5,7 K	25,0 °C/ 10,0 K	50,0 °C
Ort	6,73 m	6,69 m	6,62 m	6,53 m	6,85 m

Tabelle 5.3: Maximale Temperaturen (°C) und Erwärmungen (K) im lehmigen Boden (Modellboden 2), stationäre Berechnung, siehe Bericht von Dr. Stammen, 2020

Tiefe	0,0 m	0,2 m	0,5 m	1,0 m	L33
Dyn. Last (Normallast)	16,3 °C/ 1,3 K	17,4 °C/ 2,4 K	19,8 °C/ 4,8 K	23,5 °C/ 8,5 K	40,0 °C- 48,8 °C
Grenzlast (Höchstlast)	16,6 °C/ 1,6 K	17,9 °C/ 2,9 K	20,9 °C/ 5,9 K	25,4 °C/ 10,4 K	46,0 °C- 57,6 °C
Ort	6,73 m	6,69 m	6,62 m	6,53 m	6,85 m

Tabelle 5.4: Maximale Temperaturen (°C) und Erwärmungen (K) im lehmigen Boden (Modellboden 2), transiente Berechnung, siehe Bericht von Dr. Stammen, 2020

Fazit

Im Oberboden erhöht sich demzufolge die mittlere Temperatur um 1,2 bis 2,9K und an der Untergrenze des Wurzelraums um 4,6 bis 5,9 K, die Unterschiede zwischen stationärer und transienter Berechnung sind auch beim Lehm relativ gering.

5.3 Modellboden 3: Moor

In diesem Abschnitt wird das dritte repräsentative Bodenprofil „Moorboden“ untersucht. Es handelt sich um Niedermoor auf Sand, wie es in der Pinnauniederung vorkommt.

In einem Tiefenbereich von 1,0 m bis 2,0 m befindet sich eine Grundwasserströmung. Hier fließt das Grundwasser mit einer Geschwindigkeit von ca. 0,5 m/d bis 1,0 m/d. Der kühlende Einfluss von Grundwasserströmungen wird bei Kabelbelastbarkeitsberechnungen in der Regel vernachlässigt. Daher wird hier Einfluss der Grundwasserströmung ermittelt:

Die PE-Rohre liegen mit einer Legetiefe von 1,6 m in der 1,0 Meter mächtigen Grundwasserströmung (Tiefenbereich von 1,0 m bis 2,0 m). Thermodynamisch handelt es sich somit um ein quer angeströmtes Rohr. Die Gleichungen zur Berechnung der Wärmeübergangszahl sind in (VDI2013) zu finden. Die charakteristische Überströmungslänge beträgt:

$$L = \pi \cdot \frac{d_{a,PE-Rohr}}{2} = 0,44 \text{ m} \quad (5.1)$$

Die Reynoldszahl berechnet sich zu:

$$\text{Re} = \frac{v \cdot \rho \cdot \lambda}{\eta} = 1,312 \quad (5.2)$$

Mit der Geschwindigkeit v , dem spezifischen Gewicht ρ , der Wärmeleitfähigkeit des ruhenden Wassers λ und der Viskosität η . Aufgrund der kleinen Reynoldszahl handelt es sich um eine laminare Strömung. Die Prandtl-Zahl, die dimensionslose Kennzahl für die Stoffwerte, kann [VDI2013] entnommen werden und ergibt sich für eine Wassertemperatur von 12 °C zu:

$$\text{Pr} = 8,876 \quad (5.3)$$

Es wurde eine Grundwassertemperatur zu 12 °C angenommen. Die Nusseltzahl bestimmt sich zu:

$$\text{Nu}_{\text{Lam}} = 0,664 \cdot \sqrt[3]{\text{Pr}} \cdot \sqrt[2]{\text{Re}} = 2,973 \quad (5.4)$$

Daraus ergibt sich eine Wärmeübergangszahl von:

$$\alpha = \frac{\text{Nu}_{\text{Lam}} \cdot \lambda}{d_{a,PE-Rohr}} = 3,94 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K}) \quad (5.5)$$

Dies ist die Wärmeübergangszahl für ein Rohr, was vollständig in einem strömenden Fluid liegt. Da hier der Volumenanteil des Fluiden nur bei 16 % liegt, wurde der effektive Wärme-Übergangskoeffizient abgeschätzt zu:

$$\alpha_{\text{eff}} = 0,16 \cdot 3,94 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K}) = 0,63 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K}) \quad (5.6)$$

Dieser Wärmeübergangskoeffizient wird als ringförmiger Cauchy-Randwert um die PE-Rohre gelegt und sorgt so, neben der Wärmeleitung durch das feuchte Erdreich, für den zusätzlichen konvektiven Wärmeübergang aufgrund der Grundwasserströmung. Zum Vergleich wurde die Anordnung ohne die zusätzlichen Randwerte für ruhendes Grundwasser berechnet, um den Einfluss der Strömung zu ermitteln. Die restliche Vorgehensweise ist identisch zu den anderen Böden.

Die folgende Abbildung zeigt eine Ausschnittvergrößerung des FEM-Modells, in der die Bodenschichtung gemäß Kapitel 3 zu erkennen ist. Die Kabelanlage liegt hier im tragfähigen Sand; die Torfschichten befinden sich darüber.

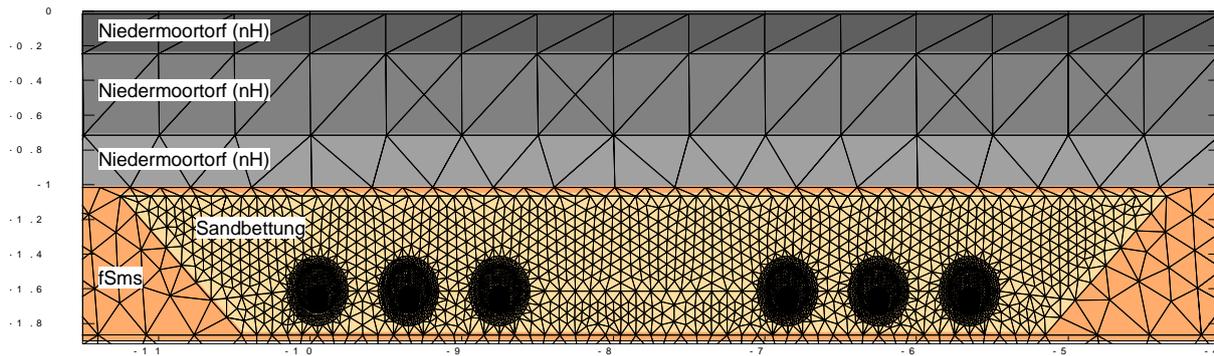


Abb. 5.3: Finite-Elemente-Modell, Ausschnitt im Bereich der Kabelanlage und der Bodenschichten, Moorboden (aus dem Gutachten von Dr. Stammen, 2020)

Aufgrund des Grundwasservorkommens und des ca. 40 cm umfassenden nahe gesättigten Kapillarsaums wird ab einer Tiefe von 1,0 m keine Bodenaustrocknung angenommen.

Zunächst wurden die Simulationen ohne Grundwasserströmung durchgeführt, um danach den Einfluss der Grundwasserströmung besser herauszustellen.

BHF bitte beachten: Für die naturschutzfachliche Bewertung sind ausschließlich die Erwärmungen mit Grundwasserströmung ausschlaggebend. Zunächst werden jedoch die Bedingungen ohne Grundwasserströmung betrachtet.

Ohne Grundwasserströmung

In Tabelle 5.5 sind für Normallast und Höchstlast die maximalen Temperaturen und Erwärmungen für verschiedene Bodentiefen aufgeführt. Die Angaben gelten für Bedingungen ohne Grundwasserströmung.

Tiefe	0,0 m	0,2 m	0,5 m	1,0 m	L33
Dyn. Last (Normallast)	15,8 °C/ 0,8 K	20,0 °C/ 5,0 K	25,8 °C/ 10,8 K	35,2 °C/ 20,2 K	53,2 °C
Grenzlast (Höchstlast)	16,0 °C/ 1,0 K	21,0 °C/ 6,0 K	27,9 °C/ 12,9 K	40,6 °C/ 25,6 K	62,6 °C
Ort	6,75 m	6,70 m	6,64 m	6,55 m	6,85 m

Tabelle 5.5: Maximale Temperaturen (°C) und Erwärmungen (K) im Moorboden (Modellboden 3) ohne Grundwasserströmung, stationäre Berechnung, siehe Bericht I Dr. Stammen, 2020

Die maximalen Leitertemperaturen betragen 53,3 °C bei 2333 A und 62,6 °C bei 2625 A. Die Leitertemperaturen liegen im Vergleich zu den anderen Böden um rund 10 Kelvin und damit deutlich höher, was auf die schlechten Wärmeleitfähigkeiten der oberhalb der Kabelanlage liegenden Torfschichten von unter 0,5 W/(m K) zurückzuführen ist. Die thermische Grenzlast sorgt für einen kleinen Austrocknungsbereich in der unteren Torfschicht senkrecht oberhalb der Kabel. Hier sinkt die Wärmeleitfähigkeit der Torfschichten lokal auf 0,3 W/(m K) (vergleiche Schicht 3 von -0,70 m bis -1,00 m in Abb. 5.4) ab:

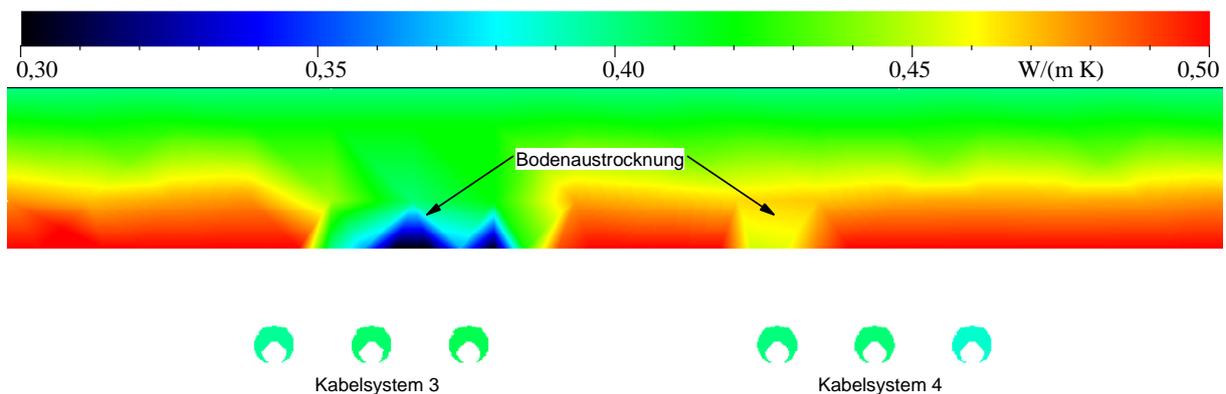


Abb. 5.4: Wärmeleitfähigkeiten des Sandbetts und der Bodenschichten, Moorboden ohne Grundwasserströmung, thermische Grenzlast, siehe Bericht I, Dr. Stammen

Mit Grundwasserströmung

Trotz der geringen Wärmeübergangszahl (bedingt durch die geringe Fließgeschwindigkeit) zeigt das fließende Grundwasser einen deutlich positiven Einfluss auf die Erwärmung der Kabelanlage. Bei dynamischer Belastung sinkt die maximale Leitertemperatur um 11,3 Kelvin auf 41,9 °C. Bei thermischer Grenzlast sinkt sie um 14,1 K auf 48,5 °C, eine nachweisbare Bodenaustrocknung tritt bei Berücksichtigung der Grundwasserströmung nicht mehr auf. Die Ergebnisse machen deutlich, dass bei einer Vernachlässigung selbst langsam fließender Grundwasserströmungen die Kabelerwärmung deutlich überschätzt wird. Die folgende Tabelle 5.6 fasst die maximalen Temperaturen, Erwärmungen und die Orte der Temperaturmaxima bei Berücksichtigung der Grundwasserströmung zusammen. Die Erwärmung (Temperatur abzüglich Umgebungstemperatur von 15 °C) ist in Kelvin angeben:

Tiefe	0,0 m	0,2 m	0,5 m	1,0 m	L33
Dyn. Last	15,4 °C/ 0,4 K	17,7 °C/ 2,7 K	20,7 °C/ 5,7 K	25,6 °C/ 10,6 K	41,9 °C
Grenzlast	15,6 °C/ 0,6 K	18,3 °C/ 3,3 K	22,2 °C/ 7,2 K	28,3 °C/ 13,3 K	48,5 °C
Ort	6,79 m	6,78 m	6,70 m	6,62 m	6,85 m

Tabelle 5.6: Maximale Temperaturen (°C) und Erwärmungen (K) im Moorboden (Modellboden 3) mit Grundwasserströmung, stationäre Berechnung, siehe Bericht I von Dr. Stammen, 2020

Wie man sich diese Wärmeausbreitung durch die oberflächennahe Grundwasserströmung vorstellen kann, wird anhand des Verlaufs der Temperaturisolines im Grundwasser und Boden anhand der Abb. 5.4 gezeigt. Die Wärmeausbreitung wurde zusätzlich mit Hilfe des MODFLOW Modells für worst-case Bedingungen (Höchstlast) berechnet. Bei der Berechnung des Wärmetransports im Grundwasser und der angrenzenden Bodenzone wurden folgende Parameter und Randbedingungen zugrunde gelegt:

- Mittlere Grundwassergeschwindigkeit (Darcy-Geschwindigkeit, $q = 1 \text{ m/d}$).
- Referenzbodentemperatur: Hintergrund 15°C (15 mg/L), worst-case am Rohr permanent 50°C
- Obere Randbedingung an der Bodenoberfläche: mittlere Durchschnittstemperatur der Luft von 9 °C
- Gleichgewichtseinstellung: drei Jahre
- K_d -Parameter = $4e^{-7} \text{ L/mg}$ (im Aquifer)
- 200 m in x-Richtung, Rohre beginnen bei 0 m (s. Abb. 5.5)
- Benutzung eines 5cm x 5cm Grid in direkter Nähe der Rohre, in weiterer Entfernung 20 cm x 10 cm
- Rohrtiefe: 160 cm Tiefe
- Es wurde ein Sandaquifer ab 1m Bodentiefe angenommen, darüber befindet sich Moorboden
- Die Rohre selbst haben einen vernachlässigbar kleinen Kf-Wert ($1e^{-20} \text{ m/d}$)

Ergebnisse

Die Wärmeemission des verrohrten 380 KV Erdkabels reicht im Grundwasser max. ca. 60 m weit in Strömungsrichtung (von links nach rechts). Wie eine Fahne, mit einer seitlichen Ausdehnung von ca. 1,5 bis 2m, treten höhere Temperaturen um die Kabelanlage herum auf; die Wärmefahne ist nach 50m kaum noch nachweisbar und taucht dann in 125m Entfernung nach unten ab. Wie in Abb. 5.5 zu sehen, sind bereits in 1m Tiefe die Grundwassertemperaturen oberhalb der Kabelanlage nur noch um 13-15 K erhöht und schwächen sich im Hauptwurzelraum auf 2,0 bis 3,3 K ab.

In Abb. 5.6 sind als Funktion der Entfernung von der Kabelanlage die mittleren Jahrestemperaturtiefenprofile dargestellt. Es wird deutlich, dass mit zunehmender Entfernung vom Erdkabel der Temperatureinfluss im Oberboden stark abfällt; gleiches gilt im Übrigen auch für das Grundwasser in tieferen Schichten. In ca. 125 bis 150 m Entfernung taucht, wie bereits erwähnt, die Wärmefahne mit +2,5K in tiefere Bodenschichten ab und ist im Oberboden nicht mehr nachweisbar.

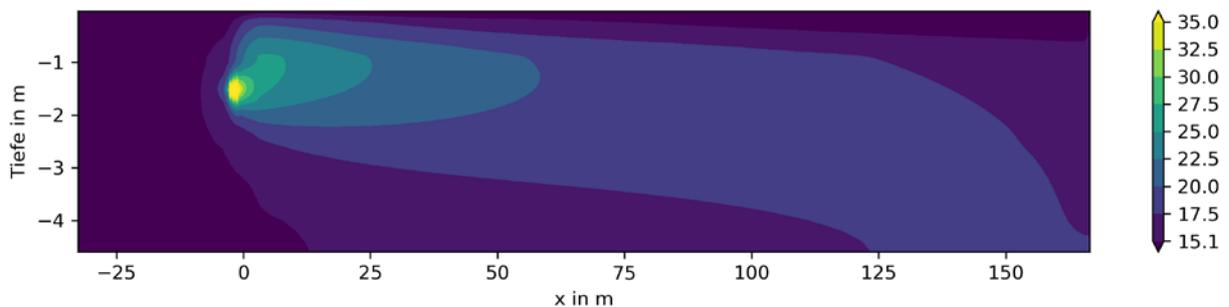


Abb. 5.5: Isolinien der kabelinduzierten Temperaturen im oberflächennahen Grundwasserbereich; die Strömung (1m/Tag) verläuft entlang des Gradienten von links nach rechts

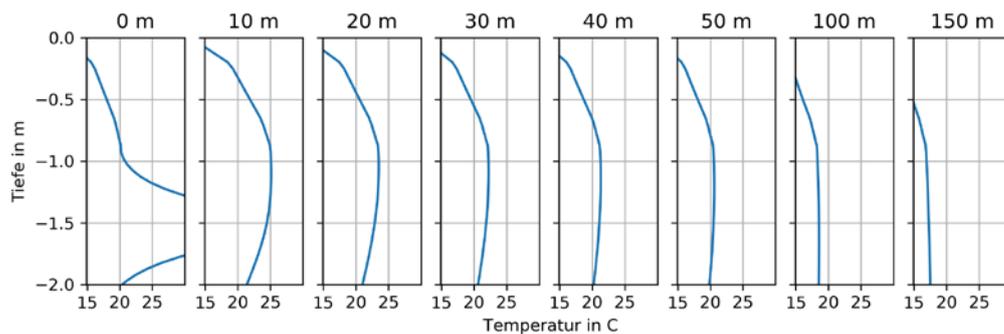


Abb. 5.6: Wärmeentwicklung in Boden und Grundwasser als Funktion der Entfernung von der Erdkabelanlage

Fazit

Mit Berücksichtigung des oberflächennahen Grundwassers und seiner relativ geringen Grundwasserströmung ergeben sich ähnlich geringe Erwärmungen im Oberboden wie bei den Mineralböden. Große Teile der vom Kabel emittierten Wärme werden longitudinal im Aquifer oberflächennah in die weitere Umgebung abtransportiert, wo sie sich mit nachfließendem Grundwasser vermischen und weiter abkühlen. Aufgrund der sehr geringen Wärme- und Wasserleitfähigkeit der Moore und der sehr hohen Wärmekapazität bei Wassersättigung benötigt es ca. drei Jahre bis sich im Kabelbereich halbwegs neue Temperaturfelder eingestellt haben. Sie werden tages- und jahreszeitlich beeinflusst durch a) den Witterungsjahresverlauf des Standorts, b) geringfügig durch den Tidehub sowie c) durch lokal schwankende Grundwasserab- und Zuströmungen. Das Grundwasser erhöht seine Temperatur nur in unmittelbarer Kabelumgebung. Im Anschluss nimmt die Temperatur des Aquifers je nach Tiefe und Lage der Wärmefahne kontinuierlich ab. Im weiteren Abstrom ist der Temperaturanstieg im Grundwasser auf die Umgebung nur noch sehr gering und dann auch nur in Tiefen von $> 0,5$ m nachweisbar. Der Wärmeabtransport am Kabel durch das Grundwasser wurde bei den Simulationen von Herrn Dr. Stammen (s. Bericht I) entsprechend berücksichtigt.

6 Umwelt- Folgeabschätzung

In diesem Kapitel werden die zu erwartenden Umweltfolgen der Temperaturveränderungen im Boden durch die beiden 380 KV Erdbodentrassen vorgestellt und bewertet. Die Bewertung erfolgt jeweils anhand der Modellböden (Sand, Lehm und Moor) für a) die Referenzsituation (ohne Kabel), b) für Normallastbedingungen und c) für Höchstlast. Es wird abgehoben auf folgende vier Aspekte:

1. Landwirtschaft: die zu erwartenden Veränderungen der Pflanzenentwicklung (Phänologie) sowie Erträge typischer Kulturen auf sandigen und lehmigen Böden,
2. Bodenwasserhaushalt: Veränderungen von Versickerung und Verdunstung sowie Stickstoffauswaschung ins Grundwasser
3. Mikrobieller Stickstoffumsatz: Mineralisation der organischer Bodensubstanz sowie der gasförmigen Freisetzung von Stickstoff (Denitrifikation)
4. Veränderungen bei den Moorstandorten (Pinnau-Niederung)

Bevor detailliert auf diese Aspekte eingegangen wird, sei eindringlich darauf hingewiesen, dass sich alle nachfolgenden Ausführungen zum Einfluss der Bodentemperatur stets auf die beiden Maxima der Temperatur-Doppel-Peaks (s. Abb. 6, violett gepunkteter Bereich) innerhalb der gesamten Kabeltrasse beziehen. Sie stellen in der Trasse die Bereiche dar, die direkt oberhalb der Kabelanlage liegen. Sie umfassen aber mit jeweils ca. 7,5 m nur knapp ein Drittel der gesamten Trassenbreite. Alle anderen Bereiche unterliegen einem deutlich geringeren Temperaturanstieg (s. Zonen mit blauen Punkten). Daher fallen die gemittelten Ergebnisse bezogen auf die Gesamtrassenbreite um ca. 40-50% geringer aus als direkt oberhalb der Kabelanlage. Bei der Besprechung der Einzelergebnisse wird darauf nochmals hingewiesen.

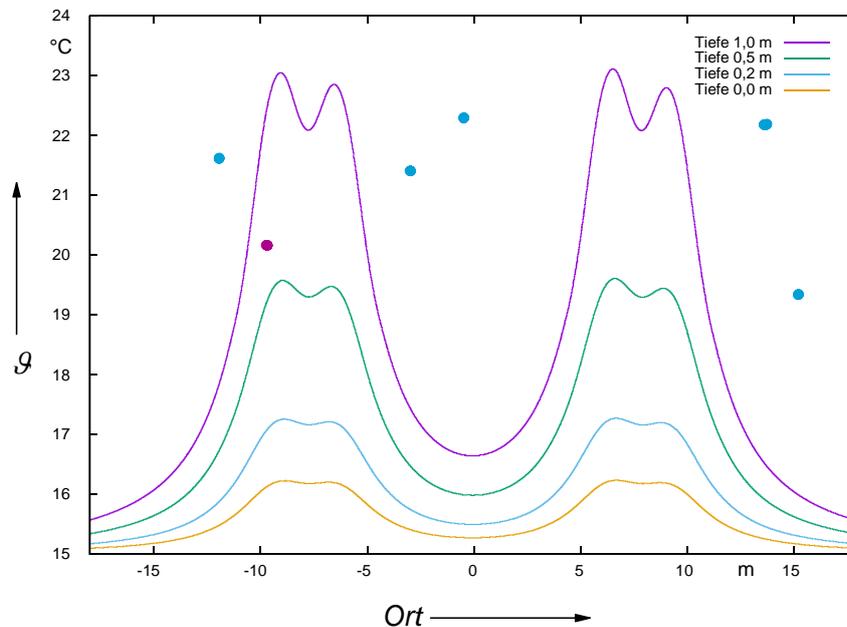


Abb. 6: Temperaturen auf der Kabeltrasse in 0,2 m 0,5 m und 1,0 m Tiefe im lehmigen Boden, $I = 2333 \text{ A}$, ergänzt nach Bericht I, Dr. Stammen, 2020

6.1 Landwirtschaft und Erträge

Zunächst sei kurz auf die allgemeine Ertragsentwicklung in Schleswig-Holstein und dann speziell auf die landwirtschaftlich genutzten Modellböden (Sande und Lehme) der Region Bad Segeberg eingegangen.

In Abb. 6.1 ist zunächst anhand der Daten der Landwirtschaftskammer von Schleswig-Holstein sichtbar, wie stark die mittleren Erträge in SH für Winterweizen, Wintergerste und Winterraps angestiegen sind. Für Winterweizen und Wintergerste hat sich das Ertragsniveau seit 1955 mehr als verdoppelt.

Grafik: Entwicklung der Ernteerträge in Schleswig-Holstein 1955 bis 2014

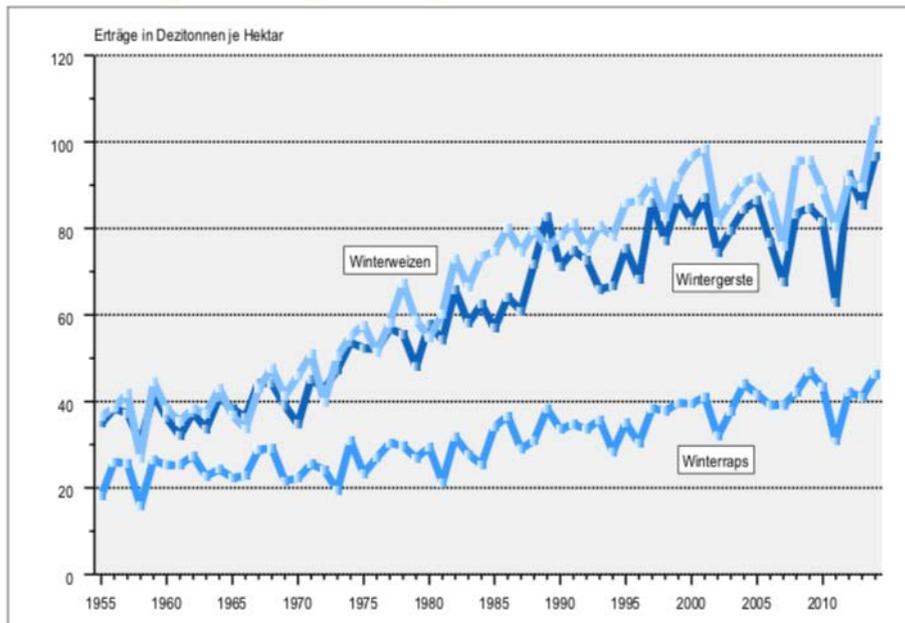


Abb. 6.1: Entwicklung der mittleren Erträge in SH seit 1955 (Quelle: Landwirtschaftskammer Schleswig-Holstein)

Aus der nachfolgend gezeigten Tabelle 6.1 geht hervor, dass Winterweizen, Sommergetreide, Winterraps und Silomais auf erheblichen, d.h. relevanten Flächenanteilen angebaut wird. Daher wurde zur Simulation der Auswirkungen einer Bodenerwärmung eine typische Fruchtfolge aus den wesentlichen Anbaukulturen (Winterweizen-Winterraps-Sommergerste-Silomais) zugrunde gelegt. Zur Vermeidung von Nitratauswaschungsverlusten wurde jeweils vor Sommergerste und Silomais eine winterharte Zwischenfrucht berücksichtigt. Die Kalibrierung der Pflanzenparameter erfolgte unter Nutzung der für die Kulturen vorliegenden phänologischen Beobachtungsdaten des Deutschen Wetterdienstes (DWD) sowie anhand der agrarstatistischen Ertragsdaten für den Kreis Segeberg.

Anbau, Ertrag und Ernte landwirtschaftlicher Feldfrüchte in Schleswig-Holstein 2013 und 2014

Kultur-/Fruchtart	Anbaufläche		Ertrag			Erntemenge	
	2013	2014	D 2008 – 2013	2013	2014	2013	2014
	in 1 000 Hektar		Dezitonnen/Hektar			in 1 000 Tonnen	
Getreide insgesamt (ohne Körnermais)	278,3	285,9	84,0	84,0	98,7	2 336	2 821
davon							
Winterweizen	158,4	188,6	90,2	89,6	104,8	1 419	1 977
Sommer- und Hartweizen	14,0	3,8	68,4	74,4	79,3	104	30
Roggen	26,5	22,8	66,9	76,6	80,8	203	184
Wintergerste	53,4	54,5	82,7	85,3	96,8	455	527
Sommergerste	8,7	4,2	47,1	55,9	55,1	49	23
Hafer und Sommernenggetreide	11,5	6,9	53,4	54,3	56,2	62	39
Triticale	5,8	5,2	69,8	76,3	79,6	44	41
Winterraps	112,6	100,0	41,4	41,0	46,2	462	462
Kartoffeln	5,6	5,7	361,5	341,4	415,5	190	237
Zuckerrüben	8,4	8,5	656,6	684,3	848,9	572	721
Leguminosen zur Ganzpflanzenemte	12,0	10,3	72,0	77,2	82,3	92	84
Grasanbau auf dem Ackerland	43,0	43,3	80,0	80,0	95,9	344	416
Grünmais, Silomais	181,1	175,8	384,8	387,5	439,5	7 016	7 728

Tabelle 6.1: Relevante landwirtschaftliche Kulturen im Anbaubereich sowie Erträge in zwei Vergleichsjahren (2013 und 2014), Quelle: Landwirtschaftskammer Schleswig-Holstein

Zunächst wurde das Modell HERMES anhand der mittleren Ertragsdaten für den Kreis Bad Segeberg geeicht bzw. kalibriert. In Tabelle 6.2 sind diese Ergebnisse dargestellt.

Anbaukultur	Berechnet für Boden 1 Sand	Berechnet für Boden 2 Lehm	Mittelwert aus Boden 1 und 2	Gemessen im Kreis Segeberg	Abweichung Modell
W. Raps	40	43	41,5	39	+6%
W. Weizen	93	95	94	88	+7%
S. Gerste	42	45	43,5	43	+1%
Silomais	433	435	434	412	+5%
Mittel					+4,75

Tabelle 6.2: Durchschnittliche simulierte Erträge der Hauptkulturarten (1981-2016) für die betrachteten Bodenprofile Sand und Lehm im Vergleich zu den mittleren Erträgen des Kreises Segeberg (2010-2016), Quelle: Statistische Ämter des Bundes und der Länder, Deutschland, 2020)

Die Kalibrierung des Modells anhand der mittleren Ertragsdaten (ohne Bezug zum Boden) für den Kreis Segeberg für die Referenzsituation, d.h. ohne Einfluss einer Kabeltrasse zeigt, dass das HERMES Modell die Ertragssituation sehr gut nachvollziehen kann, im Mittel der Anbaukulturen ergibt sich eine leichte Überschätzung der Erträge zwischen +1% bei S. Gerste und +7% bei Raps und W. Weizen; im Mittel aller Kulturen liegt die Abweichung (gemessen/berechnet) bei den Erträgen bei < +5%.

Auswirkungen erhöhter Bodentemperaturen auf Pflanzenwachstum und Entwicklung

Aus der Simulation der neuen Temperaturverteilung im Boden ergibt sich in Richtung Bodenoberfläche eine stark abklingende Erwärmung der durchwurzelten Bodenschichten. Die obersten 10 cm des Bodens zeigen im Durchschnitt eine Erwärmung des Sand- und des Lehmbodens von +1.7 K und +2.1 K. Hintergrund ist, dass diese Temperaturen ganz überwiegend durch die obere Randbedingung der Lufttemperatur bestimmt werden. Das Bodenfrostisiko in Oberflächennähe

nimmt geringfügig ab. In 20-30 cm Tiefe beträgt die Temperaturerhöhung bereits +5.35 K und 6.37 K. Innerhalb der Hauptdurchwurzelungszone von 60 cm Bodentiefe bei Sand und 90 cm Bodentiefe beim Lehm, wird keine für die Pflanze kritische Wachstumstemperatur erreicht; im Gegenteil erhöht die Bodentemperatur die Verfügbarkeit und Aufnahme von Pflanzennährstoffen.

Die phänologische Entwicklung der Pflanzen wird im Wesentlichen durch die Lufttemperatur gesteuert. Lediglich die Dauer der Phase zwischen Aussaat und Auflaufen der Pflanzen wird durch die Bodentemperatur der oberen Bodenschicht beeinflusst. Aus den Simulationen ergeben sich für die Kulturarten eine Verfrühung des Auflauftermins um einen Tag für Winterraps, zwei Tage für Sommergerste und Winterweizen sowie 5-6 Tage für Silomais beim Normallast-Szenario. Beim Höchstlast-Szenario beträgt die Verfrühung 1-2 Tage für Winterraps, 2-8 Tage für Sommergerste, 2-4 Tage für Winterweizen und 6-8 Tage für Silomais. Während sich die Gesamtlänge der Vegetationsperiode vom Auflaufen bis zur Abreife beim Winterraps kaum verändert, erhöht sich die Dauer der anderen Kulturen geringfügig um maximal drei Tage. Daher wird die Auswirkung der Kabelanlage auf die phänologische Entwicklung der Kulturarten insgesamt als relativ gering eingestuft.

Ertragsprognosen für die Modellböden Sand und Lehm

Hinsichtlich des Ertrages werden nur sehr geringe Auswirkungen durch die Bodenerwärmung prognostiziert. Überwiegend reagieren die Pflanzenbestände mit leichten Ertragssteigerungen. Dies gilt für sandige Böden (Modellboden 1) ebenso wie für die Lehmstandorte (Modellboden 1I, Abb. 6.6 bis 6.11). Lediglich beim Winterraps wird auf dem Sandboden eine leichte Abnahme von 1.5% des Ertrages beim Höchstlast-Szenario ermittelt. Bei allen anderen Kulturen liegen die Erträge ca. 1-1,5% über dem Referenz-Szenario, beim Silomais bis zu 2,6%!

Begründung: Das etwas früher einsetzende Wachstum der Kulturpflanzen bei den Standorten mit Kabeltrasse nutzt die Frühjahrsfeuchte im Boden besser aus und durch die etwas früher einsetzende Abreife bei Weizen und Gerste wird der in einzelnen Jahren einsetzende Wasserstress im Sommer stärker vermieden. Bemerkenswert ist ferner, dass die langjährigen Ertragsunterschiede zwischen den Varianten Sand und Lehm sehr gering ausfallen, lediglich in sehr trockenen Jahren ist der Lehm aufgrund seiner etwas höheren Wasserspeicherung im Vorteil. Im Anhang des Kapitels 6 sind die Erträge für alle Varianten als Tabellenwerte aufgeführt.

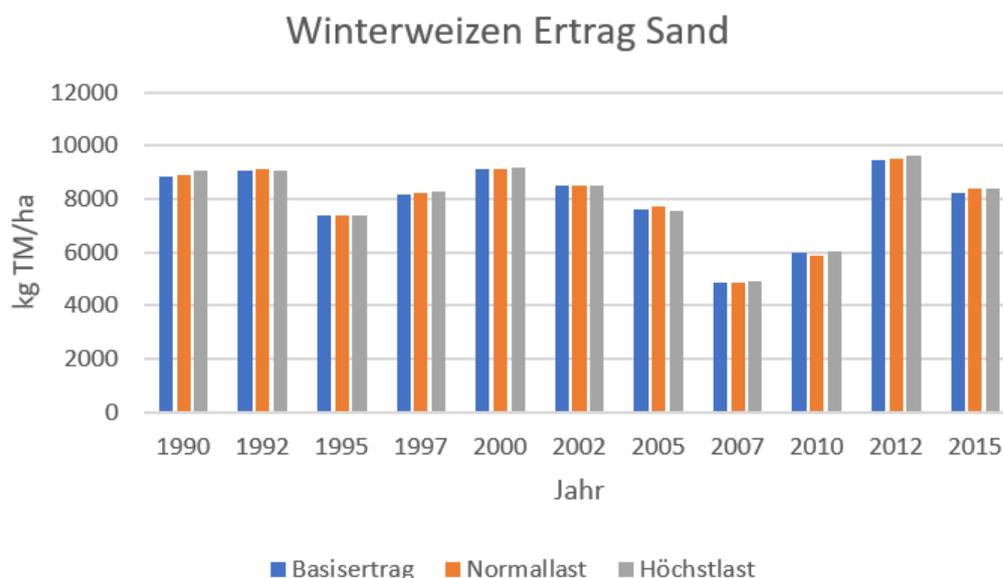


Abb. 6.2: Berechnete Erträge für Winterweizen auf sandigen Böden (Modellboden 1) für den Referenzfall (ohne Kabel) im Vergleich zu Normallast- und Höchstlastbedingungen

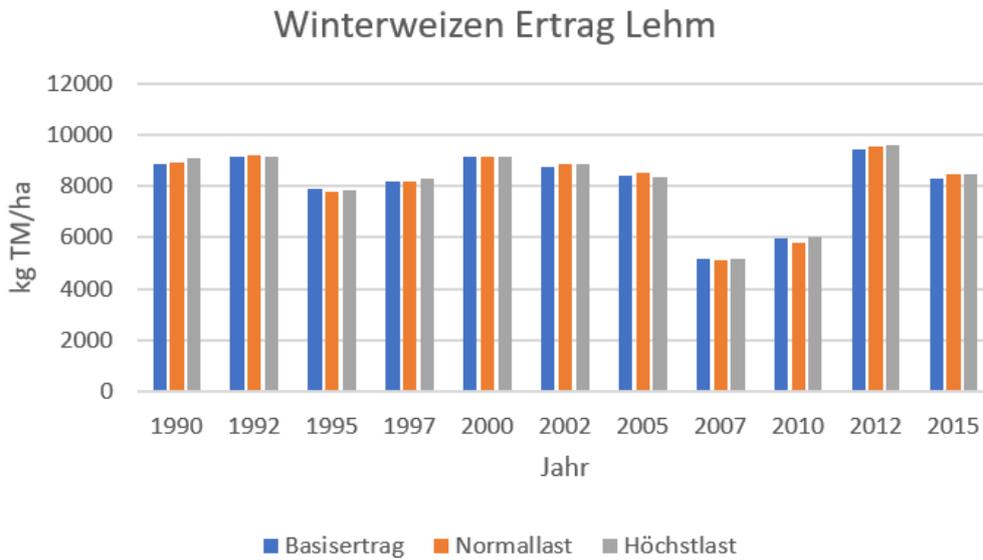


Abb. 6.3: Berechnete Erträge für Winterweizen auf lehmigen Böden (Modellboden 2) für den Referenzfall (ohne Kabel) im Vergleich zu Normallast- und Höchstlastbedingungen

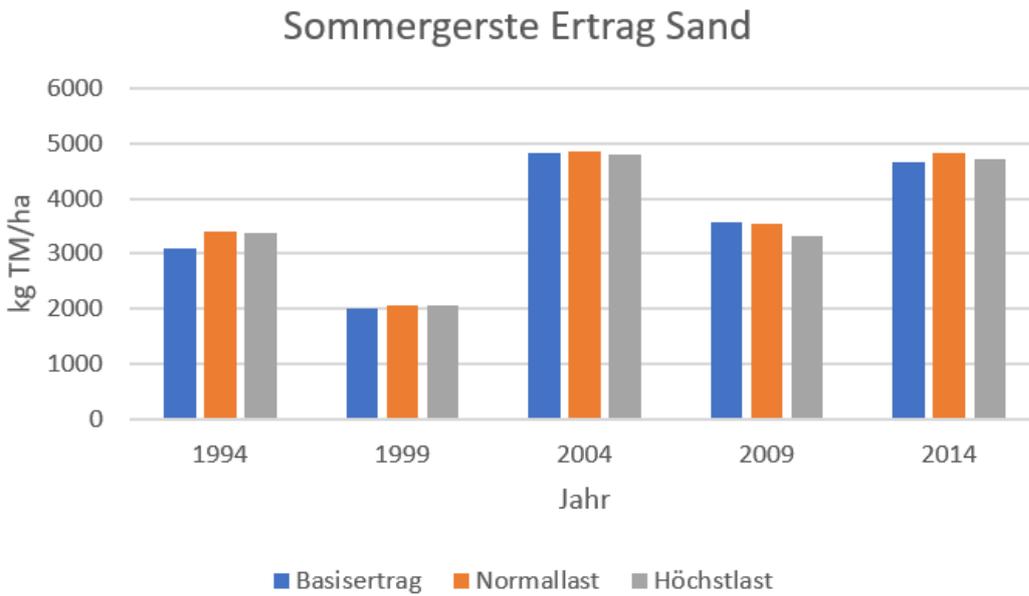


Abb. 6.4: Berechnete Erträge für Sommergerste auf sandigen Böden (Modellboden 1) für den Referenzfall (ohne Kabel) im Vergleich zu Normallast- und Höchstlastbedingungen

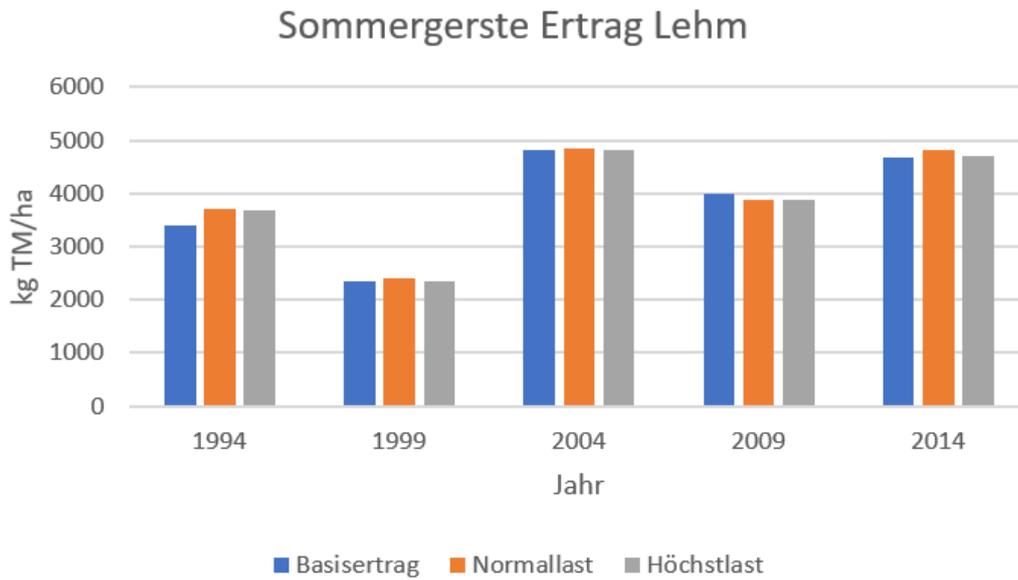


Abb. 6.5: Berechnete Erträge für Sommergerste auf lehmigen Böden (Modellboden 2) für den Referenzfall (ohne Kabel) im Vergleich zu Normallast- und Höchstlastbedingungen

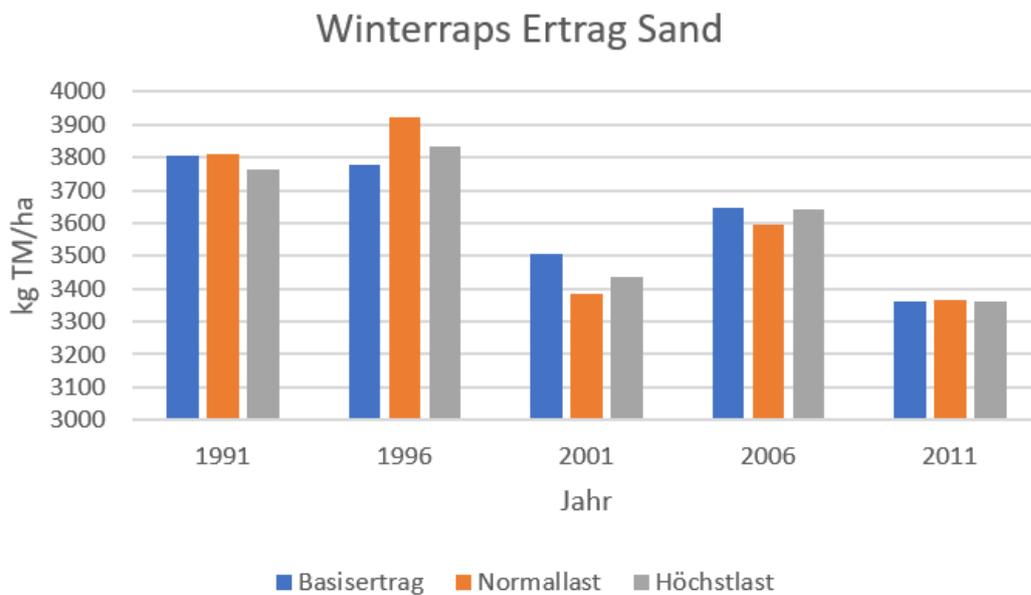


Abb. 6.6: Berechnete Erträge für Winterraps auf sandigen Böden (Modellboden 1) für den Referenzfall (ohne Kabel) im Vergleich zu Normallast- und Höchstlastbedingungen

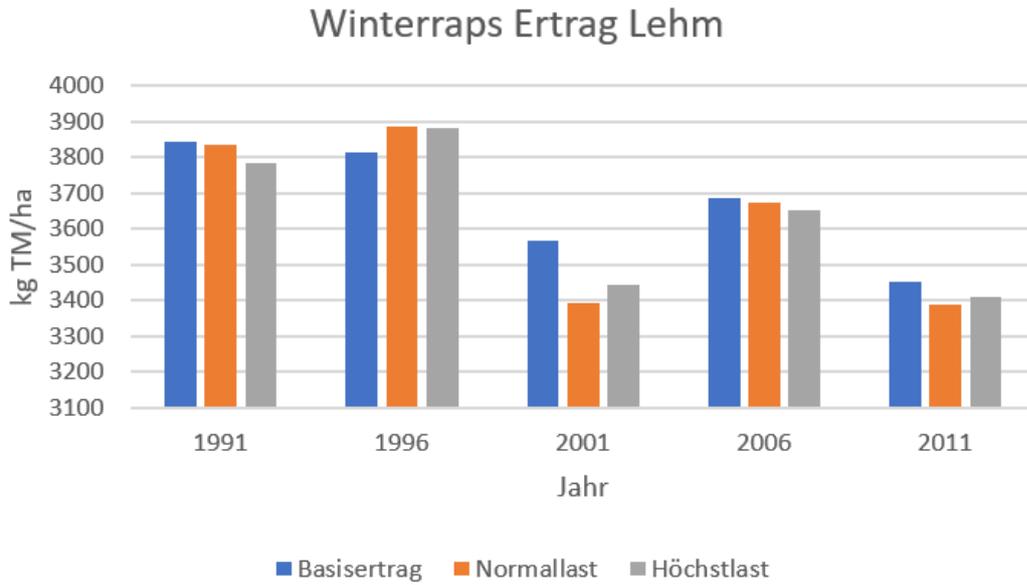


Abb. 6.7: Berechnete Erträge für Winterraps auf lehmigen Böden (Modellboden 2) für den Referenzfall (ohne Kabel) im Vergleich zu Normallast- und Höchstlastbedingungen

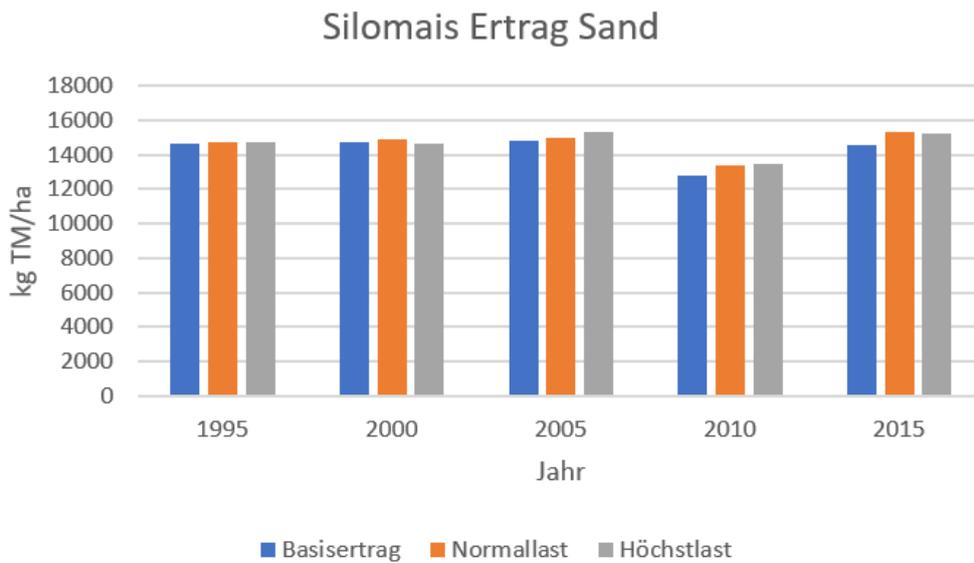


Abb. 6.8: Berechnete Erträge für Silomais auf sandigen Böden (Modellboden 1) für den Referenzfall (ohne Kabel) im Vergleich zu Normallast- und Höchstlastbedingungen

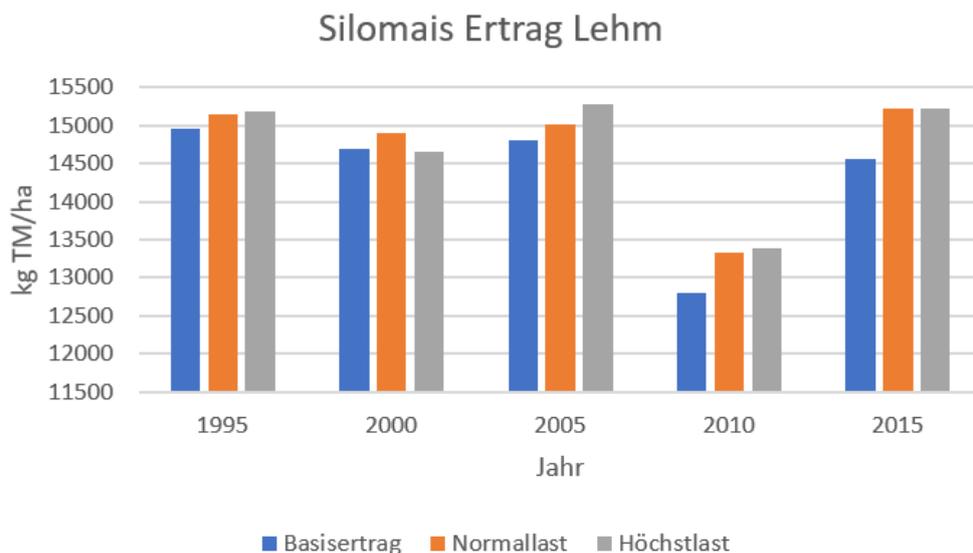


Abb. 6.9: Berechnete Erträge für Silomais auf lehmigen Böden (Modellboden 2) für den Referenzfall (ohne Kabel) im Vergleich zu Normallast- und Höchstlastbedingungen

6.2 Bodenwasserhaushalt und Nitratauswaschung

Nachfolgend werden die Prognosen bzw. Simulationsergebnisse zum Bodenwasserhaushalt anhand der jährlichen realen Evapotranspiration (Verdunstung) und Versickerung sowie die Berechnungen zur potenziellen Stickstoffauswaschung (Nitrat) ins Grundwasser vorgestellt. Diese Ergebnisse sind gleichfalls wichtige Grundlagen für die beteiligten Fachplanungen wie Landschaftsplanung, untere Wasserbehörde, Naturschutz und Landschaftsarchitekten.

Es werden stets die Ergebnisse für den Modellboden 1 (Sand) und zum direkten Vergleich dazu die für den Modellboden 2 (Lehm) gezeigt. Die Jahresangaben beruhen auf täglichen Berechnungen des Wasserhaushalts. Die bodenbedingten Unterschiede für die reale Evapotranspiration und Versickerung fallen beim Sand und Lehm relativ gering aus, bei der Verdunstung liegt stets der Lehm geringfügig höher als der Sand, bei der Versickerung ist es umgekehrt. Erklärung: Die Unterschiede zwischen den Böden fallen im langjährigen Mittel aufgrund der relativ hohen Sommerniederschläge und der relativ geringen potenziellen Verdunstung gering aus.

Als ein weiteres wichtiges Ergebnis lässt sich festhalten: Bei keiner der Stromlastvarianten (Referenz, Normallast, Höchstlast) treten Unterschiede bei der Jahresverdunstung von mehr als 5mm/Jahr auf, d.h. die Bodenerwärmung durch Erdkabel spielt eine vernachlässigbare Rolle für die Höhe der Verdunstung und damit auch für die Bodenaustrocknung.

Erklärung: die Bodenerwärmung in der obersten Bodenschicht ist viel zu gering, um einen Einfluss auf die Höhe der realen Verdunstung zu nehmen. Vielmehr sind es a) die atmosphärischen Bedingungen (Einstrahlung, Temperatur, Sättigungsdefizit der Luft, Wind), die die Höhe der potenziellen Verdunstung bestimmen und b) die Wassermenge im Porenraum des Bodens, die den Wasserumsatz bestimmen. Dieser wird gesteuert a) aus den Niederschlägen während der Vegetationsperiode, b) dem gespeicherten Bodenwasser und c) dem kapillaren Aufstieg aus dem Grundwasser bei grundwasserbeeinflussten Standorten wie Modellboden 3 (Moor).

Hinzu kommt als steuernde Größe, dass der Wärmetransport im Boden stets vom höheren Energiepotenzial zum niedrigeren gerichtet ist, d.h. er ist tagsüber nach unten gerichtet und nachts nach oben. Da nachts kühle atmosphärische Bedingungen vorherrschen, schlägt sich der Wasserdampf an den kühleren Schichten direkt an der Bodenoberfläche nieder und kann (ähnlich wie beim Tau) von

den Pflanzen in den Morgenstunden verwertet werden. In Zeiten mit geringer oder ohne Bodenbedeckung trocknen tagsüber die obersten Zentimeter des Bodens aus und verhindern, ähnlich wie eine Mulchschicht, dass Wasser aus tieferliegenden Schichten nachgeliefert und verdunstet wird.

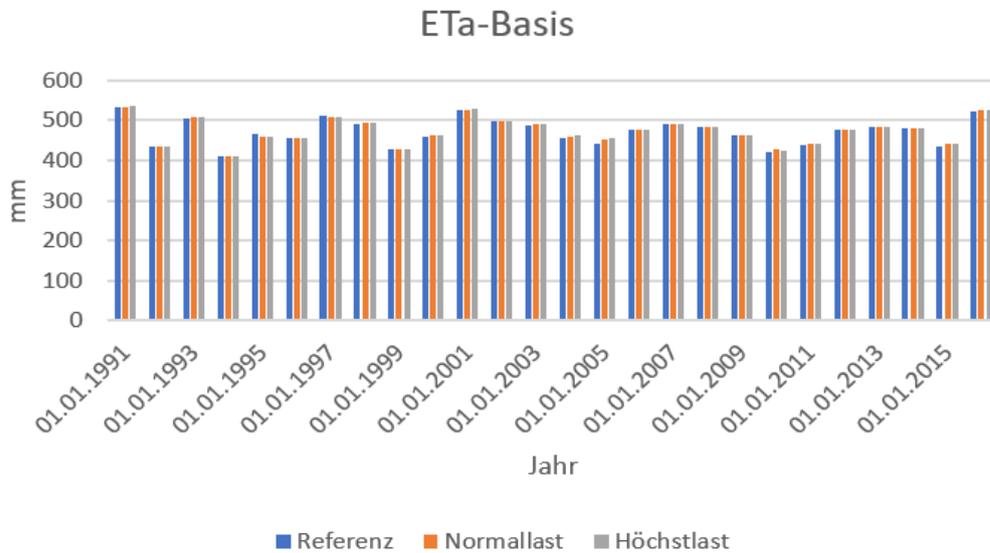


Abb. 6.10: Berechnete reale Evapotranspiration (Eta-Basis) von Sand (Modellboden 1) für den Referenzfall (ohne Kabel) im Vergleich zu Normallast- und Höchstlastbedingungen

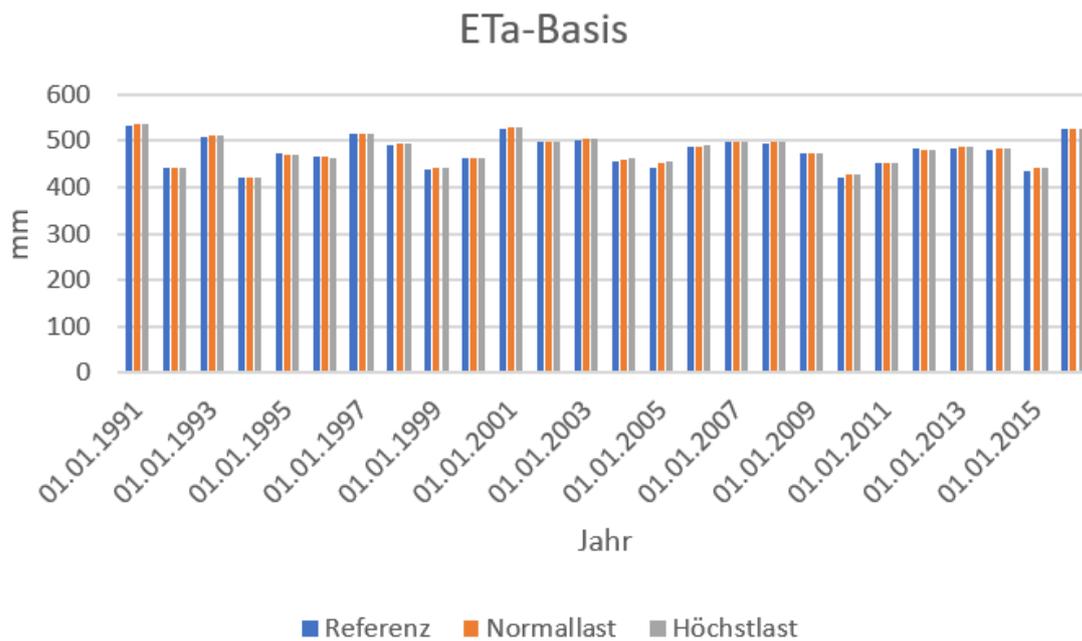


Abb. 6.11: Berechnete reale Evapotranspiration (Eta-Basis) von Lehm (Modellboden 1I) für den Referenzfall (ohne Kabel) im Vergleich zu Normallast- und Höchstlastbedingungen

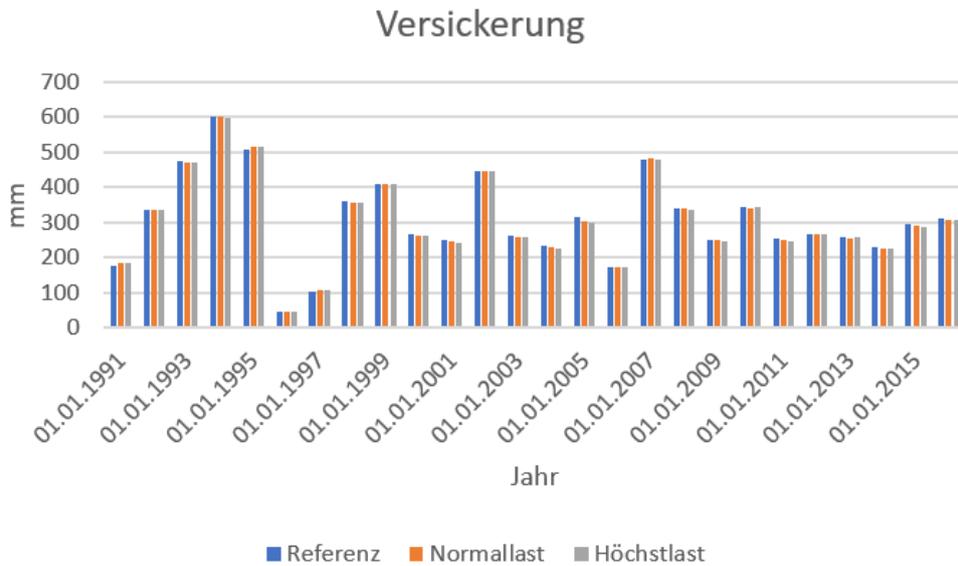


Abb. 6.12: Berechnete jährliche Versickerung unter Sand (Modellboden 1) für den Referenzfall (ohne Kabel) im Vergleich zu Normallast- und Höchstlastbedingungen

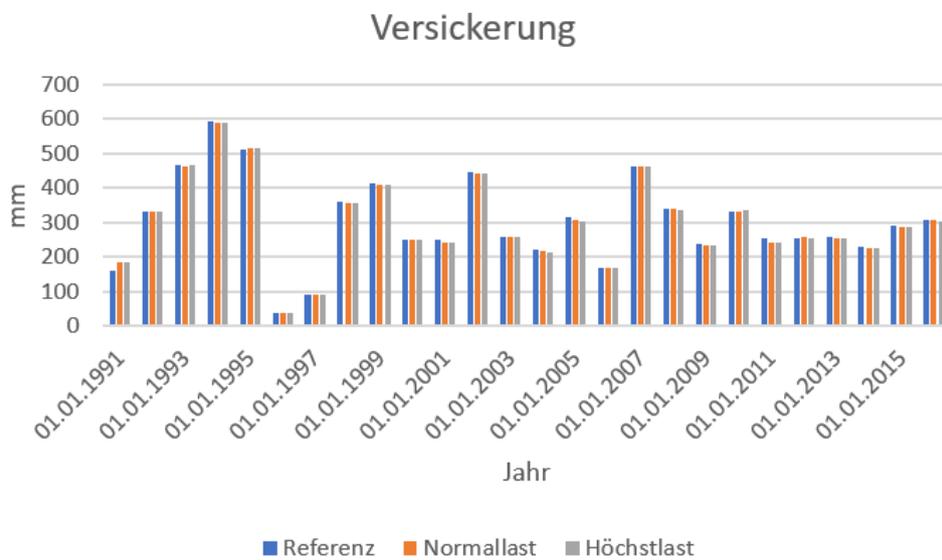


Abb. 6.13: Berechnete jährliche Versickerung unter Lehm (Modellboden 1) für den Referenzfall (ohne Kabel) im Vergleich zu Normallast- und Höchstlastbedingungen

Aspekt Stickstoffauswaschung

Nachfolgend wird auf die Verlagerung von Stickstoff aus dem Wurzelraum eingegangen. Diese Verlagerung bzw. Auswaschung von Stickstoff aus dem Wurzelraum ist für den Landwirt eine unproduktive Verlustgröße und für die Wasserwirtschaft häufig mit Qualitätsproblemen verbunden.

Die Verlagerung von Stickstoff erfolgt überwiegend in Form von Nitrat (NO_3^-). Insgesamt liegt beim Sand die Auswaschung von Nitrat etwas höher als beim Lehm, wie die Abbildungen 6.14 und 6.15 zeigen. In vielen Jahren fällt die Nitrat auswaschung unter den Normal- und Höchstlastbedingungen der Trasse geringer aus als bei der Referenzvariante, was mit einer besseren N-Verwertung und N-Wurzelaufnahme infolge der erhöhten Umgebungstemperaturen auf der Kabeltrasse erklärt werden kann.

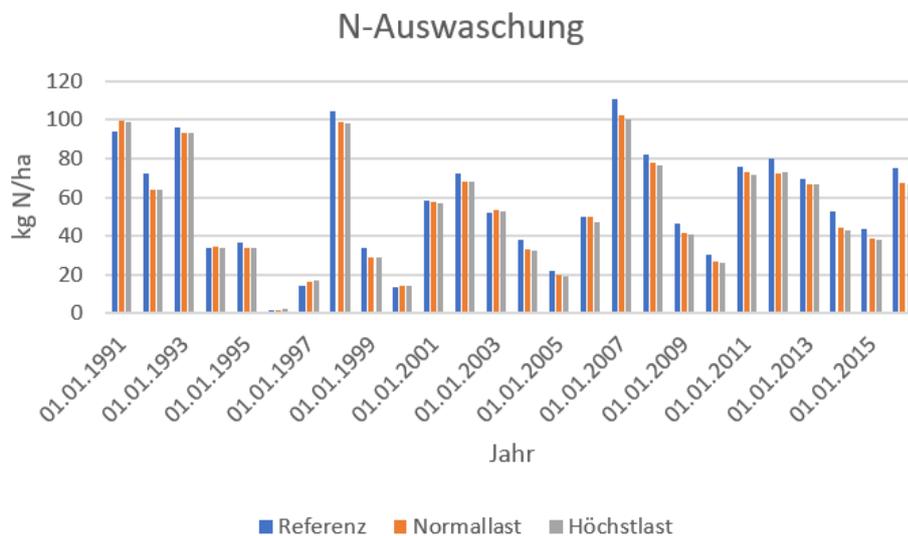


Abb. 6.14: Berechnete Stickstoffauswaschung (Nitrat) bei Sand (Modellboden 1) für den Referenzfall (ohne Kabel) im Vergleich zu Normallast- und Höchstlastbedingungen

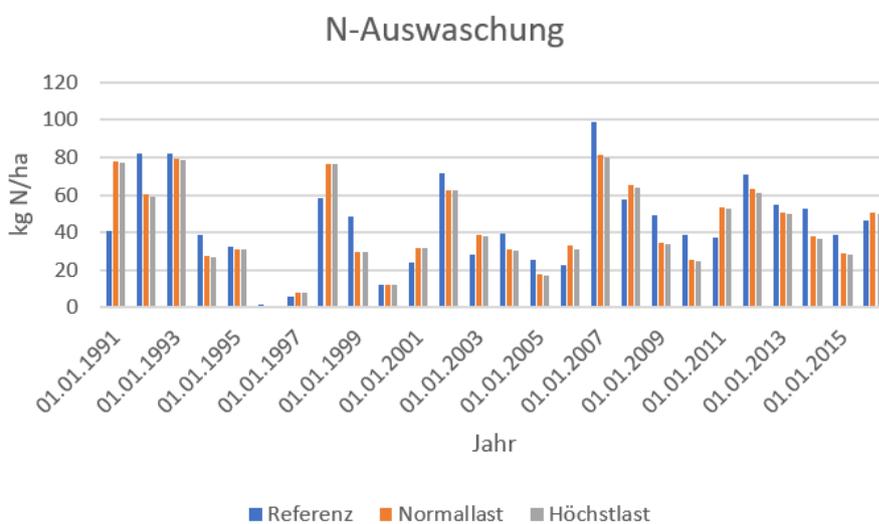


Abb. 6.15: Berechnete Stickstoffauswaschung (Nitrat) bei Lehm (Modellboden 2) für den Referenzfall (ohne Kabel) im Vergleich zu Normallast- und Höchstlastbedingungen

6.3 Mikrobielle Aktivität im Boden (N-Mineralisierung und Denitrifikation)

Aufgrund der höheren Temperatur in den oberen Bodenschichten ist mit einer leicht erhöhten mikrobiellen Aktivität, d.h. Mineralisation von organisch gebundenem Stickstoff zu rechnen. Im Mittel über 30 Jahre wird dieser Effekt zu einem Teil durch den damit einhergehenden Abbau der organischen Substanz kompensiert, so dass im Durchschnitt und bezogen auf die gesamte Kabeltrasse beim Sand und Lehm Boden etwa 2,8 bzw. 6,8 % mehr Stickstoff pro Jahr freigesetzt werden. Dies kann beim Höchstlast-Szenario gegenüber der Referenzvariante zu einem geringfügigen Abbau des organischen Kohlenstoffs um ca. 770 bzw. 1177 kg C/ha in 0-30 cm führen. Die Humusbilanz bleibt bei regelmäßiger Zufuhr organischer Substanz (Stallmist) insgesamt positiv.

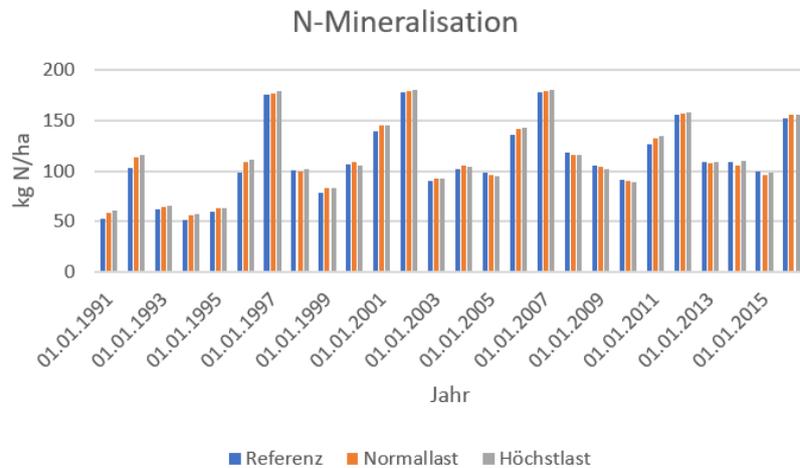


Abb. 6.16: Berechnete Stickstoffmineralisation (N) bei Sand (Modellboden I) für den Referenzfall (ohne Kabel) im Vergleich zu Normallast- und Höchstlastbedingungen

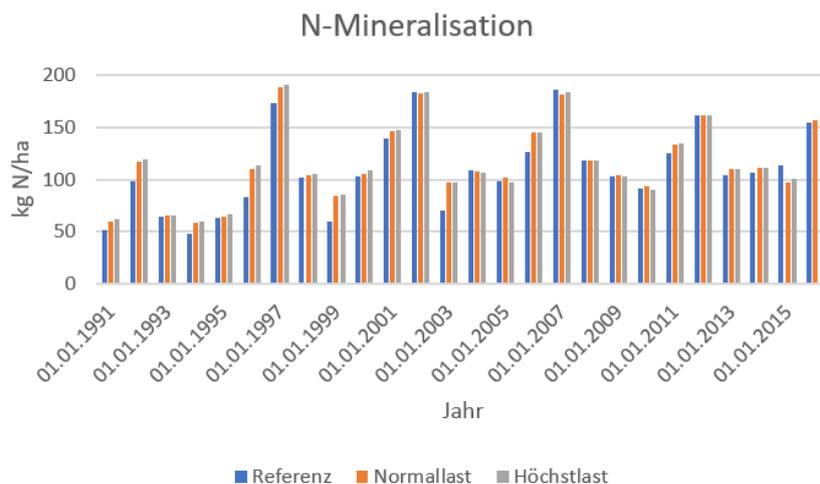


Abb. 6.17: Berechnete Stickstoffmineralisation (N) bei Lehm (Modellboden II) für den Referenzfall (ohne Kabel) im Vergleich zu Normallast- und Höchstlastbedingungen

Aspekt Denitrifikation (gasförmige N-Verluste aus dem Boden)

Die jährlichen Denitrifikationsverluste oberhalb der Kabelanlage können aufgrund der Bodenerwärmung um ca. +10 kg N/ha beim Sand und +12 kg N/ha beim Lehm Boden ansteigen. Dieser linienförmige Anstieg der gasförmigen N-Freisetzung oberhalb der Kabelanlage ist vor allem auf die Erhöhung der Bodentemperatur in den Wintermonaten zurückzuführen, weil dann auch hohe Bodenfeuchten vorherrschen. Die Bodenfeuchte ist beim Lehm naturgemäß höher als beim Sand.

Durch den Anstieg der gasförmigen N-Verluste in die Atmosphäre sowie das früher und intensiver einsetzende Pflanzenwachstum ist mit einem Rückgang der Nitratauswaschung bezogen auf die Kabeltrasse in 150 cm Tiefe um ca. 3-5 % zu rechnen. Als Resultat der leicht angestiegenen N-Gasverluste in die Atmosphäre und des verbesserten Pflanzenwachstums steigt der Bedarf an N-Düngung im Trassenbereich geringfügig um +4,5 kg N/ha für Winterweizen und Winterraps und um +2 kg N/ha für Silomais auf dem Lehm Boden an. Bezogen auf das mittlere N-Düngungsniveau sind das jedoch weniger als 2%. Der Düngungsbedarf beim Winterraps auf Sandboden geht hingegen geringfügig zurück. Der N-Aufwand für den Sommergerstenanbau ändert sich dagegen nicht.

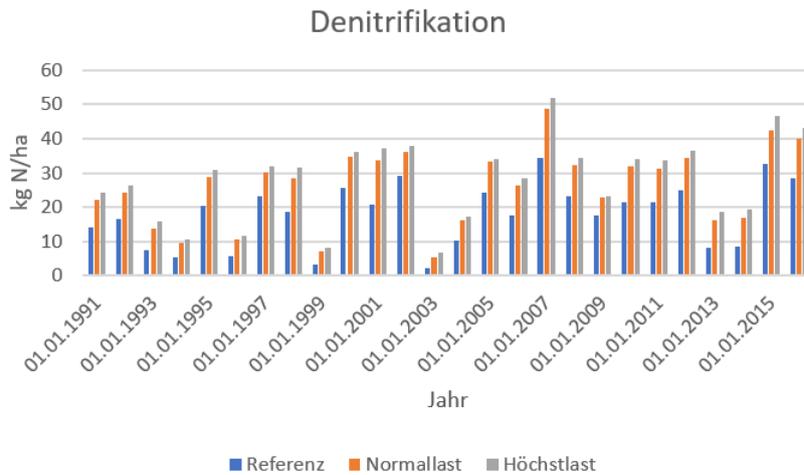


Abb. 6.18: Berechnete Denitrifikation (Kg N) bei Sand (Modellboden 1) für den Referenzfall (ohne Kabel) im Vergleich zu Normallast- und Höchstlastbedingungen

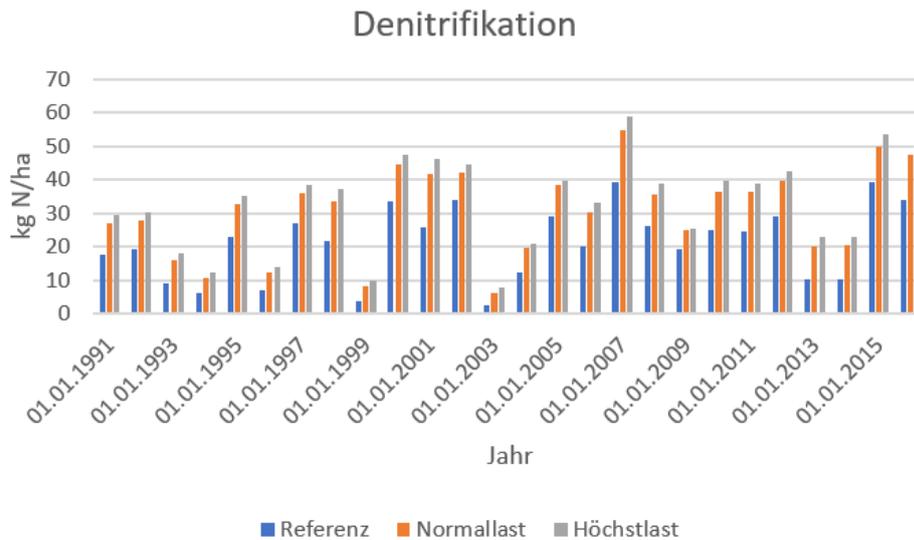


Abb. 6.19: Berechnete Denitrifikation (Kg N) bei Lehm (Modellboden 2) für den Referenzfall (ohne Kabel) im Vergleich zu Normallast- und Höchstlastbedingungen

Bewertung

Insgesamt lässt sich festhalten, dass die direkten Umweltauswirkungen der Kabelanlage auf die mikrobiellen Prozesse des N-Haushalts (Mineralisation, Denitrifikation, N-Auswaschung) relativ gering ausfallen, weil sich a) die oben dargestellten Ergebnisse nur auf den engen Bereich der Kabeltrasse beziehen und b) die 1D- Berechnungen mit dem HERMES Modell die laterale Wärmeabfuhr nicht berücksichtigen. Bezogen auf die Gesamtgeometrie der Kabeltrasse (siehe Abb. 6) bedeutet dies, dass die tatsächlichen Zahlen nochmals um 40-50% geringer ausfallen.

6.4 Moore und Steuergrößen zum Moorschutz

Moore erfüllen wichtige Funktionen in der Landschaft und sind daher zumeist geschützte Lebensräume für Fauna und Flora; oft stehen sie unter Naturschutz oder Landschaftsschutz. Es gilt ferner in hohem Maße diese Flächen zu erhalten, weil Torfe wichtige Kohlenstoffspeicher sind.

Abb. 6.20 zeigt zunächst, dass sich sehr viele Moore aufgrund der Klimabesonderheiten und Geogenese in Norddeutschland befinden. Durch Grundwasserabsenkungen infolge von Gewässerregulierungen oder Dränungen, mit dem Ziel einer verbesserten landwirtschaftlichen Nutzung der Flächen, wurden seit ca. 150 Jahren viele Moor- und Auenstandorte entsprechend entwässert. Grundlegende Arbeiten zu Veränderungen der Moore infolge von Entwässerung sowie zu Aspekten des Naturschutzes wurden von Mundel, 1982a-d, 1996, Luthardt & Zeitz, 2014, Kluge et al., 2013, Renger et al., 2002 und Wessolek et al., 2002 durchgeführt.

Zunächst werden die wichtigsten Steuergrößen vorgestellt, die den Erhalt von Moorstandorten regulieren, dies sind der vorherrschende Grundwasserstand und die Bodentemperatur. Danach werden diese beiden Umweltfaktoren auf die Standorte im Untersuchungsgebiet (Pinnauwiesen) am Beispiel des Modellbodens 3 angewandt bzw. übertragen.

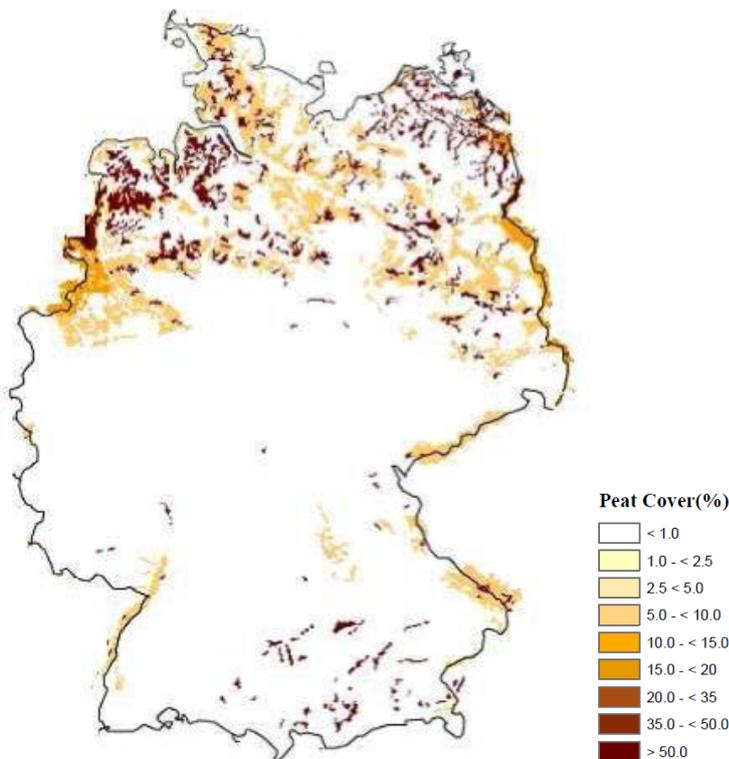


Abb. 6.20: Lage und Verteilung von Mooren in Deutschland (nach Hiederer, 2006)

In Abb. 6.21 wird anhand einer Literaturlauswertung von Höper (2007) gezeigt, wie die jeweilige Landnutzung einen großen Einfluss auf die CO₂-C Freisetzung ausübt. Die Freisetzung nimmt in der Reihenfolge Acker > intensive Graslandnutzung > extensive Graslandnutzung > Wald ab.

Mit anderen Worten: Ein naturnaher Bruchwald mit Erlen oder Seggen und hohen Grundwasserständen setzt kaum oder deutlich weniger Spurengase frei als eine intensive Acker- oder Grünlandnutzung. Tabelle 6.3 zeigt in diesem Zusammenhang eine Zusammenstellung von wissenschaftlichen Studien zu CO₂-C Freisetzungsraten aus Moorböden in ganz Deutschland.

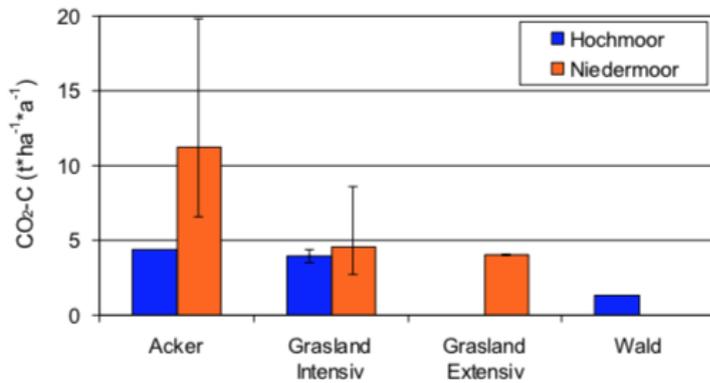


Abb. 6.21: Jährliche CO₂-C Freisetzung verschiedener Moortypen in den gemäßigten Breiten nach einer Literaturschau von Höper (2007). Die Fehlerbreiten stellen den höchsten und niedrigsten Wert dar

Autoren	Untersuchungsgebiet	Wasserregime/ Nutzung	Messmethode	CO ₂ -C-Freisetzung kg*ha ⁻¹ *a ⁻¹
MUNDEL (1976)	Paulinenaue, Brandenburg; Niedermoor	Grünlandnutzung/ GW 30-120 cm u. GOK	Lysimeterversuche, künstlich geschüttet; Spezielle Aufbaubedingungen	2900-6700
WESSOLEK et al. (1999)	Rhinluch, Brandenburg; Niedermoor	intensive Grünlandnutzung/ GW- 30 - 50 cm u. GOK	Massenbilanzierung: Mächtigkeitsverlust (Zeitraum: 22 a)	3080
GENSOR & ZEITZ (1999)	Biesenbrow Brandenburg; Niedermoor	Überstau, intensive Grünlandnutzung, drainiert	CO ₂ Flussmessung	0-5600
MEYER et al. (2001)	Dümmer, Niedersachsen; Niedermoor	Grünlandnutzung, drainiert/ GW 57 cm u. GOK	„Geschlossene-Kammer-Methode“, Flussmessungen	4120
RENGER et al. (2002)	Rhinluch, Brandenburg; Niedermoor	intensive Grünlandnutzung/ GW 30 - 120 cm u. GOK	Respirationsmessung und Modellierung	2800-7000
KLUGE (2003)	Randow-Welse, Brandenburg; Niedermoor	intensive Grünlandnutzung/ GW 50-120 cm u. GOK	Massenbilanzierung: Mächtigkeitsverlust (Zeitraum: 40 a)	6900
DROBLER (2005)	Kendimühlfilze Bayern; Hochmoor	drainiert/ GW 1117cm u. GOK	„Geschlossene-Kammer-Methode“, Flussmessungen	2250-2460
LORENZ (2008)	Spreewald, Brandenburg; Niedermoor	verschiedene Varianten/ GW 20-110 cm u. GOK	Respirationsmessung und Modellierung	1600-4100
KLUGE et al. (2008)	Randow-Welse, Brandenburg; degradiertes Niedermoor	intensive Grünlandnutzung/ GW 30-80 cm u. GOK	Respirationsmessung und Modellierung	2900-5800

Quelle: aus WERKENTHIN 2012, nach KLUGE et al. 2008. GW = Grundwasserstand, GOK = Geländeoberkante.

Tabelle 6.3: Zusammenstellung von CO₂-C Freisetzungsraten aus Mooren in Deutschland (aus Werkenthin, 2012)

Grundsätzlich gilt: Nasse Standorte mit hohem Grundwasserstand konservieren Torfe, weil durch Sauerstoffmangel im Porenraum eine Mineralisierung der organischen Substanz weitgehend

verhindert wird. Wie stark der Grundwasserstand selbst als Steuergröße der Mineralisierung und damit der CO₂-C Freisetzung wirkt, wird anhand der Abbildung 6.22 verdeutlicht.

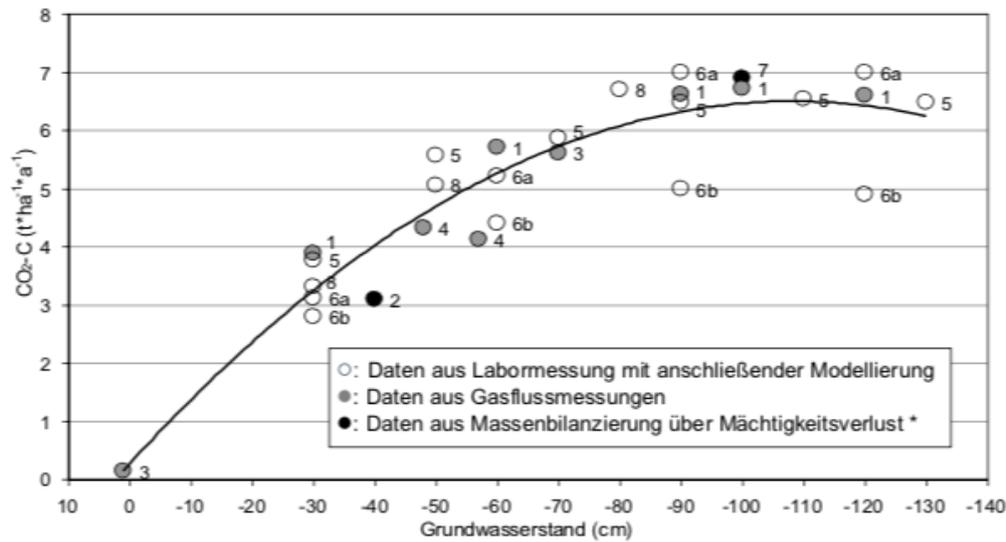


Abb. 6.22: Jährliche CO₂-C Freisetzung aus norddeutschen Niedermooren mit einer Moormächtigkeitsspanne von 150 cm unter Grünlandnutzung in Abhängigkeit vom mittleren Grundwasserstand; Zusammenstellung von Ergebnissen aus: (1) Mundel, 1976, (2) Wessolek et al., 1993, (3) Gensior und Zeitz, 1999, (4) Meyer et al., 2001, (5) Wessolek et al., 2002, (6a, 6b) Renger et al. 2002, (7) Kluge, 2003, (8) Kluge et al., 2008; n=28

6.5 Folgen einer Temperaturerhöhung auf die CO₂-C Freisetzung bei Mooren

Nachfolgend wird dargelegt, wie für den Niedermoorstandort (Modellboden 3) die Folgen von erhöhten Bodentemperaturen auf die Freisetzung von CO₂-C berechnet wurden. Zunächst wird auf die Rolle der Bodentemperatur als wichtige Steuergröße der CO₂-C Freisetzung eingegangen. Torfe setzen in Abhängigkeit vom Wassergehalt und Bodentemperatur CO₂-C frei; dieser Verlauf ist für einen Niedermoorortorf mit der Zersetzungsstufe H9 (wie bei Modellboden 3) in Abb. 6.23 und Tabelle 6.4 dargestellt. Es wird deutlich, dass mit zunehmender Temperatur und Wasserspannung die CO₂-C Freisetzung zunimmt, vor allem dann, wenn die Temperaturen >20 Grad C betragen.

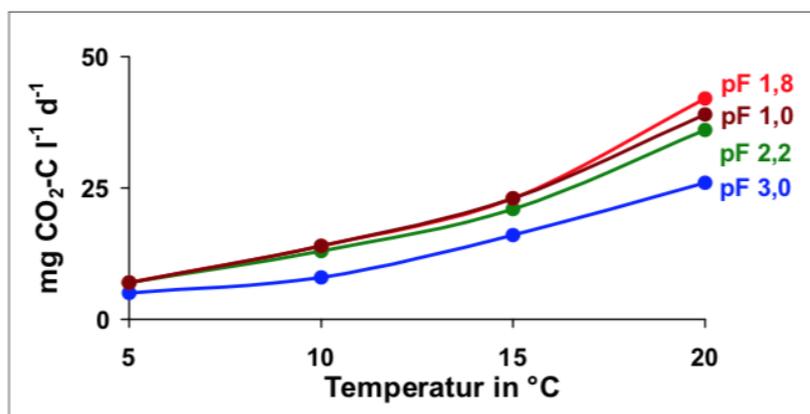


Abb. 6.23: CO₂-C Freisetzungsfunktion von Niedermoorortorf der Zersetzungsstufe H9 (entspricht dem Modellbodens 3) bei unterschiedlichen Wasserspannungen (pF-Werte) und Bodentemperaturen (x), entnommen aus: Wessolek et al. 2003: Veränderungen des Bodenwasserhaushaltes, der Biomasseproduktion und der Degradierung von Niedermooren als Folgen des globalen Wandels, Endbericht „Globaler Wandel“ (GLOWA)

Wasserspannung	CO ₂ -C-Freisetzungsfunktion	Bestimmtheitsmaß
pF 1,0	$y = 4,2065 \cdot e^{0,1078 x}$	$R^2 = 0.98$
pF 1,8	$y = 2,7735 \cdot e^{0,1128 x}$	$R^2 = 0.94$
pF 2,2	$y = 4,0415 \cdot e^{0,1174 x}$	$R^2 = 0.96$
pF 3,0	$y = 4,1940 \cdot e^{0,1130 x}$	$R^2 = 0.94$

Tabelle 6.4: CO₂-C- Freisetzungsfunktionen für unterschiedliche pF Stufen nach Kluge et al. 2013

Mit Hilfe von:

a) CO₂-C Freisetzungsfunktionen, die in dem Forschungsvorhaben „Regionalisierung von CO₂-C Emissionen aus Niedermooren“ speziell für Niedermoore von Kluge et al., 2013, bestimmt worden sind

b) den Klimabedingungen im Untersuchungsgebiet

c) den berechneten Temperaturerhöhungen auf der Kabeltrasse für den Modellboden 3 (siehe Kapitel 3 und 5) sowie

d) den physikalischen Bodeneigenschaften des Niedermoors (Kapitel 3) und für die zugrundeliegende Kabeltrassegeometrie (Abb. 6)

wurden die Auswirkungen auf die CO₂-C Freisetzung für drei Varianten (ohne Kabel, Normallast, Höchstlast) mit Hilfe des Modells BO-WAS berechnet.

Die Ergebnisse der berechneten CO₂-C Freisetzung für Niedermoor-Trassenabschnitte sind in Tabelle 6.5 für einen zehnjährigen Simulationszeitraum (2010-2019) zusammengestellt. Die Jahresangaben zur Kohlendioxidfreisetzung erfolgen in Kg CO₂-C/ha a. In der Tabelle sind für die jeweiligen Jahre Angaben zur CO₂-C Freisetzung für eine Moorfläche ohne Kabeltrasse (Referenz) sowie jeweils für eine Trasse bei Normallast und Höchstlast aufgeführt.

Jahr	Referenz (ohne)	Normallast	Höchstlast
2010	3.380	3.610	3.825
2011	3.320	3.460	3.660
2012	3.250	3.375	3.550
2013	3.440	3.615	3.825
2014	3.510	3.725	3.970
2015	3.200	3.365	3.550
2016	3.470	3.645	3.860
2017	3.220	3.325	3.490
2018	3.920	4.280	4.620
2019	3.460	3.685	3.925
Mittelwert	3.417	3.609	3.828
Zunahme (%)		5,6	12

Tabelle 6.5: Berechnete CO₂-C Verluste (Kg CO₂-C/ha) von Niedermoor (Modellboden 3) für die Varianten: a) Referenz= ohne Erdkabelerwärmung, b) bei Normallast und c) bei Höchstlast

Unter Normallastbedingungen steigt die CO₂-C Freisetzung der Kabeltrasse gegenüber der Referenz (ohne Kabelanlage) um 5,6% an, unter Höchstlast um 12%. In Trockenjahren (wie 2018) können höhere Freisetzungsraten auftreten, während sie in kühlen, feuchten Jahren (2017) relativ niedrig sind.

Fazit, allgemeine Einordnung und Bewertung

Die CO₂-C Freisetzung der Moore (ohne Einfluss einer Kabelanlage) ist im Wesentlichen abhängig vom Grundwasserflurabstand. Dies wird anhand des Kurvenverlaufs der blauen Linie in Abb. 6.24 für die gegenwärtigen Klimabedingungen im Untersuchungsgebiet gezeigt. Gegenwärtig werden bei einem mittleren Grundwasserflurabstand von ca. 90 cm unter Geländeoberfläche (GOF) ca. 3.417 Kg CO₂-C pro Jahr freigesetzt (s. auch Tabelle 6.5). Bei höheren Grundwasserständen fällt die Freisetzung entsprechend geringer aus, weil dann der Torfkörper wassergesättigt ist und nicht belüftet wird. Die hohen CO₂-C-Freisetzungsraten bei tiefen Grundwasserständen sind eine Folge der Moorentwässerung (Melioration, Dränung) in den 50er bis Mitte der 70er Jahre. Ziel war es, die landwirtschaftlichen Produktionsbedingungen (z.B. Befahrbarkeit, Ertragsniveau) zu verbessern. Dies hatte zur Folge, dass der Moorkörper belüftet wurde und damit stärker mineralisierte.

Zur Rolle des Klimas: Die rote Linie in Abb. 6.24 zeigt die prognostizierte CO₂-C-Freisetzung für zukünftige Klimabedingungen an. Durch den zu erwartenden Klimawandel werden die heutigen Moorverluste voraussichtlich um 10-15% ansteigen.

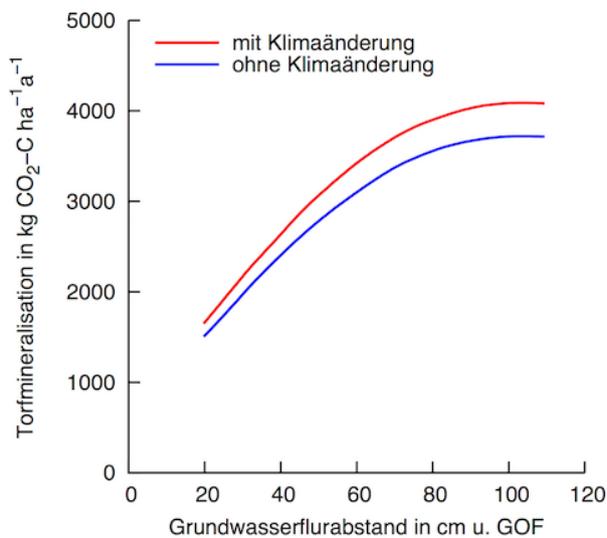


Abb. 6.24: Torfmineralisation für unterschiedliche Grundwasserstände unter gegenwärtigen Klimabedingungen (blaue Kurve) und bei prognostizierter Klimaänderung (rote Kurve)

Zur Einordnung der Kabelanlage: Bei einer Erdkabeltrasse unter Normallast erwärmt sich der durchwurzelte Oberboden lokal begrenzt um 2-3 Kelvin. Dies führt im Bereich der Kabeltrasse zu einer stärkeren Umsetzung bzw. Mineralisierung der Torfe in Höhe von 5% (Normallast) bis 12% (Höchstlast). Da jedoch nur Teile des Moores von einer Trasse durchzogen werden, fällt die prognostizierte Zunahme bezogen auf die Gesamtfläche deutlich geringer aus. Ein Beispiel: Werden 5% der Moorfläche von einer Kabeltrasse durchzogen, erhöht sich die CO₂-C-Gesamtfreisetzung um weniger als 1%.

Fazit: Die Höhe der Freisetzung von CO₂-C im Moor wird zuallererst vom Grundwasserstand gesteuert, in zweiter Linie vom Klimageschehen und erst an dritter Stelle von der Querung einer Kabeltrasse.

7 Gesamtfazit und Empfehlungen

Folgende Schlussfolgerungen im Hinblick auf Landwirtschaft und Umwelt lassen sich für die geplanten Kabeltrassen ableiten:

- Auf beiden Kabeltrassen treten Sande und Lehme als dominante Bodenformen auf; in der Pinnauniederung sind außerdem organische Böden (Niedermoore) mit Grundwassereinfluss typisch. Für drei Modellböden (Sand, Lehm, Moor) wurden umfassende numerische Umweltfallstudien durchgeführt, um die Auswirkungen einer Bodenerwärmung bei Normallast und Höchstlastbedingungen gegenüber einer Referenzsituation (ohne Kabel) zu prüfen.
- In Tabelle 7.1 sind zunächst aus Studie I (Dr. Stammen) die mittleren Bodenerwärmungen (K) für die drei Böden für mittlere Last und Höchstlast (=thermische Grenzlast) und unterschiedliche Bodentiefen zusammengestellt; Gesamtfazit: die Zunahmen der Temperaturen sind für das Pflanzenwachstum unproblematisch.

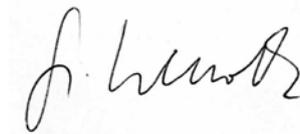
Tiefe	0,0 m	0,2 m	0,5 m	1,0 m
Erwärmung bei mittlerer Last				
sandiger Boden/ K	1,3	2,3	4,0	7,1
lehmiger Boden/ K	1,2	2,3	4,6	8,1
Moorboden/ K	1,4	2,7	5,7	15,6
Erwärmung bei thermischer Grenzlast				
sandiger Boden/ K	1,6	2,9	4,9	8,8
lehmiger Boden/ K	1,5	2,7	5,7	10,0
Moorboden/ K	1,6 K	3,3	7,2	13,3

Tabelle 7.1: Zusammenfassung aller Bodenerwärmungen, siehe Bericht Teil I, Dr. Stammen, 2020

- Landwirtschaft: Die Auswirkungen der Bodenerwärmungen auf die Erträge der Kulturpflanzen bei sandigen und lehmigen Böden sind bei Normallast und selbst bei Höchstlast als gering und nicht signifikant einzustufen. Die Pflanzenentwicklung wird durch ein früheres Auflaufen um wenige Tage bis zu einer Woche beschleunigt. Die darauffolgende Entwicklung der Kulturpflanzen wird dagegen durch die atmosphärischen Bedingungen (Licht und Wärme) gesteuert. Bis zum Erntezeitpunkt haben sich die Entwicklungsunterschiede im Bestand weitgehend angeglichen, d.h. eine gesonderte Ernte auf der Trasse ist nicht erforderlich. Die Bodenerwärmung im Hauptwurzelraum führt tendenziell zu einem geringfügig höheren Ertragspotenzial, weil die Prozesse Mineralisierung, Nährstoffversorgung und -aufnahme der Pflanzen begünstigt werden.
- Eine relevante Bodenaustrocknung und Zunahme von Wassermangelstress im Wurzelraum für die Kulturpflanzen durch die Kabelerwärmung in 160 cm Tiefe findet nicht statt, sie liegt bei weniger als 5mm/a (= < 5 Liter /m²) bei mittleren Niederschlägen von 800 mm im Jahr.
- Die Unterschiede zwischen den Böden Sand und Lehm fallen erwartungsgemäß gering aus. Dies liegt vor allem daran, dass unter den eher kühl-feuchten Bedingungen des Untersuchungsgebiets die Wasserversorgung sehr ähnlich ist und sich die Bodenunterschiede nur in geringem Maße auswirken, dies gilt vor allem im Frühjahr. In ausgeprägten

Trockenjahren steht dem Lehm mehr Bodenwasser zur Verfügung während sich beim Sand Wassermangel früher einstellt und sich eher begrenzend auf das Pflanzenwachstum auswirkt.

- Infolge des Klimawandels werden Trockenjahre vermehrt auftreten, was dazu führen wird, dass die Erträge bei Sanden stärker abnehmen werden als bei Lehmböden. Der prognostizierte Klimawandel wird insgesamt einen größeren Einfluss auf Erträge und Umweltprozesse ausüben als die lokal geplante Kabeltrasse.
- Stickstoffhaushalt: Die Nitratbelastung des Sickerwassers geht im Bereich der Trasse leicht zurück, weil die Pflanzen mehr Stickstoff aufnehmen als vorher. Durch den kabelbedingten Temperaturanstieg steigt die Denitrifikation auf der Trasse leicht an.
- Moorstandorte: Bei einer Verlegung der Kabeltrasse durch die Moorstandorte der Trasse Henstedt-Ulzburg ist zu erwarten, dass die Mineralisation der Torfsubstrate oberhalb der Trasse geringfügig zunehmen wird. Negative Einflüsse auf die Erträge sind nicht zu erwarten, im Gegenteil wird die geringfügige Temperaturzunahme das Pflanzenwachstum begünstigen.



(Prof. Dr. G. Wessolek)

8 Literatur

Allen, R.G., L.S. Pereira, D. Raes, and M. Smith. 1998. Crop evapotranspiration. Guidelines for computing crop water requirements. Irrigation and Drainage Paper 56. FAO, Rome.

ATV-DVWK, 1996. Ermittlung der Verdunstung von Land- und Wasserflächen, Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall (DWA), DVWK-M 238 und ATV-DVWK-M 504.

Asseng, S., Ewert, F., Rosenzweig, C., Jones, J.W., Hatfield, J.L., Ruane, A., Boote, K.J., Thorburn, P., Rötter, R.P., Cammarano, D., Brisson, N., Basso, B., Martre, P., Aggarwal, P.K., Angulo, C., Bertuzzi, P., Biernath, C., Challinor, A., Doltra, J., Gayler, S., Goldberg, R., Grant, R., Heng, L., Hooker, J., Hunt, T., Ingwersen, J., Izaurralde, C., Kersebaum, K.C., Müller, C., Naresh Kumar, S., Nendel, C., O’Leary, G., Olesen, J.E., Osborne, T.M., Palosuo, T., Priesack, E., Ripoche, D., Semenov, M., Shcherbak, I., Steduto, P., Stöckle, C., Stratonovitch, P., Streck, T., Supit, I., Tao, F., Travasso, M., Waha, K., Wallach, D., White, J., Williams, J.R., Wolf, J., 2013. Quantifying uncertainties in simulating wheat yields under climate change. *Nature Climate Change* 3, 827–832.

Asseng, S., Ewert, F., Martre, P., Rötter, R.P., Lobell, D.B., Cammarano, D., Kimball, B.A., Ottman, M.J., Wall, G.W., White, J.W., Reynolds, M.P., Alderman, P.D., Prasad, P.V.V., Aggarwal, P.K., Anothai, J., Basso, B., Biernath, C., Challinor, A.J., De Sanctis, G., Doltra, J., Fereres, E., Garcia-Vila, M., Gayler, S., Hoogenboom, G., Hunt, L.A., Izaurralde, R.C., Jabloun, M., Jones, C.D., Kersebaum, K.C., Koehler, A.-K., Müller, C., Naresh Kumar, S., Nendel, C., O’Leary, G., Olesen, J.E., Palosuo, T., Priesack, E., Eyshi Rezaei, E., Ruane, A.C., Semenov, M.A., Shcherbak, I., Stöckle, C., Stratonovitch, P., Streck, T., Supit, I., Tao, F., Thorburn, P., Waha, K., Wang, E., Wallach, D., Wolf, J., Zhao, Z., Zhu, Y. 2015. Rising temperatures reduce global wheat production. *Nature Climate Change* 5, 2, 143-147. DOI: 10.1038/NCLIMATE2470

Bassu, S., Brisson, N., Durand, J.-L., Boote, K.J., Lizaso, J., Jones J.W., Rosenzweig, C., Ruane, A.C., Adam, M., Baron, C., Basso, B., Biernath, C., Boogaard, H., Conijn, S., Corbeels, M., Deryng, D., De Sanctis, G., Gayler, S., Grassini, P., Hatfield, J., Hoek, S., Izaurralde, C., Jongschaap, R., Kemanian, A.R., Kersebaum, K.C., Kumar, N.S., Makowski, D., Müller, C., Nendel, C., Priesack, E., Pravia, M.V., Kim, S.-H., Sau, F., Shcherbak, I., Tao, F., Teixeira, E., Timlin, D., Waha, K. (2014): How do various maize crop models vary in their responses to climate change factors? *Global Change Biology* 20, 7, 2301-2320. doi: 10.1111/gcb.12520.

Bodenkundliche Kartieranleitung (KA5), 2005. Hrsg. von der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe in Zusammenarbeit mit den Staatlichen Geologischen Diensten, ISBN 978-3-510-95920-4, 438pp.

Bodenübersichtskarte von Schleswig-Holstein, BÜK 1:250.000, 2016. Teil A: Bodentyp und Teil B: Bodenart. Landesamt für Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume.

Bodenkarte von Schleswig-Holstein, Blatt 2126 Stuenborn, 2009. Maßstab 1:25.000, östliches Hügelland. Landesamt für Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume, Flintbeck 2009. Wiss. Bearbeitung: P. Janetzko, fachliche Redaktion: B. Burbaum, Kartographie: S. Dölger-Schwermer.

Böhm, J., 2008. Veränderungen der Klimakenntage in Schleswig-Holstein. Als Internetquelle unter: <https://www.schleswig-holstein.de/DE/Fachinhalte/B/boden/aenderungTemperatur.html>

Böhm, G., 2001. Die reale Evapotranspiration von Niedermoorgebieten - Ermittlung und Parametrisierung nach dem Penman-Monteith-Konzept. Dissertation. Freie Universität Berlin.

Burbaum, B., Filipinski, M., und K. Krienke, 2019. Die Böden Schleswig-Holsteins – mit Erläuterungen zur Bodenübersichtskarte 1: 250.000. Landesamt für Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume. ISBN 978-3-937937-94-6, 156 pp.

Campbell, G. J., Jungbauer, W., Bidlake, R., Hungerfort, 1994: Predicting the effect of temperature on soil thermal conductivity. *Soil Sci.* 158 (5) 307-313.

Deutscher Wetterdienst (DWD) 2017. Klimareport Schleswig-Holstein, Fakten bis zur Gegenwart – Erwartungen für die Zukunft, im Internet publiziert und verfügbar unter:
https://www.dwd.de/DE/leistungen/klimareport_sh/download_report_2017.pdf?__blob=publicationFile&v=5

Gensior A. & J. Zeitz, 1999. Einfluss einer Wiedervernässungsmaßnahme auf die Dynamik chemischer und physikalischer Bodeneigenschaften eines degradierten Niedermoors. *Arch. Naturschutz und Landschaftsforschung.* S. 267-302.

Hiederer, R., 2006. The distribution of peatland in Europe. *Mires and Peat.* Volume 1. Article 01, ISSN 1819-754X.

Hillel, D., 2004. *Environmental Soil Physics.* 771pp, Academic Press,

Höper, H., 2007. Freisetzung von Treibhausgasen aus deutschen Mooren. In: TELMA - Berichte der Deutschen Gesellschaft für Moor- und Torfkunde; Band 37; 2007, 85 - 116, DOI 10.23689/fidgeo-3035.

Keulen, H. van, F.W.T. Penning de Vries & E. M. Drees, 1982. A summary model for crop growth. In: F.W.T. Penning de Vries & H. H. van Laar (eds.): *Simulation of plant growth and plant production.* Pudoc, Centre of agricultural Publishing and documentation, Wageningen, 87 – 97.

Kersebaum, K.C., 2007. Modelling nitrogen dynamics in soil–crop systems with HERMES. *Nutr Cycl Agroecosyst* 77, 39–52.

Kersebaum, K.C., 2011. Special features of the HERMES model and additional procedures for parameterization, calibration, validation and applications. In: Ahuja, L.R., Ma, L. (Eds.), *Advances in Agricultural Systems Modeling Series*, vol. 2. ASA-CSSA-SSSA, Madison, pp. 65–94.

Kluge, B., Werkenthin, M. und G. Wessolek, 2013. Regionalisierung von CO₂-Emissionen aus Niedermoorböden. BMBF-Forschungsbericht ELAN, Teilprojekt: Nachhaltige Moornutzung“, 85pp.

Kluge, B., Werkenthin, M., Wessolek, G., 2013. Regionalisierung von CO₂-Emissionen aus Niedermooeren. Elan discussion paper No. 6. Hrsg. Leibniz-Zentrum für Agrarlandschaftsforschung (ZALF) e.V., ISBN 978-3-943679-11-3.

Kluge, B., Wessolek, G., Facklam, M., Lorenz, M., Schwärzel, K., 2008. Long-term carbon loss and CO₂-C release of drained peat land soils in northeast Germany. *Europ. J. of Soil Sci.* 59: 1076-1086.

Landwirtschaftskammer Schleswig-Holstein, <https://www.lksh.de/landwirtschaft/ackerkulturen/>

Luthardt, V. & J. Zietz, 2014. Moore in Brandenburg und Berlin. *Natur+Text*, 384pp, ISBN: 978-3-942062-13-8.

Markert, A., A. Peters and G. Wessolek, 2015: Analysis of the evaporation method to obtain soil thermal conductivity data in the full moisture range.- *Soil Sci. Soc. Am. J.* 80:275–283 doi:10.2136/sssaj2015.09.0316.

- Markert, A., Bohne, K., Facklam, M., & Wessolek, G. 2017. Pedo-transfer-functions of soil thermal conductivity for the textural classes sand, silt and loam. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 81, 6, 1315-1327.
- Meyer, K., Höper H., Blankenburg J., 2001. Spurengashaushalt und Klimabilanz bei Vernässung: in R. Kratz und J. Pfadenhauer: Ökosystemmanagement für Niedermoore. Strategien und Verfahren zur Renaturierung: Verlag Eugen Ulmer, Stuttgart, S.104-111.
- Mc Donald, M. G. & A. W. Harbaugh, 1988. MODFLOW - A Modular Three-Dimensional Finite-Difference Ground-Water Flow Model. - U.S. Geological Survey. 1988.
- Miess, M. 1968. Vergleichende Darstellung von Meteorologischen Messergebnissen und Wärmehaushaltsuntersuchungen an drei verschiedenen Standorten in Norddeutschland. Dissertation, TU-Hannover, 97pp.
- Monteith, J.L., 1965. Evaporation and Environment. *Proc. Sympos. Soc. Exp. Biol.* 19. p. 205-234.
- Mualem, Y., 1976: A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media.- *Water Res. Res.* 12: 513-522.
- Mualem, Y., 1984: A modified dependent domain theory of hysteresis. - *Soil Sci.* 137: 283-291.
- Mundel, G., 1976. Untersuchungen zur Torfmineralisation in Niedermooren. *Acker- und Pflanzenbau und Bodenkunde* 20, 669-679.
- Mundel, G., 1982a. Untersuchungen über die Evapotranspiration von Grasland auf Grundwasserstandorten – 1. Mitteilung: Beziehungen zwischen meteorologischen Faktoren und Evapotranspiration. *Arch. Acker-, Pflanzenb. Bodenk.* 26. S. 507-513.
- Mundel, G., 1982b. Untersuchungen über die Evapotranspiration von Grasland auf Grundwasserstandorten – 2. Mitteilung: Beziehungen zwischen Bodenfaktoren und Evapotranspiration. *Arch. Acker-, Pflanzenb. Bodenk.* 26. S. 515-521.
- Mundel, G., 1982c. Untersuchungen über die Evapotranspiration von Grasland auf Grundwasserstandorten – 3. Mitteilung: Beziehungen zwischen Stoffproduktion und Evapotranspiration. *Arch. Acker-, Pflanzenb. Bodenk.* 26. S. 629-638.
- Mundel, G., 1982d. Untersuchungen über die Evapotranspiration von Grasland auf Grundwasserstandorten – 4. Mitteilung: Verlauf der Verdunstung während der Vegetationszeit. *Arch. Acker-, Pflanzenb. Bodenk.* 26. S. 639-646.
- Mundel, G., 1986. Verlauf und Umfang der Sackung eines Niedermoores ermittelt in Grundwasserlysimetern mit Moormonolithen. *Arch. Acker-, Pflanzenb. Bodenk.* 30. S.531-537.
- Neitsch, S.L., Arnold, J.G., Kiniry, J.R., Williams, J.R., 2005. Soil and water assessment tool – Theoretical documentation Version 2005 (<http://www.brc.tamus.edu/swat/>). USDA Agricultural Research Service at the Grassland, Soil and Water Research Laboratory in Temple, Texas, USA, Section 5 and 6, 275-324.
- Penman, H.L. 1940. Gas and vapor movement in soil: The diffusion of vapors through porous solids. *J. Agric. Sci.* 30:437-462.
- Potsdamer Institut für Klimafolgenforschung, PIK, <https://www.wis-potsdam.de/de>

Renger, M., Bohne, K., Facklam, M., Harrach, T., Riek, W., Schäfer, G., Wessolek, G., Zacharias, S., 2009. Bodenphysikalische Kennwerte und Berechnungsverfahren für die Praxis.- Bodenökologie und Bodengenese, Nr.40, TU Berlin, 80 pp.

Renger, M., K. Bohne, G. Wessolek, 2014. Bodenphysikalische Kennwerte und Berechnungsverfahren für die Praxis, Teil II: Verfahren zur Berechnung der ungesättigten und gesättigten Wasserleitfähigkeit aus einfach zugänglichen Daten.-Bodenökologie und Bodengenese, Nr. 43, TU Berlin, 41pp.

Renger, M., G. Wessolek, K. Schwärzel, R. Sauerbrey and C. Siewert, 2002. Aspects of peat conservation and water management. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 165, 487-493.

Renger, M., G. Wessolek und R. Sauerbrey, 2003. Einfluss des Grundwasserflurabstandes auf C- und N-Freisetzung von Niedermooren. *Wasser & Boden*, 55, 39-47.

Richter, J., A. Nuske, W. Habenicht, and J. Bauer. 1982. Optimized N-mineralization parameters of loess soils from incubation experiments. *Plant Soil* 68:379–388.

Rötter, R.P., Palosuo, T., Kersebaum, K.C., Angulo, C., Bindi, M., Ewert, F., Ferrise, R., Hlavinka, P., Moriondo, M., Nendel, C., Olesen, J.E., Patil, R.H., Ruget, F., Takáč, J. Trnka, M., 2012. Simulation of spring barley yield in different climatic zones of Northern and Central Europe: A comparison of nine crop models. *Field Crops Res.* 133, 23–36.

Seiz, P., Schulz, R., Heger, A., et al., 2014: Einfluss von N-Düngung, Nitrifikationshemmstoff und Abfuhr der Ernterückstände auf die N₂O-Freisetzung zweier gemüsebaulich genutzter Böden. Erschienen in: KONGRESSBAND 2013 BERLIN; Vorträge zum Generalthema: Untersuchen, Bewerten, Beraten, Forschen: 125 Jahre VDLUFA in den Diensten von Landwirtschaft, Umwelt- und Verbraucherschutz. Hrsg.: Verband Deutscher Landwirtschaftlicher Untersuchungs- und Forschungsanstalten. VDLUFA-Verlag, Darmstadt, S. 174- 181.

Schwärzel, K., M. Renger, R. Sauerbrey & G. Wessolek, 2002. Soil physical characteristics of peat soils. *J. Plant Nutr. Soil Sci.*,165, 479-486.

Schwärzel, K; Simunek, J., Stoffregen, H; Wessolek, G.; van Genuchten, M.T., 2006. Estimation of the unsaturated hydraulic conductivity of peat soils: Laboratory versus field data. *Vadose Zone Journal* 5 (2):628-640.

Schwärzel, K; Simunek, J., Stoffregen, H; Wessolek, G.; van Genuchten, M.T, 2006. Measurement and modeling of soil-water dynamics evapotranspiration of drained peatland soils. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 169, 762–774.

Schwärzel, K., M. Renger, R. Sauerbrey & G. Wessolek, 2002. Soil physical characteristics of peat soils. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 165, 479-486.

Stammen, J., 2001. Numerische Berechnung elektromagnetischer und thermischer Felder in Hochspannungskabelanlagen, Dissertation Universität Duisburg, Shaker Verlag.

Stammen, J. und Tao Dong, 2020: Thermische Emissionen der Ostküstenleitung, Projekt A310, im Auftrag von Tennet

Van Genuchten, M.T., 1980. A Closed-form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 44, 892.

Van Wijk, W. and D. de Vries, 1963. Periodic Temperature Variations in a Homogeneous Soil, In: W. R. Van Wijk, Eds., *Physics of Plant Environment*, North-Holland Publ. Co., Amsterdam, pp. 102-143.

Wallor, E., Kersebaum, K.C., Ventrella, D., Bindi, M., Cammarano, D., Coucheney, E., Gaiser, T., Garofalo, P., Giglio, L., Giola, P., Hoffmann, M.P., Iocola, I., Lana, M., Lewan, E., Maharjan, G.R., Moriondo, M., Mula, L., Nendel, C., Pohankova, E., Roggero, P.P., Trnka, M., Trombi, G. 2018. The response of process-based agro-ecosystem models to within-field variability in site conditions. *Field Crops Res.* 228, 1-19. Doi: 10.1016/j.fcr.2018.08.021

Wessolek, G., 1989: Einsatz von Wasserhaushalts- und Photosynthesemodellen in der Ökosystemforschung. Habilitationsschrift. Landschaftsentwicklung und Umweltforschung, Band 61, TU-Berlin, 170pp.

Wessolek, G. & K. Schwärzel, 2001. Wasser- und Stoffumsatz in Niedermooren. *Geographische Rundschau*, 53, 24-34.

Wessolek, G., Eschner, D., Facklam, M., Renger, M., Sauerbrey, R., Schwärzel, K., Siewert, V., 1999. Kennzeichnung der Bodenentwicklungsprozesse in Niedermooren. DFG-Abschlussbericht in *Ökologische Hefte 11 der Humboldt-Universität zu Berlin*, 96-125.

Wessolek, G., K. Schwärzel, M. Renger, R. Sauerbrey & C. Siewert, 2002. Soil hydrology and CO₂ mineralization of peat soils. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 165, 494-500.

Wessolek, G., M. Lorenz, K. Schwärzel & M. Kayser (2003): Auswirkungen von Klimaänderungen auf bodenhydrologische Zustandsgrößen. Schlussbericht VH 2.6 des BMBF-Forschungsprojektes: Integrierte Analyse der Auswirkungen des globalen Wandels auf Umwelt und Gesellschaft im Elbegebiet (GLOWA-Elbe).

Wessolek, G., Kaupenjohann, M., Dominik, P., Ilg, K., Schmitt, A., Zeitz, J., Gahre, F. Schulz, E. & R. Ellerbrock, 2008. Ermittlung von Optimalgehalten an organischer Substanz landwirtschaftlich genutzter Böden nach § 17 (2) Nr. 7 BBodSchG. UBA, UFOPLAN-Nr. 202 71 264, 163pp.

Wessolek G., Trinks S., Kluge, B., Bohne K., Markwardt, N., 2015: Bewertung der Bodenerwärmung durch Erdkabeltrassen. Veröffentlicht in: *Boden und Energiewende - Trassenbau, Erdverkabelung und Erdwärme*. Springer -Vieweg Verlag.

Werkenthin, M., 2012. CO₂-Freisetzung ausgewählter Moore in Berlin und Brandenburg. Diplomarbeit am Institut für Ökologie, FG Standortkunde und Bodenschutz. Technische Universität Berlin.

Zeitz, J., Veltý, S., 2002. Soil properties of drained and rewetted fen soils. *Plant Nutrition and Soil Science*, 165(5), 618–626.

9 Über die Autoren

Gerd Wessolek

studierte Agrarwissenschaften mit den Schwerpunkten Bodenphysik, Hydrologie und Pflanzenbauwissenschaften an der Georg-August Universität in Göttingen und promovierte dort über das Thema: „Wasser- und Nährstoffhaushalt einer Löss-Parabraunerde“.

Im Anschluss leitete er für zwei Jahre ein GIZ-Beregnungsprojekt in Ägypten bevor er an das Niedersächsische Landesamt für Bodenforschung nach Hannover ging und dort an der numerischen Modellierung von Wasserhaushalt, Ertrag und Stickstoff unter der Leitung von Prof. Dr. M. Renger arbeitete. Mitte der 80er Jahre wechselte er an die TU-Berlin als Leiter des bodenphysikalischen und chemischen Labors. Nach seiner Habilitation über das Thema „Einsatz von Wasserhaushalts- und Photosynthese- Modellen in der Ökosystemanalyse“ war Herr Wessolek zunächst als Gastprofessur an der Universität in Halle tätig, bevor er 1995 an die TU-Berlin wechselte und seitdem das Fachgebiet „Standortkunde und Bodenschutz“ im Institut für Ökologie vertrat.

Dort forschte er mehr als zwanzig Jahre auf den Gebieten des Wasser-, Energie-, Gas- und Stofftransports von Böden, bis er 2018 emeritierte. Als wissenschaftlicher Gutachter ist Herr Wessolek für die DFG, das BMBF sowie zahlreiche internationale Forschungseinrichtungen sowie im Editorial Boards von wiss. Zeitschriften tätig. Er ist Autor und Co-Autor zahlreicher Lehr- und Fachbücher und an mehr als 300 wissenschaftlichen Veröffentlichungen und Umweltstudien beteiligt. In der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft (DBG) leitete er den Arbeitskreis „Bodenphysikalische Kennwerte“ und war Vorsitzender der Kommissionen „Bodentechnologie“ und „Boden in Bildung und Gesellschaft“. Herr Professor Wessolek beriet neben seiner Hochschultätigkeit die Oberlandesgerichte in Berlin und Brandenburg bei größeren Umweltkonflikten als vereidigter Sachverständiger. Seit zehn Jahren ist Herr Wessolek beratend im Netzausbau tätig, u.a. für TenneT, Vattenfall-Europe, Edis und 50-hertz.

Kurt Christian Kersebaum

studierte Agrarwissenschaften der Fachrichtung Pflanzenproduktion an der Georg-August Universität in Göttingen. Während seiner Promotion am Institut für Bodenkunde der Universität Hannover arbeitete er zur Simulation der Wasser- und Stoffdynamik sowie zum Pflanzenwachstum, wo er 1982 promovierte.

In seiner Zeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Geographie und Geoökologie der TU Braunschweig beschäftigte er sich mit den Auswirkungen von Flächenstilllegungen auf Wasser- und Stoffdynamik und war für ein Jahr wissenschaftlicher Koordinator im Sonderforschungsbereich 179 der Deutschen Forschungsgemeinschaft. Berufsbegleitend absolvierte er ein einjähriges Weiterbildungsstudium an der TU Braunschweig zum Umweltingenieur Gewässerschutz.

Seit Oktober 1992 ist Herr Dr. Kersebaum am Leibniz Zentrum für Agrarlandschaftsforschung in Müncheberg am Institut für Landschaftssystemanalyse tätig, seit 2019 an der Forschungsplattform Modelle und Simulation. Seine Arbeitsgebiete sind Untersuchungen zum Wasser- und Stoffhaushalt von Böden bei unterschiedlicher Nutzung, Abschätzung von Folgewirkungen von Bewirtschaftungsmaßnahmen sowie die Abschätzung von Folgen der Klimaänderung auf Pflanzenwachstum und Wasser- und Nährstoffmanagement. Er habilitierte 2004 an der Uni Potsdam zum Dr. rer. nat. habil. im Fach Geoökologie.

Herr Kersebaum hat als Autor bzw. Co-autor ca. 290 wissenschaftliche Fachartikel und drei Bücher veröffentlicht. Er war von 2006 bis 2009 Vorsitzender der Kommission Bodentechnologie und für die Jahre 2010/2011 der Kommission Bodenschutz und Bodentechnologie der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft. Er ist Mitglied in den Amerikanischen Gesellschaften für Soil Science, Crop Science und Agronomy sowie der Deutschen Gesellschaft für Wasser und Abfall und der Gesellschaft für Informatik in der Landwirtschaft. In 2014 wurde er von der Soil Science Society of America mit dem „Laj Ahuja Award for Ag Systems Modeling“ ausgezeichnet.

10 Anhang

Jahr	Referenz	Ertrag (kg/ha)		Kulturart	Erläuterungen
		Normallast	Höchstlast		
1991	8858	8916	9073	WW	Winterweizen
1992	3804	3810	3764	WRA	Winterriaps
1993	9062	9111	9074	WW	Winterweizen
1994	47	46	45	WRC	Winterzwischenfrucht
1994	3095	3411	3365	SG	Sommergerste
1995	62	62	59	WRC	Winterzwischenfrucht
1995	14625	14725	14751	SM	Silomais
1996	7358	7356	7389	WW	
1997	3776	3920	3835	WRA	
1998	8177	8198	8287	WW	
1999	56	54	59	WRC	
1999	2013	2061	2061	SG	
2000	152	161	156	WRC	
2000	14726	14879	14649	SM	
2001	9124	9121	9170	WW	
2002	3504	3384	3436	WRA	
2003	8523	8494	8515	WW	
2004	133	140	138	WRC	
2004	4813	4845	4800	SG	
2005	110	109	103	WRC	
2005	14785	14997	15268	SM	
2006	7630	7695	7561	WW	
2007	3647	3595	3644	WRA	
2008	4858	4883	4933	WW	
2009	93	89	86	WRC	
2009	3567	3537	3320	SG	
2010	112	99	108	WRC	
2010	12745	13348	13421	SM	
2011	6001	5849	6043	WW	
2012	3359	3365	3361	WRA	
2013	9444	9539	9607	WW	
2014	112	110	109	WRC	
2014	4665	4828	4703	SG	
2015	167	163	158	WRC	
2015	14565	15349	15227	SM	
2016	8228	8379	8378	WW	
Mittel	5444	5517	5518		

Tabelle 10.1: Berechnete Erträge (Trockenmasse, = 0% Feuchte) für Sandböden mit (Normallast, Höchstlast) und ohne Kabeinfluss (Referenz)

Jahr	Erträge (kg/ha)			Kulturart	Erläuterungen
	Referenz	Normallast	Höchstlast		
1991	8857	8915	9073	WW	Winterweizen
1992	3844	3834	3785	WRA	Winterraps
1993	9125	9174	9138	WW	Winterweizen
1994	48	46	45	WRC	Winterzwischenfrucht
1994	3399	3716	3671	SG	Sommergerste
1995	64	62	58	WRC	Winterzwischenfrucht
1995	14957	15155	15177	SM	Silomais
1996	7873	7806	7864	WW	
1997	3814	3886	3882	WRA	
1998	8173	8195	8283	WW	
1999	58	54	59	WRC	
1999	2337	2402	2348	SG	
2000	150	168	164	WRC	
2000	14701	14901	14656	SM	
2001	9122	9120	9170	WW	
2002	3568	3391	3444	WRA	
2003	8774	8838	8858	WW	
2004	123	139	136	WRC	
2004	4808	4846	4806	SG	
2005	113	105	101	WRC	
2005	14811	15015	15281	SM	
2006	8388	8498	8368	WW	
2007	3688	3673	3654	WRA	
2008	5152	5117	5168	WW	
2009	96	85	83	WRC	
2009	3988	3875	3884	SG	
2010	112	94	100	WRC	
2010	12797	13333	13382	SM	
2011	5981	5802	6017	WW	
2012	3454	3390	3408	WRA	
2013	9456	9553	9609	WW	
2014	110	107	106	WRC	
2014	4665	4827	4703	SG	
2015	160	168	157	WRC	
2015	14566	15219	15229	SM	
2016	8307	8460	8461	WW	
Mittel	5545	5610	5620		

Tabelle 10.2: Berechnete Erträge (Trockenmasse, = 0% Feuchte) für Lehm Böden mit (Normallast, Höchstlast) und ohne Kabeinfluss (Referenz)

Tab. 10.3a: Wasserhaushaltskomponenten für drei Einzeljahre: 2016, 2017, 2018 Sandboden (Modellboden 1), AMPL: 1= Grundwasser in 1m unter GOF, AMPL: 6: Grundwasser >2m unter GOF, Kap. Aufstieg: kapillarer Aufstieg aus dem Grundwasser in den Wurzelraum (mm), EREAL+EI: reale Evapotranspiration (mm), GW-NEU: Grundwasserneubildung (mm) Epot: potenzielle Verdunstung, Niederschlag(mm), Et: Transpiration der Pflanze (ohne Interzeption und Evaporation)

DATUM	FRUCHT	AMPL.	KAP.AUFSTIEG	EREAL+EI	GW-NEU	Epot	NIEDERSCHLAG			Et
							WINTER	SOMMER	SUMME	
Sandboden, Grünland, grundwassernah										
31.12.2016	GRUENLAND	1	222.6	638.7	101.1	541.7	127.1	611.6	738.7	500.4
31.12.2017	GRUENLAND	1	179.3	661.6	326.3	485.1	284.1	705.8	989.9	491.1
31.12.2018	GRUENLAND	1	344.6	616.2	-97.5	786.8	160.6	358.1	518.7	525.9
Sandboden, Winterweizen, grundwassernah										
31.12.2016	WINTERWEIZEN	1	224.2	467.9	248.8	541.7	127.1	611.6	738.7	409.4
31.12.2017	WINTERWEIZEN	1	179.9	441.7	518.1	485.1	284.1	705.8	989.9	380.9
31.12.2018	WINTERWEIZEN	1	266.7	391.2	97.9	786.8	160.6	358.1	518.7	367.8
Sandboden, Sommergerste, grundwassernah										
31.12.2016	SOMMERGERSTE	1	221.2	439.9	270.2	541.7	127.1	611.6	738.7	384.3
31.12.2017	SOMMERGERSTE	1	179.0	421.6	535.7	485.1	284.1	705.8	989.9	364.3
31.12.2018	SOMMERGERSTE	1	274.3	382.5	102.6	786.8	160.6	358.1	518.7	361.2
Grundwasser: >2m unter GOF										
Sandboden, Grünland, grundwasserfern										
31.12.2016	GRUENLAND	6	14.7	502.2	237.6	541.7	127.1	611.6	738.7	363.9
31.12.2017	GRUENLAND	6	9.6	564.8	423.9	485.1	284.1	705.8	989.9	394.3
31.12.2018	GRUENLAND	6	22.1	339.1	179.6	786.8	160.6	358.1	518.7	248.8
Sandboden Winterweizen, grundwasserfern										
31.12.2016	WINTERWEIZEN	6	12.2	351.6	380.2	541.7	127.1	611.6	738.7	293.0
31.12.2017	WINTERWEIZEN	6	10.5	355.4	615.3	485.1	284.1	705.8	989.9	294.6
31.12.2018	WINTERWEIZEN	6	19.5	266.5	251.6	786.8	160.6	358.1	518.7	243.1

Sandboden, Sommergerste grundwasserfern

31.12.2016	SOMMERGERSTE	6	11.9	336.4	395.5	541.7	127.1	611.6	738.7	280.7
31.12.2017	SOMMERGERSTE	6	10.0	338.8	631.5	485.1	284.1	705.8	989.9	281.5
31.12.2018	SOMMERGERSTE	6	19.5	250.3	268.0	786.8	160.6	358.1	518.7	229.

Tab. 10.3b: Wasserhaushaltskomponenten für drei Einzeljahre: 2016, 2017, 2018 Lehm Boden (Modellboden 2), AMPL: 1= Grundwasser in 1m unter GOF, AMPL: 6: Grundwasser >2m unter GOF, Kap. Aufstieg: kapillarer Aufstieg aus dem Grundwasser in den Wurzelraum (mm), EREAL+EI: reale Evapotranspiration (mm), GW-NEU: Grundwasserneubildung (mm) Epot: potenzielle Verdunstung, Niederschlag(mm), Et: Transpiration der Pflanze (ohne Interzeption und Evaporation)

DATUM	FRUCHT	AMPL.	KAP.AUFSTIEG	EREAL+EI	GW-NEU	Epot	NIEDERSCHLAG			Et
							WINTER	SOMMER	SUMME	
Lehm Boden, Grünland, grundwassernah										
31.12.2016	GRUENLAND	1	233.2	691.0	48.8	541.7	127.1	611.6	738.7	552.6
31.12.2017	GRUENLAND	1	156.5	682.2	306.2	485.1	284.1	705.8	989.9	511.7
31.12.2018	GRUENLAND	1	521.2	820.6	-301.9	786.8	160.6	358.1	518.7	730.3
Lehm Boden, Winterweizen, grundwassernah										
31.12.2016	WINTERWEIZEN	1	119.1	567.9	171.0	541.7	127.1	611.6	738.7	509.4
31.12.2017	WINTERWEIZEN	1	94.2	558.8	420.8	485.1	284.1	705.8	989.9	498.0
31.12.2018	WINTERWEIZEN	1	288.9	574.5	-55.7	786.8	160.6	358.1	518.7	551.1
Lehm Boden, Sommergerste, grundwassernah										
31.12.2016	SOMMERGERSTE	1	106.6	530.1	207.5	541.7	127.1	611.6	738.7	474.5
31.12.2017	SOMMERGERSTE	1	81.4	524.1	455.8	485.1	284.1	705.8	989.9	466.7
31.12.2018	SOMMERGERSTE	1	264.1	529.9	-10.8	786.8	160.6	358.1	518.7	508.6
Grundwasser: >2m unter GOF										
Lehm Boden, Grünland, grundwasserfern										
31.12.2016	GRUENLAND	6	27.4	607.9	131.9	541.7	127.1	611.6	738.7	469.6
31.12.2017	GRUENLAND	6	9.5	660.0	328.8	485.1	284.1	705.8	989.9	489.4
31.12.2018	GRUENLAND	6	42.4	419.2	99.5	786.8	160.6	358.1	518.7	329.0

Lehmboden, Winterweizen, grundwasserfern

31.12.2016	WINTERWEIZEN	6	4.6	523.5	216.5	541.7	127.1	611.6	738.7	464.9
31.12.2017	WINTERWEIZEN	6	2.4	543.9	437.0	485.1	284.1	705.8	989.9	483.1
31.12.2018	WINTERWEIZEN	6	27.7	360.8	157.9	786.8	160.6	358.1	518.7	337.3

Lehmboden, Sommergerste, grundwasserfern

31.12.2016	SOMMERGERSTE	6	3.5	498.1	241.2	541.7	127.1	611.6	738.7	442.5
31.12.2017	SOMMERGERSTE	6	2.1	512.2	467.1	485.1	284.1	705.8	989.9	454.8
31.12.2018	SOMMERGERSTE	6	27.0	343.5	175.5	786.8	160.6	358.1	518.7	322.2

Tab. 10.3c: Wasserhaushaltskomponenten für drei Einzeljahre: 2016, 2017, 2018 von Niedermoor (Modellboden 3), AMPL: 1=Grundwasser in 1m unter GOF, AMPL: 6: Grundwasser >2m unter GOF, Kap. Aufstieg: kapillarer Aufstieg aus dem Grundwasser in den Wurzelraum (mm), EREAL+EI: reale Evapotranspiration (mm), GW-NEU: Grundwasserneubildung (mm) Epot: potenzielle Verdunstung, Niederschlag(mm), Et: Transpiration der Pflanze (ohne Interzeption und Evaporation)

DATUM	FRUCHT	AMPL.	KAP. AUFSTIEG	EREAL+EI	GW-NEU	Epot	NIEDERSCHLAG			Et
							WINTER	SOMMER	SUMME	
31.12.2016	GRUENLAND	1	366.2	690.9	44.8	541.7	127.1	611.6	738.7	559.1
31.12.2017	GRUENLAND	1	304.8	682.8	305.0	485.1	284.1	705.8	989.9	520.7
31.12.2018	GRUENLAND	1	603.9	822.8	-304.1	786.8	160.6	358.1	518.7	736.6