Rhein-Main-Link

Höchstspannungsleitungen (Gleichstrom)

BBPIG Vorhaben Nr. 82

Ovelgönne/Rastede/Wiefelstede/Westerstede – Bürstadt

BBPIG Vorhaben Nr. 82a

Ovelgönne/Rastede/Wiefelstede/Westerstede – Hofheim am Taunus

BBPIG Vorhaben Nr. 82b

Grenzkorridor N-III – Kriftel

[Bestandteil Ovelgönne/Rastede/Wiefelstede/Westerstede – Kriftel]

BBPIG Vorhaben Nr. 82c

Grenzkorridor N-III – Bürstadt/Biblis/Groß-Rohrheim/Gernsheim/Biebesheim am Rhein

[Bestandteil Ovelgönne/Rastede/Wiefelstede/Westerstede – Bürstadt/Biblis/Groß-Rohrheim/Gernsheim/Biebesheim am Rhein]

Unterlagen gemäß
§ 21 NABEG i. V. m. § 35 Abs. 6 NABEG

Planfeststellungsabschnitt: HE2

Unterlagenteil: Teil E5 – Berechnungen über Wärmeausbreitung

Stand: [August 2026]

Vorhabenträgerin

Amprion GmbH
Robert-Schuman-Straße 7
44263 Dortmund

Amprion Offshore GmbH
Robert-Schuman-Straße 7
44263 Dortmund

In Zusammenarbeit mit

ARGE Arcadis | ILF
c/o Arcadis Germany B.V. & Co. KG
Europaplatz 3 | 64293 Darmstadt | Deutschland

Festgestellt nach § 24 NABEG
Bonn, den

In Zusammenarbeit mit Prof. Dr. C. Emmerling

Gesamtgutachten

Betriebsbedingte Wärmeausbreitung von Höchstspannungserdkabeln und deren Bodenökologische Bewertung

TABERG Ingenieure GmbH, Rudolf-Diesel-Str. 1, 54292 Trier
delta h Ingenieurgesellschaft mbH, Parkweg 67, 58453 Witten
in Zusammenarbeit mit
Prof. Dr. Christoph Emmerling, Fach Bodenkunde der Universität Trier

Gesamtgutachten

Betriebsbedingte Wärmeausbreitung von Höchstspannungserdkabeln

Bodenökologische Bewertung von betriebsbedingten Wärmeemissionen durch Höchstspannungserdkabel

Auftraggeber:

Amprion GmbH

Robert-Schuman-Straße 7

44263 Dortmund

Bearbeitung:

TABERG Ingenieure GmbH

Dr. Benjamin Schieber

M. Sc. Celine Hoffmann

B. Sc. Sebastian Neukirch

In Zusammenarbeit mit

Prof. Dr. Christoph Emmerling
(Bodenkunde, Universität Trier)

delta h

Dr. Simon Schröder

In Zusammenarbeit mit Prof. Dr. C. Emmerling

Stand: August 2026

Präambel

Das Stromnetzausbauprojekt Rhein-Main Link bündelt vier Gleichstrom-Erdkabelvorhaben zu einem Energiekorridor. Es sind die Vorhaben 82, 82a, 82b und 82c aus dem BBPlG, für die in den Grenzen des Präferenzraumes ein Trassenverlauf zur Genehmigung beantragt wurde. Der Rhein-Main Link wird durch das Regelgrabenprofil Kabeltyp 1 abgebildet.

I Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung und Anlass des Gutachtens 1

2. Stand der Kenntnis 4
2.1 Der natürliche Bodenwärmehaushalt 4
2.2 Bodenerwärmung durch Erdkabel 7
2.3 Auswirkungen der Bodenerwärmung durch Erdkabel 16
2.3.1 Wie stark erwärmt sich der Boden? 16
2.3.2 Trocknen die Böden aus? 16
2.3.3 Nimmt die Bodenfruchtbarkeit Schaden? 18
2.3.4 Gibt es negative Auswirkungen auf die Landwirtschaft? 20
2.4 Schlussfolgerungen 21

3. Geltungsbereich und Untersuchungsraum 23
3.1 Untersuchungsraum 23
3.2 Einordnung des Untersuchungsraums in die geologischen und bodenkundlichen Großeinheiten 23
3.3 Kabelverlegung und allgemeine Vorhabenbeschreibung 27

4. Verbreitete Bodentypen, Ausgangssubstrat und Ableitung von Bodeneigenschaften im Profilaufbau 29
4.1 Grundprinzip der Leitprofile 29
4.2 Auswahl und Parametrisierung der Leitprofile 30
4.2.1 Methodik und Ergebnisübersicht zur Profilauswahl 30
4.2.2 Allgemeine Hinweise und Methodik zur Parametrisierung 35
4.3 Grundlagen des Modellaufbaus 38
4.3.1 Grundwassermodelltypen 38
4.3.2 Modelldimensionierung 39
4.3.3 Betrachtungszeitraum 40
4.3.3.1 Wahl der Zeitschrittweite 40
4.3.4 Klimastationen 41
4.3.5 Grundwasseroberfläche 42
4.3.6 Thermische Randbedingungen 43
4.3.7 Grundwasserneubildung 45
4.3.7.1 Niederschlag 45
4.3.7.2 Gebietsbezogene Klimadaten 45
4.3.7.3 Lagehöhe 45
4.3.7.4 Geographische Breite 46
4.3.7.5 Bodenklasse 46

4.3.7.6 Landnutzungsform 46
4.3.7.7 Blattflächenindex 46
4.3.7.8 Bestandskoeffizient 47
4.3.7.9 Water Stress Response Function (Feddes-Parameter) 47
4.3.7.10 Wurzellängendichte 48
4.3.7.11 Grundwasserneubildungsberechnung nach RUBINFLUX 50
4.3.7.12 Gekoppelte Berechnung der Wurzelzone 52
4.4 Allgemeine Hinweise zur Auswertung und Darstellung der Ergebnisse 55

5. Wärmemodellierung und Ergebnisse 57
5.1 Leitprofil LP_01 57
5.1.1 Modellbeschreibung und Parametrisierung LP_01 58
5.1.2 Modellierungsergebnisse LP_01 60
5.2 Leitprofile LP_02 62
5.2.1 Modellbeschreibung und Parametrisierung LP_02 62
5.2.2 Modellierungsergebnisse LP_02 (ohne Maßnahmen) 65
5.2.3 Modellierungsergebnisse LP_02 (1,9 m Achsabstand) 67
5.2.4 Modellierungsergebnisse LP_02 (Bodenaustausch) 68
5.2.5 Modellierungsergebnisse LP_02 (1,9 m Achsabstand + Bodenaustausch) 70
5.2.6 Modellierungsergebnisse LP_02 (Veränderung des ZFSV-Körpers auf 0,98 m) 72
5.3 Leitprofile LP_03 73
5.3.1 Modellbeschreibung und Parametrisierung LP_03 74
5.3.2 Modellierungsergebnisse LP_03 76
5.4 Leitprofile LP_04 77
5.4.1 Modellbeschreibung und Parametrisierung LP_04 78
5.4.2 Modellierungsergebnisse LP_04 80
5.5 Leitprofile LP_05 82
5.5.1 Modellbeschreibung und Parametrisierung LP_05 82
5.5.2 Modellierungsergebnisse LP_05 84
5.6 Leitprofile LP_06 86
5.6.1 Modellbeschreibung und Parametrisierung LP_06 86
5.6.2 Modellierungsergebnisse LP_06_gwfern 88
5.6.3 Modellierungsergebnisse LP_06_gwnah 90
5.7 Leitprofile LP_07 92
5.7.1 Modellbeschreibung und Parametrisierung LP_07 92
5.7.2 Modellierungsergebnisse LP_07 94
5.8 Leitprofile LP_08 96
5.8.1 Modellbeschreibung und Parametrisierung LP_08 97

5.8.2 Modellierungsergebnisse LP_08 99
5.9 Leitprofile LP_09 101
5.9.1 Modellbeschreibung und Parametrisierung LP_09 101
5.9.2 Modellierungsergebnisse LP_09 104
5.10 Leitprofile LP_10 105
5.10.1 Modellbeschreibung und Parametrisierung LP_10 106
5.10.2 Modellierungsergebnisse LP_10 108
5.11 Leitprofile LP_11 110
5.11.1 Modellbeschreibung und Parametrisierung LP_11 110
5.11.2 Modellierungsergebnisse LP_11 112
5.12 Leitprofile LP_12 114
5.12.1 Modellbeschreibung und Parametrisierung LP_12 114
5.12.2 Modellierungsergebnisse LP_12 116
5.13 Leitprofile LP_13 118
5.13.1 Modellbeschreibung und Parametrisierung LP_13 118
5.13.2 Modellierungsergebnisse LP_13 121
5.14 Fremdleitungen 123

6. Ökologische Bewertung 126
6.1 Einfluss betriebsbedingter Wärmeemissionen durch HGÜ-Erdkabel auf die natürliche Bodenwärmedynamik verbreiteter Böden 127
6.2 Einfluss betriebsbedingter Wärmeemissionen durch HGÜ-Erdkabel auf den Bodenwasserhaushalt verbreiteter Böden 139
6.3 Einfluss betriebsbedingter Wärmeemissionen durch HGÜ-Erdkabel auf den Nährstoffhaushalt, Stickstoffdynamik und organische Bodensubstanz 151
6.3.1 Spannungsfeld Bodenerwärmung – Humusabbau – Klimaschutz 153
6.4 Einfluss betriebsbedingter Wärmeemissionen durch HGÜ-Erdkabel auf Vegetation und Landwirtschaft 156
6.5 Einfluss betriebsbedingter Wärmeemissionen durch HGÜ-Erdkabel auf Bodenorganismen und Stoffwechselaktivitäten mit besonderer Berücksichtigung der Bodenfauna (Regenwürmer) 160

7. Zusammenfassung 165

8. Literatur 167

II Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1: Zukunftsszenario mit Darstellung des Erzeugungsüberschusses im Norden und des Defizites im Süden (Quelle: amprion.net, Basis: Netzentwicklungsplan 2037/2045)

Abbildung 2.1-1: Zeitlicher Verlauf der Bodentemperaturen (°C) im August für einen Geest- und Hochmoorstandort (nach Miess, 1968, aus Bachmann, 1997)..... 4

Abbildung 2.1-2: Jahresgang der Temperatur in einem Boden bei Königsberg in Abhängigkeit von der Tiefe (nach Schmidt & Leyst in Geiger 1961, aus Amelung et al., 2018)..... 5

Abbildung 2.1-3: Thermische Leitfähigkeit von verschiedenen Böden als Funktion des Wassergehaltes (nach Markert et al., 2017 aus Wessolek et al., 2016)..... 6

Abbildung 2.2-1: Mittlere Bodentemperaturen in verschiedenen Tiefenstufen im Trassenbereich und den jeweiligen Kontrollflächen des ALEGrO-Monitorings; Mittelwerte aller vier Untersuchungsstandorte (* = signifikanter Unterschied zwischen Trasse und Kontrolle).....11

Abbildung 2.3-1: Boxplots der mittleren Bodenwassergehalte (Vol.-%) in der Tiefenstufe 60 cm in Trasse und Kontrolle an den vier ALEGrO-Untersuchungsstandorten (* = signifikant; p<0,001).....17

Abbildung 3.2-1: Bodengroßlandschaften im Bereich der betrachteten Korridornetze (Teil 1 - nördlicher Abschnitt).....24

Abbildung 3.2-2: Bodengroßlandschaften im Bereich der betrachteten Korridornetze (Teil 2 - südlicher Abschnitt).....25

Abbildung 3.3-1: Regelgrabenprofil Kabeltyp 1.....28

Abbildung 3.3-2: Regelgrabenprofil Kabeltyp 2.....28

Abbildung 4.3-1: Verschiedene Grundwassermodelle, grundwasserfern (Typ A) und grundwassernah (Typ B).....38

Abbildung 4.3-2: Beispielhafter Ausschnitt aus dem Modellnetz mit den vier Gräben des Kabeltyp 1 (oben) und den vier Gräben des Kabeltyp 2 (unten).....39

Abbildung 4.3-3: Wichtige Modellrandbedingungen am Beispiel des grundwassernahen Modelltyps.....43

Abbildung 4.3-4: Blattflächenindex im Jahresverlauf für verschiedene Landnutzungsformen. 46

Abbildung 4.3-5: Bestandkoeffizient im Jahresverlauf für verschiedene Landnutzungsformen. 47

Abbildung 4.3-6: Schematische Darstellung der Water Stress Response Function mit den feuchteabhängigen Parametern. 48

Abbildung 4.3-7: Darstellung des Verhältnisses von Evaporation und Transpiration in Abhängigkeit des Blattflächenindex. 53

Abbildung 4.3-8: Faktor der tatsächlichen Evaporation in logarithmischer Darstellung des Drucks als pF-Wert im Verhältnis zu Feldkapazität und permanentem Welkepunkt.....54

Abbildung 6.1-1: Modellierte betriebsbedingte Wärmeemissionen durch Höchstspannungserdkabel für den Kabeltyp 1 bei unterschiedlicher Ausführungslast (70 %, 85 %). Dargestellt sind die berechneten Temperaturerhöhungen als Box-Plots für Getreideanbau in den vier Tiefenstufen (-30 cm, -60 cm, -90 cm, -120 cm) von insgesamt 13 Leitprofilen repräsentativ für SH, NDS, NRW und HE. 131

Abbildung 6.1-2: Modellierte betriebsbedingte Wärmeemissionen durch Höchstspannungserdkabel für den Kabeltyp 1 bei unterschiedlicher Ausführungslast (70 %, 85 %). Dargestellt sind die berechneten Temperaturerhöhungen als Box-Plots für Maisanbau in den vier Tiefenstufen (-30 cm, -60 cm, -90 cm, -120 cm) von insgesamt 13 Leitprofilen repräsentativ für SH, NDS, NRW und HE. 132

Abbildung 6.1-3: Modellierte betriebsbedingte Wärmeemissionen durch Höchstspannungserdkabel für den Kabeltyp 2 bei unterschiedlicher Ausführungslast (70 %, 85 %). Dargestellt sind die berechneten Temperaturerhöhungen als Box-Plots für Getreideanbau in den vier Tiefenstufen (-30 cm, -60 cm, -90 cm, -120 cm) von insgesamt 13 Leitprofilen repräsentativ für SH, NDS, NRW und HE. 133

Abbildung 6.1-4: Modellierte betriebsbedingte Wärmeemissionen durch Höchstspannungserdkabel für den Kabeltyp 2 bei unterschiedlicher Ausführungslast (70 %, 85 %). Dargestellt sind die berechneten Temperaturerhöhungen als Box-Plots für Maisanbau in den vier Tiefenstufen (-30 cm, -60 cm, -90 cm, -120 cm) von insgesamt 13 Leitprofilen repräsentativ für SH, NDS, NRW und HE. 134

Abbildung 6.1-5: Modellierte betriebsbedingte Wärmeemissionen durch Höchstspannungserdkabel für den Kabeltyp 1 bei unterschiedlicher Ausführungslast (70 %, 85 %). Dargestellt sind die berechneten Temperaturerhöhungen als Box-Plots für Getreideanbau in den vier Tiefenstufen (-30 cm, -60 cm, -90 cm, -120 cm) für die vier betrachteten Varianten (davon 3 mit Minderungsmaßnahmen) im Bereich von Moorlandschaften (Leitprofil 02). 135

Abbildung 6.1-6: Laterale Ausbreitung betriebsbedingter Wärmeemissionen bei Lastbetrieb von 85 % und Getreideanbau am Beispiel des Leitprofiles LP_02 (Typ 1 oben, Typ 2 unten). 137

Abbildung 6.2-1: Jahresverlaufsdiagramme der Wassergehalte in Bezug auf die nutzbare Feldkapazität anhand des Leitprofils LP_04, Kabeltyp 2, Nutzungsart Mais. 142

Abbildung 6.2-2: Jahresverlaufsdiagramme der Wassergehalte in Bezug auf die nutzbare Feldkapazität anhand des Leitprofils LP_04, Kabeltyp 2, Nutzungsart Getreide. 143

Abbildung 6.2-3: Jahresverlaufsdiagramme der Wassergehalte in Bezug auf die nutzbare Feldkapazität anhand des Leitprofils LP_06 gf-fern, Kabeltyp 2, Nutzungsart Getreide. 144

Abbildung 6.2-4: Jahresverlaufsdiagramme der Wassergehalte in Bezug auf die nutzbare Feldkapazität anhand des Leitprofils LP_06 gw-nah, Kabeltyp 2, Nutzungsart Getreide. 145

Abbildung 6.2-5: Jahresverlaufsdiagramme der Wassergehalte in Bezug auf die nutzbare Feldkapazität anhand des Leitprofils LP_09, Kabeltyp 1, Nutzungsart Getreide für die Tiefenstufen 60 cm und 90 cm. 146

Abbildung 6.2-6: Jahresverlaufsdiagramme der Wassergehalte in Bezug auf die nutzbare Feldkapazität anhand des Leitprofils **LP_12**, Kabeltyp 2, Nutzungsart **Getreide** 148

Abbildung 6.3-1: Stickstoffmineralisation in einem lehmigen (schwarze Balken) und sandigen Boden (graue Balken) in einem Temperaturbereich von 15 bis 45°C im Laborversuch (Neukirch, Universität Trier, 2021). 152

Abbildung 6.3-2: Mittlere C-Vorräte in Mineralböden sowie organischen Böden bei unterschiedlicher Landnutzung (aus: Don et al., 2021). 153

Abbildung 6.3-3: Vorräte an organischem Kohlenstoff in Abhängigkeit vom Grundwassereinfluss (aus: Don et al., 2021). 154

Abbildung 6.5-1: Förderung der mikrobiellen Eigenschaften (mikrobiellen Biomasse, mikrobielle Aktivität und Enzymaktivität) durch betriebsbedingte Wärmeemissionen im Bereich der ALEGrO-Erdkabeltrasse (Abweichung von den Kontrollflächen ohne Kabeleinfluss).....162

Abbildung 6.5-2: Mittlere Anzahl (links) und Biomasse (rechts) von adulten und juvenilen Regenwürmern im Trassenbereich (UTL) und Kontrollflächen an 4 verschiedenen Untersuchungsstandorten entlang der ALEGrO–Trasse sowie Mittelwerte über alle Untersuchungsflächen (± S.E.; n = 4). Die gemittelten Differenzen zwischen Trassen- und Kontrollflächen waren statistisch nicht signifikant ($p > 0.05$, $n = 4$, Wilcoxon – test). Verändert nach Emmerling et al., (2024) 163

III Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.2-1: Übersicht von ausgewählten Erdkabelprojekten sowie Messwerte und Annahmen zu betriebsbedingten Auswirkungen auf den jeweiligen Bodenwärmehaushalt (Abweichungen von der Umgebungstemperatur in Grad Kelvin) in verschiedenen Bodentiefen. 14

Tabelle 2.3-1: Nmin-Gehalte (NH_4-N + NO_3-N in kg/ha) in drei Tiefenstufen jeweils im Trassenbereich und Kontrolle der vier Untersuchungsstandorte im ALEGrO-Monitoring in den Monaten Mai und November 2022; aus Emmerling et al., 2023. 18

Tabelle 2.3-2: Ergebnisse der Regenwurmpopulationen von Trassen- und Kontrollböden an den vier Untersuchungsstandorten (Abundanzen, Frischbiomassen und Artenzahlen); aus Emmerling et al., 2024. 20

Tabelle 3.2-1: Erläuterungen zur Bezeichnung der Bodengroßlandschaften (BGL). 26

Tabelle 4.2-1: Übersicht der ausgewählten Leitprofile 32

Tabelle 4.2-2: Begutachtete Böden und die korrespondierenden repräsentativen Bodentypen und Bodenarten gemäß Bodenkundlicher Kartieranleitung KA5. 34

Tabelle 4.3-1: Feddes-Jarvis-Parameter für verschiedene Landnutzungsformen. 48

Tabelle 4.3-2: Tiefe mit 63 % Wurzelmasse im ausgewachsenen Stadium sowie maximale Wurzeltiefe für verschiedene Landnutzungsarten. 49

Tabelle 5.1-1: Profilaufbau des Leitprofils LP_01 57

Tabelle 5.1-2: Rechnerisch bestimmte volumetrische Wassergehalte und abgeleitete Durchlässigkeit in der gesättigten Zone für das Leitprofil LP_01 58

Tabelle 5.1-3: Volumetrische Wärmekapazität und spezifische Wärme bei verschiedenen Wassergehalten für das Leitprofil LP_01. 58

Tabelle 5.1-4: Wärmeleitfähigkeit bei verschiedenen Wassergehalten für das Leitprofil LP_01. 59

Tabelle 5.1-5: Van-Genuchten-Parameter für das Leitprofil LP_01 59

Tabelle 5.1-6: Mittlere betriebsbedingte Differenz der Bodentemperatur [K] in Abhängigkeit von Kabeltyp, Tiefenstufen, Nutzungsart und Lastfällen. 60

Tabelle 5.1-7: Mittlere betriebsbedingte Differenz [Diff.-nFK %] der Wassergehalte in Bezug auf die nFK des Bodens ohne Last [nFK %] in Abhängigkeit von Kabeltyp, Tiefenstufen, Nutzungsart und Lastfällen. 61

Tabelle 5.2-1: Profilaufbau des Leitprofils LP_02 62

Tabelle 5.2-2: Rechnerisch bestimmte volumetrische Wassergehalte und abgeleitete Durchlässigkeit in der gesättigten Zone für das Leitprofil LP_02.....63

Tabelle 5.2-3: Volumetrische Wärmekapazität und spezifische Wärme bei verschiedenen Wassergehalten für das Leitprofil LP_02. 63

Tabelle 5.2-4: Wärmeleitfähigkeit bei verschiedenen Wassergehalten für das Leitprofil LP_02. 63

Tabelle 5.2-5: Van-Genuchten-Parameter für das Leitprofil LP_02.....64

Tabelle 5.2-6: Mittlere betriebsbedingte Differenz der Bodentemperatur [K] in Abhängigkeit von Kabeltyp, Tiefenstufen, Nutzungsart und Lastfällen. 65

Tabelle 5.2-7: Mittlere betriebsbedingte Differenz [Diff.-nFK %] der Wassergehalte in Bezug auf die nFK des Bodens ohne Last [nFK %] in Abhängigkeit von Kabeltyp, Tiefenstufen, Nutzungsart und Lastfällen. 66

Tabelle 5.2-8: Mittlere betriebsbedingte Differenz der Bodentemperatur [K] in Abhängigkeit von Kabeltyp, Tiefenstufen, Nutzungsart und Lastfällen. 67

Tabelle 5.2-9: Mittlere betriebsbedingte Differenz [Diff.-nFK %] der Wassergehalte in Bezug auf die nFK des Bodens ohne Last [nFK %] in Abhängigkeit von Kabeltyp, Tiefenstufen, Nutzungsart und Lastfällen. 68

Tabelle 5.2-10: Mittlere betriebsbedingte Differenz der Bodentemperatur [K] in Abhängigkeit von Kabeltyp, Tiefenstufen, Nutzungsart und Lastfällen. 69

Tabelle 5.2-11: Mittlere betriebsbedingte Differenz [Diff.-nFK %] der Wassergehalte in Bezug auf die nFK des Bodens ohne Last [nFK %] in Abhängigkeit von Kabeltyp, Tiefenstufen, Nutzungsart und Lastfällen. 70

Tabelle 5.2-12: Mittlere betriebsbedingte Differenz der Bodentemperatur [K] in Abhängigkeit von Kabeltyp, Tiefenstufen, Nutzungsart und Lastfällen. 71

Tabelle 5.2-13: Mittlere betriebsbedingte Differenz [Diff.-nFK %] der Wassergehalte in Bezug auf die nFK des Bodens ohne Last [nFK %] in Abhängigkeit von Kabeltyp, Tiefenstufen, Nutzungsart und Lastfällen. 71

Tabelle 5.2-14: Mittlere betriebsbedingte Differenz der Bodentemperatur [K] in Abhängigkeit von Kabeltyp, Tiefenstufen, Nutzungsart und Lastfällen. 72

Tabelle 5.2-15: Mittlere betriebsbedingte Differenz [Diff.-nFK %] der Wassergehalte in Bezug auf die nFK des Bodens ohne Last [nFK %] in Abhängigkeit von Kabeltyp, Tiefenstufen, Nutzungsart und Lastfällen. 73

Tabelle 5.3-1: Profilaufbau des Leitprofils LP_03.....74

Tabelle 5.3-2: Rechnerisch bestimmte volumetrische Wassergehalte und abgeleitete Durchlässigkeit in der gesättigten Zone für das Leitprofil LP_03.....74

Tabelle 5.3-3: Volumetrische Wärmekapazität und spezifische Wärme bei verschiedenen Wassergehalten für das Leitprofil LP_03. 75

Tabelle 5.3-4: Wärmeleitfähigkeit bei verschiedenen Wassergehalten für das Leitprofil LP_03. 75

Tabelle 5.3-5: Van-Genuchten-Parameter für das Leitprofil LP_03.....76

Tabelle 5.3-6: Mittlere betriebsbedingte Differenz der Bodentemperatur [K] in Abhängigkeit von Kabeltyp, Tiefenstufen, Nutzungsart und Lastfällen. 76

Tabelle 5.3-7: Mittlere betriebsbedingte Differenz [Diff.-nFK %] der Wassergehalte in Bezug auf die nFK des Bodens ohne Last [nFK %] in Abhängigkeit von Kabeltyp, Tiefenstufen, Nutzungsart und Lastfällen. 77

Tabelle 5.4-1: Profilaufbau des Leitprofils LP_04.....78

Tabelle 5.4-2: Rechnerisch bestimmte volumetrische Wassergehalte und abgeleitete Durchlässigkeit in der gesättigten Zone für das Leitprofil LP_04.....78

Tabelle 5.4-3: Volumetrische Wärmekapazität und spezifische Wärme bei verschiedenen Wassergehalten für das Leitprofil LP_04. 79

Tabelle 5.4-4: Wärmeleitfähigkeit bei verschiedenen Wassergehalten für das Leitprofil LP_04. 79

Tabelle 5.4-5: Van-Genuchten-Parameter für das Leitprofil LP_04.....80

Tabelle 5.4-6: Mittlere betriebsbedingte Differenz der Bodentemperatur [K] in Abhängigkeit von Kabeltyp, Tiefenstufen, Nutzungsart und Lastfällen. 80

Tabelle 5.4-7: Mittlere betriebsbedingte Differenz [Diff.-nFK %] der Wassergehalte in Bezug auf die nFK des Bodens ohne Last [nFK %] in Abhängigkeit von Kabeltyp, Tiefenstufen, Nutzungsart und Lastfällen. 81

Tabelle 5.5-1 Profilaufbau des Leitprofils LP_05.....82

Tabelle 5.5-2: Rechnerisch bestimmte volumetrische Wassergehalte und abgeleitete Durchlässigkeit in der gesättigten Zone für das Leitprofil LP_05.....82

Tabelle 5.5-3: Volumetrische Wärmekapazität und spezifische Wärme bei verschiedenen Wassergehalten für das Leitprofil LP_05. 83

Tabelle 5.5-4: Wärmeleitfähigkeit bei verschiedenen Wassergehalten für das Leitprofil LP_05. 83

Tabelle 5.5-5: Van Genuchten Parameter für das Leitprofil LP_05. 84

Tabelle 5.5-6: Mittlere betriebsbedingte Differenz der Bodentemperatur [K] in Abhängigkeit von Kabeltyp, Tiefenstufen, Nutzungsart und Lastfällen. 84

Tabelle 5.5-7: Mittlere betriebsbedingte Differenz [Diff.-nFK %] der Wassergehalte in Bezug auf die nFK des Bodens ohne Last [nFK %] in Abhängigkeit von Kabeltyp, Tiefenstufen, Nutzungsart und Lastfällen. 85

Tabelle 5.6-1: Profilaufbau des Leitprofils LP_06. 86

Tabelle 5.6-2: Rechnerisch bestimmte volumetrische Wassergehalte und abgeleitete Durchlässigkeit in der gesättigten Zone für das Leitprofil LP_06. 87

Tabelle 5.6-3: Volumetrische Wärmekapazität und spezifische Wärme bei verschiedenen Wassergehalten für das Leitprofil LP_06. 87

Tabelle 5.6-4: Wärmeleitfähigkeit bei verschiedenen Wassergehalten für das Leitprofil LP_06. 87

Tabelle 5.6-5: Van-Genuchten-Parameter für das Leitprofil LP_06. 88

Tabelle 5.6-6: Mittlere betriebsbedingte Differenz der Bodentemperatur [K] in Abhängigkeit von Kabeltyp, Tiefenstufen, Nutzungsart und Lastfällen. 89

Tabelle 5.6-7: Mittlere betriebsbedingte Differenz [Diff.-nFK %] der Wassergehalte in Bezug auf die nFK des Bodens ohne Last [nFK %] in Abhängigkeit von Kabeltyp, Tiefenstufen, Nutzungsart und Lastfällen. 89

Tabelle 5.6-8: Mittlere betriebsbedingte Differenz der Bodentemperatur [K] in Abhängigkeit von Kabeltyp, Tiefenstufen, Nutzungsart und Lastfällen. 90

Tabelle 5.6-9: Mittlere betriebsbedingte Differenz [Diff.-nFK %] der Wassergehalte in Bezug auf die nFK des Bodens ohne Last [nFK %] in Abhängigkeit von Kabeltyp, Tiefenstufen, Nutzungsart und Lastfällen. 91

Tabelle 5.7-1: Profilaufbau des Leitprofils LP_07. 92

Tabelle 5.7-2: Rechnerisch bestimmte volumetrische Wassergehalte und abgeleitete Durchlässigkeit in der gesättigten Zone für das Leitprofil LP_07. 93

Tabelle 5.7-3: Volumetrische Wärmekapazität und spezifische Wärme bei verschiedenen Wassergehalten für das Leitprofil LP_07 93

Tabelle 5.7-4: Wärmeleitfähigkeit bei verschiedenen Wassergehalten für das Leitprofil LP_07. 93

Tabelle 5.7-5: Van-Genuchten-Parameter für das Leitprofil LP_07.....94

Tabelle 5.7-6: Mittlere betriebsbedingte Differenz der Bodentemperatur [K] in Abhängigkeit von Kabeltyp, Tiefenstufen, Nutzungsart und Lastfällen.....95

Tabelle 5.7-7: Mittlere betriebsbedingte Differenz [Diff.-nFK %] der Wassergehalte in Bezug auf die nFK des Bodens ohne Last [nFK %] in Abhängigkeit von Kabeltyp, Tiefenstufen, Nutzungsart und Lastfällen.....96

Tabelle 5.8-1: Profilaufbau des Leitprofils LP_08.....97

Tabelle 5.8-2: Rechnerisch bestimmte volumetrische Wassergehalte und abgeleitete Durchlässigkeit in der gesättigten Zone für das Leitprofil LP_08.....97

Tabelle 5.8-3: Volumetrische Wärmekapazität und spezifische Wärme bei verschiedenen Wassergehalten für das Leitprofil LP_08. 98

Tabelle 5.8-4: Wärmeleitfähigkeit bei verschiedenen Wassergehalten für das Leitprofil LP_08. 98

Tabelle 5.8-5: Van-Genuchten-Parameter für das Leitprofil LP_08.....99

Tabelle 5.8-6: Mittlere betriebsbedingte Differenz der Bodentemperatur [K] in Abhängigkeit von Kabeltyp, Tiefenstufen, Nutzungsart und Lastfällen.....99

Tabelle 5.8-7: Mittlere betriebsbedingte Differenz [Diff.-nFK %] der Wassergehalte in Bezug auf die nFK des Bodens ohne Last [nFK %] in Abhängigkeit von Kabeltyp, Tiefenstufen, Nutzungsart und Lastfällen.....100

Tabelle 5.9-1: Profilaufbau des Leitprofils LP_09.....101

Tabelle 5.9-2: Rechnerisch bestimmte volumetrische Wassergehalte und abgeleitete Durchlässigkeit in der gesättigten Zone für das Leitprofil LP_09.....102

Tabelle 5.9-3: Volumetrische Wärmekapazität und spezifische Wärme bei verschiedenen Wassergehalten für das Leitprofil LP_09. 102

Tabelle 5.9-4: Wärmeleitfähigkeit bei verschiedenen Wassergehalten für das Leitprofil LP_09. 103

Tabelle 5.9-5: Van-Genuchten-Parameter für das Leitprofil LP_09.....103

Tabelle 5.9-6: Mittlere betriebsbedingte Differenz der Bodentemperatur [K] in Abhängigkeit von Kabeltyp, Tiefenstufen, Nutzungsart und Lastfällen.....104

Tabelle 5.9-7: Mittlere betriebsbedingte Differenz [Diff.-nFK %] der Wassergehalte in Bezug auf die nFK des Bodens ohne Last [nFK %] in Abhängigkeit von Kabeltyp, Tiefenstufen, Nutzungsart und Lastfällen. 105

Tabelle 5.10-1: Profilaufbau des Leitprofils LP_10. 106

Tabelle 5.10-2: Rechnerisch bestimmte volumetrische Wassergehalte und abgeleitete Durchlässigkeit in der gesättigten Zone für das Leitprofil LP_10. 106

Tabelle 5.10-3: Volumetrische Wärmekapazität und spezifische Wärme bei verschiedenen Wassergehalten für das Leitprofil LP_10. 107

Tabelle 5.10-4: Wärmeleitfähigkeit bei verschiedenen Wassergehalten für das Leitprofil LP_10. 107

Tabelle 5.10-5: Van-Genuchten-Parameter für das Leitprofil LP_10. 108

Tabelle 5.10-6: Mittlere betriebsbedingte Differenz der Bodentemperatur [K] in Abhängigkeit von Kabeltyp, Tiefenstufen, Nutzungsart und Lastfällen. 108

Tabelle 5.10-7: Mittlere betriebsbedingte Differenz [Diff.-nFK %] der Wassergehalte in Bezug auf die nFK des Bodens ohne Last [nFK %] in Abhängigkeit von Kabeltyp, Tiefenstufen, Nutzungsart und Lastfällen. 109

Tabelle 5.11-1: Profilaufbau des Leitprofils LP_11. 110

Tabelle 5.11-2: Rechnerisch bestimmte volumetrische Wassergehalte und abgeleitete Durchlässigkeit in der gesättigten Zone für das Leitprofil LP_11. 111

Tabelle 5.11-3: Volumetrische Wärmekapazität und spezifische Wärme bei verschiedenen Wassergehalten für das Leitprofil LP_11. 111

Tabelle 5.11-4: Wärmeleitfähigkeit bei verschiedenen Wassergehalten für das Leitprofil LP_11. 111

Tabelle 5.11-5: Van-Genuchten-Parameter für das Leitprofil LP_11. 112

Tabelle 5.11-6: Mittlere betriebsbedingte Differenz der Bodentemperatur [K] in Abhängigkeit von Kabeltyp, Tiefenstufen, Nutzungsart und Lastfällen. 113

Tabelle 5.11-7: Mittlere betriebsbedingte Differenz [Diff.-nFK %] der Wassergehalte in Bezug auf die nFK des Bodens ohne Last [nFK %] in Abhängigkeit von Kabeltyp, Tiefenstufen, Nutzungsart und Lastfällen. 113

Tabelle 5.12-1: Profilaufbau des Leitprofils LP_12. 114

Tabelle 5.12-2: Rechnerisch bestimmte volumetrische Wassergehalte und abgeleitete Durchlässigkeit in der gesättigten Zone für das Leitprofil LP_12. 115

Tabelle 5.12-3: Volumetrische Wärmekapazität und spezifische Wärme bei verschiedenen Wassergehalten für das Leitprofil LP_12. 115

Tabelle 5.12-4: Wärmeleitfähigkeit bei verschiedenen Wassergehalten für das Leitprofil LP_12....115

Tabelle 5.12-5: Van-Genuchten-Parameter für das Leitprofil LP_12. 116

Tabelle 5.12-6: Mittlere betriebsbedingte Differenz der Bodentemperatur [K] in Abhängigkeit von Kabeltyp, Tiefenstufen, Nutzungsart und Lastfällen. 117

Tabelle 5.13-1 Profilaufbau des Leitprofils LP_13....118

Tabelle 5.13-2: Rechnerisch bestimmte volumetrische Wassergehalte und abgeleitete Durchlässigkeit in der gesättigten Zone für das Leitprofil LP_13....119

Tabelle 5.13-3: Volumetrische Wärmekapazität und spezifische Wärme bei verschiedenen Wassergehalten für das Leitprofil LP_13. 119

Tabelle 5.13-4: Wärmeleitfähigkeit bei verschiedenen Wassergehalten für das Leitprofil LP_13....120

Tabelle 5.13-5: Van-Genuchten-Parameter für das Leitprofil LP_13. 120

Tabelle 5.13-6: Mittlere betriebsbedingte Differenz der Bodentemperatur [K] in Abhängigkeit von Kabeltyp, Tiefenstufen, Nutzungsart und Lastfällen. 121

Tabelle 5.13-7: Mittlere betriebsbedingte Differenz [Diff.-nFK %] der Wassergehalte in Bezug auf die nFK des Bodens ohne Last [nFK %] in Abhängigkeit von Kabeltyp, Tiefenstufen, Nutzungsart und Lastfällen. 122

Tabelle 5.14-1: Maximale Temperaturdifferenz eines Profils mit guten thermischen Eigenschaften (LP_06) und mit schlechten thermischen Eigenschaften (LP_12) direkt unterhalb des Schutzrohrs bei einer Ausführungslast von 85 %. 124

Tabelle 5.14-2: Maximale Temperaturdifferenz eines Profils mit guten thermischen Eigenschaften (LP_06) und mit schlechten thermischen Eigenschaften (LP_12) direkt unterhalb des Schutzrohrs bei einer Ausführungslast von 85 % für eine Verlegetiefe von 2,80 m. 124

Tabelle 5.14-3: Maximale Temperaturdifferenz eines Profils mit guten thermischen Eigenschaften (LP_06) und mit schlechten thermischen Eigenschaften (LP_12) direkt unterhalb des Schutzrohrs bei einer Ausführungslast von 85 % für eine Verlegetiefe von 3,10 m. 125

Abkürzungsverzeichnis

Abs.	Absatz
BBodSchG	Bundesbodenschutzgesetz
BBP	Bundesbedarfsplan
BBPlG	Bundesbedarfsplangesetzes
BGBl.	Bundesgesetzblatt
BGL	Bodengroßlandschaft
BGL5000	Karte der Bodenregionen und Bodengroßlandschaften 1:5.000.000
BGR	Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe
BK	Bodenkarte
BK25	Bodenkarte im Maßstab 1:25.000
BK50	Bodenkarte im Maßstab 1:50.000
BS5	Bodenkarte im Maßstab 1:5.000 auf Basis der Bodenschätzungsdaten in Niedersachsen
BSK	Bodenschutzkonzept
BÜK200	Bodenübersichtskarte 1:200.000
BÜK5000	Bodenübersichtskarte 1:5.000.000
bspw.	beispielsweise
bzgl.	bezüglich
bzw.	beziehungsweise
ca.	circa
d. h.	das heißt
DWD	Deutschen Wetterdienstes
EEG	Erneuerbare-Energien-Gesetz
EnLAG	Energieleitungsausbaugesetz
EnWG	Energiewirtschaftsgesetz
et al.	et alii
etc.	et cetera
GD NRW	Geologischer Dienst Nordrhein-Westfalen
GDI-NRW	Geodateninfrastruktur Nordrhein-Westfalen
GDSHE	Hessische Verwaltung für Bodenmanagement und Geoinformationen
gem.	gemäß
GOK	Geländeoberkante
gwfern	grundwasserfern
gwnah	grundwassernah
HE	Hessen
HGÜ	Höchstspannungsgleichstromübertragung
HÜK	Hydrologischen Übersichtskarten
i. d. R.	in der Regel
i. V. m.	in Verbindung mit
KA 5	Bodenkundliche Kartieranleitung, 5. Auflage (BGR 2005)
KA 6	Bodenkundliche Kartieranleitung, 6. Auflage (BGR 2024)
LBEG	Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie
LBG200	Bodenlandschaften und Leitbodengesellschaften von NRW 1:200.000
LfU SH	Landesamt für Umwelt Schleswig Holstein
LK Niedersachsen	Landwirtschaftskammer Niedersachsen
LP	Leitprofil
max.	maximal
n.	nach
NABEG	Netzausbaubeschleunigungsgesetz
NDS	Niedersaschen
NEP	Netzentwicklungsplan
nFK	nutzbaren Feldkapazität
NIBIS	Niedersächsischen Bodeninformationssystems
NRW	Nordrhein-Westfalen
o. g.	oben genannt
PWP	permanenten Welkepunktes
s.	siehe

s. a.	siehe auch
s. o.	siehe oben
s. u.	siehe unten
SH	Schleswig Holstein
THG	Treibhausgas
u. a.	unter anderm
UA	Umspannanlage
UVPG	Gesetz über die Umweltverträglichkeitsprüfung
v. a.	vor allem
vgl.	vergleiche
VKR	Verknüpfungsregeln
z. B.	zum Beispiel
z. T.	zum Teil
ZFSV	zeitweise fließfähigen, selbstverdichtenden Verfüllbaustoff

1. Einleitung und Anlass des Gutachtens

Zu Umsetzung der Energiewende im Elektrizitätssektor müssen die Übertragungsnetze ausgebaut werden. Der Amprion GmbH obliegt als einer von vier Übertragungsnetzbetreibern in Deutschland der Betrieb sowie die bedarfsgerechte Dimensionierung und Instandhaltung der überregionalen Stromnetze. Mit der Novellierung des Gesetzes für den Ausbau erneuerbarer Energien (EEG) zum 01.01.2023 wurde ein Zielwert von 80 Prozent für den Anteil erneuerbarer Energien am Bruttostromverbrauch bis zum Jahr 2030 im Staatsgebiet der Bundesrepublik Deutschland festgesetzt. Vor allem die in der Nord- und Ostsee errichteten, leistungsstarken Windparks tragen einen Großteil zur Produktion von Strom aus erneuerbaren Energien bei. Der höchste Stromverbrauch ist jedoch im Bereich der energieintensiven „Verbrauchszentraten“ in Mittel- und Süddeutschland zu verorten (vgl. Abbildung 1-1). Hieraus leitet sich, bei einer bereits weitgehenden Überlastung der vorhandenen Höchstspannungsleitungen, der o. g. Ausbaubedarf ab. Gemäß § 3 des Bundesbedarfsplangesetzes (BBPIG) sind solche Leitungen zur Höchstspannungs-Gleichstrom-Übertragung vorzugsweise als Erdkabel zu errichten.

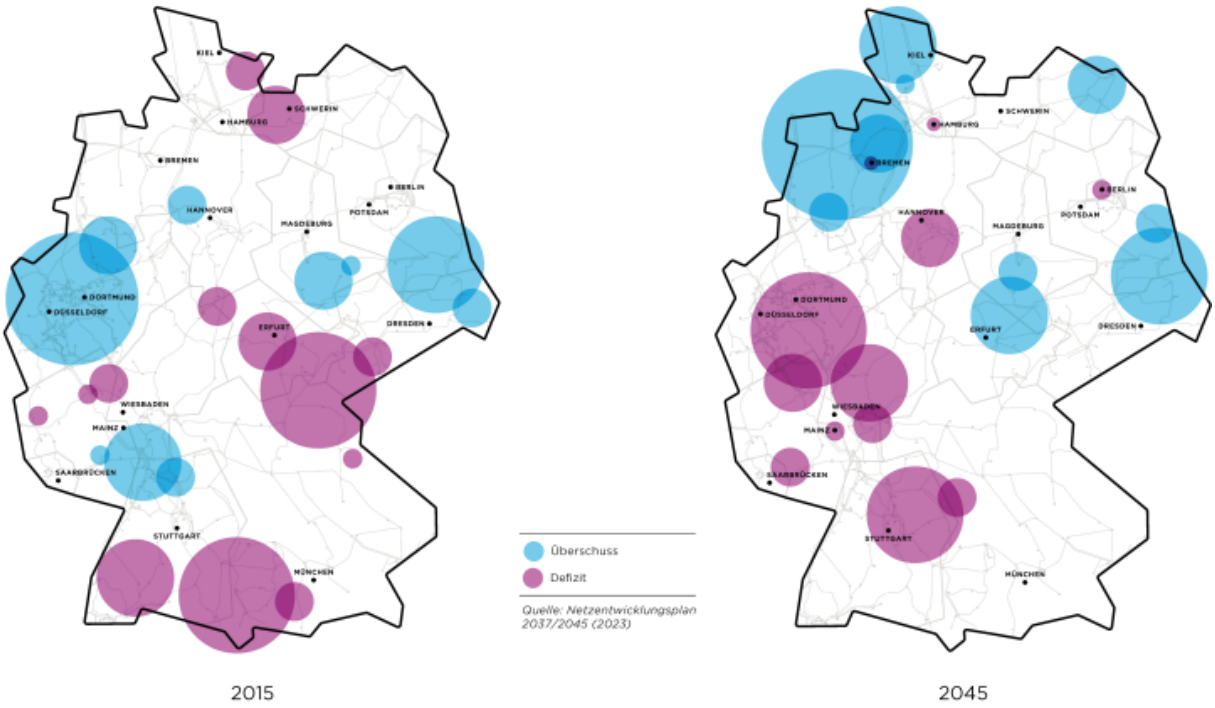

Abbildung 1-1: Zukunftsszenario mit Darstellung des Erzeugungsüberschusses im Norden und des Defizites im Süden (Quelle: amprion.net, Basis: Netzentwicklungsplan 2037/2045).

Nachdem im Netzentwicklungsplan (NEP) festgesetzt wurde, wo ein Ausbaubedarf besteht, werden im Bundesbedarfsplan (BBP) konkrete Vorhaben festgelegt.

Darauffolgend wird der Verlauf von Trassenkorridoren festgelegt (Hinweis: dies erfolgt im Rahmen der Bundesfachplanung, insofern diese nicht im Sinne des § 5a Abs. 4a NABEG entfällt) sowie im Rahmen der Planfeststellung (Festlegung des Verlaufs der Leitung innerhalb des zuvor festgesetzten Trassenkorridors) verschiedene, planungsrelevante Umweltauswirkungen abgewogen und untersucht. Die Berücksichtigung der Böden findet dabei zunächst im Rahmen der strategischen Umweltprüfung statt, worauf folgend der Detaillierungsgrad der Betrachtung – auch im Sinne der obligatorischen Umweltverträglichkeitsprüfung gem. dem Gesetz über die Umweltverträglichkeitsprüfung (UVPG) – im Zuge von Umweltberichten, Bodenschutzkonzepten und Fachbeiträgen erhöht wird.

Die betriebsbedingte Wärmeemission von erdverlegten Stromkabelsystemen kann eine Erwärmung des umgebenden Bodens hervorrufen. Die Wärmeausbreitung im Boden ist dabei von der Stromlast, der Grabengeometrie, dem Bettungsmaterial, der Bodentiefe und den thermischen Bodeneigenschaften abhängig und kann entlang der Trasse je nach Boden, Grundwasserflurabstand, Bewuchs und klimatischen Randbedingungen variieren.

Das vorliegende Gutachten zielt darauf ab die potenziellen, betriebsbedingten Auswirkungen des Erdkabelbetriebs für einen Großteil des Netzgebietes der Amprion GmbH übergeordnet und kleinmaßstäbig möglichst repräsentativ zu beschreiben.

Hierzu wurden unter Berücksichtigung der Netzentwicklungskorridore, der technischen Randbedingungen im Netzgebiet der Amprion GmbH mit besonderer Bedeutung für den flächenhaften Netzausbau sowie der verfügbaren Geodaten insgesamt 13 typische Bodenleitprofile mit charakteristischen Bodeneigenschaften abgeleitet. Mit Hilfe numerischer Modelle wurden auf Basis der bodenphysikalischen Eigenschaften dieser Leitprofile Wärme-Prognoseberechnungen zur Abbildung der voraussichtlich zu erwartenden, betriebsbedingten Wärmeemissionen durchgeführt. Im Sinne einer konservativen Betrachtung erfolgte neben der Annahme einer betriebstypischen Kabelauslastung von 70 % ebenfalls die Berücksichtigung eines Szenarios mit einer Kabelauslastung von 85 %.

Aus bodenökologischer Sicht werden nachfolgend die vorliegenden Modellierungsergebnisse in Bezug auf die anstehenden Böden ausgewertet und Rückschlüsse auf die Auswirkungen einer Wärmezufuhr auf

- den Wärme- und Wasserhaushalt,
- den Nährstoffhaushalt, inklusive Stickstoffdynamik und organische Bodensubstanz,
- die Vegetation und Landwirtschaft,
- sowie auf Bodenorganismen und Stoffwechselaktivitäten

in den Böden abgeleitet.

Mit den hierfür erforderlichen Untersuchungen und gutachterlichen Leistungen wurde die Arbeitsgemeinschaft TABERG Ingenieure GmbH und delta h Ingenieurgesellschaft mbH von der Amprion GmbH beauftragt. Die Durchführung der Leistungen erfolgte in enger Zusammenarbeit mit Prof. Dr. C. Emmerling, Fach Bodenkunde der Universität Trier. Der Modellaufbau sowie die Berechnungen zur betriebsbedingten Wärmeausbreitung an den Erdkabelsystem (Wärmetransport- und Wasserhaushaltsmodellierung) erfolgte durch die delta h Ingenieurgesellschaft GmbH. Die Ermittlung der bodenkundlichen Eingangsdaten sowie die Auswertung und bodenökologische Bewertung der Ergebnisse wurde durch die TABERG Ingenieure GmbH und Prof. Dr. Emmerling vorgenommen.

2. Stand der Kenntnis

2.1 Der natürliche Bodenwärmehaushalt

Die dem Boden zugeführte Wärme und damit der Wärmehaushalt des Bodens wird im natürlichen Zustand praktisch ausschließlich durch die Sonneneinstrahlung gesteuert. Die Eigenschaft von Böden, Wärme zu speichern (Wärmespeicherkapazität) und im Boden zu leiten (Wärmeleitfähigkeit), hängt insbesondere vom Wassergehalt des Bodens, der Lagerungsdichte, der Bodenart und dem Gehalt an organischer Substanz ab (Richter, 1986; Amelung et al., 2018).

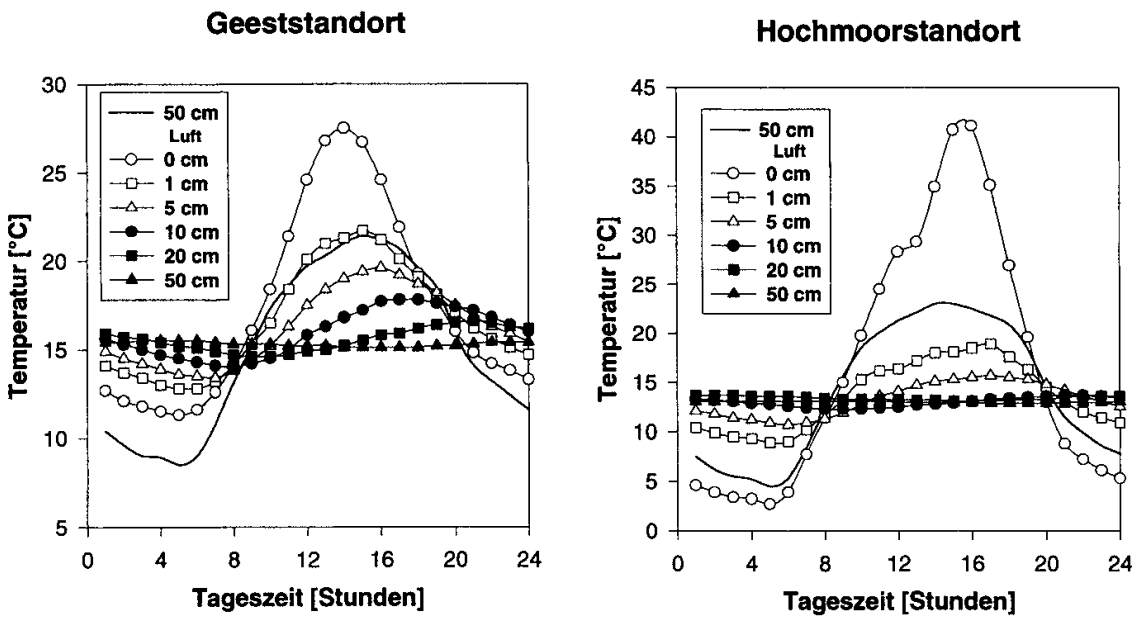

Abbildung 2.1-1: Zeitlicher Verlauf der Bodentemperaturen (°C) im August für einen Geest- und Hochmoorstandort (nach Miess, 1968, aus Bachmann, 1997).

Die Bodentemperatur weist starke räumliche und zeitliche Schwankungen auf und unterliegt einem symmetrischen Tages- und Jahreszyklus (Gisi et al., 1997; Amelung et al., 2018), gewöhnlich dargestellt anhand von Isochronen (Abbildung 2.1-1). Im Tagesverlauf steigen die Temperaturen gewöhnlich kontinuierlich an und erreichen in den Mittagsstunden einen Höchststand. So werden in einem sandigen Geestboden in Niedersachsen zum Beispiel in den sommerlichen Mittagsstunden im Oberboden Temperaturen bis zu 28 °C erreicht.

In 10 cm Tiefe erreicht die Temperatur bis zum frühen Nachmittag noch ca. 17 °C und in 50 cm Tiefe ist ein Tagesgang der Temperatur nicht mehr zu erkennen. Im Hochmoorboden werden deutlich höhere Temperaturen erreicht (ca. 40 °C) und bereits in ca. 15 cm Tiefe tritt kein merklicher Tagesgang mehr auf (Abbildung 2.1-1).

Der Jahresverlauf der Bodentemperatur zeigt einen der normalen Tagesamplitude analogen Verlauf, der allerdings mit einer Verzögerung von Tagen bis Wochen bis in eine Bodentiefe von knapp 2,0 m reicht. Die Temperaturamplitude ist mit zunehmender Bodentiefe gedämpft. Wie aus Abbildung 2.1-2 zu entnehmen ist, variierten die Bodentemperaturen in 75 cm lediglich noch zwischen 8 und 9°C. In 2,0 m Tiefe herrscht gewöhnlich die Jahresmitteltemperatur mit einer Spannweite von 5 °C bis 15 °C.

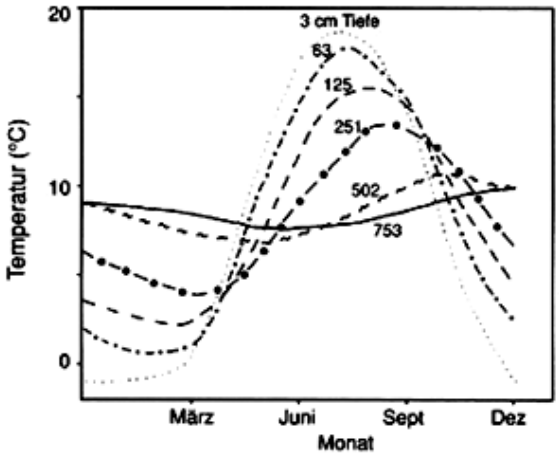

Abbildung 2.1-2: Jahresgang der Temperatur in einem Boden bei Königsberg in Abhängigkeit von der Tiefe (nach Schmidt & Leyst in Geiger 1961, aus Amelung et al., 2018).

Die Wärmeleitfähigkeit eines Bodens wird durch die Bodenart und die hieraus abzuleitenden Bodeneigenschaften bestimmt (Richter, 1986; Markert et al., 2017). Hieraus folgt, dass bei unterschiedlichem Wassergehalt sandige, lehmige oder tonige Böden die Wärme sehr unterschiedlich ableiten, wie in Abbildung 2.1-3 veranschaulicht wird. Bei niedrigem Wassergehalt sind demnach die Unterschiede zwischen den Böden eher gering; erst bei höheren Wassergehalten steigt die thermische Leitfähigkeit deutlich in der Reihenfolge Sand > Lehm > Ton an. Torfe dagegen zeigen über einen großen Wassergehaltsbereich eine geringe thermische Leitfähigkeit (Abbildung 2.1-3). Böden unterscheiden sich zudem in ihrer Wärmespeicherkapazität beträchtlich. Einfach formuliert, erwärmt sich ein sandiger, trockener Boden leichter und damit schneller als ein lehmiger und feuchter Boden.

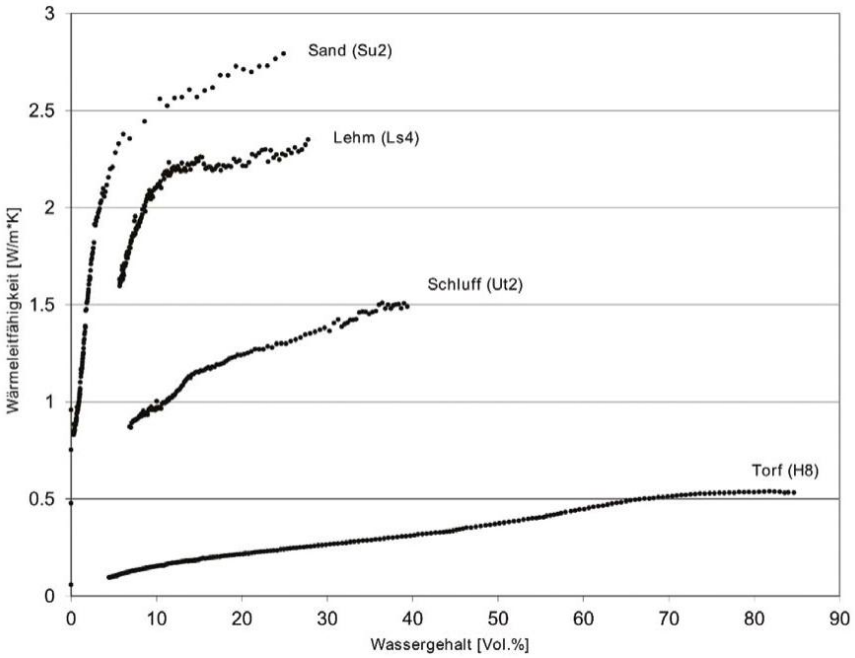

Abbildung 2.1-3: Thermische Leitfähigkeit von verschiedenen Böden als Funktion des Wassergehaltes (nach Markert et al., 2017 aus Wessolek et al., 2016).

Umgekehrt kann dieser die Wärme im Boden länger speichern, während sich der sandige Boden schneller wieder abkühlt, da die Wärmeleitfähigkeit schwächer vom Wassergehalt abhängt als die Wärmekapazität. Für den sandigen Boden zeigt sich hierin auch die besondere Wirkung der Wärmeleitfähigkeit der mineralischen Komponente. Der Quartzanteil in Sanden kann eine Wärmeleitfähigkeit von bis zu 8 W/m*K aufweisen (Campanale et al., 2025).

In der landwirtschaftlichen Praxis ist das Phänomen bekannt, dass sich sandige Böden im Frühjahr schnell erwärmen, da sie gewöhnlich niedrige Wassergehalte aufweisen, während sich tonreichere Böden aufgrund des höheren Totwassergehaltes nur langsam erwärmen, andererseits aber länger warm bleiben (Stahr et al., 2008). Die organische Auflage und der Pflanzenbestand können diese Prozesse modifizieren. Der Wärmehaushalt von nassen Grund-(Gley)- und Stauwasser-(Pseudogley-) Böden wird zusätzlich durch die starke Verdunstung und damit durch zusätzliche Wärmeverluste geprägt. So kann eine Dränung nasser Böden eine deutliche Erwärmung im Vergleich zu ungedränten Flächen, insbesondere im Frühjahr, bewirken und die Wachstumsperiode von Kulturpflanzen verlängern (Amelung et al. 2018). Eine Dränung wirkt ausgleichend auf den Jahresgang der Temperatur in den obersten Bodenschichten. Auch die Bewässerung landwirtschaftlicher Kulturen hat hier einen entsprechenden Einfluss.

2.2 Bodenerwärmung durch Erdkabel

Der Betrieb von erdverlegten Höchstspannungskabeln kann eine Erwärmung von Böden verursachen. Dies betrifft insbesondere den Unterboden und den Bereich der Verlegetiefe der Kabel, der sogenannten technischen Leitungszone. Als Folge kann es zu Temperaturanomalien im Boden kommen, indem die Temperaturen nicht mit zunehmender Bodentiefe abnehmen, sondern insbesondere im Unterboden ansteigen.

Einflussfaktoren einer betriebsbedingten Bodenerwärmung sind vorrangig die die Verlustwärme bestimmenden Variablen: das verwendete Bettungsmaterial, die Kabelauslastung, die Anzahl und Dicke (Abschirmung) der Kabel, die Kabelachsabstände sowie die den Wärmehaushalt bestimmenden Bodeneigenschaften: Bodenart, Lagerungsdichte und organische Bodensubstanz.

Um den Einfluss von betriebsbedingten Wärmeemissionen durch Erdkabel abschätzen zu können, wurde eine Literaturstudie von vergleichbaren Erdkabelprojekten durchgeführt, soweit Angaben zu den erwarteten Temperaturänderungen in verschiedenen Bodentiefen zugänglich waren. Die Ergebnisse sind in Tabelle 2.2-1 zusammengestellt. Soweit möglich, sind zusätzlich die Kabeltypen, die entsprechenden Bodentypen und Bodenarten, die Wärmeverluste sowie die gemessenen oder berechneten Temperaturerhöhungen gegenüber der Umgebungstemperatur für den Oberboden (0–10 cm und 20 cm Tiefe), für die Hauptdurchwurzelungszone (50–80 cm Tiefe) und den Unterboden (90 cm bzw. 120 cm Tiefe) angegeben. Neben unterschiedlichen Kabel-Spannungen, Wärmeemissionen im Boden sowie der Verlegetiefe der Kabel unterscheiden sich die aufgeführten Kabelprojekte in der Kabel-Auslastung. Es ist weiterhin von Bedeutung, dass Messwerte aus dem Feld ausschließlich für das Freiburger Experiment, den Kabeltest Osterath, die Monitoringtrasse Raesfeld, für einen Monitoring-Versuch mit Erdkabeln aus Berlin, das CHARGE-Transnet-Projekt, Reinshof (TenneT) sowie aus dem Monitoringversuch ALEGrO vorliegen. Bei den Kabelprojekten der TenneT Ostküstenleitung, CCM, A-Nord und Kriftel – IHP West handelt es sich um Modellrechnungen auf Basis unterschiedlicher numerischer Rechenverfahren. Für die hierzu modellierten Wärmeemissionen gelten bestimmte Rahmenbedingungen der Kabelauslastung, der Geometrie des Kabelgrabens, der Verlegetiefe der Kabel, der Kabelabstände, der angenommenen Trockenrohdichte der Kontrolle, u.v.m.

„Freiburger Experiment“

In dieser Freilandstudie (Trüby, 2014; 2018; 2020) wurden Experimente zum Bodenwärme- und Bodenwasserhaushalt durch den Betrieb von Erdkabeln über einen Zeitraum von 5 Jahren durchgeführt. Bei dem getesteten Boden handelte es sich um einen terrestrischen Boden (Auf-

füllmaterial; s. Tabelle 2.2-1) ohne Grundwasseranschluss. Die Ergebnisse dieses Langzeitversuches zeigen, dass die betriebsbedingten Auswirkungen der Kabel auf den Bodenwärmehaushalt im Jahresverlauf stark variierten. Zum ausgehenden Winter kam es zum Beispiel an der Bodenoberfläche zu einer Temperaturabweichung von 5,5 K, während die Differenzen in den Sommermonaten deutlich geringer waren, insbesondere bei experimentell erzeugtem Grundwassereinfluss im Kabelbereich. Allerdings zeigte sich auch eine Inversion der Temperaturgradienten und eine grundsätzlich veränderte Wärmeverteilung im Unterboden, die im Jahresverlauf andauerte, so dass sich dauerhaft konstante Temperaturbedingungen eingestellt haben. Die Temperaturentwicklung im Oberboden wurde aber primär durch die Jahres-Dynamik der natürlichen Erwärmung durch Sonneneinstrahlung geprägt.

Kabeltest Osterath

In dieser dreijährigen Studie an einer 110 kV-Kabeltrasse wurden verschiedene Betriebsszenarien getestet, und zwar eine zweijährige technische Maximallast (in den Sommermonaten) gefolgt von über einem Jahr Auslegungslast (s. Trüby, 2014; 2018; 2020). Ein dauerhafter Betrieb mit technischer Maximallast ist in der Praxis nicht möglich, ebenso wäre ein dauerhafter Betrieb bei Auslegungslast nicht praxisnah oder repräsentativ. Bei dem Kabeltest Osterath liegen somit Ergebnisse eines Worst-Case-Szenarios vor. Demnach unterschieden sich die betriebsbedingten Temperaturen am Schutzrohr im Unterbodenbereich mit 4,0 K nur geringfügig von der Kontrolle. Bei hohem Auslastungsgrad kann die Differenz im Unterboden noch größer sein. Die Temperaturabweichungen an der Bodenoberfläche und in 20 cm Bodentiefe variierten insgesamt zwischen 2,5 und 5,2 K.

Monitoringtrasse Raesfeld

Um die direkten Auswirkungen einer Kabeltrasse auf den Boden erfassen zu können, wurde vom Netzbetreiber Amprion GmbH und dem Westfälisch-Lippischen Landwirtschaftsverband eine Versuchsfläche entlang einer 3,4 km langen Erdkabeltrasse eingerichtet. Untersucht werden die thermischen und hydrologischen Effekte von Erdkabeln auf landwirtschaftliche Kulturen. Der entsprechende Bodentyp ist ein tiefgründig entwickelter anthropogener Plaggenesch. Die Kabelauslastung variierte bisher über einen weiten Bereich zwischen 11 % bis 26 % der Auslegungslast, das entspricht 18 % bis 43 % der Normallast (s. a. Trüby, 2018). Die bisher dokumentierten Temperaturunterschiede zwischen Trasse und Kontrollfläche waren insbesondere im Oberboden sehr gering und entsprachen den bereits im Testfeld Osterath gemachten Erfahrungen, dass im Oberboden mit Temperaturabweichungen von ca. 2,0 K gerechnet werden kann (Trüby, 2018; 2020). Die bisher dokumentierten Temperaturabweichungen müssen vor dem Hintergrund der geringen und schwankenden Auslastungen betrachtet werden.

Freilandmonitoring Berlin

Im urbanen Umfeld von Berlin wurde von Trinks (2010) ein Freilandmonitoring an einer 110 kV Kabeltrasse durchgeführt (Wesselok et al., 2016). An einem Straßen- und einem Waldstandort wurden für einen Zeitraum von 18 Monaten die Kabeltemperatur sowie der Wärme- und Wassershaushalt im Kabelraum gemessen. Die Ergebnisse zeigten, dass vor allem der Wärmehaushalt der Standorte und der daraus resultierende Jahresgang der Bodentemperaturen für die Kabeltemperaturen ausschlaggebend ist. Die betriebsbedingten Temperaturen der unter einer Straße verlegten Kabel waren um 5,0 K bis 10,0 K höher als die Temperatur der Kabel am Waldstandort. Die von der Strombelastung hervorgerufene Erwärmung der Kabel betrug maximal 5,0 K gegenüber dem unbeeinflussten Boden. Im Winter und bei niedriger Stromlast betrug die Erwärmung maximal 2,0 K bis 3,0 K. Der Boden in der Kabelumgebung erwärmte sich im Winter nur wenig, im Sommer hingegen stieg dort die Temperatur vor allem am Standort Wald deutlich an. Die Temperaturgradienten zeigten, dass der Wärmetransport aus dem Kabelraum im Winter zur Bodenoberfläche gerichtet ist. Im Sommer findet auch ein Wärmetransport in die Tiefe statt.

Südlink (Transnet)

Der Südlink ist mit einer Länge von ca. 700 km eine der zentralen Nord–Süd-Infrastrukturvorhaben der Energiewende in Deutschland. Die Umsetzung erfolgt als Gleichstromkabel mit insgesamt 4 GW Leistung und 525 kV Spannung. Um die betriebsbedingten Auswirkungen des Südlinks u. a. auf Bodeneigenschaften und landwirtschaftliche Kulturpflanzen abzuschätzen, wurde vom Bundesland Baden-Württemberg ein umfangreicher Feldversuch an jeweils 4 Standorten in Südwestdeutschland etabliert. Hierbei handelt es sich um einen tonigen Pararendzina-Pelosol aus Keuper, eine Terra fusca aus Muschelkalk, eine Parabraunerde aus Löss sowie eine Pseudogley-Braunerde aus Muschelkalk. Der Versuchsaufbau umfasst einen Kaltgraben, einen Warmgraben und eine Kontrolle. Bisherige mittlere Differenzen zwischen Warmgraben und Kaltgraben an den vier Untersuchungsstandorten variierten in der Krume zwischen 1,8 K bis 2,2 K (Lehmann et al., 2024).

Reinshof (TenneT)

Auf dem Testfeld Reinshof werden seit 2019 die betriebsbedingten Auswirkungen einer 380 kV Erdkabeltrasse der TenneT TSO GmbH auf Bodeneigenschaften und landwirtschaftlichen Kulturpflanzen simuliert. Die Versuchsfläche ist eine Ackerfläche, auf der vorwiegend Auenböden aus Löss verbreitet sind. Der Versuchsaufbau beinhaltet einen Kaltversuch, einen Warmversuch und eine Kontrollvariante. Es wurden bisher verschiedene Lastszenarios simuliert, die zwischen 13 W/m und 46 W/m variierten. Im Grundlastbetrieb mit 13 W/m betrugen die Differenzen zwischen Warmversuch und Kontrollvariante 2,2 K in 30 cm Tiefe, 3,2 K in 60 cm Tiefe, 4,1 K in 90 cm Tiefe sowie 5,3 K in 120 cm Tiefe (Ahl et al., 2023).

ALEGrO (Amprion)

Die ca. 90 km lange 320 kV-Gleichstromerdkabeltrasse ALEGrO (Aachen-Lüttig-Electricity-Grid-Overlay) wurde in den Jahren 2018 bis 2020 zwischen Oberzier (NRW) und Lixhe (Belgien) erdverlegt und befindet sich derzeit im Regelbetrieb (Ampr. Das ALEGrO-System besteht aus zwei Kabeln, die in einem Abstand von 75 cm in 1,8 m Tiefe (Oberkante Schutzrohr) verlegt sind. Die Verlustwärme der beiden ALEGrO-Höchstspannungserdkabel variiert zwischen 11,5 W/m (NEP; 75 % Auslastung) und 12,8 W/m (NEP+; 79 % Auslastung).

Seit Mai 2022 ist entlang der Kabeltrasse an vier Standorten ein Bodentemperatur- und Bodenfeuchtemonitoring etabliert. Es werden kontinuierliche Messungen mittels Bodensensoren in 30 cm, 60 cm, 90 cm und 120 cm Tiefe durchgeführt. An Böden sind (Pseudogley-) Parabraunerden aus Löss verbreitet; an einem Standort liegt ein Hanggley vor. Zum Vergleich dienen benachbarte Kontrollflächen ohne Erdkabel. Die Böden im Trassenbereich unterscheiden sich von den jeweiligen Kontrollflächen hinsichtlich bodenphysikalischer, -chemischer oder -biologischer Eigenschaften lediglich marginal (Emmerling et al., 2024).

Die betriebsbedingte Erwärmung der Böden (K) betrug im Mittel der vier Standorte und über einen Zeitraum von zwei Jahren lediglich 0,63 (20 cm), 0,99 (60 cm), 1,30 (90 cm) und 1,68 (120 cm Tiefe; siehe auch Abbildung 2.2-1).

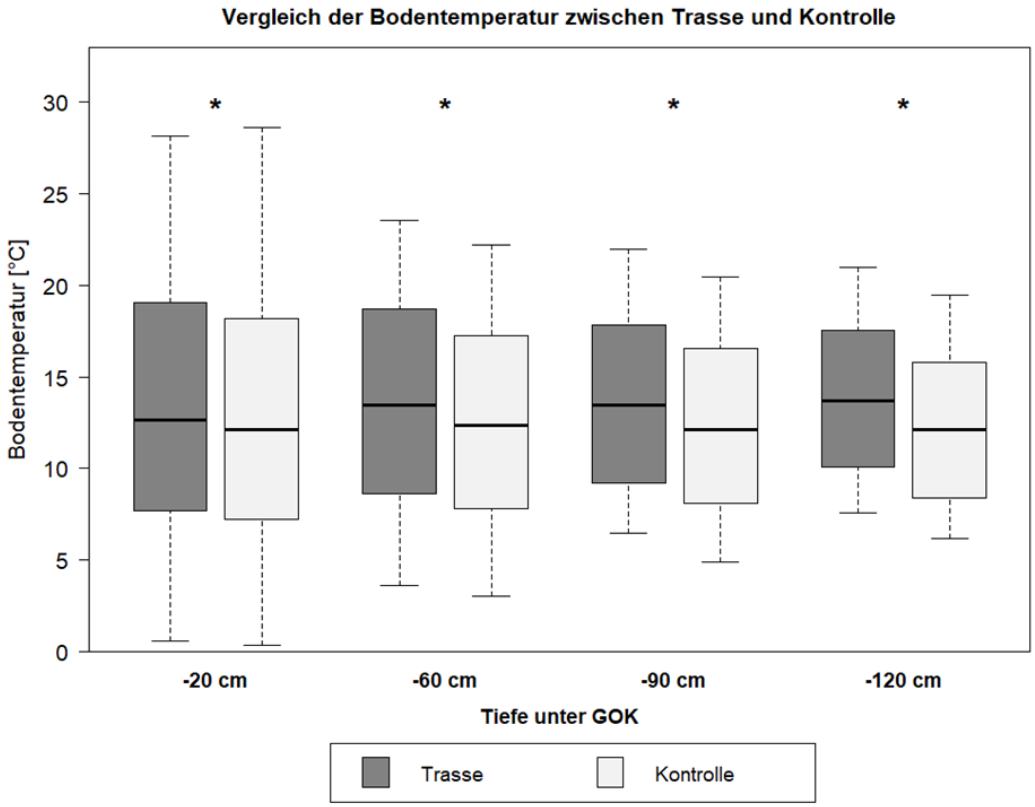

Abbildung 2.2-1: Mittlere Bodentemperaturen in verschiedenen Tiefenstufen im Trassenbereich und den jeweiligen Kontrollflächen des ALEGrO-Monitorings; Mittelwerte aller vier Untersuchungsstandorte (* = signifikanter Unterschied zwischen Trasse und Kontrolle).

Ebenso waren die betriebsbedingten Änderungen der Bodenwassergehalte in den Trassenflächen im Mittel lediglich schwach ausgeprägt (-1,41 Gew.-% in 20 cm; -0,75 Gew.-% in 60 cm und -1,71 Gew.-% in 120 cm Tiefe).

TenneT Ostküstenleitung

Für den Neubau der 380 kV-Höchstspannungsleitung in den Abschnitten Henstedt-Ulzburg und Kisdorferwohld (380 kV-Ostküstenleitung) wurden von Stammen und Dong (2020) sowie Wessolek und Kersebaum (2020) umfangreiche Modellrechnungen und Auswertungen zu den betriebsbedingten Auswirkungen des Erdkabelsystems auf Bodenerwärmung, Bodenwasserhaushalt und Landwirtschaft durchgeführt. Die Simulationen wurden für verschiedene Modellböden, und zwar einen Sandboden, einen Lehmboden sowie Moorböden mit oder ohne Grundwasserströmung, durchgeführt und die Berechnungen der Temperaturabweichungen auf verschiedene Bodentiefen bezogen.

Insgesamt wurden moderate betriebsbedingte Temperaturerhöhungen durch Erdkabel für die Mineralböden berechnet. Auch der grundwasserbeeinflusste Moorboden zeigte ähnlich geringe Erwärmungen im Oberboden. Die gemessenen und modellierten Temperaturabweichungen sämtlicher Böden variierten für den Oberboden in 0–20 cm Tiefe zwischen 0,4 K und 1,6 K, bis zu 20 cm Tiefe zwischen 2,3 K und 3,3 K, bis 50 cm Tiefe zwischen 4,0 K und 7,2 K sowie bis in 100 cm Tiefe zwischen 7,2 K und 13,3 K. Aufgrund der sehr geringen Wärmeleitfähigkeit der Moore zeigten sich bei den Simulationsrechnungen ohne Grundwasserströmung deutlich höhere Temperaturänderungen. Dieser Modellboden ist allerdings in der Landschaft normalerweise nicht verbreitet.

CCM

Im Verlauf der 380-kV Höchstspannungstrasse von Conneforde über Cloppenburg nach Merzen/Neuenkirchen sollen die Teilabschnitte Ankum und Quakenbrück als Erdverkabelung realisiert werden. Die Region um Ankum wird der Bodengroßlandschaft der „Sander und trockenen Niederungssande sowie der sandigen Platten und sandigen Endmoränen im Jungmoränengebiet Norddeutschlands“ zugeordnet. Die Region um Quakenbrück gehört zu der Bodengroßlandschaft der „Niederungen und Urstromtäler des Altmoränengebietes“. Mittels eines numerischen Modells wurden die betriebsbedingten Auswirkungen auf die verbreiteten Böden anhand von drei ausgewählten Leitprofilen simuliert.

Für diese Leitprofile der Projektabschnitte Ankum und Quakenbrück ergab sich im Normallastbetrieb ein sehr geringer Einfluss auf den Bodenwärmehaushalt der Oberböden bis 50 cm Tiefe. Ab einer Tiefe von 70 cm bis ca. 120 cm Tiefe ist mit einer mäßigen Erwärmung der Unterböden zu rechnen. Die Wärmemissionen variierten bei Normallast von 1,0 K im Oberboden (0–10 cm), im Unterboden bis 50 cm Tiefe zwischen 1,5 K und 2,3 K sowie um ca. 5,1 K im Übergangsbereich von der Kabelbettung zum umgebenden Boden in 120 cm Tiefe. Der ergänzend betrachtete einseitige Ausfall eines Kabelstranges über insgesamt sieben Tage mit anschließendem zweitätigen technischen Maximallastbetrieb (Lastfall) erbrachte für sämtliche Leitprofile einen moderaten Temperaturanstieg im Vergleich zu den Normallast-Bedingungen.

A-Nord

Zwischen den Netzverknüpfungspunkten Emden-Ost in Niedersachsen und Osterath in Nordrhein-Westfalen wird derzeit ein neues 380 kV Netzanbindungssystem (BBPIG Vorhaben 1: A-Nord) zur Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung (HGÜ) errichtet. Mit einer Länge von ca. 300 km soll die Trasse als Erdverkabelung realisiert werden. Entlang der Kabeltrasse wurden je Bundesland (NDS, NRW) fünf typische Bodenleitprofile sowie jeweils 1 Sonderprofil (Moorstandorte) und deren charakteristische Bodeneigenschaften abgeleitet. Mit Hilfe numerischer Modelle wurden auf Basis der bodenphysikalischen Eigenschaften dieser Leitprofile für den Abschnitt zwischen den Netzverknüpfungspunkten Wärme-Prognoseberechnungen zur

Abbildung der voraussichtlich zu erwartenden, betriebsbedingten Wärmeemissionen durchgeführt.

Durch den Betrieb der Erdkabel werden sich demnach im Grundlastbetrieb voraussichtlich die Temperaturen in allen drei betrachteten Bodenbereichen signifikant gegenüber dem ungestörten Boden (Boden ohne Kabel, mit Bettungsmaterial) erhöhen, und zwar im Mittel um 0,4 K in 30 cm Tiefe, 0,7 K in 60 cm Tiefe und 1,8 K in Kabelnähe in 140 cm Tiefe (Emmerling et al., 2022). Neben den Normallastbedingungen wurden zudem Berechnungen bei dauerhaft erhöhten Lastfallbedingungen (NEP+) durchgeführt (Schröder u. König, 2022). Hierbei handelt es sich um die Simulation einer dauerhaft um 50 % erhöhten Auslastung. Im NEP+ -Fall würden sich zum Beispiel die Maximaltemperaturen zusätzlich um 1,0 K (30 cm), 1,6 K (60 cm) und 3,5 K (140 cm) erhöhen.

Kriftel – IPH Nord

Zur künftigen Versorgung des Industrieparks Hoechst mit regenerativen Energieträgern ist ein rund 5,6 Kilometer langes 110-kV-Hochspannungs-Erdkabel zwischen der Umspannanlage (UA) Welschgraben (Standort Kriftel) und der UA IPH-West im Industriepark Höchst geplant. Die geplante Erdkabeltrasse liegt innerhalb der Hessischen Untermainebene. Die verbreitetste Bodenhauptgruppe in diesem Raum bilden Böden aus mächtigem Löss mit den wichtigsten Bodentypen Parabraunerde und Pseudogley-Parabraunerde.

Bei einer simulierten Auslastung von 60 % mit einer zugehörigen Verlustleistung von 6,3 W/m je Erdkabel würde der Betrieb der Erdkabel zu relativ geringen Erwärmungen in den Profilen führen. Maximale betriebsbedingte Erwärmungen schwankten zwischen 1,9 K bis 2,2 K in der Krume, 3,2 K bis 3,7 K in 60 cm Tiefe, 4,5 K bis 5,7 K in 90 cm Tiefe sowie 5,9 K bis 7,7 K im Unterboden in 120 cm Tiefe (Marschner et al., 2024).

Tabelle 2.2-1: Übersicht von ausgewählten Erdkabelprojekten sowie Messwerte und Annahmen zu betriebsbedingten Auswirkungen auf den jeweiligen Bodenwärmehaushalt (Abweichungen von der Umgebungstemperatur in Grad Kelvin) in verschiedenen Bodentiefen.

Erdkabel-Projekt	**Anlage**	**Bodentyp, Boden-form/Bettung◊**	**Wärme-verl. (W/m)**	**Erwartete Temperaturabweichung in K (Tiefe in cm)**				**Quelle**
				0-10	**20/30**	**50/60**	**100/120**	
Freiburger Experiment	WHA [1]	Sand/Sand◊	--	< 1	< 1	< 4	< 6	Trüby (2014, 2018)
Kabeltest Osterath	110 kV [2]	Lehmsand/Sand-Mager-beton-ZFSV◊	--	2,5 – 3,2	4,2 – 5,2	k.A.	< 3,0	Trüby (2018)
Monitoring Raesfeld	380 kV [3]	Plaggenesch, re-kult./ZFSV◊	--	< 1,6	k.A.	k.A.	4,0 – 7,0 [4]	Trüby (2020)
Ostküstenleitung (TenneT)	380 kV	Sandiger Boden lehmiger Boden/Sand◊	--	1,2 – 1,6 [5] 1,2 – 1,6	2,3 – 3,0 [5] 2,3 – 2,9	4,0 – 5,1 [5] 4,6 – 5,9	7,2 – 9,2 [5] 8,1 – 10,4	Stammen u. Dong (2020); Wessolek u. Kersebaum (2020)
Fallstudie Berlin [6]	110 kV	Anthropogener Boden	--	k.A.	k.A.	2,0	3,0	Trinks (2020)
CCM [7]	380 kV	Plaggenesche, Gleye, Parabraunerden/ZFSV◊	--	1,0	1,5	2,3	3,8	Emmerling et al. 2021
A-Nord [8]	380 kV	u. a. Marschen, Gleye, Plaggenesche/ZFSV◊	9,0 – 9,8	0,6		1,1	3,2	Emmerling et al., 2022
Südlink (Transnet) [9]	525 kV	(Para)Braunerden, Pelo-sole, Terra fusca/Sand◊	32,0	1,8 – 2,3		--	--	Lehmann et al., 2024
Reinshof (TenneT) [10]	380 kV	Fluvisol aus Löss/Sand◊	13,0 – 23,0	1,8 – 2,2		2,8 – 3,2	3,8 – 5,0	Ahl et al., 2023
Kriftel – IHP West	110 kV	Parabraunerden, Kolluvi-sol, Auengley/ZFSV◊	6,3 – 17,5	1,9 – 2,2	3,2 – 3,7	4,5 – 5,7	5,9 – 7,7	Marschner et al., 2024
ALEGrO	320 kV	Parabraunerden, Hangg-ley/ZFSV◊	11,5 – 12,8	0,61		0,97	1,69	Emmerling et al., 2024

	Spannweite (K) Mittelwert	<1 … 3,2 1,5	<1 … 5,2 2,1	2,0 … 5,9 3,1	3 … 10,4 5,0	

[1]: Warmwasser-Heizanlage 50°C; Worst-case –Szenarium

[2]: Spannweite zwischen techn. Maximallast und Auslegungslast

[3]: reduzierte Auslastung bis max. 40%

[4]: hochgerechnet auf 100% Kabelauslastung; s. a. Trüby (2020)

[5]: Spannweite von Normallast und Höchstlast sowie stationärer und transienter Berechnung

[6]: Fallstudie III; Annahmen: Kabeltrasse in 5 m Tiefe; Kabelumgebungstemperatur = 50°C; Grundwasserströmung = 1m/Tag, Grundwassertemperatur = 10°C (Wessolek et al., 2016)

[7]: Mittlere maximale Erwärmung (K) bei Normlastbetrieb; modelliert

[8]: Wärmeemissionen gelten für NEP+-Szenario

[9]: Differenz zwischen Warmgraben und Kaltgraben.

[10]: Spannweite aus Grundlastbetrieb, Wärmeverlust 13,0 W/m, siehe Ahl et al. (2023), S. 40 sowie Abkühlungsphase nach Heizphase, Wärmeverlust 23,0 W/m, siehe ebenda S.

[11]: ZFSV – zeitweise fließfähiger selbstverdichtender Verfüllbaustoff

2.3 Auswirkungen der Bodenerwärmung durch Erdkabel

Der Betrieb von Höchstspannungserdkabeln kann den Wärme- und Wasserhaushalt sowie den Nährstoffhaushalt von Böden sowie mikrobielle Stoffwechselprozesse und die natürlichen Lebensbedingungen von Bodentieren beeinflussen. Die betriebsbedingten Wärmeemissionen betreffen das gesamte Bodenprofil, jedoch sind die höchsten Effekte in der Peripherie der Kabel und damit im Unterboden zu erwarten.

Im Vergleich zum Oberboden ist die Bodenwärme- und Bodenfeuchtedynamik im kulturfähigen Unterboden gemindert, die Durchwurzelung sowie die Humus- und Nährstoffgehalte sind niedriger und Diversität, Besatzdichte und Aktivität von Bodenorganismen unterscheiden sich deutlich, bzw. sind reduziert. Dementsprechend haben mögliche betriebsbedingte Auswirkungen im Unterboden als weniger kritisch zu bewerten als im Oberboden.

2.3.1 Wie stark erwärmt sich der Boden?

Der Betrieb von erdverlegten Höchstspannungskabeln verursacht eine Erwärmung von Böden, insbesondere im Unterboden und im Bereich der Verlegetiefe der Kabel. Erhöhte Wärmeemissionen in den Unterböden kehren somit das natürliche Temperaturprofil des Bodens um.

Die bisherigen Ergebnisse aus begleitenden Feldversuchen und Modellberechnungen zeigen, dass moderate **Wärmeemissionen von bis zu 3,0 K im Bereich der Hauptwurzelzone** bis 60 cm Tiefe bei Regellast **aus bodenökologischer Sicht als Richtwert anzustreben sind**, da sie sich noch im Bereich der jährlichen natürlichen Temperaturschwankungen in dieser Bodentiefe bewegen. Diese Richtwerte sollten generell bei künftigen Erdkabelprojekten angestrebt werden; schließlich hat die moderate Bodenerwärmung bei den vorangegangenen Projekten wesentlich zur Akzeptanz von Erdkabelprojekten in der Gesellschaft und insbesondere bei Landwirten beigetragen, da hier keine negativen Auswirkungen auf Böden, Erträge und Umwelt zu erwarten sind.

2.3.2 Trocknen die Böden aus?

Für die Beurteilung der ökologischen Auswirkungen von betriebsbedingten Wärmeemissionen durch Erdkabel auf den Wassergehalt von Böden ist es maßgeblich, wie die erhöhte Wärmeemission im Boden abgeleitet werden kann. Hierzu existieren zwei Mechanismen in Böden: Wärmeleitung und Kondensation. Die Wärmeleitung findet praktisch immer statt, die Kondensation ist an das Vorhandensein von Wasser gebunden.

Mit einer erhöhten Bodentemperatur kann die Bodenluft mehr Wasserdampf aufnehmen. Wenn der Wasserdampf anschließend in kühleren Bereichen des Bodens kondensiert, wird

zusätzlich latente Wärme von einer Wärmequelle abgeführt (Bertermann et al., 2020). Im nicht wassergesättigten Boden spielt der Wasserdampftransport eine erhebliche Rolle für die Ableitung von Wärme, insbesondere, wenn große Temperaturunterschiede auftreten, wie zum Beispiel beim Betrieb von HGÜ-Erdkabel.

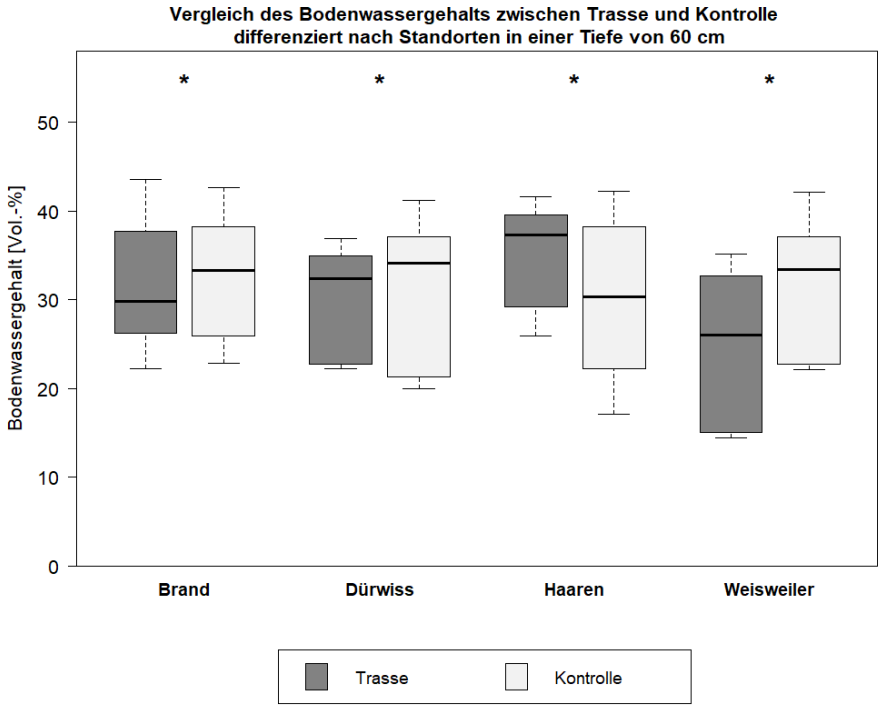

Abbildung 2.3-1: Boxplots der mittleren Bodenwassergehalte (Vol.-%) in der Tiefenstufe 60 cm in Trasse und Kontrolle an den vier ALEGrO-Untersuchungsstandorten (* = signifikant; p<0,001).

Bisher konnten keine Hinweise auf negative betriebsbedingte Auswirkungen von Erdkabeln auf den Wassergehalt von Böden nachgewiesen werden. So zeigten sich zum Beispiel nach drei Jahren Bodenmonitoring der Erdkabelleitung ALEGrO keine Unterschiede in den Bodenwassergehalten zwischen Trassenflächen und benachbarten Kontrollen (Abbildung 2.3-1).

Die Auswirkungen des Erdkabelbetriebs waren in den obersten 60 cm der Böden im Durchschnitt sehr gering (± 1,00 Gew.-%). Dies steht im Einklang mit Ergebnissen früherer Arbeiten (Ahl et al., 2023; Verschaffel-Drefke et al., 2021) und könnte mit der mäßigen Bodenerwärmung innerhalb dieser Bodenschichten zusammenhängen. Im Unterboden in 120 cm Tiefe betrug der Bodenwasserverlust im Mittel 2,45 (max. 2,91) Gew.-%.

Es ist anzunehmen, dass die Erwärmung das Bodenwasser teilweise in Wasserdampf umgewandelt hat, der dann in kühleren Bereichen kondensiert ist. Ein weiterer möglicher Grund für

den gemessenen leichten Rückgang des Bodenwassergehalts könnte eine erhöhte Pflanzenaufnahme sein.

2.3.3 Nimmt die Bodenfruchtbarkeit Schaden?

Die Wärme im Boden beeinflusst direkt und indirekt eine Vielzahl von Prozessen in Böden, wie zum Beispiel den Wasser- und Nährstoffhaushalt, bzw. Lösungs- und Umwandlungsreaktionen, insbesondere Stickstoffumsetzungen, wie Ammonifikation und Nitrifikation, die Evapotranspiration, das Pflanzenwachstum, Wachstum und Aktivität von Bodenmikroorganismen sowie Vorkommen und Aktivität der Bodenfauna.

So hängen zum Beispiel Keimung, Wachstum, Atmung und Nährstoffaufnahme der Pflanzen in besonderem Maße von der Bodentemperatur ab. Die Wärmebedürfnisse der Pflanzen unterscheiden sich dabei stark, was sich insbesondere an den unterschiedlichen Kardinaltemperaturen der Keimung oder an der Winterfestigkeit ablesen lässt.

Erste umfangreiche Untersuchungen zu den betriebsbedingten Auswirkungen von Wärmeemissionen auf das Lösungsverhalten und die Nährstoffverfügbarkeit von Pflanzennährstoffen in Böden hat Trüby (2018) durchgeführt. Dabei zeigte sich, dass durch eine betriebsbedingte Bodenerwärmung vermehrt Nährstoffe, wie Kalium, Magnesium und Calcium freigesetzt wurden. Die Größenordnungen waren allerdings gering.

Ein sowohl aus landwirtschaftlicher als auch aus bodenökologischer Sicht bedeutsamer Nährstoff ist Stickstoff. Der betriebsbedingte Einfluss von Bodenerwärmung auf die Freisetzung von Stickstoff wurde am Beispiel der pflanzenverfügbaren Nmin-Gehalte im ALEGrO-Monitoring untersucht. Es zeichnete sich kein eindeutiges Bild auf den N-Umsatz der Böden ab (siehe Tabelle 2.3-1). Sowohl in den einzelnen Tiefenstufen als auch in den Gesamtwerten lagen die Nmin-Gehalte in der Trasse jeweils teils leicht erhöht als auch leicht erniedrigt im Vergleich zu den jeweiligen Kontrollflächen. Eine Verschlechterung der Nährstoffversorgung der Pflanzen oder eine erhöhte Freisetzung von Stickstoff als Nitrat im Trassenbereich war somit nicht erkennbar (Tabelle 2.3-1).

Tabelle 2.3-1: Nmin-Gehalte (NH_4-N + NO_3-N in kg/ha) in drei Tiefenstufen jeweils im Trassenbereich und Kontrolle der vier Untersuchungsstandorte im ALEGrO-Monitoring in den Monaten Mai und November 2022; aus Emmerling et al., 2023.

Mai 2022	0-30 cm	30-60 cm	60-90 cm	Summe von 0-90 cm
Weisweiler Kabel	1,89	1,96	2,30	6,15
Weisweiler Kontrolle	2,95	1,97	2,20	7,12

Dürwiss Kabel	2,94	1,76	3,86	8,56
Dürwiss Kontrolle	2,88	2,96	3,40	9,24
Haaren Kabel	3,35	2,46	1,11	6,92
Haaren Kontrolle	3,24	3,04	4,95	11,2
Brand Kabel	4,46	5,11	2,13	11,7
Brand Kontrolle	1,44	5,84	3,35	10,6
November 2022	**0-30 cm**	**30-60 cm**	**60-90 cm**	**Summe von 0-90 cm**
Weisweiler Kabel	1,05	2,79	2,13	5,97
Weisweiler Kontrolle	1,54	4,76	2,41	8,72
Dürwiss Kabel	3,32	4,32	2,98	10,6
Dürwiss Kontrolle	3,21	2,79	2,24	8,24
Haaren Kabel	3,20	4,41	2,28	9,90
Haaren Kontrolle	5,13	3,72	2,27	11,1
Brand Kabel	2,15	2,64	2,80	7,60
Brand Kontrolle	2,58	3,11	2,39	8,08

Neben Nahrungs-, Wasser-, Luft- und Nährstoffangebot beeinflussen unterschiedliche Temperaturen die Aktivität von Bodenmikroorganismen, der Bodenfauna sowie das Wurzelwachstum der höheren Pflanzen. In den meisten Böden in Deutschland dominieren mesophile mikrobielle Gemeinschaften, deren Aktivitäten sich bei einer Temperaturerhöhung um 10 °C potenziell verdoppeln (Q_{10}=2). Das Temperaturoptimum liegt dabei zwischen 30–35 °C. Bei Temperaturen knapp darüber setzt allerdings schnell ein Abfall der Aktivitäten ein (Killham, 1994).

Erhöhte Wärmeemissionen in den Unterböden kehren das natürliche Temperaturprofil des Bodens um, was eine Anpassung der Bodenorganismen an diese Anomalie erfordert. Dieses Phänomen ist bereits in anthropogenen Böden beobachtet worden, und zwar in Deckböden über Müll- und Klärschlammdeponien, wo durch den Abbau organischer Verbindungen im Deponiekörper durch Mikroorganismen eine ständige Wärmezufuhr (+ 2–4 °C) in diese Böden stattfinden kann (Blume, 2004). Die Ergebnisse aus dem Monitoringprojekt ALEGrO bestätigen, dass mikrobielle Stoffwechselleistungen im Bereich der Trasse gefördert werden.

Bodentiere sind generell sehr sensibel gegenüber Temperaturveränderungen und speziell gegenüber hohen Temperaturen, weil sie dann zu viel Energie für die Atmung aufwenden müssen. Grab- und wanderungsfähige Tiere suchen deshalb als eine Form der Anpassung natürlicherweise tiefere und kühlere Bodenbereiche auf.

Untersuchungen zum betriebsbedingten Einfluss von Wärmeemissionen durch Erdkabel auf Vertreter der Bodenfauna liegen kaum vor. Bodentiere sind von der Erwärmung des Bodens

unterschiedlich betroffen und zeigen verschiedene Reaktionsmuster. In einer Studie von Briones et al. (1997), in der Böden aus einer kühleren Region in eine wärmere verpflanzt wurden, nahm die Häufigkeit einzelner Enchyträenarten zu, während andere, darunter Dipterenlarven, stark zurückgingen.

Im Rahmen des ALEGrO-Monitorings wurden umfangreiche Untersuchungen zur Regenwurmfauna durchgeführt. Der Vergleich der Regenwurmpopulationen zwischen dem Trassenbereich und der Kontrolle erbrachte zunächst unerwartete Ergebnisse: An drei von vier Standorten wurden höhere Abundanzen, Biomassen und Artenzahlen im Trassenbereich ermittelt (Tabelle 2.3-2). Die mittleren Abundanzen in der Trasse waren mit 380,5 Tieren pro m^2 im Vergleich zu 275 Tieren pro m^2 in der Kontrolle um 38 % deutlich erhöht. Die Frischbiomasse der Regenwürmer war mit 16 % ebenfalls deutlich höher als in den Kontrollböden.

Tabelle 2.3-2: Ergebnisse der Regenwurmpopulationen von Trassen- und Kontrollböden an den vier Untersuchungsstandorten (Abundanzen, Frischbiomassen und Artenzahlen); aus Emmerling et al., 2024.

	Abundanz/m²	**Biomasse/m²**	**Diversität**
Fläche 1 Kabel	**230**	**81,10**	**4**
Fläche 1 Kontrolle	134	49,38	3
Fläche 2 Kabel	**122**	**46,14**	**3**
Fläche 2 Kontrolle	196	79,60	5
Fläche 3 Kabel	**190**	**67,50**	**3**
Fläche 3 Kontrolle	162	49,06	3
Fläche 4 Kabel	**980**	**254,78**	**6**
Fläche 4 Kontrolle	608	208,92	4

Die stärkere Förderung der Abundanzen ist auf eine deutlich höhere Zahl an Jungtieren im Trassenbereich zurückzuführen. Es ist anzunehmen, dass durch die moderate Bodenerwärmung die Schlupfabundanz der Tiere gefördert wurde.

2.3.4 Gibt es negative Auswirkungen auf die Landwirtschaft?

Auf Basis der projizierten betriebsbedingten Wärmeemissionen (s.a. Tabelle 2.2-1) sind nach bisherigen Erfahrungen aus den eigenen Monitoringprojekten und den Ergebnissen der Testfelder- und Modellierungen keine negativen Auswirkungen auf die landwirtschaftliche Nutzung

und Bewirtschaftung zu erwarten. Bisherige Feldversuche zeigten, dass aufgrund der Erwärmung der Böden keine Ertragseinbußen, sondern eher Ertragssteigerungen eintreten werden und dass die jährlichen Ertragsschwankungen infolge des Kabelbetriebs geringer sind als die wechselwirkungsbedingten Ertragsschwankungen in aufeinanderfolgenden trockenen und feuchten Jahren (u.a. Trüby, 2018). Eine häufig gemachte Beobachtung, dass es im Trassenbereich zu einer verfrühten Keimung und zu einer Verlängerung der Wachstumsperiode kommen kann, ist in der Regel nicht verallgemeinerbar und nicht ertragswirksam. In einzelnen Jahren und bei vereinzelten Kulturen können die Ertragsschwankungen im Trassenbereich erhöht sein (Feldwisch et al., 2023). In der Konsequenz sind Befürchtungen, die von den Erdkabeln ausgehende Bodenerwärmung könnte zu substanziellen Ertragseinbußen oder gar zu einem Totalausfall landwirtschaftlicher Kulturen führen, nicht haltbar und experimentell widerlegt. Ferner ist eine verstärkte Aufwendung bei Schädlingsprophylaxe und -bekämpfung, selbst in ungünstigen Jahren, nicht zu erwarten.

2.4 Schlussfolgerungen

Die betriebsbedingten thermischen Effekte von HGÜ-Erdkabeln auf Böden sind abhängig von:

- Natürlicher Wärmehaushalt des Bodens, gesteuert durch den Strahlungshaushalt der Atmosphäre
- Bodentyp
- Bodentextur
- Gehalt an organischer Bodensubstanz
- Lagerungsdichte des Bodens
- abgeleitete Parameter, u. a. Wärmeleitfähigkeit, Wärmekapazität
- Nutzung bzw. Bodenbedeckung
- Grundwassernähe und Grundwasserstrom, Stauwasser
- Bewässerung
- Grabengeometrie, v. a. Verlegetiefe, Kabelabstand, Bettungsmaterial
- Auslastung der Erdkabel

Bisherige Messungen und Modellierungen zeigten lediglich niedrige bis moderate Temperaturänderungen durch die Verlegung von Erdkabelsystemen in den durchwurzelten Oberböden der betrachteten Standorte und dies zum Teil unter Annahme von Worst-Case-Szenarien.

Im Regelbetrieb wird die Auslastung nicht konstant und vielmehr großen Schwankungen unterworfen sein. Hiervon wird unter Realbedingungen die Wärmeemission abhängen. Es kann angenommen werden, dass die Temperaturen an der Kontaktstelle der Kabelummantelung

zum umgebenden Bettungsmaterial (ZFSV nach Amprion-Spezifikation) und weiter vom Bettungsmaterial in den umgebenden Boden bei Normallast kontinuierlich zurückgehen (vgl. auch Trüby, 2020).

Niedrige bis moderate betriebsbedingte Wärmeemissionen und entsprechende Temperaturerhöhungen in Böden können seit 2022 im Rahmen des ALEGrO-Monitoring-Projektes verifiziert werden (Emmerling et al., 2023, 2024). Hierbei handelt es sich um das bislang einzige Monitoringprojekt zu betriebsbedingten Auswirkungen von HGÜ-Erdkabeln unter realen Praxisbedingungen. Bei weiteren Freilandexperimenten, wie im Rahmen des CHARGE-Projektes oder den Versuchen am Versuchsgut Reinsfeld, wurden bisher betriebsbedingte Bodenerwärmungen dokumentiert, die leicht über den Ergebnissen aus dem ALEGrO-Monitoring liegen, aber dennoch insgesamt als moderate Temperaturerhöhungen in den dort verbreiteten Böden zu bewerten sind. **Maximale Wärmeemissionen von bis zu 3 K in 60 cm Tiefe (Hauptwurzelzone) sind anzustreben.** Negative Auswirkungen der betriebsbedingten Bodenerwärmung durch Erdkabel sind nicht zu erwarten.

Unter bestimmten ungünstigen Standortskonstellationen, wie bei Böden, die schlechte thermische Eigenschaften aufweisen sowie in Trinkwassereinzugsgebieten oder bei humusreichen Böden, kann es zu erhöhten betriebsbedingten Wärmeemissionen kommen. Hier bedarf es einer Einzelfallprüfung und ggf. einer Dynamisierung des Grabenprofils, wie zum Beispiel eines erweiterten Achsabstandes der Erdkabel.

3. Geltungsbereich und Untersuchungsraum

3.1 Untersuchungsraum

Der Untersuchungsraum deckt im Sinne einer kleinmaßstäbigen Betrachtung das Netzausbaugebiet der Amprion GmbH in den Bundesländern Schleswig-Holstein, Niedersachsen, Nordrhein-Westfalen und Hessen ab. Die aktuell in der Planungsphase anzusiedelnden Projekte erstrecken sich unter Berücksichtigung der potenziellen Korridore vollständig durch die o. g. Bundesländer. Es handelt sich um die derzeit flächenmäßig größten Ausbauprojekte der Amprion GmbH in der Planungsphase. Somit bilden die Korridore der vorgenannten Projekträume die primäre, flächenhafte Basis zur Definition des Untersuchungsraums. Anhand dieser großräumigen Betrachtung können zudem zahlreiche Rückschlüsse auf weitere angrenzende Projekträume in vergleichbaren Raum- bzw. Bodeneinheiten gezogen werden.

Die Maßstäblichkeit, mit dem Prinzip der Leitprofile für grob gegliederte Substrateinheiten, zielt dementsprechend darauf ab, möglichst flächen-repräsentative Fälle zu betrachten. Maßgebliche Bodeneigenschaften werden anhand der in Kapitel 4 beschriebenen Grundprinzipien und Datengrundlagen für jeweils charakteristische Leitprofile abgeleitet. Direkte Rückschlüsse auf einzelne Flächen oder eine uneingeschränkte Vergleichbarkeit mit kleinräumigen Einzelfällen sind nicht angedacht.

3.2 Einordnung des Untersuchungsraums in die geologischen und bodenkundlichen Großeinheiten

Die gemäß den Ausführungen in Kapitel 3.1 primär zugrunde liegenden Korridornetze erstrecken sich von Norden nach Süden durch das norddeutsche Tiefland bis zur Mittelgebirgsschwelle. Die südlichen Ausläufer des Rhein-Main-Links greifen zudem gebietsweise bis in das oberrheinische Tiefland hinein.

Aus geologischer Sicht verläuft ein Großteil der beiden Korridornetze durch die quartären Sedimente der mitteleuropäischen Senke, die aus dem Mesozoikum entwickelten Substrate der süddeutschen Großscholle sowie auf den im Grundgebirge zumeist flachgründig ausgeprägten Lockergesteinsschichten bzw. Festgesteinsübergängen im Bereich des rheinischen Schiefergebirges. Der südlichste Abschnitt des Korridornetzes verläuft zudem partiell durch die im Trassenbereich überwiegend quartären und tertiären Sedimente des Oberrheingrabens.

Anhand der Abbildung 3.2-1 und Abbildung 3.2-2 sowie mit Hilfe der Tabelle 3.2-1 kann die Lage der zentralen Korridornetze mit Darstellung der Bodengroßlandschaften entnommen werden. Daraus lassen sich Rückschlüsse auf die großräumige Einordnung hinsichtlich der für die Bodenbildung relevanten Substrate und geologischen Ausgangsbedingungen ziehen. Es

ist darauf hinzuweisen, dass die bloße flächenhafte Betroffenheit von Bodengroßlandschaften in keinem direkt-linearen Zusammenhang mit der Anzahl der jeweils ausgewählten Leitprofile steht, sondern insbesondere die Repräsentativität in Bezug auf maßgebende und sich teils innerhalb der Bodenlandschaften wiederholende Substrateigenschaften im Vordergrund steht. Weitere Details zur großmaßstäbigeren Abschichtung, bis hin zur Beschreibung charakteristischer Leitprofile, können den Kapiteln 4.1 und 4.2 entnommen werden.

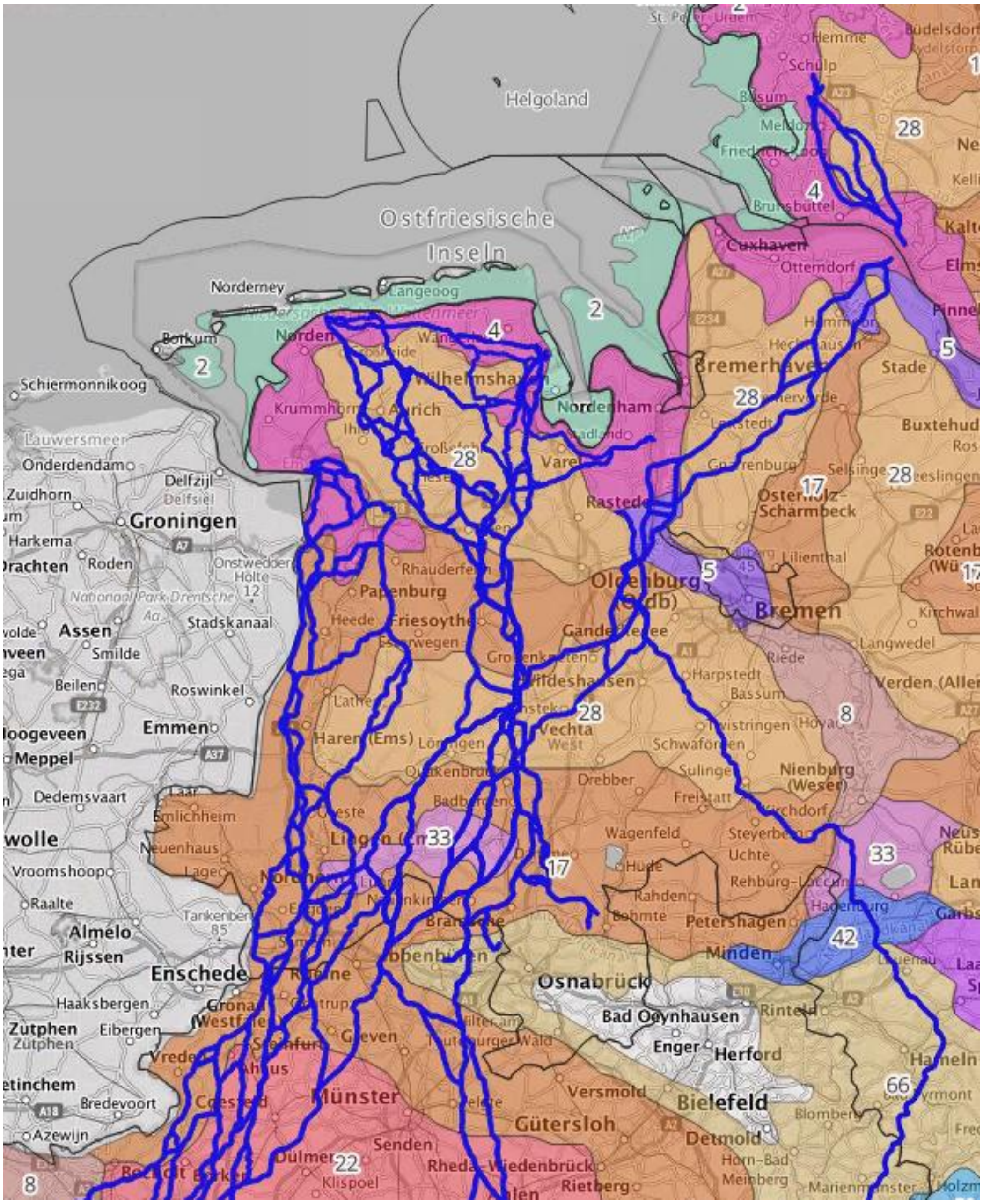

Abbildung 3.2-1: Bodengroßlandschaften im Bereich der betrachteten Korridornetze (Teil 1 - nördlicher Abschnitt).

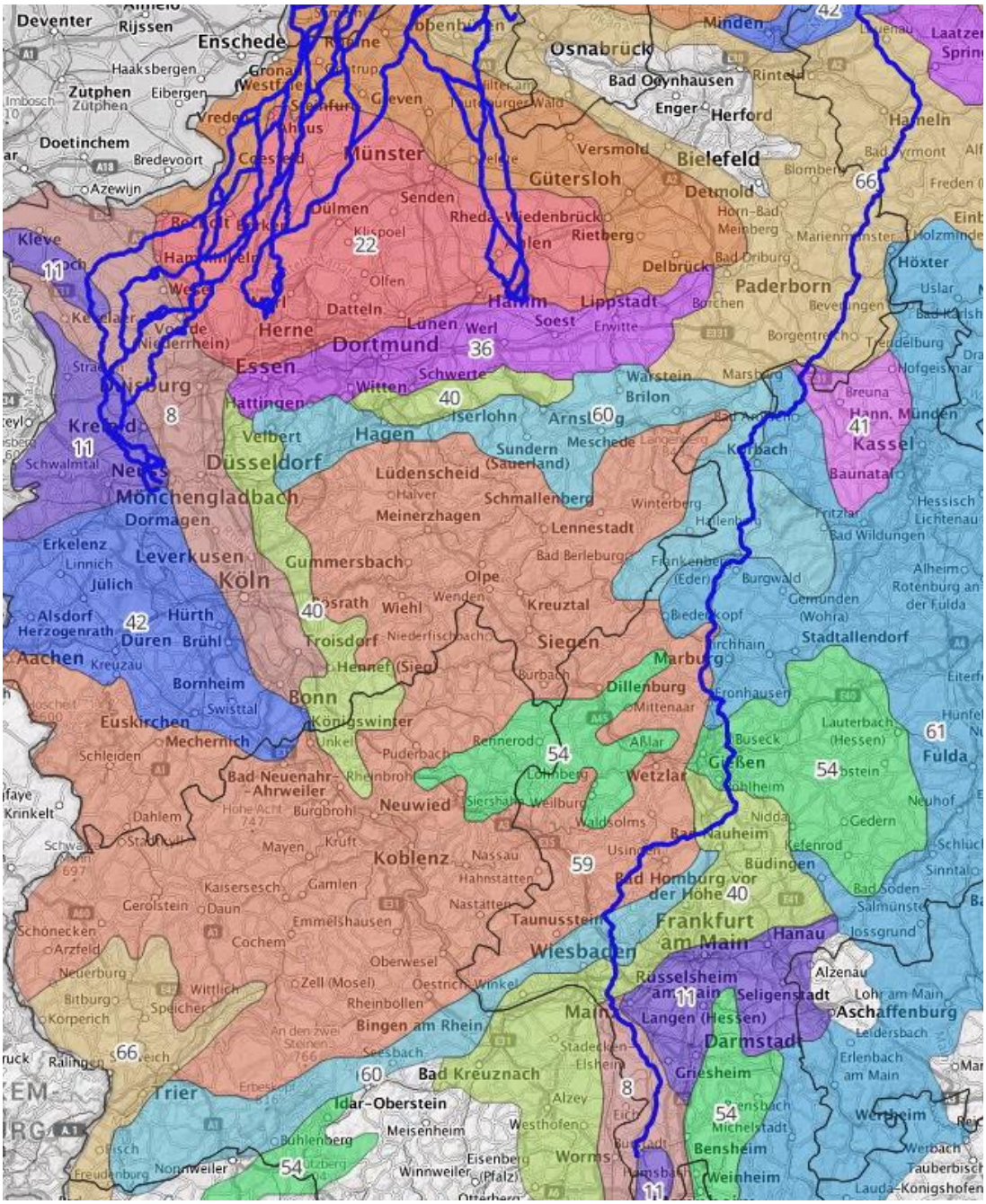

Abbildung 3.2-2: Bodengroßlandschaften im Bereich der betrachteten Korridornetze (Teil 2 - südlicher Abschnitt).

Tabelle 3.2-1: Erläuterungen zur Bezeichnung der Bodengroßlandschaften (BGL).

BGL.-Nr.:	**BGL.-Text**
2	BGL des Watts der Nordseeküste
4	BGL der Marschen und Moore im Tideeinflussbereich
5	BGL der Ästuargebiete
8	BGL der Auen und Niederterrassen
11	BGL der Hochflutlehm-, Terrassensand- und Flussschottergebiete
17	BGL der Niederungen und Urstromtäler des Altmoränengebietes
22	BGL der (geringmächtigen) Grundmoränen über Festgestein und/oder Kreide und/oder Tertiärsedimenten
28	BGL der Grundmoränenplatten und Endmoränen im Altmoränengebiet Norddeutschlands und im Rheinland
33	BGL der Sander und trockenen Niederungssande sowie der sandigen Platten und sandigen Endmoränen im Altmoränengebiet Norddeutschlands
36	BGL der Lössbörden
40	BGL der Lösslandschaften des Berglandes (Becken, Talweitungen, Senken, Berglandhänge und Lösshügelländer)
41	BGL mit hohem Anteil an Sand- und Mergelgesteinen, stellenweise im Wechsel mit Lösslehm
42	BGL des Bördenvorlandes mit geringmächtiger Lössbedeckung
54	BGL der basischen bis intermediären Vulkaniten, z. T. wechselnd mit Lösslehm
59	BGL der Ton- und Schluffschiefer mit wechselnden Anteilen an Grauwacke, Kalkstein, Sandstein und Quarzit; z.T. wechselnd mit Lösslehm
60	BGL mit hohen Anteilen an Quarzit, Grauwacke, Sandsteine und Konglomerat sowie Ton- und Schluffschiefern
61	BGL mit hohem Anteil an Sand-, Schluff- und Tongesteinen, häufig im Wechsel mit Löss
66	BGL mit hohem Anteil an carbonatischen Gesteinen

3.3 Kabelverlegung und allgemeine Vorhabenbeschreibung

Im Zuge der Verwirklichung der gesetzlich verankerten Energiewende kommt es durch den massiven Zubau erneuerbarer Energien in Norddeutschland zu Leitungsengpässen für den Stromtransport in Richtung Süddeutschland. Um ihren gesetzlichen Verpflichtungen zur Erfüllung einer sicheren Energieversorgung nachzukommen, besteht seitens der Übertragungsnetzbetreiber die Notwendigkeit, überlastete Übertragungsnetze in ihren jeweiligen Regelzonen zu optimieren, zu verstärken oder auszubauen (vgl. § 11 Abs. 1 Energiewirtschaftsgesetz – EnWG). Da die bestehende Netzinfrastruktur der Region weitgehend verstärkt ist, erfolgt gemäß NOVA-Prüfung im Netzentwicklungsplan (NEP) 2037/2045 (2025) (Übertragungsnetzbetreiber 2026) die Umsetzung der erforderlichen Höchstspannungs-Gleichstrom-Übertragungsverbindungen (HGÜ-Verbindungen).

Wie bereits in Kapitel 1 beschrieben, sind die Leitungen zur Höchstspannungs-Gleichstrom-Übertragung gemäß § 3, Abs. 1 BBPlG vorzugsweise als Erdkabel zu errichten und zu betreiben. Dieser Grundsatz wurde auch in weitere, für die Genehmigungsverfahren oftmals einschlägige Normen (v. a. das Netzausbaubeschleunigungsgesetz Übertragungsnetz – NABEG, sowie das Gesetz zum Ausbau von Energieleitungen – EnLAG) übertragen.

Die Errichtung der Leitungssysteme in der Erdkabelbauweise erfolgt überwiegend in der offenen Bauweise. Dabei werden trapezförmige Gräben ausgehoben und an der Grabensohle Leerrohrsysteme verlegt. Anschließend erfolgt eine Rückverfüllung des Grabens, wobei im Bereich der untersten Dezimeter zumeist eine qualifizierte Bettungszone (z. B. mit Hilfe von zeitweise fließfähigen selbstverdichtenden Verfüllbaustoffen – ZFSV) hergestellt wird. Die Rückverfüllung des restlichen Grabens erfolgt mit den zuvor ausgehobenen Böden unter Berücksichtigung der natürlichen Substratschichtung sowie der natürlichen Lagerungsdichte. Erst im Anschluss an die Verlegung des Leerrohrsystems erfolgt der Einzug der Medienleitungen im Bereich der Muffenstandorte.

In der vorliegenden Studie werden zwei verschiedene Kabeltypen (Typ 1 und Typ 2) betrachtet, welche als übergeordnet repräsentativ für typische HGÜ-Vorhaben im Netzgebiet der Amprion GmbH gelten. In Bezug auf den Kabeltyp 1 kann festgehalten werden, dass hiermit konkret das Regelgrabenprofil in Bezug auf das Vorhaben Rhein-Main-Link beschrieben wird. Details zu den Kabelsystem bzw. den in der offenen Bauweise üblicherweise zur Anwendung kommenden Regelgrabenprofile können den nachfolgenden Abbildungen (Abbildung 3.3-1 und Abbildung 3.3-2) entnommen werden.

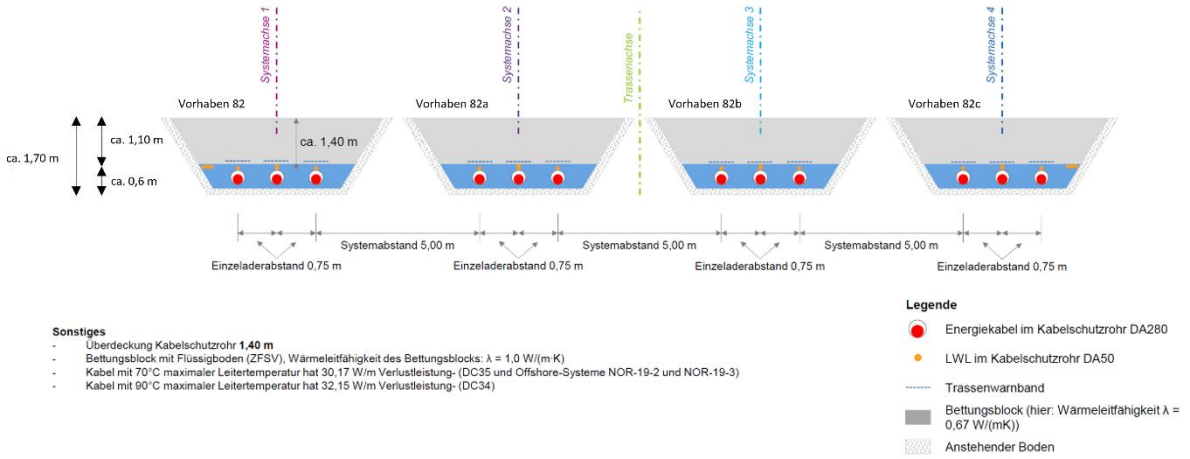

Abbildung 3.3-1: Regelgrabenprofil Kabeltyp 1.

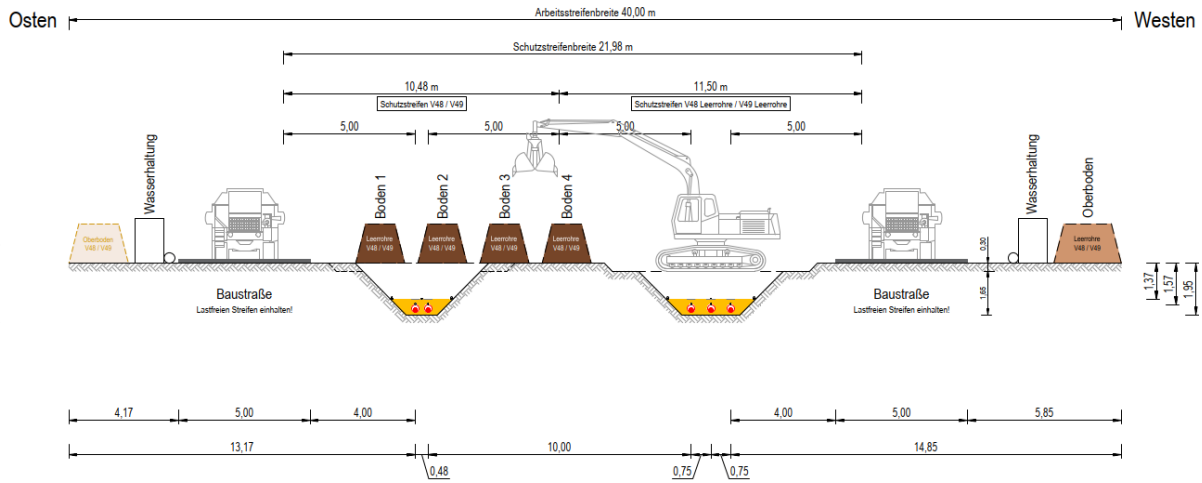

Abbildung 3.3-2: Regelgrabenprofil Kabeltyp 2.

4. Verbreitete Bodentypen, Ausgangssubstrat und Ableitung von Bodeneigenschaften im Profilaufbau

4.1 Grundprinzip der Leitprofile

Um eine Basis zur möglichst repräsentativen Abschätzung der Auswirkungen der Erdkabelsysteme auf den Bodenwärmehaushalt im Netzgebiet der Amprion GmbH zu erhalten, wurden für die relevanten Trassenkorridore bodenkundliche Leitprofile abgeleitet. Diese sollen die im Bereich der Netzkorridore vorkommenden Böden inkl. derer Eigenschaften charakterisieren.

Der grundlegenden Auswahl von Leitprofilen liegt eine räumlich-statistische Auswertung zugrunde, wobei die Kriterien im Auswahlprozess von kleinmaßstäbigen Grundeinheiten (bundesweite Karten: Bodengroßlandschaften, Bodenlandschaften, Leitbodengesellschaften) bis hin zu mittelmaßstäbigen Bodenkarten iterativ angepasst und verfeinert wurden.

Das Netzgebiet der Amprion GmbH erstreckt sich im Hinblick auf die geplanten Trassenkorridore v. a. auf die Bundesländer Schleswig-Holstein, Niedersachsen, Nordrhein-Westfalen sowie Hessen. Die bundeslandspezifischen Bodenkarten und zugehörigen Geodaten (z. B. Profildatenbanken) dienen als letzte Stufe der raumstatistischen Auswertung zur Identifikation typischer Bodenprofile. Im Vordergrund stehen dabei die substratspezifische Varietät und die damit korrespondierenden Eigenschaften im Hinblick auf Bodenprozesse, welche mit den thermischen Effekten korrelieren.

Diese Auswertungen stellen eine grundlegende Vorarbeit für die Bodenwärmemodellierung dar. Es gilt zu beachten, dass die Leitprofile nicht den Bodentypen gleichzusetzen sind. Die Beschreibung von Bodentypen erfolgt nachrichtlich zur Illustration typischer Böden inkl. pedogenetisch prägender Prozesse innerhalb dieser Bodenlandschaften.

Die Methodik zur Ableitung der Leitprofile und Bodeneigenschaften, unter Zuhilfenahme der verfügbaren Datengrundlagen, wird im nachfolgenden Kapitel beschrieben. Bei den zu diesem Zweck verwendeten Grundlagendaten handelt es sich insbesondere um folgende Dokumente bzw. Daten:

- Geodaten des geologischen Dienstes NRW, des Landesamtes für Bergbau, Energie und Geologie (LBEG Niedersachsen), des Landesamtes für Umwelt des Landes Schleswig-Holstein (LfU SH) sowie der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe
    - Karte der Bodenregionen und Bodengroßlandschaften sowie der Bodenlandschaften 1:5.000.000 (BGL5000 sowie BÜK5000 BGR)
    - Bodenübersichtskarte 1:200.000 (BÜK200, BGR)
    - Bodenlandschaften und Leitbodengesellschaften sowie Erläuterungstexte von NRW 1:200.000 (LBG200, GD NRW)

  - Bodenkarten 1:50.000 sowie Profildatenbanken (BK50, LBEG und GD NRW)
  - Bodenkarte 1:25.000 sowie Profildatenbank (BK25, LfU SH)
- Digitale Rauminformationen zum Trassenkorridornetz der Amprion GmbH
- Fachliteratur zur Ableitung charakteristischer Bodenkennwerte und zur Parametrisierung (z. B. AD-HOC-AG Boden (2005), Renger et al. (2009), Markert et al. (2017), Van Genuchten (1980), Cote und Konrad (2005), etc.)

4.2 Auswahl und Parametrisierung der Leitprofile

4.2.1 Methodik und Ergebnisübersicht zur Profilauswahl

Das Ziel der Ableitung von Leitprofilen ist es, die Bodeneigenschaften in den jeweiligen von der Erdkabelverlegung betroffenen Bodenlandschaften möglichst zutreffend und dennoch allgemein zu repräsentieren. Besonders entscheidend für die jeweiligen Abschnitte und die Bodeneigenschaften sind die Ausgangssubstrate der Böden sowie deren Genese. Aus diesem Grund wurden zunächst die im Bereich des Trassenkorridors großflächig vorkommenden Bodengroßlandschaften in den Bundesländern Schleswig-Holstein, Niedersachsen und Nordrhein-Westfalen ermittelt. Dabei handelt es sich v. a. um die Bodengroßlandschaften der

- Marschen und Moore im Tideeinflussbereich,
- Grundmoränenplatten und Endmoränen im Altmoränengebiet Norddeutschlands und im Rheinland,
- Auen und Niederterrassen,
- Hochflutlehm-, Terrassensand- und Flussschottergebiete,
- Ton- und Schluffschiefer mit wechselnden Anteilen an Grauwacke, Kalkstein, Sandstein und Quarzit.

Die Ergänzung der Leitprofile für Hessen erfolgte zeitlich nachgelagert, da es sich hier um einen spezifischen Trassenkorridor handelt, welcher sich räumlich von den weiteren Korridoren abgrenzt. Insbesondere in Süd-Hessen kommen substratgenetisch abweichende Einheiten vor, welche in einem letzten Schritt zielgerichtet ausgewertet wurden, um die Böden in diesem Trassenabschnitt charakteristisch zu erfassen und zudem substratspezifische „Lücken“ innerhalb der nördlichen Profile – bei vergleichsweise homogenen, geologischen Verhältnissen – zu schließen. Dadurch kann die Flächenrepräsentativität im Sinne eines orientierenden „Bodenkatasters“ für das Netzgebiet der Amprion GmbH verbessert werden.

Unter Berücksichtigung der genannten Kartenwerke und Datenbanken erfolgte eine räumlich-statistische Auswertung in Bezug auf die betroffenen Bodenlandschaften sowie die dafür repräsentativen Leitbodengesellschaften. Neben dem räumlichen Bezug, d. h. der flächenmäßigen Verbreitung der jeweiligen Bodentypen, wurden bei der Ableitung der als repräsentativ für die Auswirkungen herangezogenen Bodenprofile auch potenzielle, hohe Empfindlichkeiten

bzw. Aspekte der Schutzwürdigkeit der Böden berücksichtigt. Dies spiegelt sich z. B. in der Berücksichtigung von Wattböden (hier: Norm(schlick)watt) und Plaggeneschen wider, welche mit in die Betrachtung eingeflossen sind, obwohl es sich nicht um flächenmäßig dominierende Bodentypen handelt.

Ebenso ist zu beachten, dass sich anhand der Verteilung von Leitprofilen auf methodische Grundlagen jeweiliger Bundeslandabschnitte keine direkten Rückschlüsse auf deren flächenhafte Repräsentativität im Gesamtkontext schließen lassen. Zwar wurde die Homogenität bestimmter Bodengroßlandschaften sowie die Empfindlichkeit einzelner Gebiete bei der Gewichtung in Bezug auf die Gesamtanzahl der Profile berücksichtigt, jedoch sind oftmals länderübergreifende Synergien vorhanden. Insbesondere im Übergangsbereich von verwaltungstechnischen Grenzen treten gleichartige Bodenverhältnisse auch länderübergreifend auf. So sind beispielsweise Rückschlüsse aus der Betrachtung des Küstenholozäns auf Basis von Leitprofilen, welche räumlich-methodisch Schleswig-Holstein zugeordnet werden, auf das niedersächsische Küstenholozän möglich. Weiterhin wurden vorliegenden Erkenntnissen in Bezug auf einzelne Vorhaben Beachtung geschenkt, d. h. die bereits vorhandene Informationsdichte für bestimmte Gebiete (z. B. vorliegende, umfangreiche Modellierung für den Trassenkorridor A-Nord in Niedersachsen und Nordrhein-Westfalen) wurde im gesamtheitlichen Zusammenhang berücksichtigt.

Die Tabelle 4.2-1 gibt einen Überblick über die Leitprofile unter Berücksichtigung der allgemein-substratspezifischen Einheiten sowie der Überlagerung mit dem Trassenkorridornetz der Amprion GmbH. Die Darstellung der Bodentypen erfolgt nachrichtlich. Primär relevant sind die jeweils typischen Substrateigenschaften. Durch die räumlich-statistische Auswertung der häufigsten Leitbodentypen konnte eine Verknüpfung zu den jeweiligen Profildatenbanken erfolgen (Ermittlung von charakteristischen Eigenschaften und Basisparametern wie z. B. Horizontierung, Bodenart etc.) und zugleich ein Rückschluss auf dominierende, pedogenetische Prozesse getroffen werden.

Ergänzender Hinweis zur Benennung und Systematik der Leitprofile:

Im 3. Quartal 2024 ist die 6. Auflage der bodenkundliche Kartieranleitung (KA 6) erschienen. Im Vergleich zur KA 5 ergeben sich u. a. auch Änderungen bei der Systematik von Böden sowie bei der Benennung und Beschreibung von horizontbezogenen Daten. Die Auswahl der Leitprofile erfolgte auf Basis der o. g. Flächendaten, welche in Bezug auf die Attribuierung und Systematik i. d. R. auf der 5. Auflage der bodenkundlichen Kartieranleitung (KA 5) gründen. Dies ist lediglich von nachrichtlicher Relevanz und berührt nicht die Ableitung der für die Modellierung relevanten Kennwerte. Die Methodik zur Ableitung bzw. Berechnung wird jeweils parameterspezifisch beschrieben.

Tabelle 4.2-1: Übersicht der ausgewählten Leitprofile

Profil	Bodengroßlandschaft (BGL)	Bodenlandschaft bzw. Hauptgruppe	Leitbodengesellschaft bzw. Bodeneinheit + Untergruppe
LP_01	BGL der Marschen und Moore im Tideeinflussbereich der Nordsee	Marschböden	Verbreitet Kleimarschen und Dwogmarschen aus Schluff bis Ton, selten Knickmarschen aus Ton
LP_02	BGL der Grundmoränenplatten und Endmoränen im Altmoränengebiet Norddeutschlands und im Rheinland	Hoch- und Niedermoorböden	Vorherrschend bis fast ausschließlich Niedermoore und flache Organomarschen über Niedermoor aus flachem, humosem Ton über Niedermoortorf
LP_03	BGL der Grundmoränenplatten und Endmoränen im Altmoränengebiet Norddeutschlands und im Rheinland	Hoch- und Niedermoorböden	Vorherrschend bis fast ausschließlich Niedermoore und flache Organomarschen über Niedermoor aus flachem, humosem Ton über Niedermoortorf
LP_04	BGL der Grundmoränenplatten und Endmoränen im Altmoränengebiet Norddeutschlands und im Rheinland	Trockene Sandböden	Vorherrschend Braunerden bis Podsol-Braunerden aus Geschiebedecksand über Geschiebesand und gering verbreitet Pseudogley-Braunerden aus Geschiebedecksand über tiefem Geschiebelehm
LP_05	BGL des Watts der Nordseeküste	Böden des tidalmarinen Milieus	Vorherrschend Sand- und Mischwatt
LP_06	BGL der Grundmoränenplatten und Endmoränen im Altmoränengebiet Norddeutschlands und im Rheinland	Trockene Sandböden	Vorherrschend Braunerde-Podsole bis Podsole aus Schmelzwassersand sowie aus Geschiebedecksand bis Flugsand über Schmelzwassersand, gering verbreitet Podsol-Braunerden aus Geschiebedecksand über Schmelzwassersand
LP_07	BGL der Grundmoränenplatten und Endmoränen im Altmoränengebiet	Böden aus Geschiebelehm und Geschiebemergel	Vorherrschend Pseudogley-Podsole aus Geschiebedecksand oder Flugsand über tiefem Geschiebelehm,

Profil	Bodengroßlandschaft (BGL)	Bodenlandschaft bzw. Hauptgruppe	Leitbodengesellschaft bzw. Bodeneinheit + Untergruppe
	Norddeutschlands und im Rheinland	mit sandiger Deckschicht	gering verbreitet Podsole aus Flugsand über sehr tiefem Geschiebelehm
LP_08	BGL der Auen und Niederterrassen	Böden der Flussterrassen und Hochflutsedimente	Vorherrschend Parabraunerden und Braunerden, gering verbreitet Gley-Parabraunerden und Gley-Braunerden aus Hochflutlehm, gering verbreitet über Terrassensand oder über tiefem Terrassensand
LP_09	BGL der Hochflutlehm-, Terrassensand- und Flussschottergebiete	Braune Lössböden, einschließlich Sandlöss und lössähnliche Sedimente	Überwiegend Parabraunerden und verbreitet Pseudogley-Parabraunerden aus Löss über tiefem Terrassensand, selten aus Löss über Terrassensand
LP_10	Niederungen und Urstromtäler des Altmoränengebietes	Sandböden der Niederrheinischen Sandplatten	Pseudogleye aus Geschiebedecksand über lehmiger Grundmoräne über sehr tiefem, tertiärem Lehm sowie Plaggenesche über Flugsand
LP_11	BGL der Ton- und Schluffschiefer mit wechselnden Anteilen an Grauwacke, Kalkstein, Sandstein und Quarzit; z. T. wechselnd mit Lösslehm	Böden aus solifluidalen Sedimenten	Böden aus lösslehmhaltigen Solifluktionsdecken mit basenarmen Gesteinsanteilen
LP_12	BGL der Auen und Niederterrassen	Böden aus fluviatilen Sedimenten	Böden aus tonigen Hochflutsedimenten
LP_13	BGL der Ton- und Schluffschiefer mit wechselnden Anteilen an Grauwacke, Kalkstein, Sandstein und Quarzit; z. T. wechselnd mit Lösslehm	Böden aus solifluidalen Sedimenten	Böden aus lösslehmreichen Solifluktionsdecken mit basenarmen Gesteinsanteilen

Tabelle 4.2-2: Begutachtete Böden und die korrespondierenden repräsentativen Bodentypen und Bodenarten gemäß Bodenkundlicher Kartieranleitung KA5.

Repräsentative Bodenart gemäß KA5	**Repräsentative Bodentypen (Auszug)**
Toniger Lehm bis sandig-toniger Lehm (Tongehalt 25 bis 45 %)	Normkleimarsch (MNn) Normorganomarsch (MOn)
Anmoorige Substrate und Torfe (Humusgehalt ≥ 15 %; ≥ 30 %)	Normhochmoor (HHn) Nordmniedermoor (HNn)
Lehmiger bis toniger Sand (Tongehalt 12 bis 17 %)	Normbraunerde (BBn) Normparabraunerde (LLn) Normpseudogley (SSn)
Sandiger Lehm bis toniger Schluff (Tongehalt 17 bis 25 %)	Normparabraunerde (LLn) Normgley (GGn) Normvega (ABn) Gley-Vega (GG-AB) Normtschernosem (TTn)
Sandiger bis toniger Lehm (Tongehalt 17 bis 35 %)	Nornpararendzina (RZn) Normbraunerde (BBn) Normparabraunerde (LLn) Normpseudogley (SSn)
Sandiger Sand (Tongehalt < 5 %)	Normbraunerde (BBn) Normpodsol (PPn) Normrendzina (RZn)

4.2.2 Allgemeine Hinweise und Methodik zur Parametrisierung

Anhand von Informationen aus Profildatenbanken und Steckbriefen für die jeweils beschriebenen Leitprofile der Bodenlandschaften wurden grundlegende Profilinformationen, wie typische Horizontabfolgen, Bodenarten, Humusgehalte und Lagerungsdichten, mit räumlichem Bezug zur geplanten Trassenführung abgeleitet. Zahlreiche Tabellen und Pedotransferfunktionen sind für mineralische Böden mit vernachlässigbaren Grobbodenanteilen anwendbar. In Sonderfällen (z. B. Torfhorizonte der Moorböden (vgl. LP_02) sowie steinige Böden bzw. Ausgangssubstrate aus Solifluktionsdecken mit Gesteinsanteilen (vgl. LP_11, LP_12 und LP_13)) wurden substratspezifische Korrekturfaktoren berücksichtigt.

Zur Korrektur der Trockenrohdichten bei humosen Bodenhorizonten (> 1 %) wurden die nach Renger et al. (2009) beschriebenen Abzüge (0,04 g/cm³ pro % bei Humusgehalten von 1-6 % bzw. 0,03 g/cm³ bei Humusgehalten von 6-15 %) angewendet. In der untenstehenden Darstellung erfolgte eine Rundung der Werte auf die 2. Nachkommastelle. Bei den nachfolgend beschriebenen Berechnungen, welche den Humusgehalt berücksichtigen, wurde der rechnerische Korrekturwert verwendet. Die Ableitung der Korndichte erfolgte unter der Annahme einer mittleren Korndichte von 2,65 g/cm³ für den Mineralboden und anteiliger Gewichtung der Humusanteile für den jeweiligen Horizont.

Neben der Bodenart, der Trockenrohdichte und dem Humusgehalt ist die Wärmeleitfähigkeit und die Wärmekapazität der Böden stark vom Wassergehalt abhängig. Ziel war eine Abschätzung der Wärmeleitfähigkeit und Wärmekapazität der verschiedenen Bodenhorizonte bei drei verschiedenen Bodenfeuchtezuständen, und zwar bei Sättigung (θ_s), dem Wassergehalt bei Feuchteäquivalent (pF FÄ) sowie bei Totwassergehalt (pF 4,2). Die Wassergehalte bei den jeweiligen Saugspannungsstufen sowie die van-Genuchten-Parameter wurden nach Renger et al. (2009) bzw. den Verknüpfungsregeln (VKR) des LBEG (2020) für Torfhorizonte (VKR 6.1.7, 6.1.8 sowie 6.1.9) sowie auf Grundlage vorhandener Messreihen abgeleitet. Für grobkörnige Substrate wurden entsprechende Korrekturen (Novak, 2011; Schneider, 2012) angewandt. Für die Eingabe in die Finite-Element-Software SPRING werden die van-Genuchten-Parameter mit Hilfe der Wassergehalte bei permanentem Welkepunkt, Feldkapazität (pF=1,8), Feldkapazität FÄ und Gesamtporenvolumen durch ein Fitting plausibilisiert.

Die mittlere Wasserleitfähigkeit im wassergesättigten Boden wurde in Abhängigkeit der Bodenart sowie der Trockenrohdichte nach Renger et al. (2009, Tabelle 13) für mineralische Bodenhorizonte bzw. nach den Verknüpfungsregeln gemäß LBEG (2020, VKR 6.1.11), unter Berücksichtigung von Torfart, Zersetzungsgrad und Substanzvolumen für Torfe abgeleitet.

Die anschließende Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit erfolgte für mineralische Böden ohne erhöhte Grobbodenanteile unter Anwendung der Pedotransferfunktion nach Markert et al.

(2017). Zur Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit von Torfböden wurde die Gleichung nach Zhao et al. (2019) herangezogen:

$$\lambda = A + Bln(1 + S_r)$$

Bei A und B handelt es sich um bodenabhängige Parameter (Zusammensetzung, Textur, Struktur). Die Berechnung erfolgt durch die Ableitung der darin einfließenden Eingangsparameter λ_{dry} und λ_{sat} nach den etablierten Ansätzen von Cote und Konrad (2005) und vorheriger Bestimmung der Parameter λ_s, λ_m, λ_o und λ_w nach de Vries (1962). Bei S_r handelt es sich um den Sättigungsgrad des Substrates.

Nach Cote und Konrad (2013) können die spezifischen Parameter (z. B. n, S_r, K_s, K_{sat}, K_{dry}, K_r) für Grobboden sowie die daraus resultierende Wärmeleitfähigkeit abgeleitet werden. Unter Berücksichtigung der Fein- und Grobbodenanteile erfolgte im Anschluss die Berechnung einer charakteristischen Wärmeleitfähigkeit für die jeweiligen Leitprofil-Horizonte.

Zur rechnerischen Ermittlung der Wärmekapazität, unter Berücksichtigung der spezifischen Wärme des trockenen Gesteins, des Wassergehaltes und der Trockenrohdichte, wurde der Ansatz nach SIA (1996) gewählt.

Die Finite-Elemente-Software SPRING, die zur Modellierung eingesetzt wurde, einen linearen Zusammenhang zwischen der Sättigung und der Wärmeleitfähigkeit:

$$\lambda = n \cdot S_r \cdot \lambda_w + (1 - n) \cdot \lambda_s$$

Dabei entspricht n der Porosität und $S_r \in [0,1]$ der relativen Sättigung. Die Wärmeleitfähigkeit des Wassers λ_w und des Bodens λ_s werden nur als numerische Parameter verwendet und haben keine direkte physikalische Entsprechung. In dauerhaft gesättigten Horizonten funktioniert dieser Ansatz gut, da die Parameter der Formel so angepasst werden können, dass die Wärmeleitfähigkeit im gesättigten Fall stimmt. Um die ermittelten Werte besser abbilden zu können, wird in der ungesättigten Zone bevorzugt auf einen logarithmischen Zusammenhang und der Angabe der Sättigung in Gewichtsprozent gesetzt:

$$\lambda = \log_{10}\left(n \cdot S_r \cdot \frac{\varrho_{w,0}}{\varrho_{TRD}}\right) \cdot \lambda_w + (1 - n) \cdot \lambda_s$$

Die Dichte von Wasser $\varrho_{w,0} = 1000 \left[\frac{kg}{m^3}\right]$ und die Trockenrohdichte ϱ_{TRD} dienen der Umrechnung von Volumenprozent in Gewichtsprozent. In den Parametrisierungen der Leitprofile wird die Anwendung der letzteren Formel durch ein Sternchen (*) gekennzeichnet.

Die Bestimmung der volumetrischen Wärmekapazität, c_v (MJ/m³K), erfolgte für Torfböden unter Berücksichtigung der Lagerungsdichte für Torfe (LD_{feucht} nach VKR 6.1.21) sowie der spezifischen Wärmekapazität pro Masseneinheit (c_p in Abhängigkeit des Wassergehaltes und der spezifischen Wärme des trockenen Materials c_s: 1.920 J/kg*K bei Torfen) mit folgender Gleichung, gemäß Verknüpfungsregel 6.1.19 des LBEG (2020):

$$c_v = \frac{LD \cdot C_p}{1000}$$

Der Einfluss der Grobbodenfraktion auf die Wasserretentionseigenschaften und die Wärmekapazität von Böden wurde von Beck-Broichsitter et al. (2023) untersucht. Demnach ergibt sich zur Bestimmung der volumetrischen Wärmekapazität folgender Zusammenhang:

$$c_v = \left(c_{mh} \cdot \left(\frac{OM}{100}\right) + \left[(1 - R_v)c_{m\,min}\left(1 - \frac{OM}{100}\right) + R_v c_{m\,g}\left(1 - \frac{OM}{100}\right)\right]\right) \cdot \rho_b + c_{mw} \cdot \rho_w \cdot \theta$$

Auch hier müssen die Formeln für die Finite-Elemente-Software linearisiert werden:

$$c = n \cdot S_r \cdot \varrho_w \cdot c_w + (1 - n) \cdot \varrho_s \cdot c_s$$

Die Dichte des Wassers ϱ_w wird während der Berechnung in Abhängigkeit der Temperatur ermittelt und für die Dichte des Bodens ϱ_s wird die Trockenrohdichte gewählt. Wiederum sollten die spezifische Wärmekapazität des Wassers c_w und des Bodens c_s als numerische Parameter betrachtet werden, die die ermittelten Werte möglichst präzise abbilden.

Die für die Wärmemodellierung für grundwasserbeeinflusste Böden ebenso relevanten gesättigten Wasserleitfähigkeiten wurden als mittlere Wasserdurchlässigkeiten nach Renger et al. (2009, Tabelle 13) bzw. nach LBEG (2020) für Torfhorizonte und entsprechender Korrektur nach Novak et al. (2011) für Horizonte mit erhöhten Grobbodenanteilen angegeben.

Im nachfolgenden Kapitel 5 werden die für die Modellierung zentralen Parameter unter Berücksichtigung des Profilaufbaus horizontweise zusammengefasst.

Es wird darauf hingewiesen, dass es sich bei den angegebenen Werten für die jeweiligen Parameter um charakteristische Kennwerte handelt. Ziel war es, realistische und ortstypische Eingangsdaten für die Berechnung der betriebsbedingten Effekte auf den Temperatur- und Wasserhaushalt zu erhalten. Es ist davon auszugehen, dass konkrete Feldmessungen aufgrund der pedogenetisch üblichen Heterogenität bereits innerhalb einzelner Peda variieren können.

4.3 Grundlagen des Modellaufbaus

Die Modellierung baut auf der Parametrisierung der Leitprofile auf. Dabei werden die Bodenschichten und das Regelgrabenprofil in die Geometrie übernommen. Ziel der Modellierung ist die Abbildung der Temperaturentwicklung zusammen mit der Grundwasserströmung und der Bodenfeuchte in der ungesättigten Zone in verschiedenen Tiefenstufen. Dafür eignen sich Vertikalmodelle, die einen Querschnitt durch die Kabeltrasse darstellen.

4.3.1 Grundwassermodelltypen

Bei der Reduktion auf 2D-Vertikalmodelle kann zwischen 2 unterschiedlichen Strömungssituationen unterschieden werden (siehe Abbildung 4.3-1).

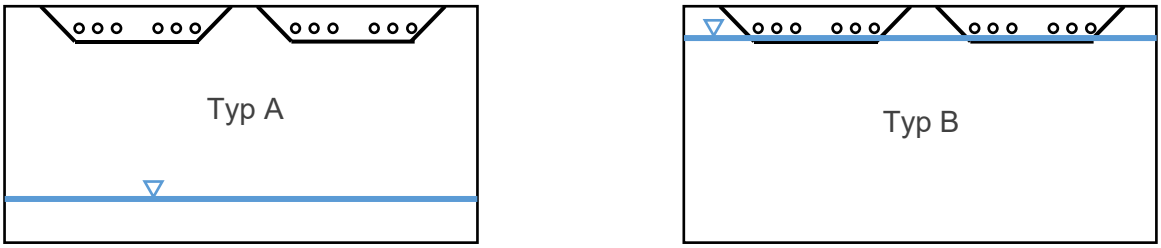

Abbildung 4.3-1: Verschiedene Grundwassermodelle, grundwasserfern (Typ A) und grundwassernah (Typ B).

Bei einem grundwasserfernen Standort (Typ A) liegt die Grundwasseroberfläche weit genug von der Kabelanlage entfernt, sodass keine Beeinflussung der Wärmeausbreitung mehr festgestellt werden kann. In der Modellierung wird dafür die Modellunterkante als offen angenommen, sodass das Sickerwasser das Modell verlassen kann. Liegt die Grundwasseroberfläche in der Nähe der Kabelanlage oder gar die Kabelanlage ganz oder teilweise unterhalb der Grundwasseroberfläche, so spricht man von einem grundwassernahen Standort (Typ B). Dabei ist vor allen Dingen die Strömung quer zur Kabeltrasse für potenzielle Kühleffekte relevant. Eine schnellere Querströmung würde zu einer besseren Kühlung der Kabelanlage führen. Tatsächlich wird in den Modellen eine typische Strömungsgeschwindigkeit angesetzt, die durchweg sehr gering ist und somit den potenziell schlechteren Fall der Wärmeausbreitung abbildet.

4.3.2 Modelldimensionierung

Die Modellnetze werden mit der Finite-Element Software SPRING (delta h 2025) aufgebaut. SPRING berechnet Grundwasserströmungen inklusive der ungesättigten Zone in direkter Kopplung mit Wärmetransport. Zusätzlich wurde die Grundwasserneubildungsberechnung vollständig gekoppelt und greift auf das Grundwassermodell anstelle eines Bodenwasserhaushaltsmodells zurück.

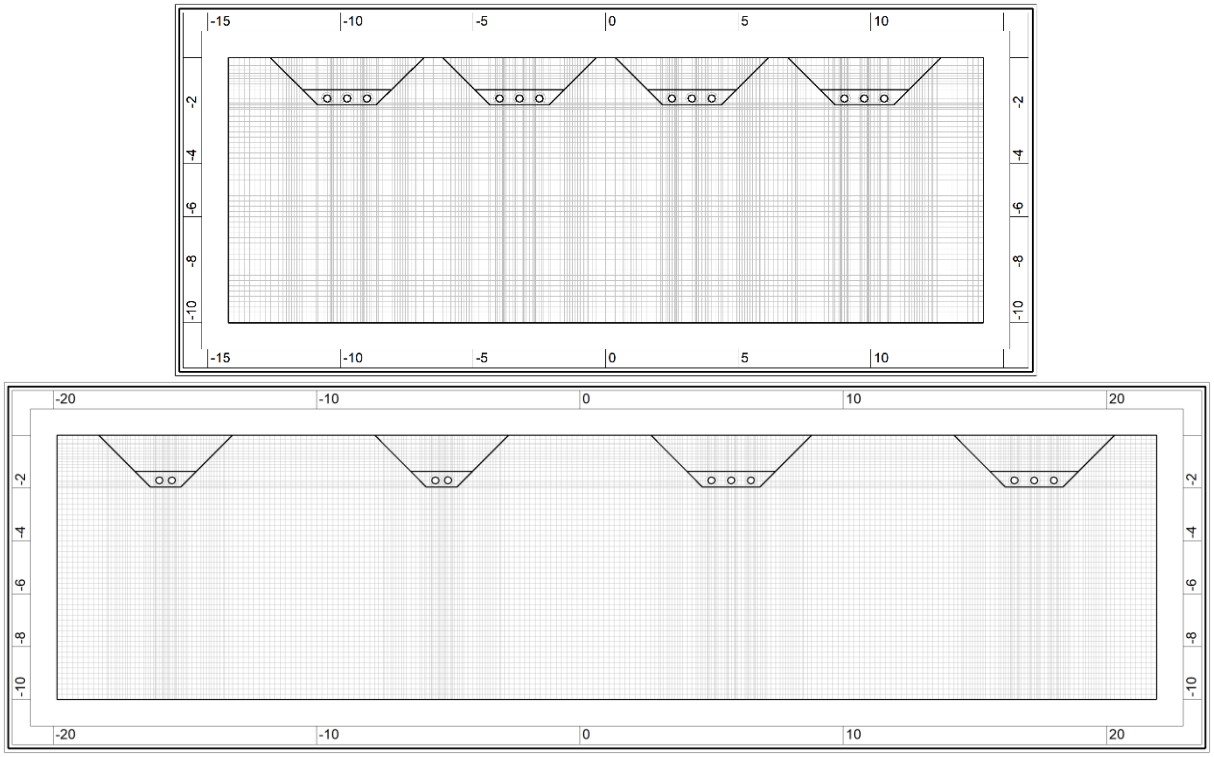

Abbildung 4.3-2: Beispielhafter Ausschnitt aus dem Modellnetz mit den vier Gräben des Kabeltyp 1 (oben) und den vier Gräben des Kabeltyp 2 (unten).

Im Wesentlichen ist die seitliche Ausdehnung der Modelle durch die Regelgrabenprofile des Kabeltyp 1 und Kabeltyp 2 vorgegeben. Beide Kabeltypen werden in einem gemeinsamen Modell berechnet. Dazwischen wird ein Abstand von 20 m angesetzt, sodass die Ergebnisse der beiden Kabeltypen möglichst unbeeinflusst vom jeweils anderen Kabeltyp sind. Für die Temperaturrandbedingung ist zudem ein weiterer Abstand von den äußeren Systemen vorzusehen. Dies sind hier mindestens 20 m. Daraus ergibt sich eine Gesamtbreite des Modells von 121 m.

Auch an der Modellunterkante muss eine Temperaturrandbedingung vorgegeben werden. Diese sollte die Wärmeausbreitung im Bereich der Kabelanlage möglichst nicht beeinflussen. Daher wird die Höhe des Modells mit 10 m angesetzt. Damit ist zudem die wassererfüllte

Mächtigkeit bei grundwassernahen Modellen und der Abstand bei grundwasserfernen Modellen groß genug.

Die Mächtigkeit des Modells, d. h. die Tiefe in der Draufsicht, ist mit 1 m angegeben.

Sowohl in horizontaler wie auch in vertikaler Richtung ist eine Elementkantenlänge von höchstens 20 cm vorgegeben. Die Schichtgrenzen, die Grabenprofile, der Bettungsblock, sowie die Schutzrohre sind als Zwangsgeometrie vorgegeben. Die Kreisgeometrie der Schutzrohre wurde mit jeweils 8 Knoten approximiert. Die Schutzrohre bilden zudem einen Modellrand, sodass das Innere der Schutzrohre im Modellgebiet nicht enthalten ist.

4.3.3 Betrachtungszeitraum

Als Betrachtungszeitraum wird das Trockenjahr 2019 herangezogen. Bereits das vorangegangene Jahr war sehr trocken und wird in dem zweijährigen Initialisierungszeitraum berücksichtigt. Erhöhte Lufttemperaturen und Sonnenstunden führen zu erhöhten Temperaturen im Boden, die sich zeitlich mit der Erwärmung der Kabelanlagen überlagern. Der stark reduzierte Niederschlag im Trockenjahr verringert darüber hinaus die Wärmeleitfähigkeit und Wärmekapazität des Bodens aufgrund einer niedrigen Sättigung. Das Trockenjahr ermöglicht dadurch die Prognose künftiger Bodenerwärmungen der Systeme unter Berücksichtigung der Einflüsse des Klimawandels.

4.3.3.1 Wahl der Zeitschrittweite

Grundsätzlich hat sich in bisherigen Projekten eine Zeitschrittweite von 1 Tag als ausreichend herausgestellt. Dies ist aufgrund der Datenlage der Wetterdaten und der Trägheit sowohl der Grundwasserströmung als auch der Temperaturausbreitung meist ausreichend. Die Kopplung des Grundwasserströmungsmodells mit der Grundwasserneubildungsberechnung erfordert jedoch kleinere Zeitschrittweiten. Bereits der Niederschlag als direkte Randbedingung bringt eine deutlich höhere Dynamik als bisher, sodass die ungesättigte Zone für die Berechnung der Sättigungen kleinere Zeitschrittweiten erfordert. Auch soll die Transpiration der Pflanzen auf das tatsächlich verfügbare Bodenwasser eingeschränkt werden, was zudem zusätzlich numerische Stabilität im Grundwassermodell zur Folge hat. Unter Berücksichtigung dieser Faktoren wird eine Zeitschrittweite von ¼ Tag gewählt.

Da der Anfangszustand der Temperaturverteilung über die Tiefe nicht bekannt ist, muss bereits vor dem einjährigen Betrachtungszeitraum, der zur Analyse herangezogen wird, die Berechnung gestartet werden. Dabei hat sich gezeigt, dass ein zweijähriger Vorlauf notwendig ist. In diesen zwei Jahren stellt sich eine entsprechende Schichtung der Temperaturen über die Tiefe ein. Nimmt man die Last der Kabel mit hinzu, kann sich in diesem Zeitraum auch die Temperaturfahne ausreichend ausbreiten.

4.3.4 Klimastationen

Für verschiedenste Randbedingungen werden Wetterdaten innerhalb des Betrachtungszeitraums benötigt. Es werden hierbei historische Wetterdaten aus Klimastationen des Deutschen Wetterdienstes (DWD) zur Betrachtung herangezogen. Neben den offensichtlichen Daten, wie Niederschlag und Lufttemperatur, werden für die Grundwasserneubildungsberechnung weitere Daten benötigt. Diese erweiterten Daten liegen nur für wenige Klimastationen vollständig vor. Für die Leitprofile, die vorwiegend für den Norden des Netzgebietes der Amprion GmbH repräsentativ sind, werden die beiden Klimastationen Elpersbüttel in Schleswig-Holstein und Bremervörde in Niedersachsen herangezogen. Aus dem Vorhaben A-Nord können die Klimastationen Dörpen und Ahaus in Niedersachsen und Düsseldorf in Nordrhein-Westfalen übernommen werden. Hinzu kommen die Klimastationen Gießen/ Wettenberg und Frankfurt/ Flughafen in Hessen. Jede der Wetterstationen wird repräsentativ für Gebiete im Umkreis von 30-60 km herangezogen. Die jeweiligen Leitprofile werden entsprechend ihrer Verbreitung einer repräsentativen Klimastation zugeordnet.

4.3.5 Grundwasseroberfläche

Für jedes der Leitprofile muss eine typische Grundwasseroberfläche mit entsprechender Strömungsgeschwindigkeit bei grundwassernahen Standorten abgeleitet werden. In dem vorliegenden Fachgutachten wird für die Grundwasseroberfläche der mittlere Niedriggrundwasserstand der Bodenkarten (BK50) herangezogen. Die Grundwasserströmung bei grundwassernahen Modellen wird aus Grundwasserpotentialen abgeleitet. Aufgrund der räumlichen Verbreitung der Leitprofile wird das Potentialgefälle aus den Hydrologischen Übersichtskarten (HÜK) der jeweiligen Bundesländer für den Regelfall abgelesen.

Durch die hohe zeitliche Dynamik der Niederschlagsrandbedingung und der Wurzelzone aus der Kopplung mit der Grundwasserneubildungsberechnung sind deutlich aufwändigere hydraulische Randbedingungen am linken und rechten Modellrand für grundwassernahe Standorte als bisher notwendig, um eine entsprechende Dynamik auch in den Grundwasserständen abbilden zu können. Dabei wird angestrebt, dass das hydraulisch sonst unbeeinflusste Modell eine Grundwasserströmung von links nach rechts aufweist und sich im Mittel der gewünschte Grundwasserstand einstellt. Entsprechend wird der linke Rand als Einstromrand und der rechte Rand als Ausstromrand mit vorgegebenen Mengen angesetzt. Die Menge des ein-/ ausströmenden Grundwassers berechnet sich mittels folgender Formel:

$$Q = k_f \cdot A \cdot \frac{\Delta h}{d}$$

Q = Menge [m³ / s]
k_f = Durchlässigkeit (kf-Wert) [m / s]
A = durchströmte Fläche [m²]
Δh = Potentialgefälle in Bezug auf Distanz d [m]
d = Bezugsdistanz für Potentialgefälle [m]

Am Einstromrand wird diese Menge für jedes Element, welches sich unterhalb der vorgegebenen Grundwasseroberfläche befindet, als feste Randbedingung vorgegeben. Am Ausstromrand wird die Menge für genau die Elemente angeschaltet, die sich im gegenwärtigen Zeitschritt unterhalb der aktuellen Grundwasseroberfläche befinden. Dies gewährt einen festen Zustrom unabhängig von Schwankungen des Grundwasserstandes am Einstromrand. Bei Niederschlag steigt der Grundwasserstand an, dementsprechend strömt mehr Wasser am rechten Rand aus. Wiederrum sinkt der Grundwasserstand bei hoher Wasseraufnahme durch die Pflanzen, wodurch die Menge am Ausstromrand reduziert wird. Ohne Niederschlag und Wasseraufnahme durch die Pflanzen stellt sich mit diesen Mengenrandbedingungen an den Ein- und Ausstromrändern der gewünschte Wasserstand ein.

In allen Leitprofilen mit grundwassernahen Modellen ist im Regelfall ein sehr geringes Potentialgefälle anzutreffen. Entsprechend stellen sich hier keine einseitigen Temperaturfahnen ein,

die sichtbar mit der Strömung transportiert werden. Für grundwasserferne Standorte wird aufgrund des großen Flurabstandes keine Potentialrandbedingung benötigt. Stattdessen kann das Bodenwasser durch die Modellunterkante versickern. Im ungesättigten Bereich gelten die jeweiligen van-Genuchten-Parameter aus den Leitprofilen. Die van-Genuchten-Parameter wurden für die Modellierung vorher anhand der Sättigungen bei Totwasser, Feldkapazität bei pF=1,8 und Feldkapazität bei Feuchteäquivalent sowie dem Gesamtporenvolumen plausibilisiert. In manchen Fällen steigt die Grundwasseroberfläche bis an die Geländeoberkante (GOK) an. Daher werden in allen Modellen Drainagen in einer Tiefe von 80 cm unter GOK im Abstand von etwa 5 m angesetzt. Die Lage der Drainage ist so gewählt, dass sie parallel zur Trassenachse verläuft und symmetrisch um die Gräben liegt. Im Modell werden die Drainagen nur bei vollständiger Sättigung des Bodens aktiv. Entsprechend haben sie bei grundwasserfernen Profilen ohne Staunässe keine Wirkung.

4.3.6 Thermische Randbedingungen

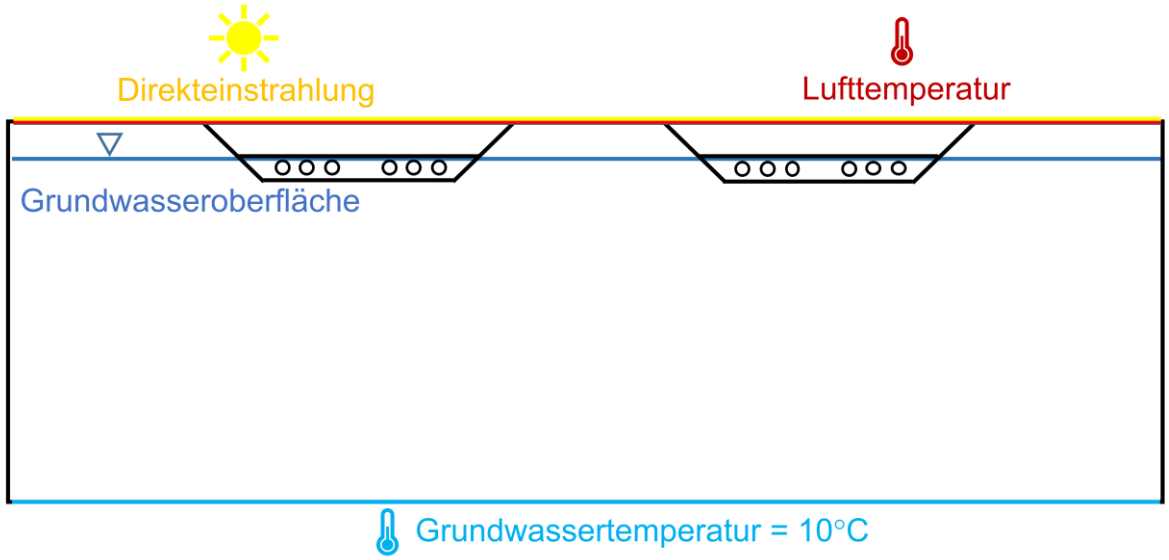

Abbildung 4.3-3: Wichtige Modellrandbedingungen am Beispiel des grundwassernahen Modelltyps.

Für die Kopplung der Wärmeberechnung an Umwelteinflüsse sind eine Reihe thermischer Randbedingungen zu berücksichtigen. Für das Grundwasser wird eine feste Temperatur von etwa 10 °C angenommen (vgl. GD NRW 2022). Die tatsächliche Temperatur ergibt sich aus dem langjährigen Mittel der jeweiligen Klimastation. Dafür wird im grundwassernahen und grundwasserfernen Modelltyp diese Grundwassertemperatur an der Modellunterkante vorgegeben. Zudem wird diese Temperatur auch für seitlich einströmendes Grundwasser bei grundwassernahen Modellen vorgegeben. Der seitliche Modellrand ist weit genug entfernt angesetzt, sodass sich die Temperaturschichtung aufgrund der Temperaturrandbedingung an der

Geländeoberfläche einstellt, bevor das einströmende Grundwasser den ersten Kabelgraben und damit den für die Ergebnisauswertung relevanten Modellbereich erreicht.

Die hauptsächliche thermische Randbedingung an der Geländeoberkante ist die Lufttemperatur. Diese wird aus den historischen Wetterdaten der ausgewählten Klimastationen des DWD entnommen und den entsprechenden Leitprofilen zugeordnet. Die Lufttemperatur ist als Tagesmittelwert instationär vorgegeben. Ein Wärmeübergangskoeffizient bewirkt eine Dämpfung der Randbedingung. Dieser numerische Koeffizient wurde anhand von Messwerten aus Feldversuchen kalibriert. Er erlaubt zusätzlich, dass sich die Geländeoberkante aufgrund der Kabelwärme erwärmen kann.

Darüber hinaus ist dieser Koeffizient auch für eine weitere Randbedingung an der Geländeoberfläche notwendig. Bei direkter Sonneneinstrahlung kann die Temperatur des Oberbodens die der Luft übersteigen. Dafür wird die Globalstrahlung in ihre zwei Komponenten aufgeteilt: die Hintergrundstrahlung und die Direktstrahlung, die von den Sonnenstunden abhängt. Die Aufteilung geschieht nach der Formel (vgl. ReKIS 2016):

$$R_G = R_{ex} \cdot \left(a + b \cdot \frac{SD}{S_0}\right)$$

SD = Sonnenscheindauer [h]
S_0 = astronomisch mögliche Sonnenscheindauer [h]
R_{ex} = extraterrestrische Strahlung [J / cm²]
R_G = Globalstrahlung [J / cm²]

$$S_0 = 12{,}3 + \sin\zeta \cdot \left(4{,}3 + \frac{\varphi - 51{,}0}{6}\right)$$

φ = geographische Breite (Dezimalgrad)
$\zeta = 0{,}0172 \cdot JT - 1{,}39$ = Datumsfunktion
JT = Tag des Jahres (1 … 365)

$$R_{ex} = 2425 + 1735 \cdot \sin\zeta + 44 \cdot (\varphi - 51{,}0) \cdot (\sin\zeta - 1)$$

Für Deutschland sind bei Tageswerten die Koeffizienten $a = 0{,}19$ und $b = 0{,}55$ gültig.

Der Anteil der Hintergrundstrahlung wird dabei der Lufttemperatur zugeschlagen und nicht gesondert berücksichtigt. Die Direktstrahlung wird dagegen als Energierandbedingung an der Geländeoberkante zugewiesen. Diese hängt von der Anzahl der Sonnenstunden pro Tag ab, welche für die verwendeten Klimastationen des DWD vorliegen.

4.3.7 Grundwasserneubildung

Ein zusätzlicher Wasser- und auch Wärmeeintrag findet aufgrund des Niederschlags an der Geländeoberkante statt. Anstelle des direkten Niederschlags wird eine gekoppelte Grundwasserneubildungsberechnung durchgeführt und nur der korrigierte Niederschlag — nach Abzug der Interzeption und des Direktabflusses — wird als Mengenrandbedingung an der Modelloberkante angesetzt. Durch die gleichzeitige Temperaturrandbedingung erhält das eindringende Wasser die an diesem Rand vorgegebene Temperatur.

Die hier verwendete Methode zur Berechnung der Grundwasserneubildung basiert auf der instationären, standortsabhängigen Berechnung nach der Methode RUBINFLUX (vgl. Zepp et al. 2017: 113f). Allerdings wird das Bodenwasserhaushaltsmodell von RUBINFLUX gegen die Kopplung an das Grundwassermodell ausgetauscht. Folgende Eingangsgrößen werden für die Berechnung benötigt.

4.3.7.1 Niederschlag

Der Niederschlag kann lokal variieren. Im Sinne der Leitprofile ist es dagegen nicht sinnvoll jeden Meter der Kabeltrassen mit exaktem Niederschlag abzubilden. Stattdessen wird jedem Leitprofil genau eine Klimastation zugeordnet. Die gleiche Zuordnung wird auch für die weiteren klimatischen Parameter verwendet.

4.3.7.2 Gebietsbezogene Klimadaten

Für die Ermittlung der instationären Grundwasserneubildungsraten sind neben den Niederschlagsmengen auch die gemessenen Tageswerte für die Klimaparameter

- Sonnenscheindauer,
- Lufttemperatur,
- Luftfeuchtigkeit und
- Windgeschwindigkeit

notwendig. Aus der Sonnenscheindauer wird zudem der Direktstrahlungsanteil der Globalstrahlung für die Energierandbedingung an der Geländeoberkante berechnet. Die Evapotranspiration ist abhängig von diesen Parametern.

4.3.7.3 Lagehöhe

Die Lagehöhe ist für die Berechnung der Grasreferenzverdunstung erforderlich und bezieht sich auf das Niveau des Meeresspiegels. Lagehöhen werden entsprechend der räumlichen Verbreitung jedes Leitprofils aus Kartenwerken NIBIS-Kartenserver für Niedersachsen (vgl. LBEG 2022), GEOportal.NRW für Nordrhein-Westfalen (vgl. GDI-NRW 2022), GDS für Hessen (vgl. GDSHE 2025)) abgeleitet.

4.3.7.4 Geographische Breite

Die geographische Breite hat einen Einfluss auf die maximal mögliche Anzahl an Sonnenstunden und fließt damit in die Berechnung der Grasreferenzverdunstung mit ein. Auch hier wird die räumliche Verbreitung der einzelnen Leitprofile herangezogen.

4.3.7.5 Bodenklasse

Die Bodenklasse kann anhand des Oberbodens zugeordnet werden. Dies hat Einfluss auf das berücksichtigte Versickerungsvermögen der Böden. Dabei verwendet RUBINFLUX eine 4-stufige Klassifizierung von hoch bis sehr gering. Böden mit geringerem Versickerungsvermögen haben einen größeren Direktabfluss.

4.3.7.6 Landnutzungsform

Im vorliegenden Gutachten werden die Landnutzungsformen Winterweizen und Mais betrachtet. Hieraus leiten sich z. B. Vegetationsperiode, Bestandskoeffizient, Blattflächenindex und Wurzellängendichte ab, die wiederum einen Einfluss auf die Evapotranspiration haben.

4.3.7.7 Blattflächenindex

Der Blattflächenindex ist zeitlich variabel. Zum Zeitpunkt der Saat liegt er bei 0 und steigt anschließend mit dem Pflanzenwachstum weiter an. In späteren Phasen kann er auch wieder zurückgehen, wenn die Pflanze vertrocknet oder die Blätter nach unten hängen. Mit der Ernte ist er wieder bei 0. Bei allen Ackerfrüchten wird eine Zwischenfrucht angenommen. Der Jahresverlauf des Blattflächenindex fünf ausgewählter Landnutzungsformen ist in Abbildung 4.3-4 dargestellt.

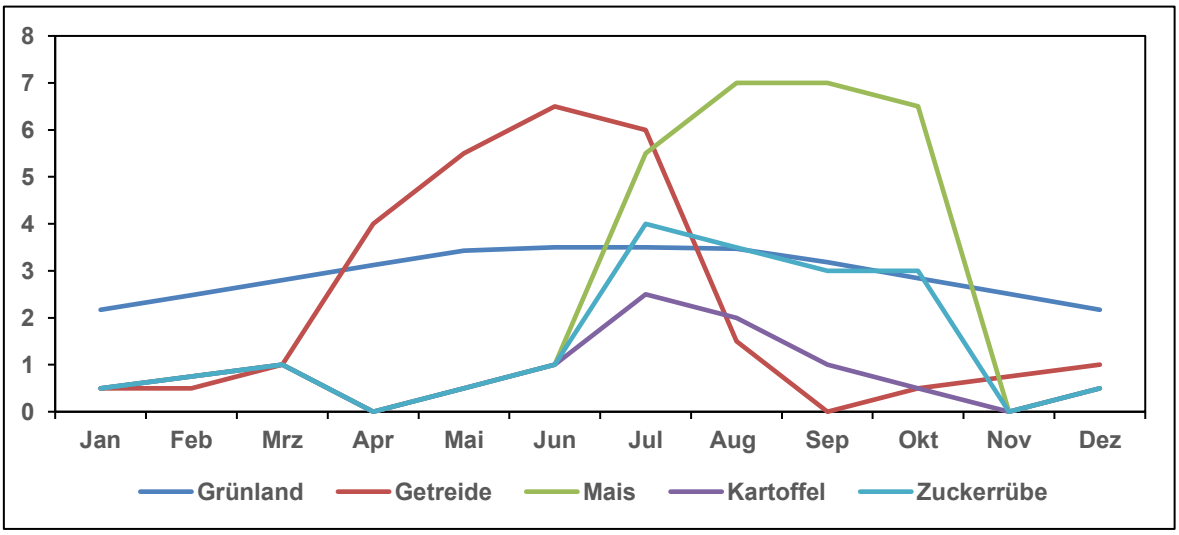

Abbildung 4.3-4: Blattflächenindex im Jahresverlauf für verschiedene Landnutzungsformen.

4.3.7.8 Bestandskoeffizient

Der Bestandskoeffizient wird genutzt, um die Grasreferenzverdunstung in die potenzielle Evapotranspiration der jeweiligen Landnutzung umzurechnen. Abbildung 4.3-5 zeigt den Jahresverlauf des Bestandkoeffizienten für fünf ausgewählte Landnutzungsformen.

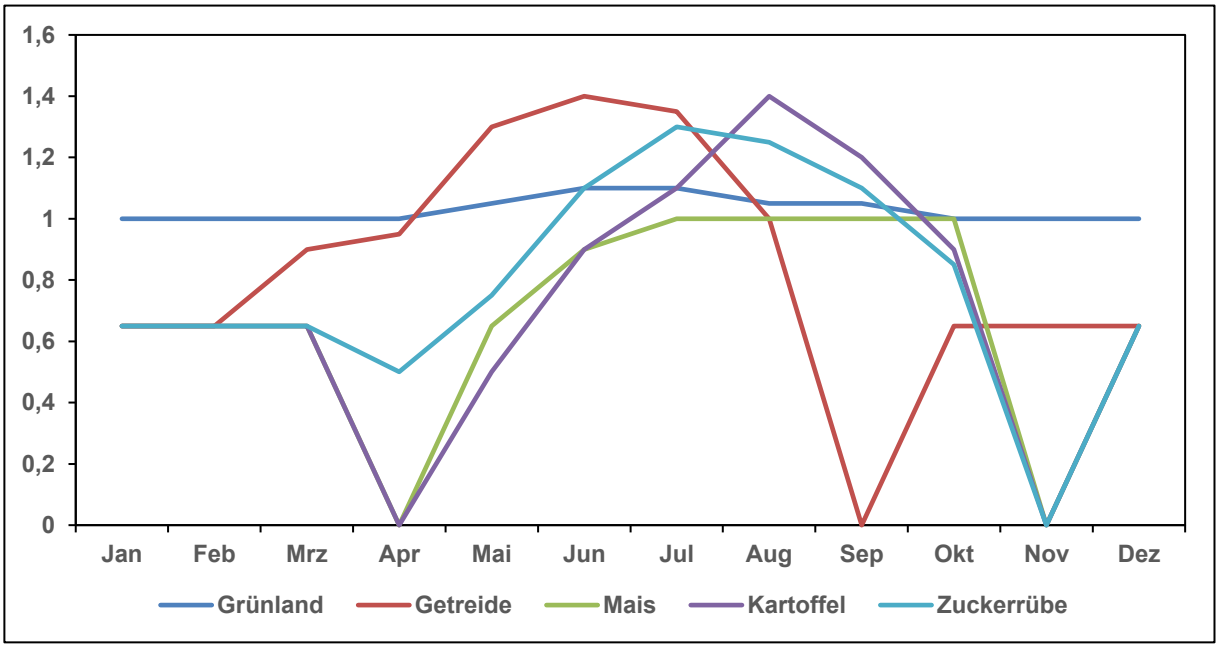

Abbildung 4.3-5: Bestandkoeffizient im Jahresverlauf für verschiedene Landnutzungsformen.

4.3.7.9 Water Stress Response Function (Feddes-Parameter)

Die Water Stress Response Function steuert wieviel Wasser in einer bestimmten Tiefe in Abhängigkeit der Sättigung von der Pflanze aufgenommen werden kann (siehe Abbildung 4.3-6). Ist der Boden zu feucht (h_0) nimmt die Wurzel kein Wasser mehr auf. Auch beim permanenten Welkepunkt (h_3) kann kein Wasser mehr aufgenommen werden. Dazwischen gibt es einen optimalen Bereich (h_{opt} bis h_2), bei dem die für die Transpiration notwendige Wassermenge vollständig aufgenommen werden kann. Im Feddes-Jarvis-Modell wird zudem der Parameter h_2 in Abhängigkeit der Transpiration im Bereich von h_{2H} und h_{2L} variiert. Für alle Landnutzungsarten wird h_{2H} bei einer Transpiration von 1 mm / d und h_{2H} bei einer Transpiration von 5 mm / d angesetzt.

Die Feddes-Jarvis-Parameter wurden aus Feddes und Raats (2004) übernommen und finden sich in Tabelle 4.3-1. Weitere Quellen zeigen zudem, dass Kartoffeln und Zuckerrüben identische Parameter haben.

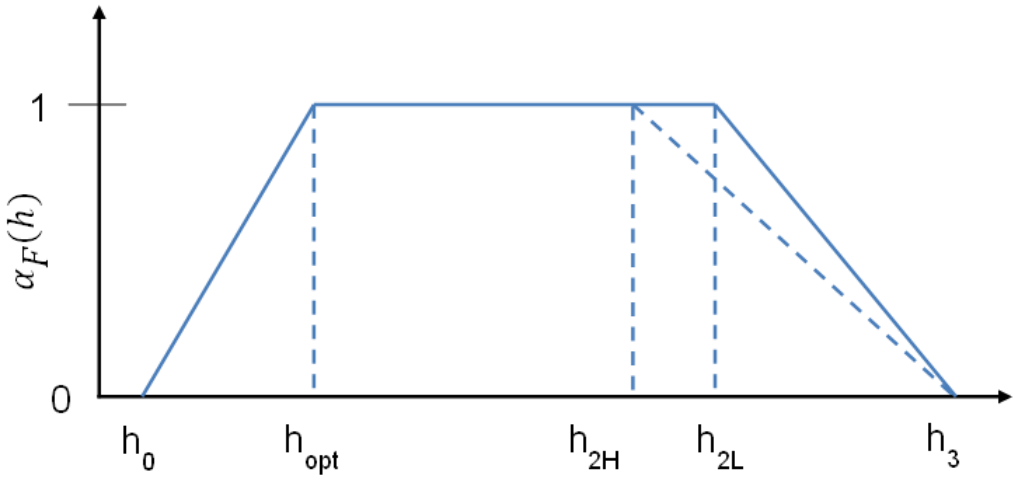

Abbildung 4.3-6: Schematische Darstellung der Water Stress Response Function mit den feuchteabhängigen Parametern.

Tabelle 4.3-1: Feddes-Jarvis-Parameter für verschiedene Landnutzungsformen.

Parameter	Grünland	Getreide	Mais	Kartoffel	Zuckerrübe
h_0	-15 hPa	0 hPa	-15 hPa	0 hPa	0 hPa
h_{opt}	-30 hPa	-1 hPa	-30 hPa	-1 hPa	-1 hPa
h_{2H}	-300 hPa	-8000 hPa	-325 hPa	-300 hPa	-300 hPa
h_{2L}	-1000 hPa	-12000 hPa	-600 hPa	-500 hPa	-500 hPa
h_3	-8000 hPa	-24000 hPa	-8000 hPa	-16000 hPa	-16000 hPa

4.3.7.10 Wurzellängendichte

Wesentlich für die Bestimmung aus welchen Tiefen wieviel Wasser für die Transpiration entzogen wird ist die Wurzellängendichte. Diese gibt für verschiedene Tiefen an wie viele der Wurzeln sich in dieser Tiefe befinden. Entsprechend der Diskretisierung im Grundwassermodell werden die Wurzellängendichten gewichtet und die Wasseraufnahme entsprechend dieser Gewichte verteilt. Zudem ist die Wurzellängendichte über die Zeit vom jeweiligen Pflanzenwachstum abhängig.

Die Datenlage für Wurzellängendichten ist, insbesondere mit Blick auf den zeitlichen Aspekt, sehr sparsam. Aus unterschiedlichen Quellen liegen Abbildungen zu Wurzelbilder der vollständig ausgewachsenen Pflanzen vor. Diese wurden auf ihre Wurzelverteilung analysiert und eine

Wurzellängendichte abgeleitet. Dabei ist grundsätzlich zu berücksichtigen, dass das Pflanzenwachstum von vielen verschiedenen Umwelteinflüssen abhängt und daher in der Natur stark variiert. Entsprechend können die hier verwendeten Parameter nur als eine allgemeine Näherung verstanden werden. Um die Wurzellängendichten auch zeitlich zu extrapolieren, wird auf die Formel von Gerwitz und Page (1974) zurückgegriffen:

$$P = 100 \cdot (1 - \exp(-f \cdot x))$$

Diese Formel beschreibt die kumulative Wurzelmasse P in Prozent, die bis in eine Tiefe x [cm] angetroffen wird. Der pflanzenspezifische Faktor f wird gemäß Gerwitz und Page (1974) so definiert, dass $1/f$ der Tiefe entspricht, in der 63 % der gesamten Wurzelmasse vorliegen. Dadurch kann die Wurzellängendichte in verschiedensten Tiefen bestimmt werden. Tabelle 4.3-2 listet die Tiefen, bei denen 63 % der Wurzelmasse im ausgewachsenen Zustand angetroffen wird.

Tabelle 4.3-2: Tiefe mit 63 % Wurzelmasse im ausgewachsenen Stadium sowie maximale Wurzeltiefe für verschiedene Landnutzungsarten.

	Getreide	**Mais**	**Kartoffel**	**Zuckerrübe**
63 % Wurzelmasse	27,5 cm	42 cm	40 cm	23 cm
max. Wurzeltiefe	1,20 m	1,80 m	1,20 m	1,20 m

Für die zeitliche Entwicklung wird angenommen, dass vom Zeitpunkt der Saat die Wurzeln im gleichen Maße länger werden, wie auch der Blattflächenindex zunimmt. Bei manchen Pflanzen geht der Blattflächenindex jedoch vor der Ernte leicht zurück. Bei den Wurzeln wird jedoch davon ausgegangen, dass sie sich nicht zurückbilden. Mit Zeitpunkt der Ernte wird die Wurzellänge wird auf 0 m zurückgesetzt und die Parameter einer Zwischenfrucht angewendet. Für Grünland wird eine konstante Wurzellänge mit der Wurzellängendichte aus Cai et al. (2017) verwendet.

4.3.7.11 Grundwasserneubildungsberechnung nach RUBINFLUX

Oberhalb der Geländeoberkante hat die Grundwasserneubildungsberechnung einen „Zufluss“ aus Niederschlag und einen „Abfluss“ aus der Evapotranspiration. Für das Grundwassermodell ist dabei der korrigierte Niederschlag als Randbedingung ausschlaggebend. Dieser berechnet sich folgendermaßen:

$$P_{korr} = P - I - A_{SCS}$$

P = Niederschlag aus den Klimastationen [mm/d]
I = Interzeption durch Pflanzen [mm/d]
A_{SCS} = Abfluss nach SCS-Verfahren [mm/d]
P_{korr} = korrigierter Niederschlag [mm/d]

INTERZEPTION I ist das Rückhaltevermögen von Pflanzen in Abhängigkeit vom Blattflächenindex. Der Blattflächenindex wird in Abhängigkeit von der Landnutzungsform und der Wachstumsphase angegeben. Die Interzeption ergibt sich als:

$$I = I_{max} - ET_I - I_S$$

I_{max} = Interzeptionskapazität [mm / d]
ET_I = Interzeptionsverdunstung [mm / d], $ET_I \leq ET_{max}$
ET_{max} = maximale Evapotranspirationshöhe [mm / d]
I_S = Interzeptionsspeicher [mm / d]

Der Interzeptionsspeicher behält die Interzeptionsmenge, die am Vortag nicht verdunstet werden konnte. Am Ende des Tages wird der Interzeptionsspeicher mit der verbleibenden Menge aktualisiert.

Die Interzeptionskapazität I_{max} ergibt sich nach Hoyningen-Huene (1983):

$$I_{max} = -0{,}42 + 0{,}245 \cdot P + 0{,}2 \cdot LAI - 0{,}0111 \cdot P^2 + 0{,}0271 \cdot P \cdot LAI - 0{,}0109 \cdot LAI^2$$

in Abhängigkeit des Niederschlags P und des Blattflächenindex LAI. Dabei muss der Tagesniederschlag den Grenzwert

$$P_{grenz} = 11{,}05 + 1{,}223 \cdot LAI$$

übersteigen. Zudem ist die Interzeption nach oben durch

$$I_{grenz} = 0{,}935 + 0{,}498 \cdot LAI - 0{,}00575 \cdot LAI^2$$

begrenzt.

DIREKTABFLUSS A_{SCS} wird nach dem SCS-Abflussverfahren berechnet (vgl. SCS 1986). Dabei wird die Bodenfeuchte in einem vereinfachten Verfahren basierend auf den letzten 5 Tagen berücksichtigt: Ist der Boden bereits gesättigt, kann kein weiteres Wasser eindringen und ist

der Boden zu trocken, kann auch nur wenig Wasser eindringen. Der Direktabfluss berechnet sich folgendermaßen:

$$A_{SCS} = \frac{(P-I)^2}{P-I+S} \text{ falls } P > I$$

P = Niederschlag [mm / d]
I = Interzeption [mm / d]
S = Bodenfeuchte [mm / d]

$$S = 25{,}4 \cdot \left(\frac{1000}{CN} - 10\right)$$

CN = SCS Curve Number [-]

Die Curve Number hängt wiederum von der Bodenart und der Landnutzungsform ab. Der korrigierte Niederschlag, der nach Interzeption und Direktabfluss übrigbleibt, wird als Mengenrandbedingung an der Modelloberkante angesetzt.

POTENZIELLE EVAPOTRANSPIRATION ET_{max} beschreibt die potenziell mögliche Verdunstung basierend auf den aktuellen Wettergegebenheiten. Dabei gilt:

$$ET_{max} = k_c \cdot ET_0$$

k_c = Bestandskoeffizient [-]
ET_0 = Grasreferenzverdunstung [mm / d]

Der Bestandskoeffizient rechnet die Grasreferenzverdunstung in die Verdunstung der tatsächlichen Pflanze um. Dieser ist wiederum zeitlich variabel und ändert sich mit dem Pflanzenwachstum. Zudem ist er abhängig von der Bodenart.

GRASREFERENZVERDUNSTUNG ET_0 wird in RUBINFLUX nach Penman-Monteith (vgl. FAO 56) berechnet:

$$ET_0 = \frac{s \cdot Rn + \frac{\gamma \cdot 90}{T+273} \cdot u2 \cdot (e_s - e_a)}{s + \gamma \cdot (1 + 0{,}34 \cdot u2)}$$

Rn = Verdunstungsäquivalent der Nettostrahlung [mm / d]
s = Steigung der Sättigungsdampfdruckkurve über Wasser [hPa]
γ = Psychrometerkonstante $\gamma = 0{,}65$ [hPa / K]
T = Lufttemperatur [°C]
$u2$ = Windgeschwindigkeit in 2 m über Gelände [m / s]
e_s = Sättigungsdampfdruck über Wasser [hPa]
e_a = aktueller Dampfdruck [hPa]

Dabei berechnet sich die Steigung der Sättigungsdampfdruckkurve durch

$$s = \frac{e_s \cdot 4284}{(243{,}12 + T)^2}$$

und der Sättigungsdampfdruck durch

$$e_s = 6{,}112 \cdot \exp\left(\frac{17{,}62 \cdot T}{243{,}12 + T}\right).$$

Das Verdunstungsäquivalent der Nettostrahlung ergibt sich aus

$$Rn = Rn_k - Rn_l$$

Rn_k = Verdunstungsäquivalent der kurzwelligen Nettostrahlung [mm / d]
Rn_l = Verdunstungsäquivalent der Strahlungsbilanz der Nettostrahlung [mm / d]

Diese wiederum berechnen sich folgendermaßen:

$$Rn_k = 0{,}23 \cdot \frac{R_G}{L}$$

R_G = Globalstrahlung [J / cm²] (siehe Kapitel 4.3.6)
L = spezielle Verdunstungswärme [J / cm²]

$$Rn_l = R_L \cdot \left(-0{,}22 + 1{,}64 \cdot \frac{R_G}{R_0}\right) \cdot \left(0{,}34 - 0{,}044 \cdot \sqrt{e_a}\right)$$

R_L = Verdunstungsäquivalent der langwelligen Gegenstrahlung der Atmosphäre [mm / d]
R_0 = extraterrestrische Strahlung [J / cm²]

Die Gegenstrahlung wird dabei folgendermaßen berechnet:

$$R_L = \sigma \cdot \frac{(T + 273{,}15)^4}{L} \cdot 8{,}64$$

σ = Stefan-Boltmann-Konstante $\sigma = 5{,}67 \cdot 10^{-8}$ [W / m² / K⁴]

Und die Verdunstungswärme ergibt sich als

$$L = \frac{L' \cdot \varrho_W}{1000}$$

L' = spezifische Verdampfungswärme $L' = 2498000 - 2420 \cdot T$ [J / kg]
ϱ_W = Dichte von Wasser [kg / m³]

4.3.7.12 Gekoppelte Berechnung der Wurzelzone

Typischerweise wird ein Bodenwasserhaushaltsmodell für die Grundwasserneubildungsberechnung verwendet. Im Falle von RUBINFLUX ist dies ein Einschichtmodell, welches man sich als Becher vorstellen kann: Der korrigierte Niederschlag wird in den Becher reingekippt

und die Evapotranspiration wieder herausgenommen. Die potenzielle Evapotranspiration ET_{max} wird auf das tatsächlich verfügbare Bodenwasser eingeschränkt. Die Feldkapazität beschreibt das Wasser, das gegen die Schwerkraft gehalten werden kann. Ist im Becher mehr Wasser vorhanden, versickert es und wird schlussendlich Grundwasserneubildung.

Im vorliegenden Gutachten wird das Bodenwasserhaushaltsmodell ersetzt und es wird die tatsächliche Bodenfeuchte aus dem Grundwassermodell für die tatsächliche Evapotranspiration verwendet. Wie bereits zuvor erwähnt, wird der korrigierte Niederschlag, d. h. abzüglich der Interzeption und des Direktabflusses, als Mengenrandbedingung im Grundwassermodell angesetzt. Auch die potenzielle Evapotranspiration wird um die Interzeptionsverdunstung reduziert:

$$ET'_{max} = ET_{max} - ET_I$$

Für die weitere Verwendung muss nun die Evapotranspiration in die Transpiration T_{pot} (Verdunstung durch die Pflanze) und Evaporation ET_{pot} (Verdunstung von der Geländeoberkante) aufgeteilt werden. Dafür wird auf den Ansatz von Huwe (1990) zurückgegriffen:

$$T_{pot} = \tau \cdot ET_{max}{}'$$

$$EP_{pot} = (1 - \tau) \cdot ET_{max}{}'$$

$$\tau = (1 - e^{-0{,}6 \cdot LAI})$$

Der Faktor τ zur Aufsplittung in Evaporation und Transpiration hängt somit wiederum von Blattflächenindex ab. Das Verhältnis von Evaporation und Transpiration ist in Abhängigkeit vom Blattflächenindex in Abbildung 4.3-7 dargestellt.

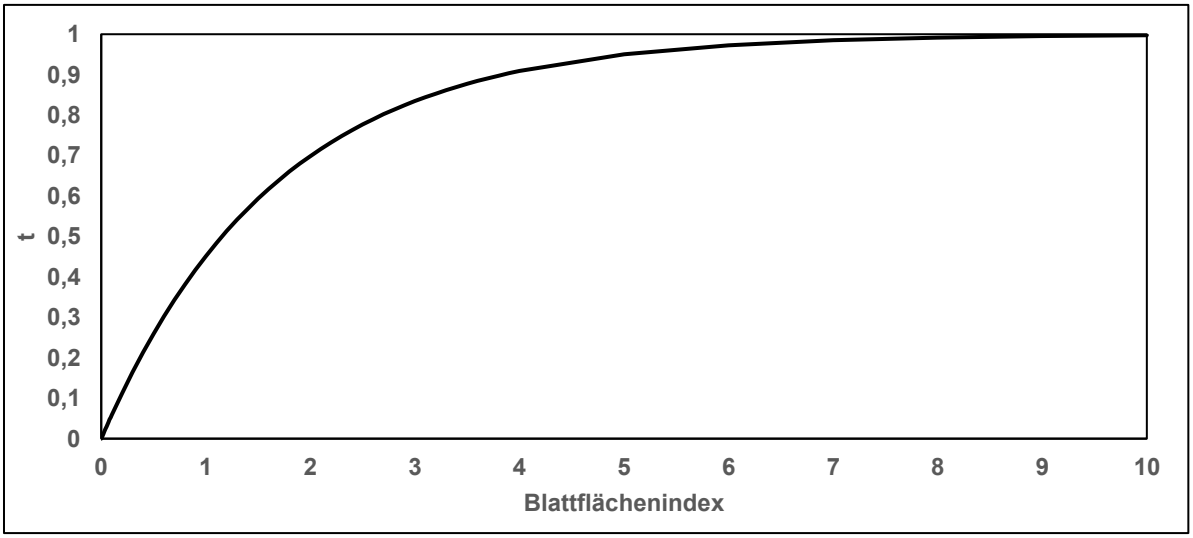

Abbildung 4.3-7: Darstellung des Verhältnisses von Evaporation und Transpiration in Abhängigkeit des Blattflächenindex.

Die tatsächliche Evaporation ergibt sich nun in Abhängigkeit der Bodenfeuchte in 5 cm Tiefe unter der Geländeoberkante (GOK):

$$EP_{real} = (-0{,}5767 \cdot \log_{10}(h_5) + 1{,}78) \cdot EP_{pot}$$

Es wird sichergestellt, dass $0 \leq EP_{real} \leq EP_{pot}$. Dies liefert für den h_5, den Druck in 5 cm unter GOK, einen gültigen Wertebereich von $22{,}5 \leq h_5 \leq 1220{,}5$, bzw. $1{,}4\,pF \leq \log_{10}(h_5) \leq 3{,}1\,pF$. Abbildung 4.3-8 ordnet diese beiden Grenzwerte und den Faktor selbst in Bezug auf die Feldkapazität und den permanenten Welkepunkt ein.

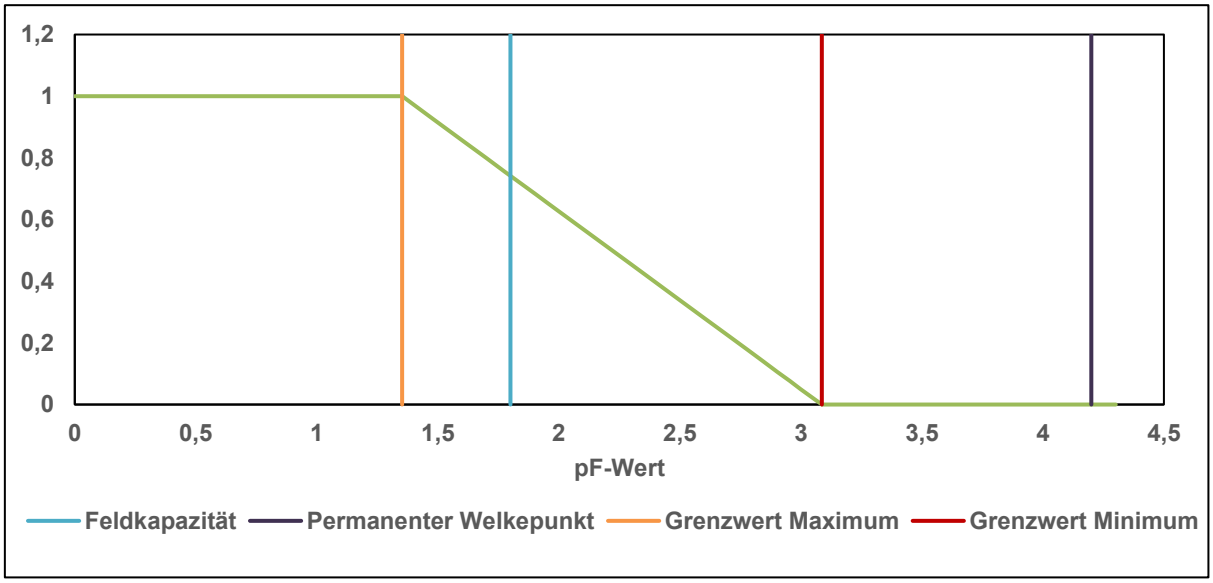

Abbildung 4.3-8: Faktor der tatsächlichen Evaporation in logarithmischer Darstellung des Drucks als pF-Wert im Verhältnis zu Feldkapazität und permanentem Welkepunkt.

Root Water Uptake (RWU) entspricht der Wasseraufnahme der Pflanze über die Wurzeln. Diese ist gleichzusetzen mit der tatsächlichen Transpiration. Aufgrund der Lufttemperatur und Luftfeuchtigkeit entsteht eine Druckdifferenz an den Blättern der Pflanze. Über das Xylem, das Wasserleitsystem der Pflanze, wird dieser Druck an die Wurzeln weitergegeben. Mit diesem Druck saugt die Pflanze nun Wasser aus dem Boden. Dadurch gibt es einen direkten Zusammenhang der Transpiration zur Wasseraufnahme der Pflanze. Dabei gilt nach dem Feddes-Jarvis-Modell (Cai et al., 2017)

$$RWU(z,t) = \alpha_F(h) \cdot T_{pot} \cdot \frac{w(z,t)}{\sum w(z,t)}$$

z = Tiefe unter der Geländeoberkante [m]

t = Zeit (für gewöhnlich Tag im Jahr um den Wachstumsprozess abzubilden) [d]

$w(z,t)$ = Wurzellängendichte in Abhängigkeit der Tiefe und Zeit [-]
$\alpha_F(h)$ = Water Stress Response Function [-]

Die Wurzellängendichte verteilt die potenzielle Transpiration anteilig auf die entsprechenden Tiefen. Die tatsächlichen Gewichte werden anhand der Diskretisierung im Grundwassermodell normiert. Dadurch, dass die Evaporation und die Transpiration, letztere durch die Water Stress Response Function, vom jeweiligen Druck abhängt, ist eine direkte Kopplung der Grundwasserneubildungsberechnung an das Grundwassermodell gegeben.

Sowohl Evaporation als auch RWU werden als Mengenrandbedingungen im Grundwassermodell in den jeweiligen Tiefen angegeben. Dabei ist es grundsätzlich möglich, dass insbesondere bei der Transpiration zu viel Wasser aus dem Boden entnommen wird. Daher wird eine Zeitschrittweite von ¼ Tag gewählt, um den tatsächlichen Wasserhaushalt im Grundwassermodell besser abbilden zu können. Es werden jedoch weiterhin Tagesmittelwerte der Lufttemperatur, der Globalstrahlung, des Niederschlags, der Evaporation und der Transpiration verwendet. Ein Tagesverlauf des Pflanzenwachstums wird somit nicht exakt abgebildet. Da die Saugspannung der Wurzeln als Randbedingung im Grundwassermodell angegeben wird, kann bei ausreichendem Abstand zur Grundwasseroberfläche Wasser nachgeliefert werden, was im Wesentlichen den Effekten des Kapillaren Aufstiegs entspricht.

4.4 Allgemeine Hinweise zur Auswertung und Darstellung der Ergebnisse

In diesem Kapitel sollen ergänzende Hinweise zur Auswertung und Darstellung im Sinne der Transparenz und besseren Nachvollziehbarkeit erläutert werden. Das Modell legt in der horizontalen Ausbreitung eines gewisse Mindestbreite zugrunde, welche für eine möglichst realistische Betrachtung des Raums um den Kabelgraben erforderlich ist (siehe auch vorherige Kapitel). Zur Beschreibung der Ergebnisse im Hinblick auf potenzielle bodenökologische Auswirkungen wurde die horizontale Ausdehnung auf den relevanten Nahbereich des Kabelgrabens reduziert. Die für die Ermittlung der in Kapitel 5 herangezogenen Werte, resultieren in einem ersten Schritt aus berechneten Tagesmittelwerten. Der Tagesmittelwert bezieht sich auf das arithmetische Mittel der Einzelwerte aus allen Kabelgräben des jeweiligen Kabeltyps über eine Breite von ca. 3,0 m unmittelbar oberhalb der Grabensohle. Somit konzentriert sich diese Datengrundlage auf den am stärksten von den Erdkabeln betroffenen Bereich, welcher sich in den horizontalen Ausmaßen zwischen der Grabensohle und der Breite der Bettungszone an deren Oberkante bewegt. Die daraus resultierenden 365 Einzelwerte (mittlere Tageswerte) bilden die Grundlage für die erzeugten Jahresverlaufsdiagramme und Boxplots, während in den Tabellen in Kapitel 5 die Jahresmittelwerte aus diesen Tages-Einzelwerten dargestellt werden.

Im vorliegenden Gutachten werden die potenziellen betriebsbedingten Auswirkungen auf den Wasserhaushalt der Böden anhand der nutzbaren Feldkapazität (nFK) als primäre Bezugsgröße beschrieben. Somit sollen mögliche Folgen auf die Wasserversorgung von bspw. Kulturpflanzen direkter kenntlich werden. Generell ist jedoch zu beachten, dass je nach den grundlegenden Kennwerten der Wasserbindung bei einer gleichen prozentualen Sättigung in Bezug auf die nFK unterschiedliche absolute Wassergehalte vorliegen können. Da es um die Beschreibung und Diskussion betriebsbedingter Effekte mit Bezug zu konkreten Tiefenstufen geht, kann dieser relative Wert als Betrachtungsgröße herangezogen werden. Um Aussagen zur quantitativ-absoluten Wassermenge im gesamten Profil zu erhalten, können im Bedarfsfall weitergehende Auswertungen ergänzt werden. In Bezug auf die in Kapitel 5 aufgezeigten Ausgangswerte ist hinzuweisen, dass negative Werte – als auch Werte > 100 % der nFK – möglich sind. Die durch das Modell ermittelte Sättigung in Bezug auf das Gesamtporenvolumen muss unter Berücksichtigung des permanenten Welkepunktes (PWP) korrigiert werden, da das in den Feinporen des Bodens gebundene Wasser nicht pflanzenverfügbar ist. Hierdurch kann es bei einer starken Austrocknung (der Wassergehalt kann in bestimmten Fällen – z. B. durch Verdunstung – auch unter den Wassergehalt des permanenten Werkepunktes sinken) zu negativen Werten in Bezug auf die nFK kommen. Bei hohen Wassergehalten (oberhalb der gesamten Feldkapazität) können sich im Umkehrschluss – v. a. bei Böden mit einer hohen Luftkapazität – auch Werte > 100 % einstellen.

Die tabellarische Darstellung und Boxplots begrenzen sich in der Darstellung auf potenzielle Abnahmen in Bezug auf die nFK. In den Tabellen wurde die Grenze zur Darstellung ermittelter Werte bei ≥ 0,1 % gewählt, d. h. rechnerisch ermittelte Werte < 0,1 % werden nicht ausgewiesen. Bei den Temperaturen erfolgt in der tabellarischen Ergebnisdarstellung eine Rundung auf die erste Nachkommastelle.

5. Wärmemodellierung und Ergebnisse

In den nachfolgenden Tabellen sind ausschließlich die Kabelauslastungen von 70 % und 85 % dargestellt, da diese die betriebstypischen Lastfälle abbilden. Die Nutzungsarten wurden in der Darstellung innerhalb der textlichen Ausarbeitung des Gutachtens auf Getreide und Mais beschränkt, da diese beiden Kulturen ein breites Spektrum der zu erwartenden Effekte (auch im Sinne der höchsten Temperaturdifferenzen) abdecken und damit als repräsentativ für die maßgeblichen Auswirkungspotenziale angesehen werden können. Die Ergebnisse für den Kabeltyp 1 stehen direkt repräsentativ für die geplante HGÜ-Verbindung Rhein-Main-Link (siehe auch Kap. 3.3).

5.1 Leitprofil LP_01

Bei dem Leitprofil LP_01 handelt es sich um ein Typusprofil der Bodenlandschaft der Marschböden. Bodentypologisch können hier vermehrt Kleimarschen verortet werden. Charakteristisch für dieses Profil sind die hohen Feinanteile (Bodenarten-Gruppe Tonschluffe) sowie die humose Ausprägung im gesamten Bodenprofil (mittel humos im Oberboden; sehr schwach bis schwach humos im Unterboden bzw. Untergrund). Typisch für die Marschböden ist zudem die überwiegend geringe Trockenrohdichte (s. Tabelle 5.1-1).

Tabelle 5.1-1: Profilaufbau des Leitprofils LP_01.

Bodenlandschaft (Leitprofil)	Horizont	Von [dm]	Bis [dm]	Bodenart KA 5	Humus [%]	TRD [g/cm³]
Marschböden (z. B. Kleimarsch)	Ap	0	3	Lu	3,0	1,25
	rGo	3	8	Lu	0,5	1,48
	Go	8	10	Lu	1,5	1,25
	eGo	10	12	Lu	1,5	1,25
	eGr	12	20	Lu	1,5	1,25
	ZFSV	-	-	-	-	1,69

5.1.1 Modellbeschreibung und Parametrisierung LP_01

Die für die numerische Modellierung zentralen Parameter sind stark von den bodenphysikalischen Randbedingungen des Profils (Bodenart, Humusgehalte, Lagerungsdichte) sowie den Kennwerten der Wasserbindung abhängig. Die Kennwerte der Wasserbindung können der nachfolgenden Tabelle 5.1-2 entnommen werden. Die thermischen Eigenschaften können für die verschiedenen Wassergehaltsstufen (Totwassergehalt, Feldkapazität, nutzbare Feldkapazität und vollständigen Sättigung) anhand der Wärmeleitfähigkeit sowie der volumetrischen Wärmekapazität mit Hilfe der Tabelle 5.1-3 und Tabelle 5.1-4 beschrieben werden. Aufgrund der zuvor beschriebenen bodenphysikalischen Grundparameter (v.a. überwiegend geringe Lagerungsdichte sowie humose Anteile) weist das Profil tendenziell ungünstige Eigenschaften in Bezug auf die Wärmeableitung auf.

Tabelle 5.1-2: Rechnerisch bestimmte volumetrische Wassergehalte und abgeleitete Durchlässigkeit in der gesättigten Zone für das Leitprofil LP_01.

Von [dm]	Bis [dm]	GPV [Vol.-%]	nFK FÄ [Vol.-%]	FK FÄ [Vol.-%]	TOT FÄ [Vol.-%]	Kf-Wert nach Renger [cm/d]
0	3	64,0	20,0	41,0	21,0	50,0
3	8	43,0	13,0	32,0	19,0	20,0
8	10	58,0	18,5	38,5	20,0	42,5
10	12	58,0	18,5	38,5	20,0	42,5
12	20	58,0	18,5	38,5	20,0	42,5
ZFSV		35,0	-	-	-	0,0864

Tabelle 5.1-3: Volumetrische Wärmekapazität und spezifische Wärme bei verschiedenen Wassergehalten für das Leitprofil LP_01.

Von [dm]	Bis [dm]	Cv θs [MJ/(m³*K)]	Cv pF 1,8 [MJ/(m³*K)]	Cv pF 4,2 [MJ/(m³*K)]	c_s [W*s/(kg*K)]	c_w [W*s/(kg*K)]
0	3	2,23	1,86	1,43	2613	1873
3	8	2,22	1,98	1,65	1437	2365
8	10	2,21	1,87	1,45	2147	2005
10	12	2,21	1,87	1,45	2147	2005
12	15	2,21	1,87	1,45	2147	2005
15	20	2,21	1,87	1,45	2398	1744
ZFSV		-	-	-	1233	2485

Tabelle 5.1-4: Wärmeleitfähigkeit bei verschiedenen Wassergehalten für das Leitprofil LP_01.

Von [dm]	Bis [dm]	WLFK θs [W/(m*K)]	WLFK pF 1,8 [W/(m*K)]	WLFK pF 4,2 [W/(m*K)]	λ_s [W/(m*K)]	λ_w [W/(m*K)]
0	3	1,29	1,07	0,78	4,2724	1,0631*
3	8	1,69	1,48	1,14	4,4203	1,5630*
8	10	1,34	1,12	0,82	3,9952	1,1385*
10	12	1,34	1,12	0,82	3,9952	1,1385*
12	15	1,34	1,12	0,82	3,9952	1,1385*
15	20	1,34	1,12	0,82	1,6325	1,1282
ZFSV		-	-	-	1,2346	5,3254

Für die hydraulische Randbedingung wird ein Potentialgefälle von $4{,}96 \cdot 10^{-4}$ m / m bei einem Flurabstand von 1,50 m angenommen. Die Geländeoberkante liegt bei 3 m und der Breitengrad bei 54,02 °N. Für die Klimadaten wird die Klimastation mit der Stations-ID 1200 verwendet. Die Jahresniederschlagssumme 2019 betrug 690 mm und die tatsächliche Evapotranspiration 433 mm (Getreide), bzw. 278 mm (Mais). Das langjährige Mittel der Grundwassertemperatur liegt bei 9,49 °C und die Globalstrahlung 2019 bei 116 W / m². Es ergibt sich eine jährliche Sickerwasserrate der Grundwasserneubildung von 124 mm (Getreide), bzw. 271 mm (Mais).

Tabelle 5.1-5: Van-Genuchten-Parameter für das Leitprofil LP_01.

Von [dm]	Bis [dm]	θ_r [-]	θ_s [-]	α [1/hPa]	n [-]	x [-]	K_0 [cm/d]
0	3	0,0834	0,8438	0,04321	1,16518	-3,227	82,7
3	8	0,1241	1,0000	0,04321	1,16518	-3,227	82,7
8	10	0,0921	0,8793	0,04321	1,16518	-3,227	82,7
10	12	0,0921	0,8793	0,04321	1,16518	-3,227	82,7
12	20	0,0921	0,8793	0,04321	1,16518	-3,227	82,7
ZFSV		0,0000	0,9629	0,04321	1,29000	-3,227	0,168

5.1.2 Modellierungsergebnisse LP_01

Im Jahresmittel ist im Oberboden (30 cm), je nach Lastfall, Kabeltyp und Nutzungsart, mit einer Temperaturzunahme von max. 2,0 K zu rechnen. Bis zur häufig als Unterkante der Hauptwurzelzone anzunehmenden Tiefe von 60 cm zeigen sich Differenzen von bis zu 3,4 K. Im tieferen Unterboden steigen die Temperaturzunahmen auf bis zu 5 K (90 cm) bzw. 7,2 K (120 cm) an. Die Maximalwerte werden bei einer Kabelauslastung von 85 % erreicht. Bei einer Kabellast von 70 % liegen die höchsten Jahresmittelwerte gemäß Tabelle 5.1-6 gemäß v. a. im Unterboden deutlich darunter (+ 1,3 K in 30 cm, + 2,2 K in 60 cm, + 3,3 K in 90 cm, + 4,9 K in 120 cm).

Tabelle 5.1-6: Mittlere betriebsbedingte Differenz der Bodentemperatur [K] in Abhängigkeit von Kabeltyp, Tiefenstufen, Nutzungsart und Lastfällen.

Kabeltyp	Kabel-auslastung	Nutzungsart	30 [cm]	60 [cm]	90 [cm]	120 [cm]
Typ 1	70 %	Getreide	1,3	2,2	3,3	4,7
Typ 1	70 %	Mais	1,3	2,2	3,2	4,5
Typ 1	85 %	Getreide	2,0	3,2	4,8	6,9
Typ 1	85 %	Mais	1,9	3,2	4,7	6,7
Typ 2	70 %	Getreide	1,4	2,3	3,4	4,9
Typ 2	70 %	Mais	1,3	2,2	3,3	4,7
Typ 2	85 %	Getreide	2,0	3,4	5,0	7,2
Typ 2	85 %	Mais	2,0	3,3	4,8	6,9

Mittlere Erwärmung [K]	≤ 1,0	≤ 3,0	≤ 5,0	≤ 7,5	≤ 10,0	> 10,0

Tabelle 5.1-7: Mittlere betriebsbedingte Differenz [Diff.-nFK %] der Wassergehalte in Bezug auf die nFK des Bodens ohne Last [nFK %] in Abhängigkeit von Kabeltyp, Tiefenstufen, Nutzungsart und Lastfällen.

Kabel-typ	**Kabel-auslas-tung**	**Nutzungs-art**	**Messtiefe [cm] / nFK & Diff.-nFK [%]**							
			30		**60**		**90**		**120**	
			nFK	Diff.-nFK	nFK	Diff.-nFK	nFK	Diff.-nFK	nFK	Diff.-nFK
Typ 1	70 %	Getreide	139,0	-0,1	105,1	-0,1	99,7	-	86,5	-
Typ 1	70 %	Mais	170,9	-0,1	152,5	-0,1	167,6	-	179,3	-
Typ 1	85 %	Getreide	139,0	-0,2	105,1	-0,2	99,7	-	86,5	-
Typ 1	85 %	Mais	170,9	-0,2	152,5	-0,2	167,6	-	179,3	-
Typ 2	70 %	Getreide	139,4	-0,2	104,5	-0,3	96,0	-	99,2	-
Typ 2	70 %	Mais	170,2	-0,1	151,3	-	166,8	-	176,2	-
Typ 2	85 %	Getreide	139,4	-0,3	104,5	-0,5	96,0	-0,1	99,2	-
Typ 2	85 %	Mais	170,2	-0,2	151,3	-0,1	166,8	-	176,2	-

Die Auswirkungen auf die mittlere betriebsbedingte Differenz in Bezug auf die nutzbare Feldkapazität fallen bei diesem Leitprofil sehr gering aus. Insbesondere im Bereich der Hauptwurzelzone liegen die nutzbaren Feldkapazitäten im Jahresmittel ohnehin bereits im Bereich einer sehr guten Wasserversorgung (bis hin zu einem möglichen Sauerstoffmangel aufgrund hoher Wassergehalte), welche auch durch die betriebsbedingten Effekte nur äußerst geringfügig (< 1 % der nFK) beeinflusst werden.

5.2 Leitprofile LP_02

Das Leitprofil LP_02 repräsentiert ein typisches Profil der Bodenlandschaft von Hoch- und Niedermoorböden. Bodentypologisch überwiegen in diesem Fall Niedermoore. Charakteristisch für das Profil sind mächtige Torfschichten, die in diesem Fall bis in eine Tiefe von etwa 20 dm reichen. Eine weitere typische Eigenschaft der Niedermoore ist die sehr geringe Trockenrohdichte (s. Tabelle 5.2-1).

Tabelle 5.2-1: Profilaufbau des Leitprofils LP_02.

Bodenlandschaft (Leitprofil)	Horizont	Von [dm]	Bis [dm]	Bodenart KA 5	Humus [%]	TRD [g/cm³]
Hoch- und Nieder-Moorböden (z. B. Niedermoor)	nHv	0	0,5	Hn, z5, SV5	80	0,3
	nHw1	0,5	5	Hn, z4, SV4	92	0,2
	nHw2	5	10	Hn, z3, SV4	96	0,2
	nHr	10	15	Hn, z3, SV3	92	0,15
	nHr	15	20	Hn, z3, SV3	92	0,1
	ZFSV	-	-	-	-	1,69

5.2.1 Modellbeschreibung und Parametrisierung LP_02

Die für die numerische Modellierung wichtigen Parameter hängen maßgeblich von den bodenphysikalischen Eigenschaften des Profils ab, wie Boden- oder Torfart, Humusgehalt und Lagerungsdichte, sowie von den Kennwerten der Wasserbindung. Die Werte zur Wasserbindung sind in Tabelle 5.2-2 aufgeführt. Die thermischen Eigenschaften für verschiedene Wassergehaltsstufen, darunter Totwassergehalt, Feldkapazität, nutzbare Feldkapazität und vollständige Sättigung, lassen sich anhand der volumetrischen Wärmekapazität und der Wärmeleitfähigkeit beschreiben, wie in Tabelle 5.2-3 und Tabelle 5.2-4 und dargestellt. Aufgrund der zuvor beschriebenen bodenphysikalischen Grundparameter eines Torfprofils (sehr geringe Lagerungsdichte und organische Bodenschichten) weist das Profil sehr ungünstige Eigenschaften in Bezug auf die Wärmeableitung auf.

Tabelle 5.2-2: Rechnerisch bestimmte volumetrische Wassergehalte und abgeleitete Durchlässigkeit in der gesättigten Zone für das Leitprofil LP_02.

Von [dm]	Bis [dm]	GPV [Vol.-%]	nFK FÄ [Vol.-%]	FK FÄ [Vol.-%]	TOT FÄ [Vol.-%]	Kf-Wert nach Renger [cm/d]
0	0,5	82	25,9	44,4	18,5	15
0,5	5	90	54,1	75,9	21,8	1
5	10	90	56,3	76,7	20,4	5
10	15	94	35,9	65,5	29,6	25
15	20	94	42,1	72,6	30,5	25
ZFSV		35	-	-	-	0,0864

Tabelle 5.2-3: Volumetrische Wärmekapazität und spezifische Wärme bei verschiedenen Wassergehalten für das Leitprofil LP_02.

Von [dm]	Bis [dm]	Cv θs [MJ/(m³*K)]	Cv pF 1,8 [MJ/(m³*K)]	Cv pF 4,2 [MJ/(m³*K)]	c_s [W*s/(kg*K)]	c_w [W*s/(kg*K)]
0	0,5	3,99	2,42	1,33	10355	4191
0,5	5	4,13	3,54	1,27	17907	4191
5	10	4,13	3,58	1,22	18902	4169
10	15	4,17	2,98	1,47	27278	4175
15	20	4,17	3,27	1,51	36060	4206
ZFSV		-	-	-	1233	2485

Tabelle 5.2-4: Wärmeleitfähigkeit bei verschiedenen Wassergehalten für das Leitprofil LP_02.

Von [dm]	Bis [dm]	WLFK θs [W/(m*K)]	WLFK pF 1,8 [W/(m*K)]	WLFK pF 4,2 [W/(m*K)]	λ_s [W/(m*K)]	λ_w [W/(m*K)]
0	0,5	0,55	0,36	0,2	0,5446	0,5512
0,5	5	0,55	0,49	0,2	0,8812	0,5132
5	10	0,55	0,49	0,19	0,8449	0,5172
10	15	0,57	0,44	0,25	0,4561	2,3544
15	20	0,57	0,48	0,26	2,9106	0,4206
ZFSV		-	-	-	1,2346	5,3254

Für die hydraulische Randbedingung wird ein Potentialgefälle von $1{,}57 \cdot 10^{-3}$ m / m bei einem Flurabstand von 1,00 m angenommen. Die Geländeoberkante liegt bei 5,25 m und der Breitengrad bei 53,5 °N. Für die Klimadaten wird die Klimastation mit der Stations-ID 704 verwendet Die Jahresniederschlagssumme 2019 betrug 785 mm und die tatsächliche Evapotranspiration 453 mm (Getreide), bzw. 294 mm (Mais). Die Grundwassertemperatur als das langjährige Mittel liegt bei 9,69 °C und die Globalstrahlung 2019 bei 105 W / m². Es ergibt sich eine jährliche Sickerwasserrate der Grundwasserneubildung von 92 mm (Getreide), bzw. 218 mm (Mais).

Tabelle 5.2-5: Van-Genuchten-Parameter für das Leitprofil LP_02.

Von [dm]	**Bis [dm]**	**θ_r [-]**	**θ_s [-]**	**α [1/hPa]**	**n [-]**	**x [-]**	**K_0 [cm/d]**
0	0,5	0,1707	0,6098	0,0140	1,386	2,132	17,8
0,5	5	0,0011	0,8889	0,0050	1,3	-1,021	1,13
5	10	0,0011	0,8889	0,0040	1,33	2,597	7,15
10	15	0,0011	0,7894	0,0230	1,155	-1,196	64,0
15	20	0,0011	0,8457	0,0130	1,18	-2,287	58,0
ZFSV		0	0,9629	0,04321	1,29	-3,227	0,168

Aufgrund der Auswirkungen sowie der im Bereich dieser Substrateinheiten besonders sensiblen Böden wurden für das Leitprofil 02 weitergehende Varianten zur Minderung der betriebsbedingten Auswirkungen untersucht. Neben der Erhöhung der Kabelachsabstände besteht die Möglichkeit die betriebsbedingten Temperaturanstiege durch einen Bodenaustausch im Bereich der Bettungszone zu mindern. Dabei wird das torfige Material, mit besonders ungünstigen Eigenschaften im Hinblick auf die Wärmeableitung, durch vorwiegend mineralisches Material mit einer höheren Wärmeleitfähigkeit ersetzt. Für die Modellierung wurde im Sinne einer ökologisch optimierten sowie thermisch konservativen Betrachtungsweise ein Austausch mit möglichst gebietstypischem Material angenommen. Für den Bodenaustausch zwischen Bettungszone und Oberboden wurden die bodenphysikalischen Eigenschaften des Kleibodens gemäß des rGo-Horizontes im Profil LP_01 angenommen. Darüberstehend wurde die Überdeckung anhand eines stark humosen Oberbodens gemäß des Ah-Horizontes im Profil LP_03 angesetzt.

5.2.2 Modellierungsergebnisse LP_02 (ohne Maßnahmen)

Im Jahresmittel ist im Oberboden (30 cm), je nach Lastfall, Kabeltyp und Nutzungsart, mit einer Temperaturzunahme von max. knapp 3,0 K zu rechnen. Bis zur häufig als Unterkante der Hauptwurzelzone anzunehmenden Tiefe von 60 cm zeigen sich Differenzen von bis zu 5,5 K. Im tieferen Unterboden steigen die Temperaturzunahmen auf bis zu 8,2 K (90 cm) bzw. 10,7 K (120 cm) an. Die Maximalwerte werden bei einer Kabelauslastung von 85 % erreicht. Bei einer Kabellast von 70 % liegen die höchsten Jahresmittelwerte gemäß Tabelle 5.2-6 v. a. im Unterboden deutlich darunter (+ 1,7 K in 30 cm, + 3,4 K in 60 cm, + 5,6 K in 90 cm, + 7,3 K in 120 cm).

Tabelle 5.2-6: Mittlere betriebsbedingte Differenz der Bodentemperatur [K] in Abhängigkeit von Kabeltyp, Tiefenstufen, Nutzungsart und Lastfällen.

Kabeltyp	Kabel-auslastung	Nutzungsart	30 [cm]	60 [cm]	90 [cm]	120 [cm]
Typ 1	70 %	Getreide	2,0	3,7	5,6	7,3
Typ 1	70 %	Mais	1,9	3,6	5,3	6,8
Typ 1	85 %	Getreide	2,9	5,5	8,2	10,7
Typ 1	85 %	Mais	2,8	5,3	7,9	9,9
Typ 2	70 %	Getreide	1,8	3,5	5,1	6,7
Typ 2	70 %	Mais	1,7	3,4	5,0	6,3
Typ 2	85 %	Getreide	2,7	5,1	7,6	9,9
Typ 2	85 %	Mais	2,6	5,0	7,3	9,3

Mittlere Erwärmung [K]	≤ 1,0	≤ 3,0	≤ 5,0	≤ 7,5	≤ 10,0	> 10,0

Tabelle 5.2-7: Mittlere betriebsbedingte Differenz [Diff.-nFK %] der Wassergehalte in Bezug auf die nFK des Bodens ohne Last [nFK %] in Abhängigkeit von Kabeltyp, Tiefenstufen, Nutzungsart und Lastfällen.

Kabel-typ	**Kabel-auslas-tung**	**Nutzungs-art**	**Messtiefe [cm] / nFK & Diff.-nFK [%]**							
			30		**60**		**90**		**120**	
			nFK	Diff.-nFK	nFK	Diff.-nFK	nFK	Diff.-nFK	nFK	Diff.-nFK
Typ 1	70 %	Getreide	82,6	-	87,0	-	89,5	-	84,5	-
Typ 1	70 %	Mais	100,6	-	103,2	-	113,4	-	159,7	-
Typ 1	85 %	Getreide	82,6	-	87,0	-	89,5	-	84,5	-
Typ 1	85 %	Mais	100,6	-	103,2	-	113,4	-	159,7	-
Typ 2	70 %	Getreide	83,8	-	89,1	-	92,0	-	26,0	-
Typ 2	70 %	Mais	100,4	-	102,5	-	113,0	-	128,9	-
Typ 2	85 %	Getreide	83,8	-	89,1	-	92,0	-	26,0	-
Typ 2	85 %	Mais	100,4	-	102,5	-	113,0	-	128,9	-0,2

Insbesondere im Bereich der Moore lassen sich, bei ohnehin sehr hoch anstehenden Grundwasserständen, im Jahresmittel keine erkennbaren Veränderungen in Bezug auf die Wassergehalte erwarten. In 120 cm Tiefe können, v. a. bei der Nutzungsart Mais, vereinzelt Ausreißer in Bezug auf einzelne Tageswerte auftreten, welche sich jedoch auch in Bezug auf den gesamtheitlichen Betrachtungszeitraum, v. a. in der Vegetationsperiode, nicht langfristig mitteilen.

5.2.3 Modellierungsergebnisse LP_02 (1,9 m Achsabstand)

Die Erweiterung der Kabelachsabstände wird als Option zur Minderung der betriebsbedingten Wärmeemissionen im Bereich stark organischer Böden in Betracht gezogen. Die nachfolgend dargestellten Ergebnisse zeigen die Ergebnisse des numerischen Modells unter der Annahme eines Kabelabstandes von jeweils 1,9 m. Im Vergleich zur zuvor beschriebenen Variante gemäß der allgemeinen Regelbauweise zeigt sich eine deutliche Reduktion der Temperaturzunahmen. Die stärksten Effekte lassen sich beim Kabeltyp 1 feststellen (-0,5 bis -0,7 K in 30 cm, -0,9 bis -1,4 K in 60 cm, -1,3 bis -2,1 K in 90 cm sowie -1,7 bis -2,7 K in 120 cm). Beim Kabeltyp 2 sind die Minderungseffekte deutlich geringer (im Bereich von -0,1 K in 30 cm bis -0,9 K in 120 cm).

In Bezug auf die Wassergehalte sind hinsichtlich des Jahresmittels keine Auswirkungen erwartbar (siehe Tabelle 5.2-9). Temporär sind sowohl kurzfristige Zu- als auch Abnahmeeffekte denkbar.

Tabelle 5.2-8: Mittlere betriebsbedingte Differenz der Bodentemperatur [K] in Abhängigkeit von Kabeltyp, Tiefenstufen, Nutzungsart und Lastfällen.

Kabeltyp	**Kabel-auslastung**	**Nutzungsart**	**30 [cm]**	**60 [cm]**	**90 [cm]**	**120 [cm]**
Typ 1	70 %	Getreide	1,4	2,7	4,1	5,4
Typ 1	70 %	Mais	1,4	2,7	4,0	5,1
Typ 1	85 %	Getreide	2,2	4,1	6,1	8,0
Typ 1	85 %	Mais	2,1	4,0	5,9	7,5
Typ 2	70 %	Getreide	1,7	3,2	4,7	6,1
Typ 2	70 %	Mais	1,6	3,2	4,6	5,9
Typ 2	85 %	Getreide	2,5	4,7	7,0	9,0
Typ 2	85 %	Mais	2,4	4,7	6,8	8,7

Mittlere Erwärmung [K]	≤ 1,0	≤ 3,0	≤ 5,0	≤ 7,5	≤ 10,0	> 10,0

Tabelle 5.2-9: Mittlere betriebsbedingte Differenz [Diff.-nFK %] der Wassergehalte in Bezug auf die nFK des Bodens ohne Last [nFK %] in Abhängigkeit von Kabeltyp, Tiefenstufen, Nutzungsart und Lastfällen.

Kabel-typ	Kabel-auslas-tung	Nutzungs-art	Messtiefe [cm] / nFK & Diff.-nFK [%]							
			30		60		90		120	
			nFK	Diff.-nFK	nFK	Diff.-nFK	nFK	Diff.-nFK	nFK	Diff.-nFK
Typ 1	70 %	Getreide	82,0	-	86,2	-	88,6	-	76,5	-
Typ 1	70 %	Mais	100,4	-	102,9	-	113,3	-	156,9	-
Typ 1	85 %	Getreide	82,0	-	86,2	-	88,6	-	76,5	-
Typ 1	85 %	Mais	100,4	-	102,9	-	113,3	-	156,9	-
Typ 2	70 %	Getreide	83,4	-	88,5	-	91,3	-	24,8	-
Typ 2	70 %	Mais	100,6	-	104,0	-	112,9	-	127,7	-
Typ 2	85 %	Getreide	83,4	-	88,5	-	91,3	-	24,8	-
Typ 2	85 %	Mais	100,6	-	104,0	-	112,9	-	127,7	-

5.2.4 Modellierungsergebnisse LP_02 (Bodenaustausch)

Wie in Kapitel 5.2.1 erläutert, besteht eine weitere Möglichkeit zur Reduzierung der Bodenerwärmung infolge des Kabelbetriebs durch einen Austausch der stark organischen Böden im Bereich des Kabelgrabens. Es wird darauf hingewiesen, dass es sich hierbei um eine Situation im Sinne des Variantenvergleichs für die bodenthermischen Effekte handelt. Eine bodenschutzfachliche Einschätzung des Bodenaustauschs (z. B. in Bezug auf die allgemeinen Standorteigenschaften, z.B. Gefügekennwerte) ist nicht Gegenstand dieses Gutachtens.

Die Effekte des Bodenaustauschs auf die betriebsbedingte Erwärmung sind v. a. im Unterboden sehr deutlich erkennbar (vgl. Tabelle 5.2-10). Während die Temperaturabnahmen im Oberboden mit dem Szenario des erweiterten Achsabstandes vergleichbar sind (-0,1 bis -0,6 K im Vergleich zur Variante ohne Maßnahmen) zeigt sich im Unterboden eine deutlich stärke Reduktion der Bodenerwärmung (- 1,0 bis -2,4 K in 60 cm, -1,8 bis -3,5 K in 90 cm sowie -2,2 bis -4,7 K in 120 cm). Somit liegt die Temperaturerhöhung in 120 cm Tiefe je nach Lastfall, Nutzung und Kabeltyp noch bei +4,0 bis +6,2 K. In 90 cm Tiefe sind bereits keine Temperaturerhöhungen mehr > 5 K zu erwarten. In der Hauptwurzelzone haben sich die Auswirkungen auf ca. 2 bis 3,5 K mittlere Temperaturzunahme reduziert. Auch hier zeigt sich ein Trend zu deutlicheren Auswirkungen der Maßnahme Bodenaustausch für den Kabeltyp 1.

Hinsichtlich der Wassergehalte zeigen sich unter Berücksichtigung der Jahresmittelwerte erwartungsgemäß weiterhin keine negativen Auswirkungen bei diesen grundwasserbeeinflussten Böden (siehe Tabelle 5.2-11).

Tabelle 5.2-10: Mittlere betriebsbedingte Differenz der Bodentemperatur [K] in Abhängigkeit von Kabeltyp, Tiefenstufen, Nutzungsart und Lastfällen.

Kabeltyp	**Kabel-auslastung**	**Nutzungsart**	**30 [cm]**	**60 [cm]**	**90 [cm]**	**120 [cm]**
Typ 1	70 %	Getreide	1,5	2,1	3,2	4,1
Typ 1	70 %	Mais	1,5	2,1	3,1	4,0
Typ 1	85 %	Getreide	2,3	3,1	4,7	6,0
Typ 1	85 %	Mais	2,3	3,1	4,6	5,9
Typ 2	70 %	Getreide	1,6	2,4	3,3	4,2
Typ 2	70 %	Mais	1,6	2,4	3,2	4,1
Typ 2	85 %	Getreide	2,4	3,5	4,9	6,2
Typ 2	85 %	Mais	2,4	3,5	4,7	6,0

Mittlere Erwärmung [K]	≤ 1,0	≤ 3,0	≤ 5,0	≤ 7,5	≤ 10,0	> 10,0

Tabelle 5.2-11: Mittlere betriebsbedingte Differenz [Diff.-nFK %] der Wassergehalte in Bezug auf die nFK des Bodens ohne Last [nFK %] in Abhängigkeit von Kabeltyp, Tiefenstufen, Nutzungsart und Lastfällen.

Kabel-typ	**Kabel-auslas-tung**	**Nutzungs-art**	**Messtiefe [cm] / nFK & Diff.-nFK [%]**							
			30		**60**		**90**		**120**	
			nFK	Diff.-nFK	nFK	Diff.-nFK	nFK	Diff.-nFK	nFK	Diff.-nFK
Typ 1	70 %	Getreide	83,3	-	71,2	-	88,2	-	91,4	-
Typ 1	70 %	Mais	99,9	-	90,9	-	114,9	-	161,3	-
Typ 1	85 %	Getreide	83,3	-	71,2	-	88,2	-	91,4	-
Typ 1	85 %	Mais	99,9	-	90,9	-	114,9	-	161,3	-
Typ 2	70 %	Getreide	78,2	-	79,7	-	83,6	-	113,8	-
Typ 2	70 %	Mais	88,2	-	93,5	-	105,5	-	164,3	-
Typ 2	85 %	Getreide	78,2	-	79,7	-	83,6	-	113,8	-
Typ 2	85 %	Mais	88,2	-	93,5	-	105,5	-	164,3	-

5.2.5 Modellierungsergebnisse LP_02 (1,9 m Achsabstand + Bodenaustausch)

Der Vollständigkeit halber wurde ein weiteres Szenario betrachtet, welches beide Maßnahmen (erhöhter Kabelachsabstand sowie Bodenaustausch) kombiniert. Wie der Tabelle 5.2-12 entnommen werden kann würden sich die Temperaturerhöhungen in diesem Fall sehr stark reduzieren – die Differenzbeträge fallen niedriger aus als in diversen Leitprofilen mit rein mineralischen Böden. Im Unterboden bei 120 cm wurden noch maximale Temperaturanstiege von 2,5 bis 5,3 K ermittelt. Im Bereich der Hauptwurzelzone klingen diese bereits auf nahezu durchgängig auf ca. 3,0 K ab, während im Oberboden Temperaturanstiege von ca. 1,0 bis 2,0 K erwartbar wären.

Weiterhin zeigen sich auch für diese Variante keine negativen Auswirkungen im Hinblick auf die Jahresmittelwerte der Bodenwassergehalte (siehe Tabelle 5.2-13).

Tabelle 5.2-12: Mittlere betriebsbedingte Differenz der Bodentemperatur [K] in Abhängigkeit von Kabeltyp, Tiefenstufen, Nutzungsart und Lastfällen.

Kabeltyp	Kabel-auslastung	Nutzungsart	30 [cm]	60 [cm]	90 [cm]	120 [cm]
Typ01	70 %	Getreide	1,0	1,5	2,1	2,7
Typ01	70 %	Mais	1,0	1,4	1,9	2,5
Typ01	85 %	Getreide	1,4	2,2	3,0	3,9
Typ01	85 %	Mais	1,4	2,1	2,9	3,7
Typ02	70 %	Getreide	1,5	2,2	2,9	3,7
Typ02	70 %	Mais	1,4	2,0	2,7	3,4
Typ02	85 %	Getreide	2,1	3,1	4,2	5,3
Typ02	85 %	Mais	2,1	3,0	4,0	5,1

Mittlere Erwärmung [K]	≤ 1,0	≤ 3,0	≤ 5,0	≤ 7,5	≤ 10,0	> 10,0

Tabelle 5.2-13: Mittlere betriebsbedingte Differenz [Diff.-nFK %] der Wassergehalte in Bezug auf die nFK des Bodens ohne Last [nFK %] in Abhängigkeit von Kabeltyp, Tiefenstufen, Nutzungsart und Lastfällen.

Kabel-typ	Kabel-auslas-tung	Nutzungs-art	Messtiefe [cm] / nFK & Diff.-nFK [%]							
			30		60		90		120	
			nFK	Diff.-nFK	nFK	Diff.-nFK	nFK	Diff.-nFK	nFK	Diff.-nFK
Typ 1	70 %	Getreide	83,5	-	84,8	-	89,0	-	92,8	-
Typ 1	70 %	Mais	100,7	-	107,2	-	115,7	-	162,8	-
Typ 1	85 %	Getreide	83,5	-	84,8	-	89,0	-	92,8	-
Typ 1	85 %	Mais	100,7	-	107,2	-	115,7	-	162,8	-
Typ 2	70 %	Getreide	76,5	-	77,0	-	80,1	-	113,6	-
Typ 2	70 %	Mais	88,2	-	92,0	-	102,5	-	158,1	-
Typ 2	85 %	Getreide	76,5	-	77,0	-	80,1	-	113,6	-
Typ 2	85 %	Mais	88,2	-	92,0	-	102,5	-	158,1	-

5.2.6 Modellierungsergebnisse LP_02 (Veränderung des ZFSV-Körpers auf 0,98 m)

Eine weitere Maßnahme zur Reduzierung der betriebsbedingten Wärmeemissionen in Bereichen mit stark organischen Böden ist die Vergrößerung des ZFSV-Körpers. Die nachfolgend dargestellten Ergebnisse basieren auf numerischen Modellrechnungen unter der Annahme einer ZFSV-Mächtigkeit von jeweils 0,98 m. Die Ergebnisse sind vergleichbar mit den einzelnen Maßnahmen des Bodenaustausches oder des erweiterten Kabelabstands von 190 cm (vgl. Tabelle 5.2-14). Die ausgeprägtesten Minderungswirkungen treten beim Kabeltyp 1 auf. Hier ergeben sich Temperaturreduzierungen von etwa 0,5 bis 0,7 K in 30 cm Tiefe, 0,8 bis 1,3 K in 60 cm, 1,7 bis 2,6 K in 90 cm sowie 2,7 bis 4,2 K in 120 cm Tiefe. Beim Kabeltyp 2 fallen die Effekte deutlich geringer aus und bewegen sich in einem Bereich von etwa 0,1 K in 30 cm bis zu 1,4 K in 120 cm Tiefe.

Hinsichtlich der Wassergehalte sind im Jahresmittel keine relevanten Veränderungen zu erwarten, wie Tabelle 5.2-15 zeigt. Kurzfristig können jedoch temporär sowohl geringe Zu- als auch Abnahmeeffekte auftreten.

Tabelle 5.2-14: Mittlere betriebsbedingte Differenz der Bodentemperatur [K] in Abhängigkeit von Kabeltyp, Tiefenstufen, Nutzungsart und Lastfällen.

Typ	Kabel-auslastung	Nutzungsart	30 [cm]	60 [cm]	90 [cm]	120 [cm]
Typ 1	70 %	Getreide	1,5	2,9	3,9	4,4
Typ 1	70 %	Mais	1,4	2,7	3,6	4,1
Typ 1	85 %	Getreide	2,2	4,3	5,7	6,6
Typ 1	85 %	Mais	2,1	4,0	5,3	6,0
Typ 2	70 %	Getreide	1,7	3,3	4,9	5,7
Typ 2	70 %	Mais	1,6	3,1	4,7	5,4
Typ 2	85 %	Getreide	2,5	4,8	7,3	8,5
Typ 2	85 %	Mais	2,3	4,6	6,9	8,0

Mittlere Erwärmung [K]	≤ 1,0	≤ 3,0	≤ 5,0	≤ 7,5	≤ 10,0	> 10,0

Tabelle 5.2-15: Mittlere betriebsbedingte Differenz [Diff.-nFK %] der Wassergehalte in Bezug auf die nFK des Bodens ohne Last [nFK %] in Abhängigkeit von Kabeltyp, Tiefenstufen, Nutzungsart und Lastfällen.

Kabel-typ	**Kabel-auslas-tung**	**Nutzungs-art**	**Messtiefe [cm] / nFK & Diff.-nFK [%]**							
			30		**60**		**90**		**120**	
			nFK	Diff.-nFK	nFK	Diff.-nFK	nFK	Diff.-nFK	nFK	Diff.-nFK
Typ 1	70 %	Getreide	78,1	-	79,3	-	42,2	-	97,2	-
Typ 1	70 %	Mais	100,0	-	103,7	-	106,2	-0,12	166,3	-0,47
Typ 1	85 %	Getreide	78,1	-	79,3	-	42,2	-	97,2	-
Typ 1	85 %	Mais	100,0	-	103,7	-	106,2	-0,14	166,3	-0,62
Typ 2	70 %	Getreide	81,2	-	85,0	-	87,7	-	114,0	-1,42
Typ 2	70 %	Mais	100,6	-	105,5	-	113,6	-	166,0	-0,20
Typ 2	85 %	Getreide	81,2	-	85,0	-	87,7	-	114,0	-2,55
Typ 2	85 %	Mais	100,6	-	105,5	-	113,6	-	166,0	-0,32

5.3 Leitprofile LP_03

Das Leitprofil LP_03 wird, ergänzend zu den zuvor beschriebenen Niedermoorböden, als weiteres repräsentatives Bodenprofil für die Bodenlandschaft der Hoch- und Niedermoorböden herangezogen. Bodentypologisch handelt es sich hierbei v. a. um Organomarschen. Auffällig sind die hohen Feinanteile, die den Bodenarten der Gruppe der Schlufftone entsprechen, sowie die stark humose Ausprägung bis in mehrere dm Tiefe. Typisch für Oragnomarschen ist zudem die sehr geringe Trockenrohdichte (s. Tabelle 5.3-1).

Tabelle 5.3-1: Profilaufbau des Leitprofils LP_03.

Bodenlandschaft (Leitprofil)	Horizont	Von [dm]	Bis [dm]	Bodenart KA 5	Humus [%]	TRD [g/cm³]
Hoch- und Nieder-Moorböden (z. B. Organo-marsch)	Ah	0	1	Tu3	11,5	0,96
	orGo	1	3	Tu3	11,5	0,96
	orGo	3	6	Tu3	11,5	0,96
	oGo	6	10	Tu3	11,5	0,96
	Gr	10	20	Tu3	1,5	1,18
	ZFSV	-	-	-	-	1,69

5.3.1 Modellbeschreibung und Parametrisierung LP_03

Die für die numerische Modellierung relevanten Parameter hängen wesentlich von den bodenphysikalischen Eigenschaften des Profils ab, insbesondere von Bodenart, Humusgehalt und Lagerungsdichte, sowie von den Kennwerten der Wasserbindung. Letztere sind in Tabelle 5.3-2 dargestellt. Die thermischen Eigenschaften für verschiedene Wassergehaltsstufen, wie Totwassergehalt, Feldkapazität, nutzbare Feldkapazität und vollständige Sättigung, lassen sich über die Wärmeleitfähigkeit und die volumetrische Wärmekapazität beschreiben, wie in Tabelle 5.3-3 und Tabelle 5.3-4 aufgeführt. Aufgrund der beschriebenen bodenphysikalischen Merkmale, insbesondere der eher geringen Lagerungsdichte und des humosen Aufbaus, sind bei diesem Profil ungünstige Bedingungen für die Wärmeleitung zu erwarten.

Tabelle 5.3-2: Rechnerisch bestimmte volumetrische Wassergehalte und abgeleitete Durchlässigkeit in der gesättigten Zone für das Leitprofil LP_03.

Von [dm]	Bis [dm]	GPV [Vol.-%]	nFK FÄ [Vol.-%]	FK FÄ [Vol.-%]	TOT FÄ [Vol.-%]	Kf-Wert nach Renger [cm/d]
0	1	88,5	30,5	58,5	28	55
1	3	88,5	30,5	58,5	28	55
3	6	88,5	30,5	58,5	28	55
6	10	88,5	32,5	60,5	28	55
10	20	61	20	47	27	55
ZFSV		35	-	-	-	0,0864

Tabelle 5.3-3: Volumetrische Wärmekapazität und spezifische Wärme bei verschiedenen Wassergehalten für das Leitprofil LP_03.

Von [dm]	Bis [dm]	Cv θs [MJ/(m³*K)]	Cv pF 1,8 [MJ/(m³*K)]	Cv pF 4,2 [MJ/(m³*K)]	c_s [W*s/(kg*K)]	c_w [W*s/(kg*K)]
0	1	1,7	1,48	1,11	12257	974
1	3	1,7	1,48	1,11	12257	974
3	6	1,7	1,48	1,11	12257	974
6	10	1,7	1,5	1,11	12431	962
10	20	2,18	1,96	1,56	2797	1571
ZFSV		-	-	-	1233	2485

Tabelle 5.3-4: Wärmeleitfähigkeit bei verschiedenen Wassergehalten für das Leitprofil LP_03.

Von [dm]	Bis [dm]	WLFK θs [W/(m*K)]	WLFK pF 1,8 [W/(m*K)]	WLFK pF 4,2 [W/(m*K)]	λ_s [W/(m*K)]	λ_w [W/(m*K)]
0	1	0,66	0,53	0,33	4,7556	0,6695*
1	3	0,66	0,53	0,33	4,7556	0,6695*
3	6	0,66	0,53	0,33	4,7556	0,6695*
6	10	0,66	0,54	0,33	4,7578	0,67145*
10	20	1,15	1	0,72	1,2729	1,0714
ZFSV		-	-	-	1,2346	5,3254

Für die hydraulische Randbedingung wird ein Potentialgefälle von $1{,}57 \cdot 10^{-3}$ m / m bei einem Flurabstand von 1,00 m angenommen. Die Geländeoberkante liegt bei 5,25 m und der Breitengrad bei 53,5 °N. Für die Klimadaten wird die Klimastation mit der Stations-ID 704 verwendet. Die Jahresniederschlagssumme 2019 betrug 785 mm und die tatsächliche Evapotranspiration 461 mm (Getreide), bzw. 289 mm (Mais). Die Grundwassertemperatur als das langjährige Mittel liegt bei 9,69 °C und die Globalstrahlung 2019 bei 105 W / m². Es ergibt sich eine jährliche Sickerwasserrate der Grundwasserneubildung von 107 mm (Getreide), bzw. 291 mm (Mais).

Tabelle 5.3-5: Van-Genuchten-Parameter für das Leitprofil LP_03.

Von [dm]	Bis [dm]	θ_r [-]	θ_s [-]	α [1/hPa]	n [-]	x [-]	K_0 [cm/d]
0	1	0,0011	0,9379	0,055	1,15	0,001	124
1	3	0,0011	0,9774	0,055	1,16	0,001	124
3	6	0,0011	0,9774	0,055	1,16	0,001	124
6	10	0,0011	1	0,055	1,16	0,001	124
10	20	0,0016	1	0,045	1,12	0,001	124
ZFSV		0	0,9629	0,04321	1,29	-3,227	0,168

5.3.2 Modellierungsergebnisse LP_03

Im Jahresmittel ist im Oberboden (30 cm), je nach Lastfall, Kabeltyp und Nutzungsart, mit einer Temperaturzunahme von max. knapp 3,0 K zu rechnen. Bis zur häufig als Unterkante der Hauptwurzelzone anzunehmenden Tiefe von 60 cm zeigen sich Differenzen von bis zu 5,4 K. Im tieferen Unterboden steigen die Temperaturzunahmen auf bis zu 8,4 K (90 cm) bzw. 10,1 K (120 cm) an. Die Maximalwerte werden bei einer Kabelauslastung von 85 % erreicht. Bei einer Kabellast von 70 % liegen die höchsten Jahresmittelwerte gemäß Tabelle 5.3-6 v. a. im Unterboden deutlich darunter (+ 1,9 K in 30 cm, + 3,7 K in 60 cm, + 5,7 K in 90 cm, + 6,8 K in 120 cm).

Tabelle 5.3-6: Mittlere betriebsbedingte Differenz der Bodentemperatur [K] in Abhängigkeit von Kabeltyp, Tiefenstufen, Nutzungsart und Lastfällen.

Kabeltyp	Kabel-auslastung	Nutzungsart	30 [cm]	60 [cm]	90 [cm]	120 [cm]
Typ 1	70 %	Getreide	1,9	3,7	5,7	6,8
Typ 1	70 %	Mais	1,9	3,6	5,5	6,6
Typ 1	85 %	Getreide	2,9	5,4	8,4	10,1
Typ 1	85 %	Mais	2,8	5,4	8,1	9,8
Typ 2	70 %	Getreide	1,9	3,6	5,6	6,8
Typ 2	70 %	Mais	1,9	3,5	5,4	6,5
Typ 2	85 %	Getreide	2,8	5,3	8,3	10,0
Typ 2	85 %	Mais	2,7	5,2	7,9	9,6

Mittlere Erwärmung [K]	≤ 1,0	≤ 3,0	≤ 5,0	≤ 7,5	≤ 10,0	> 10,0

Tabelle 5.3-7: Mittlere betriebsbedingte Differenz [Diff.-nFK %] der Wassergehalte in Bezug auf die nFK des Bodens ohne Last [nFK %] in Abhängigkeit von Kabeltyp, Tiefenstufen, Nutzungsart und Lastfällen.

Kabel-typ	**Kabel-auslas-tung**	**Nutzungs-art**	**Messtiefe [cm] / nFK & Diff.-nFK [%]**							
			30		**60**		**90**		**120**	
			nFK	Diff.-nFK	nFK	Diff.-nFK	nFK	Diff.-nFK	nFK	Diff.-nFK
Typ 1	70 %	Getreide	119,4	-	119,5	-	124,0	-	87,0	-
Typ 1	70 %	Mais	145,4	-0,3	159,4	-	177,8	-	167,5	-
Typ 1	85 %	Getreide	119,4	-	119,5	-	124,0	-	87,0	-
Typ 1	85 %	Mais	145,4	-0,4	159,4	-	177,8	-	167,5	-
Typ 2	70 %	Getreide	119,9	-	119,3	-	122,0	-	126,6	-
Typ 2	70 %	Mais	144,9	-0,3	157,9	-	176,3	-	168,3	-
Typ 2	85 %	Getreide	119,9	-0,1	119,3	-	122,0	-	126,6	-
Typ 2	85 %	Mais	144,9	-0,4	157,9	-	176,3	-	168,3	-

Das Profil LP_03 (z. B. Organomarschen) zeigt sich in Bezug auf die Wassergehalte erwartungsgemäß in einer vergleichbaren Größenordnung wie die Niedermoore (vgl. Profil LP_02). Im Oberboden lassen sich sehr geringfügige Differenzen im Jahresmittel erwarten. Auch in diesem Profil ist die jahreszeitliche Variabilität zumeist gering ausgeprägt.

5.4 Leitprofile LP_04

Bei dem Leitprofil LP_04 handelt es sich um ein typisches Profil der Bodenlandschaft der Trockenen Sandböden. Bodentypologisch treten vermehrt Braunerden auf. Charakteristisch sind die sehr hohen Sandanteile, die bis 15 dm der Bodenarten-Gruppe der Reinsande und ab 15 bis 20 dm der Normallehme zugeordnet werden. Die Trockenrohdichten bewegen sich dabei gemäß Bezeichnung nach KA5 auf einem mittleren bis hohen Niveau (s. Tabelle 5.4-1).

Tabelle 5.4-1: Profilaufbau des Leitprofils LP_04.

Bodenlandschaft (Leitprofil)	Horizont	Von [dm]	Bis [dm]	Bodenart KA 5	Humus [%]	TRD [g/cm³]
Trockene Sandböden (z. B. Braunerde)	Ap	0	3	mSfs	3	1,4
	Bv	3	6	mSfs	0,5	1,63
	Bv-Cv	6	10	mSfs	0,5	1,63
	Cv	10	15	mSfs	0,5	1,63
	Cv	15	20	Ls4	0,5	1,72
	ZFSV	-	-	-	-	1,65

5.4.1 Modellbeschreibung und Parametrisierung LP_04

Die für die numerische Modellierung relevanten Parameter werden maßgeblich durch die bodenphysikalischen Eigenschaften des jeweiligen Profils bestimmt. Dazu zählen insbesondere die Bodenart, der Humusgehalt und die Lagerungsdichte. Auch die Kennwerte zur Wasserbindung spielen eine zentrale Rolle und sind in Tabelle 5.4-2 zusammengefasst. Die thermischen Eigenschaften des Bodens bei unterschiedlichen Wassergehalten (Totwassergehalt, Feldkapazität, nutzbare Feldkapazität und vollständige Sättigung) können mithilfe der Wärmeleitfähigkeit und der volumetrischen Wärmekapazität beschrieben werden. Die entsprechenden Werte sind in den Tabelle 5.4-3 und Tabelle 5.4-4 aufgeführt. Aufgrund der beschriebenen bodenphysikalischen Eigenschaften, wie dem sandigen Bodensubstrat, einem mittel bis sehr schwach humosen Aufbau und einer mittleren Lagerungsdichte, weist das Profil im gesättigten Zustand günstige Bedingungen für eine gute Wärmeableitung auf, welche jedoch mit fallenden Wassergehalten stark abnehmen können.

Tabelle 5.4-2: Rechnerisch bestimmte volumetrische Wassergehalte und abgeleitete Durchlässigkeit in der gesättigten Zone für das Leitprofil LP_04.

Von [dm]	Bis [dm]	GPV [Vol.-%]	nFK FÄ [Vol.-%]	FK FÄ [Vol.-%]	TOT FÄ [Vol.-%]	Kf-Wert nach Renger [cm/d]
0	3	57	13	20	7	375
3	6	39,5	9	12	3	200
6	10	39,5	9	12	3	200
10	15	39,5	9	12	3	200
15	20	36	11	26	15	25
ZFSV		37	-	-	-	0,0864

Tabelle 5.4-3: Volumetrische Wärmekapazität und spezifische Wärme bei verschiedenen Wassergehalten für das Leitprofil LP_04.

Von [dm]	**Bis [dm]**	**Cv θs [MJ/(m³*K)]**	**Cv pF 1,8 [MJ/(m³*K)]**	**Cv pF 4,2 [MJ/(m³*K)]**	**c_s [W*s/(kg*K)]**	**c_w [W*s/(kg*K)]**
0	3	2,29	1,52	1,15	1809	2402
3	6	2,28	1,56	1,28	1218	2823
6	10	2,28	1,56	1,28	1218	2823
10	15	2,28	1,56	1,28	1218	2823
15	20	2,27	2,02	1,72	1212	2615
ZFSV		-	-	-	1149	3020

Tabelle 5.4-4: Wärmeleitfähigkeit bei verschiedenen Wassergehalten für das Leitprofil LP_04.

Von [dm]	**Bis [dm]**	**WLFK θs [W/(m*K)]**	**WLFK pF 1,8 [W/(m*K)]**	**WLFK pF 4,2 [W/(m*K)]**	**λ_s [W/(m*K)]**	**λ_w [W/(m*K)]**
0	3	1,87	1,26	0,73	5,2770	1,2517*
3	6	2,84	1,87	1,02	6,1573	1,6374
6	10	2,84	1,87	1,02	6,1573	1,6374
10	15	2,84	1,87	1,02	6,1573	1,6374
15	20	2,11	1,96	1,71	4,4130	1,0533*
ZFSV		-	-	-	0,7463	6,0606

Es handelt sich um ein grundwasserfernes Modell. Die Geländeoberkante liegt bei 5,25 m und der Breitengrad bei 53,5 °N. Für die Klimadaten wird die Klimastation mit der Stations-ID 704 verwendet. Die Jahresniederschlagssumme 2019 beträgt 785 mm und die tatsächliche Evapotranspiration 450 mm (Getreide), bzw. 289 mm (Mais). Die Grundwassertemperatur als das langjährige Mittel liegt bei 9,69 °C und die Globalstrahlung 2019 bei 105 W / m². Es ergibt sich eine jährliche Sickerwasserrate der Grundwasserneubildung von 144 mm (Getreide), bzw. 311 mm (Mais).

Tabelle 5.4-5: Van-Genuchten-Parameter für das Leitprofil LP_04.

Von [dm]	Bis [dm]	θ_r [-]	θ_s [-]	α [1/hPa]	n [-]	x [-]	K_0 [cm/d]
0	3	0,0526	1	0,26188	1,3533	-0,579	507
3	6	0,0025	0,9838	0,26188	1,3533	-0,579	507
6	10	0,0025	0,9838	0,26188	1,3533	-0,579	507
10	15	0,0025	0,9838	0,26188	1,3533	-0,579	507
15	20	0,1286	1	0,09955	1,15	-3,604	170
ZFSV		0,0027	1	0,26188	1,3533	-0,579	0,219

5.4.2 Modellierungsergebnisse LP_04

Im Jahresmittel ist im Oberboden (30 cm), je nach Lastfall, Kabeltyp und Nutzungsart, mit einer Temperaturzunahme von weniger als 2 K zu rechnen. Bis zur häufig als Unterkante der Hauptwurzelzone anzunehmenden Tiefe von 60 cm zeigen sich Differenzen von bis zu 2,4 K. Im tieferen Unterboden steigen die Temperaturzunahmen auf bis zu 3,1 K (90 cm) bzw. 3,9 K (120 cm) an. Die Maximalwerte werden bei einer Kabelauslastung von 85 % erreicht. Bei einer Kabellast von 70 % sind die höchsten Jahresmittelwerte gemäß Tabelle 5.4-6 v. a. im Unterboden entsprechend niedriger (+ 1,3 K in 30 cm, + 1,7 K in 60 cm, + 2,1 K in 90 cm, + 2,6 K in 120 cm).

Tabelle 5.4-6: Mittlere betriebsbedingte Differenz der Bodentemperatur [K] in Abhängigkeit von Kabeltyp, Tiefenstufen, Nutzungsart und Lastfällen.

Kabeltyp	Kabel-auslastung	Nutzungsart	30 [cm]	60 [cm]	90 [cm]	120 [cm]
Typ 1	70 %	Getreide	1,2	1,6	2,0	2,5
Typ 1	70 %	Mais	1,2	1,6	2,0	2,4
Typ 1	85 %	Getreide	1,8	2,4	3,0	3,7
Typ 1	85 %	Mais	1,7	2,3	2,9	3,6
Typ 2	70 %	Getreide	1,3	1,7	2,1	2,6
Typ 2	70 %	Mais	1,2	1,6	2,0	2,6
Typ 2	85 %	Getreide	1,9	2,4	3,1	3,9
Typ 2	85 %	Mais	1,8	2,4	3,0	3,8

Mittlere Erwärmung [K]	≤ 1,0	≤ 3,0	≤ 5,0	≤ 7,5	≤ 10,0	> 10,0

Tabelle 5.4-7: Mittlere betriebsbedingte Differenz [Diff.-nFK %] der Wassergehalte in Bezug auf die nFK des Bodens ohne Last [nFK %] in Abhängigkeit von Kabeltyp, Tiefenstufen, Nutzungsart und Lastfällen.

Kabel-typ	**Kabel-auslas-tung**	**Nutzungs-art**	**Messtiefe [cm] / nFK & Diff.-nFK [%]**							
			30		**60**		**90**		**120**	
			nFK	Diff.-nFK	nFK	Diff.-nFK	nFK	Diff.-nFK	nFK	Diff.-nFK
Typ 1	70 %	Getreide	89,3	-1,7	115,2	-1,2	129,2	-0,6	223,6	-0,2
Typ 1	70 %	Mais	121,5	-2,7	148,5	-2,0	165,0	-1,0	297,4	-0,3
Typ 1	85 %	Getreide	89,3	-2,5	115,2	-1,8	129,2	-0,9	223,6	-0,2
Typ 1	85 %	Mais	121,5	-3,9	148,5	-2,9	165,0	-1,4	297,4	-0,3
Typ 2	70 %	Getreide	79,8	-1,6	103,9	-1,2	113,0	-0,9	134,5	-0,6
Typ 2	70 %	Mais	111,0	-2,6	136,1	-2,1	147,4	-1,5	175,2	-0,8
Typ 2	85 %	Getreide	79,8	-2,3	103,9	-1,8	113,0	-1,4	134,5	-0,9
Typ 2	85 %	Mais	111,0	-3,8	136,1	-3,0	147,4	-2,2	175,2	-1,2

Im Bereich der trockenen Sandböden liegen die mittleren Effekte auf die Wassergehalte, mit Bezug zur nutzbaren Feldkapazität, in allen Fällen im modelltechnisch bestimmbaren Bereich. Im Jahresmittel liegt die Abnahme der Lastfallszenarien zur Kontrolle (Regelgrabenherstellung ohne Last) bei < 1 bis ca. 4 % der nFK. Die Jahresverläufe zeigen, dass die Differenzen v. a. aus den Frühjahrsmonaten sowie dem Spätherbst und Winter resultieren, während in den Sommermonaten keine bis äußerst geringfügige Auswirkungen erkennbar sind.

5.5 Leitprofile LP_05

Das Leitprofil LP_05 repräsentiert die Böden des tidal-marinen Milieus. Bodentypologisch sind hier z. B. Norm-(Schlick)watte zu erwarten. Charakteristisch sind die hohen Feinanteile (Bodenarten-Gruppe Schlufftone im Oberboden und Tonschluffe im Unterboden) sowie die sehr niedrigen Trockenrohdichten (s. Tabelle 5.5-1).

Tabelle 5.5-1 Profilaufbau des Leitprofils LP_05.

Bodenlandschaft (Leitprofil)	Horizont	Von [dm]	Bis [dm]	Bodenart KA 5	Humus [%]	TRD [g/cm³]
Böden des tidal-marinen Milieus (z. B. Norm-(schlick)watt)	zFo	0	0,5	Tu4	1,4	0,4
	zFro	0,5	2	Tu4	1	0,63
	zFr1	2	5	Tu4	1	0,94
	zFr2	5	20	Lu	0,7	1,05
	ZFSV	-	-	-	-	1,69

5.5.1 Modellbeschreibung und Parametrisierung LP_05

Die zentralen Parameter für die numerische Modellierung werden wesentlich durch die physikalischen Eigenschaften des jeweiligen Bodenprofils bestimmt. Dazu zählen insbesondere die Bodenart, der Gehalt an organischer Substanz sowie die Dichte der Lagerung. Ebenso sind die Eigenschaften zur Wasserbindung von großer Bedeutung, wie sie in Tabelle 5.5-2 dargestellt sind. Die thermischen Eigenschaften des Bodens in verschiedenen Wassergehaltsstufen, wie Totwassergehalt, Feldkapazität, nutzbare Feldkapazität und vollständige Sättigung, lassen sich durch die Wärmeleitfähigkeit und die volumetrische Wärmekapazität beschreiben. Die entsprechenden Kennwerte sind in den Tabelle 5.5-3 und Tabelle 5.5-4 aufgeführt. Aufgrund der geringen Lagerungsdichte und der Bodenart ist bei diesem Profil, selbst bei hohen Wassergehalten, die Leitung von Wärme eher gering einzustufen.

Tabelle 5.5-2: Rechnerisch bestimmte volumetrische Wassergehalte und abgeleitete Durchlässigkeit in der gesättigten Zone für das Leitprofil LP_05.

Von [dm]	Bis [dm]	GPV [Vol.-%]	nFK FÄ [Vol.-%]	FK FÄ [Vol.-%]	TOT FÄ [Vol.-%]	Kf-Wert nach Renger [cm/d]
0	0,5	83	43	61	18	0,6
0,5	2	74	25	71	46	0,2
2	5	62	22	61	39	0,5
5	20	56	20	55	35	0,8
ZFSV		35	-	-	-	0,0864

Tabelle 5.5-3: Volumetrische Wärmekapazität und spezifische Wärme bei verschiedenen Wassergehalten für das Leitprofil LP_05.

Von [dm]	**Bis [dm]**	**Cv θs [MJ/(m³*K)]**	**Cv pF 1,8 [MJ/(m³*K)]**	**Cv pF 4,2 [MJ/(m³*K)]**	**c_s [W*s/(kg*K)]**	**c_w [W*s/(kg*K)]**
0	0,5	1,17	1,08	0,69	9163	685
0,5	2	1,57	1,55	1,32	5835	827
2	5	1,9	1,89	1,59	3158	1237
5	10	1,98	1,95	1,61	2137	1762
10	20	1,98	1,95	1,61	649	3000
ZFSV		-	-	-	1233	2485

Tabelle 5.5-4: Wärmeleitfähigkeit bei verschiedenen Wassergehalten für das Leitprofil LP_05.

Von [dm]	**Bis [dm]**	**WLFK θs [W/(m*K)]**	**WLFK pF 1,8 [W/(m*K)]**	**WLFK pF 4,2 [W/(m*K)]**	**λ_s [W/(m*K)]**	**λ_w [W/(m*K)]**
0	0,5	0,41	0,35	0,14	1,6091	0,4172*
0,5	2	0,61	0,59	0,48	0,8634	0,5237
2	5	0,91	0,9	0,73	1,0050	0,8518
5	10	1,04	1,03	0,84	1,1337	0,9675
10	20	1,04	1,03	0,84	1,0909	1,0000
ZFSV		-	-	-	1,2346	5,3254

Für die hydraulische Randbedingung wird ein Potentialgefälle von $1 \cdot 10^{-6}$ m / m bei einem Flurabstand von 1,00 m angenommen. Die Geländeoberkante liegt bei 3 m und der Breitengrad bei 54,02 °N. Für die Klimadaten wird die Klimastation mit der Stations-ID 1200 verwendet. Die Jahresniederschlagssumme 2019 betrug 690 mm und die tatsächliche Evapotranspiration 288 mm (Getreide), bzw. 229 mm (Mais). Die Grundwassertemperatur als das langjährige Mittel liegt bei 9,49 °C und die Globalstrahlung 2019 bei 116 W / m². Es ergibt sich eine jährliche Sickerwasserrate der Grundwasserneubildung von 186 mm (Getreide), bzw. 164 mm (Mais).

Tabelle 5.5-5: Van Genuchten Parameter für das Leitprofil LP_05.

Von [dm]	Bis [dm]	θ_r [-]	θ_s [-]	α [1/hPa]	n [-]	x [-]	K_0 [cm/d]
0	0,5	0,0012	1	0,012	1,29	0,5	0,886
0,5	2	0,0014	1	0,0026	1,127	0,5	0,443
2	5	0,0016	1	0,0034	1,11	0,5	0,886
5	20	0,3071	1	0,004	1,17	0,5	1,658
ZFSV		0	0,9629	0,4321	1,29	-3,227	0,168

5.5.2 Modellierungsergebnisse LP_05

Hinweis zu den Ergebnissen der Leitprofils 05:

Die Bereiche des tidal-marin geprägten Milieus mit den dort anstehenden Wattböden (z. B. Schlickwatt) werden üblicherweise nicht anhand konventioneller landwirtschaftlicher Methoden, d. h. mit gängigen Kulturpflanzen, bewirtschaftet. Aus diesem Grund wurden für diesen Betrachtungsfall im Modellaufbau keine landwirtschaftlichen Kulturen und keine Drainagen angesetzt.

Im Jahresmittel ist im Oberboden (30 cm), je nach Lastfall, und Kabeltyp, mit einer Temperaturzunahme von max. 3,7 K zu rechnen. Bis zur häufig als Unterkante der Hauptwurzelzone anzunehmenden Tiefe von 60 cm zeigen sich Differenzen von bis zu 6,3 K. Im tieferen Unterboden steigen die Temperaturzunahmen auf bis zu 8,9 K (90 cm) bzw. 11,9 K (120 cm) an. Die Maximalwerte werden bei einer Kabelauslastung von 85 % erreicht. Bei einer Kabellast von 70 % liegen die höchsten Jahresmittelwerte gemäß Tabelle 5.5-6 v. a. im Unterboden deutlich darunter (+ 2,5 K in 30 cm, + 4,3 K in 60 cm, + 6,1 K in 90 cm, + 8,1 K in 120 cm).

Tabelle 5.5-6: Mittlere betriebsbedingte Differenz der Bodentemperatur [K] in Abhängigkeit von Kabeltyp, Tiefenstufen, Nutzungsart und Lastfällen.

Kabeltyp	Kabel-auslastung	Nutzungsart	30 [cm]	60 [cm]	90 [cm]	120 [cm]
Typ 1	70 %	o. Vegetation	2,5	4,1	5,7	7,4
Typ 1	85 %	o. Vegetation	3,7	6,1	8,5	10,9
Typ 2	70 %	o. Vegetation	2,5	4,3	6,1	8,1
Typ 2	85 %	o. Vegetation	3,7	6,3	8,9	11,9

Mittlere Erwärmung [K]	≤ 1,0	≤ 3,0	≤ 5,0	≤ 7,5	≤ 10,0	> 10,0

In Bezug auf die Wassergehalte zeigen sich im Profil LP_05 (z. B. Norm-Schlickwatt) keine negativen Auswirkungen (vgl. Tabelle 5.5-7).

Tabelle 5.5-7: Mittlere betriebsbedingte Differenz [Diff.-nFK %] der Wassergehalte in Bezug auf die nFK des Bodens ohne Last [nFK %] in Abhängigkeit von Kabeltyp, Tiefenstufen, Nutzungsart und Lastfällen.

Kabel-typ	**Kabel-auslas-tung**	**Nutzungs-art**	**Messtiefe [cm] / nFK & Diff.-nFK [%]**							
			30		**60**		**90**		**120**	
			nFK	Diff.-nFK	nFK	Diff.-nFK	nFK	Diff.-nFK	nFK	Diff.-nFK
Typ 1	70 %	ohne Vegetation	97,5	-	99,4	-	101,7	-	72,3	-
Typ 1	85 %	ohne Vegetation	97,5	-	99,4	-	101,7	-	72,3	-
Typ 2	70 %	ohne Vegetation	97,8	-	99,6	-	101,8	-	103,7	-
Typ 2	85 %	ohne Vegetation	97,8	-	99,6	-	101,8	-	103,7	-

5.6 Leitprofile LP_06

Das Leitprofil LP_06 bildet ein weiteres charakteristisches Beispiel für die Bodenlandschaft der trockenen Sandböden. Bodentypologisch können hier z. B. vermehrt Podsole verortet werden. Kennzeichnend sind die geringen Humusgehalte im Oberboden sowie die sehr hohen Sandanteile, die durchgängig der Bodenarten-Gruppe der Reinsande zugeordnet werden können. Die Trockenrohdichte liegt im mittleren bis hohen Bereich (s. Tabelle 5.6-1).

Tabelle 5.6-1: Profilaufbau des Leitprofils LP_06.

Bodenlandschaft (Leitprofil)	Horizont	Von [dm]	Bis [dm]	Bodenart KA 5	Humus [%]	TRD [g/cm³]
Trockene Sandböden (z. B. Mittlerer Podsol)	rAeh+Ap	0	3	fSms	1,5	1,63
	Ae	3	3,5	fSms	0,5	1,63
	Bhs	3,5	6	fSms	0,5	1,63
	Cv	6	11	fSms	0	1,63
	Cv	11	20	fSms	0	1,63
	ZFSV	-	-	-	-	1,50

5.6.1 Modellbeschreibung und Parametrisierung LP_06

Im Rahmen der numerischen Modellierung stellen die bodenphysikalischen Eigenschaften des jeweiligen Profils eine wesentliche Grundlage dar. Von besonderer Bedeutung sind hierbei die Bodenart, der Humusgehalt sowie die Lagerungsdichte, da sie maßgeblich das Wasser- und Wärmehaushaltsverhalten beeinflussen. Ergänzend sind die Kennwerte zur Wasserbindung zu berücksichtigen, die in Tabelle 5.6-2 zusammengefasst sind. Die thermischen Eigenschaften des Bodens unter variierenden Wassergehaltsbedingungen (darunter Totwassergehalt, Feldkapazität, nutzbare Feldkapazität und vollständige Sättigung) lassen sich durch die Parameter Wärmeleitfähigkeit und volumetrische Wärmekapazität charakterisieren. Die entsprechenden Kennwerte sind in den Tabelle 5.6-3 und Tabelle 5.6-4 aufgeführt. Es ist davon auszugehen, dass durch die mittlere bis hohe Lagerungsdichte, dem sandigen Ausgangsmaterial und dem eher geringen Humusgehalt v. a. bei zunehmenden Wassergehalten eine günstige Wärmeleitfähigkeit vorausgesetzt werden kann. Diese korreliert recht stark negativ mit abnehmenden Wassergehalten.

Tabelle 5.6-2: Rechnerisch bestimmte volumetrische Wassergehalte und abgeleitete Durchlässigkeit in der gesättigten Zone für das Leitprofil LP_06.

Von [dm]	Bis [dm]	GPV [Vol.-%]	nFK FÄ [Vol.-%]	FK FÄ [Vol.-%]	TOT FÄ [Vol.-%]	Kf-Wert nach Renger [cm/d]
0	3	43,5	13	19	6	120
3	3,5	39,5	11	15	4	120
3,5	6	39,5	11	15	4	120
6	11	39,5	11	15	4	120
11	20	39,5	11	15	4	120
ZFSV		42,3	-	-	-	0,0864

Tabelle 5.6-3: Volumetrische Wärmekapazität und spezifische Wärme bei verschiedenen Wassergehalten für das Leitprofil LP_06.

Von [dm]	Bis [dm]	Cv θs [MJ/(m³*K)]	Cv pF 1,8 [MJ/(m³*K)]	Cv pF 4,2 [MJ/(m³*K)]	c_s [W*s/(kg*K)]	c_w [W*s/(kg*K)]
0	3	2,31	1,72	1,33	1336	2674
3	3,5	2,28	1,65	1,31	1225	2798
3,5	6	2,28	1,65	1,31	1225	2798
6	11	2,28	1,65	1,31	1341 / 1225	2571 / 2798
11	20	2,28	1,65	1,31	1341 / 1225	2571 / 2798
ZFSV		-	-	-	1463 / 1332	2571 / 2798

Tabelle 5.6-4: Wärmeleitfähigkeit bei verschiedenen Wassergehalten für das Leitprofil LP_06.

Von [dm]	Bis [dm]	WLFK θs [W/(m*K)]	WLFK pF 1,8 [W/(m*K)]	WLFK pF 4,2 [W/(m*K)]	λ_s [W/(m*K)]	λ_w [W/(m*K)]
0	3	2,69	2,04	1,27	6,3137	1,6652*
3	3,5	2,84	2,03	1,16	6,2845	1,7104*
3,5	6	2,84	2,03	1,16	6,2845	1,7104*
6	11	2,83	2,03	1,16	2,6888 / 6,2845	3,3061 / 1,7104*
11	20	2,83	2,03	1,16	2,6888 / 6,2845	3,3061 / 1,7104*

Von [dm]	Bis [dm]	WLFK θs [W/(m*K)]	WLFK pF 1,8 [W/(m*K)]	WLFK pF 4,2 [W/(m*K)]	λ_s [W/(m*K)]	λ_w [W/(m*K)]
ZFSV		-	-	-	2,1257	6,6667

Dieses Profil wurde sowohl als grundwassernaher (gwnah) als auch grundwasserferner (gwfern) Standort modelliert. Für die hydraulische Randbedingung im grundwassernahen Fall wird ein Potentialgefälle von $1{,}21 \cdot 10^{-3}$ m / m bei einem Flurabstand von 0,60 m angenommen. Die Geländeoberkante liegt bei 8,77 m und der Breitengrad bei 53,07 °N. Für die Klimadaten wird die Klimastation mit der Stations-ID 6159 verwendet. Die Jahresniederschlagssumme 2019 betrug 748 mm und die tatsächliche Evapotranspiration 511 mm (Getreide, gwnah), 324 mm (Mais, gwnah), 496 mm (Getreide, gwfern), bzw. 312 mm (Mais, gwfern). Die Grundwassertemperatur als das langjährige Mittel liegt bei 10,61 °C und die Globalstrahlung 2019 bei 117 W / m². Es ergibt sich eine jährliche Sickerwasserrate der Grundwasserneubildung von 115 mm (Getreide, gwnah), 309 mm (Mais, gwnah), 130 mm (Getreide, gwfern), bzw. 321 mm (Mais, gwfern).

Tabelle 5.6-5: Van-Genuchten-Parameter für das Leitprofil LP_06.

Von [dm]	Bis [dm]	θ_r [-]	θ_s [-]	α [1/hPa]	n [-]	x [-]	K_0 [cm/d]
0	3	0,0644	1	0,12	1,33576	-0,328	286
3	3,5	0,0253	1	0,15041	1,33576	-0,328	286
3,5	6	0,0253	1	0,15041	1,33576	-0,328	286
6	11	0,0253	1	0,15041	1,33576	-0,328	286
11	20	0,0253	1	0,15041	1,33576	-0,328	286
ZFSV		0,0236	1	0,15041	1,33576	-0,328	286

5.6.2 Modellierungsergebnisse LP_06_gwfern

Im Jahresmittel ist im Oberboden (30 cm), je nach Lastfall, Kabeltyp und Nutzungsart, mit einer Temperaturzunahme von max. 1,5 K zu rechnen. Bis zur häufig als Unterkante der Hauptwurzelzone anzunehmenden Tiefe von 60 cm zeigen sich Differenzen von bis zu 2,6 K. Im tieferen Unterboden steigen die Temperaturzunahmen auf bis zu 3,9 K (90 cm) bzw. 5,3 K (120 cm) an. Die Maximalwerte werden bei einer Kabelauslastung von 85 % erreicht. Bei einer Kabellast von 70 % sind die höchsten Jahresmittelwerte gemäß Tabelle 5.6-6 v. a. im Unterboden entsprechend niedriger (+ 1,0 K in 30 cm, + 1,8 K in 60 cm, + 2,6 K in 90 cm, + 3,6 K in 120 cm).

Tabelle 5.6-6: Mittlere betriebsbedingte Differenz der Bodentemperatur [K] in Abhängigkeit von Kabeltyp, Tiefenstufen, Nutzungsart und Lastfällen.

Kabeltyp	Kabel-auslastung	Nutzungsart	30 [cm]	60 [cm]	90 [cm]	120 [cm]
Typ 1	70 %	Getreide	1,0	1,7	2,5	3,4
Typ 1	70 %	Mais	1,0	1,7	2,4	3,2
Typ 1	85 %	Getreide	1,5	2,6	3,7	5,1
Typ 1	85 %	Mais	1,4	2,4	3,5	4,7
Typ 2	70 %	Getreide	1,0	1,8	2,6	3,6
Typ 2	70 %	Mais	1,0	1,7	2,5	3,3
Typ 2	85 %	Getreide	1,5	2,6	3,9	5,3
Typ 2	85 %	Mais	1,4	2,5	3,6	4,9

Mittlere Erwärmung [K]	≤ 1,0	≤ 3,0	≤ 5,0	≤ 7,5	≤ 10,0	> 10,0

Tabelle 5.6-7: Mittlere betriebsbedingte Differenz [Diff.-nFK %] der Wassergehalte in Bezug auf die nFK des Bodens ohne Last [nFK %] in Abhängigkeit von Kabeltyp, Tiefenstufen, Nutzungsart und Lastfällen.

Kabel-typ	Kabel-auslas-tung	Nutzungs-art	Messtiefe [cm] / nFK & Diff.-nFK [%]							
			30		60		90		120	
			nFK	Diff.-nFK	nFK	Diff.-nFK	nFK	Diff.-nFK	nFK	Diff.-nFK
Typ 1	70 %	Getreide	103,1	-2,3	103,5	-2,2	107,9	-2,1	137,3	-4,3
Typ 1	70 %	Mais	128,6	-2,1	133,1	-2,1	141,7	-1,8	197,6	-2,6
Typ 1	85 %	Getreide	103,1	-3,2	103,5	-3,2	107,9	-3,0	137,3	-6,1
Typ 1	85 %	Mais	128,6	-3,0	133,1	-3,0	141,7	-2,7	197,6	-4,0
Typ 2	70 %	Getreide	91,5	-2,6	88,8	-2,2	88,4	-1,8	92,8	-1,9
Typ 2	70 %	Mais	122,6	-2,6	122,5	-2,8	123,3	-2,3	135,1	-2,4
Typ 2	85 %	Getreide	91,5	-3,9	88,8	-3,2	88,4	-2,8	92,8	-3,0
Typ 2	85 %	Mais	122,6	-4,0	122,5	-4,2	123,3	-3,4	135,1	-3,7

Für den Fall, dass die trockenen Sandböden der Grundmoränenplatten und Endmoränen im Altmoränengebiet Norddeutschlands und im Rheinland ohne Grundwassereinfluss betrachtet werden, lassen sich mittlere Wassergehaltsänderungen in einer Größenordnung von ca. 2 bis 6 % der nFK beschreiben. Die größten Unterschiede zeigen sich im Nahbereich der Bettungszone (v. a. beim Typ 1, d. h. im direkten Übergangsbereich der Bettungszone zum anstehenden Boden). In den Sommermonaten fallen die Wassergehalte der anstehenden Böden auf weniger als 30 % der nFK, wobei hier die betriebsbedingten Effekte am geringsten ausfallen. Ein Großteil der jahreszeitlichen Mittelwerte, bei zugleich niedrigen Wassergehalten in den Sommermonaten, entstammt jahreszeitlich gesehen aus den Frühjahrs- und Wintermonaten.

5.6.3 Modellierungsergebnisse LP_06_gwnah

Im Jahresmittel ist im Oberboden (30 cm), je nach Lastfall, Kabeltyp und Nutzungsart, mit einer Temperaturzunahme von max. 1,4 K zu rechnen. Bis zur häufig als Unterkante der Hauptwurzelzone anzunehmenden Tiefe von 60 cm zeigen sich Differenzen von bis zu 2,4 K. Im tieferen Unterboden steigen die Temperaturzunahmen auf bis zu 3,3 K (90 cm) bzw. 4,4 K (120 cm) an. Die Maximalwerte werden bei einer Kabelauslastung von 85 % erreicht. Bei einer Kabellast von 70 % sind die höchsten Jahresmittelwerte gemäß Tabelle 5.6-8 v. a. im Unterboden entsprechend niedriger (+ 1,0 K in 30 cm, + 1,6 K in 60 cm, + 2,2 K in 90 cm, + 3,0 K in 120 cm).

Tabelle 5.6-8: Mittlere betriebsbedingte Differenz der Bodentemperatur [K] in Abhängigkeit von Kabeltyp, Tiefenstufen, Nutzungsart und Lastfällen.

Kabeltyp	Kabel-auslastung	Nutzungsart	30 [cm]	60 [cm]	90 [cm]	120 [cm]
Typ 1	70 %	Getreide	1,0	1,6	2,2	2,9
Typ 1	70 %	Mais	0,9	1,5	2,1	2,8
Typ 1	85 %	Getreide	1,4	2,4	3,3	4,3
Typ 1	85 %	Mais	1,4	2,3	3,2	4,1
Typ 2	70 %	Getreide	1,0	1,6	2,2	3,0
Typ 2	70 %	Mais	0,9	1,5	2,1	2,8
Typ 2	85 %	Getreide	1,4	2,3	3,3	4,4
Typ 2	85 %	Mais	1,3	2,2	3,1	4,1

Mittlere Erwärmung [K]	≤ 1,0	≤ 3,0	≤ 5,0	≤ 7,5	≤ 10,0	> 10,0

Unter der Annahme eines stärkeren Grundwassereinflusses schwächen sich die Effekte im selbigen Profil, v. a. mit zunehmender Tiefe, erwartungsgemäß deutlich ab. Eine sehr geringfügige Abnahme des pflanzenverfügbaren Wassers zeigt sich nur noch in den obersten Bodenzonen. Im Jahresmittel liegen die Unterschiede durchweg bei < 1 % der nFK (bei Ausgangswerten von >> 100 % der nFK). Im Jahresverlauf zeigt sich, dass die mittleren Werte v. a. durch die sehr hohen Wassergehalte im Winterhalbjahr beeinflusst werden. Auch im grundwasserbeeinflussten Fall sind bei diesen sanddominierten Böden (in der Modellannahme Reinsande) bei der Nutzungsform Getreide in den Sommermonaten zeitweise geringere Wasserverfügbarkeiten (jedoch > 30 % der nFK und oftmals > 50 % der nFK) zu erwarten, wobei sich kein merklicher Einfluss des Kabelbetriebs im Sinne einer zusätzlichen Wassergehaltsreduzierung zeigt. Deutlich höhere und ganzjährig unkritische Verhältnisse (zumeist > 100 % der NFK) zeigen sich bei der Nutzungsform Mais.

Tabelle 5.6-9: Mittlere betriebsbedingte Differenz [Diff.-nFK %] der Wassergehalte in Bezug auf die nFK des Bodens ohne Last [nFK %] in Abhängigkeit von Kabeltyp, Tiefenstufen, Nutzungsart und Lastfällen.

Kabel-typ	**Kabel-auslas-tung**	**Nutzungs-art**	**Messtiefe [cm] / nFK & Diff.-nFK [%]**							
			30		**60**		**90**		**120**	
			nFK	Diff.-nFK	nFK	Diff.-nFK	nFK	Diff.-nFK	nFK	Diff.-nFK
Typ 1	70 %	Getreide	122,6	-0,3	133,1	-0,4	142,3	-0,4	206,7	-
Typ 1	70 %	Mais	151,9	-0,3	180,8	-0,2	246,8	-	286,5	-
Typ 1	85 %	Getreide	122,6	-0,4	133,1	-0,6	142,3	-0,5	206,7	-
Typ 1	85 %	Mais	151,9	-0,5	180,8	-0,3	246,8	-	286,5	-
Typ 2	70 %	Getreide	123,0	-0,4	132,2	-0,6	135,2	-0,6	153,3	-0,4
Typ 2	70 %	Mais	151,3	-0,3	178,6	-0,2	241,3	-	271,9	-
Typ 2	85 %	Getreide	123,0	-0,5	132,2	-0,8	135,2	-0,8	153,3	-0,6
Typ 2	85 %	Mais	151,3	-0,5	178,6	-0,3	241,3	-	271,9	-

5.7 Leitprofile LP_07

Das Leitprofil LP_07 stellt ein typisches Beispiel für Böden aus Geschiebelehm und Geschiebemergel mit sandiger Deckschicht dar. Bodentypologisch können in diesem Bereich z. B. pseudovergleyte Podsole anstehen. Charakteristisch sind die hohen Sandanteile (Bodenarten-Gruppe Lehmsande und Sandlehme) sowie mittlere bis hohe Trockenrohdichte bei vergleichsweise geringen Humusanteilen (s. Tabelle 5.7-1).

Tabelle 5.7-1: Profilaufbau des Leitprofils LP_07.

Bodenlandschaft (Leitprofil)	Horizont	Von [dm]	Bis [dm]	Bodenart KA 5	Humus [%]	TRD [g/cm³]
Böden aus Geschiebe-	rAeh+Ap	0	3	Su2	1,5	1,62
lehm und Geschiebe-	Ae	3	3,5	Su2	0,5	1,62
mergel mit sandiger	Bhs	3,5	6	Su2	0,5	1,62
Deckschicht	Sw	6	11	Sl3	0	1,58
(z. B. Mittlerer	Swd	11	20	Sl4	0	1,75
Pseudogley-Podsol)	ZFSV	-	-	-	-	1,65

5.7.1 Modellbeschreibung und Parametrisierung LP_07

Für die numerische Modellierung sind verschiedene bodenphysikalische Parameter von zentraler Bedeutung. Besonders wichtig sind die Bodenart, der Humusgehalt und die Lagerungsdichte, da sie die thermischen und hydraulischen Eigenschaften des Bodens maßgeblich beeinflussen. Ebenso relevant sind die Kennwerte zur Wasserbindung, die in Tabelle 5.7-2 dargestellt sind. Die thermischen Eigenschaften des Bodens in unterschiedlichen Feuchtezuständen wie Totwassergehalt, Feldkapazität, nutzbare Feldkapazität und vollständige Sättigung werden durch die Wärmeleitfähigkeit sowie die volumetrische Wärmekapazität beschrieben. Die entsprechenden Werte finden sich in den Tabelle 5.7-3 und Tabelle 5.7-4. Im Vergleich zum Profil LP_06 nehmen die Feinkornanteile zu, was dazu führt, dass bei ähnlich guten Eigenschaften bei höheren Wassergehalten die Abnahme der Wärmeleitfähigkeit im Falle einer Austrocknung merklich geringer ausfällt.

Tabelle 5.7-2: Rechnerisch bestimmte volumetrische Wassergehalte und abgeleitete Durchlässigkeit in der gesättigten Zone für das Leitprofil LP_07.

Von [dm]	Bis [dm]	GPV [Vol.-%]	nFK FÄ [Vol.-%]	FK FÄ [Vol.-%]	TOT FÄ [Vol.-%]	Kf-Wert nach Renger [cm/d]
0	3	42,5	16,00	22,00	6,00	95
3	3,5	39,5	14,00	19,00	5,00	95
3,5	6	39,5	14,00	19,00	5,00	95
6	11	39,5	14,50	24,50	10,00	55
11	20	32,5	11,00	24,00	13,00	22,5
ZFSV		37	-	-	-	0,00864

Tabelle 5.7-3: Volumetrische Wärmekapazität und spezifische Wärme bei verschiedenen Wassergehalten für das Leitprofil LP_07

Von [dm]	Bis [dm]	Cv θs [MJ/(m³*K)]	Cv pF 1,8 [MJ/(m³*K)]	Cv pF 4,2 [MJ/(m³*K)]	c_s [W*s/(kg*K)]	c_w [W*s/(kg*K)]
0	3	2,28	1,79	1,32	1317	2653
3	3,5	2,27	1,76	1,34	1245	2728
3,5	6	2,27	1,76	1,34	1245	2728
6	11	2,23	1,87	1,46	1270	2613
11	20	2,21	1,99	1,68	1130	2708
ZFSV		-	-	-	1198	2708

Tabelle 5.7-4: Wärmeleitfähigkeit bei verschiedenen Wassergehalten für das Leitprofil LP_07.

Von [dm]	Bis [dm]	WLFK θs [W/(m*K)]	WLFK pF 1,8 [W/(m*K)]	WLFK pF 4,2 [W/(m*K)]	λ_s [W/(m*K)]	λ_w [W/(m*K)]
0	3	2,70	2,17	1,27	6,3040	1,7101*
3	3,5	2,89	2,26	1,30	6,5097	1,8031*
3,5	6	2,89	2,26	1,30	6,5097	1,8031*
6	11	2,53	2,00	1,18	6,3944	2,3083*
11	20	2,16	2,00	1,70	4,4534	1,1659*
ZFSV		-	-	-	6,2543	2,6327*

Es handelt sich um ein grundwasserfernes Modell. Die Geländeoberkante liegt bei 4 m und der Breitengrad bei 53,0 °N. Für die Klimadaten wird die Klimastation mit der Stations-ID 6159 verwendet. Die Jahresniederschlagssumme 2019 betrug 748 mm und die tatsächliche Evapotranspiration 497 mm (Getreide), bzw. 318 mm (Mais). Die Grundwassertemperatur als das langjährige Mittel liegt bei 10,03 °C und die Globalstrahlung 2019 bei 117 W / m². Es ergibt sich eine jährliche Sickerwasserrate der Grundwasserneubildung von 129 mm (Getreide), bzw. 314 mm (Mais).

Tabelle 5.7-5: Van-Genuchten-Parameter für das Leitprofil LP_07.

Von [dm]	**Bis [dm]**	**θ_r [-]**	**θ_s [-]**	**α [1/hPa]**	**n [-]**	**x [-]**	**K_0 [cm/d]**
0	3	0,0024	1	0,15	1,23473	-3,339	285
3	3,5	0,0025	1	0,0167	1,27	-3,339	143
3,5	6	0,0025	1	0,0167	1,27	-3,339	143
6	11	0,1313	1	0,06	1,3	0,001	90
11	20	0,0031	1	0,077	1,13	-3,236	141
ZFSV		0,0027	1	0,077	1,13	-3,236	0,0543

5.7.2 Modellierungsergebnisse LP_07

Im Jahresmittel ist im Oberboden (30 cm), je nach Lastfall, Kabeltyp und Nutzungsart, mit einer Temperaturzunahme von max. 1,5 K zu rechnen. Bis zur häufig als Unterkante der Hauptwurzelzone anzunehmenden Tiefe von 60 cm zeigen sich Differenzen von bis zu 2,4 K. Im tieferen Unterboden steigen die Temperaturzunahmen auf bis zu 3,6 K (90 cm) bzw. 5,0 K (120 cm) an. Die Maximalwerte werden bei einer Kabelauslastung von 85 % erreicht. Bei einer Kabellast von 70 % sind die höchsten Jahresmittelwerte gemäß Tabelle 5.7-6 v. a. im Unterboden entsprechend niedriger (+ 1,0 K in 30 cm, + 1,6 K in 60 cm, + 2,5 K in 90 cm, + 3,4 K in 120 cm).

Tabelle 5.7-6: Mittlere betriebsbedingte Differenz der Bodentemperatur [K] in Abhängigkeit von Kabeltyp, Tiefenstufen, Nutzungsart und Lastfällen.

Kabeltyp	**Kabel-auslastung**	**Nutzungsart**	**30 [cm]**	**60 [cm]**	**90 [cm]**	**120 [cm]**
Typ 1	70 %	Getreide	1,0	1,6	2,4	3,3
Typ 1	70 %	Mais	0,9	1,5	2,2	3,1
Typ 1	85 %	Getreide	1,4	2,3	3,5	4,8
Typ 1	85 %	Mais	1,4	2,2	3,3	4,5
Typ 2	70 %	Getreide	1,0	1,6	2,5	3,4
Typ 2	70 %	Mais	1,0	1,5	2,3	3,2
Typ 2	85 %	Getreide	1,5	2,4	3,6	5,0
Typ 2	85 %	Mais	1,4	2,3	3,5	4,8

Mittlere Erwärmung [K]	≤ 1,0	≤ 3,0	≤ 5,0	≤ 7,5	≤ 10,0	> 10,0

Im Falle des Leitprofils für die Böden aus Geschiebelehm und Geschiebemergel mit sandiger Deckschicht (hier: Pseudogley-Podsol) sind bei gleichzeitiger Betrachtung des verfügbaren Wasservorrats im ungestörten Fall (>> 100 % nFK) sowie den gemäß Modellierung erwartbaren Differenzen, im Sinne einer Abnahme des pflanzenverfügbaren Wassers (< 1 % der nFK), im Jahresmittel keine spürbaren Effekte abzuleiten. Die mittleren Jahreswerte können hier als guter Richtwert für eine allgemeine Aussage herangezogen werden, dass ich im Jahresverlauf kaum erkennbare Unterschied hinsichtlich der Wassergehaltsabnahmen zeigen.

Tabelle 5.7-7: Mittlere betriebsbedingte Differenz [Diff.-nFK %] der Wassergehalte in Bezug auf die nFK des Bodens ohne Last [nFK %] in Abhängigkeit von Kabeltyp, Tiefenstufen, Nutzungsart und Lastfällen.

Kabel-typ	**Kabel-auslas-tung**	**Nutzungs-art**	**Messtiefe [cm] / nFK & Diff.-nFK [%]**							
			30		**60**		**90**		**120**	
			nFK	Diff.-nFK	nFK	Diff.-nFK	nFK	Diff.-nFK	nFK	Diff.-nFK
Typ 1	70 %	Getreide	141,8	-	129,2	-0,1	137,8	-	183,7	-
Typ 1	70 %	Mais	169,8	-0,2	154,7	-0,3	168,4	-0,1	212,6	-
Typ 1	85 %	Getreide	141,8	-	129,2	-0,2	137,8	-	183,7	-
Typ 1	85 %	Mais	169,8	-0,3	154,7	-0,5	168,4	-0,2	212,6	-
Typ 2	70 %	Getreide	141,1	-0,1	127,4	-0,3	130,4	-0,2	173,3	-
Typ 2	70 %	Mais	168,5	-0,2	152,7	-0,4	160,4	-0,2	201,3	-
Typ 2	85 %	Getreide	141,1	-0,2	127,4	-0,5	130,4	-0,3	173,3	-
Typ 2	85 %	Mais	168,5	-0,3	152,7	-0,5	160,4	-0,3	201,3	-

5.8 Leitprofile LP_08

Bei dem Leitprofil LP_08 handelt es sich um ein Typusprofil der Bodenlandschaft Böden der Flussterrassen und Hochflutsedimente. Bodentypologisch können hier Humusbraunerden auftreten. Die Bodenarten-Gruppe variiert entsprechend der Substratwechsel von Schluffsanden und Normallehmen über Tonschluffe hin zu Reinsanden. Die oberen 10 dm sind mittel humos gefolgt von einem humusfreien Untergrund. Die Trockenrohdichten sind als gering bis mittel einzustufen (s. Tabelle 5.8-1).

Tabelle 5.8-1: Profilaufbau des Leitprofils LP_08.

Bodenlandschaft (Leitprofil)	Horizont	Von [dm]	Bis [dm]	Bodenart KA 5	Humus [%]	TRD [g/cm³]
Böden der Flussterrassen und Hochflutsedimente (z. B. Humus-braunerde)	Ah	0	1	Su3	3	1,37
	Ah-Bv	1	10	Ls2	3	1,5
	Bv	10	12,6	Lu	0	1,48
	Gor	12,6	16,5	Lu	0	1,25
	II Gr	16,5	17,5	mSgs	0	1,4
	ZFSV	-	-	-	-	1,69

5.8.1 Modellbeschreibung und Parametrisierung LP_08

Die für die numerische Modellierung relevanten Parameter werden maßgeblich durch die bodenphysikalischen Eigenschaften des jeweiligen Profils bestimmt. Hierzu zählen insbesondere die Bodenart, der Humusgehalt sowie die Lagerungsdichte. Ebenso spielen die Kennwerte der Wasserbindung eine wesentliche Rolle, die in Tabelle 5.8-2 dargestellt sind. Die thermischen Eigenschaften des Bodens unter variierenden Feuchtebedingungen – darunter Totwassergehalt, Feldkapazität, nutzbare Feldkapazität sowie vollständige Sättigung – lassen sich durch die Wärmeleitfähigkeit und die volumetrische Wärmekapazität charakterisieren (s. Tabelle 5.8-3 und Tabelle 5.8-4). Auf Grundlage der beschriebenen bodenphysikalischen Merkmale, insbesondere der humosen Anteile sowie der teils feineren Körnung, ist davon auszugehen, dass das Profil über die meisten Horizonte ein eher moderates Potenzial zur Wärmeableitung aufweist.

Tabelle 5.8-2: Rechnerisch bestimmte volumetrische Wassergehalte und abgeleitete Durchlässigkeit in der gesättigten Zone für das Leitprofil LP_08.

Von [dm]	Bis [dm]	GPV [Vol.-%]	nFK FÄ [Vol.-%]	FK FÄ [Vol.-%]	TOT FÄ [Vol.-%]	Kf-Wert nach Renger [cm/d]
0	1	56	23	32	9	95
1	10	51	17,5	34,5	17	40
10	12,6	43	13	32	19	20
12,6	16,5	52	16	35	19	35
16,5	17,5	46,5	11	14	3	312,5
ZFSV		35	-	-	-	0,0864

Tabelle 5.8-3: Volumetrische Wärmekapazität und spezifische Wärme bei verschiedenen Wassergehalten für das Leitprofil LP_08.

Von [dm]	**Bis [dm]**	**Cv θs [MJ/(m³*K)]**	**Cv pF 1,8 [MJ/(m³*K)]**	**Cv pF 4,2 [MJ/(m³*K)]**	**c_s [W*s/(kg*K)]**	**c_w [W*s/(kg*K)]**
0	1	2,24	1,78	1,19	1864	2239
1	10	2,29	1,95	1,52	1705	2261
10	12,6	2,22	1,98	1,65	1437	2365
12,6	16,5	2,17	1,85	1,47	1809	2126
16,5	17,5	2,22	1,45	1,11	1534	2369
ZFSV		-	-	-	1233	2485

Tabelle 5.8-4: Wärmeleitfähigkeit bei verschiedenen Wassergehalten für das Leitprofil LP_08.

Von [dm]	**Bis [dm]**	**WLFK θs [W/(m*K)]**	**WLFK pF 1,8 [W/(m*K)]**	**WLFK pF 4,2 [W/(m*K)]**	**λ_s [W/(m*K)]**	**λ_w [W/(m*K)]**
0	1	1,64	1,31	0,67	4,6545	1,2471*
1	10	1,43	1,32	1,13	3,4699	0,6316*
10	12,6	1,69	1,47	1,14	4,4158	1,5742*
12,6	16,5	1,38	1,16	0,86	3,7985	1,1998*
16,5	17,5	2,12	1,34	0,59	1,9852	2,4000
ZFSV		-	-	-	1,2346	5,3254

Für die hydraulische Randbedingung wird ein Potentialgefälle von $1{,}07 \cdot 10^{-3}$ m / m bei einem Flurabstand von 1,65 m angenommen. Die Geländeoberkante liegt bei 25,04 m und der Breitengrad bei 51,3 °N. Für die Klimadaten wird die Klimastation mit der Stations-ID 1078 verwendet. Die Jahresniederschlagssumme 2019 betrug 672 mm und die tatsächliche Evapotranspiration 584 mm (Getreide), bzw. 415 mm (Mais). Die Grundwassertemperatur als das langjährige Mittel liegt bei 11,19 °C und die Globalstrahlung 2019 bei 117 W / m². Es ergibt sich eine jährliche Grundwasserzehrung von -47 mm (Getreide), bzw. eine jährliche Sickerwasserrate der Grundwasserneubildung von 125 mm (Mais).

Tabelle 5.8-5: Van-Genuchten-Parameter für das Leitprofil LP_08.

Von [dm]	Bis [dm]	θ_r [-]	θ_s [-]	α [1/hPa]	n [-]	x [-]	K_0 [cm/d]
0	1	0,0018	1	0,08862	1,24	-3,611	120
1	10	0,2757	1	0,04052	1,36	-2,067	38
10	12,6	0,1242	1	0,04321	1,16518	-3,227	83
12,6	16,5	0,1027	0,9038	0,04321	1,17	-3,227	83
16,5	17,5	0,0108	0,8817	0,26188	1,3533	-0,579	507
ZFSV		0	0,9629	0,04321	1,29	-3,227	0,168

5.8.2 Modellierungsergebnisse LP_08

Im Jahresmittel ist im Oberboden (30 cm), je nach Lastfall, Kabeltyp und Nutzungsart, mit einer Temperaturzunahme von max. knapp 2 K zu rechnen. Bis zur häufig als Unterkante der Hauptwurzelzone anzunehmenden Tiefe von 60 cm zeigen sich Differenzen von bis zu 3,4 K. Im tieferen Unterboden steigen die Temperaturzunahmen auf bis zu 5,0 K (90 cm) bzw. 6,7 K (120 cm) an. Die Maximalwerte werden bei einer Kabelauslastung von 85 % erreicht. Bei einer Kabellast von 70 % sind die höchsten Jahresmittelwerte gemäß Tabelle 5.8-6 im Unterboden entsprechend niedriger (+ 1,3 K in 30 cm, + 2,3 K in 60 cm, + 3,4 K in 90 cm, + 4,5 K in 120 cm).

Tabelle 5.8-6: Mittlere betriebsbedingte Differenz der Bodentemperatur [K] in Abhängigkeit von Kabeltyp, Tiefenstufen, Nutzungsart und Lastfällen.

Kabeltyp	Kabel-auslastung	Nutzungsart	30 [cm]	60 [cm]	90 [cm]	120 [cm]
Typ 1	70 %	Getreide	1,3	2,3	3,4	4,5
Typ 1	70 %	Mais	1,2	2,1	3,2	4,2
Typ 1	85 %	Getreide	1,9	3,4	5,0	6,6
Typ 1	85 %	Mais	1,7	3,2	4,7	6,2
Typ 2	70 %	Getreide	1,3	2,3	3,4	4,5
Typ 2	70 %	Mais	1,1	2,1	3,1	4,1
Typ 2	85 %	Getreide	1,9	3,4	5,0	6,7
Typ 2	85 %	Mais	1,7	3,1	4,6	6,0

Mittlere Erwärmung [K]	≤ 1,0	≤ 3,0	≤ 5,0	≤ 7,5	≤ 10,0	> 10,0

Bei den Böden der Flussterrassen und Hochflutsedimente sind hinsichtlich des hier betrachteten Leitprofils in vielen Konstellationen keine modelltechnisch bestimmbaren Auswirkungen auf das pflanzenverfügbare Wasser erkennbar. Im Falle der Getreidenutzung sind vereinzelt äußerst geringe Wassergehaltsdifferenzen mit Auswirkungen auf die nFK (> 1 %) ausweisbar. Die geringsten Wassergehalte des Profils zeigen sich im Bereich der Erntezeitpunkte, d. h. im Hochsommer für Getreide und im Frühherbst/Herbst für Mais. Starke Abweichungen im Jahresverlauf zeigen sich nicht, d. h. es gibt keine Anzeichen für eine merkliche Abnahme im Bereich der Phasen mit den potenziell niedrigsten Gehalten an pflanzenverfügbarem Wasser.

Tabelle 5.8-7: Mittlere betriebsbedingte Differenz [Diff.-nFK %] der Wassergehalte in Bezug auf die nFK des Bodens ohne Last [nFK %] in Abhängigkeit von Kabeltyp, Tiefenstufen, Nutzungsart und Lastfällen.

Kabel-typ	**Kabel-auslas-tung**	**Nutzungs-art**	**Messtiefe [cm] / nFK & Diff.-nFK [%]**							
			30		**60**		**90**		**120**	
			nFK	Diff.-nFK	nFK	Diff.-nFK	nFK	Diff.-nFK	nFK	Diff.-nFK
Typ 1	70 %	Getreide	81,1	-	85,9	-	95,5	-	58,9	-
Typ 1	70 %	Mais	94,0	-	100,8	-	114,1	-	93,5	-
Typ 1	85 %	Getreide	81,1	-0,1	85,9	-	95,5	-	58,9	-
Typ 1	85 %	Mais	94,0	-	100,8	-	114,1	-	93,5	-
Typ 2	70 %	Getreide	80,7	-0,2	84,4	-0,3	91,5	-0,3	104,0	-
Typ 2	70 %	Mais	95,1	-	101,5	-	113,9	-	133,9	-
Typ 2	85 %	Getreide	80,7	-0,3	84,4	-0,4	91,5	-0,5	104,0	-
Typ 2	85 %	Mais	95,1	-	101,5	-	113,9	-	133,9	-

5.9 Leitprofile LP_09

Das Leitprofil LP_09 stellt ein typisches Beispiel für die Bodenlandschaft der Braunen Lössböden, einschließlich Sandlöss und lössähnlicher Sedimente dar. Bodentypologisch treten hier vor allem Parabraunerden auf. Kennzeichnend für das Profil ist eine vorhandene Tonverlagerung aus dem Oberboden, welcher der Bodenarten-Gruppe der Lehmschluffe zugeordnet wird. Darunter folgt eine Schicht mit höherem Tongehalt (Bodenarten-Gruppe Tonschluffe). Im tieferen Untergrund dominieren Bodenarten der Gruppen Lehmsande und Sandlehme. Die Trockenrohdichte liegt durchgängig im niedrigen bis mittleren Bereich.

Tabelle 5.9-1: Profilaufbau des Leitprofils LP_09.

Bodenlandschaft (Leitprofil)	Horizont	Von [dm]	Bis [dm]	Bodenart KA 5	Humus [%]	TRD [g/cm³]
Braune Lössböden, einschließlich Sand-Löss und lössähnliche Sedimente (z. B. Parabraunerde)	rAp	0	1,5	Ut3	3	1,27
	Ahl	1,5	2,5	Ut3	3	1,27
	Al	2,5	5	Ut3	1,5	1,5
	Awl	5	6,5	Ut3	0,5	1,5
	Bt	6,5	8	Lu	0,5	1,48
	II Bv-Sw	8	9,5	Sl3	0	1,35
	III Bv-Sd	9,5	11	Sl4	0	1,32
	ZFSV	-	-	-	-	1,3

5.9.1 Modellbeschreibung und Parametrisierung LP_09

Die Parameter, die für die numerische Modellierung von Bedeutung sind, werden in hohem Maße durch die bodenphysikalischen Eigenschaften des jeweiligen Bodenprofils beeinflusst. Dazu zählen insbesondere die Bodenart, der Humusgehalt sowie die Lagerungsdichte. Ergänzend dazu sind auch die Kennwerte zur Wasserbindung von zentraler Relevanz, welche in Tabelle 5.9-2 aufgeführt sind. Die thermischen Eigenschaften des Bodens bei unterschiedlichen Wassergehaltszuständen wie dem Totwassergehalt, der Feldkapazität, der nutzbaren Feldkapazität und einer vollständigen Sättigung lassen sich mithilfe der Wärmeleitfähigkeit und der volumetrischen Wärmekapazität beschreiben. Die entsprechenden Kennwerte sind in Tabelle 5.9-3 und Tabelle 5.9-4 zusammengefasst. Durch die hohen Feinkornanteile zeigt sich i. d. R. innerhalb der jeweiligem Horizonte keine sehr stark ausgeprägte Variabilität in Abhängigkeit der Wassergehalte. Werte um die 2 W/m*K (bei Wassersättigung) sind, aufgrund der geringen bis mittleren Lagerungsdichten, nur im zunehmend sandigeren und humusfreien Unterboden zu erwarten.

Tabelle 5.9-2: Rechnerisch bestimmte volumetrische Wassergehalte und abgeleitete Durchlässigkeit in der gesättigten Zone für das Leitprofil LP_09.

Von [dm]	Bis [dm]	GPV [Vol.-%]	nFK FÄ [Vol.-%]	FK FÄ [Vol.-%]	TOT FÄ [Vol.-%]	Kf-Wert nach Renger [cm/d]
0	1,5	61	22,5	38,5	16	40
1,5	2,5	61	22,5	38,5	16	40
2,5	5	49,5	19	34	15	22,5
5	6,5	43	17	31	14	15
6,5	8	43	13	32	19	20
8	9,5	47	16	26	10	85
9,5	11	51	15	28	13	80
ZFSV		52,4	-	-	-	0,0864

Tabelle 5.9-3: Volumetrische Wärmekapazität und spezifische Wärme bei verschiedenen Wassergehalten für das Leitprofil LP_09.

Von [dm]	Bis [dm]	Cv θs [MJ/(m³*K)]	Cv pF 1,8 [MJ/(m³*K)]	Cv pF 4,2 [MJ/(m³*K)]	c_s [W*s/(kg*K)]	c_w [W*s/(kg*K)]
0	1,5	2,21	1,83	1,32	2310	1978
1,5	2,5	2,21	1,83	1,32	2310	1978
2,5	5	2,32	1,99	1,51	1622	2334
5	6,5	2,24	1,97	1,52	1395	2460
6,5	8	2,22	1,98	1,65	1437	2365
8	9,5	2,18	1,73	1,3	1510	2403
9,5	11	2,23	1,75	1,36	1662	2325
ZFSV		-	-	-	1688	2325

Tabelle 5.9-4: Wärmeleitfähigkeit bei verschiedenen Wassergehalten für das Leitprofil LP_09.

Von [dm]	Bis [dm]	WLFK θs [W/(m*K)]	WLFK pF 1,8 [W/(m*K)]	WLFK pF 4,2 [W/(m*K)]	λ_s [W/(m*K)]	λ_w [W/(m*K)]
0	1,5	1,31	1,14	0,83	3,9342	1,0667*
1,5	2,5	1,36	1,18	0,88	4,0464	0,8377*
2,5	5	1,79	1,57	1,14	4,6863	1,2707*
5	6,5	1,88	1,69	1,27	4,4886	1,2684*
6,5	8	1,69	1,48	1,14	4,4203	1,5630*
8	9,5	1,76	1,28	0,65	4,681	1,6788*
9,5	11	2,01	1,72	1,37	4,9954	1,0807*
ZFSV		-	-	-	0	3,0769

Es handelt sich um ein grundwasserfernes Modell. Die Geländeoberkante liegt bei 25,04 m und der Breitengrad bei 51,3 °N. Für die Klimadaten wird die Klimastation mit der Stations-ID 1078 verwendet. Die Jahresniederschlagssumme 2019 betrug 672 mm und die tatsächliche Evapotranspiration 576 mm (Getreide), bzw. 398 mm (Mais). Die Grundwassertemperatur als das langjährige Mittel liegt bei 11,19 °C und die Globalstrahlung 2019 bei 117 W / m². Es ergibt sich eine jährliche Grundwasserzehrung von -39 mm (Getreide), bzw. eine jährliche Sickerwasserrate der Grundwasserneubildung von 133 mm (Mais).

Tabelle 5.9-5: Van-Genuchten-Parameter für das Leitprofil LP_09.

Von [dm]	Bis [dm]	θ_r [-]	θ_s [-]	α [1/hPa]	n [-]	x [-]	K_0 [cm/d]
0	1,5	0,0098	0,8033	0,01679	1,20668	-1,198	28
1,5	2,5	0,0098	0,8033	0,01679	1,20668	-1,198	28
2,5	5	0,0202	0,8727	0,01679	1,20668	-1,198	28
5	6,5	0,0123	0,9374	0,01679	1,20668	-1,198	28
6,5	8	0,1242	1	0,04321	1,16518	-3,227	83
8	9,5	0,1319	1	0,07097	1,35096	0,001	90
9,5	11	0,0020	1	0,10486	1,2	-3,236	142
ZFSV		0,0191	1	0,10486	1,2	-3,236	0,168

5.9.2 Modellierungsergebnisse LP_09

Im Jahresmittel ist im Oberboden (30 cm), je nach Lastfall, Kabeltyp und Nutzungsart, mit einer Temperaturzunahme von max. 2,2 K zu rechnen. Bis zur häufig als Unterkante der Hauptwurzelzone anzunehmenden Tiefe von 60 cm zeigen sich Differenzen von bis zu 3,5 K. Im tieferen Unterboden steigen die Temperaturzunahmen auf bis zu 5,2 K (90 cm) bzw. 7,0 K (120 cm) an. Die Maximalwerte werden bei einer Kabelauslastung von 85 % erreicht. Bei einer Kabellast von 70 % sind die höchsten Jahresmittelwerte gemäß Tabelle 5.9-6 v. a. im Unterboden entsprechend niedriger (+ 1,5 K in 30 cm, + 2,4 K in 60 cm, + 3,6 K in 90 cm, + 4,7 K in 120 cm).

Tabelle 5.9-6: Mittlere betriebsbedingte Differenz der Bodentemperatur [K] in Abhängigkeit von Kabeltyp, Tiefenstufen, Nutzungsart und Lastfällen.

Kabeltyp	Kabel-auslastung	Nutzungsart	30 [cm]	60 [cm]	90 [cm]	120 [cm]
Typ 1	70 %	Getreide	1,5	2,3	3,4	4,5
Typ 1	70 %	Mais	1,4	2,3	3,4	4,4
Typ 1	85 %	Getreide	2,2	3,4	5,1	6,7
Typ 1	85 %	Mais	2,1	3,4	5,0	6,5
Typ 2	70 %	Getreide	1,5	2,4	3,6	4,7
Typ 2	70 %	Mais	1,5	2,3	3,4	4,5
Typ 2	85 %	Getreide	2,2	3,5	5,2	7,0
Typ 2	85 %	Mais	2,1	3,4	5,1	6,7

Mittlere Erwärmung [K]	≤ 1,0	≤ 3,0	≤ 5,0	≤ 7,5	≤ 10,0	> 10,0

Die mittels Leitprofil LP_09 repräsentierten Lössböden weisen unter Berücksichtigung der Textur (zuoberst tonig-schluffig, darunter sandig-lehmig) sowie der modelltechnisch angesetzten Witterungsbedingungen in den Trockenjahren bereits im Ausgangszustand ohne Last in vielen Fällen Wassergehalte unterhalb der potenziell verfügbaren nFK aus. Durch den Betrieb der Kabel sind je nach Lastfall, Nutzungsart, Kabeltyp und Tiefenstufe Abnahmen von > 0,1 % bis ca. 3,6 % in Bezug auf die nFK zu erwarten. Die höchsten Unterschiede zeigen sich außerhalb der Hauptwurzelzone, d. h. in 90 bis 120 cm Tiefe (darüberliegen bis max. 2,1 % Abnahme). Im Jahresverlauf können zu unterschiedlichen Zeitpunkten variierenden Abzüge hinsichtlich des pflanzenverfügbaren Wassers festgestellt werden. In vielen Fällen zeigen sich die höchsten Differenzbeträge im späteren Frühjahr bis Frühsommer ab 90 cm Tiefe. Deutlich gering bis kaum erkennbar ist der Effekt im Bereich der Hauptwurzelzone.

Tabelle 5.9-7: Mittlere betriebsbedingte Differenz [Diff.-nFK %] der Wassergehalte in Bezug auf die nFK des Bodens ohne Last [nFK %] in Abhängigkeit von Kabeltyp, Tiefenstufen, Nutzungsart und Lastfällen.

Kabel-typ	**Kabel-auslas-tung**	**Nutzungs-art**	**Messtiefe [cm] / nFK & Diff.-nFK [%]**							
			30		**60**		**90**		**120**	
			nFK	Diff.-nFK	nFK	Diff.-nFK	nFK	Diff.-nFK	nFK	Diff.-nFK
Typ 1	70 %	Getreide	76,7	-0,2	79,1	-0,3	62,4	-0,6	87,2	-0,7
Typ 1	70 %	Mais	95,0	-1,2	101,3	-1,6	93,2	-2,1	133,4	-3,3
Typ 1	85 %	Getreide	76,7	-0,5	79,1	-0,8	62,4	-1,3	87,2	-1,7
Typ 1	85 %	Mais	95,0	-1,3	101,3	-1,8	93,2	-2,2	133,4	-3,5
Typ 2	70 %	Getreide	74,3	-1,4	74,1	-2,0	51,7	-1,9	69,5	-2,0
Typ 2	70 %	Mais	92,8	-	97,5	-	81,3	-1,2	106,2	-1,7
Typ 2	85 %	Getreide	74,3	-1,5	74,1	-2,1	51,7	-1,9	69,5	-2,0
Typ 2	85 %	Mais	92,8	-	97,5	-0,3	81,3	-2,8	106,2	-3,6

5.10 Leitprofile LP_10

Das Leitprofil LP_10 repräsentiert die Bodenlandschaft Sandböden der Niederrheinischen Sandplatten. Bodentypologisch können hier vermehrt Pseudogleye, Gleye und Podsole verortet werden, allerdings sind auch vermehrt Vorkommen der kulturhistorisch besonders relevanten Plaggenesche bekannt. Die Bodenarten-Gruppe variiert in diesem Fall von mittel bis stark humosen Lehmsanden zu Sand- bis Normallehmen. Der Humusgehalt nimmt mit der Tiefe ab, ist jedoch aufgrund des angenommenen E-Horizontes bis in 5 dm Tiefe als stark humos einzustufen. Die Einstufung der Trockenrohdochte nimmt von gering im Bereich der Hauptwurzelzone bis mittel in den darunterliegenden Schichten zu (s. Tabelle 5.10-1).

Tabelle 5.10-1: Profilaufbau des Leitprofils LP_10.

Bodenlandschaft (Leitprofil)	Horizont	Von [dm]	Bis [dm]	Bodenart KA 5	Humus [%]	TRD [g/cm³]
Sandböden der Niederrheinischen Sandplatten (z. B. pseudovergley-ter Plaggenesch)	Ap	0	3	Sl3	6	1,34
	E	3	5	Sl3	6	1,34
	Sw-E	5	8	Sl4	1,5	1,49
	IISd	8	12	Ls3	1	1,51
	IIC	12	20	Sl4	0	1,55
	ZFSV	-	-	-	-	1,30

5.10.1 Modellbeschreibung und Parametrisierung LP_10

Die bodenphysikalischen Parameter (v. a. Bodenart, Humusgehalt und Lagerungsdichte) bestimmen maßgebend die weiteren Parameter, welche für die numerische Modellierung von zentraler Bedeutung sind. Für die Kennwerte der Wärmeleitfähigkeit und Wärmekapazität kommt zudem dem Wassergehalt eine besondere Bedeutung zu (vgl. Tabelle 5.10-2). Je nach Wassergehalt stellen sich unterschiedliche Werte für die zuvor genannten Parameter des Wärmehaushalts ein, welche anhand der Tabelle 5.10-3 und Tabelle 5.10-4 für die Zustände bei vollständiger Sättigung, Feldkapazität sowie dem Totwassergehalt beschrieben werden. In den sandigen und humosen Oberböden zeigt sich eine deutliche Abnahme (< 1 W//m*K) bei einer nahezu vollständigen Austrocknung. Mit abnehmenden Humusgehalten und zunehmender Trockenrohdichten stellen sich in den Unterbodenhorizonten tendenziell günstigere Werte für die Ableitung von Wärme ein.

Tabelle 5.10-2: Rechnerisch bestimmte volumetrische Wassergehalte und abgeleitete Durchlässigkeit in der gesättigten Zone für das Leitprofil LP_10.

Von [dm]	Bis [dm]	GPV [Vol.-%]	nFK FÄ [Vol.-%]	FK FÄ [Vol.-%]	TOT FÄ [Vol.-%]	Kf-Wert nach Renger [cm/d]
0	3	57	20	33	13	55
3	5	57	20	33	13	55
5	8	45	13	27	14	40
8	12	43	12	28	16	35
12	20	39,5	11,5	24,5	13	40
ZFSV		52,4	-	-	-	0,0864

Tabelle 5.10-3: Volumetrische Wärmekapazität und spezifische Wärme bei verschiedenen Wassergehalten für das Leitprofil LP_10.

Von [dm]	Bis [dm]	Cv θs [MJ/(m³*K)]	Cv pF 1,8 [MJ/(m³*K)]	Cv pF 4,2 [MJ/(m³*K)]	c_s [W*s/(kg*K)]	c_w [W*s/(kg*K)]
0	3	2,35	1,88	1,38	1939	2221
3	5	2,35	1,88	1,38	1939	2221
5	8	2,27	1,87	1,52	1454	2445
8	12	2,25	1,91	1,59	1404	2459
12	20	2,21	1,85	1,53	1285	2583
ZFSV		-	-	-	1688	2325

Tabelle 5.10-4: Wärmeleitfähigkeit bei verschiedenen Wassergehalten für das Leitprofil LP_10.

Von [dm]	Bis [dm]	WLFK θs [W/(m*K)]	WLFK pF 1,8 [W/(m*K)]	WLFK pF 4,2 [W/(m*K)]	λ_s [W/(m*K)]	λ_w [W/(m*K)]
0	3	1,93	1,48	0,83	5,9027	1,7387*
3	5	1,93	1,48	0,83	5,9027	1,7387*
5	8	2,11	1,85	1,54	4,8845	1,1276*
8	12	1,71	1,55	1,36	3,7703	0,8186*
12	20	2,09	1,85	1,55	4,5436	1,1220*
ZFSV		-	-	-	0	3,0769

Es handelt sich um ein grundwasserfernes Modell. Die Geländeoberkante liegt bei 25,04 m und der Breitengrad bei 51,75 °N. Für die Klimadaten wird die Klimastation mit der Stations-ID 7374 verwendet. Die Jahresniederschlagssumme 2019 betrug 748 mm und die tatsächliche Evapotranspiration 520 mm (Getreide), bzw. 339 mm (Mais). Die Grundwassertemperatur als das langjährige Mittel liegt bei 10,38 °C und die Globalstrahlung 2019 bei 116 W / m². Es ergibt sich eine jährliche Sickerwasserrate der Grundwasserneubildung von 84 mm (Getreide), bzw. 261 mm (Mais).

Tabelle 5.10-5: Van-Genuchten-Parameter für das Leitprofil LP_10.

Von [dm]	Bis [dm]	θ_r [-]	θ_s [-]	α [1/hPa]	n [-]	x [-]	K_0 [cm/d]
0	3	0,1351	1	0,066	1,34	0,001	90
3	5	0,1351	1	0,066	1,34	0,001	90
5	8	0,0022	1	0,10486	1,18427	0,001	141
8	12	0,1694	0,9514	0,06835	1,20501	0,001	98
12	20	0,0025	1	0,10486	1,16	0,001	142
ZFSV		0,0191	1	0,10486	1,2	0,001	0,168

5.10.2 Modellierungsergebnisse LP_10

Im Jahresmittel ist im Oberboden (30 cm), je nach Lastfall, Kabeltyp und Nutzungsart, mit einer Temperaturzunahme von max. 1,8 K zu rechnen. Bis zur häufig als Unterkante der Hauptwurzelzone anzunehmenden Tiefe von 60 cm zeigen sich Differenzen von bis zu 3,0 K. Im tieferen Unterboden steigen die Temperaturzunahmen auf bis zu 4,3 K (90 cm) bzw. 5,9 K (120 cm) an. Die Maximalwerte werden bei einer Kabelauslastung von 85 % erreicht. Bei einer Kabellast von 70 % sind die höchsten Jahresmittelwerte gemäß Tabelle 5.10-6 v. a. im Unterboden entsprechend niedriger (+ 1,2 K in 30 cm, + 2,0 K in 60 cm, + 2,9 K in 90 cm, + 4,0 K in 120 cm).

Tabelle 5.10-6: Mittlere betriebsbedingte Differenz der Bodentemperatur [K] in Abhängigkeit von Kabeltyp, Tiefenstufen, Nutzungsart und Lastfällen.

Kabeltyp	Kabel-auslastung	Nutzungsart	30 [cm]	60 [cm]	90 [cm]	120 [cm]
Typ 1	70 %	Getreide	1,2	2,0	2,8	3,9
Typ 1	70 %	Mais	1,1	1,9	2,7	3,8
Typ 1	85 %	Getreide	1,8	2,9	4,2	5,7
Typ 1	85 %	Mais	1,7	2,8	4,0	5,6
Typ 2	70 %	Getreide	1,2	2,0	2,9	4,0
Typ 2	70 %	Mais	1,2	1,9	2,8	3,9
Typ 2	85 %	Getreide	1,8	3,0	4,3	5,9
Typ 2	85 %	Mais	1,7	2,9	4,1	5,7

Mittlere Erwärmung [K]	≤ 1,0	≤ 3,0	≤ 5,0	≤ 7,5	≤ 10,0	> 10,0

Das Plaggenesch-Leitprofil weist trotz hoher Sandanteile, u. a. aufgrund der Humusgehalte in den obersten Bodenschichten, eine zumeist gute Wasserversorgung für Kulturpflanzen auf. Eine Abnahme des pflanzenverfügbaren Wassers durch den Kabelbetrieb lässt sich im Jahresmittel nur in einem sehr geringen Umfang (im A- und E-Horizont bis ca. 1,5 % der nFK und im Unterboden < 1 % der nFK) ableiten. Das Bild zeichnet sich im Jahresverlauf i. d. R. recht homogen. Nur in 120 cm Tiefe lässt sich eine sehr leichte Zunahme der Differenzen in Bezug auf die nutzbare Feldkapazität (also eine Abnahme des pflanzenverfügbaren Wassers) während der Frühjahres- und Frühsommermonate ausmachen. In diesen Fällen liegt eine überwiegend ausreichende bis gute Wasserversorgung vor und die Abnahmebeträge sind in Bezug auf die Gesamtverfügbarkeit sehr gering. Eine erkennbare Verstärkung der potenziellen Austrocknung im Sommer (unter Annahme eines Trockenjahres) lässt sich nicht erkennen.

Tabelle 5.10-7: Mittlere betriebsbedingte Differenz [Diff.-nFK %] der Wassergehalte in Bezug auf die nFK des Bodens ohne Last [nFK %] in Abhängigkeit von Kabeltyp, Tiefenstufen, Nutzungsart und Lastfällen.

Kabel-typ	**Kabel-auslas-tung**	**Nutzungs-art**	**Messtiefe [cm] / nFK & Diff.-nFK [%]**							
			30		**60**		**90**		**120**	
			nFK	Diff.-nFK	nFK	Diff.-nFK	nFK	Diff.-nFK	nFK	Diff.-nFK
Typ 1	70 %	Getreide	88,4	-0,3	99,7	-0,2	98,8	-	93,2	-
Typ 1	70 %	Mais	111,2	-0,6	127,7	-0,7	125,0	-0,3	135,1	-
Typ 1	85 %	Getreide	88,4	-0,4	99,7	-0,4	98,8	-	93,2	-
Typ 1	85 %	Mais	111,2	-1,0	127,7	-1,1	125,0	-0,5	135,1	-0,1
Typ 2	70 %	Getreide	87,1	-0,6	96,3	-0,7	92,2	-0,3	97,3	-0,3
Typ 2	70 %	Mais	110,9	-0,8	125,9	-0,9	119,0	-0,5	128,9	-0,5
Typ 2	85 %	Getreide	87,1	-0,8	96,3	-1,0	92,2	-0,4	97,3	-0,4
Typ 2	85 %	Mais	110,9	-1,2	125,9	-1,4	119,0	-0,9	128,9	-0,8

5.11 Leitprofile LP_11

Bei dem Leitprofil LP_11 handelt es sich um ein ausgewähltes Profil aus der Bodenlandschaft der Böden aus solifluidalen Sedimenten. Oberhalb des hoch anstehenden Ausgangsgesteins sind oft pseudovergleyte Böden anzutreffen. Die Fein-Bodenarten wechseln von Lehmschluffen im Oberboden über Schlufftone bis hin zu Tonlehmen im Unterboden. Charakteristisch sind in diesen Abschnitten die erhöhten Skelettanteile in Form von Steinen und Blöcken, welche im vorliegenden Fall von knapp 10 % im Oberboden bis zu 50 % im Unterboden und > 70 % im Untergrund ansteigen. Der Humusgehalt nimmt vom mittel humosen Oberboden zum humusfreien Unterboden stetig ab. Umgekehrt steigt die Trockenrohdichte von mittleren Werten im Oberboden zu höheren Werten im tieferen Profilverlauf an (s. Tabelle 5.11-1).

Tabelle 5.11-1: Profilaufbau des Leitprofils LP_11.

Bodenlandschaft (Leitprofil)	Horizont	Von [dm]	Bis [dm]	Bodenart KA 5	Humus [%]	TRD [g/cm³]	Grobbodenanteil [%]
Böden aus solifluidalen Sedimenten (z. B. Pseudogleye)	Ap	0	3	Uls	3	1,53	9,0
	Sw	3	4,5	Uls	0,5	1,53	9,0
	Sd	4,5	9	Lt3	0	1,76	50,0
	ilCv	9	13	Lts	0	1,8	72,5
	ZFSV	-	-	-	-	1,69	-

5.11.1 Modellbeschreibung und Parametrisierung LP_11

Die Ableitung der weiteren für die Modellberechnung relevanten Parameter erfolgt auf Grundlage der dafür maßgebenden bodenphysikalischen Grundparameter unter Berücksichtigung der Wassergehalte bei verschiedenen Saugspannungsstufen gemäß Tabelle 5.11-2. Unter Berücksichtigung der methodischen Besonderheiten für steinige Bodenhorizonte resultieren die in Tabelle 5.11-3 und Tabelle 5.11-4 dargestellten Werte für die angewandten Wärmehaushaltsparameter bei den verschiedenen Wassergehaltsstufen (Totwassergehalt, Feldkapazität und vollständige Sättigung). Die Wärmeleitfähigkeit bewegt sich in allen Fällen in einem Bereich von 1 bis 2 W/(m*K) und zeigt v. a. für die sehr steinreichen Horizonte keine starke Variabilität in Bezug auf die verschiedenen Saugspannungsstufen.

Tabelle 5.11-2: Rechnerisch bestimmte volumetrische Wassergehalte und abgeleitete Durchlässigkeit in der gesättigten Zone für das Leitprofil LP_11.

Von [dm]	Bis [dm]	GPV [Vol.-%]	nFK FÄ [Vol.-%]	FK FÄ [Vol.-%]	TOT FÄ [Vol.-%]	Kf-Wert nach Renger [cm/d]
0	3	49,18	20,39	31,73	11,34	27,5
3	4,5	38,07	16,98	27,32	10,34	13,5
4,5	9	11,25	2,19	9,69	7,5	1,5
9	13	6,75	1,69	5,63	3,94	2,5
ZFSV		35	-	-	-	0,0864

Tabelle 5.11-3: Volumetrische Wärmekapazität und spezifische Wärme bei verschiedenen Wassergehalten für das Leitprofil LP_11.

Von [dm]	Bis [dm]	Cv θs [MJ/(m³*K)]	Cv pF 1,8 [MJ/(m³*K)]	Cv pF 4,2 [MJ/(m³*K)]	c_s [W*s/(kg*K)]	c_w [W*s/(kg*K)]
0	3	3,18	2,45	1,6	1576	4169
3	4,5	2,76	2,31	1,6	1236	4172
4,5	9	2,21	2,15	1,99	980	4120
9	13	1,92	1,87	1,74	897	4122
ZFSV		-	-	-	1233	2485

Tabelle 5.11-4: Wärmeleitfähigkeit bei verschiedenen Wassergehalten für das Leitprofil LP_11.

Von [dm]	Bis [dm]	WLFK θs [W/(m*K)]	WLFK pF 1,8 [W/(m*K)]	WLFK pF 4,2 [W/(m*K)]	λ_s [W/(m*K)]	λ_w [W/(m*K)]
0	3	1,79	1,56	1,06	4,5439	1,1545*
3	4,5	1,91	1,70	1,17	4,3608	1,3351*
4,5	9	1,28	1,26	1,21	1,2696	1,3208
9	13	1,17	1,14	1,06	2,1159	0,5894*
ZFSV		-	-	-	1,2346	5,3254

Es handelt sich um ein grundwasserfernes Modell. Die Geländeoberkante liegt bei 300 m und der Breitengrad bei 50,597 °N. Für die Klimadaten wird die Klimastation mit der Stations-ID 1639 verwendet. Die Jahresniederschlagssumme 2019 betrug 624 mm und die tatsächliche Evapotranspiration 403 mm (Getreide), bzw. 394 mm (Mais). Die Grundwassertemperatur als das langjährige Mittel liegt bei 9,9 °C und die Globalstrahlung 2019 bei 120 W / m². Es ergibt sich eine jährliche Sickerwasserrate der Grundwasserneubildung von 92 mm (Getreide), bzw. 107 mm (Mais).

Tabelle 5.11-5: Van-Genuchten-Parameter für das Leitprofil LP_11.

Von [dm]	**Bis [dm]**	**θ_r [-]**	**θ_s [-]**	**α [1/hPa]**	**n [-]**	**x [-]**	**K_0 [cm/d]**
0	3	0,0020	0,8821	0,02513	1,23	-4,032	29
3	4,5	0,0026	0,9876	0,02513	1,22	-4,032	38
4,5	9	0,5015	1	0,01	1,15	-4,099	2,5
9	13	0,3547	1	0,018	1,14	0,001	0,864
ZFSV		0	0,9629	0,04321	1,29	-3,227	0,168

5.11.2 Modellierungsergebnisse LP_11

Im Jahresmittel ist im Oberboden (30 cm), je nach Lastfall, Kabeltyp und Nutzungsart, mit einer Temperaturzunahme von max. 2,0 K zu rechnen. Bis zur häufig als Unterkante der Hauptwurzelzone anzunehmenden Tiefe von 60 cm zeigen sich Differenzen von bis zu 3,6 K. Im tieferen Unterboden steigen die Temperaturzunahmen auf bis zu 5,6 K (90 cm) bzw. 8,2 K (120 cm) an. Die Maximalwerte werden bei einer Kabelauslastung von 85 % erreicht. Bei einer Kabellast von 70 % sind die höchsten Jahresmittelwerte gemäß Tabelle 5.11-6 v. a. im Unterboden entsprechend niedriger (+ 1,3 K in 30 cm, + 2,4 K in 60 cm, + 3,8 K in 90 cm, + 8,2 K in 120 cm).

Bei den lösslehmhaltigen Böden aus solifluidalen Sedimente, mit einem hohen Grobbodenanteil im Unterboden und Untergrund, sind keine bis sehr geringfügig erkennbare Auswirkungen hinsichtlich der nFK absehbar. Im Jahresmittel zeigen sich im Oberboden gering Abnahmen von < 1 % bei einem mittleren Grundwert der Wasserversorgung von ca. 100 % der nFK. Jahreszeitlich gesehen können sich, v. a. im steinigen Unterboden und Untergrund, temporär (Sommer und Frühherbst) sehr geringe Wasserverfügbarkeiten einstellen. Starke Spitzen in Bezug auf die betriebsbedingten Effekte zeigen sich kaum. Am ehesten lässt sich in 120 cm Tiefe beim Typ 1 (Hinweis: OK Bettungszone entspricht dem Übergang zur Bodenzone in 120 cm Tiefe) eine schwach erkennbare Abnahme im späten Frühjahr bzw. dem Frühsommer erwarten.

Tabelle 5.11-6: Mittlere betriebsbedingte Differenz der Bodentemperatur [K] in Abhängigkeit von Kabeltyp, Tiefenstufen, Nutzungsart und Lastfällen.

Kabeltyp	**Kabel-auslastung**	**Nutzungsart**	**30 [cm]**	**60 [cm]**	**90 [cm]**	**120 [cm]**
Typ 1	70 %	Getreide	1,3	2,3	3,6	5,3
Typ 1	70 %	Mais	1,3	2,3	3,6	5,2
Typ 1	85 %	Getreide	1,9	3,5	5,4	7,7
Typ 1	85 %	Mais	1,9	3,4	5,3	7,7
Typ 2	70 %	Getreide	1,3	2,4	3,8	5,6
Typ 2	70 %	Mais	1,3	2,4	3,8	5,6
Typ 2	85 %	Getreide	2,0	3,6	5,6	8,2
Typ 2	85 %	Mais	2,0	3,6	5,6	8,2

Mittlere Erwärmung [K]	≤ 1,0	≤ 3,0	≤ 5,0	≤ 7,5	≤ 10,0	> 10,0

Tabelle 5.11-7: Mittlere betriebsbedingte Differenz [Diff.-nFK %] der Wassergehalte in Bezug auf die nFK des Bodens ohne Last [nFK %] in Abhängigkeit von Kabeltyp, Tiefenstufen, Nutzungsart und Lastfällen.

Kabel-typ	**Kabel-auslas-tung**	**Nutzungs-art**	**Messtiefe [cm] / nFK & Diff.-nFK [%]**							
			30		**60**		**90**		**120**	
			nFK	Diff.-nFK	nFK	Diff.-nFK	nFK	Diff.-nFK	nFK	Diff.-nFK
Typ 1	70 %	Getreide	102,3	-0,3	120,6	-	121,8	-	7,9	-
Typ 1	70 %	Mais	102,9	-	121,0	-	122,3	-	11,2	-
Typ 1	85 %	Getreide	102,3	-0,4	120,6	-	121,8	-	7,9	-
Typ 1	85 %	Mais	102,9	-0,2	121,0	-	122,3	-	11,2	-
Typ 2	70 %	Getreide	101,4	-0,3	119,7	-	120,2	-	110,4	-
Typ 2	70 %	Mais	101,7	-	119,8	-	120,4	-	111,0	-
Typ 2	85 %	Getreide	101,4	-0,5	119,7	-0,1	120,2	-	110,4	-
Typ 2	85 %	Mais	101,7	-	119,8	-	120,4	-	111,0	-

5.12 Leitprofile LP_12

Das Leitprofil LP_12 soll anhand der Bodenlandschaft der Böden aus solifluidalen Sedimenten einen besonders tonreichen Boden darstellen. Bodentypologisch sind v. a. die im Korridorbereich potenziell vorkommenden Pelosole und Gley-Pelosole zu nennen. Die Bodenarten-Gruppen (Feinboden) reichen von Schlufftonen und Lehmtonen im oberen Bereich über Lehmschluffe bis hin zu grobkörnigen Reinsanden mit grobkörnigeren Kies-Anteilen (knapp 30 Vol.-%) im Untergrund. Der Humusgehalt ist im Oberboden mittel bis hoch und nimmt mit der Tiefe deutlich ab. Die Trockenrohdichte bewegt sich gemäß KA5 insgesamt im mittleren bis hohen Bereich.

Tabelle 5.12-1: Profilaufbau des Leitprofils LP_12.

Bodenland-schaft (Leitprofil)	Horizont	Von [dm]	Bis [dm]	Bodenart KA 5	Humus [%]	TRD [g/cm³]	Grobboden-anteil [%]
Böden aus fluviatilen Sedimenten (z. B. Pelosole und Gley-Pelosol)	Ah	0	1	Lt3	6	1,41	-
	P	1	10	Tl	0,5	1,55	-
	Go	10	17,8	Tu3	0	1,61	-
	eGmco	17,8	18,5	Uls	0	1,73	-
	eGo	18,5	20	gS	0	1,4	27,5
	ZFSV	-	-	-	-	1,69	-

5.12.1 Modellbeschreibung und Parametrisierung LP_12

Für die numerischen Modellierung wurden auf Grundlage der bodenphysikalischen Eigenschaften im Bodenprofil weitergehende Eingangsparameter abgeleitet, welche in einem besonderen Maße von der Bodenart, dem Humusgehalt und der Trockenrohdichte beeinflusst werden. Die daraus ableitbaren Kennwerte der Wasserbindung bei verschiedenen Saugspannungsstufen (Totwassergehalt, Feldkapazität und vollständiger Sättigung) können der Tabelle 5.12-2 entnommen werden. Darauf aufbauend ergeben sich die in Tabelle 5.12-3 und Tabelle 5.12-4 aufgezeigten Wärmeparameter. Je nach Horizont und Sättigungsgrad können sich sehr geringe Werte in Bezug auf die Wärmeleitfähigkeit (< 0,8 W/(m*K)) einstellen. Unter günstigen Bedingungen liegen die Werte je nach Horizont und Wassergehalte um den Faktor 2 bis 3 erhöht. Es zeigt sich also eine sehr differenzierte Ausprägung innerhalb des Profils.

Tabelle 5.12-2: Rechnerisch bestimmte volumetrische Wassergehalte und abgeleitete Durchlässigkeit in der gesättigten Zone für das Leitprofil LP_12.

Von [dm]	Bis [dm]	GPV [Vol.-%]	nFK FÄ [Vol.-%]	FK FÄ [Vol.-%]	TOT FÄ [Vol.-%]	Kf-Wert nach Renger [cm/d]
0	1	62,5	15,5	41,5	26	27,5
1	10	40	7	37	30	2
10	17,8	39,5	13	36,5	23,5	3
17,8	18,5	36	19	30	11	7
18,5	20	38,775	11,43	13,9	2,48	327,5
ZFSV		35	-	-	-	0,0864

Tabelle 5.12-3: Volumetrische Wärmekapazität und spezifische Wärme bei verschiedenen Wassergehalten für das Leitprofil LP_12.

Von [dm]	Bis [dm]	Cv θs [MJ/(m³*K)]	Cv pF 1,8 [MJ/(m³*K)]	Cv pF 4,2 [MJ/(m³*K)]	c_s [W*s/(kg*K)]	c_w [W*s/(kg*K)]
0	1	2,26	1,91	1,58	2549	1862
1	10	2,22	2,15	1,99	1395	2306
10	17,8	2,26	2,19	1,87	1343	2411
17,8	18,5	2,28	2,13	1,61	1203	2639
18,5	20	2,69	1,65	1,17	1244 / 1568	4192 / 4192
ZFSV		-	-	-	1233	2485

Tabelle 5.12-4: Wärmeleitfähigkeit bei verschiedenen Wassergehalten für das Leitprofil LP_12.

Von [dm]	Bis [dm]	WLFK θs [W/(m*K)]	WLFK pF 1,8 [W/(m*K)]	WLFK pF 4,2 [W/(m*K)]	λ_s [W/(m*K)]	λ_w [W/(m*K)]
0	1	1,02	0,95	0,87	2,9982	0,3873*
1	10	1,34	1,25	1,04	0,2333	3,0000
10	17,8	1,63	1,56	1,17	4,7517	2,0399*
17,8	18,5	2,46	2,30	1,55	5,6875	1,8364*
18,5	20	1,95	1,33	0,53	4,1711 / 1,7709	1,2189* / 2,4900
ZFSV		-	-	-	1,2346	5,3254

Für die hydraulische Randbedingung wird ein Potentialgefälle von $1{,}38 \cdot 10^{-3}$ m / m bei einem Flurabstand von 2 m angenommen. Die Geländeoberkante liegt bei 90,69 m und der Breitengrad bei 49,77 °N. Für die Klimadaten wird die Klimastation mit der Stations-ID 1420 verwendet. Die Jahresniederschlagssumme 2019 betrug 586 mm und die tatsächliche Evapotranspiration 473 mm (Getreide), bzw. 262 mm (Mais). Die Grundwassertemperatur als das langjährige Mittel liegt bei 11,31 °C und die Globalstrahlung 2019 bei 129 W / m². Es ergibt sich eine jährliche Grundwasserzehrung von -92 mm (Getreide), bzw. eine jährliche Sickerwasserrate der Grundwasserneubildung von 74 mm (Mais).

Tabelle 5.12-5: Van-Genuchten-Parameter für das Leitprofil LP_12.

Von [dm]	**Bis [dm]**	**θ_r [-]**	**θ_s [-]**	**α [1/hPa]**	**n [-]**	**x [-]**	**K_0 [cm/d]**
0	1	0,3692	0,8960	0,04947	1,17003	-4,099	44
1	10	0,0025	1	0,008	1,06254	0,001	17
10	17,8	0,0025	1	0,004	1,12	0,001	12
17,8	18,5	0,0028	1	0,008	1,25	-4,032	10
18,5	20	0,0026	0,8011	0,0022065	1,3	1,3829	721
ZFSV		0	0,9629	0,04321	1,29	-3,227	0,168

5.12.2 Modellierungsergebnisse LP_12

Im Jahresmittel ist im Oberboden (30 cm), je nach Lastfall, Kabeltyp und Nutzungsart, mit einer Temperaturzunahme von max. 1,9 K zu rechnen. Bis zur häufig als Unterkante der Hauptwurzelzone anzunehmenden Tiefe von 60 cm zeigen sich Differenzen von bis zu 3,6 K. Im tieferen Unterboden steigen die Temperaturzunahmen auf bis zu 5,5 K (90 cm) bzw. 7,4 K (120 cm) an. Die Maximalwerte werden bei einer Kabelauslastung von 85 % erreicht. Bei einer Kabellast von 70 % sind die höchsten Jahresmittelwerte gemäß Tabelle 5.12-6 v. a. im Unterboden entsprechend niedriger (+ 1,3 K in 30 cm, + 2,5 K in 60 cm, + 3,8 K in 90 cm, + 6,1 K in 120 cm).

Tabelle 5.12-6: Mittlere betriebsbedingte Differenz der Bodentemperatur [K] in Abhängigkeit von Kabeltyp, Tiefenstufen, Nutzungsart und Lastfällen.

Kabeltyp	**Kabel-auslastung**	**Nutzungsart**	**30 [cm]**	**60 [cm]**	**90 [cm]**	**120 [cm]**
Typ 1	70 %	Getreide	1,3	2,4	3,7	5,0
Typ 1	70 %	Mais	1,2	2,3	3,5	4,6
Typ 1	85 %	Getreide	1,9	3,6	5,5	7,3
Typ 1	85 %	Mais	1,8	3,4	5,1	6,8
Typ 2	70 %	Getreide	1,3	2,5	3,8	5,1
Typ 2	70 %	Mais	1,2	2,3	3,5	4,7
Typ 2	85 %	Getreide	1,9	3,6	5,5	7,4
Typ 2	85 %	Mais	1,8	3,4	5,1	6,9

Mittlere Erwärmung [K]	≤ 1,0	≤ 3,0	≤ 5,0	≤ 7,5	≤ 10,0	> 10,0

Die anhand des Leitprofils LP_12 im Bereich fluviatiler Hochflutsedimente betrachteten Pelosole stellen in Bezug auf die Ergebnisse des Wasserhaushalts einen Sonderfall dar. Die Böden sind aufgrund der hohen Tongehalt durch sehr geringe Luftkapazitäten und geringe nutzbaren Feldkapazitäten innerhalb der meisten Profilschichten geprägt. Der Anteil des Totwassergehalts ist entsprechend hoch. Im Jahresverlauf zeigt sich, dass sich aufgrund dieser Bedingungen ein sehr heterogenes Bild angesichts etwaiger Verluste des pflanzenverfügbaren Wassers oder Zunahmen einstellt. Hieraus ergibt sich auch die Notwendigkeit auf eine tabellarische Darstellung von Mittelwerten zu verzichten, da die Werte aufgrund der sehr heterogenen Jahresverläufe sowie der besonderen Kennwerte der Wasserbindung (geringe nFK bei zugleich hohen Totwassergehalten) nicht aussagekräftig sind. Anhand der nFK-Jahresverlaufsdiagramme ist v. a. beim Getreideanbau eine auffallende Zunahme der pflanzenverfügbaren Wassergehalte im Spätherbst sowie in den Winter- und Frühjahrsmonaten erkennbar. Insgesamt zeigen sich im Jahresverlauf, insbesondere allerdings in den Sommermonaten in 30 cm Tiefe, deutliche Sprünge beim nFK-anteiligen Wassergehalt. Zudem kommt es während der Sommermonate v. a. bei der Getreidenutzung zu einer vollständigen Austrocknung in Bezug auf die pflanzenverfügbaren Vorräte. Dass sich dieser Zustand in 120 cm Tiefe beim Typ 1 langfristig einstellt, soll an dieser Stelle erwähnt werden, ist jedoch – unabhängig der noch folgenden Diskussion der Ergebnisse – auf die Modellrandbedingungen (Übergangsbereich zur Bettungszone beim Typ 1 in 120 cm Tiefe) sowie das Verhältnis von Luftkapazität, nutzbarer Feldkapazität und Totwassergehalt bei moderaten Sättigungswerten zurückzuführen.

5.13 Leitprofile LP_13

Das Leitprofil LP_13 repräsentiert ein weiteres Profil der Bodenlandschaft aus solifluidalen Sedimenten, mit dem Ziel der Berücksichtigung skelettreicher Böden in den südlicheren Korridorabschnitten. Auch hier treten vermehrt Pseudogleye auf. Die Bodenarten-Gruppen (Feinboden) bestehen zunächst aus Normallehmen, gefolgt von Schlufftonen und schließlich Tonlehmen. Im Vergleich zum Leitprofil LP_11 setzt sich der Grobbodenanteil aus der kiesigen Fraktion, bei insgesamt erhöhten Volumenanteilen, zusammen. Der Oberboden ist als mittel humos einzustufen, während der Unterboden sehr schwach humos (bis 5 dm) bis humusfrei ist. Die Trockenrohdichte liegt im Bereich der Hauptwurzelzone im überwiegend mittleren Bereich und ist im Unterboden sowie Untergrund nach KA5 als hoch einzuschätzen.

Tabelle 5.13-1 Profilaufbau des Leitprofils LP_13.

Bodenland-schaft (Leitprofil)	**Horizont**	**Von [dm]**	**Bis [dm]**	**Bodenart KA 5**	**Humus [%]**	**TRD [g/cm³]**	**Grobboden-anteil [%]**
Böden aus solifluidalen Sedimenten (z. B. Pseudo-gleye)	Ap	0	3	Ls3	3	1,51	9,0
	Sw	3	5	Ls3	0,5	1,51	9,0
	Sd	5	10	Lt3	0	1,76	27,5
	ilCv	10	15,5	Lts	0	1,65	72,5
	ilCn	15,5	20	Lts	0	1,65	90,0
	ZFSV	-	-	-	-	1,69	-

5.13.1 Modellbeschreibung und Parametrisierung LP_13

Die bodenphysikalischen Grundparameter wie die Bodenart, der Humusgehalt und die Lagerungsdichte bestimmen wesentlich die weiteren Eingangsparameter für die durchgeführte Modellierung. Zudem sind die daraus ableitbaren Kennwerte der Wasserbindung bei verschiedenen Wassergehalten (Totwassergehalt, Wassergehalt bei Feldkapazität sowie vollständige Sättigung, siehe Tabelle 5.13-2) von Bedeutung. Hieraus leiten sich die in den Tabellen Tabelle 5.13-3 und Tabelle 5.13-4 dargestellten thermischen Eigenschaften des Bodenprofils ab. Typischerweise zeigt sich eine im Vergleich zu den Feinböden geringere Abhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit vom Wassergehalt. Die Werte im gegenwärtigen Profil liegen je nach Horizont und Wassergehalt um die 1 W/(m*K) bis ca. 1,6 W/(m*K).

Tabelle 5.13-2: Rechnerisch bestimmte volumetrische Wassergehalte und abgeleitete Durchlässigkeit in der gesättigten Zone für das Leitprofil LP_13.

Von [dm]	**Bis [dm]**	**GPV [Vol.-%]**	**nFK FÄ [Vol.-%]**	**FK FÄ [Vol.-%]**	**TOT FÄ [Vol.-%]**	**Kf-Wert nach Renger [cm/d]**
0	3	48,18	16,22	31,26	15,04	47,5
3	5	37,13	11,81	26,85	15,04	27,5
5	10	14,85	2,89	12,79	9,9	1,5
10	15,5	14,8125	3,75	11,63	7,88	12,5
15,5	20	25,9375	1,25	17,88	16,63	12,5
ZFSV		35	-	-	-	0,0864

Tabelle 5.13-3: Volumetrische Wärmekapazität und spezifische Wärme bei verschiedenen Wassergehalten für das Leitprofil LP_13.

Von [dm]	**Bis [dm]**	**Cv θs [MJ/(m³*K)]**	**Cv pF 1,8 [MJ/(m³*K)]**	**Cv pF 4,2 [MJ/(m³*K)]**	**c_s [W*s/(kg*K)]**	**c_w [W*s/(kg*K)]**
0	3	3,12	2,41	1,73	1529	4187
3	5	2,71	2,28	1,78	1209	4209
5	10	2,47	2,38	2,17	978	4543
10	15,5	1,85	1,76	1,62	908	4105
15,5	20	2,37	2,04	2	1105	3925
ZFSV		-	-	-	1233	2485

Tabelle 5.13-4: Wärmeleitfähigkeit bei verschiedenen Wassergehalten für das Leitprofil LP_13.

Von [dm]	Bis [dm]	WLFK θs [W/(m*K)]	WLFK pF 1,8 [W/(m*K)]	WLFK pF 4,2 [W/(m*K)]	λ_s [W/(m*K)]	λ_w [W/(m*K)]
0	3	1,59	1,44	1,21	3,7255	0,7565*
3	5	1,62	1,50	1,31	3,3363	0,7989*
5	10	1,43	1,41	1,36	1,5874	1,0000
10	15,5	1,08	1,03	0,94	0,8584	2,5000
15,5	20	1,08	1,00	0,98	2,0335	0,5364*
ZFSV		-	-	-	1,2346	5,3254

Es handelt sich um ein grundwasserfernes Modell. Die Geländeoberkante liegt bei 300 m und der Breitengrad bei 50,597 °N. Für die Klimadaten wird die Klimastation mit der Stations-ID 1639 verwendet. Die Jahresniederschlagssumme 2019 betrug 624 mm und die tatsächliche Evapotranspiration 434 mm (Getreide), bzw. 320 mm (Mais). Die Grundwassertemperatur als das langjährige Mittel liegt bei 9,9 °C und die Globalstrahlung 2019 bei 120 W / m². Es ergibt sich eine jährliche Sickerwasserrate der Grundwasserneubildung von 60 mm (Getreide), bzw. 197 mm (Mais).

Tabelle 5.13-5: Van-Genuchten-Parameter für das Leitprofil LP_13.

Von [dm]	Bis [dm]	θ_r [-]	θ_s [-]	α [1/hPa]	n [-]	x [-]	K_0 [cm/d]
0	3	0,1079	1	0,06835	1,20501	-3,226	93
3	5	0,1846	1	0,057	1,20501	-3,226	93
5	10	0,5015	1	0,0074	1,17003	-4,099	3,4
10	15,5	0,3407	1	0,019	1,19442	0,001	52
15,5	20	0,5657	0,7843	0,031401	1,19442	0,001	52
ZFSV		0	0,9629	1,29	1,29	-3,227	0,168

5.13.2 Modellierungsergebnisse LP_13

Im Jahresmittel ist im Oberboden (30 cm), je nach Lastfall, Kabeltyp und Nutzungsart, mit einer Temperaturzunahme von max. 2,0 K zu rechnen. Bis zur häufig als Unterkante der Hauptwurzelzone anzunehmenden Tiefe von 60 cm zeigen sich Differenzen von bis zu 3,6 K. Im tieferen Unterboden steigen die Temperaturzunahmen auf bis zu 5,6 K (90 cm) bzw. 8,2 K (120 cm) an. Die Maximalwerte werden bei einer Kabelauslastung von 85 % erreicht. Bei einer Kabellast von 70 % sind die höchsten Jahresmittelwerte gemäß Tabelle 5.13-6 v. a. im Unterboden entsprechend niedriger (+ 1,4 K in 30 cm, + 2,5 K in 60 cm, + 3,8 K in 90 cm, + 5,5 K in 120 cm).

Tabelle 5.13-6: Mittlere betriebsbedingte Differenz der Bodentemperatur [K] in Abhängigkeit von Kabeltyp, Tiefenstufen, Nutzungsart und Lastfällen.

Kabeltyp	Kabel-auslastung	Nutzungsart	30 [cm]	60 [cm]	90 [cm]	120 [cm]
Typ 1	70 %	Getreide	1,3	2,3	3,5	5,1
Typ 1	70 %	Mais	1,3	2,3	3,5	5,1
Typ 1	85 %	Getreide	1,9	3,4	5,2	7,6
Typ 1	85 %	Mais	1,9	3,4	5,2	7,6
Typ 2	70 %	Getreide	1,4	2,5	3,8	5,5
Typ 2	70 %	Mais	1,4	2,5	3,8	5,5
Typ 2	85 %	Getreide	2,0	3,6	5,5	8,2
Typ 2	85 %	Mais	2,0	3,6	5,6	8,1

Mittlere Erwärmung [K]	≤ 1,0	≤ 3,0	≤ 5,0	≤ 7,5	≤ 10,0	> 10,0

Die lösslehmreichen Böden aus Solifluktionsdecken mit basenarmen Gesteinsanteilen (hier pseudovergleyt) sind in Bezug auf die Kennwerte der Wasserbindung ebenfalls sehr spezifisch ausgeprägt. Insbesondere im steinigen Unterboden/Untergrund (s. o.) sind die Grundwerte der nFK äußerst gering einzustufen. Durch die betriebsbedingten Auswirkungen der Erdkabelleitung sind insgesamt moderate Effekte in Bezug auf das pflanzenverfügbare Wasser zu erwarten. Im tieferen Unterboden bzw. Untergrund können geringfügige Änderungen in Bezug auf die Wassersättigung eine mittlere Abnahme des pflanzenverfügbaren Wassers um ca. 2 bis 3 % bei ungünstigen Fallkonstellationen (hohe Auslastung, Getreide, Typ 2) bewirken. Auch im Oberboden bewegt sich die mittlere Abnahme mit Bezug zur nFK bei bis zu 2,2 %. Beim Anbau von Mais zeigt sich im Jahresverlauf keine starke Variabilität und die betriebsdingten Effekte

führen zu keinem Zeitpunkt zu einer erkennbaren Abnahme des pflanzenverfügbaren Wassers. Im Bereich der „Extremwerte“, also der verlaufsmäßigen Tiefpunkte, sind auch bei Getreide keine starken Differenzen während des Sommers zu beobachten. Es zeigen sich jedoch leichte Abweichungen hinsichtlich des pflanzenverfügbaren Wassers zu einem kurzen Zeitpunkt der Wassergehaltszunahme im Sommer sowie während der erneuten „Aufsättigung“ im Spätherbst und Winter.

Tabelle 5.13-7: Mittlere betriebsbedingte Differenz [Diff.-nFK %] der Wassergehalte in Bezug auf die nFK des Bodens ohne Last [nFK %] in Abhängigkeit von Kabeltyp, Tiefenstufen, Nutzungsart und Lastfällen.

Kabel-typ	**Kabel-auslas-tung**	**Nutzungs-art**	**Messtiefe [cm] / nFK & Diff.-nFK [%]**							
			30		**60**		**90**		**120**	
			nFK	Diff.-nFK	nFK	Diff.-nFK	nFK	Diff.-nFK	nFK	Diff.-nFK
Typ 1	70 %	Getreide	104,8	-0,4	119,5	-0,3	119,6	-	18,1	-
Typ 1	70 %	Mais	122,1	-0,5	137,5	-	138,3	-	63,8	-
Typ 1	85 %	Getreide	104,8	-1,0	119,5	-0,6	119,6	-0,5	18,1	-0,6
Typ 1	85 %	Mais	122,1	-0,7	137,5	-	138,3	-	63,8	-
Typ 2	70 %	Getreide	103,5	-1,7	118,0	-1,2	116,5	-1,5	105,1	-2,5
Typ 2	70 %	Mais	121,1	-0,6	136,8	-0,2	137,5	-	132,4	-0,4
Typ 2	85 %	Getreide	103,5	-2,2	118,0	-1,6	116,5	-1,9	105,1	-3,2
Typ 2	85 %	Mais	121,1	-0,9	136,8	-0,2	137,5	-0,1	132,4	-0,5

5.14 Fremdleitungen

Im folgenden Kapitel soll betrachtet werden, inwieweit Fremdleitungen die Wärmewegführung der Erdkabel beim Typ01 beeinflussen können. Dabei ist insbesondere auf eine Parallelführung und Kreuzung von Fremdleitungen in offener Bauweise der Erdkabelsysteme einzugehen. Den Berechnungen wurde zugrunde gelegt, dass sich der Rhein-Main-Link gem. Regelgrabenprofil in einer Tiefe (Überdeckung der Kabelschutzrohre) von ca. 1,30 m bis 1,40 m befindet.

Tabelle 5.14-1 stellt die Temperaturdifferenz des Bodens von zwei verschiedenen Leitprofilen (LP 6 und L9 12) über die Tiefe von 0,5 m bis 8 m unter Geländeoberkante dar. In den modellierten Leitprofilen LP_06 mit guten thermischen Eigenschaften und LP_12 mit schlechten thermischen Eigenschaften kann bei einer Ausführungslast von 85 % festgestellt werden, dass die maximale Temperaturdifferenz (ΔK) mit zunehmendem Abstand zur GOK kontinuierlich abnimmt. Wichtig ist zudem, dass die in Tabelle 5.14-1 genannten Temperaturdifferenzen ausschließlich in direkter Linie unterhalb oder oberhalb des Schutzrohrs gelten jedoch unabhängig davon in welchem Winkel sich der Rhein-Main-Link und die Fremdleitung(en) kreuzen. Wie schon in der Abbildung 6.1-6 zu erkennen ist, nimmt die Erwärmung zur Seite hin sehr schnell ab.

Im Kontext der Auslastung ist auf die Zeitpunkte der maximalen Erwärmung und Phasen geringer Erwärmung hinzuweisen. Dies bedeutet, dass jahreszeitabhängig in den Herbst und Wintermonaten die Auslastung der Erdkabelsysteme am höchsten ist. In diesen Monaten weht der Wind kräftiger und häufiger. Zugleich ist in diesen Monaten die Lufttemperatur vergleichsweise gering. In den heißen Sommermonaten fällt die Auslastung dagegen geringer aus. Das verringert selbstverständlich die maximalen absoluten Temperaturen, da starke betriebsbedingte Erwärmungen sich auf kalte Tage beschränken.

Tabelle 5.14-1 sind die Erwärmungen des umgebenen Bodens in verschiedenen Legetiefen zu entnehmen und können somit in der Planung bzw. technischen Abstimmung zur Querung mit dem Rhein-Main-Link seitens des Betreibers der Fremdleitung Berücksichtigung finden. Bei einem ausreichend gewähltem Abstand kann eine negative Beeinflussung von Fremdleitungen und durch Fremdleitungen selbst aufgrund der getroffenen Annahmen ausgeschlossen werden.

Tabelle 5.14-1: Maximale Temperaturdifferenz eines Profils mit guten thermischen Eigenschaften (LP_06) und mit schlechten thermischen Eigenschaften (LP_12) direkt unterhalb des Schutzrohrs bei einer Ausführungslast von 85 %.

Tiefe u. GOK [m]	LP_06 [MW ΔK]	LP_12 [MW ΔK]	MW ΔK
0,5	1,9	2,6	2,3
1	4,1	5,9	5,0
2	9,7	9,6	9,6
3	6,9	6,9	6,9
4	5,3	5,1	5,2
5	4,2	4,0	4,1
6	2,7	3,0	2,8
7	2,5	2,2	2,3
8	2,3	1,4	1,8

Tabelle 5.14-2: Maximale Temperaturdifferenz eines Profils mit guten thermischen Eigenschaften (LP_06) und mit schlechten thermischen Eigenschaften (LP_12) direkt unterhalb des Schutzrohrs bei einer Ausführungslast von 85 % für eine Verlegetiefe von 2,80 m.

Tiefe u. GOK [m]	Gesamt [MW ΔK]			Typ 1 [MW ΔK]			Typ 2 [MW ΔK]		
	LP_06	LP_12	MW ΔK	LP_06	LP_12	MW ΔK	LP_06	LP_12	MW ΔK
0,5	1,8	2,7	2,2	1,8	2,7	2,2	1,6	2,5	2,1
1	2,8	5,1	3,9	2,8	5,1	3,9	2,6	4,8	3,7
2	5,0	8,7	6,8	4,9	8,5	6,7	5,0	8,7	6,8
3	10,1	18,1	14,1	8,2	14,2	11,2	10,1	18,1	14,1
4	5,5	9,2	7,3	5,5	9,2	7,3	5,1	8,9	7,0
5	4,2	6,5	5,4	4,2	6,5	5,4	3,4	5,5	4,4
6	3,2	4,9	4,1	3,2	4,9	4,1	2,4	3,7	3,1
7	2,4	3,6	3,0	2,4	3,6	3,0	1,7	2,6	2,1
8	1,6	2,4	2,0	1,6	2,4	2,0	1,1	1,6	1,4

Tabelle 5.14-3: Maximale Temperaturdifferenz eines Profils mit guten thermischen Eigenschaften (LP_06) und mit schlechten thermischen Eigenschaften (LP_12) direkt unterhalb des Schutzrohrs bei einer Ausführungslast von 85 % für eine Verlegetiefe von 3,10 m.

Tiefe u. GOK [m]	**Gesamt [MW ΔK]**			**Typ 1 [MW ΔK]**			**Typ 2 [MW ΔK]**		
	LP_06	**LP_12**	**MW ΔK**	**LP_06**	**LP_12**	**MW ΔK**	**LP_06**	**LP_12**	**MW ΔK**
0,5	1,6	2,5	2,1	1,6	2,5	2,1	1,5	2,3	1,9
1	2,6	4,8	3,7	2,6	4,8	3,7	2,3	4,3	3,3
2	4,6	7,9	6,2	4,6	7,9	6,2	4,4	7,6	6,0
3	9,1	16,2	12,7	7,6	13,2	10,4	9,1	16,2	12,7
4	6,1	10,6	8,4	6,1	10,3	8,2	6,0	10,6	8,3
5	4,6	7,2	5,9	4,6	7,2	5,9	3,9	6,2	5,0
6	3,5	5,4	4,5	3,5	5,4	4,5	2,7	4,1	3,4
7	2,6	3,9	3,3	2,6	3,9	3,3	1,9	2,8	2,3
8	1,7	2,6	2,2	1,7	2,6	2,2	1,2	1,8	1,5

6. Ökologische Bewertung

Die ökologische Bewertung der betriebsbedingten Auswirkungen der Erdkabelsysteme gliedert sich wie folgt:

- Einfluss auf die natürliche Bodenwärmedynamik (Kapitel 6.1)
- Einfluss auf den Bodenwasserhaushalt (Kapitel 6.2)
- Einfluss auf den Nährstoffhaushalt u. organische Bodensubstanz (Kapitel 6.3)
- Einfluss auf Vegetation und Landwirtschaft (Kapitel 6.4)
- Einfluss auf Bodenorganismen (Edaphon) und Stoffwechselaktivitäten (Kapitel 6.5)

Der Betrieb von Erdkabelkabelanlagen ist stets mit einem Wärmefluss in den Boden verbunden, der vom Übertragungsverlust der Anlage abhängt. Dadurch ergeben sich potenzielle Auswirkungen auf überwiegend landwirtschaftlich und forstwirtschaftlich genutzte Böden (oftmals mittlerer Bedeutung). Im gesamten Geltungsbereich des vorliegenden Gutachtens werden zudem Böden mit hoher Funktionserfüllung und besonders empfindliche Böden besonderer Bedeutung im Sinne der Erfüllung von Bodenfunktionen gem. § 2 Abs. 2 BBodSchG berücksichtigt. Böden mit einer erhöhten, potenziellen Empfindlichkeit gegenüber betriebsbedingten Wirkfaktoren sind hierbei grundwasserbeeinflusste Klei-, Dwog- und Organomarschen (Biotopentwicklungspotenzial für Extremstandorte), fruchtbare Braunerden und Parabraunerden aus Löss (Nährstoffhaushalt und Filter-/Puffervermögen), Podsole und Derivate (Biotopentwicklungspotenzial für Extremstandorte) sowie anthropogene Plaggenesche (kulturelle Archivböden). Des Weiteren sind Böden von besonderer Bedeutung in Ihrer Funktion als Kohlenstoffspeicher und Kohlenstoffsenke verbreitet (Marschböden, Niedermoore). Auf den besonderen Schutzstatus dieser Böden im Zusammenhang mit dem Betrieb von Erdkabelsystemen wird übergreifend in den verschiedenen Kapiteln der ökologischen Bewertung eingegangen.

Grundsätzlich ist davon auszugehen, dass es zu betriebsbedingten Temperaturerhöhungen im Boden in Abhängigkeit von den Bodeneigenschaften, der Bodentiefe, vom Bettungsmaterial und der Kabelauslastung kommt (s. a. Abschnitt 2.3).

Höhe und Ausmaß der Temperaturabweichungen werden darüber hinaus maßgeblich von der Grundwassernähe der Standorte oder von temporärer Staunässe in den Böden modifiziert. Es wird sich eine Temperaturanomalie einstellen, in dem im Bereich der Kabeltrasse die Bodentemperaturen mit der Tiefe ansteigen werden, anstatt abzunehmen. Dies kann für einzelne Stoffwechselprozesse, z. B. im Stickstoffkreislauf, für die Stabilität der organischen Bodensubstanz, für die Nährstoffdynamik in Böden sowie für einige Gruppen von Bodenorganismen, wie zum Beispiel Regenwürmer, evident sein. Wie zahlreiche Untersuchungen gezeigt haben, gilt es auch zu beachten, dass die laterale Ausbreitung der Bodenerwärmung gering ist und sich vor allem auf den Kabelgraben beschränken wird.

Die bisherigen Ergebnisse aus verschiedenen Erdkabelprojekten belegen (s. a. Tabelle 2.2-1, Kap. 2), dass sich insbesondere bei Regelbetrieb und betrieblicher Dauerlast mit entsprechenden Wärmeverlusten bis zu 30 W/m mittlere Wärmeemissionen von 1,5 K bis 2,1 K in der Krume bis 30 cm Tiefe und 3,1 K in der Hauptwurzelzone bis 60 cm Tiefe einhalten lassen. Bezüglich der gut dokumentierten Temperaturabweichungen zwischen Erdkabeltrasse und Kontrolle im Versuchsfeldbetrieb Reinshof (TenneT) muss zwischen Heizphase (46 W/m) und Abkühlungsphase mit Höchstlast- (23 W/m) und Grundlastbetrieb (13 W/m) während der gesamten Versuchszeit differenziert werden (Ahl et al., 2023). Demnach lagen die Wärmeemissionen bei Höchstlastbetrieb in 60 cm Tiefe bei 2,8 K und im anschließenden Grundlastbetrieb bei 3,2 K, wobei hier zusätzlich ein Effekt der saisonal erhöhten Außentemperaturen wirksam wurde (Ahl et al., 2023).

Diese moderaten Wärmeemissionen von bis zu 3,0 K im Bereich der Hauptwurzelzone bis 60 cm Tiefe bei Regellast sind aus bodenökologischer Sicht als Richtwert anzustreben, da sie sich noch im Bereich der jährlichen natürlichen Temperaturschwankungen in dieser Bodentiefe bewegen (Zimmermann, 2012). Diese Richtwerte sollten auch auf die beiden hier betrachteten Erdkabelprojekte übertragen werden. Schließlich wird eine moderate Bodenerwärmung wesentlich zur Akzeptanz von Erdkabelprojekten in der Gesellschaft und insbesondere bei Landwirten beitragen, da hier keine negativen Auswirkungen auf Böden, Erträge und Umwelt zu erwarten sind.

Die vorliegende ökologische Bewertung der betriebsbedingten Auswirkungen von Höchstspannungserdkabelsystemen auf Böden für die beiden Geltungsbereiche, des Netzgebietes der Amprion GmbH basiert auf einer umfassenden Modellierung unter Berücksichtigung zahlreicher potenzieller Einflussfaktoren, wie Grabengeometrie, Kabelauslastung, Grundwasser und Bodennutzung, einer wissenschaftlich fundierten und repräsentativen Auswahl und Charakterisierung von insgesamt 13 Bodenleitprofilen sowie deren Parametrisierung unter anderem hinsichtlich der Kennwerte des Bodenwärmehaushaltes. Für die fachgutachterliche Bewertung wird schließlich auf die nationale und internationale Literatur sowie auf eigene Laborexperimente zurückgegriffen.

6.1 Einfluss betriebsbedingter Wärmeemissionen durch HGÜ-Erdkabel auf die natürliche Bodenwärmedynamik verbreiteter Böden

Aus Gründen einer besseren Übersichtlichkeit und inhaltlichen Darstellbarkeit der zu erwartenden betriebsbedingten Wärmeemissionen in den verbreiteten Böden wurden für sämtliche Leitprofile jeweils vier Tiefenstufen ausgewählt: die Tiefenstufe bis 30 cm repräsentiert den für die Landwirtschaft besonders relevanten humosen und biologisch aktiven Oberboden, die Tiefenstufe bis 60 cm repräsentiert den Hauptwurzelraum der meisten (Kultur-) Pflanzen und die Tiefenstufen bis 90 cm und bis 120 cm repräsentieren zwei Unterbodenbereiche, die zwischen

Hauptwurzelzone und Bettungszone der Kabel vermitteln und damit die stärkste Temperaturerhöhung im Vergleich zum ungestörten Boden erwarten lassen, demgegenüber jedoch nicht mehr den Hauptwurzelraum für landwirtschaftliche Nutzpflanzen darstellen.

Der Oberboden und der Hauptwurzelraum sind zugleich für die nachfolgenden bodenökologischen Betrachtungen der Effekte der Bodenerwärmung auf die Wachstums- und Ertragsbedingungen der (Kultur-)Pflanzen, auf Bodenorganismen sowie auf Stoffumsätze in Böden (zum Beispiel Humus, Stickstoff) von besonderer Relevanz.

Nachfolgend werden die zu erwartenden mittleren betriebsbedingten Wärmeemissionen für sämtliche regional bedeutsame Bodeneinheiten – unter räumlicher Berücksichtigung der relevanten Entwicklungskorridore – dargestellt:

- Küste/Marschland in Schleswig-Holstein und Niedersachsen (SH, NDS),
- Altmoränengebiet in Niedersachsen (NDS), teils in SH,
- Auen und Niederterrassen in Nordrhein-Westfalen (NRW) und Hessen (HE),
- Lössböden in Nordrhein-Westfalen (NRW, teils NDS) und
- Solifluktionsdecken mit Gesteinsanteilen in Hessen (HE)

Deren bodenökologische Beurteilung erfolgt auf der Ebene der Bodenleitprofile, jeweils differenziert nach Erdkabelsystemen (Typ 1, Typ 2), Lastfällen (70 %, 85 %), Bodennutzung (Getreide, Mais) sowie den jeweils vier Tiefenstufen (-30 cm, -60 cm, -90 cm, -120 cm).

Die Ergebnisse der Modellierungen zeigen in Bezug auf die Bodenwärmedynamik allgemein lediglich geringe Unterschiede zwischen den beiden Erdkabelsystemen (Typ 1 und Typ 2) sowie den beiden Nutzungen, während insbesondere die Faktoren Lastfall und Bodentiefe eine große Bedeutung für die Ausprägung der Bodentemperaturen und den Abweichungen zu den jeweiligen Kontrollflächen ohne Kabeleinfluss haben.

Die Ergebnisse der Modellierung der betriebsbedingten Wärmeemissionen lassen insgesamt für beide Erdkabeltypen in allen vier Tiefenstufen ein einheitliches Bild der Temperaturänderung zur Kontrolle erkennen. Die berechneten betriebsbedingten Wärmeemissionen sind in beiden Fällen zumeist gleich, zum Teil ähnlich mit Abweichungen von 0,1 K bis 0,3 K zwischen beiden Systemen oder moderat unterschiedlich mit Abweichungen von 0,5 K bis 0,8 K, insbesondere in den beiden Unterbodenbereichen bis 90 cm und bis 120 cm Tiefe (siehe hierzu auch Abbildung 6.1-1 bis Abbildung 6.1-4). Daher wird im Folgenden nicht weiter zwischen beiden HGÜ-Systemen differenziert, sondern die gemachten Aussagen zur bodenökologischen Beurteilung der berechneten betriebsbedingten Wärmeemissionen gelten verallgemeinernd für beide Erdkabelsysteme.

Die Ergebnisse der Modellierung der betriebsbedingten Wärmeemissionen zeigen weiterhin, dass bei einer Ausführungslast von 85 % die zu erwartende Temperaturerhöhung für sämtliche Leitprofile, für alle vier Tiefenstufen und für beide Bodennutzungssysteme, Getreide und Mais,

eine der 70 %i-gen Auslegungslast vergleichbare Dynamik und Variation aufweisen, allerdings in einer um ca. 1 K bis 2,5 K höheren Ausprägung.

Ebenso sind die Unterschiede in den betriebsbedingten Wärmeemissionen zwischen den modellierten Bodennutzungen Getreide- und Maisanbau marginal und zeigen in den Oberböden und den Hauptwurzelbereichen um 0,1 K bis 0,3 K und in den Unterböden um maximal 0,5 K erhöhte Temperaturen unter Getreideanbau (s. a. Abbildung 6.1-1 und Abbildung 6.1-2).

Bei einer Ausführungslast von 70 % wird die zu erwartende Temperaturerhöhung in den **Oberböden bis 30 cm Tiefe** aller betrachteten Leitprofile deutlich variieren. Dabei ist sowohl unter Getreide- als auch unter Maisanbau eine geringe betriebsbedingte Wärmeemission von unter 2 K bei sämtlichen Leitprofilen in NDS, NRW und HE zu erwarten (Abbildung 6.1-1 bis Abbildung 6.1-4). Eine Ausnahme stellen erwartungsgemäß die Niedermoore, Organomarschen und Böden aus tidal-marinen Sedimenten in SH (und gleichbedeutend auch für NDS) dar. Hier sind Temperaturerhöhungen in den Oberböden von bis zu 3,0 K errechnet worden. Bei einer Ausführungslast von 85 % muss im Vergleich zur 70 %-igen Last mit einer mittleren zusätzlichen Erwärmung von 0,4 K bis 0,5 K gerechnet werden.

Für den **Hauptwurzelraum bis 60 cm Bodentiefe** zeigen die Ergebnisse ein vergleichbares Bild. Das Niveau der betriebsbedingten Wärmeemissionen ist lediglich leicht angestiegen und variiert bei den meisten Böden zwischen 1,5 und 2,5 K. Das Leitprofil LP_12, das Böden aus tonigen Hochflutlehmen repräsentiert, weist in den Tiefenstufen >30 cm bis 120 cm Tiefe ebenfalls leicht erhöhte betriebsbedingte Wärmeemissionen auf, was eventuell auf erhöhte Humusgehalte in den alluvialen Sedimenten zurückzuführen ist. Bis in 60 cm Tiefe sind demnach betriebsbedingte Wärmeemissionen von bis zu 2,5 K zu erwarten. Bei einer Ausführungslast von 85 % sind erhöhte Wärmeemissionen von im Mittel 0,9 K bis 1,2 K berechnet worden. Insgesamt wird die zuvor genannte Bodenerwärmung bodenökologisch als nicht relevant bewertet. Für die Niedermoore, Organomarschen und Böden aus tidal-marinen Sedimenten sind Temperaturerhöhungen für den Hauptwurzelraum bis 60 cm Tiefe für beide Nutzungen von 3,6 K bis zu 4,5 K errechnet worden.

Der beschriebene Trend für den Hauptwurzelraum setzt sich in den **Unterböden** bis in einer Tiefe von 120 cm fort. Auch hier ist jeweils eine bimodale Verteilung der betriebsbedingten Wärmeemissionen zu erkennen (Abbildung 6.1-1 - Abbildung 6.1-4). Die zu erwartenden Temperaturabweichungen bei Ausführungslast von 70 % gegenüber einem ungestörten Boden variieren zumeist zwischen 2,5 K und 4,0 K (90 cm Tiefe), bzw. zwischen 3,0 K und 5,1 K (120 cm Tiefe). Aus bodenökologischer Sicht sind diese Wärmeemissionen noch tolerierbar, da keine nachhaltig negativen Auswirkungen auf die Bodenfunktionen und angrenzende Umweltkompartimente zu erwarten sind. Für Niedermoore, Organo-Marschen und Böden aus tidal-marinen Sedimenten sowie für Böden aus tonigen Hochflutlehmen (LP_12) werden allerdings deutlich höhere Temperaturerhöhungen von bis zu 12,0 K in 120 cm Tiefe zu erwarten sein.

Bei einer Ausführungslast von 85 % ist mit einer mittleren zusätzlichen Erwärmung von 1,5 K bis 2,5 K zu rechnen.

Im Bereich der Moorlandschaften können die betriebsbedingten Bodenerwärmungen durch die bereits in Kapitel 5.2 beschriebenen Maßnahmen zur Verbesserung der Wärmeableitung deutlich reduziert werden. Die kann ergänzend zu den Tabellen mit Jahresmittelwerten in Kapitel 5.2 anhand der Boxplots in Abbildung 6.1-5 veranschaulicht werden. Das Verhältnis zu den Jahresverläufen ist ungefähr – entsprechend den Differenzbeträgen – symmetrisch versetzt und somit gesamtheitlich vergleichbar. Aus bodenökologischer Sicht sind die hier betrachteten Maßnahmenvarianten als relevant einzustufen, sodass die erwartbaren Auswirkungen auf den Bodenwärmehaushalt maßgeblich reduziert werden können. Beide Varianten oder ggf. die Kombination der beiden Maßnahmen, sollten im Rahmen von projektspezifisch zu erarbeitenden Bodenschutzkonzepten zusätzlich im Sinne der bau- und anlagenbedingten Wirkfaktoren betrachtet werden. Allgemein wird aus bodenökologischer Sicht die bauzeitlich erhöhte Flächeninanspruchnahme durch eine Erhöhung der Kabelachsabstände – angesichts der positiven Effekte auf die betriebsbedingten Auswirkungen – als gesamtheitlich vertretbar eingestuft. Der Bodenaustausch ist im Einzelfall, auch unter Berücksichtigung weiterer Aspekte, wie z.B. der Betriebssicherheit, zu prüfen; insbesondere vor dem Hintergrund, dass sich hierdurch die stärkeren Effekte zur Minderung der Temperaturanstiege erzielen lassen.

Für das Leitprofil LP_06 (Bodenlandschaft ‚Trockene Sandböden' mit vorherrschenden Podsolen und Braunerde-Podsolen aus Geschiebe(deck)- und Schmelzwassersanden) wurden ergänzend ein grundwassernahes und ein grundwasserfernes Szenario modelliert. Demnach zeigt sich der simulierte Grundwassereinfluss auf die Wärmeemissionen ausschließlich in den Unterbodenbereichen. Die betriebsbedingten Wärmeemissionen beim grundwassernahen Szenario sind lediglich um 0,3 K (in 90 cm Tiefe) bis 0,5 K (in 120 cm Tiefe) erniedrigt.

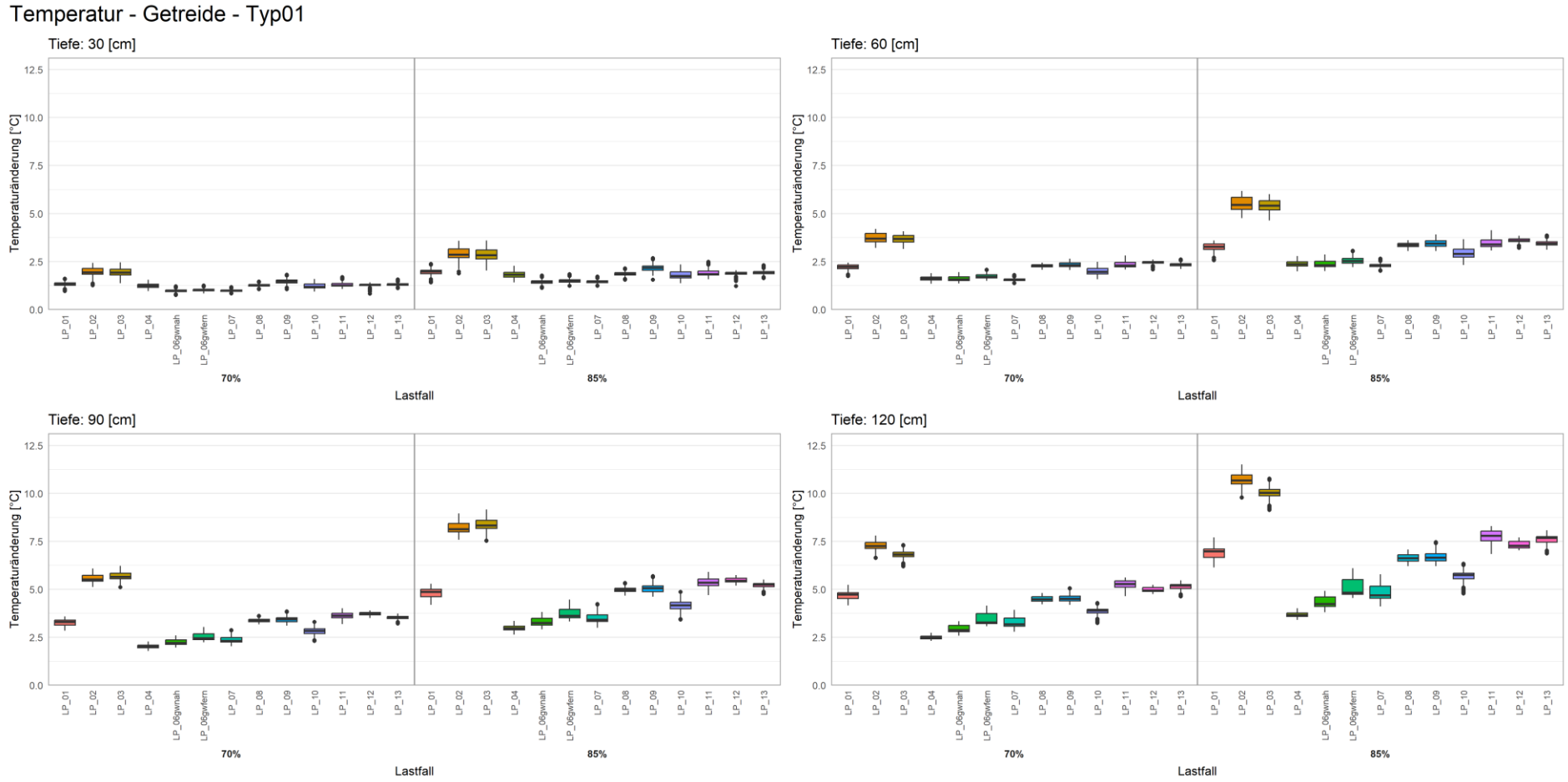

Abbildung 6.1-1: Modellierte betriebsbedingte Wärmeemissionen durch Höchstspannungserdkabel für den Kabeltyp 1 bei unterschiedlicher Ausführungslast (70 %, 85 %). Dargestellt sind die berechneten Temperaturerhöhungen als Box-Plots für Getreideanbau in den vier Tiefenstufen (-30 cm, -60 cm, -90 cm, -120 cm) von insgesamt 13 Leitprofilen repräsentativ für SH, NDS, NRW und HE.

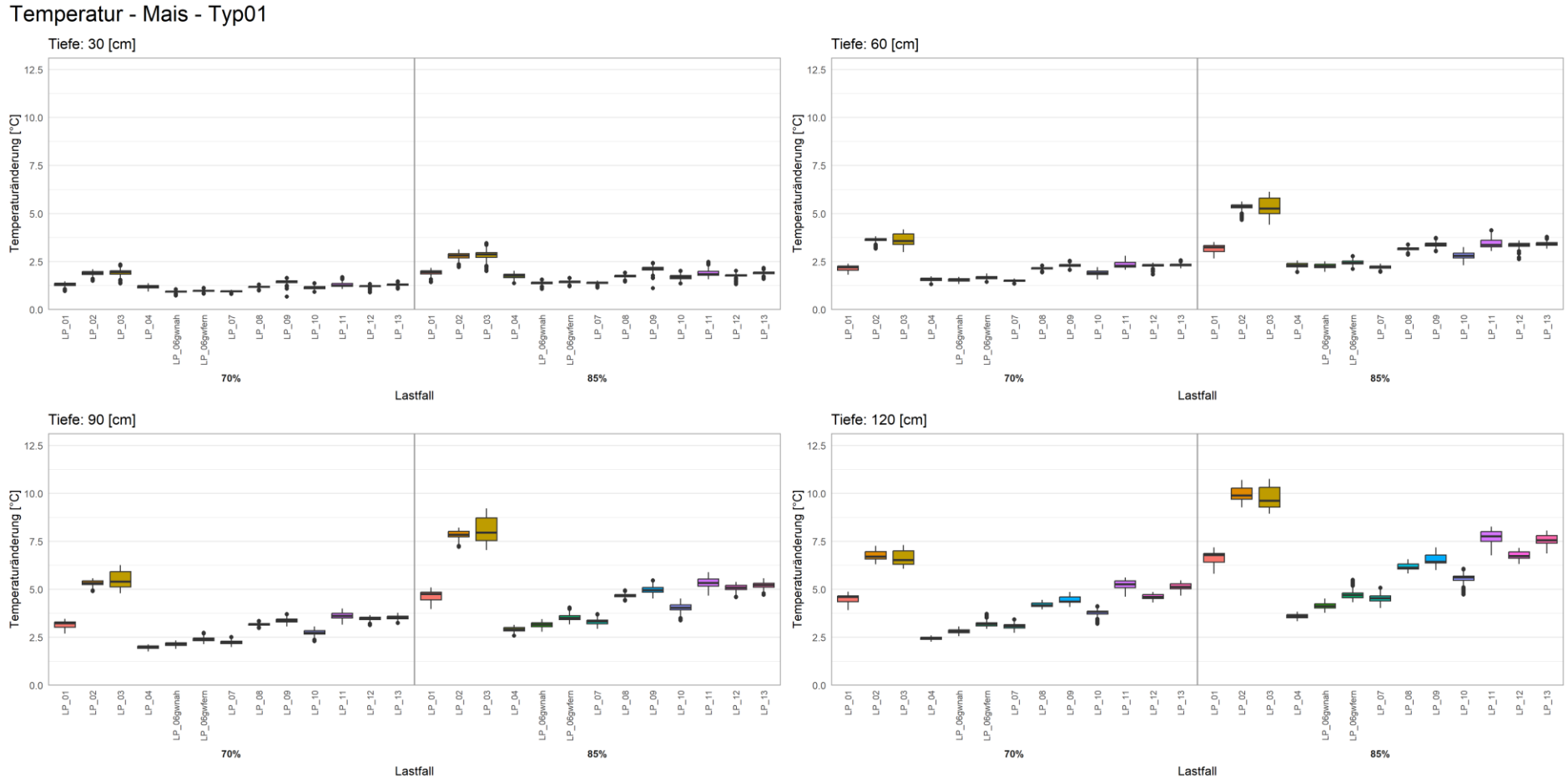

Abbildung 6.1-2: Modellierte betriebsbedingte Wärmeemissionen durch Höchstspannungserdkabel für den Kabeltyp 1 bei unterschiedlicher Ausführungslast (70 %, 85 %). Dargestellt sind die berechneten Temperaturerhöhungen als Box-Plots für Maisanbau in den vier Tiefenstufen (-30 cm, -60 cm, -90 cm, -120 cm) von insgesamt 13 Leitprofilen repräsentativ für SH, NDS, NRW und HE.

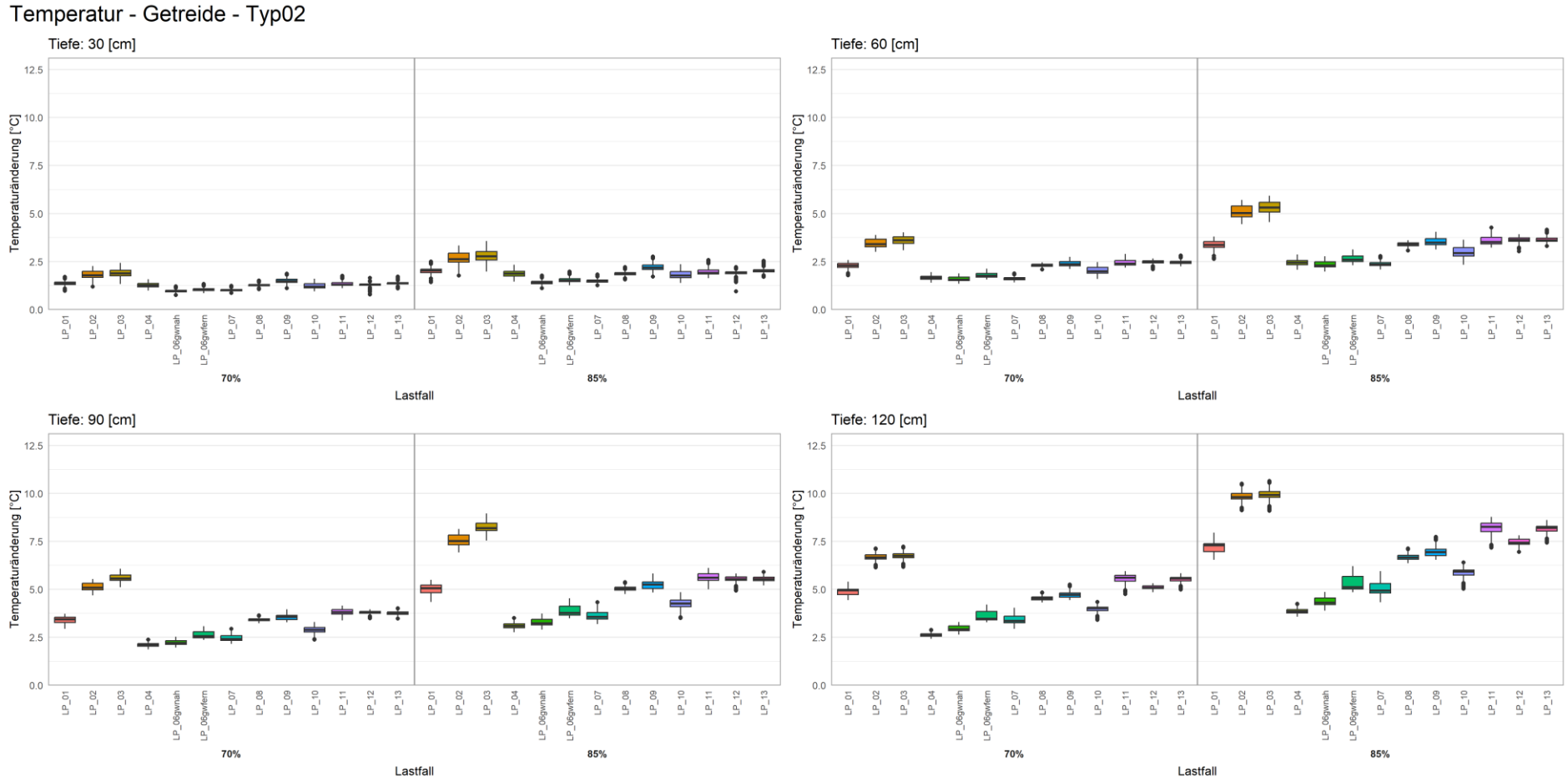

Abbildung 6.1-3: Modellierte betriebsbedingte Wärmeemissionen durch Höchstspannungserdkabel für den Kabeltyp 2 bei unterschiedlicher Ausführungslast (70 %, 85 %). Dargestellt sind die berechneten Temperaturerhöhungen als Box-Plots für Getreideanbau in den vier Tiefenstufen (-30 cm, -60 cm, -90 cm, -120 cm) von insgesamt 13 Leitprofilen repräsentativ für SH, NDS, NRW und HE.

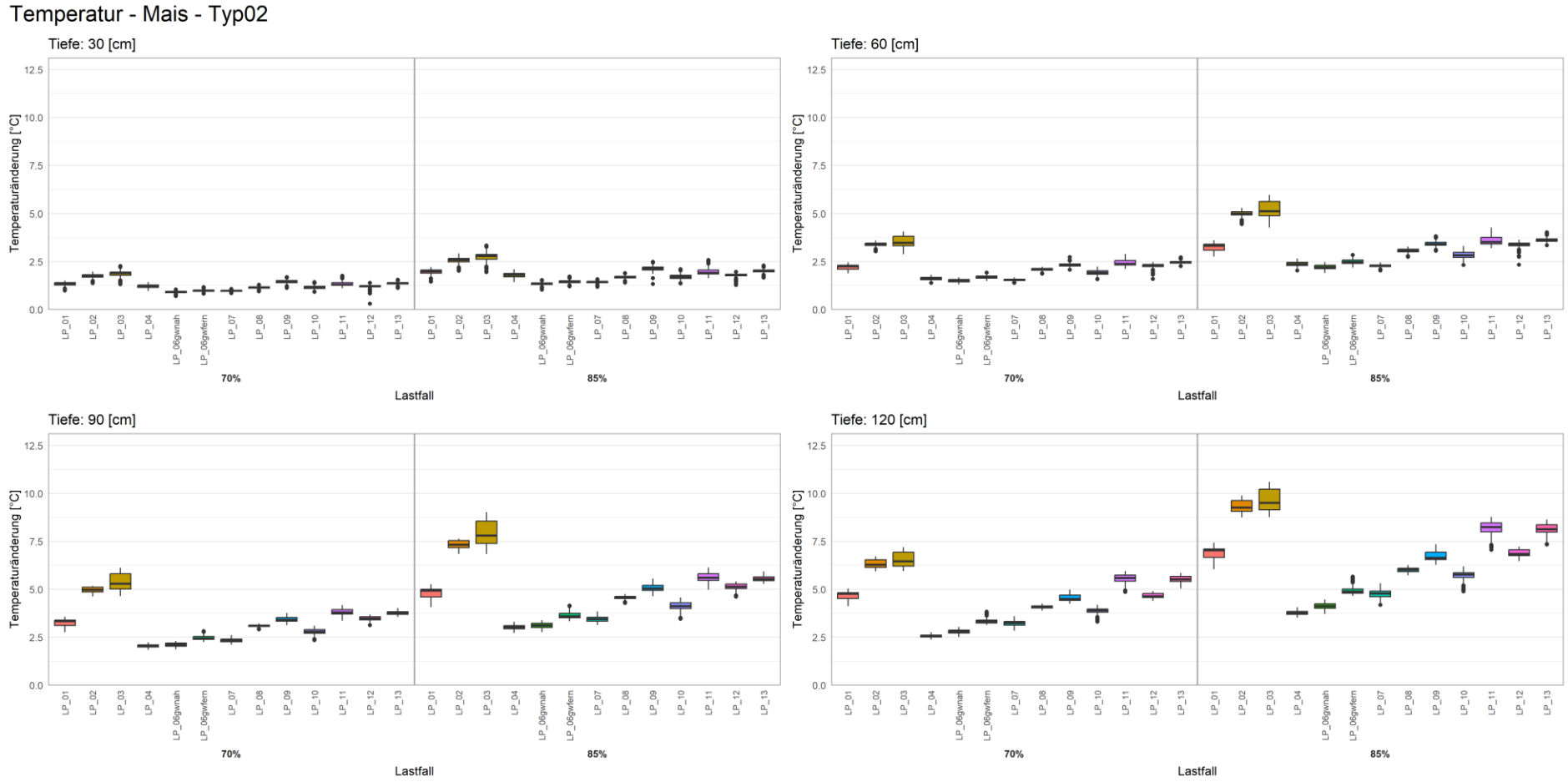

Abbildung 6.1-4: Modellierte betriebsbedingte Wärmeemissionen durch Höchstspannungserdkabel für den Kabeltyp 2 bei unterschiedlicher Ausführungslast (70 %, 85 %). Dargestellt sind die berechneten Temperaturerhöhungen als Box-Plots für Maisanbau in den vier Tiefenstufen (-30 cm, -60 cm, -90 cm, -120 cm) von insgesamt 13 Leitprofilen repräsentativ für SH, NDS, NRW und HE.

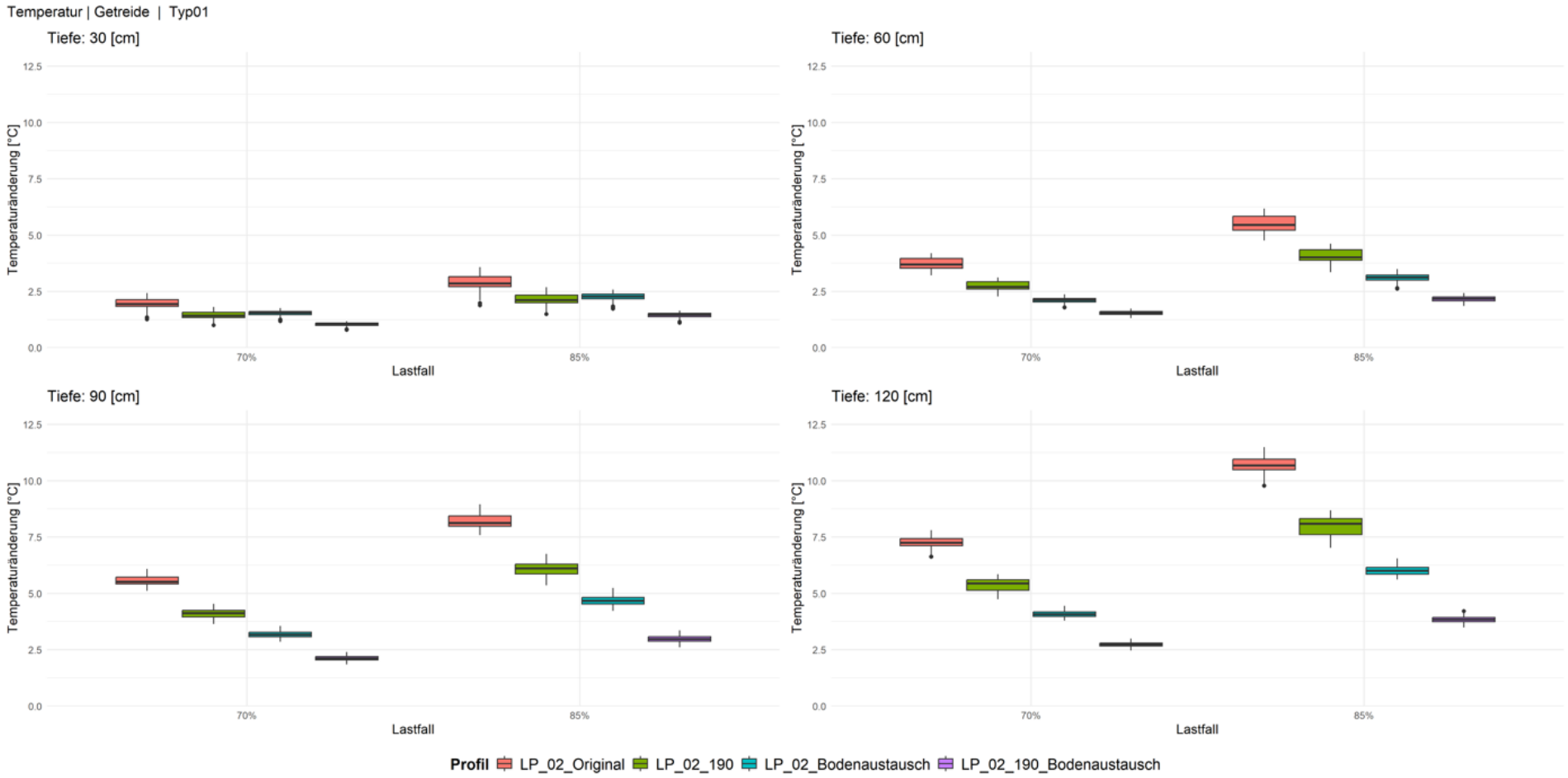

Abbildung 6.1-5: Modellierte betriebsbedingte Wärmeemissionen durch Höchstspannungserdkabel für den Kabeltyp 1 bei unterschiedlicher Ausführungslast (70 %, 85 %). Dargestellt sind die berechneten Temperaturerhöhungen als Box-Plots für Getreideanbau in den vier Tiefenstufen (-30 cm, -60 cm, -90 cm, -120 cm) für die vier betrachteten Varianten (davon 3 mit Minderungsmaßnahmen) im Bereich von Moorlandschaften (Leitprofil 02).

Aus bodenökologischer Sicht und hinsichtlich eines vorsorgenden Grundwasser- und Klimaschutzes sind die Aspekte Grundwassererwärmung und verstärkter Humusabbau, insbesondere in Moorböden, von herausragender Bedeutung (siehe auch Abschnitt 6.3). Grundsätzlich sollte in Regionen, in denen Böden verbreitet sind, die den oben genannten Leitprofilen (insbesondere den Leitprofilen 02 und 03) zugeordnet werden können, prophylaktische Maßnahmen zur Verringerung derartiger Wärmeemissionen getroffen werden. Eine wesentliche Stellschraube wäre die gewählte Grabengeometrie, d.h. insbesondere eine Erweiterung der Kabeldistanz oder eine geschlossene Bauweise. Stand jetzt sind selbst bei geringeren Überdeckungshöhen keine maßgeblichen Änderungen der Ergebnisse zu erwarten.

Die Ergebnisse der Modellierung der lateralen Ausbreitung von betriebsbedingten Wärmeemission sowohl für den Kabeltyp 1 als auch für Kabeltyp 2 zeigen aber, dass sich betriebsbedingte Wärmeemissionen > 1,0 K vorwiegend auf den Trassenbereich beschränken, und implizieren eine eher geringe potenzielle Gefahr der Grundwassererwärmung (s.a. Abbildung 6.1-6). Diese würde allenfalls linienhaft und auf den Kabelgraben beschränkt eintreten. Hierbei handelt es sich um eine orientierende Erstabwägung, ohne Berücksichtigung weiterer, maßgebender Einflussfaktoren, wie z.B. die jeweilige Fließgeschwindigkeit des Grundwassers.

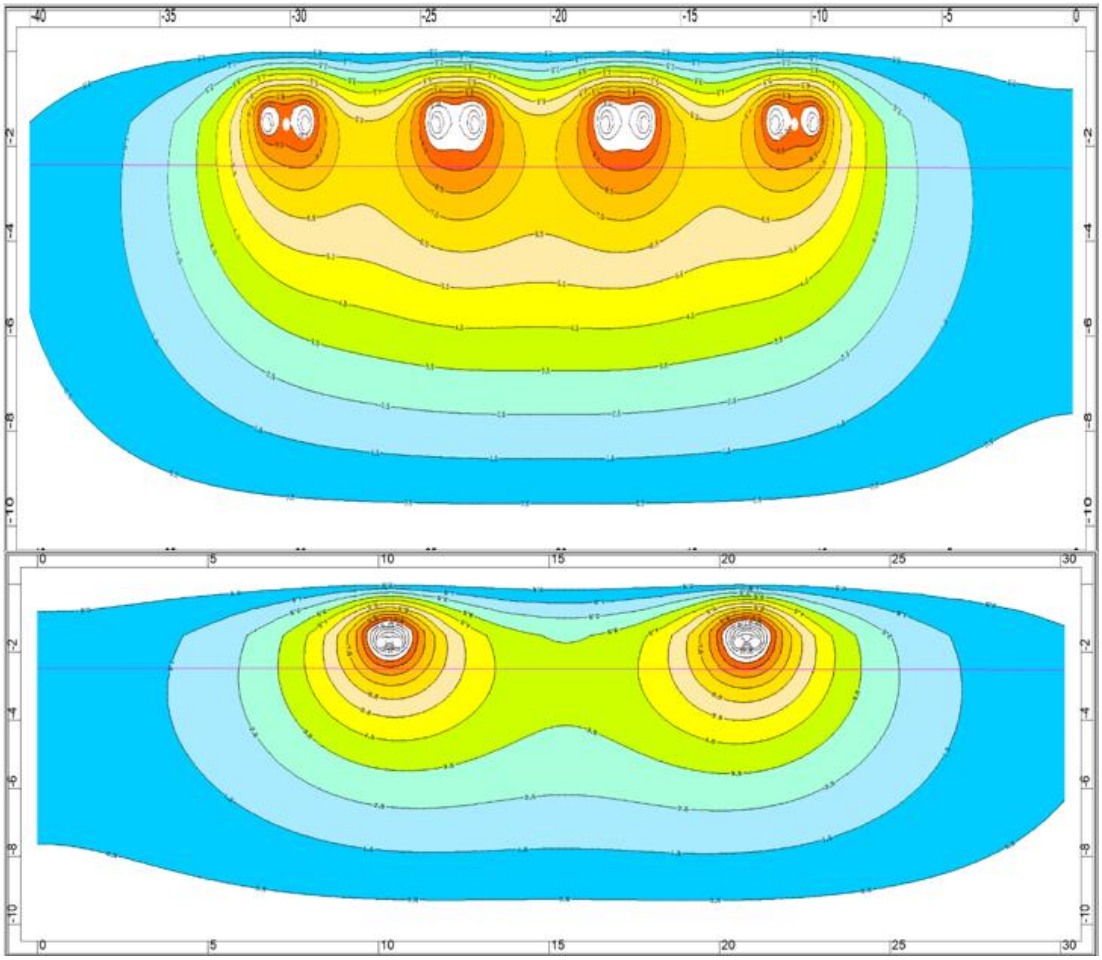

Abbildung 6.1-6: Laterale Ausbreitung betriebsbedingter Wärmeemissionen bei Lastbetrieb von 85 % und Getreideanbau am Beispiel des Leitprofiles LP_02 (Typ 1 oben, Typ 2 unten).

In allen vier betrachteten Bodentiefen sind somit hohe betriebsbedingte Wärmeemissionen in den lehmig-tonigen, humosen und niedermoorigen Bodengesellschaften, insbesondere im nördlichen Schleswig-Holstein und Niedersachsen, zu erwarten. Dies ist auf die daraus resultierenden geringen Wärmeleitfähigkeiten dieser Böden zurückzuführen. Bei gleicher Bodentiefe, gleichem Lastfall und gleichen betriebsbedingten Wärmeemissionen werden sich insbesondere diese Böden im Vergleich zu Mineralböden stärker erwärmen.

Zusammenfassende Bewertung des betriebsbedingten Einflusses der HGÜ-Verbindungen Kabeltyp 1 und Kabeltyp 2 auf den Bodenwärmehaushalt der verbreiteten Böden (Leitprofile):

Böden/Leitprofile: Zusammenfassend ist festzuhalten, dass sich deutliche Unterschiede hinsichtlich der betriebsbedingten Wärmeemissionen innerhalb der betrachteten Leitprofile aufgrund der unterschiedlichen Wärmeleitfähigkeiten der Böden ergeben werden. So wirken sich die betriebsbedingten Wärmeemissionen auf die Streckenabschnitte in Schleswig-Holstein und in Niedersachsen aufgrund der dort verbreiteten, bezüglich Wärmeemissionen besonders sensiblen, Marschen und Moore stärker aus als in den eher mineralischen (Auenlehme, Lössböden) und hydromorphen Böden in den Streckenabschnitten in Nordrhein-Westfalen und Hessen (sowie den südlicheren Übergangsbereichen von NDS und SH). Innerhalb der 13 betrachteten Leitprofile erscheint die betriebsbedingte Temperaturvarianz in den Oberböden und im Hauptwurzelbereich bis 60 cm Tiefe bodenökologisch wenig relevant.

Tiefenstufen: Bei beiden hier betrachteten Betriebslasten wird ein geringer bis moderater Einfluss auf den Bodenwärmehaushalt in den Oberböden und der Hauptwurzelzone bis in 60 cm Tiefe der verbreiteten Leitprofile ausgehen. Dies ist der bodenökologisch relevante Bodenbereich. Im Mittel ist eine Erwärmung um 2,0 K bis 3,5 K zu erwarten. In den Unterböden in 120 cm Tiefe ist mit einer Erwärmung von 2,5 K bis 5,0 K zu rechnen, die einen geringen bodenökologischen Einfluss auf das Wachstum landwirtschaftlicher Kulturpflanzen sowie auf chemische, wie biologische Prozesse in den Böden haben wird. Ausnahmen bilden Niedermoore und diverse (Organo-) Marschen, für die deutlich höhere betriebsbedingte Temperatursteigerungen errechnet wurden und für die allgemein Maßnahmen zur Verringerung der Wärmeemissionen in den entsprechenden Streckenabschnitten anzusetzen sind.

Lastfälle: Eine höhere Betriebslast von 85% wird für sämtliche Leitprofile einen zusätzlichen moderaten Temperaturanstieg im Vergleich zu den 70 %-Lastbedingungen zur Folge haben. Die zu erwartende zusätzliche Erwärmung gegenüber variiert im Mittel zwischen 0,5 K in den Oberböden bis 30 cm Tiefe, zwischen 0,7 K und 1,1 K bis 60 cm Tiefe sowie 1,5 K und 2,5 K bis 120 cm Tiefe.

Grundwassereinfluss: Grundwasseranschluss im Kabelgraben – und eingeschränkt auch Staunässe – bedeutet eine deutlich optimierte Wärmeübertragung von der Schutzrohroberfläche der Höchstspannungskabel in den Boden. Hinzu kommt ein Wärmeabfluss mit dem Grundwasser. Für beide betrachtete Trassen zeigen die modellierten hohen oder niedrigen Grundwasserflurabstände lediglich sehr geringe Unterschiede, da im Modell auf Grundlage realer Daten aus Grundwassermesseinrichtungen lediglich eine sehr schwache Grundwasserströmung angenommen wurde. Die bodenökologischen Auswirkungen sind vernachlässigbar.

Niedermoore und Marschen: Für beide schützenswerten und empfindlichen Standortstypen ist mit zum Teil deutlich erhöhten betriebsbedingten Wärmeemissionen bis in eine Tiefe von 90 cm zu rechnen. Aufgrund der besonderen Boden- und Standorteigenschaften, wie ein dauerhafter Grundwassereinfluss z. T. bis in den Oberboden, werden diese Ausmaße – unter naturnahen Bedingungen – insgesamt als bodenökologisch noch unbedenklich eingestuft. Einer differenzierten Betrachtung bedarf es im Falle entwässerter bzw. nicht dauerhaft gesättigter Standorte. Die vorläufig beschriebenen und modellierten Varianten im Zusammenhang mit Maßnahmen zur Minderung von Auswirkungen auf den Temperaturhaushalt erweisen sich auf Grundlage der vorliegenden Erkenntnisse als äußerst effektiv, d. h. negative Auswirkungen auf die natürliche Bodenwärmedynamik können deutlich abgeschwächt werden. Hinsichtlich einer potenziellen Gefahr eines klimarelevanten Abbaus der organischen Bodensubstanz wird auf Abschnitt 6.3 verwiesen.

6.2 Einfluss betriebsbedingter Wärmeemissionen durch HGÜ-Erdkabel auf den Bodenwasserhaushalt verbreiteter Böden

Wie bereits in Kapitel 4.4 beschrieben wird die nutzbare Feldkapazität im vorliegenden Fall als maßgebender Bezugswert zur Beurteilung der Auswirkungen von betriebsbedingten Wärmeemissionen auf den Wasserhaushalt der Böden herangezogen. Bereits bei der Beschreibung der Ergebnisse in Kapitel 5 wurde zudem klar, dass insbesondere bei den Auswirkungen auf den Wasserhaushalt – hier im Sinne des pflanzenverfügbaren Wassers – neben den deskriptiv-statistischen Einzelwerten die jahreszeitlichen Verläufe und zeitversetzte Effekte bei der Bewertung der Ergebnisse verstärkt miteinbezogen werden müssen.

In der Gesamtschau lassen sich in bestimmten Fällen betriebsbedingte Auswirkungen in Form von Wassergehaltsverlusten in einem zumeist sehr geringen bis moderaten Bereich (d. h. in den meisten Fällen im niedrigen einstelligen Prozentbereich in Bezug auf die nFK) erwarten. Es ist wichtig darauf hinzuweisen, dass es sich bei Änderungen der Wassergehalte – z. B. Bodenfeuchteverluste – in vielen Fällen um temporäre Effekte handelt, da sich das Wasser infolge der zumeist eher moderaten Erwärmung nicht vollständig der Bodenzone im Grabenbereich entzieht (s. a. Erläuterungen in Kapitel 2.3.2). Vielmehr kommt es vermehrt zu einem kleinräumigen Transport mit anschließender Kondensation. Auch eine zunehmende Aufnahme durch Pflanzenwurzeln ist infolge der Stimulation des Wurzelwachstums – zugunsten der Pflanzenentwicklung – denkbar. Letzterer Fall (i. V. m. pflanzenphysiologischen Aspekten), ist jedoch nicht Gegenstand des hier betrachten Modellansatzes der unmittelbar betriebsbedingten Effekte. Letztlich ist es auch möglich, dass ein temporärer Wasserentzug zu einer Zunahme zu einem anderen Zeitpunkt oder einem kleinräumigen versetzten Bereich der Bodenzone führt. Mit zunehmender Nähe zur Geländeoberfläche nehmen Verdunstungseffekte

potenziell zu, während eine Beeinflussung durch betriebsbedingte Wärmeemissionen abnimmt.

Kaum feststellbare Auswirkungen sind bei Böden mit geringen Grundwasserflurabständen zu erwarten. So zeigen sich v. a. für Marschböden, für Böden des tidal-marinen Milieus sowie für die naturnahen Hoch- und Niedermoorböden, d. h. für einen Großteil der im nördlichen Niedersachsen und Schleswig-Holstein anstehenden Böden, keine relevanten Veränderungen in Bezug auf die pflanzenverfügbaren Wasservorräte (im Jahresmittel zumeist < 0,5 % Abnahme mit Bezug zur nFK). Wie den textlichen Hinweisen in Kapitel 5 entnommen werden kann, sind die mittleren Beträge der Wasserverluste hier als allgemein aussagekräftige Größe anzunehmen, da es auch im Hinblick auf realistische Nutzungsszenarien keine deutliche Variabilität im Jahresverlauf gibt und auch keine negativen Differenzbeträge während der Vegetationsperiode erkennbar sind. Bodenökologisch relevante Auswirkungen durch den Betrieb der Kabel sind hinsichtlich des Wasserhaushaltes somit nicht zu erwarten.

Der Einfluss des Grundwassers zeigt sich verstärkt bei den trockenen Sandböden. In der Gesamtschau zeigen sich mitunter die ausgeprägtesten Effekte bei den trockenen Sandböden im Bereich der norddeutschen und rheinischen Altmoränengebiete unter Annahme terrestrischer Grundvoraussetzungen (Leitprofile LP_04 und LP_06 ohne Grundwassereinfluss). Auffallend ist jedoch, dass die mittleren Differenzbeträge, im Sinne einer Abnahme des pflanzenverfügbaren Wassers, von bis zu 4 % (LP_04) bzw. 6 % (LP_06) überwiegend den Frühjahrsmonaten sowie den Zeiträumen im Spätherbst und Winter entstammen. Wie die Abbildung 6.2-1 und Abbildung 6.2-2 exemplarisch für das Leitprofil LP_04 (sowie Abbildung 6.2-3 für LP_06) zeigen, sind in den frühen Wachstumshasen der Kulturpflanzen im Bereich der Hauptwurzelzone geringe Effekte beobachtbar. Allerdings zeigt sich zugleich, dass zu diesen Zeitpunkten i. d. R. eine ausreichende bis gute Wasserversorgung durch die anstehenden Böden gewährleistet wird und somit keine Einschränkungen beim Pflanzenwachstum zu erwarten sind. Generell werden sich bei den trockenen Sandböden, insbesondere beim Anbau von Getreide und speziell in der Hauptwurzelzone bis 0,6 m u. GOK, kritische Wasserversorgungsstufen (d. h. Trockenstress) in den Sommermonaten einstellen können. Die vorliegenden Ergebnisse deuten jedoch nicht darauf hin, dass die betriebsbedingten Wärmeverluste zu diesem Zeitpunkt zu einer Verschärfung der Situation beitragen. Die natürlichen Prozesse, d. h. im Wesentlichen die Evapotranspiration, dominieren diese jahreszeitliche Entwicklung. Neben den relativen Verlusten in Bezug auf die nFK ist v. a. hinsichtlich der trockenen Sandböden darauf hinzuweisen, dass die dort anstehenden Substrate, auch bei hohen Ausgangswerten der nFK, keine sehr hohen Wassergehalte aufweisen.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass die betriebsbedingten Effekte, während der besonders sensiblen Phasen der Vegetationsperiode im Vergleich zu den aus natürlichen

Prozessen resultierenden Effekten insgesamt eine untergeordnete Rolle spielen. Es ist jedoch aufgrund der ungünstigen Ausgangsbedingungen (Böden mit geringem Wasserhaltevermögen, intensive landwirtschaftliche Nutzung sowie Annahme eines Trockenjahres) nicht auszuschließen, dass bereits minimale betriebsbedingte Effekte in bestimmten Wachstumsperioden Einschränkungen bei der Pflanzenentwicklung verstärken können. Beim Vergleich des grundwassernahen und grundwasserfernen Szenarios für das Leitprofil LP_06 bestätigt sich die Vermutung, dass die vorgenannt beschriebenen Entwicklungen hinsichtlich des Wasserhaushalts deutlich abgeschwächt auftreten und ein betriebsbedingter Einfluss kaum mehr zu erkennen ist (s. a. Abbildung 6.2-3 und Abbildung 6.2-4).

Der Einfluss des Kabeltyps – und dies kann auch für die meisten weiteren Leitprofile übertragen werden – ist nicht sehr stark ausgeprägt. Je nach Leitprofil, Jahreszeit und Lastfall sind deskriptiv-statistisch gesehen geringfüge Unterschiede erkennbar. Es ist jedoch zum jetzigen Zeitpunkt nicht eindeutig festzustellen, ob es sich dabei um reine betriebsbedingte Effekte handelt. Dies vor dem Hintergrund, dass v. a. in 120 cm Tiefe die höherliegende Oberkante der Bettungszone beim Kabeltyp 1 (OK Bettungszone = Tiefenstufe 120 cm) einen Einfluss auf die ermittelten Wassergehalte hat, da sich in dieser Übergangszone baubedingte und betriebsbedingte Effekte überlagern. Generell führt aber auch dies zu keinen derart relevanten Unterschieden, welche sich im Vergleich zu den überwiegend maßgebenden, natürlichen Prozessen (atmosphärische Effekte, Pflanzenaufnahme etc.) in einer relevanten Größenordnung bewegen würden.

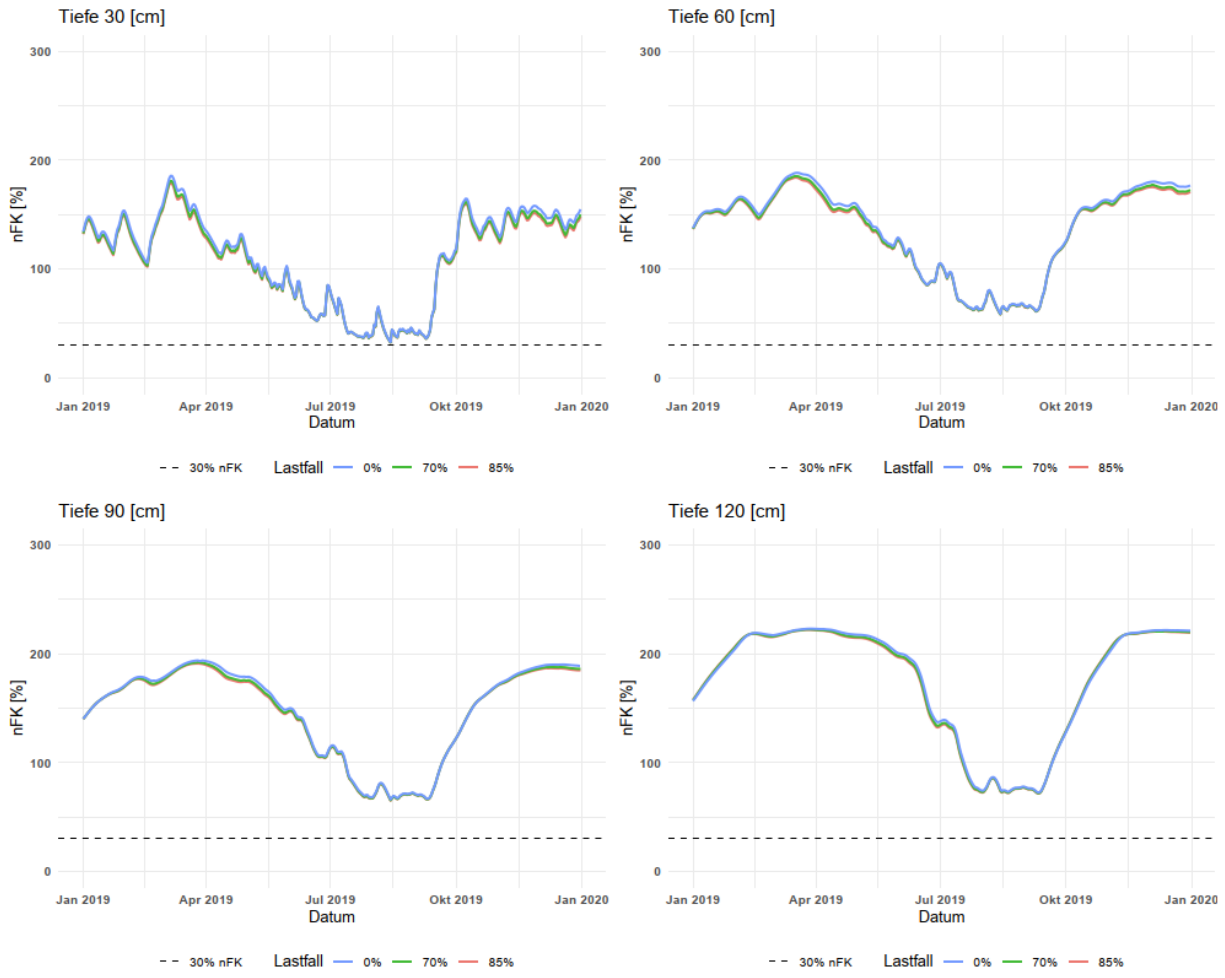

Abbildung 6.2-1: Jahresverlaufsdiagramme der Wassergehalte in Bezug auf die nutzbare Feldkapazität anhand des Leitprofils LP_04, Kabeltyp 2, Nutzungsart Mais.

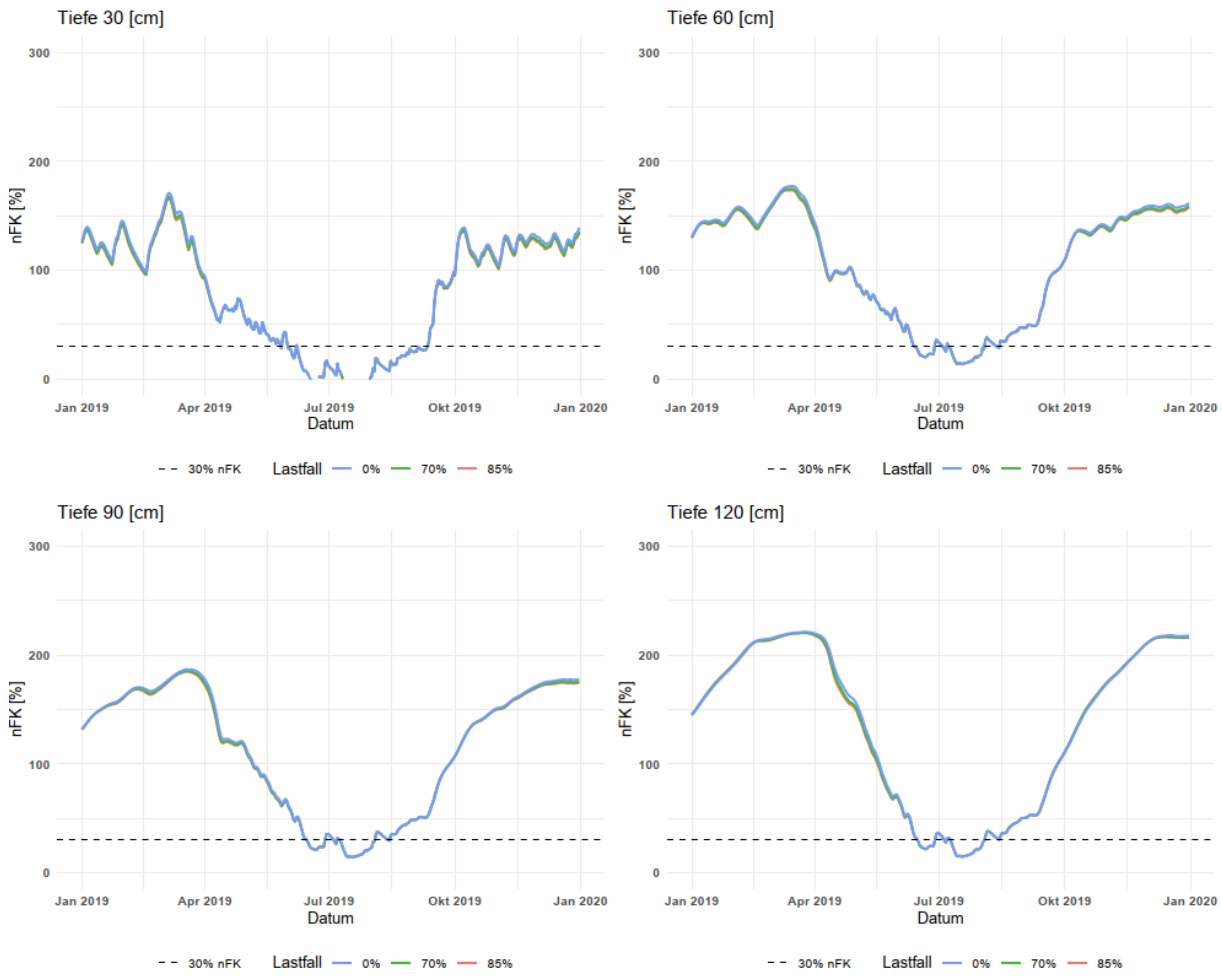

Abbildung 6.2-2: Jahresverlaufsdiagramme der Wassergehalte in Bezug auf die nutzbare Feldkapazität anhand des Leitprofils LP_04, Kabeltyp 2, Nutzungsart Getreide.

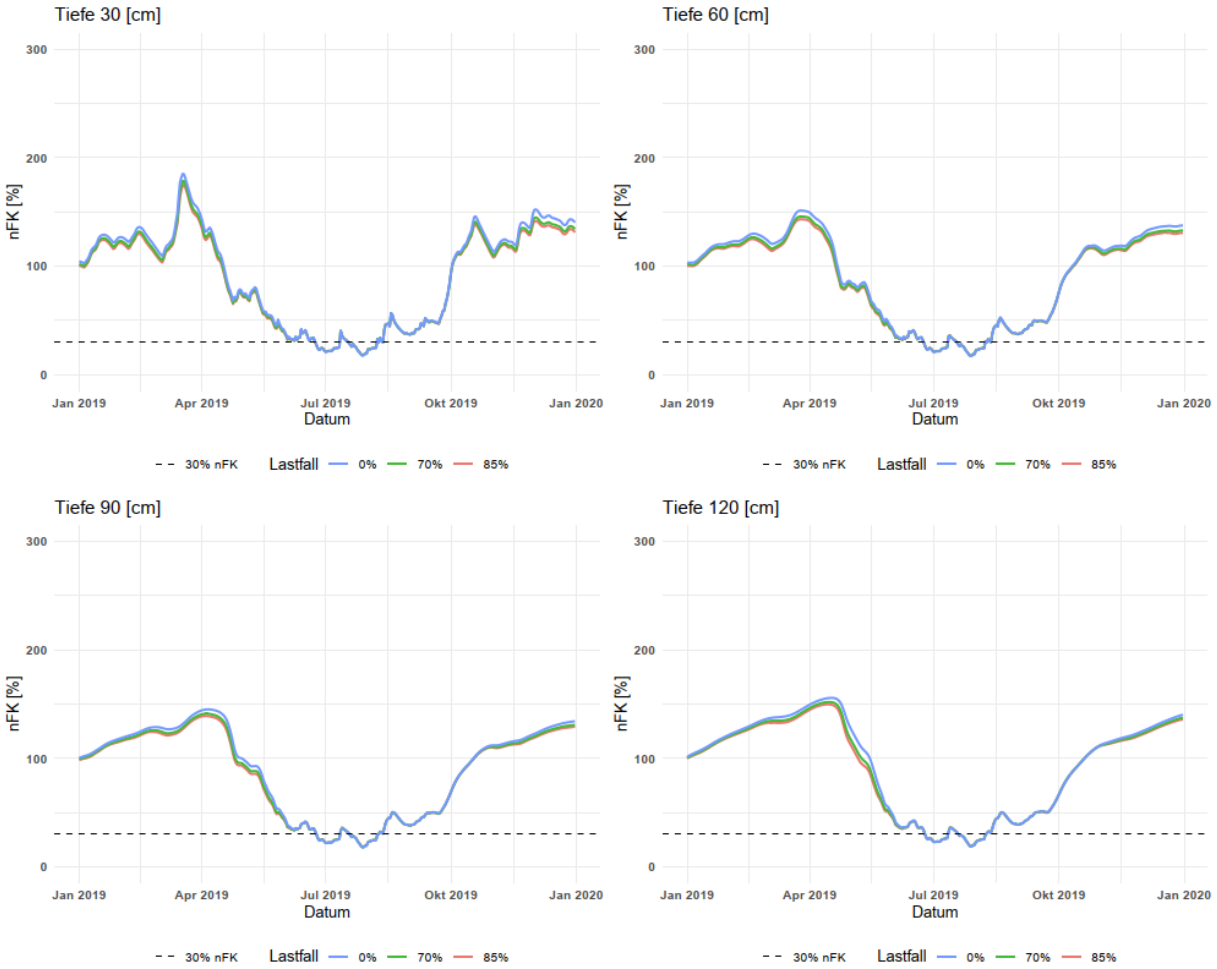

Abbildung 6.2-3: Jahresverlaufsdiagramme der Wassergehalte in Bezug auf die nutzbare Feldkapazität anhand des Leitprofils LP_06 gf-fern, Kabeltyp 2, Nutzungsart Getreide.

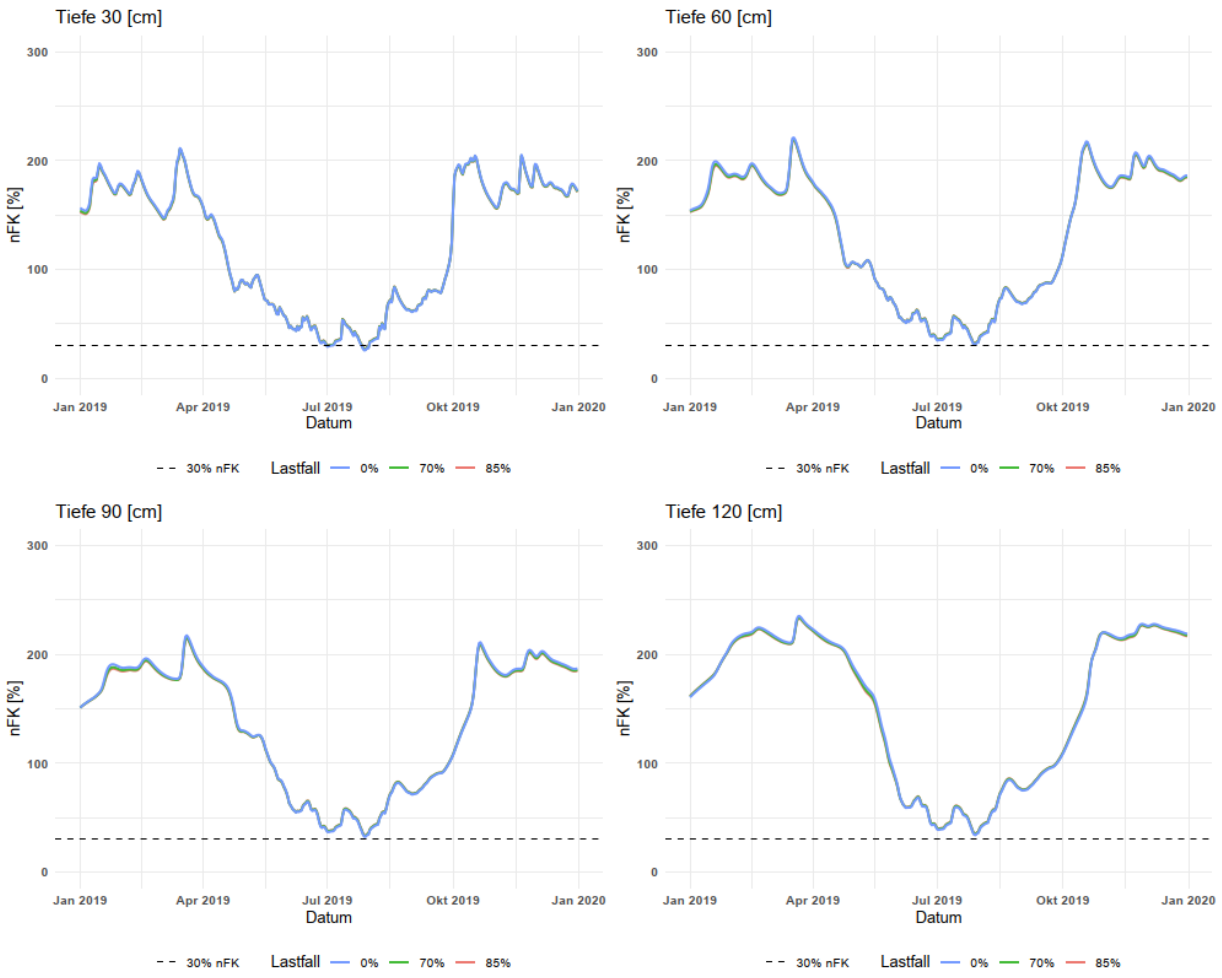

Abbildung 6.2-4: Jahresverlaufsdiagramme der Wassergehalte in Bezug auf die nutzbare Feldkapazität anhand des Leitprofils LP_06 gw-nah, Kabeltyp 2, Nutzungsart Getreide.

Bei den im mittleren bis südlicheren Verlauf der betrachteten Netzentwicklungskorridore anstehenden (zunehmend) terrestrischen Böden mit höheren Feinanteilen (lehmige bis schluffige Böden aus Löss, Geschiebelehm und fluviatilen Sedimenten) zeigen sich – bei zugleich verbesserten Grundvoraussetzungen der Wasserversorgung – in den meisten Fällen keine erkennbaren Auswirkungen (im Jahresmittel < 1 % negative Abweichung in Bezug auf die nFK). Trotz hoher Feinkornanteile zeigt das Modell für die anhand des Leitprofils LP_09 betrachteten Lössböden im Trockenjahr, insbesondere bei der Nutzungsart Getreide, eine starke natürliche (d. h. nicht betriebsbedingte) Abnahme der pflanzenverfügbaren Wassergehalte. Die betriebsbedingten Auswirkungen durch entstehende Wärmedifferenzen führen aufgrund der guten Wasserverfügbarkeit in Zeiträumen mit potenziellen Wasserverlusten (v. a. im Frühjahr) voraussichtlich zu keinen Einschränkungen bei der Pflanzenentwicklung. Dies auch vor dem Hintergrund, dass die höchsten Abweichungen im früheren Entwicklungsstadium der Pflanzen

v. a. in den tieferen Bodenzonen (> 2 % Abnahme in Bezug auf die nFK in 90 cm und 120 cm) auftreten. Es ist denkbar, dass der Wasserhaushalt in den tieferen Bodenzonen temporär geringfügig beeinflusst wird, da zu diesem Zeitpunkt die Sickerwasserrate durch die erhöhte Aufnahme von Wasser aus der Hauptwurzelzone reduziert wird und bei zugleich hohen Wassergehalten auch niedrige Temperaturanstiege im Trockenjahr zu lokalen Wasserverlusten führen können. Bei höheren Wassergehalten ist der Anteil der engen Grobporen an der nFK am höchsten und es ist anzunehmen, dass Effekte durch geringe Veränderungen im Wärmehaushalt sich am ehesten auf den Anteil der Wasservorräte auswirken, welche durch eine geringe Saugspannung charakterisiert sind. In den Sommermonaten sind keine Änderungen in Bezug auf die pflanzenverfügbaren Wasservorräte (eher eine leichte, jedoch kaum merkliche Tendenz zur Zunahme) zu erkennen. Die Bodenwasserspannung hat sich, bei den zu diesem Zeitpunkt erwartbaren Sättigungsgrad der Böden, auch hinsichtlich der pflanzenverfügbaren Anteile erhöht.

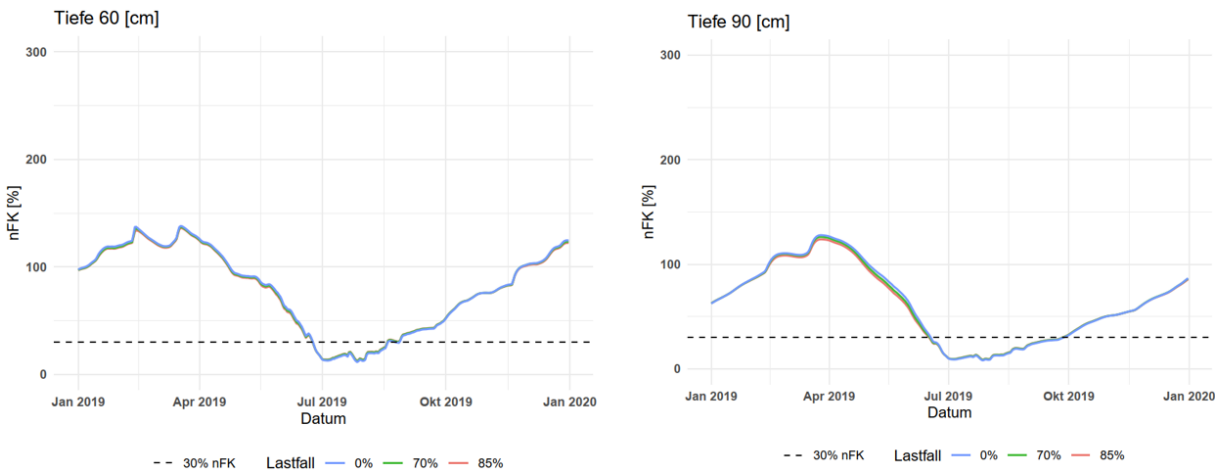

Abbildung 6.2-5: Jahresverlaufsdiagramme der Wassergehalte in Bezug auf die nutzbare Feldkapazität anhand des Leitprofils LP_09, Kabeltyp 1, Nutzungsart Getreide für die Tiefenstufen 60 cm und 90 cm.

Gesondert zu betrachten sind zudem die Leitprofile mit substratspezifischen Besonderheiten im Sinne der Betrachtung spezieller Fälle im südlicheren Mittelgebirgsbereich (LP_11 bis LP_13). Die Böden aus lösslehmhaltigen Solifluktionsdecken mit basenarmen Gesteinsanteilen sind durch hohe Skelettanteile im gesamten Bodenprofil sowie hoch anstehende C-Horizonte geprägt. Die nutzbare Feldkapazität ist v. a. außerhalb der Hauptwurzelzone als sehr niedrig zu bewerten. Aufgrund der Bodeneigenschaften sowie der klimatischen und nutzungs-

spezifischen Randbedingungen im Modell ist v. a. in den Sommermonaten und tieferen Bodenzonen eine sehr geringe Wasserverfügbarkeit zu erwarten. Ähnlich wie bei den vorgenannten Profilen mit einer Tendenz zu trockenstress-begünstigenden Bedingungen sind jedoch auch hier die betriebsbedingten Effekte von untergeordneter Bedeutung. Die anhand der Jahresverläufe oftmals schwach erkennbaren Abnahmen in den Herbst- und Wintermonaten sind bodenökologisch nicht relevant. Kaum erkennbare Effekte sind in den Hauptwachstumsphasen der Kulturpflanzen zu erkennen. Die deutlichsten Effekte in den Sommermonaten sind für das Profil LP_13 bei Getreidenutzung (hier Winterweizen) im August zu erkennen, d. h. zu einem Zeitpunkt unmittelbar nach den üblicherweise anzunehmenden Erntezeitpunkten. Aufgrund der allgemein eher ungünstigen Kennwerte der Wasserbindung sollten mögliche Auswirkungen, v. a. im Hinblick auf die Frühjahrs- und Frühsommermonate, gezielt beobachtet werden.

Das Profil LP_12 (Pelosol) zeigt hinsichtlich der betriebsbedingten Auswirkungen auf die pflanzenverfügbaren Wassergehalte, wie in Kapitel 5.12.2 beschrieben, ein stark abweichendes Bild. Das Zustandekommen langfristiger Nullwerte bzw. gar Negativwerte in Bezug auf den Anteil des Wassergehaltes an der nFK ist beim Typ 1 voraussichtlich. auf die Modellrandbedingungen bei zugleich sehr ungünstigen Verhältnissen hinsichtlich der Kennwerte der Wasserbindung zurückzuführen. Die Ergebnisse sind durch die Eigenschaften der Bettungszone überprägt und da modelltechnisch die Luftkapazität als effektive Porosität angenommen wird (hier nur 3 Vol. %), kommt es bereits bei Sättigungen von knapp 60 % zu dem Szenario, dass der Wassergehalt dem hohen Totwassergehalt (knapp 24 Vol.-% bei 40 % GPV) entspricht. Weniger stark davon beeinflusst sind die Werte in den darüberliegenden Bodenzonen sowie im gesamten Profil für den Typ 2. Bei der Nutzungsart Getreide kommt es über das Frühjahr hinweg bis zur Spitze in den Sommermonaten im betrieblich beeinflussten Lastfall zu Verlusten in Bezug auf die pflanzenverfügbaren Wassergehalte (siehe Abbildung 6.2-6). Im Spätherbst, Winter und beginnenden Frühjahr sind zudem deutliche Zunahmen zu erkennen. Aus bodenphysikalischer Sicht ist es denkbar, dass es im Sommer zu einer Reduzierung der Wassergehalte bis in die Größenordnung der Totwassergehalte kommt. Zwar können Pflanzen ab diesem Zeitpunkt kein weiteres Wasser aus dem Boden entnehmen (Bereich des potenziell extremen Trockenstresses), es könnte aber durch weitergehende Prozesse (z. B. durch stark negative Wasserpotenziale im Übergangsbereich der betroffenen Schichten) zu weiteren Wasserverlusten – wenn auch in geringem Umfang – aus den Feinporen kommen. Betriebsbedingte Einflüsse könnten u.U. einen zusätzlichen thermischen Effekt verstärken, wie er sonst nur an Oberflächen bei fehlender Vegetation in ariden Gebieten auftritt. Gemäß Liu et al. (2023, preprint article) könnten Temperaturanstiege v. a. bei niedrigen Wassergehalten einen Einfluss auf das Wasserrückhaltevermögen von Böden (u. a. auch Einfluss der Temperatur

auf die Saugspannung) haben. Wenn sich der Grad der Wassersättigung nach den Sommermonaten wieder erhöht, wird es wahrscheinlich dazu kommen, dass zunächst Wasser innerhalb der Grob- und Mittelporen angesammelt wird und die geringfügigen Verluste aus den Feinporen zuletzt – bei hohen Wassersättigungen oder wiedereinsetzenden Quellprozessen – ausgeglichen werden (Todoruk et al. 2003). Dies könnte die teils deutlich erkennbaren Zunahmen bei der nutzbaren Feldkapazität ansatzweise erklären.

Zusammenfassend wird auch hier empfohlen, Böden mit vergleichbaren Eigenschaften einer genauen Beobachtung, z. B. durch weitergehende Untersuchungen oder Beobachtungen/Messungen nach Abschluss der Maßnahmen, zu unterziehen.

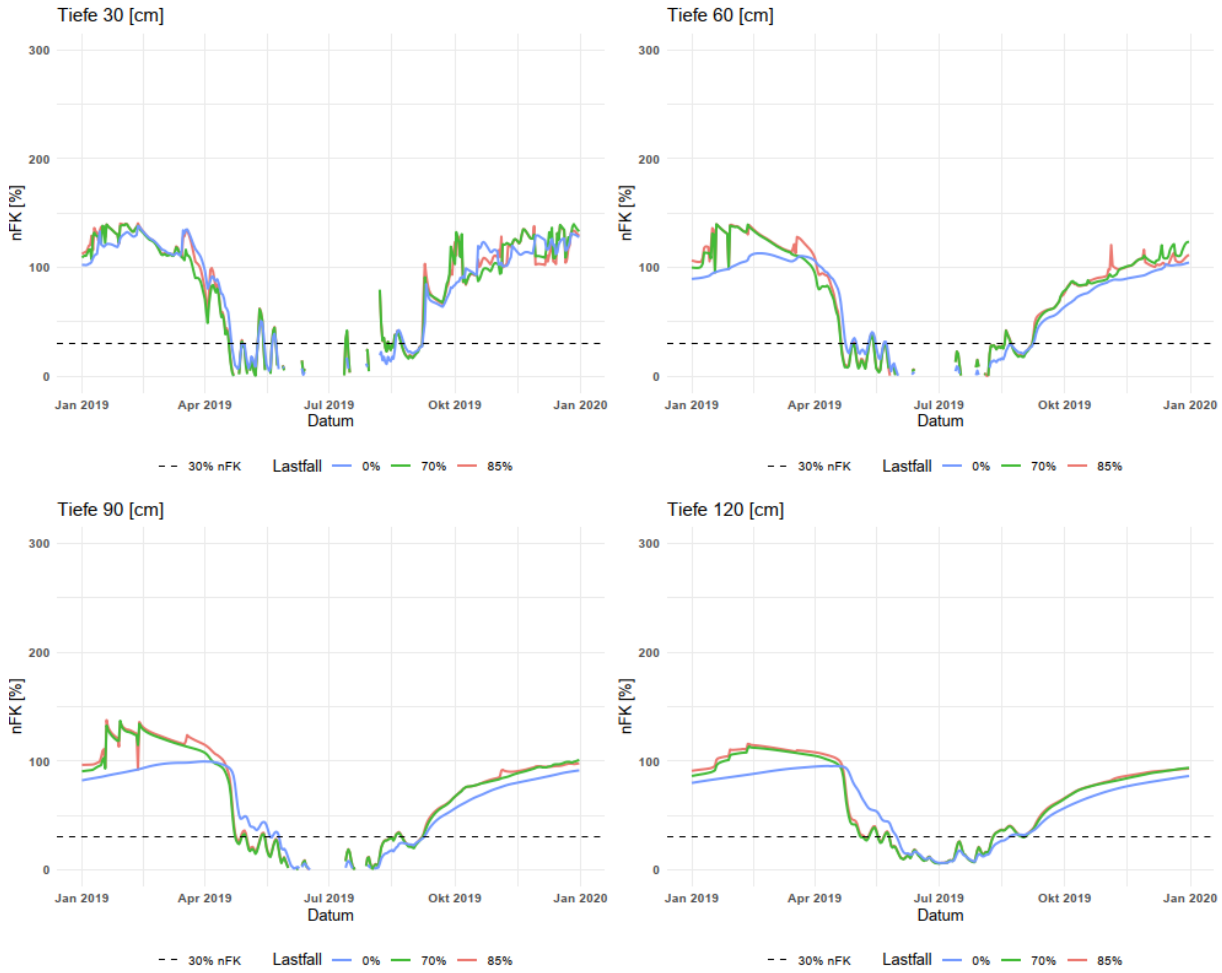

Abbildung 6.2-6: Jahresverlaufsdiagramme der Wassergehalte in Bezug auf die nutzbare Feldkapazität anhand des Leitprofils **LP_12**, Kabeltyp 2, Nutzungsart **Getreide**

Zusammenfassende Bewertung des betriebsbedingten Einflusses der HGÜ-Verbindungen Kabeltyp 1 und Kabeltyp 2 auf den Bodenwasserhaushalt der verbreiteten Böden (Leitprofile)

Böden/Leitprofile sowie Grundwassereinfluss

Es lässt sich zusammenfassend festhalten, dass die Leitprofile – samt damit einhergehender Bodeneigenschaften, aber auch klimatischen Randbedingungen – der wesentliche Einflussfaktor in Bezug auf betriebsbedingte Auswirkungen des Bodenwasserhaushaltes sind. Etwaige Wasserverluste bewegen sich im Jahresmittel in einer Größenordnung von < 1 % bis ca. 5 % (im Extremfall ca. 6 %) der nutzbaren Feldkapazität (entspricht dem Anteil des pflanzenverfügbaren Wassers im Boden). Diese Befunde decken sich mit Angaben von Ahl et al. (2023) für den Erdkabelversuchsfeldbetrieb Reinshof. Wichtig ist die Feststellung, dass die mittleren Werte jedoch hinsichtlich der Auswirkungen auf die Entwicklung von Kulturpflanzen in den kritischen Profilen von untergeordneter Bedeutung sind und ein gezieltes Augenmerk auf die Jahresverläufe gerichtet werden muss. Außerdem sind geringe Abweichungen bei Böden mit einer ohnehin guten Wasserversorgung i. d. R. nicht relevant (s. a. Kapitel 2.3.2). Auch erkennbare Extremwerte können in bestimmten Fällen auf kurze Zeiträume begrenzt und zeitlich anschließend wieder ausgeglichen werden.

Letztlich lässt sich im Hinblick auf bodenökologisch und pflanzenphysiologisch relevante Maßstäbe keine negativen Auswirkungen bei den hier betrachteten semiterrestrischen und semi-subhydrischen Böden sowie den naturnahen Moorböden (v. a. im Norden von Niedersachsen und Schleswig-Holstein) erkennen. In solchen Profilen zeigt sich auch im Jahresverlauf keine ausgeprägte Variabilität und die mittleren Abweichungen (von i. d. R. < 1 % in Bezug auf die nFK) sind zumeist repräsentativ. Einen Übergangsbereich zu potenziell kritischen Fällen (s. u.) stellen die terrestrischen Böden mit günstigen Grundvoraussetzungen (v. a. hoher Anteil der nutzbaren Feldkapazität) dar. Bodenökologische relevante Auswirkungen durch betriebsbedingte Effekte sind hier auch in Trockenjahren kaum zu erwarten.

Weitere Modellparameter (Tiefenstufen, Kabeltyp, Auslastung, Nutzung)

Die Tiefenstufe stellt bei der Bewertung anhand von Verhältniswerten mit Bezug zur nutzbaren Feldkapazität keine wesentliche Einflussgröße dar. Es dominieren die natürlichen Prozesse (v. a. Evapotranspiration) sowie etwaige anlagenbedingte Effekte (z. B. durch den Bettungskörper). Durch die Nähe zum Kabel (erhöhte Temperaturzunahme) sowie die bevorzugte Wasseraufnahme aus dem Bereich der Hauptwurzelzone bei zugleich abnehmender Nachlieferung aus dem Sickerwasser lassen sich in den Frühjahrs- bis Frühsommermonaten vermehrt etwas stärkere Effekte im Unterboden (v. a. 90 cm und 120 cm Tiefe) erkennen.

Mit Ausnahme der Tiefenstufe 120 cm (anlagenbedingter Effekt durch die Oberkante des Bettungsblocks in 120 cm Tiefe) zeigen sich in Bezug auf den Wasserhaushalt keine eindeutigen oder stark ausgeprägten Auswirkungen, welche auf den Kabeltyp zurückzuführen sind.

Der Unterschied bei den Lastfällen macht sich nur dann bemerkbar, wenn größere Differenzbeträge auftreten und dies v. a. im Bereich des Unterbodens bei 90 bzw. 120 cm (darüberliegend sind i. d. R. kaum erkennbare Effekte auszumachen). Im Vergleich zu den thermischen Auswirkungen ist das Prinzip einer stark überproportionalen Zunahme der Auswirkungen mit zunehmender Last beim Wasserhaushalt nicht ausgeprägt. Insofern Unterschiede erkennbar sind, sind diese zumeist sehr moderat.

Der Haupteinfluss der Nutzungsart liegt überwiegend im Bereich der Basis-Wassergehalte ohne betriebsbedingten Einfluss. Werte der kritischen Wasserversorgung sind in den Sommermonaten, bzw. vermehrt um den Erntezeitpunkt, v. a. beim Anbau von Getreide (hier Winterweizen) ausgeprägt. Entsprechend der phänologischen Eigenschaften sind die Jahresverläufe erwartungsgemäß versetzt (spätere Abnahme und Wiederanstieg der Kurve in Bezug auf die pflanzenverfügbaren Wassergehalte bei Mais). Beim direkten Vergleich gibt es eine sehr leichte Tendenz zu erhöhten Abnahmebeträgen beim Mais.

Potenziell kritische Konstellationen

Insgesamt lässt sich auf Basis der vorliegenden Ergebnisse festhalten, dass durch den Betrieb der Erdkabel in den meisten Fällen keine nennenswerten Auswirkungen auf den Bodenwasserhaushalt zu erwarten sind. Unter der Annahme ungünstiger Randbedingungen (d. h. der hier angesetzten Trockenjahr-Betrachtung) sowie unvorteilhafter Bodeneigenschaften (hier v. a. trockene Sandböden des Altmoränengebietes sowie Pelosole und steinige Böden im Bereich des niedersächsischen und hessischen Berglandes sowie Schiefergebirge) sind vermehrt geringe Wassergehalte in den Sommermonaten zu erwarten. Gemäß den vorliegenden Ergebnissen zeigt sich der geringfügige betriebsbedingte Einfluss hierbei in den meisten Fällen während der Frühjahrs- bis Frühsommermonate, während zum Zeitpunkt niedrigster Wassergehalte im Hoch- bis Spätsommer keine nennenswerten Differenzen erkennbar sind. Als besonders kritisch ist die Übergangszeit dieser Zustände zu beschreiben, da es hier zu einer Überschneidung von betriebsbedingten Effekten und niedrigen Ausgangswerten in Bezug auf die Wasserversorgung kommen kann.

Die betriebsbedingten Effekte sind auch hier – im Vergleich zu den natürlichen Faktoren (Klima, Pflanzen etc.) – sehr gering, könnten allerdings unter ungünstigen Bedingungen zu einer Verstärkung des Zustandes infolge natürlicher Prozesse beitragen. Insbesondere in solchen Fällen wird eine weitergehende Betrachtung, bzw. eine gezielte Beobachtung/Messung im Feld, empfohlen.

6.3 Einfluss betriebsbedingter Wärmeemissionen durch HGÜ-Erdkabel auf den Nährstoffhaushalt, Stickstoffdynamik und organische Bodensubstanz

Bodentemperaturen haben einen signifikanten Einfluss auf den Nährstoffhaushalt von Böden. Mit der betriebsbedingten Erwärmung des Bodens durch Erdkabel kann eine Freisetzung und Lösung und somit eine potenzielle Auswaschung leicht löslicher Nährstoffe, wie Calcium, Magnesium und Kalium, im Boden einhergehen. Nach Untersuchungen von Trüby (2018) war dieser Effekt insgesamt sehr gering. Für die Versorgung der meisten Kulturpflanzen ist der Nährstoffvorrat im humosen Oberboden und in der Hauptdurchwurzelungszone von Bedeutung, der von einer Temperaturerhöhung und der damit verbundenen möglichen Nährstofffreisetzung und potenziellen Nährstoffauswaschung im genannten Bodenbereich weniger stark beeinflusst sein wird.

Unter den Pflanzennährstoffen muss ein besonderes Augenmerk auf den Stickstoff (N) gelegt werden. Stickstoff kann die Wurzelzone als Nitrat verlassen und wird damit dem produktiven N-Kreislauf entzogen. Zudem kann Nitrat über das Sickerwasser in das Grundwasser gelangen und dieses ggf. belasten.

Aufgrund einer betriebsbedingten Erwärmung des Bodens kann es grundsätzlich zu einer vermehrten Freisetzung von Nitrat im Boden kommen. Allerdings weisen Simulationsberechnungen von Wessolek und Kersebaum (2020) darauf hin, dass unter Normal- sowie Höchstlastbedingungen beim Betrieb von Höchstspannungserdkabeln die Nitratverlagerung gegenüber der Kontrolle sogar geringer ausfallen kann. Denn Stickstoff in Form von Nitrat wird vorrangig in der Sickerwasserperiode, zumeist im Winter außerhalb der Vegetationsperiode, ausgewaschen, wenn der Entzug durch die Kulturpflanzen gering ist. Da Kulturpflanzen bei höheren Temperaturen ein intensiveres Wurzel- und Sprosswachstum aufweisen, kann dies auch zu einer besseren N-Verwertung und N-Wurzelaufnahme infolge der erhöhten Umgebungstemperaturen im Trassenbereich führen. Hinzu kommt, dass unter höheren Bodentemperaturen in der Hauptdurchwurzelungszone auch eine verstärkte Denitrifikation einsetzen kann, so dass überschüssiges Nitrat, das vertikal aus dem Oberboden verlagert wurde, in tieferen Bodenschichten mikrobiell z. B. zu Lachgas reduziert werden und infolge gasförmig aus dem Boden emittieren kann.

Dies konnte im Rahmen des ALEGrO-Monitorings bestätigt werden. Es zeigte sich, dass die Nmin-Gehalte in 0 – 90 cm Tiefe im Trassenbereich gegenüber den Kontrollflächen im Mittel leicht erniedrigt waren (Emmerling et al., 2023).

Da die berechneten betriebsbedingten Wärmeemissionen in allen betrachteten Bodentiefen für die hier betrachteten Erdkabelsysteme *Kabeltyp 1* und *Kabeltyp 2* deutlich über denen des

ALEGrO-Monitorings liegen werden, ist grundsätzlich mit einer verstärkten mikrobiellen Stoffwechselaktivität zu rechnen, was in der Folge mit einer verstärkten Nitratfreisetzung einhergehen kann. Begleitende Laborversuche der Universität Trier haben allerdings gezeigt, dass sich die absolute Reaktionsgeschwindigkeit bei einer Temperaturerhöhung nicht zwingend ändert, insbesondere, wenn es sich um ressourcenlimitierte Lebensräume, wie dem Boden, handelt (s. a Abbildung 6.3-1).

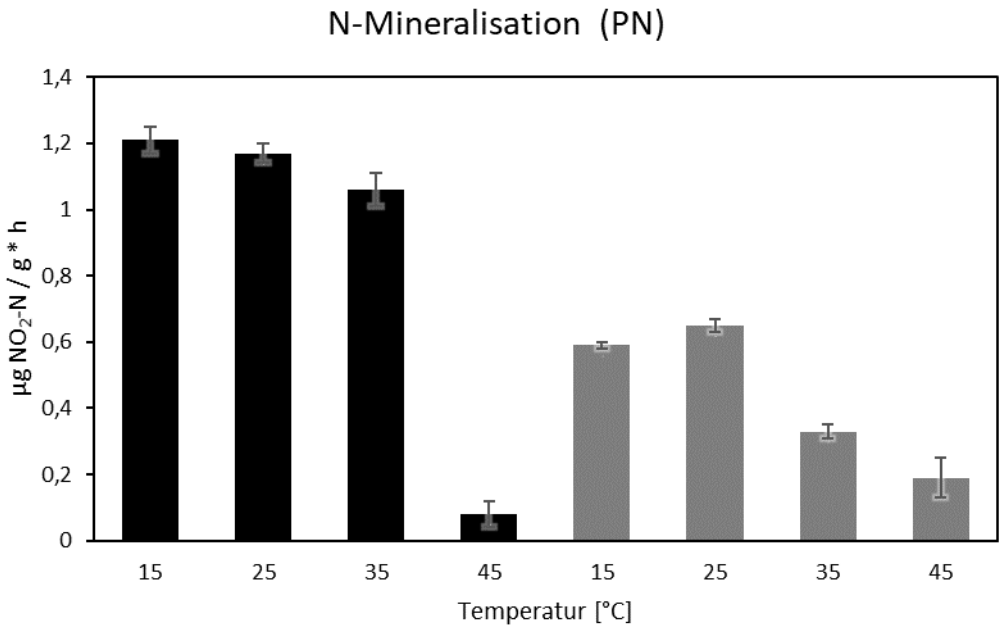

Abbildung 6.3-1: Stickstoffmineralisation in einem lehmigen (schwarze Balken) und sandigen Boden (graue Balken) in einem Temperaturbereich von 15 bis 45°C im Laborversuch (Neukirch, Universität Trier, 2021).

Darüber hinaus haben Simulationsergebnisse für das A-Nord/Offshore-Erdkabelsystem belegt, dass selbst bei einem erhöhten Lastfall lediglich geringe betriebsbedingte Auswirkungen der Wärmeemissionen auf die N-Dynamik der Böden zu erwarten sind. Demnach waren die Nmin-Werte zum Teil leicht erhöht (Mais), wenig verändert (Grünland) oder in einzelnen Bodentiefen sogar verringert (Kartoffeln, Getreide). Diese Effekte sind vermutlich darauf zurückzuführen, dass durch die Bodenerwärmung nicht nur die Nitrifikation im Boden stimuliert wird, sondern auch die Denitrifikation, insbesondere bei niedrigen Grundwasserflurabständen. Eine durch Bodenerwärmung stimulierte zusätzliche Nmin-Freisetzung und eine potenzielle vertikale Verlagerung von Nitrat in Richtung Grundwasser ist demnach für beide hier betrachteten Erdkabelsysteme selbst bei erhöhten Lastgängen von 85 % nicht zu erwarten.

6.3.1 Spannungsfeld Bodenerwärmung – Humusabbau – Klimaschutz

Aus verschiedenen Studien zu den Auswirkungen einer Bodenerwärmung, zum Beispiel infolge des prognostizierten Klimawandels, auf die organische Bodensubstanz ist bekannt, dass allgemein von einer Verringerung der Kohlenstoffgehalte in terrestrischen Böden durch eine Erhöhung der mittleren Bodentemperaturen ausgegangen werden kann (Bachmann, 1997). Dies ist insbesondere auf eine Förderung der C-Mineralisationsraten der Mikroorganismen bei höheren Temperaturen zurückzuführen. Damit einhergehend ist eine CO_2-Freisetzung zu erwarten.

Die potenzielle Gefahr eines verstärkten Humusabbaus infolge des Betriebs von Höchstspannungserdkabeln stellt sich in besonderem Maße bei der Durchleitung durch tiefgründige humose Mineralböden sowie insbesondere durch Niedermoor- oder Hochmoorgebiete ein, da diese Böden über besonders hohe C-Vorräte verfügen (Abbildung 6.3-2).

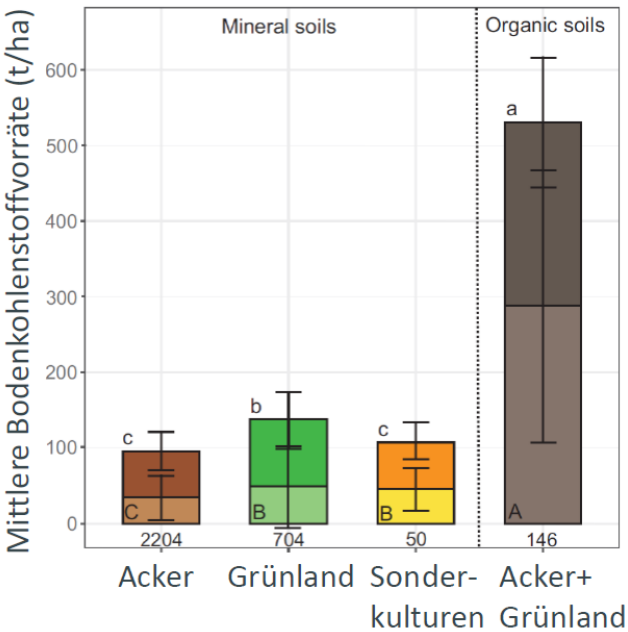

Abbildung 6.3-2: Mittlere C-Vorräte in Mineralböden sowie organischen Böden bei unterschiedlicher Landnutzung (aus: Don et al., 2021).

Ein weiterer wichtiger Einflussfaktor auf die potenzielle CO_2-Freisetzung aus Böden ist der Grundwassereinfluss. Abbildung 6.3-3 verdeutlicht, dass die C-Vorräte in Böden bei geringem Grundwasserflurabstand vergleichsweise höher sind und die CO_2-Emissionen entsprechend niedriger ausfallen, da es sich bei der C-Mineralisation um einen aeroben Prozess handelt.

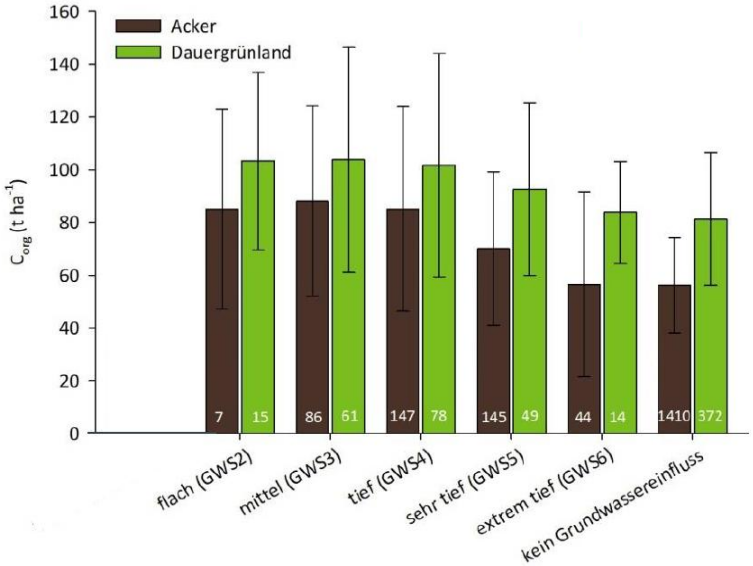

Abbildung 6.3-3: Vorräte an organischem Kohlenstoff in Abhängigkeit vom Grundwassereinfluss (aus: Don et al., 2021).

Natürliche Moore erfüllen als geschützte Landschaftselemente wesentliche ökologische Funktionen in der Landschaft. Sie dienen als Lebensraum für Flora und Fauna sowie als Kohlenstoffsenke und Kohlenstoffspeicher. Diese Aspekte sind hinsichtlich des prognostizierten Klimawandels von besonderer Bedeutung und werden seit einigen Jahren in der Forschung intensiv untersucht.

Während natürliche Moore bei ausreichender Wassersättigung als CO_2-Senken gelten, können aus genutzten oder trockengefallenen Mooren in Abhängigkeit von Nutzungsintensität, Feuchte und Temperatur erhebliche Beträge an klimawirksamem CO_2 emittieren (LK Niedersachsen, 2021). Die Zersetzung der organischen Substanz sowie die Setzung des Moorkörpers sind dabei irreversibel.

Nach Höper (2007) übt die Landnutzung einen bedeutenden Einfluss auf die CO_2-Freisetzung aus Mooren aus. Die Freisetzung nimmt in der Reihenfolge (Seggen-, Bruch-) Wald < extensives Grünland < intensives Grünland < Acker zu. Die Beträge für extensives Grünland können zwischen 10 (nass) – 17 (feucht) und 23 t/ha/Jahr CO_2 schwanken. Aus intensivem Grünland können je nach Nutzungsintensität zwischen 19 und 31 t/ha/Jahr CO_2 emittieren. Unter Ackernutzung können die Werte noch höher liegen. Zum Vergleich: aus natürlichen Mooren emittieren 0 bis 3 t/ha/Jahr CO_2 (Höper 2007; Werkenthin, 2012, aus Wessolek & Kersebaum, 2020; LK Niedersachsen, 2021).

Humusabbau in Organo-Mineralböden und Moorböden

Das Potenzial betriebsbedingter Emissionen von CO_2 durch die Erwärmung von Mineralböden sowie von Nieder- und Hochmooren muss vor dem Hintergrund dieser hohen Treibhausgas - Emissionen (THG-Emissionen) aus der landwirtschaftlichen Bodenbewirtschaftung beurteilt werden:

Die Problematik betriebsbedingter CO_2-Emissionen stellt sich entlang beider Erdkabeltrassen insbesondere bei (tiefgründig) humosen Böden, wie zum Beispiel den Niedermooren, Organo-Marschen, Tiefumbruchböden aus Moorböden sowie den Plaggeneschen.

Für die Oberkrume im Bereich der Pflugtiefe ist eine erhöhte C-Mineralisation durch betriebsbedingte Wärmeemissionen vernachlässigbar, da sich hier die organische Substanz in einem Fließgleichgewicht zwischen Anlieferung und Umsetzung/Abbau befindet und deren Menge vorrangig von der Bodennutzung, der Bodenbewirtschaftung und der Bodenbearbeitung gesteuert wird.

Organische Böden weisen geringe. Wärme- und Wasserleitfähigkeiten und sehr hohe Wärmekapazitäten bei Wassersättigung auf. Insofern handelt es sich bei Moorböden um ausgesprochen träge Systeme. Da sich diese Böden bei erhöhter Ausführungslast von 85 % lokal auf den Kabelgraben begrenzt bis zu 5,5 K in 60 cm Tiefe (Hauptwurzelzone) erwärmen können (siehe Kap. 6.1), kann allgemein mit einer leicht erhöhten Mineralisierung der organischen Bodensubstanz gerechnet werden, sofern nicht hohe Grundwasserstände diesem Prozess entgegenwirken. Sowohl die Verbreitungsgebiete der Moore als auch die der Organomarschen entlang beider Erdkabeltrasse weisen allerdings grundsätzlich niedrige Grundwasserflurabstände auf, sodass bei insgesamt moderater Erhöhung der betriebsbedingten Wärmeemissionen von einem geringen zusätzlichen Abbau der organischen Substanz auszugehen ist, insbesondere vor der hohen nutzungsbedingten landwirtschaftlichen Kulisse. Entscheidend ist in diesem Zusammenhang auch, dass lediglich ein geringer Teil der Moorgebiete oder der Organomarschen von den geplanten Erdkabeln betroffen sein wird.

Zusammenfassende Bewertung des betriebsbedingten Einflusses der HGÜ-Verbindungen Kabeltyp 1 und Kabeltyp 2 auf Nährstoffhaushalt, Stickstoffdynamik und organische Bodensubstanz der verbreiteten Böden (Leitprofile):

Nährstoffhaushalt

Hinsichtlich der Freisetzung von Pflanzennährstoffen und insbesondere der N-Dynamik ist aufgrund der zu erwartenden betriebsbedingten Wärmeemissionen nicht mit einer verstärkten Nitrat-Freisetzung und Auswaschungsdynamik zu rechnen. Zwar kann es zu leicht erhöhten N-Mineralisationsraten und Nmin-Gehalten in verschiedenen Bodenkompartimenten kommen, gleichzeitig kann aber ebenfalls mit einer erhöhten Pflanzenaufnahme, einer erhöhten mikrobiellen N-Fixierung sowie mikrobiellen Denitrifikation gerechnet werden. In der Summe ist potenziell mit keiner oder lediglich mit einer geringen Erhöhung der Nährstoff- und Stickstofffreisetzung und –mobilität durch den Betrieb der Erdkabel zu rechnen.

Potenzieller Humusabbau

Sowohl bei offener als auch bei geschlossener Verlegung durch Hoch- und Niedermoorstandorte sowie Organomarschen kann es im oberen Bodenbereich außerhalb des Grundwassereinflusses potenziell zu einer leicht verstärkten Mineralisation der organischen Substanz und einer leicht erhöhten Emission von klimawirksamen Treibhausgasen wie CO_2 kommen. Bei Moorstandorten unter landwirtschaftlicher Nutzung ist anzunehmen, dass die Temperaturerhöhung das Pflanzenwachstum fördern und die Erträge landwirtschaftlicher Kulturen leicht ansteigen werden.

Insgesamt sind die betriebsbedingten Auswirkungen umweltfachlich und aus Sicht des Bodenschutzes gering.

6.4 Einfluss betriebsbedingter Wärmeemissionen durch HGÜ-Erdkabel auf Vegetation und Landwirtschaft

Der Bodenwärmehaushalt ist für die Bodenfruchtbarkeit von zentraler Bedeutung. Keimung, Wachstum, Atmung und Nährstoffaufnahme der Pflanzen hängen wesentlich von der Bodentemperatur ab (Blume et al., 2004). Der Temperaturfaktor ist darüber hinaus in der pflanzenbaulichen Produktionstechnik wirksam, indem die Bodenbearbeitung, die Ernte, als auch die Ausbreitung von Krankheitserregern und Schädlingen sowie manche Pflanzeninhaltsstoffe, wie z. B. Proteine, von der Temperatur beeinflusst werden.

Die meisten Kulturpflanzen benötigen eine Mindesttemperatur von 5 °C für Keimung und Wachstum. Böden, die sich im Frühjahr schnell und früh erwärmen, sind aus pflanzenbaulicher Sicht Gunststandorte (Stahr et al., 2008).

Bereits frühere Versuche mit der Einleitung von Prozesswärme von Biogasanalgen in den Wurzelbereich und eine kontrollierte Erwärmung des Bodens ermöglichten Ertragssteigerungen bei Spargel (Gabbert, 2009). Demnach kann eine durchschnittliche Temperaturerhöhung im Boden von 1 °C eine Ertragssteigerung von 10 % bewirken (Morgan, 1957; aus Bachmann, 1997). Im Projekt Agrotherm, bei der Abwärme aus dem Kühlkreislauf von Kraftwerken über ein im Boden verlegtes Rohrsystem in landwirtschaftliche und gärtnerische Böden abgeleitet wurde, zeigte sich ebenfalls eine signifikante Steigerung der Erträge (Reinken 1975; Reinken et al., 1978). Gleiches gilt für den in Niedersachsen und Nordrhein-Westfalen ökonomisch bedeutsamen Anbau von Sonderkulturen, wie Spargel und Erdbeeren. Versuche zur Bodenerwärmung von Rykbost et al. (1975), u. a. mit Erdbeeren, zeigten ebenfalls deutliche Ertragssteigerungen bei Bodenerwärmung.

Der Optimumbereich der Temperatur liegt für viele Kulturpflanzen zwischen 25 °C und 30 °C; bei einigen Sommerkulturen, wie Mais oder Zuckerrüben, liegen sie etwas höher. Hohe Temperaturen ab 45 °C führen zu Schäden an den Wurzeln oder der oberirdischen Biomasse.

Die Inanspruchnahme von Landwirtschaftsflächen unter anderem für Siedlung und Verkehr ist in den vergangenen Dekaden zwar zurückgegangen, sie liegt im Bundesgebiet aber nach wie vor sehr hoch. Nach Angaben des BMEL liegt der Wert derzeit bei 56 ha pro Tag (Durchschnitt der Jahre 2015 – 2018). Die Landwirtschaft mit ihren zum Teil hoch produktiven Flächen ist somit durch den Bau und Betrieb der Erdkabelsysteme im weiteren Maße von einer Flächeninanspruchnahme direkt und indirekt betroffen, auch wenn der Eingriff in die Böden zeitlich begrenzt ist, die späteren Nutzungseinschränkungen vernachlässigbar sein werden und sich die Auswirkungen auf die Böden durch den Betrieb der Kabel auf den Bereich des Kabelgrabens beschränken werden.

Grundsätzlich sind in diesem Kontext zwei Faktoren zu berücksichtigen: Zum einen ist dies der mechanische Eingriff in die weitestgehend ungestörten Böden im Rahmen der Verlegung der Kabel und zum anderen die Auswirkungen der Wärmeemissionen auf die rekultivierten Böden. Es muss an dieser Stelle betont werden, dass der Eingriff in den Boden im Rahmen der Verlegung der Erdkabel nicht Gegenstand der vorliegenden Ausführungen ist, sondern lediglich die bodenökologische Bewertung der betriebsbedingten Wärmeemissionen.

In verschiedensten Projekten zum Betrieb von Erdkabeln wurden mögliche Effekte der betriebsbedingten Wärmezufuhr von Erdkabeln auf bedeutende Kulturpflanzen untersucht (u. a. Trüby, 2014, 2018; Wessolek und Kersebaum, 2020; siehe Kapitel 2.3). Es wurden insgesamt keine Hinweise auf geringere Erträge oder sonstige negative Einflüsse, die auf eine Verlegung von Erdkabeln zurückzuführen wären, gefunden. Im aktuellen CHARGE-Projekt der Universität Hohenheim (SüdLink, TRANSNET BW) zum Beispiel zeigten sich leicht erhöhte Erträge bei landwirtschaftlichen Kulturpflanzen, wie z. B. bei Dinkel, im Vergleich zu Kaltgraben und

Kontrolle (Lehmann et al., 2024). Ertragskundliche Untersuchungen auf der ALEGrO-Trasse (s. a. Kap. 2.3) belegen, dass sich die Kornerträge von Getreide (Winterweizen) aus dem Kabelgraben nicht von den ungestörten Flächen unterschieden; die Variabilität war auf den Trassenschlägen nicht signifikant erhöht (Feldwisch et al., 2023). Nach Angaben von Ahl et al. (2023) zeigten sich nach drei Bewirtschaftungsjahren keine negativen betriebsbedingten Einflüsse auf die Erträge oder Wachstumsphasen (BBCH-Notierung); die Erträge von Hafer waren umgekehrt im Bereich des Warmgrabens deutlich erhöht. Eine verstärkte Aufwendung bei Schädlingsprophylaxe und -bekämpfung bei verschiedenen Kulturen wurde bisher nicht nachgewiesen.

Hingegen besitzt eine leichte Temperaturerhöhung im Oberboden das Potential einer Förderung der Keimung und des früheren Auflaufens der Kulturen. Nach Trüby (2018) ist für verschiedene Kulturpflanzen, wie zum Beispiel Sonderkulturen und gegebenenfalls auch Silomais, in manchen Jahren ein früheres Abreifen auf den durch Erdkabel beeinflussten Flächen nicht auszuschließen. Die Effekte dürften allerdings keine gesonderte Ernte zur Folge haben. Darüber hinaus wurde ein leicht verringertes Bodenfrostrisiko in Oberflächennähe sowie leichte Veränderungen in der phänologischen Entwicklung der Pflanzen prognostiziert. Auch hier zeigte sich eine Verfrühung des Auflauftermins um wenige Tage für einige Kulturpflanzen, wie Winterraps, Getreide und Silomais (Wessolek und Kersebaum, 2020).

Aus Sicht der Landwirtschaft stellt sich hinsichtlich des Betriebs von Erdkabelsystemen vorrangig die Frage nach potenziellen Bodenfeuchteverlusten durch die Bodenerwärmung. Diese sind insbesondere in den Unterböden nach Angaben aus anderen, ähnlich gelagerten Projekten, zumindest theoretisch zu erwarten. Allerdings waren die Auswirkungen nicht eindeutig und auch das Ausmaß war eher als gering zu bewerten. Zusätzlich kann eine erhöhte Evapotranspiration durch die Bodenerwärmung erwartet werden (Buschhaus und Werning, 1981). Nach Modellrechnungen von Wessolek und Kersebaum (2020) zeigten sich keine Abweichungen in den Erträgen zahlreicher Kulturpflanzen (Getreide, Raps, Mais) im Vergleich zur Kontrolle, sowohl für sandige als auch für lehmige Böden. Darüber hinaus wurden auch Anzeichen gefunden, dass im Umfeld des Bettungsmaterials höhere Bodenwassergehalte auftreten können, insbesondere, wenn das verwendete Bettungsmaterial hinsichtlich der Bodenwasserspeicherkapazität bessere Eigenschaften aufweist als die umgebenden gewachsenen Böden mit sandigen Texturen (Trüby, 2018).

Für die beiden im vorliegenden Gutachten modellierten Erdkabelsysteme werden zunächst die beiden Nutzungstypen Getreide (Winterweizen) und Silomais betrachtet. Die hieran geknüpften Randbedingungen für die Modellierung bezüglich Dauer der Vegetationsperiode, Bestandskoeffizienten, Blattflächenindex und Wurzellängendichte sind ausführlich in den Kapiteln 4.3.7.7 bis 4.3.7.10 beschrieben. Insbesondere die Parameter Bestandskoeffizient und

Feddes-Parameter (Water Stress Response Function) wurden zur Beschreibung der Beziehung zwischen Vegetationsentwicklung und Bodenwasserhaushalt verwendet. Die Parametrisierung der Wurzellängendichte dient der Bestimmung des Wasserentzuges aus dem Boden (Bodentiefe) zur Berechnung der pflanzenspezifischen Transpirationsraten im Jahresverlauf.

Aus den Modellierungs-Ergebnissen kann festgehalten werden, dass sich der Betrieb beider Erdkabelsysteme unter den o. g. Rahmenbedingungen nicht negativ auf den Bodenwasserhaushalt der Böden entlang des Netzanbindungskorridors und indirekt damit auch nicht negativ auf Pflanzenwachstum und -ertrag auswirken. Vielmehr üben Witterungseinflüsse, wie Niederschlagshöhe und –verteilung während der Vegetationsperiode, einen entscheidenden Einfluss auf die Wuchsbedingungen von Pflanzen und landwirtschaftlichen Kulturen, und somit auf den Wassermangelstress, den Pflanzen ausgesetzt sind, aus.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass die betriebsbedingten Effekte, während der besonders sensiblen Phasen der Vegetationsperiode im Vergleich zu den aus natürlichen Prozessen resultierenden Effekten insgesamt eine untergeordnete Rolle spielen. Ausmaß und zeitliche Wirkung von betriebsbedingten Wärmeemissionen auf Wachstum und Ertrag der hier betrachteten Kulturpflanzen hängen wesentlich von der Bodenwärmedynamik und dem Bodenwasserhaushalt der verbreiteten Böden und den bestimmenden Bodeneigenschaften ab. Dies betrifft vor allem Textur, Lagerungsdichte und Humusgehalte der Böden, aus denen sich u. a. die Wasserspeicherkapazität oder nutzbare Feldkapazität ableiten lässt.

Die berechneten betriebsbedingten Wärmeemissionen werden keine drastischen Effekte auf den Wasserhaushalt der Böden und folglich auf die Vegetationsentwicklung haben (s. o.). Es ist jedoch bei ungünstigen Ausgangsbedingungen (Böden mit geringem Wasserhaltevermögen, intensive landwirtschaftliche Nutzung (z. B. hoher Transpirationskoeffizient) sowie Annahme eines Trockenjahres) nicht auszuschließen, dass bereits minimale betriebsbedingte Effekte in bestimmten Wachstumsperioden Einschränkungen bei der Pflanzenentwicklung verstärken können. Es ist jedoch davon auszugehen, dass diese Entwicklung auf kurze Zeiträume begrenzt ist. Bei grundwassernahen Standorten, v. a. Marschböden, Böden des tidal-marinen Milieus sowie bei naturnahen Hoch- und Niedermoorböden – somit für einen Großteil der im nördlichen Niedersachsen und Schleswig-Holstein anstehenden Böden – ist ein betriebsbedingter Einfluss kaum zu erkennen (vgl. auch Kap. 6.2). Für lehmige bis schluffige Böden aus Löss, Geschiebelehm und fluviatilen Sedimenten, die zumeist im südlichen Trassenverlauf beider Erdkabelsysteme verbreitet sind, zeigen sich ebenfalls keine erkennbaren Auswirkungen der betriebsbedingten Wärmeemissionen auf den Bodenwasserhaushalt. Im Jahresmittel sind weniger als 1 % Verlust des pflanzenverfügbaren Bodenwassers auf den höheren Speicherpotenzial der terrestrischen Böden (vgl. auch Kap. 6.2). Diese Befunde decken sich mit Angaben von Ahl et al. (2023) für den Erdkabelversuchsfeldbetrieb Reinshof. Die berechneten

Wärmeemissionen führen aufgrund der guten Wasserverfügbarkeit dieser Böden voraussichtlich zu keinen Einschränkungen bei der Pflanzenentwicklung. Hieraus folgt, dass die betriebsbedingten Auswirkungen beider Erdkabelsysteme auf die landwirtschaftlichen Kulturpflanzen gering bis vernachlässigbar sein werden.

Zusammenfassende Bewertung des betriebsbedingten Einflusses der HGÜ-Verbindungen Kabeltyp 1 und Kabeltyp 2 auf Vegetation und Landwirtschaft auf den verbreiteten Böden (Leitprofile)

Hinsichtlich der betriebsbedingten Auswirkungen der beiden Kabeltypen auf Vegetation und Landwirtschaft können folgende Schlussfolgerungen gezogen werden:

1. Negative Auswirkungen sind nicht zu erwarten. Sowohl bei einer Ausführungslast von 70 % als auch bei erhöhtem Lastfall von 85 % ist nur mit einer geringen bis moderaten Erwärmung des Oberbodens und der Hauptwurzelzone bis ca. 60 cm Tiefe zu rechnen und selbst Bodenfrost kann zeitweise noch auftreten.
2. Der durch den Betrieb der Erdkabel induzierte Wasserverlust ist allgemein unwesentlich und wird sowohl Höhe als auch Qualität der Erträge nicht negativ beeinflussen.
3. Die zusätzliche Bodenwärme kann sich positiv auf die Erträge der Kulturpflanzen auswirken, wie zunächst Getreide und Mais.
4. Ein eventueller Bewässerungsbedarf der Kulturpflanzen ergibt sich ausschließlich aus der Entwicklung des Witterungsgeschehens und ist nicht auf den Betrieb der Erdkabelsysteme zurückzuführen.
5. Der Anbau von Sonderkulturen, wie zum Beispiel Spargel oder Erdbeeren, wird durch den Betrieb der Erdkabelsysteme nicht beeinflusst; dies gilt auch für den Anbau unter Folie.

6.5 Einfluss betriebsbedingter Wärmeemissionen durch HGÜ-Erdkabel auf Bodenorganismen und Stoffwechselaktivitäten mit besonderer Berücksichtigung der Bodenfauna (Regenwürmer)

Die Populationsdichte von Bodenorganismen ist physiologisch und morphologisch eng mit einigen abiotischen Bodeneigenschaften verbunden, die sich typischerweise mit zunehmender Bodentiefe ändern. In der Regel nehmen die Populationsdichte, Biomasse und Aktivität von Bodenorganismen mit zunehmender Bodentiefe ab, da der Gehalt an organischer Substanz und Nährstoffen sowie der verfügbare Porenraum und die Porengeometrie ebenfalls mit der Tiefe abnehmen (Eilers et al., 2012). Andererseits sind im Unterboden stressige klimatische Faktoren, wie Hitze, Frost oder Trockenheit weniger stark ausgeprägt (Kilham, 1994).

Die Temperatur ist einer der wichtigsten Umweltfaktoren, die das Wachstum von Mikroorganismen und die biologische Aktivität von Böden beeinflussen. Alle biologischen Prozesse sind temperaturabhängig und jede Erwärmung führt zu einer Steigerung der Stoffumsätze. Erhöhte Temperaturen können zudem das Wachstum und die Biodiversität der meisten Bodenlebensgemeinschaften fördern, insbesondere in kalten Ökosystemen (FAO, 2020), und dies könnte sich ggf. auch auf die Temperaturbedingungen im Unterboden übertragen lassen. Allerdings ist noch wenig über Bodenorganismen und ihre Aktivitäten im Unterboden bekannt, ebenso wenig wie über die Auswirkungen relativ gleichmäßig erhöhter Temperaturen auf biologische Systeme (Fierer et al. 2003).

Durch betriebsbedingte Wärmeemissionen werden die natürlichen vertikalen Temperaturschwankungen im Boden dauerhaft verändert, indem die Bodentemperaturen mit zunehmender Bodentiefe ansteigen, anstatt abzunehmen. Es entsteht eine Temperaturanomalie im Boden. Diese erfordert eine physiologische Anpassung der Bodenorganismen. In diesem Zusammenhang sind sowohl positive als auch negative Rückkopplungseffekte denkbar. Nach Hall et al. (2010) können zum Beispiel Bodenbakterien ihre Physiologie an die Temperatur anpassen, indem sie die Durchlässigkeit ihrer Zellmembranen verändern. Radujkovic et al. (2018) konnten zeigen, dass sich Bakterien- und Pilzgemeinschaften bei Erwärmungen von mehr als +6–8 °C über der Umgebungstemperatur veränderten.

Untersuchungen zum betriebsbedingten Einfluss von Wärmeemissionen durch Erdkabel auf Vertreter der Bodenfauna liegen kaum vor. Bodentiere sind von der Erwärmung des Bodens unterschiedlich betroffen und zeigen verschiedene Reaktionsmuster. In einer Studie von Briones et al. (1997), in den Böden aus einer kühleren Region in eine wärmere verpflanzt wurden, nahm die Häufigkeit einzelner Enchyträenarten zu, während andere, darunter Dipterenlarven, stark zurückgingen.

Zu den bedeutendsten Bodentieren zählen Regenwürmer. Die meisten europäischen Regenwurmarten bevorzugen niedrige Temperaturen, um sich optimal zu entwickeln. Nach Lee (1985) liegt die optimale Temperatur für das Wachstum von Regenwürmern zwischen 10 und 15 °C, jedoch gibt es deutliche Unterschiede zwischen den Arten (Edwards und Arancon, 2022). Beispielsweise zeigt die anezische Art *Lumbricus terrestris* unter Feldbedingungen eine optimale Entwicklung und maximale Aktivität bei vergleichsweise niedrigen Temperaturen von etwa 10 °C. Andere verbreitete Arten, wie die oft dominante endogeische Art *Aporrectodea caliginosa*, bevorzugen Temperaturbereiche von 10 bis 23 °C. Die Gewichtsentwicklung, Reifezeit vom Schlüpfen bis zur Geschlechtsreife, die Sterblichkeit der Jungtiere und die Fertilität der Tiere werden ebenfalls stark durch die Temperatur beeinflusst (Daniel et al., 1996). Nach Edwards und Arancon (2022) liegen die Lethal-Temperaturen für Regenwürmer zwischen 25 °C und ca. 30 °C.

Regenwürmer können auf ungünstige Lebensbedingungen, z. B. auf Erwärmung oder Austrocknung des Bodens, mit verschiedenen Formen der Anpassung reagieren. Dazu zählen vertikales Fluchtverhalten, Veränderungen im Grabverhalten, Inaktivität (z. B. Anhydrobiose n. Bouché (1972) oder fakultative Diapause) oder geringere Schlupfraten.

Im Rahmen des ALEGrO- Monitorings und unter realen Erdkabel-Betriebsbedingungen war insgesamt eine durch die betriebsbedingte Bodenerwärmung induzierte Stimulierung der mikrobiellen Eigenschaften (mikrobielle Biomasse, mikrobielle Aktivitäten, Enzymaktivitäten und funktionelle Gene, die die mikrobielle Nitrifikation codieren) im Boden, insbesondere im Unterboden, nachzuweisen (Emmerling et al., 2025; s. a. Abbildung 6.5-1). Die Nmin-Gehalte waren im Bereich der Trasse tendenziell, aber nicht signifikant niedriger als an den Kontrollstandorten (vgl. Kap. 2). Dieses Ergebnis wird auf eine eventuell höhere N-Aufnahme durch die Vegetation zurückgeführt und steht zudem im Einklang mit einer höheren Wurzelmasse von Gras in Bereich des Kabelgrabens (Werner, L, Universität Trier, nicht veröff.).

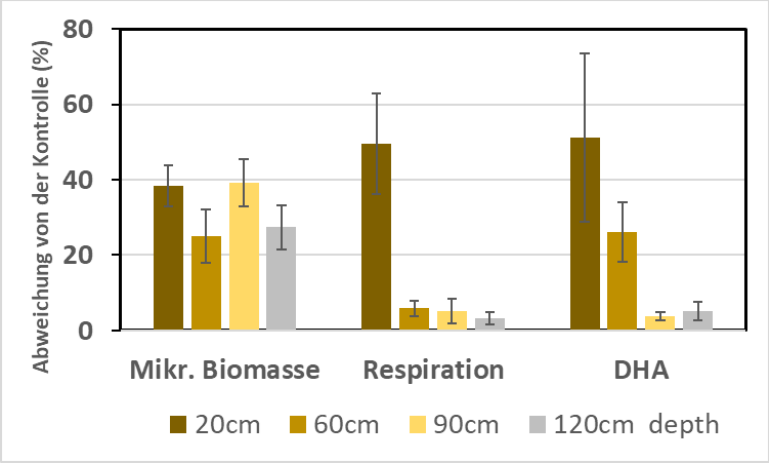

Abbildung 6.5-1: Förderung der mikrobiellen Eigenschaften (mikrobiellen Biomasse, mikrobielle Aktivität und Enzymaktivität) durch betriebsbedingte Wärmeemissionen im Bereich der ALEGrO-Erdkabeltrasse (Abweichung von den Kontrollflächen ohne Kabeleinfluss)

Im Rahmen des ALEGrO-Monitorings wurden ebenfalls umfangreiche Untersuchungen zur Regenwurmfauna durchgeführt. Der Vergleich der Regenwurmpopulationen zwischen dem Trassenbereich und der Kontrolle erbrachte zunächst unerwartete Ergebnisse: An drei von vier Standorten wurden höhere Abundanzen, Biomassen und Artenzahlen im Trassenbereich ermittelt (Abbildung 6.5-2). Die mittleren Abundanzen in der Trasse waren mit 380,5 Tieren pro m^2 im Vergleich zu 275 Tieren pro m^2 in der Kontrolle um 38 % deutlich erhöht. Die Frischbiomasse der Regenwürmer war mit 16 % ebenfalls deutlich höher als in den Kontrollböden. Die stärkere Förderung der Abundanzen ist auf eine deutlich höhere Zahl an Jungtieren im

Trassenbereich zurückzuführen (Emmerling et al., 2024). Es ist anzunehmen, dass durch die moderate Bodenerwärmung die Schlupfabundanz der Tiere gefördert wurde.

Unsere Ergebnisse bestätigen frühere Untersuchungen von Trüby (2018), der zeigte, dass die Regenwurmpopulation durch die Bauarbeiten stark dezimiert wurde, aber nur ein Jahr nach dem Verfüllen der Baugräben und nachfolgender Rekultivierung der Flächen wieder das Niveau vor den Bauarbeiten erreicht oder sogar überschritten hatte. Auch Frey und Treyer (2022) kamen in ihren Studien in der Schweiz zu einem vergleichbaren Ergebnis, wo eine moderate betriebsbedingte Erwärmung des Bodens keine negativen Auswirkungen auf Regenwürmer hatte; im Gegenteil, deren Dichte und Biomasse waren in Böden im Trassenbereich sogar etwas höher.

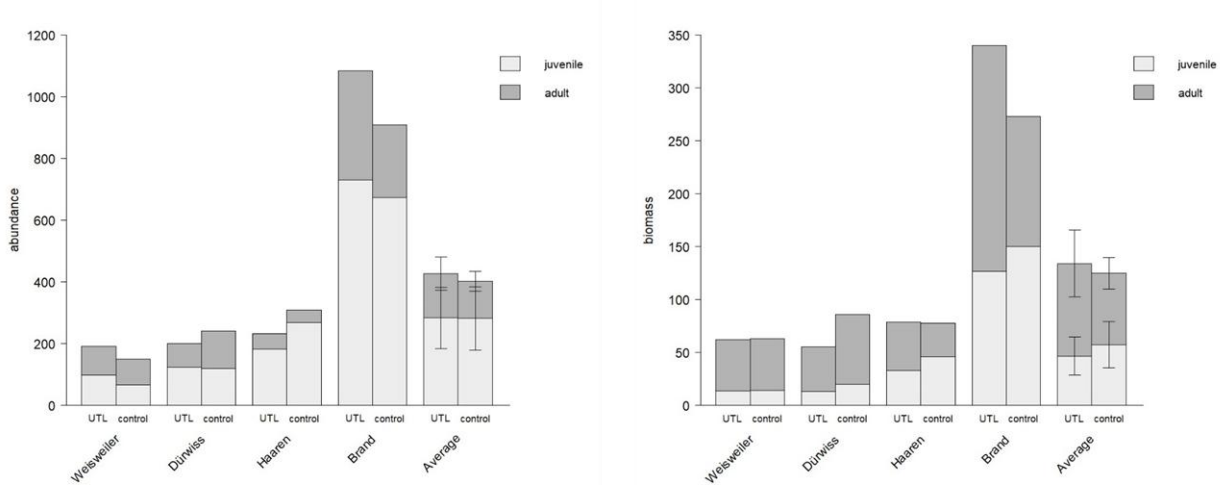

Abbildung 6.5-2: Mittlere Anzahl (links) und Biomasse (rechts) von adulten und juvenilen Regenwürmern im Trassenbereich (UTL) und Kontrollflächen an 4 verschiedenen Untersuchungsstandorten entlang der ALEGrO–Trasse sowie Mittelwerte über alle Untersuchungsflächen (± S.E.; n = 4). Die gemittelten Differenzen zwischen Trassen- und Kontrollflächen waren statistisch nicht signifikant ($p > 0.05$, n = 4, Wilcoxon – test). Verändert nach Emmerling et al., (2024)

Zusammenfassende Bewertung des betriebsbedingten Einflusses der HGÜ-Verbindungen Kabeltyp 1 und Kabeltyp 2 auf Bodenorganismen und Stoffwechselaktivitäten auf den verbreiteten Böden (Leitprofile)

Im Hinblick auf den bevorstehenden Ausbau des Höchstspannungsnetzes für Erdkabel muss zur Sicherung und Erhaltung der Bodenfruchtbarkeit sichergestellt werden, dass die daraus resultierende betriebsbedingte Erwärmung des Bodens moderat ausfällt und die Auswirkungen auf Bodenorganismen und ihre (Stoffwechsel-) Aktivitäten gering bleiben.

Nach den vorliegenden Modellierungsergebnissen kann für beide Netzanbindungssysteme *Kabeltyp 1* und *Kabeltyp 2* davon ausgegangen werden, dass die betriebsbedingten Wärmeemissionen während des Betriebs bei Regellast sowie bei einer erhöhten Ausführungslast von 85 % im gesamten Bodenprofil bis zu einer Tiefe von 120 cm eine Förderung der mikrobiellen Eigenschaften des Bodens bewirken wird und dass andererseits die Auswirkungen auf die Nmin-Dynamik in den Böden gering bleibt. Eine verstärkte Freisetzung von Nitrat wird trotz erhöhter mikrobieller Aktivität wahrscheinlich nicht zu erwarten sein.

Bisherige Untersuchungen ergaben eine Förderung der Regenwurm-Populationen hinsichtlich Anzahl und Biomasse sowie ein modifiziertes Grabverhalten eines anezischen Regenwurms (*L. terrestris*), ohne dass sich die gesamte Grabaktivität veränderte. Die Artenvielfalt oder der Anteil an Jungtieren wurden nicht beeinflusst.

7. Zusammenfassung

Das vorliegende Gutachten beschreibt und bewertet die bodenökologischen Auswirkungen des Betriebs von Erdkabeln für einen Großteil von im Netzgebiet der Amprion GmbH auftretenden Böden bzw. Bodeneigenschaften. Die technischen Randbedingungen stützen sich im Wesentlichen auf zwei derzeit in der Planung befindliche Netzausbauprojekte mit flächenhaft besonderer Bedeutung. Die getroffenen Aussagen verstehen sich als allgemeine Abwägung in Bezug auf die zuvor beschriebenen Randbedingungen hinsichtlich der räumlichen Repräsentativität, der Modellrandbedingungen und technischen Vorgaben.

Die angegebenen und beschriebenen Werte aus der Modellierung beziehen sich, im Sinne einer konservativen Betrachtung, auf einen schmalen Bereich entlang der Kabelsysteme (überschlägig in der Größenordnung der Bettungszone). Mit zunehmendem Abstand von den Systemachsen muss bereits kleinräumig von einer deutlichen Abnahme der betriebsbedingten Effekte ausgegangen werden. Die nachfolgend zusammengefassten, teils möglichen Effekte, sind dort nicht mehr relevant.

Hinsichtlich des **Bodenwärmehaushaltes** zeigt sich eine ausgeprägte Variabilität in Bezug auf die zu erwartenden Auswirkungen für die verschiedenen Leitprofile. Erwartungsgemäß bildet sich ein erkennbarer Gradient mit der Tiefenstufe aus und es kommt zu einem deutlichen Anstieg der Temperaturzunahmen mit steigender Betriebslast. So zeigen sich zumeist geringe bis moderate Einflüsse im Bereich der Hauptwurzelzone (i. d. R. ca. + 2,0 K bis + 3,5 K). Mit zunehmender Tiefe (90 cm und 120 cm) und bei 70 % Betriebslast ist in mineralischen Böden mit einer Erwärmung von 2,5 K bis 5,0 K zu rechnen. V. a. im Bereich der Hauptwurzelzone erscheinen die betriebsbedingten Temperaturvarianzen bodenökologisch wenig relevant. Eine Zunahme ist bei einer Ausführungslast von 85 % zu erwarten. Deutlich erhöhte Werte treten v. a. bei stark organischen Böden (z. B. Moore, Organomarschen) auf, wobei zusätzliche Maßnahmen (z. B. erhöhte Kabelachsabstände oder ein Bodenaustausch oberhalb der Bettungszone) die Temperaturanstiege hier stark reduzieren könnten. Bei einem starken Grund- und Stauwassereinfluss sind keine erheblichen Auswirkungen zu erwarten. Bei aeroben Verhältnissen bzw. schwankenden Grundwasserständen (z. B. durch anthropogenen Einfluss) sind Auswirkungen außerhalb bodenökologisch unbedenklicher Ausmaße nicht auszuschließen. Generell wird in solchen Fällen empfohlen, die anlagentechnischen (z. B. Verlegeabstände) und trassierungstechnischen (z. B. Verlauf und Bauweise) Rahmenbedingungen sowie die Boden- und Grundwasserverhältnisse im projektspezifischen Zusammenhang auch kleinräumig zu prüfen.

Nur in den wenigsten Fällen zeigen sich anhand der hier vorliegenden Ergebnisse erkennbare Unterschiede in Bezug auf den **Wasserhaushalt**. Die Dynamik im Jahresverlauf wird nahezu ausschließlich durch die originären Bodeneigenschaften, die klimatischen Bedingungen sowie

die Wasseraufnahme durch Kulturpflanzen bestimmt. Die betriebsbedingten Auswirkungen sind im Hinblick auf die pflanzenverfügbaren Wassergehalte zumeist marginal. Theoretisch können sich jedoch im Einzelfall (z. B. terrestrische Böden mit geringer nutzbarer Feldkapazität, intensiver landwirtschaftlicher Nutzung sowie Trockenjahrbedingungen) Konstellationen ergeben, in welchen die geringen betriebsbedingten Effekte (v. a. im Frühjahr und Frühsommer) ohnehin eintretende Trockenstressverhältnisse geringfügig verstärken können.

Zahlreiche Studien und auch die Größenordnung der erwartbaren Effekte auf den Wärme- und Wasserhaushalt deuten darauf hin, dass es gesamtheitlich zu keinen relevanten Auswirkungen auf die Verfügbarkeit von Makro-**Nährstoffen** (z. B. Stickstoff, Phosphor) kommt. Eine geringe Erhöhung der Freisetzung und / oder Umsetzung von Nährstoffen kann durch betriebsbedingte Effekte eintreten. Ebenso kann auch von einer geringfügig verstärkten Aufnahme durch Pflanzenwurzeln ausgegangen werden. Eine verstärkte Mineralisation von **organischer Substanz** kann bei organischen Böden unter aeroben Bedingungen bei zugleich erhöhten Temperaturanstiegen eintreten. Im grundwassergesättigten Bereich – und damit i. d. R. auch im Bereich der höchsten Temperaturanstiege – ist kein verstärkter Humusabbau zu erwarten.

Hinsichtlich der **landwirtschaftlichen Nutzung** sind – mit Ausnahme weniger Extremfälle; siehe Wasserhaushalt – keine negativen Auswirkungen zu erwarten. Zahlreiche Studien belegen, dass es durch betriebsbedingte Auswirkungen in den auch hier ermittelten Größenordnungen zu keinen Einbußen im Hinblick auf Höhe und Qualität der Erträge kommt. Eine Förderung des Pflanzenwachstums und Ertragssteigerungen sind möglich. Eine gesonderte Ernte aufgrund einer geringfügig früheren Abreife ist nicht zu erwarten.

In Bezug auf **Bodenorganismen** ist v. a. im Hinblick auf Mikroorganismen mit einer leichten Förderung der Aktivität durch die moderaten Temperaturanstiege zu rechnen. Temperaturbereiche mit letalen Bedingungen werden nicht erreicht. **Regenwürmer** können v. a. in den Szenarien mit den höchsten Temperaturdifferenzen mit einem leicht modifizierten Grabverhalten reagieren. Die Population, die allgemeine Grabaktivität, die Artenvielfalt und Reproduktion werden gemäß den bislang vorliegenden Erkenntnissen nicht beeinflusst.

8. Literatur

Ahl, C., Bremer, J., Löppmann, V., Redweik, H. (2023): Erdkabeltrassen: Zwischenbilanz nach drei Jahren Versuchsfeldbetrieb Reinshof. Bodenschutz 2/23, 36-42.

Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D. and Smith, M. (1998): Crop Evapotranspiration. FAO Irrigation and Drainage, Paper No. 56. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome.

Amelung, W., Blume, H.-P., Fleige, H., Horn, R., Kandeler, E., Kögel-Knabner, I., Kretzschmar, R., Stahr, K., Wilke, B.-M., Gaiser, T., Gauer, J., Stoppe, N., Thiele-Bruhn, S., Welp, G., Scheffer, F., Schachtschabel, P. (2018): Scheffer/Schachtschabel Lehrbuch der Bodenkunde, 17., überarbeitete und ergänzte Auflage, Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.

Bachmann, J. (1997): Böden als Naturkörper – 2.7.5 Wärmefluss und Wärmehaushalt. Handbuch der Bodenkunde, 3. Erg. Lfg. 11/97, 40 S.

Beck-Broichsitter, S., Rizvi, Z. H., Horn, R., Wuttke, F. (2023): Effect of gravel content on soil water retention characteristivs and thermal capacity of sandy and silty soils. J. Hydrol. Hydromech. 71(1), 1-10. https://doi.org/10.2478/johh-2022-0003.

Blume, H.-P. (Hrsg.) (2004): Handbuch des Bodenschutzes. Ecomed, Landsberg a. Lech.

Bouché, M. B. (1972): Lombriciens de France. Écologie et systématique. Institut Natational de la Recherche Agronomique, Paris: 668 pp.

Briones, M.J.I., Ineson, P., Piearce, T.G. (1997). Effects of climate change on soil fauna; responses of enchytraeids, Diptera larvae and tardigrades in a transplant experiment. Appl. Soil Ecol. 6, 117-134. https://doi.org/10.1016/S0929-1393(97)00004-8.

Bundes-Bodenschutzgesetz vom 17. März 1998 (BGBl. I S. 502), das zuletzt durch Artikel 7 des Gesetzes vom 25. Februar 2021 (BGBl. I S. 306) geändert worden ist.

Cai, G., Vanderborght, J., Couvreur, V., Mboh, C., Vereecken, H. (2017): Parameterization of Root Water Uptake Models Considering Dynamic Root Distributions and Water Uptake Compensation. Vadose Zone J. 17. https://doi.org/10.2136/vzj2016.12.0125.

Campanale, M., Moro, L., Siligardi, C. (2025): Thermal properties of sands and their dependence on physical and environmental factors. Sci. Rep. 15, 8352. https://doi.org/10.1038/s41598-025-93054-w.

Daniel, O., Kohli, L., Bieri, M. (1996): Weight gain and weight loss of the earthworm Lumbricus terrestris L. at different temperatures and body weights. Soil Biol. Biochem. 28, 1235–1240. https://doi.org/10.1016/0038-0717(96)00121-6.

delta h (2025): SPRING 7. Benutzerhandbuch, Witten

Edwards, C.A., Arancon, N.Q. (2022): Biology and Ecology of Earthworms, 4. Ed. Springer Nature. https://doi.org/10.1007/978-0-387-74943-3.

Eilers, K.G., Debenport, S., Anderson, S., Fierer, N. (2012): Digging deeper to find unique microbial communities: the strong effect of depth on the structure of bacterial and archaeal communities in soil. Soil Biol. Biochem. 50, 58-65. https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2012.03.011.

Emmerling, C., Hoffmann, C., Herzog, M., Schieber, B., Stöckhert, F., Koschel, S., Kurtenacker, M., Trüby, P. (2024): Soil warming by electrical underground transmission lines impacts temporal dynamics of soil temperature and moisture. J. Plant Nutr. Soil Sci., https://doi.org/10.1002/jpln.202400052.

Emmerling, C., Hoffmann, C., Schieber, B. (2023): Bodentemperatur- und Bodenfeuchtemonitoring der betriebsbedingten Wärmeausbreitung von erdverlegten Höchstspannungserdkabeln im Übertragungsnetz der Amprion GmbH entlang der 320 kV-ALEGrO-Trasse. Jahresbericht (Berichtszeitraum 01.06.2022 bis 31.05.2023), Trier, 54 S., unveröffentlichter Bericht.

Emmerling, C., Schieber, B., Baschab, C., Kurtenacker, M. (2022). Bodenerwärmungsberechnung und ökologische Einschätzung der Berechnungsergebnisse für das Planfeststellungsverfahren A-Nord gemäß § 21 NABEG. Teil II: Bodenökologische Bewertung von betriebsbedingten Wärmeemissionen durch Höchstspannungserdkabel. Unveröffentlichter Bericht.

Feddes, Reinder; Raats, P.A.C. (2004): Parameterizing the soil - water - plant root system. Unsaturated-zone modeling; Progress, challenges and applications.

Feldwisch, N., Thies, C., Koumans, C., Herzog, M., Sperl, D., Koschel, S. (2023): Bodeneigenschaften und landwirtschaftliche Erträge auf der ALEGrO-Erdkabeltrasse. Bodenschutz 1/23, 6-11.

Fierer, N., Allen, A.S., Schimel, J.P., Holden, P.A. et al. (2003): Controls on microbial CO_2 production: a comparison of surface and subsurface soil horizons. Glob. Change Biol. 9, 1322-1332. https://doi.org//10.1046/j.1365-2486.2003.00663.x.

Frey, B., Treyer, R. (2022): Swissgrid Beznau - Birr – Exploring the biological activity. Unpublished Report by order of Swissgrid Ltd., Switzerland (in German).

GDI-NRW (2022): Geschäftsstelle IMA GDI.NRW. GEOportal.NRW, Internetzugriff, zuletzt abgerufen am 27. Juni 2022, https://www.geoportal.nrw/.

GDNRW (2022): Geologischer Dienst Nordrhein-Westfalen. Oberflächennahe Geothermie, https://www.gd.nrw.de/ew_og.htm, zuletzt abgerufen am 26. Juni 2022.

GDSHE (2025): Hessische Verwaltung für Bodenmanagement und Geoinformationen. https://gds.hessen.de, zuletzt abgerufen am 30. Juli 2025.

Gerwitz, A.; Page, E.R. (1974): An empirical mathematical model to describe plant root systems. J. Appl. Ecol. 11: 773-782.

Gisi, U., Schenker, R., Schulin, R., Stadelmann, F.X., Sticher, H. (1997): Bodenökologie. 2. Auflage - Stuttgart; New York: Thieme.

Hall, E.K., Singer, G.A., Kainz, M.J.,Lennon, J.T. (2010): Evidence for a temperature acclimation mechanism in bacteria: An empirical test of a membrane-mediated trade-off. *Functional Ecology* 24, 898-908. https://doi.org/10.1111/j.1365-2435.2010.01707.x.

Huwe, B. (1990): WHNSIM. Ein Modell zur Simulation des Wasser-, Wärme- und Stickstoffhaushalts landwirtschaftlich genutzter Böden. Programmdokumentation, Stuttgart, Juni 1990.

Killham, K. (1994): Soil Ecology. Cambridge Univ. Press, U.K.

LBEG (2022): Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie: NIBIS® Kartenserver, Niedersächsisches Bodeninformationssystem, Internetzugriff, zuletzt abgerufen am 26. Juni 2022, https://nibis.lbeg.de/cardomap3/.

Lee, K. E. (1985). Earthworm their ecology and relationship with soils and land use. Academic Press, Sydney.

Lehmann, A., Schade, A., Trenz, J., Ingwersen, J., Graeff-Hönninger, S. (2024): Einfluss von Höchstspannungs-Gleichstrom-Übertragungs(HGÜ)-Erdkabeln auf Böden und landwirtschaftliche Kulturpflanzen CHARGE, unveröffentlichte Präsentation anlässlich des 12. HLBS-Leitungsbausymposiums am 23.04.24 in Kassel.

Liu, F., Xu, C., Mao X., Li, Y., Zhang, J. (2023, preprint): Water Retention Behaviour of Unsaturated Soils Subjected to Various Temperatures in Northwest China. Preprint available at SSRN: https://ssrn.com/abstract=4655424 or https://doi.org/10.2139/ssrn.4655424.

Markert, A., Bohne, K., Facklam, M., Wessolek, G. (2017): Pedotransfer functions of soil thermal conductivity for the textural classes sand, silt, and loam. Soil Sci. Soc. Am. J. 81:1315-1327. https://doi.org/10.2136/sssaj2017.02.0062.

Marschner, B., König, C., Schröder, S. (2024): Bodenerwärmungen durch Erdkabel und deren Auswirkungen auf Bodeneigenschaften, Bodenprozesse und landwirtschaftliche Erträge. Gutachten für den Abschnitt KBl. 0658 UA Kriftel – IPH West. Unveröffentlichter Bericht.

Pereira, L. S. (2021): Updates and advances to the FAO56 crop water requirements method. Agric. Water Manag. 248, 106697. https://doi.org/10.1016/J.AGWAT.2020.106697.

Radujković, D., Verbruggen, E., Sigurdsson, B.D., Leblans, N.I.W., Janssens, I.A., Vicca, S.,Weedon, J.T. (2018): Prolonged exposure does not increase soil microbial community compositional response to warming along geothermal gradients. FEMS Microbiology Ecology, 94, *FEMS Microbiology Ecology* 94, fix174, https://doi.org/10.1093/femsec/fix174.

ReKIS (2016): Regionales Klimainformationssystem für Sachsen, Sachsen-Anhalt und Thüringen. Hinweise zum Daten-Download.

Richter, J. (1986): Der Boden als Reaktor. Modelle für Prozesse im Boden. Enke Verl., Stuttgart.

Rykbost, K. A., Boersma, L., Mack, H. J., Schmisseur, W. E. (1975): Yield response to soil warming: Vegetable crops. Agron. J. 67, 738-743.

SCS (1986): Urban Hydrology for Small Watersheds. United States Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service, Conservation Engineering Division, Technical Release 55, Juni 1986.

Stahr, K., Kandeler, E., Herrmann, L., Streck, T. (2008): Bodenkunde und Standortlehre, Ulmer Verl., Stuttgart.

Stammen, J., Dong, T. (2020): Erwärmung des Erdbodens im Bereich der 380-kV-Zwischenverkabelung „Henstedt-Ulzburg“ und „Kisdorferwohld“. Studie Teil I; Gutachten im Auftrag der TenneT, 73 S.

Todoruk, T.R., Langford, C.H., Kantzas, A. (2003): Pore-Scale Redistribution of Water during Wetting of Air-Dried Soils As Studied by Low-Field NMR Relaxometry. Environ. Sci. Technol. 2003, 37, 12, 2707–2713.

Trinks, S. (2010): Einfluss des Wasser- und Wärmehaushaltes von Böden auf den Betrieb erdverlegter Energiekabel. Dissertation TU Berlin, 130 S.

Trüby, P. (2014): Auswirkungen der Wärmeemission von Höchstspannungserdkabeln auf den Boden und auf landwirtschaftliche Kulturen. Gutachten zur 110-/380-KV Höchstspannungsleitungen Wesel – Pkt. Meppen, Abschnitt Pkt. Borken Süd – Pkt. Nordvelen; KÜS Marbeck – KÜS Lüningkamp, KBl. 4240; Hervest–Dorsten – Stadtlohn, Bl. 1520, Abschnitt Pkt. Borken – Übergabestation Lüningkamp; Pkt. Nordvelen – Pkt. Holthausen, Bl. 1386; im Auftrag der AMPRION GmbH, 116 S., unveröffentlicht.

Trüby, P. (2018): Auswirkungen der Wärmeemission von Höchstspannungserdkabeln auf den Boden und auf landwirtschaftliche Kulturen. Gutachten zur 380-KV Höchstspannungsleitung

Wesel – Pkt. Meppen, Bl. 4201. Neubau des Höchstspannungskabels Abschnitt: pkt. Legden Süd – Pkt. Asbeck, KBl. 4250 im Auftrag der AMPRION GmbH, 94 S., unveröffentlicht.

Trüby, P. (2020): Auswirkungen der Wärmeemission von Höchstspannungserdkabeln auf den Boden und auf landwirtschaftliche Kulturen. Gutachten zur 110-/380-KV Höchstspannungsleitung Wehrendorf – Gütersloh (EnLAG, Vorhaben 16), Abschnitt Pkt. Hesseln – Pkt. Königsholz (Landesgrenze NRW / NDS); im Auftrag der AMPRION GmbH, 116 S., unveröffentlicht.

Trüby, P. (2020): Erdverkabelung Raesfeld – Ökologisches Monitoring. Installation Sensorfeld, Wasser- und Wärmehaushalt des Bodens, Update Messjahr 2019; unveröffentlicht, 33 S.

Verschaffel-Drefke, C., Schedel, M., Balzer, C, Hinrichsen, V, Sass, I. (2021); Heat dissipation in variable underground power cable beddings: experiences from a real scale field experiment. Energies 14, 7189. https://doi.org/10.3390/en14217189.

von Hoyningne-Huene, J. (1983): Die Interzeption des Niederschlags in landwirtschaftlichen Pflanzenbeständen. DVWK Schriften 57, Einfluß der Landnutzung auf den Gebietswasserhaushalt, Bonn, Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau e.V. (DVWK), 1983: 1-54.

Wessolek, G., Kersebaum, C. (2020): Bodenkundliche Bewertung der Bodenerwärmung im Bereich der 380-kV-Zwischenverkabelung „Henstedt-Ulzburg“ und „Kisdorferwohld“. Studie Teil II; Gutachten im Auftrag der TenneT, 69 S.

Wessolek, G., Trinks, S., Kluge, B., Bohne, K., Markwardt, N. (2016): Bewertung der Bodenerwärmung durch Erdkabeltrassen. Bundesnetzagentur (Hrsg.): Tagungsband Wissenschaftsdialog 2016: Erdkabel und Boden, S. 62-81.

Zepp, H., König, C., Kranl, J., Becker, M., Werth, B., Rathje, M. (2017): Implizite Berechnung der Grundwasserneubildung (RUBINFLUX) im instationäeren Grundwasserströmungsmodell SPRING. Eine neue Methodik für regionale, räumlich hochauf-gelöste Anwendungen. In: Springer Nature (Hrsg.), Grundwasser – Zeitschrift der Fachsektion Hydrogeologie, Jg. 2017, Bd. 22, H. 2: 113-126.

Zimmermann, I. (2012), in: Amelung et al. (Hrsg.) (2018): Scheffer/Schachtschabel, Lehrbuch der Bodenkunde, 17. Aufl., S. 324.