

**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**

**angefertigt von
Prof. Dr. Peter Trüby**



Peter Trüby
Terra Planta
Wissenschaftlicher Dienst



Prof. Dr. Peter Trüby

Externer Mitarbeiter
Albert-Ludwigs-Universität Freiburg Br.
Professur für Bodenökologie

Bertoldstr. 17
79085 Freiburg Br.

Telefon: 07622/9203
Mobil: 0172 9870790
Fax: 07622/671529
Peter.Trueby@bodenkunde.uni-freiburg.de

Terra Planta
Wissenschaftlicher Dienst

Prof. Dr. Peter Trüby

Öffentlich bestellter und vereidigter
Sachverständiger für Land- und
Forstwirtschaftliche Bodenkunde

Alte Wehrerstr. 14
79650 Schopfheim

Telefon: 07622/9203
Mobil: 0172 9870790
Fax: 07622/671529
TerraPlanta@t-online.de

Inhalt

1	Ausgangssituation	5
2	Aufgabe	5
3	Aktueller Kenntnisstand und Grundlagen für das Gutachten	5
4	Definition der Lastfälle und zu erwartende Kabel- und Schutzrohrtemperaturen	6
5	Grundsätzliches zum Wärmehaushalt von Böden	8
6	Das “Freiburger Experiment“	9
6.1	Szenarien und Betriebstemperaturen im “Freiburger Experiment“	10
6.2	Methodischer Ansatz des “Freiburger Experiments“	10
6.3	Ergebnisse des “Freiburger Experiments“	11
6.3.1	Das Pulsexperiment	11
6.3.2	Langzeitversuche	12
6.3.3	Wärmeausbreitung im Boden	16
6.3.4	Das Grundwasserexperiment	17
6.3.5	Auswirkungen auf den Bodenwasserhaushalt	18
6.3.6	Wirkungen auf die Schneedecke und das Auftreten von Frost	19
6.3.7	Auswirkungen auf landwirtschaftliche Kulturen	22
7	“Kabeltest Osterath“	23
7.1	Methodischer Ansatz	24
7.2	Betriebsbedingungen	26
7.3	Bodentemperaturen	26
7.4	Interpretation und Bewertung	31
7.5	Auswirkungen auf die Bodenfeuchte	32
7.6	Landwirtschaftliche Kulturversuche	33
7.6.1	Kulturversuch mit Kartoffeln	33
7.6.2	Kulturversuch mit Körnermais	34
7.6.3	Kulturversuch mit Winterweizen	36
7.6.4	Kulturversuche mit Gerste, Raps und Kartoffeln	37
7.6.5	Erträge	38
7.6.6	Bewertung	38
8	Monitoring Raesfeld	39
8.1	Auswahl und Ausstattung des Meßfeldes	39
8.2	Temperaturen und Feuchte	41

8.2.1	Kabelauslastung	41
8.2.2	Bodentemperaturen	42
8.2.3	Interpretation und Bewertung	45
8.3	Bodenfeuchte	46
8.3.1	Oberboden	46
8.3.2	Bettung und Umgebung	46
8.3.3	Interpretation und Bewertung	49
9	Einfluß auf das Lösungs- und Sorptionsverhalten von Nährstoffen und die mikrobielle Aktivität	49
9.1	Auswirkungen auf das Lösungsverhalten und die Desorption von Nährstoffen	49
9.2	Methoden	50
9.3	Ergebnisse	50
9.4	Schlussfolgerungen und Bewertung	58
10	Auswirkungen auf die mikrobielle Aktivität	59
10.1	Arbeitshypothese und Ziel	59
10.2	Methoden	60
10.3	Ergebnisse	60
10.4	Schlussfolgerungen und Bewertung	65
11	Auswirkungen auf die Bodenfauna	66
11.1	Bedeutung der Regenwürmer	66
11.2	Arbeitshypothese und Ziele der Voruntersuchungen	67
11.3	Methoden	67
11.4	Erhebungen im ersten Jahr nach der Zwischenbewirtschaftung	69
11.5	Erhebung MSc. Stauber 2016	73
11.5.1	Zusammenhang Abundanz Trasse-Kontrolle	73
11.5.2	Zusammenhang Abundanz - Standort/Bewirtschaftungsform	73
11.5.3	Zusammenhang Abundanz - Bodentiefe	75
11.5.4	Artenverteilung	75
11.6	Routineerhebung 2017	77
11.7	Zusammenfassung, Schlußfolgerungen und Prognosen	78
12	Zusammenfassende Bewertung der bisherigen Erkenntnisse	81
12.1	Welche Auswirkungen ergeben sich auf den Boden?	81
12.2	Was bewirken temporäre Spitzenlasten?	82
12.3	Was bewirken Grund- oder Stauwasser?	82
12.4	Welche Auswirkungen ergeben sich auf den Wärmehaushalt des Bodens?	82

12.5	Wie weit reichen die lateralen Auswirkungen?	83
12.6	Welche Auswirkungen ergeben sich für den Bodenwasserhaushalt?	83
12.7	Welche Auswirkungen ergeben sich auf eine Schneedecke und das Frostgeschehen?	84
12.8	Welche Auswirkungen ergeben sich auf landwirtschaftliche Kulturen?	84
12.9	Welche Auswirkungen ergeben sich auf die Bodenfauna?	85
12.10	Welche Auswirkungen ergeben sich auf die Lösungs- und Sorptionsgleichgewichte im Boden?	86
12.11	Welche Auswirkungen ergeben sich auf die mikrobielle Aktivität?	86
12.12	Welche Veränderungen sind generell zu erwarten?	86
12.13	Gibt es längerfristige Auswirkungen auf die Vegetation?	87
13	Übertragung der Erkenntnisse auf den Streckenabschnitt 110-/380-kV Höchstspannungsleitung Gütersloh – Wehrendorf (EnLAG, Vorhaben 16) Abschnitt: Pkt. Hessel n - Pkt. Königsholz (Landesgrenze NRW/NDS)	87
13.1	Klimatische Situation	87
13.2	Hydrogeologische Situation	88
13.3	Boden- und Substrateigenschaften	90
13.4	Aufbau der Kabelanlage im Abschnitt Borgholzhausen	94
13.4.1	Verlegung in weitgehend ebenem Gelände mit und ohne mittige Baustraße	94
13.4.2	Verlegung in geneigtem Gelände mit und ohne mittige Baustraße	95
13.4.3	Grabenprofile im Trassenverlauf	95
13.5	Verlustleistung im Kontext mit dem “Freiburger Experiment“	102
13.6	Interpretation und Bewertung	103
13.6.1	Substrat	103
13.6.2	Bauartbedingte Auswirkungen 380 kV-Anlage	103
13.6.3	Bauartbedingte Auswirkungen der 110 kV-Anlage	105
13.6.4	Was ändert sich durch die Verlegung in geneigtem Gelände?	105
13.6.5	Wie ist die Verwendung des modifizierten Füllmaterials einzuschätzen?	106
13.7	Prognosen zu thermischen Effekten	107
13.7.1	Prognosen für die 380 kV-Anlage	107
13.7.2	Prognosen für die 110 kV-Anlage	109
13.8	Prognose zum Bodenwasserhaushalt	110
13.9	Bodenfauna	111
13.10	Lösungs- und Desorptionsreaktionen	111
13.11	Mikrobielle Aktivität	112
13.12	Abschließende Bewertung und Prognose	113

14	Sicherheit der Prognosen	114
15	Quellenverzeichnis	115

1 Ausgangssituation

Mit der Energiewende werden große Anforderungen an die Stromübertragung gestellt, die mit der derzeit vorhandenen Netzinfrastruktur nur teilweise erfüllt werden können. Der dazu erforderliche Netzausbau ist in vollem Gange. Die gesetzlichen Regelungen sind mit dem Energieleitungsausbaugesetz EnLAG getroffen worden (ANONYMUS, 2009) und wurden insbesondere mit dem Bundesbedarfsplangesetz (BBPlG) ergänzt. Neben der konventionellen Übertragungstechnik mittels Freileitung werden erdverlegte Höchstspannungskabel künftig eine wesentliche Rolle spielen. Die Erdverkabelung wird anstelle neuer Freileitungen seitens der Bevölkerung nachdrücklich gefordert.

Zur technischen Umsetzung der Erdverkabelung und zum Betrieb von Höchstspannungserdkabelanlagen liegen bisher nur wenige und keine langfristigen Erfahrungen vor. Der Gesetzgeber hat im ENLAG sechs Erdkabelpilotprojekte als Pilotprojekte ausgewiesen, innerhalb derer die Betreiber neue Erkenntnisse und Erfahrungen zum Bau und Betrieb von Höchstspannungsanlagen erlangen können. Dazu gehört auch der Teilverkabelungsabschnitt „110-/380-kV Höchstspannungsleitung Gütersloh – Wehrendorf (EnLAG, Vorhaben 16) Abschnitt: Pkt. Hesseln - Pkt. Königsholz (Landesgrenze NRW/NDS)“ der Gegenstand dieses Gutachtens ist.

2 Aufgabe

Ziel des Gutachtens ist, mögliche ökologische Auswirkungen des Kabelbetriebs einzuschätzen und zu bewerten. Dabei ist der Fokus auf den Bodenwärmehaushalt, den Bodenwasserhaushalt und landwirtschaftliche Kulturen gerichtet. Mögliche Auswirkungen des baulichen Eingriffs sind nicht Gegenstand des Gutachtens. Dazu liegen aus dem Bau von Erdgasleitungen, der Rekultivierung von Bergbauflächen oder Großbaustellen z.B. Bundesbahntrassen fundierte Erfahrungen vor. Sofern die Vorgaben der BBodSchV (ANONYMUS, 1999) und der einschlägigen „Vollzugshilfe für das Auf- und Einbringen von Materialien in Böden“ (ANONYMUS, 2002) sowie die im September 2019 erschienene DIN 19639 eingehalten werden, sind diese baulichen Auswirkungen zuverlässig einschätzbar und mit anderen baulichen Eingriffen vergleichbar.

Die wissenschaftliche Grundlage für dieses Gutachten sind die Erkenntnisse aus dem „Freiburger Experiment“ (Kap. 6), dem „Kabeltest Osterath“ (Kap. 7) und ersten Erfahrungen mit der 380 kV-Pilotanlage Raesfeld (Kap. 8). Die Ergebnisse sind in den Kapiteln zusammengefasst und prüfbar dargestellt.

3 Aktueller Kenntnisstand und Grundlagen für das Gutachten

Der Betrieb von Erdkabelanlagen ist stets mit einem Wärmefluss in den Boden verbunden, der vom Übertragungsverlust der Anlage abhängt. Die von der Auslastung abhängige, aktuelle Verlustleistung einer Anlage bestimmt die Wärmemenge und damit auch die thermischen Effekte auf den Boden und die Vegetation. Zur tatsächlichen Verlustleistung einer Leitung liegen bisher allerdings nur Berechnungen vor. Diese ermöglichen es jedoch einen Rahmen abzustecken innerhalb dessen sich die Verlustleistungen künftig bewegen werden.

In der BRD existierten bisher keine im Freiland verlegten 380 kV-Kabel, an denen die ökologischen Auswirkungen am realen Objekt hätten gemessen werden können. Mit der Fertigstellung der Pilotstrecke in Raesfeld steht seit 2016 erstmals eine 380 kV-Erdkabelanlage für ein ökologisches Monitoring zur Verfügung. Die Anlage ist derzeit jedoch nur im Probetrieb und nur teilweise ausgelastet. Die

thermischen Auswirkungen auf den Wärme- und Wasserhaushalt des Bodens sind deshalb für 380 kV-Leitungen am realen Objekt erst ansatzweise untersucht.

Die derzeit verwertbaren Kenntnisse stützen sich auf:

- Modellrechnungen für Höchstspannungserdkabel (BRAKELMANN et al., unveröffentlicht)
- Untersuchungen an einer 110 kV-Anlage (TRINKS, 2011)
- ein Freilandexperiment ("Freiburger Experiment", UTHER et al., 2009; TRÜBY und ALDINGER, 2013)
- einen Kabeltest, der in Meerbusch-Osterath ("Kabeltest Osterath") durchgeführt wurde
- laufende Messungen an der Pilotstrecke Raesfeld.

Weitere, ältere Arbeiten stammen von ARMAN et al. (1964) und von MOCHLINSKI and ENG (1976). Diese befassen sich allerdings mehr mit den thermischen Einflüssen auf die Bodenfeuchte und ihren Auswirkungen auf die Wärmeleitfähigkeit des Bodens.

4 Definition der Lastfälle und zu erwartende Kabel- und Schutzrohrtemperaturen

Die für die Begutachtung mitverwendeten Kabeltemperaturen basieren auf Berechnungen von BRAKELMANN et al. (unveröffentlicht) und ergänzenden Angaben der AMPRION GmbH. Die Ermittlung zu erwartender Kabeltemperaturen liegt außerhalb des Kompetenzbereiches des Gutachters. Eine Verantwortung für die Richtigkeit der verwendeten Kabeltemperaturen kann deshalb nicht übernommen werden. Basierend auf den Erfahrungen aus dem an einer 110 kV-Leitung in Osterath durchgeführten Kabeltest bestehen seitens des Gutachters jedoch auch keine Bedenken hinsichtlich der Richtigkeit der prognostizierten Temperaturen.

In der Vergangenheit sind zahlreiche Pressemitteilungen erschienen, die in der Bevölkerung zu Verunsicherung geführt und eine sehr lebhaft Diskussion ausgelöst haben. Dazu beigetragen hat vor allem die Veröffentlichung von missverständlichen Boden- und Kabeltemperaturen. Es ist deshalb notwendig, zunächst diesen Sachverhalt klarzustellen. Eine besondere Rolle spielen dabei die in der Diskussion wiederholt zitierten "**Kabeltemperaturen von 90 °C**". Faktisch handelt es sich dabei um die **Maximaltemperatur des Kupferleiters** im inneren Teil des Kabels. Dies ist die **technische Grenztemperatur des Kupferkerns**, die im Netzbetrieb nicht überschritten werden darf, da sonst eine Schädigung des Kabels eintritt. Diese in der Presse häufig zitierte **Grenztemperatur von 90 °C** ist für die Begutachtung **irrelevant**, da der Boden damit nicht in Kontakt steht und innerhalb des Kabels starke Temperaturgradienten auftreten. Im äußeren, den Kupferkern umgebenden Kabelmantel sind die Temperaturen erheblich niedriger. Bei Erreichen der technischen Grenztemperatur des Kupferleiters lägen die **Temperaturen an der Oberfläche des Kabelmantels** um ca. **15-20 K niedriger**, also bei maximal **70-75 °C**. Bei der geplanten Kabelanlage kommt jedoch auch der Kabelmantel nicht direkt in Kontakt mit dem Boden, da die **Kabel in Schutzrohren** verlegt werden. Durch das dabei vorhandene Luftpolster bestehen weitere Temperaturgradienten zwischen Kabelmantel und Schutzrohr, so dass die an der **Schutzrohroberfläche** auftretenden Temperaturen nochmals um **bis zu 20 K niedriger** liegen würden. **Für die Begutachtung relevant sind ausschließlich die Temperaturen an der Schutzrohroberfläche, an der der Wärmeübergang in den Boden erfolgt.**

Die in der unmittelbaren Kontaktzone zum Boden zu erwartenden Temperaturen können nur anhand von bisherigen Erfahrungen mit 110 kV-Leitungen und Modellrechnungen für 380 kV-Leitungen ermittelt werden. Entsprechende Modellrechnungen wurden an der Universität Duisburg im Fachbereich Energietransport und -speicherung durchgeführt (Brakelmann, H., J. Brüggmann und T. Dong; unveröffentlicht). Darin wurden Leitertemperaturen und die Bodentemperaturen in der Kabelbettung, also im unmittelbaren Bereich der Schutzrohroberfläche, für verschiedene Betriebs- und Lastfälle berechnet.

- **Normallast (4 x 540 MVA; dauerhaft Lastfaktor $m=1,0$)**

Unter diesen *normalen Betriebsbedingungen* liegen die berechneten *Kupferleitertemperaturen* bei ca. **36°C**, die am Kabelschutzrohr auftretenden Temperaturen sind **< 33 °C**.

- **Auslegungslast (4 x 900 MVA; dauerhaft Lastfaktor $m = 1,0$)**

Die Kabelanlage ist technisch für diese Stromleistung ausgelegt. Bei dauerhaftem Betrieb mit Auslegungslast könnten den Berechnungen zufolge *Kupferleitertemperaturen* von ca. **61°C** erreicht werden. Die im unmittelbaren Kabelbereich auftretenden *Temperaturen am Kabelschutzrohr* wären **< 50° C**. Diese vergleichsweise hohen Temperaturen sind jedoch im *“Kabeltest Osterath“* nie, auch nicht annähernd erreicht worden.

Bei der folgenden Begutachtung der Auswirkungen im Netzbetrieb wird von diesen beiden Lastfällen und den damit korrespondierenden Temperaturen ausgegangen. Abweichend davon liegt den in Kap. 7 beschriebenen Ergebnissen des *“Kabeltests Osterath“* über einen Zeitraum von 2 Jahren ein *Betrieb weit oberhalb der Auslegungslast* und der *Normallast* zugrunde, der die realen Betriebsbedingungen des hier zu begutachtenden Vorhabens nicht abbildet.

Ziel dieses Versuchs war, verschiedene Bettungsmaterialien auf ihre thermischen Eigenschaften zu testen und Temperaturkonstanz, d.h. einen Gleichgewichtszustand zwischen Wärmeemission und Wärmeableitung zu erzeugen. Dabei sollten die für den Fall des Dauerbetriebs mit Auslegungslast berechneten Maximaltemperaturen an der Schutzrohroberfläche von ca. 50 °C eingestellt werden. Aufgrund der Trägheit des Systems ist die Einstellung eines annähernd stationären Zustandes erst nach mehreren Wochen eventuell sogar erst nach einigen Monaten zu erwarten. Um diesen Vorgang zu beschleunigen wurde die Anlage kurzzeitig mit einem höheren Strom belastet als für den Dauerbetrieb vorgesehen. Um anschließend die Leiter-Grenztemperatur von 90°C beizubehalten wurde die Anlage mit der technischen Maximallast belastet. Als *technische Maximallast* wird die Last definiert, die eine *Betriebstemperatur des Kupferleiters von 90 °C* bewirkt. Der Betrieb bei technischer Maximallast diente ausschließlich zu Versuchszwecken. Diese Grenztemperatur von 90 °C ist für den Netzbetrieb nicht relevant.

Im realen Netzbetrieb wäre ein dauerhafter Betrieb mit der sehr viel geringeren *Auslegungslast grundsätzlich* möglich. Wahrscheinlich ist jedoch ein Betrieb bei *Normallast* oder *stark variierender Normallast*. Unter realen Betriebsbedingungen resultiert die Übertragungsleistung aus dem jeweiligen Transportbedarf und der Verschaltung des umgebenden Verbundnetzes. Sie unterliegt dem sog. Tageslastgang. Dies wird zu einer deutlich geringeren Erwärmung führen. Die Bewertung auf der Grundlage der *Auslegungslast* ist daher eine äußerst konservative Vorgehensweise.

5 Grundsätzliches zum Wärmehaushalt von Böden

Die folgenden Ausführungen basieren auf den Feldmessungen, die während des “Kabeltests Osterath” im ungestörten Boden durchgeführt wurden. Sie stehen im Einklang mit den Ausführungen in der bodenkundlichen Fachliteratur (BLUME et al., 2010).

Während des inzwischen 8-jährigen Meßzeitraums war die interannuelle Variation der Bodentemperaturen relativ gering (Abb. 1). Dies gilt sowohl für die absoluten Temperaturen als auch für die Jahresgänge. Innerhalb eines Jahres ergab sich stets eine ausgeprägte jahreszeitliche Differenzierung, die sich über die gesamte hier betrachtete Bodentiefe bemerkbar machte. Entsprechend der Witterungsentwicklung ergaben sich sommerliche Temperaturmaxima in den Monaten Juli bis September. Während dieser Zeit kam es im Oberboden zu stark ausgeprägten Tagesgängen, wobei Temperaturänderungen von mehr als 15 K auftraten. In größerer Bodentiefe war die saisonale und tägliche Varianz deutlich geringer. Die maximale annuelle Temperaturdifferenz erreichte im Oberboden in Einzelfällen mehr als 30 K, im Unterboden immer noch bis zu 10 K.

Die vertikalen Temperaturprofile unterlagen einer regelmäßigen Inversion der Temperaturgradienten (Abb. 2), wobei die Temperaturen im Sommer nach oben hin anstiegen, im Winter zur Bodenoberfläche hin abnahmen. Die Inversion der Gradienten erfolgte regelmäßig im April und im September (Abb.1). In der Übergangsphase lagen die Ganglinien unmittelbar nebeneinander. Es bestanden während dieser Zeit kaum noch vertikale Temperaturgradienten. Die vertikalen Wärmeflüsse kamen deshalb weitgehend zum Stillstand. Bemerkenswert ist, daß in den Sommermonaten auch in 160 cm Bodentiefe noch deutliche Temperaturgradienten ausgeprägt waren, die einen Wärmefluß auch in größere Bodentiefen anzeigen. Der Wärmehaushalt des Bodens wird somit maßgeblich vom Wärmeaustausch mit der Atmosphäre und der saisonalen Temperaturänderung geprägt.

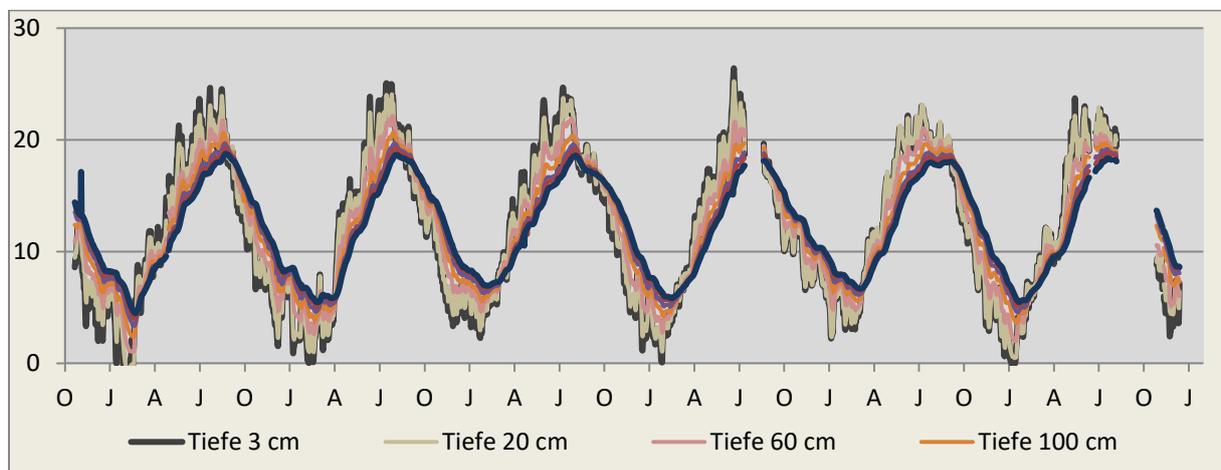


Abb. 1: Interannuelle Variation der Bodentemperaturen (Vertikalprofil)

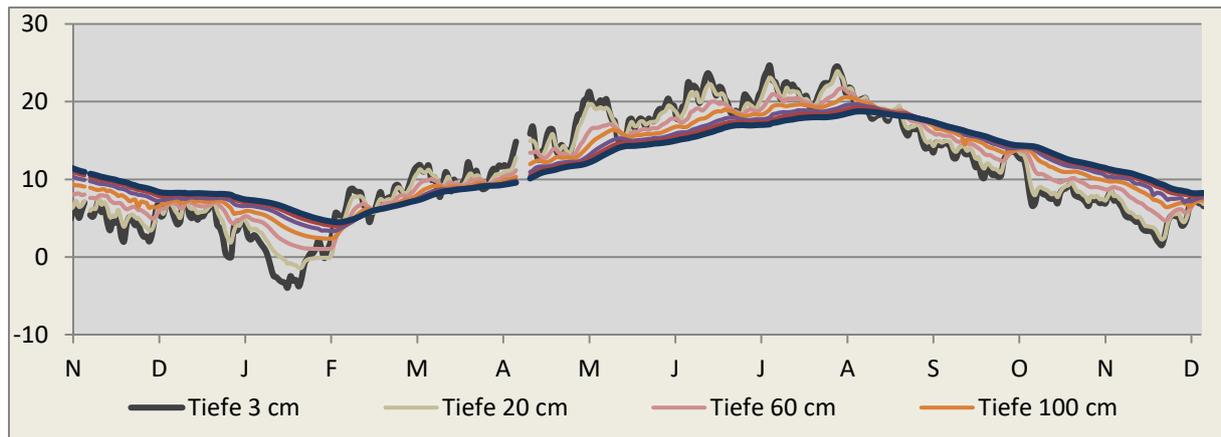


Abb. 2: Typischer Jahresgang der Bodentemperaturen (Vertikalprofil)

6 Das “Freiburger Experiment“

Bei der als “Freiburger Experiment“ bezeichneten Studie handelt es sich um ein Feldexperiment, das am Institut für Bodenkunde und Waldernährungslehre der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg über einen Zeitraum von 5 Jahren durchgeführt wurde. Die Studie lieferte eine solide Basis an *gemessenen Daten zum Wärme- und Wasserhaushalt* des Bodens und zu möglichen Auswirkungen auf landwirtschaftliche Kulturen. Es ist damit möglich, eine erste, wissenschaftlich begründete verlässliche Einschätzung der ökologischen Auswirkungen zu geben.

Ziel des Experiments war zu klären, wie sich die Wärmeemission von Höchstspannungserdkabeln auf den Wasser- und Wärmehaushalt des Bodens sowie auf landwirtschaftliche Kulturen auswirken wird.

Der Fokus richtete sich dabei auf folgende Fragen:

- **Wie verändert die Wärmezufuhr das Temperaturprofil des Bodens?**
Welche Auswirkungen ergeben sich im Bereich des Oberbodens?
Wie weit reicht die seitliche Beeinflussung?
- **Welche Auswirkungen ergeben sich für den Bodenwasserhaushalt?**
Bewirkt die Wärmezufuhr eine ökologisch relevante Austrocknung des Bodens?
Kommt es zu Umverteilungen des Bodenwassers im Unterboden bzw. in der Kabelbettung?
- **Welchen Einfluss haben Grund- oder Stauwasser auf die Wärmeableitung?**
- **Welche ökologischen Auswirkungen hat die Wärmeemission?**
Welche Auswirkungen ergeben sich auf landwirtschaftliche Kulturen?
Wird ein Auftreten von Bodenfrost verhindert?
Welche Einflüsse ergeben sich auf eine Schneedecke?

Die im zentralen Teil des Gutachtens (Abschn. 6.3 ff.) dargestellten Ergebnisse resultieren aus einem breiten Spektrum an Betriebsszenarien und Betriebstemperaturen. Es ist deshalb möglich, Temperaturprofile, Wärmeflüsse und eventuelle Wassergehaltsänderungen für Kabelmanteltemperaturen von bis zu 75 °C verlässlich zu prognostizieren. Derart hohe Temperaturen werden beim Betrieb der vorliegenden Leitung nach den Berechnungen von BRAKELMANN et al. jedoch nicht auftreten.

6.1 Szenarien und Betriebstemperaturen im “Freiburger Experiment“

Zu Beginn des Experiments lagen keine verlässlichen Daten zu den zu erwartenden Kabeltemperaturen vor. Das Experiment wurde deshalb im Ansatz bewusst konservativ angelegt und es wurde ein breites Temperaturspektrum verwendet. Die unterstellten *Kabelmantel- bzw. Schutzrohrtemperaturen* von bis zu 75 °C waren angesichts der jetzt für den Betrieb unter *Normal- und Auslegungslast* prognostizierten Temperaturen *unrealistisch hoch*.

Das Experiment wurde im April 2006 mit einer Test- und Vorlaufphase begonnen. Im Anschluß daran folgte ein *Pulsexperiment*, mit dem die Erwärmung von Erdkabeln durch kurzfristige Laständerungen z.B. infolge von temporär auftretenden Spitzeneinspeisungen aus Windkraft- oder Solaranlagen simuliert werden sollten. Dazu wurden zweiwöchige Zyklen gewählt, beginnend mit einer ca. 7 Tage langen Heizphase und einer daran anschließenden, ebenso langen Abkühlungsphase. Die anfängliche Betriebstemperatur von 35 °C wurde sukzessive um jeweils 5 K auf eine Maximaltemperatur von 75 °C erhöht.

Mit *Langzeitexperimenten* sollte ein Dauerbetrieb bei konstanter Last simuliert werden. Ziel war, für verschiedene Kabeltemperaturen den Zeitpunkt der Gleichgewichtseinstellung zwischen Wärmeemission und Wärmeableitung zu ermitteln und die entsprechenden Temperaturprofile im Boden aufzunehmen.

Danach wurden 3 mehrwöchige Versuche bei 40 °C, 60 °C und 70 °C durchgeführt. Mit Temperaturen von 60 °C und 70 °C sollte der “worst-case“ simuliert werden. Zum Schluss folgte schließlich ein Versuch mit Winterweizen bei 50 °C und einer Dauer von ca. 11 Monaten.

Mit einem weiteren Experiment sollte der Einfluss von *Grund- und Stauwasser* untersucht werden. Dazu wurde unmittelbar aus der Umgebung stammendes Grundwasser in den Bereich der Bettung eingepresst bis eine vollständige Sättigung erreicht war.

6.2 Methodischer Ansatz des “Freiburger Experiments“



Der Aufbau der Versuchsanlage erfolgte analog zum Aufbau einer realen 3-adrigen Kabeltrasse. Anstelle von Erdkabeln wurden Stahlrohre (Abb. 3) in gleicher Dimensionierung verwendet. Diese waren an eine Warmwasser-Heizanlage angeschlossen. Diese war so konzipiert, daß eine realitätsnahe Simulation der Wärmeemission von Erdkabeln für vorgegebene Betriebsszenarien möglich war. Die Einbettung der Heizrohre erfolgte in lagig eingebrachtem, leicht verdichtetem feinen Sand mit einer Körnung < 2 mm. Der Bereich darüber wurde mit Aushub verfüllt. Die Mächtigkeit der Überdeckung betrug 1,4 m. Als Referenz wurde im Abstand von 5 Metern außerhalb der Anlage eine entsprechende Kontrolle eingerichtet.

Abb. 3: Warmwasserheizanlage

Ein Überblick über den Aufbau der Anlage und die Instrumentierung findet sich in Abb. 4. Zum Temperatur- und Feuchtemonitoring wurden insgesamt 80 Thermofühler und 20 Feuchtesonden in den Boden eingebaut.

Position der Messsonden

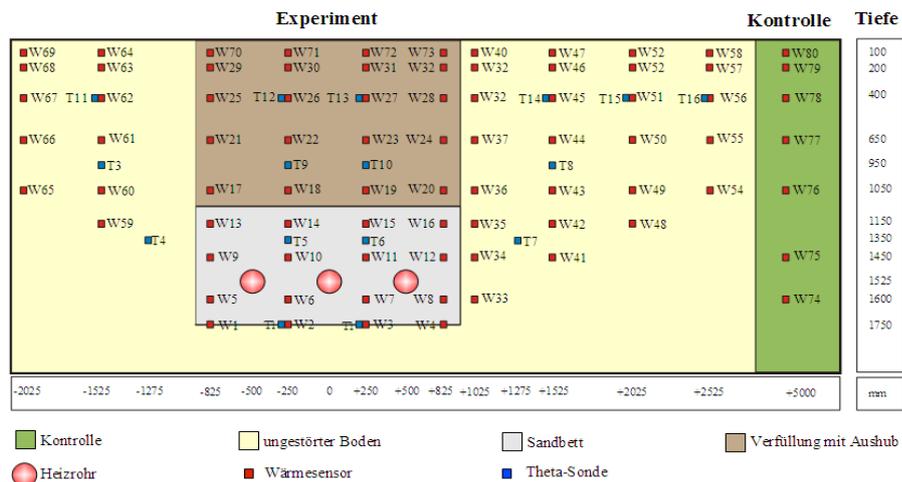


Abb. 4: Übersicht über die Instrumentierung und den Aufbau des “Kabelgrabens”

6.3 Ergebnisse des “Freiburger Experiments”

6.3.1 Das Pulsexperiment

In Abbildung 5 ist das *vertikale Temperaturprofil* für die Zone unmittelbar oberhalb der zentralen Wärmequelle dargestellt. Erwartungsgemäß treten hier sehr deutliche Effekte auf. Im Unterboden und der Bettung sind die Temperaturen dominant geprägt von der Wärmezufuhr. Die einzelnen Wärmepulse wurden bis in eine Tiefe von 65 cm exakt nachgezeichnet. Im Oberboden (20 cm Tiefe) waren die einzelnen Wärmepulse hingegen selbst bei stärkerer Erwärmung auf bis zu 75°C kaum noch identifizierbar.

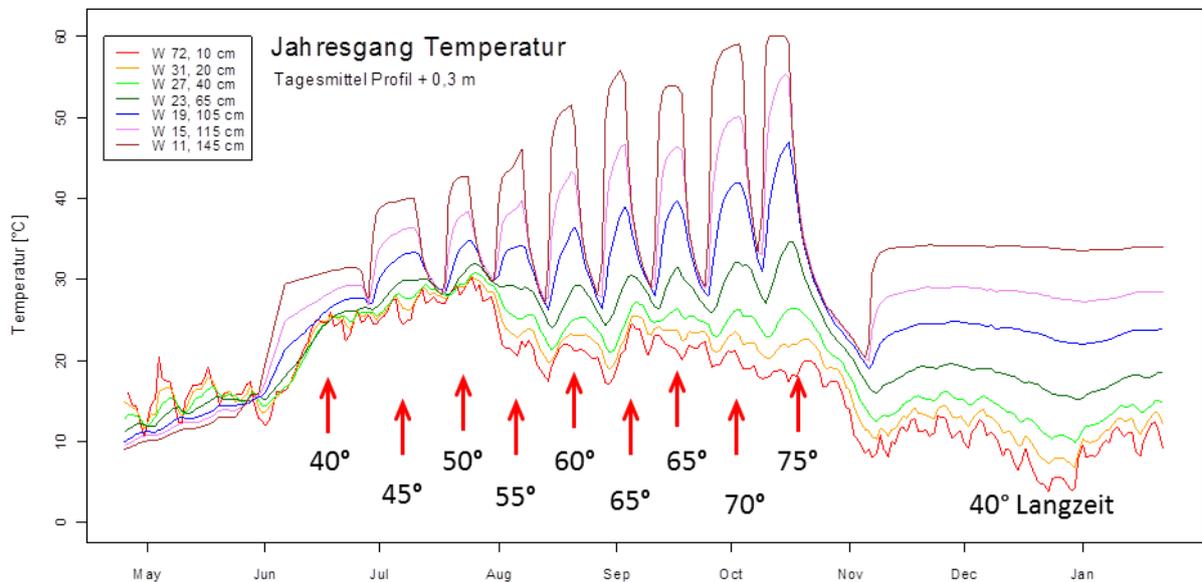


Abb. 5: Vertikales Temperaturprofil oberhalb des zentralen Heizrohres während der Pulsexperimente und des Langzeitexperiments bei 40 °C

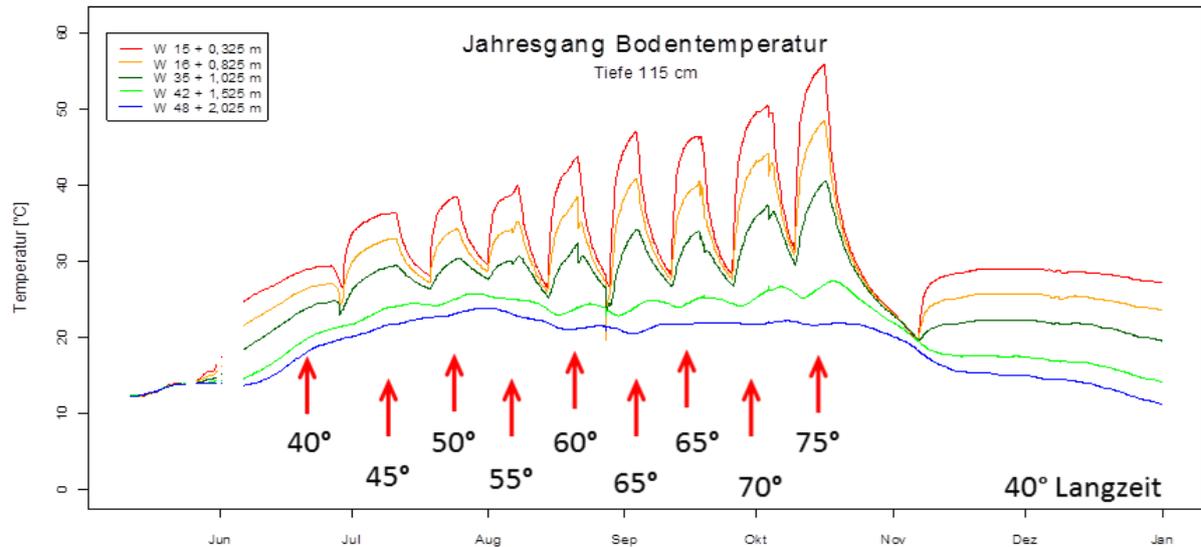


Abb. 6: Horizontale Temperaturprofile während der Pulsexperimente und des Langzeitexperiments bei 40 °C. (Längenangaben in der Legende entsprechen dem Abstand der Meßstellen vom Zentrum der Meßeinrichtung)

Die durch die Wärmepulse verursachten Temperaturspitzen waren dem saisonal bedingten Temperaturgang aufgesetzt (HARTGE & HORN, 1991). Die Temperaturen stiegen nach dem Einschalten der Anlage kontinuierlich an. Nach einigen Tagen begann sich ein stationärer Zustand einzustellen. Unmittelbar nach dem Ausschalten kam es innerhalb kurzer Zeit zu einer sehr schnellen Abnahme der Temperaturen. Die **Abkühlung** erfolgt demnach **sehr viel schneller als die Erwärmung**. In der Bettung wurden stets die höchsten Temperaturen erreicht. Die Temperaturen nahmen mit zunehmender Entfernung von der Wärmequelle kontinuierlich ab. Bemerkenswert dazu ist, daß sich die zwischen Sandbett und Verfüllung bestehende Lagerungs- und Körnungsdiskontinuität nicht erkennbar auswirkt.

Die **horizontalen** und **vertikalen Temperaturprofile** sind annähernd gleich (Abb. 5 und 6). Auch in **horizontaler Richtung** nahmen die Temperaturen auf kurzer Strecke ab. Saisonabhängig erfolgte der Wärmeabfluß nicht nur zur Atmosphäre hin sondern in Abhängigkeit von den Umgebungsbedingungen auch seitlich in einen räumlich nicht begrenzten Bodenkörper mit einer sehr homogenen Wärmeverteilung. In einer Tiefe von 145 cm waren Effekte bis in eine Entfernung von 1 m von der äußeren Wärmequelle erkennbar. Die Effekte waren jedoch bereits in dieser Entfernung nur noch gering.

Die in 5 Metern Entfernung eingerichtete Kontrolle blieb unbeeinflusst. Die seitlichen Effekte werden sich auch im quellennahen Bereich auf eine Zone von ca. 2,0 bis 2,5 m Breite beschränken.

6.3.2 Langzeitversuche

Der an die Pulsversuche anschließende, im November begonnene Langzeitversuch bei 40 °C war anfänglich noch durch die Restwärme aus den vorangegangenen Versuchen beeinflusst. Im Zentrum der Anlage waren die Temperaturen gegenüber den äußeren Bereichen immer noch leicht erhöht. Mit dem Einschalten der Anlage setzte die vertikale Temperaturdifferenzierung ein. Ein winterlicher Kälteeinbruch überformte dann jedoch das Vertikalprofil bis in eine Tiefe von 115 cm (Abb. 5). Im Winter bewirkte die Aufheizung keine grundsätzliche Änderung des natürlichen Temperaturprofils. Anders war dies jedoch bei den Wärmepulsen im Zeitraum von August bis Oktober (Abb. 5). Bei Temperaturen > 40 °C bewirkte die Wärmezufuhr erneute eine Inversion der Temperaturgradienten und vor allem im Unterboden eine grundsätzlich veränderte Wärmeverteilung. Die bei ungestörten Bedingungen im Sommer stets vorhandene Wärmescheide (Abb. 1, 2) war nicht ausgebildet. An der Bodenoberfläche

blieben jedoch die saisonalen Änderungen die prägenden Prozesse im Wärmehaushalt des Bodens. Dasselbe Bild ergab sich für den über fast ein Jahr durchgeführten Vegetationsversuch im Zeitraum von September 2008 bis August 2009 (Abb. 7). Hier waren die Temperaturprofile ganzjährig von der Wärmeemission dominiert.

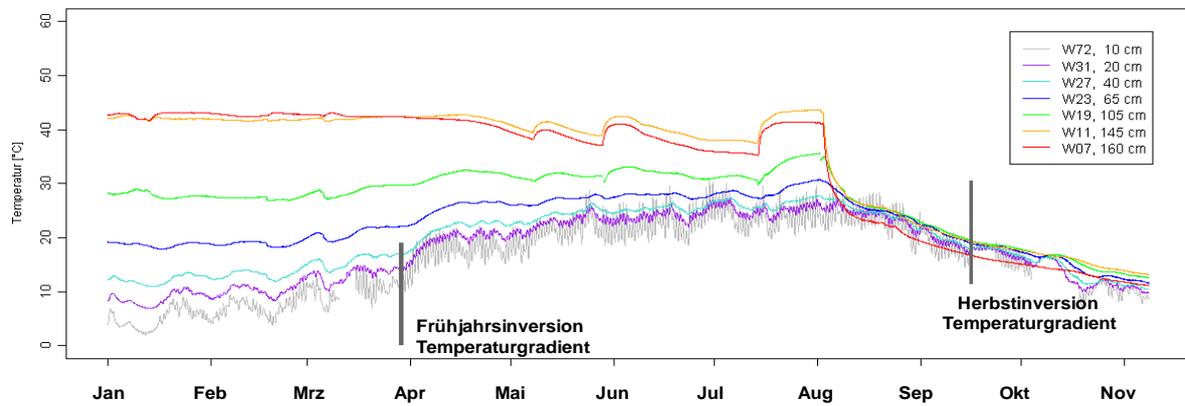


Abb. 7: Jahresgang der Bodentemperaturen während des Vegetationsexperiments bei 50°C (Vertikalprofil)

Die unter natürlichen Bedingungen im Frühjahr auftretende Inversion der Temperaturgradienten blieb hier aus. Bemerkenswert ist weiterhin, daß sich im Unterboden (Tiefe > 105 cm) dauerhaft weitgehend konstante vom Witterungsgeschehen unabhängige Temperaturen einstellten. In der Zone darüber waren die Temperaturen hingegen maßgeblich geprägt vom Wärmeaustausch mit der Atmosphäre. Die Temperaturen folgten hier dem typischen Jahresgang (Abb. 2).

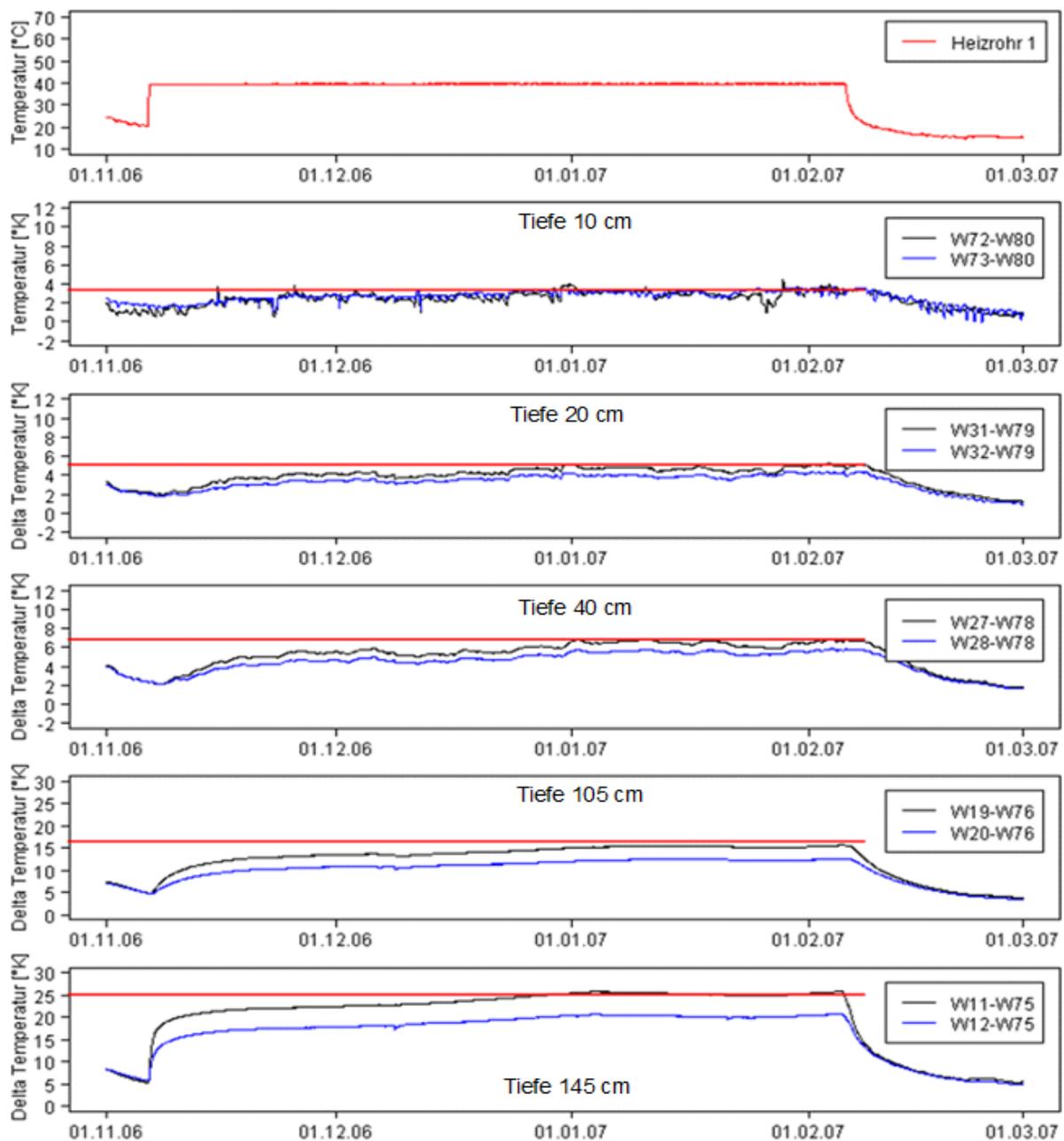


Abb. 8: Temperaturdifferenzen zwischen dem unbeeinflussten Boden und der Versuchspartelle bei dauerhaft 40°C Rohrtemperatur

schwarze Linien: Zone oberhalb des zentralen Heizrohres,

blaue Linien: Zone oberhalb des äußeren Heizrohres

rote Linien: oben Rohrtemperatur, sonst: maximale Temperaturdifferenzen

Als weiterer Maßstab zur Beurteilung von thermischen Effekten können die Temperaturdifferenzen zwischen der Versuchspartelle und dem ungestörten Boden (Kontrolle) herangezogen werden. Diese wurden für die wärmste Zone im Bereich oberhalb der zentralen Wärmequelle nach Tiefenstufen getrennt berechnet. Dargestellt ist zunächst ein Langzeitversuch bei 40 °C, der in den Wintermonaten durchgeführt wurde, in denen die thermischen Effekte grundsätzlich ausgeprägter sind (Abb. 8).

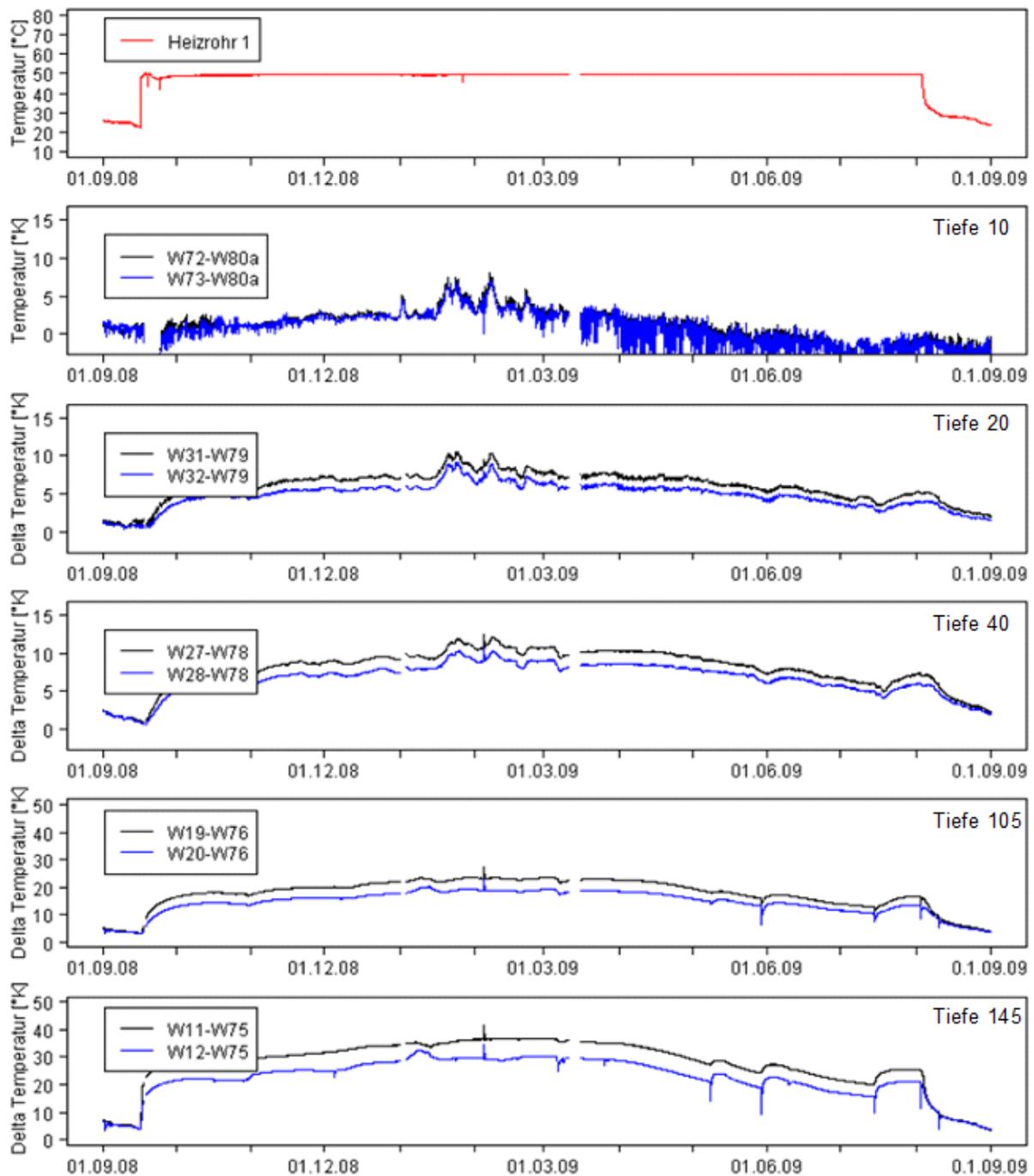


Abb. 9: Temperaturdifferenzen zwischen dem unbeeinflussten Boden und der Versuchsparzelle bei dauerhaft 50 °C Rohrtemperatur (Vegetationsversuch und Langzeitexperiment)

Das Diagramm (Abb. 8: oben) zeigt die Temperatur des zentralen Heizrohres (rote Linie), die nach einem anfänglich steilen Anstieg konstant 40°C beträgt. Darunter folgen die Differenzen für verschiedene Bodentiefen. Im Oberboden betrug die maximale Temperaturerhöhung 4 K. Grundsätzlich stiegen die Differenzen mit zunehmender Annäherung an die Wärmequelle an. In einer Tiefe von 40 cm betrug die Differenzen bis zu 6 K, in der Bettung um die Wärmequelle um bis zu 25 K.

Abb. 9 zeigt die Ergebnisse des Langzeit-Vegetationsexperiments, das über einen Zeitraum von mehr als 11 Monaten bei konstant 50°C durchgeführt wurde. Temperaturen in dieser Höhe werden bei Erdkabeln jedoch selbst bei dauerhaft anliegender Auslegungslast nicht erreicht werden.

Die Ergebnisse zeigen sehr eindrucksvoll, daß die Differenzen im Jahresverlauf erheblich variierten. Die stärksten Effekte traten gegen Ende des Winters auf, wenn die Temperaturen an der Bodenoberfläche stets niedrig sind. Während dieser Zeit wurde die Wärme bevorzugt oberhalb der Trasse an die Atmosphäre abgegeben. Bei einer Rohrtemperatur von 50 °C kam es an der Bodenoberfläche zu einer Temperaturerhöhung von bis zu 5,5 K. In den Sommermonaten waren die Unterschiede deutlich geringer. Zu diesem Zeitpunkt floss die Wärme verstärkt in den Unterboden oder zu Seite hin ab. Die zuvor dargestellten Ergebnisse gelten deshalb für die innerhalb des Jahres ungünstigste Situation.

6.3.3 Wärmeausbreitung im Boden

Die Wärmeausbreitung und deren zeitliche Entwicklung sind am Beispiel des Langzeitexperiments mit 60°C dargestellt (Abb. 10). Vor Beginn der Aufwärmung war die Wärmeverteilung im Boden sehr homogen. Lediglich im Bereich der Heizanlage ergaben sich etwas höhere Temperaturen. Dies war durch die noch enthaltene Restwärme aus dem vorangegangenen Experiment bedingt (Abb. 10 a). Vierzehn Tage nach Beginn der Aufheizung ergab sich schließlich ein wesentlich differenzierteres Bild (Abb. 10 b). Im Bereich der Wärmequellen hatten sich die Temperaturen jetzt der Zieltemperatur von 60 °C angenähert. Es stellten sich nun deutliche vertikale Temperaturgradienten im Bereich der Trasse ein, die den Wärmestrom zur Oberfläche hin anzeigten. Zu diesem Zeitpunkt hatte die Wärmefront die Bodenoberfläche jedoch noch nicht erreicht. Erst weitere zwei Wochen später war die Wärmefront bis an die Bodenoberfläche vorangeschritten (Abb. 10 c). Sie hatte sich jetzt auch zur Seite hin ausgedehnt. Dies macht sich vor allem in der Ebene auf der Höhe der Wärmequellen bemerkbar. Von diesem Zeitpunkt an begann sich ein thermisches Gleichgewicht einzustellen, bei dem die zugeführte Wärme vollständig an die Atmosphäre oder seitlich in den Boden abgeleitet wurde und die Temperaturprofile weitgehend konstant waren. Bedingt durch die Witterung werden sie sich im Jahresgang jedoch immer wieder leicht verändern. Zu einer absoluten Temperaturkonstanz wird es auch bei konstanten Lastverhältnissen nicht kommen. Je größer die Wärmezufuhr aus der Atmosphäre ist, umso stärker wird die Wärmeabgabe in die Atmosphäre behindert. Dies führt zu einer verstärkten seitlichen Wärmeausbreitung und einem Wärmefluß in größere Bodentiefen.

Die Ergebnisse des Experiments zeigen, daß die Wärmeflüsse im Winter bevorzugt nach oben zur Atmosphäre hin erfolgen. Im Sommer trifft dies nicht, bzw. nur mit Einschränkung zu. Hier erfolgt ein verstärkter, seitlicher Wärmeabfluß im Unterboden.

Weiterhin prognostiziert werden kann, daß die lateralen Auswirkungen an der Bodenoberfläche einen Bereich von 1,5 m seitlich des äußeren Leiters nicht überschreiten werden.

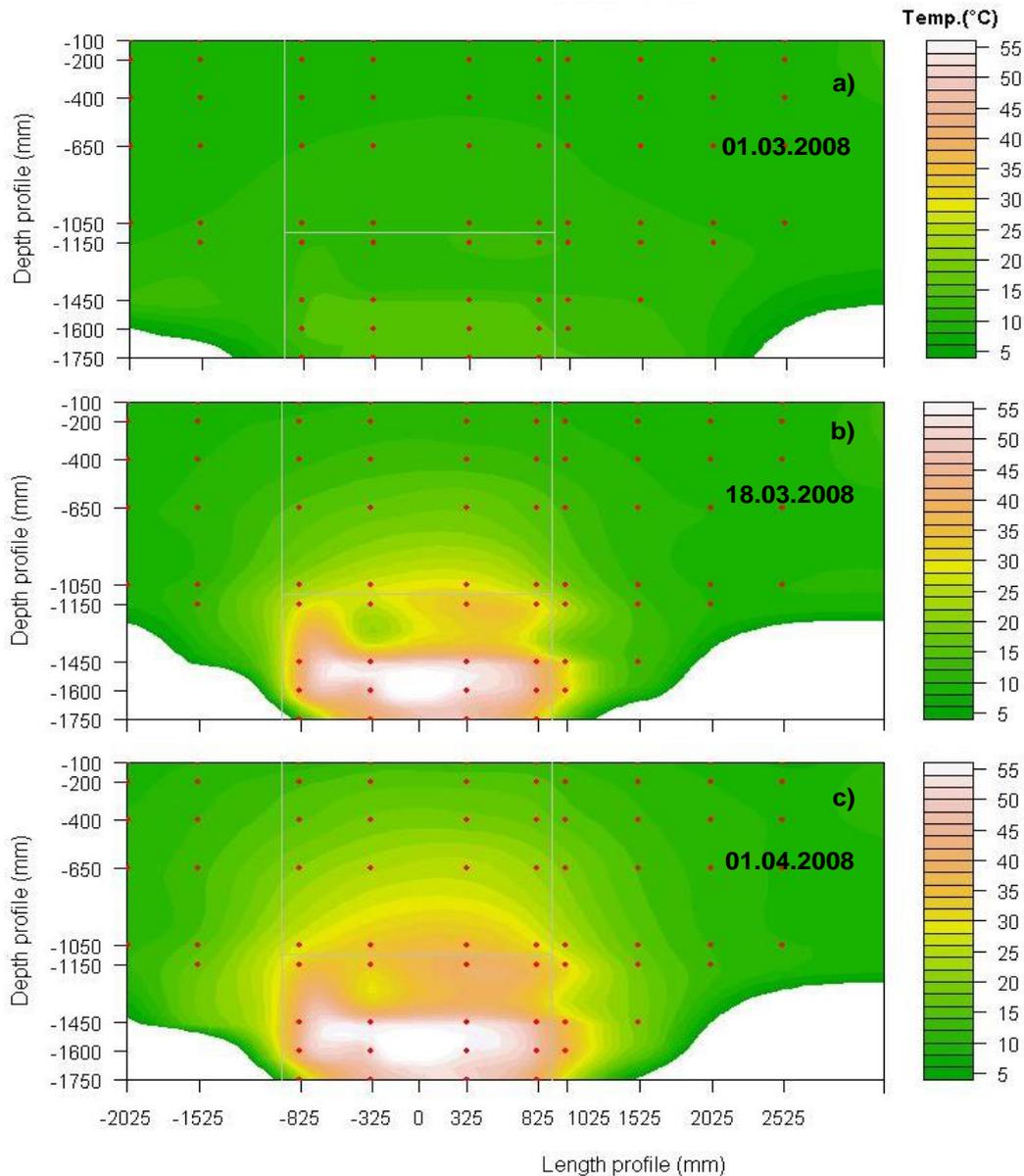


Abb. 10: Zeitlicher Gang der Wärmeausbreitung im Boden bei Erwärmung auf 60 °C

6.3.4 Das Grundwasserexperiment

Der Verlauf des Grundwasserexperiments ist in Abb. 11 dargestellt. Begonnen wurde mit dem Aufheizen der Rohre bei 50 °C. Diese Temperatur wurde während des gesamten Experiments aufrechterhalten (Abb. 11 a). Das Sandbett (Abb. 11 c, rote und grüne Linien) reagierte darauf mit einem deutlichen Temperaturanstieg.

Nahe der Wärmequelle wurden nach kurzer Zeit annähernd 45 °C erreicht. Durch das wenig später erfolgte Einpressen von Grundwasser wurde im Sandkörper innerhalb kurzer Zeit volle Wassersättigung eingestellt (Abb. 11 b), was unmittelbar danach zu einem Einbruch der Bodentemperaturen auf die Temperatur des Grundwassers führte. Erwartungsgemäß reagierte das Sandbett sofort, während die verfüllte Zone oberhalb kaum erkennbar reagierte. Die oberflächennahe Zone blieb von der Wärmezufuhr unberührt. Nach dem Abfließen des Grundwassers erwärmte sich der Boden erneut, bis zum

zweiten Mal Grundwasser eingepresst wurde. Ein Auftreten von Grundwasser eliminierte demnach alle von der Wärmeemission ausgehenden thermischen Effekte im Boden. Die Bodentemperatur glich sich rasch der Grundwassertemperatur an.

Als Fazit ergibt sich daraus: Sofern sich Kabelanlagen im Bereich des Grundwasserkörpers befinden, ist an der Bodenoberfläche von vernachlässigbar geringen thermischen Auswirkungen auszugehen. Dies gilt in abgeschwächter Form auch für Stauwasserbeeinflussung. Allerdings ist Stauwasser nur temporär vorhanden, so daß sich hier zeitweise auch terrestrische Bedingungen einstellen können.

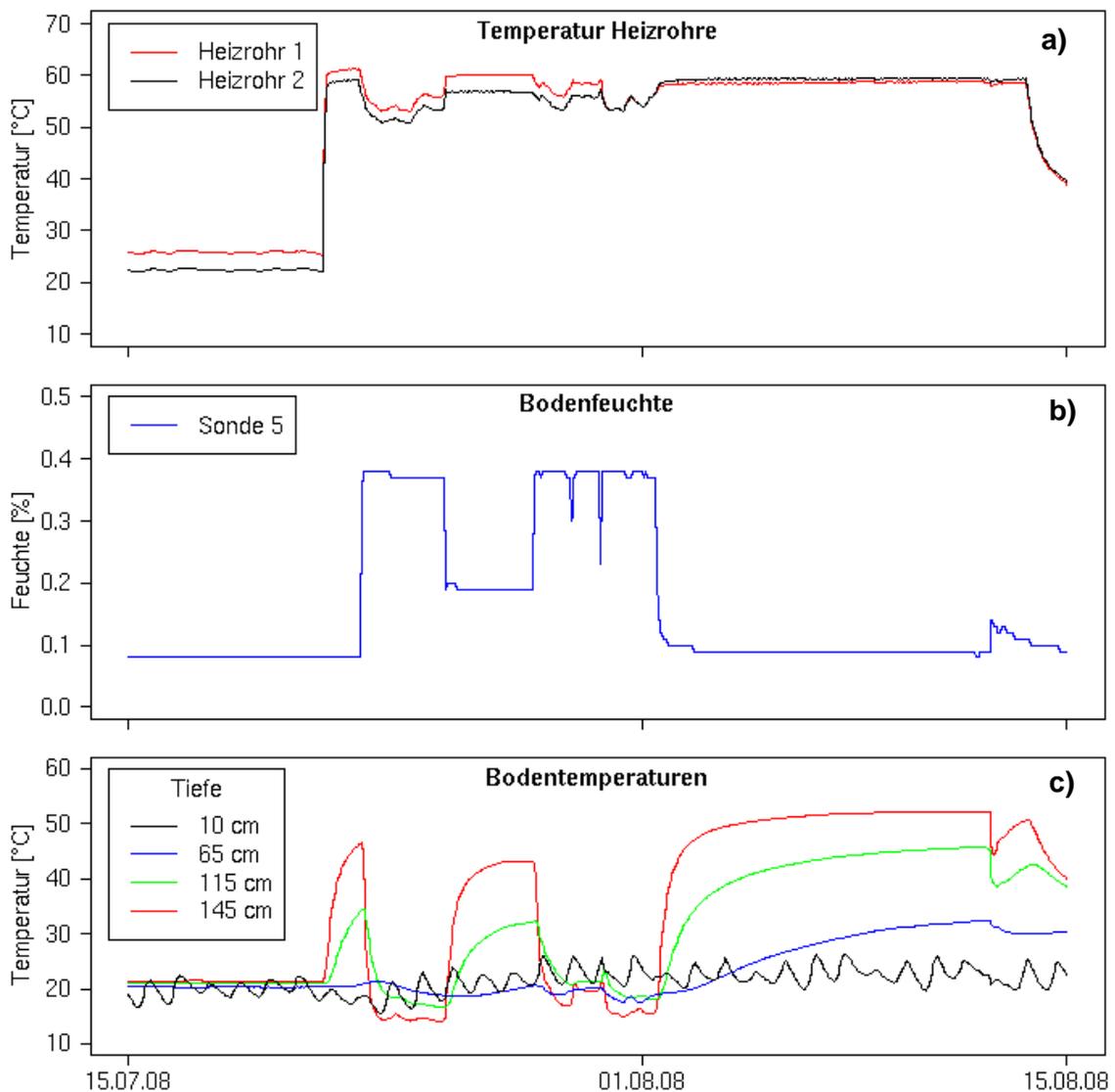


Abbildung 11: Das Grundwasserexperiment

6.3.5 Auswirkungen auf den Bodenwasserhaushalt

Im ungestörten Boden und im Bereich der Verfüllung betrug die Bodenfeuchte meist zwischen 28 Vol. % und 40 Vol. % (Abb. 12). Dies entspricht einer relativ hohen Wassersättigung. Im Sandbett waren die Wassergehalte aufgrund der geringen Speicherleistung durchweg niedrig. Sie variierten zwischen 5 Vol. % und 10 Vol. %. Abgesehen von kurzfristig auftretenden Spitzenwerten nach intensiveren Regenfällen, war die annuelle Variation der Feuchte relativ klein. Im Juli zeichnete sich witterungsbedingt ein Einbruch der aktuellen Feuchte ab, der sich auch in größerer Tiefe noch bemerkbar machte. Im August

und September wurden die Wasservorräte durch mehrere Niederschlagsereignisse wieder aufgefüllt. Einzelne Niederschlagsspitzen schlugen bis zur Trassensohle durch. Im gewachsenen Boden und der Verfüllung entspricht dies einem typischen Jahrgang.

Die im Sandbett eingebauten Sonden befanden sich in einer Entfernung von ca. 30 cm von den Heizrohren. Eine Austrocknung wäre dort am ehesten zu erwarten gewesen. Der Jahrgang war jedoch auch im Sandbett nur schwach differenziert und die Wassergehaltsänderungen waren eindeutig durch das Niederschlagsgeschehen und die im Oberboden auftretende saisonale Austrocknung bedingt (Abb. 12). Die Wärmezufuhr blieb demnach ohne Auswirkung auf den Wassergehalt der Bettung und den Boden insgesamt. Unter den hier gegebenen Bedingungen kann deshalb auch von einer relativ konstanten Wärmeleitfähigkeit des Bodens ausgegangen werden.

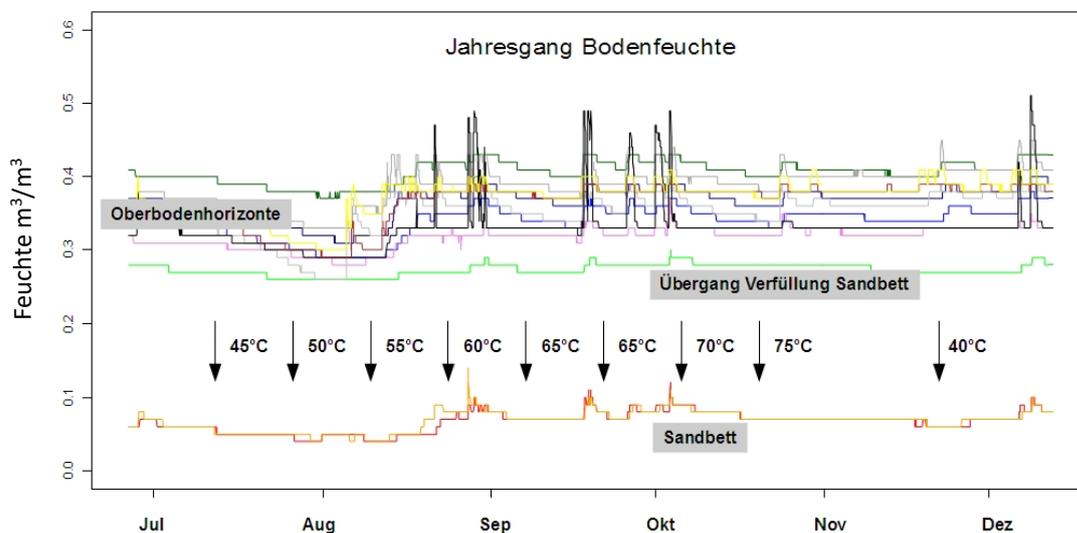


Abbildung 12: Bodenfeuchte während des Pulsexperiments und des Langzeitexperiments bei 40 °C

Wassergehaltsänderungen sind in den tieferen Bodenzonen auch über die Gasphase möglich. Es ist davon auszugehen, daß die Gasphase dort dauerhaft wassergesättigt ist, da die Weglängen für einen Gasaustausch mit der Atmosphäre viel zu lang sind. Es wird deshalb durch die Erwärmung und die dadurch bewirkten Änderungen der Dampfdruckgradienten nicht zu einer nennenswerten Umverteilung von Wasser kommen. Zumindest werden davon keine größeren Distanzen betroffen sein, da mit der Austrocknung des Bodens auch das Matrixpotential ansteigt und ein Rücktransport via Massenfluß erfolgt.

6.3.6 Wirkungen auf die Schneedecke und das Auftreten von Frost

Wegen des insgesamt milden Klimas am Versuchsstandort, stützen sich die Beobachtungen nur auf relativ kurze Zeiträume mit Schneebedeckung im Winter 2008/09 und 2009/10. In beiden Jahren war die Schneedecke nur wenige Zentimeter mächtig. Die Temperaturen lagen knapp oberhalb des Gefrierpunktes und der Oberboden war nicht gefroren. Nach dem Einsetzen des Schneefalls ergab sich zunächst eine weitgehend geschlossene Schneedecke über den gesamten Bereich der Versuchsfläche. Die langfristige Erwärmung der Rohre auf 50 °C hat die Bildung einer geschlossenen Schneedecke nicht

verhindert (Abb. 13). Eine entsprechende Differenzierung erfolgte erst nach dem Einsetzen der Tauphase. Diese verlief im Bereich der Wärmequellen deutlich schneller. Die Schneebedeckung zeichnete die Trassenränder zunächst relativ scharf nach (Abb. 14). Erst später schritt das Auftauen auch seitlich voran (Abb. 15).



Abbildung 13: Meßfläche unmittelbar nach Schneefall auf ungefrorenem Boden bei Erwärmung der Rohre auf 50°C
(Markierung entspricht dem Bereich der Wärmequellen)



Abbildung 14: Meßfläche bei einsetzender Tauphase bei Erwärmung der Rohre auf 50°C
(Markierung entspricht dem Bereich der Wärmequellen)



Abbildung 15: Meßfläche nach fortgeschrittener Tauphase bei Erwärmung der Rohre auf 50°C
(Markierung entspricht dem Bereich der Wärmequellen)



Abbildung 16: Auftreten von Bodenfrost bei Erwärmung der Rohre auf 50°C
(Markierung entspricht dem Zentrum der Wärmequellen)

Grundsätzlich führte die Wärmezufuhr zu einem beschleunigten Auftauen und damit zu einem schnelleren Verlust der Schneedecke, nicht aber zu tiefgreifenden Veränderungen des Frostgeschehens.

Eine Betriebstemperatur von 50 °C reichte nicht aus, Oberflächenfrost zu verhindern (Abb. 16). Dafür ist die zugeführte Energie zu gering. Auch eine längere, starke Auslastung der Kabel wird ein Auftreten von Bodenfrost nicht verhindern.

6.3.7 Auswirkungen auf landwirtschaftliche Kulturen

Zur Ersteinschätzung möglicher Auswirkungen auf landwirtschaftliche Kulturen wurde eine Versuchsfläche mit Winterweizen angelegt. Während des ca. 9 Monate lang andauernden Versuchs wurde eine Betriebstemperatur von 50 °C permanent aufrechterhalten. Bereits kurze Zeit nach der Aussaat war die Kultur aufgelaufen. Die Beheizung mit 50 °C führte im Vergleich zur angrenzenden Kontrolle zu keiner erkennbaren Differenzierung (Abb. 17 und 18). Mit dem weiteren Wachstumsfortschritt kam es allerdings im Bereich der Wärmequellen zu einem verstärkten Auflaufen von Senf, der zuvor als Zwischenfrucht zum Schutz vor Verunkrautung eingesät worden war. Dies führte offenbar zu einer Konkurrenz zum Getreide, was einen etwas geringeren Deckungsgrad zur Folge hatte. Ein durch die Wärmezufuhr begünstigtes Aufkommen von Fremdvegetation könnte deshalb zu gewissen Ertragseinbußen führen. Normalerweise würde jedoch ein unerwünschtes Auflaufen von Zwischenfrüchten oder eine Verunkrautung durch einen frühzeitigen Herbizid-Einsatz verhindert, so daß sich dieses Problem bei konventioneller Bewirtschaftung nicht ergeben wird. Der von uns durchgeführte Herbizid-Einsatz erfolgte zu spät. Die Ausdünnung des Weizens war zu diesem Zeitpunkt bereits erfolgt. Andererseits sollte der Effekt einer möglichen Verunkrautung auch nicht von vorne herein unterbunden werden. Insgesamt zeigt der Versuch, daß ein Anbau von Getreide im Bereich der Erdkabelanlagen ohne weiteres möglich ist. Insgesamt ergaben sich durch das Experiment keine Hinweise auf mögliche Ertragsteigerungen oder -einbußen. Eine verstärkte Verunkrautung war nicht auszuschließen.



Abbildung 17: Winterweizen nach der Aussaat
(Markierung entspricht dem Bereich der Wärmequellen)



Abbildung 18: Winterweizen unmittelbar vor der Ernte
(Markierung zeigt das Zentrum der Wärmeemission)

Bewertung

Die im "Freiburger Experiment" angelegte Testpflanzung erhebt nicht den Anspruch eines exakten, wissenschaftlich fundierten Versuchs. Sie hat lediglich qualitativen Charakter. Ungeachtet dessen sind die Ergebnisse eindeutig. Es ergaben sich hinsichtlich des Ertrags keine visuell erkennbaren Effekte. Mögliche negative Effekte auf den Ertrag können nicht völlig ausgeschlossen werden. Die Ergebnisse sprechen jedoch dafür, daß die Effekte klein sein werden.

Die Betriebsbedingungen im "Freiburger Experiment" waren stets auf den worst-case ausgerichtet. Sie sind deshalb im Vergleich zu der beim Netzbetrieb zu erwartenden Wärmeemission unrealistisch. Das Betriebsszenario entspräche einer dauerhaften Belastung deutlich oberhalb der Auslegungslast, was im Netzbetrieb aus Sicherheitsgründen nicht möglich ist.

Allein schon durch die worst-case Betrachtung erhält die Prognose ein hohes Maß an Sicherheit und zudem einen Puffer gegenüber Effekten, die sich aus klimatischen oder standörtlichen Unterschieden ergeben könnten. Die in Abschnitt 7.5 beschriebenen, in NRW durchgeführten Kulturversuche, belegen, daß regionale Unterschiede die Übertragbarkeit der Ergebnisse nicht einschränken. Sie belegen, daß die anhand des "Freiburger Experiments" getroffenen Prognosen auch für Standorte in NRW zutreffend sind.

7 "Kabeltest Osterath"

Im Jahr 2010 wurde in Meerbusch-Osterath ein weiteres Experiment zur Erdverkabelung angelegt. Ziel dieses Experiments war die technische Optimierung von Erdkabelanlagen. Es handelte sich dabei um eine 110 kV-Verbindungsstrasse zwischen zwei Umspannanlagen, die 3 Jahre lang zu Versuchszwecken genutzt werden konnte. Die Anlage ermöglichte es, verschiedene Betriebsszenarien zu testen und die

Anlage auch langfristig mit *technischer Maximallast* zu betreiben. Nach 2-jährigem Betrieb unter *technischer Maximallast* folgte über ein Jahr der Dauerbetrieb mit *Auslegungslast*. Der Kabeltest ist zwischenzeitlich abgeschlossen. Die Anlage ist inzwischen seit 6 Jahren am Netz. Aus dem begleitenden Temperatur- und Feuchte-Monitoring liegen nun auch Erkenntnisse zum realen *Netzbetrieb* vor, wengleich kontinuierliche *Normallast* bisher noch nicht erreicht wurde.



Abb. 19: 110-kV Kabeltrasse in Meerbusch-Osterath

7.1 Methodischer Ansatz

Zur Untersuchung möglicher Effekte auf landwirtschaftliche Kulturen wurden auf einer ca. 75 m langen Kabelstrecke Versuchspartellen mit Kartoffeln, Mais, Winterweizen, Sommergerste und Raps angelegt. Bepflanzt wurden jeweils drei Versuchsfelder mit verschiedenen Bettungsmaterialien und eine Kontrollparzelle abseits der Trasse.



Abb. 20: 110-kV Kabeltrasse in Meerbusch-Osterath



Abb. 21: Kabeltrasse unmittelbar vor der Fertigstellung



Abb. 22: Instrumentierung der Kabelanlage zur Temperatur- und Feuchtemessung

Die Abbildungen 20 und 21 zeigen die Trasse im Bereich der Versuchsfelder zu Beginn der Bauphase und kurz vor der Fertigstellung. Erkennbar sind die drei Schutzrohre und die teilweise erfolgte Einbettung in verschiedene Bettungsmaterialien sowie die im oberen Bereich der Verfüllung eingelegten Warnbänder. Abbildung 22 zeigt die Instrumentierung mit Feuchte- und Thermosonden in unmittelbarer Nähe zu den Schutzrohren. Zur kontinuierlichen Erfassung der Bodentemperaturen und der Bodenfeuchte wurden die einzelnen Parzellen mit jeweils 90 Sonden analog zum "Freiburger Experiment" instrumentiert (Abb. 23).

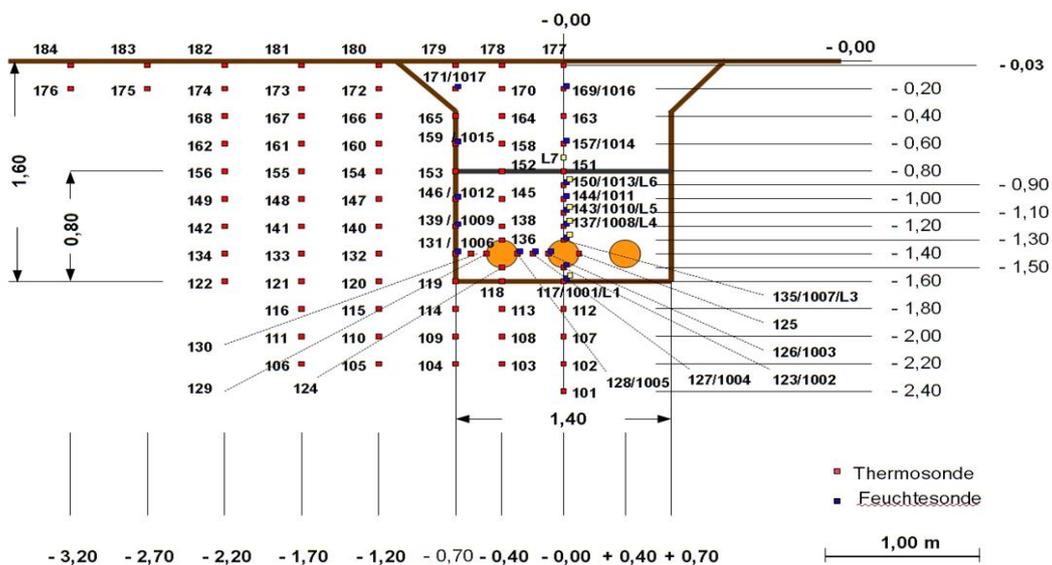


Abb. 23: Instrumentierung zur kontinuierlichen Messung der Bodentemperatur und -feuchte

7.2 Betriebsbedingungen

Der wissenschaftlich verwertbare Versuchsbetrieb wurde im Mai 2011 aufgenommen und bis August 2013 aufrechterhalten. Zur Ermittlung der Kabelbelastbarkeit wurde die Anlage langfristig mit **technischer Maximallast**, also unter Bedingungen betrieben, die zu Schäden an den Kabeln hätten führen können. Der Versuch erfolgte somit unter extremen Testbedingungen, bei denen **Kabelmanteltemperaturen** von annähernd 70 °C erzeugt wurden. Die **Auslegungslast** wurde dabei über lange, mehrmonatige Zeiträume um das 1,3- bis 1,5-fache überschritten. Eine derart hohe Auslastung liegt weit über der geplanten Auslastung im Netzbetrieb. Aufgrund dessen liefert der Versuch auch in Bezug auf andere Kabelabschnitte sehr belastbare Erkenntnisse zu den zu erwartenden thermischen Auswirkungen im Boden. Derart extreme Bedingungen, werden im geplanten Netzbetrieb mit Normal- und nur zeitweiser Auslegungslast nicht erreicht.

Im Anschluß an diese extreme Testphase wurde die Anlage zum Jahresende 2012 kurzfristig abgeschaltet bevor sie im Januar 2012 mit **Auslegungslast** wieder in Betrieb genommen wurde. Diese Last wurde bis September 2013 dauerhaft aufrechterhalten. Mit einem letzten, nur kurzfristigen Test bei technischer Maximallast wurde der Versuchsbetrieb Ende Juli 2013 beendet. Der **Netzbetrieb** wurde schließlich im September 2013 aufgenommen. Die Temperatur- und Feuchtemessungen dauern bis heute an.

7.3 Bodentemperaturen

Mit der Aufnahme des Testbetriebs im Jahr 2011 und der Einstellung auf **technische Maximallast** stiegen die Temperaturen an der Schutzrohroberfläche des zentralen Leiters kontinuierlich an (Abb. 22). Nach Überschreiten eines Maximums kam es im Zeitraum November 2011 - Januar 2012 durch Abschalten der Anlage kurzfristig zu einem Temperaturrückgang auf das Niveau der Kontrolle. In dem darauffolgenden erneuten Test bei **technischer Maximallast** stiegen die Temperaturen wieder auf das gleiche Niveau an, wobei es mehrfach zu Temperatureinbrüchen durch kurzfristiges Abschalten oder Manipulationen an der Anlage kam. Nach Einstellung der Anlage auf **Auslegungslast** stellten sich deutlich niedrigere Temperaturen ein.

Die an der **Schutzrohroberfläche** gemessenen Temperaturen variierten lastabhängig stark (Abb. 22). Zudem bestand beim Betrieb mit **technischer Maximallast** eine deutliche Differenzierung hinsichtlich der verschiedenen Bettungsmaterialien. In der Bettung aus ZFSV (**ZFSV: zeitweise fließfähiger selbstverdichtender Verfüllbaustoff**) waren die Temperaturen stets am niedrigsten. Die von BRAKELMANN et al. (unveröffentlicht) berechneten Temperaturen am Schutzrohr (≤ 50 °C) wurden nur bei dauerhaftem Betrieb unter **technischer Maximallast** erreicht bzw. überschritten. Diese betrug dauerhaft das 1,5-fache der **Auslegungslast**. Im Hinblick auf den Netzbetrieb ist dies ein unrealistisches Szenario.

Bemerkenswert ist, daß die Temperaturen auch im Bereich der Schutzrohre noch maßgeblich vom witterungsbedingten natürlichen Jahresgang bestimmt wurden. Die durch die Wärmeemission bedingten Effekte waren diesem aufgesetzt. Dies hatte sich auch schon beim "Freiburger Experiment" gezeigt. Bei **technischer Maximallast** waren die Temperaturen am zentralen Schutzrohr im Vergleich zur Kontrolle durchschnittlich um ca. 30 -35 K, bei der ungeeigneten Sandbettung sogar um bis zu 40 K höher.

Beim Betrieb unter **technischer Maximallast** ergab sich ein vom Bettungsmaterial abhängiger Temperaturverlauf. Der Versuch zeigte die unterschiedliche thermische Belastbarkeit der Bettungsmaterialien und das davon abhängige Temperaturverhalten. Bei geeignetem Material (ZFSV, Magerbeton) wurde nach 4 bis 6 Wochen ein thermisches Gleichgewicht erreicht. Die Temperaturdifferenzen zur

Kontrolle stiegen danach nicht weiter an. Die emittierte Wärme wurde vollständig in den umgebenden Bodenkörper und die Atmosphäre abgeleitet. Bei der in der Körnung zu grob gewählten Sandbettung war dies nicht der Fall. Hier reichte die Wärmeleitfähigkeit nicht aus, die Wärme vollständig von der Schutzrohroberfläche abzuführen. Um Schäden an der Anlage zu vermeiden, musste diese deshalb mehrfach abgeschaltet bzw. an den hotspots gekühlt werden. Dies ist an den peakartig ausgeprägten Temperaturgängen deutlich zu erkennen. Aus diesem Befund ist jedoch nicht abzuleiten, daß eine Sandbettung grundsätzlich ungeeignet wäre. Es wäre lediglich notwendig, die Körnung feiner zu wählen. Zur Substratoptimierung wurde dazu an der Professur für Bodenökologie der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg eine umfassende Studie durchgeführt (DEMAND, 2012).

Bei dauerhaftem Betrieb mit **Auslegungslast** wurden die von BRAKELMANN et al. berechneten Temperaturen hingegen nicht annähernd erreicht, obwohl es sich dabei um einen extrem konservativ angesetzten Lastfall handelt (Abb. 24). Die Temperaturdifferenzen zur Kontrolle betragen jetzt durchschnittlich noch ca. 20 K. Bei diesen Betriebsbedingungen ergab sich auch kaum noch eine Differenzierung durch die unterschiedlichen Bettungsmaterialien.

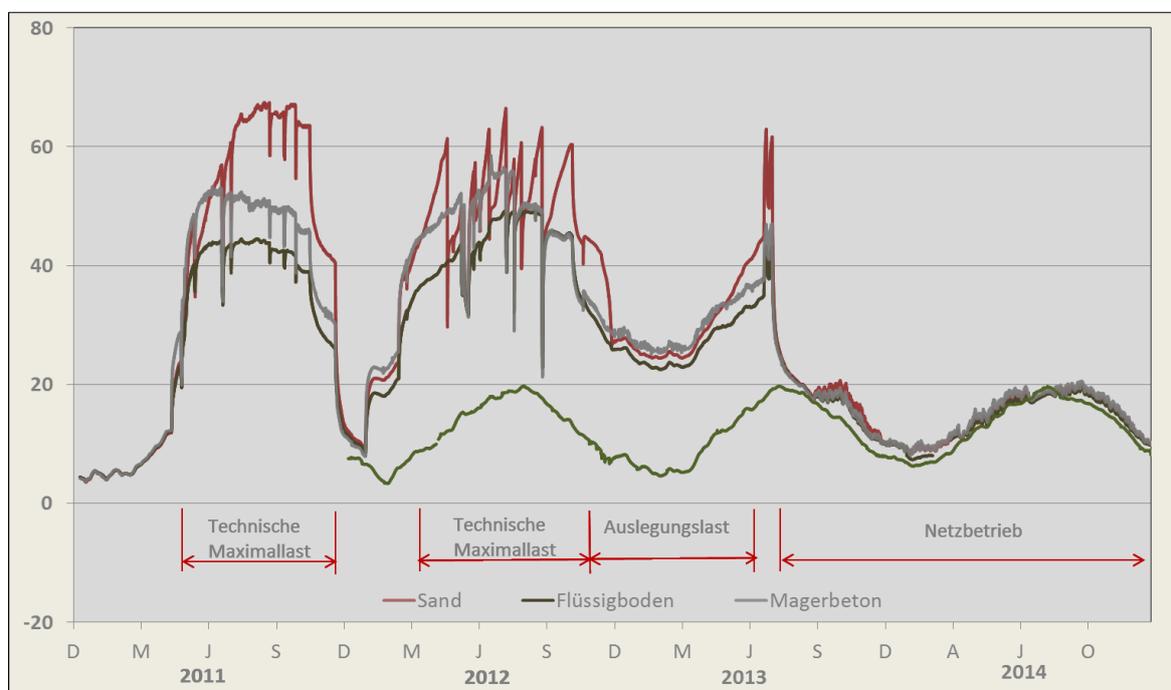


Abb. 24: Bodentemperaturen an der Schutzrohroberfläche bei unterschiedlicher Kabelauslastung

Im **Netzbetrieb** unterschieden sich die Temperaturen am Schutzrohr nur noch geringfügig von der Kontrolle (Abb.24). Die Differenzen lagen unter 4 K. Im Vergleich zum Betrieb bei **technischer Maximallast** waren die Temperaturen bei dauerhaftem Betrieb mit **Auslegungslast** durchschnittlich um bis zu 20 K niedriger. Beim derzeitigen Netzbetrieb \leq Normallast betragen die Temperaturdifferenzen nur etwa 15 % davon. Dabei ist allerdings zu berücksichtigen, daß die Anlage derzeit noch deutlich unter Normallast betrieben wird. Die Auslastung beträgt bisher maximal 40 % der **Auslegungslast**.

Abbildung 25 zeigt die Temperaturverteilung für die Variante "Sand" in einer Ebene orthogonal zur Trasse bei andauernder **technischer Maximallast** im Sommer. Die Verteilung ist nahezu identisch mit derjenigen aus dem Langzeitversuch des "Freiburger Experiments". Die innerhalb der Trasse bestehen-

den Temperaturgradienten treten jedoch durch die verbesserte Flächenauflösung wesentlich deutlicher zutage. Charakteristisch ist die ellipsenförmig ausgeprägte Wärmezone im Bettungsbereich um die Kabelanlage. Bemerkenswert ist der Gradient zwischen der Kabelschirmtemperatur und der Temperatur an der heißesten Stelle des zentralen Schutzrohres. Bedingt durch das Luftpolster nahmen die Temperaturen beim Wärmeübertritt in den Boden um 20 K ab. Eine weitere Abnahme um 15 -20 K erfolgte im Bereich der Verfüllung über eine Entfernung von 50 cm. Die thermischen Effekte konzentrierten sich somit auf den Bereich der Bettung. Außerhalb derer waren die Gradienten durchweg klein.

Bemerkenswert ist weiterhin, daß zwischen 3 cm und 20 cm eine Inversion der Temperaturgradienten erfolgt ist, die einen Wärmefluß zur Oberfläche hin verhindert (Abb. 25). Zu diesem Zeitpunkt erfolgte die Einstellung eines quasi-stationären Zustandes über eine seitliche Wärmeausbreitung oder eine Ausbreitung in größere Tiefe.

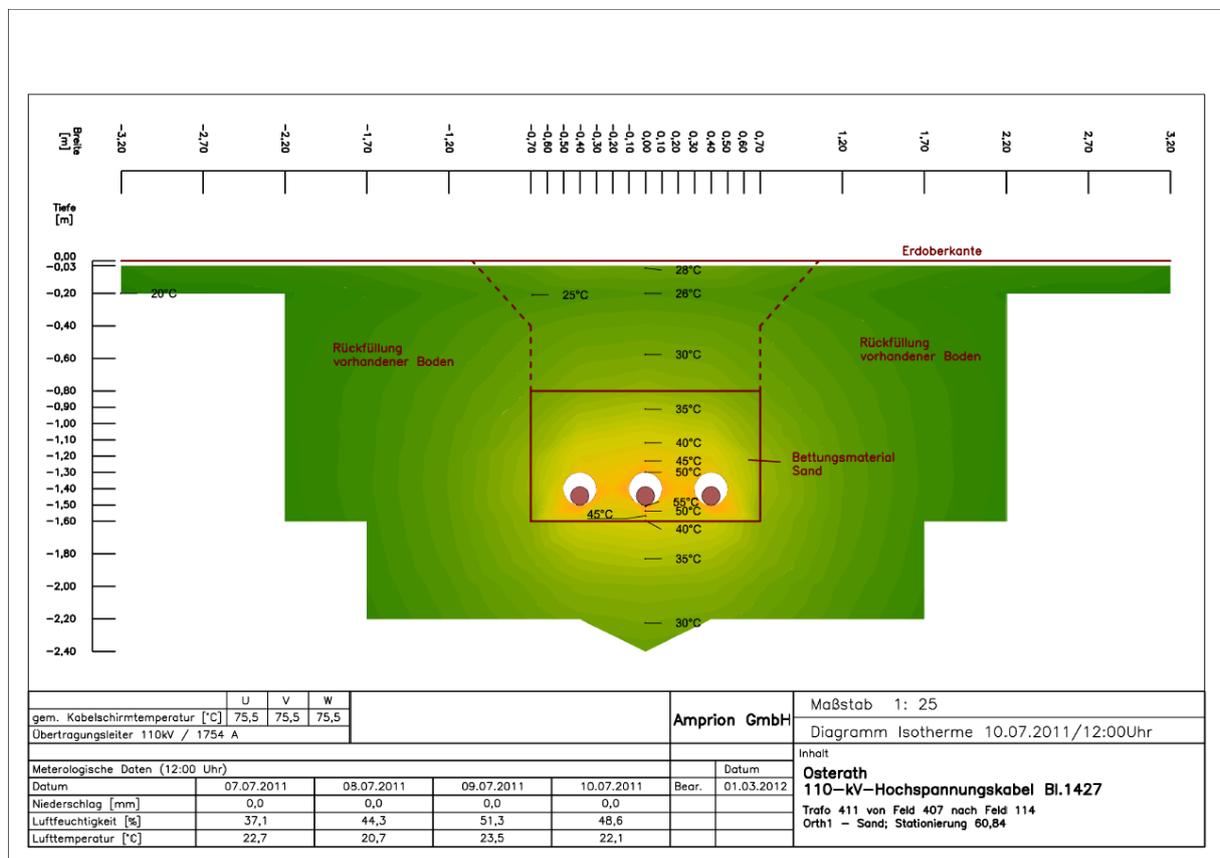


Abb. 25: Temperaturverteilung im Trassenbereich (Sand) bei technischer Maximallast

Ökologisch relevant sind primär die Temperaturen im Oberboden bzw. in der Hauptwurzelzone. Erwartungsgemäß zeigten sich dort bei *technischer Maximallast* und bei *Auslegungslast* signifikante Temperatureffekte (Abb. 26; Tab. 2). Sehr deutlich waren die Effekte beim Betrieb mit technischer Maximallast. Unter Auslegungslast waren sie deutlich geringer. Die Differenzen zwischen Kontrolle und Trasse variierten im Jahresverlauf stark. Dies ist zum einen witterungs-, zum anderen durch die verschiedenen Betriebsszenarien bedingt. Beim Betrieb unter *technischer Maximallast* musste die Anlage wegen Überhitzungsgefahr zeitweise ausgeschaltet werden. Die größten Temperaturdifferenzen zwischen Trasse und Kontrolle traten im Zeitraum Juli - September auf.

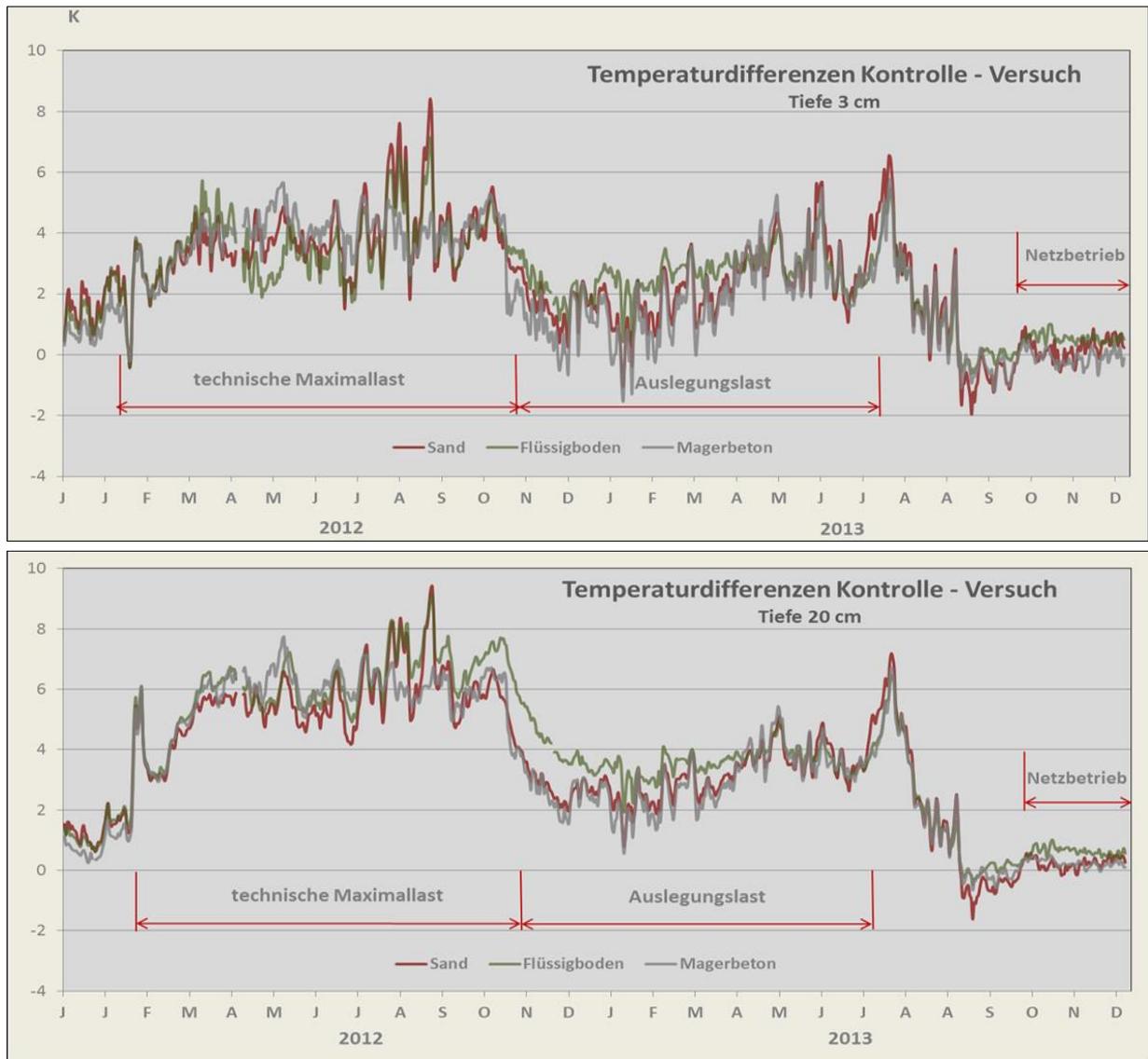


Abb. 26: Temperaturdifferenzen Kontrolle – Trasse bei unterschiedlicher Kabelauslastung

Eine Übersicht über die mittleren Temperaturdifferenzen im Oberboden gibt Tabelle 1. An der Bodenoberfläche (3 cm Tiefe) ergaben sich beim Dauerbetrieb mit *technischer Maximallast* je nach Bettungsmaterial mittlere Temperaturdifferenzen zwischen 3 K und 4 K, in 20 cm Tiefe zwischen 5 und 6 K. Dies sind die höchsten Temperaturdifferenzen, die mit der Anlage erzeugt werden können. Bei dauerhaftem Betrieb mit *Auslegungslast* waren die Differenzen jeweils um 1 K geringer. Bemerkenswert dazu ist, daß die Differenzen an der Bodenoberfläche in der Reihenfolge ZFSV > Magerbeton > Sand abnahmen. An der Kabeloberfläche war die Reihenfolge hingegen umgekehrt. Bei ZFSV erfolgte offenbar eine sehr effektive Wärmeableitung von der Kabelanlage, was zu vergleichsweise niedrigen Temperaturen an den Schutzrohren führte. Die Wärme gelangte dann rasch an die Oberfläche und bewirkte dort eine entsprechend größere Temperaturdifferenz. Bei Sandbettung war dies umgekehrt. Aufgrund der schlechten Wärmeleitfähigkeit kam es dort zu einer starken Wärmeakkumulation im Bereich der Bettung. Die Wärme wurde langsamer an die Bodenoberfläche weitergeleitet.

Tabelle 1: Übersicht über die Temperaturdifferenzen zwischen Kontrolle und Versuch						
Variante	Sand		ZFSV		Magerbeton	
Tiefe (cm)	20	3	20	3	20	3
Technische Maximallast (2012)						
Median	5,1	3,2	5,7	3,9	5,6	3,6
Mittel	4,6	3,2	5,2	3,8	4,6	3,1
Max	10,4	11,9	9,5	9,3	8,5	6,3
Min	0,5	-0,9	0,6	-2,3	-3,6	-1,2
Auslegungslast (2013)						
Median	3,3	2,3	3,7	2,9	3,6	2,3
Mittel	3,5	2,5	4,2	3,2	3,7	2,6
Max	6,9	10,1	7,8	6,9	6,8	10,0
Min	0,7	-1,1	1,8	-0,2	1,3	-1,2

Wenngleich durch den Betrieb mit technischer Maximallast und Auslegungslast wertvolle Erkenntnisse zum Betriebsverhalten der Anlage und zur Eignung verschiedener Bettungsmaterialien gewonnen werden konnten, resultiert aus den Ergebnissen im Hinblick auf die ökologischen Auswirkungen im realen Netzbetrieb ein viel zu pessimistisches Bild. Dies zeigen die ersten Erfahrungen, die aus dem gegenwärtigen Netzbetrieb gewonnen werden konnten.

Die Anlage in Osterath ist zwischenzeitlich ca. 6 Jahre am Netz. Die Auslastung liegt derzeit mit ca. 40 % noch deutlich unterhalb Normallast. Unter diesen Betriebsbedingungen unterscheiden sich die Temperaturen an der Schutzrohroberfläche nur noch geringfügig von denen der Kontrolle (Abb. 26). Eine Differenzierung zwischen den verschiedenen Bettungsmaterialien ist nicht mehr erkennbar.

An der **Schutzrohroberfläche** haben sich die Temperaturdifferenzen langfristig auf einem Niveau < 3 K eingependelt (Abb. 26). Eine jahreszeitliche Differenzierung ist nicht gegeben. Des Weiteren bestehen keine erkennbaren Unterschiede zwischen den einzelnen Bettungsmaterialien.

Im **Oberboden** (Tiefe 3 cm) streuen die Temperaturdifferenzen über lange Zeitabschnitte um die Nullmarke (Abb. 26). Signifikante Temperatureffekte traten nicht auf. Vereinzelt kamen jedoch auch größere Differenzen vor. Im Mai 2015 sind diese sehr wahrscheinlich durch die Öffnung eines weiteren Kabelgrabens, in unmittelbarer Nähe zur Kabelanlage bedingt. Die erhöhten Differenzen im Mai 2017 sind nicht erklärbar. Sie stehen jedoch in keinerlei Zusammenhang zu den Temperaturen an der Schutzrohroberfläche. Es handelt sich somit in beiden Fällen nicht um betriebsbedingte Effekte.

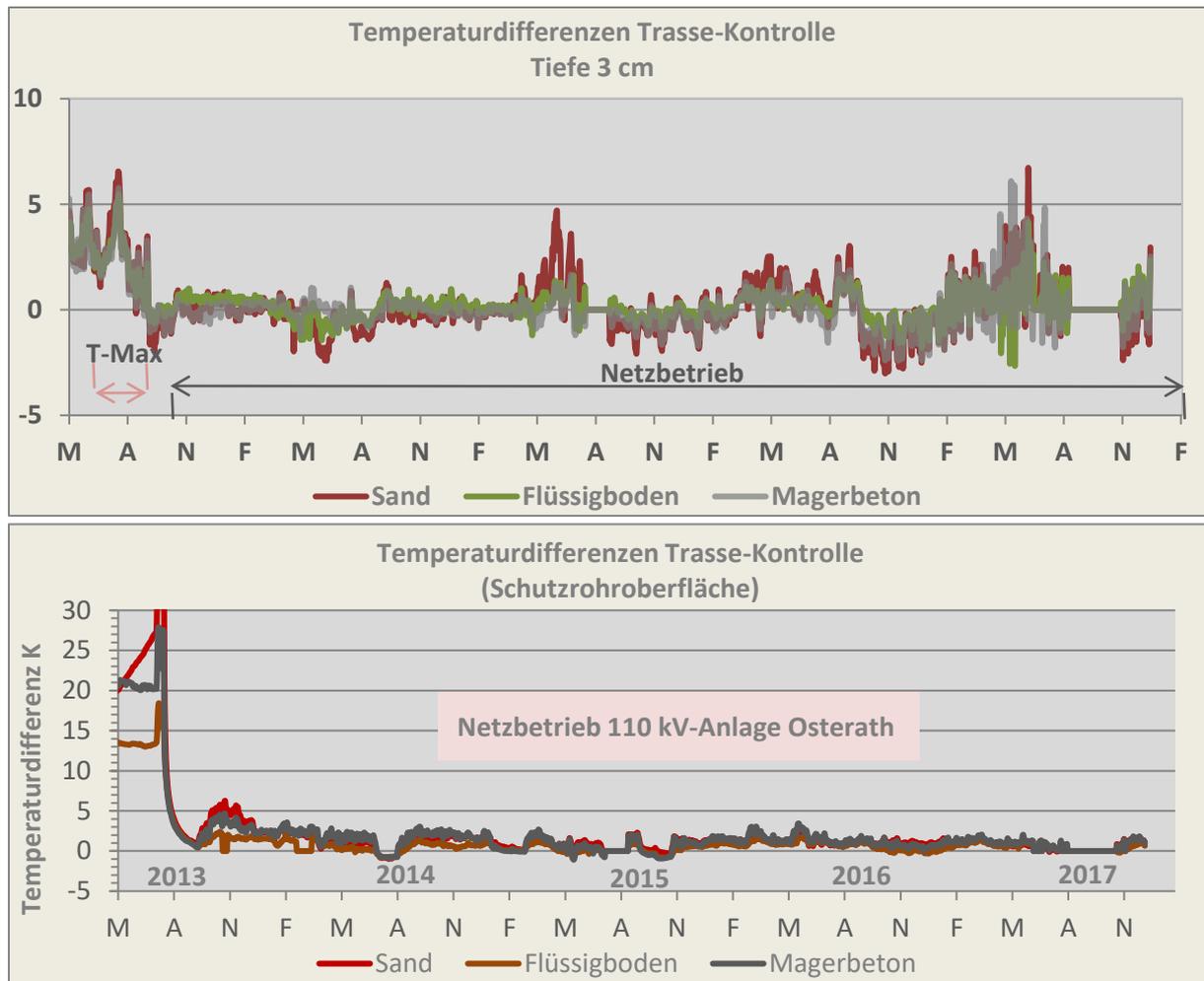


Abb. 27: Temperaturdifferenzen Kontrolle – Trasse im Netzbetrieb (< Normallast)

7.4 Interpretation und Bewertung

Mit dem Kabeltest Osterath konnte der Betrieb einer Erdkabelanlage im Vergleich zum Freiburger Experiment nochmals realitätsnäher erforscht werden. Durch die Zielsetzung des Versuchs, das Betriebsverhalten der Anlage auch unter extremem Betrieb zu testen, sind dauerhaft Lastbedingungen erzeugt worden, die weit über der zu erwartenden Auslastung im Netzbetrieb liegen. Vor allem der dauerhafte Betrieb mit *technischer Maximallast* ist in der Praxis aus Kabelschutzgründen nicht möglich. Technisch möglich, aber für den Netzbetrieb nicht repräsentativ, ist auch der dauerhafte Betrieb bei *Auslegungslast*. Dies zeigen die bisherigen Erfahrungen, wenngleich die Anlage derzeit noch deutlich unter der zur erwartenden Normallast betrieben wird. Die bisherigen Beobachtungen zum Netzbetrieb sprechen weiterhin dafür, daß die Auslastung einer sehr erheblichen Variation unterliegen wird und deshalb mit einer konstanten Wärmeabgabe nicht zu rechnen ist. Durch die Trägheit des Systems werden Effekte vorwiegend im Unterboden auftreten. An der Oberfläche wird die Wärmefront voraussichtlich nur mit großer Verzögerung ankommen und sich nur in abgeschwächter Form bemerkbar machen. Aus den Pulsversuchen geht hervor, daß die Erwärmung des Bodens stets relativ langsam, die Abkühlung nach Ausbleiben der Wärmezufuhr hingegen sehr schnell erfolgt. Kommt es im Netzbetrieb zu größeren Schwankungen bei den Übertragungsraten oder tendieren diese temporär gegen Null, so bewirkt dies eine weitere Abschwächung der Effekte.

Die getesteten Bettungsmaterialien verhalten sich thermisch unterschiedlich. Die im "Kabeltest Osterath" verwendete, aufgrund zu grober Körnung ungeeignete Sandbettung und die Bettung aus Magerbeton werden bei künftigen Anlagen nicht zum Einsatz kommen. Die daraus resultierenden Ergebnisse sind deshalb für Prognosen zu künftigen Anlagen irrelevant. Die ZFSV-Bettung führte im Vergleich dazu zu deutlich besseren Ergebnissen. Eine bessere Wärmeableitung von den Kabeln führte zu deutlich niedrigeren Temperaturen im Unterboden. Als Prognose ergibt sich daraus, daß die Temperaturdifferenzen unmittelbar an der **Schutzrohroberfläche** im Netzbetrieb erheblich < 20 K sein werden. Die räumliche Ausdehnung deutlich erhöhter Temperaturen wird dadurch auf einen noch kleineren Bereich um die Kabelanlage eingeeengt.

Durch die bessere Wärmeableitung kam es bei der ZFSV-Bettung an der **Bodenoberfläche** zu höheren Temperaturen als bei den übrigen Bettungsmaterialien. Im **Netzbetrieb** wird die für dauerhafte Auslegungslast ermittelte durchschnittliche Temperaturerhöhung um 2,9 K (vgl. Tab. 1) aus den zuvor genannten Gründen nicht erreicht werden. Das Ausbleiben von Temperatureffekten im derzeitigen, unter Auslegungslast laufenden Netzbetrieb lässt darauf schließen, daß die mittlere Temperaturerhöhung im normalen Netzbetrieb deutlich kleiner, höchstwahrscheinlich < 2 K sein wird.

7.5 Auswirkungen auf die Bodenfeuchte

Im Oberboden unterlag die Bodenfeuchte sowohl auf den Versuchspartellen als auch auf der Kontrolle dem typischen Jahresgang (Abb. 28). Dieser war geprägt von saisonalen bzw. witterungsbedingten Austrocknungs- und Wiederbefeuchtungsphasen. In den Sommermonaten kam es im Oberboden stets zu einer temporären Austrocknung und einem Einbruch der Bodenfeuchte bis an die Grenze zur Welkefeuchte. Diese Defizite wurden durch länger anhaltende Niederschläge wieder ausgeglichen. Für die verschiedenen Versuchspartellen sind die Ganglinien weitgehend kongruent. Im Jahresgang sehr ähnlich, aber systematisch niedriger war dagegen die Bodenfeuchte im Bereich der Kontrolle. Infolge mehrerer Niederschlagsereignisse wurden die Wasservorräte im Spätjahr auf allen Partellen wieder bis auf 25 - 30 Vol. % aufgefüllt.

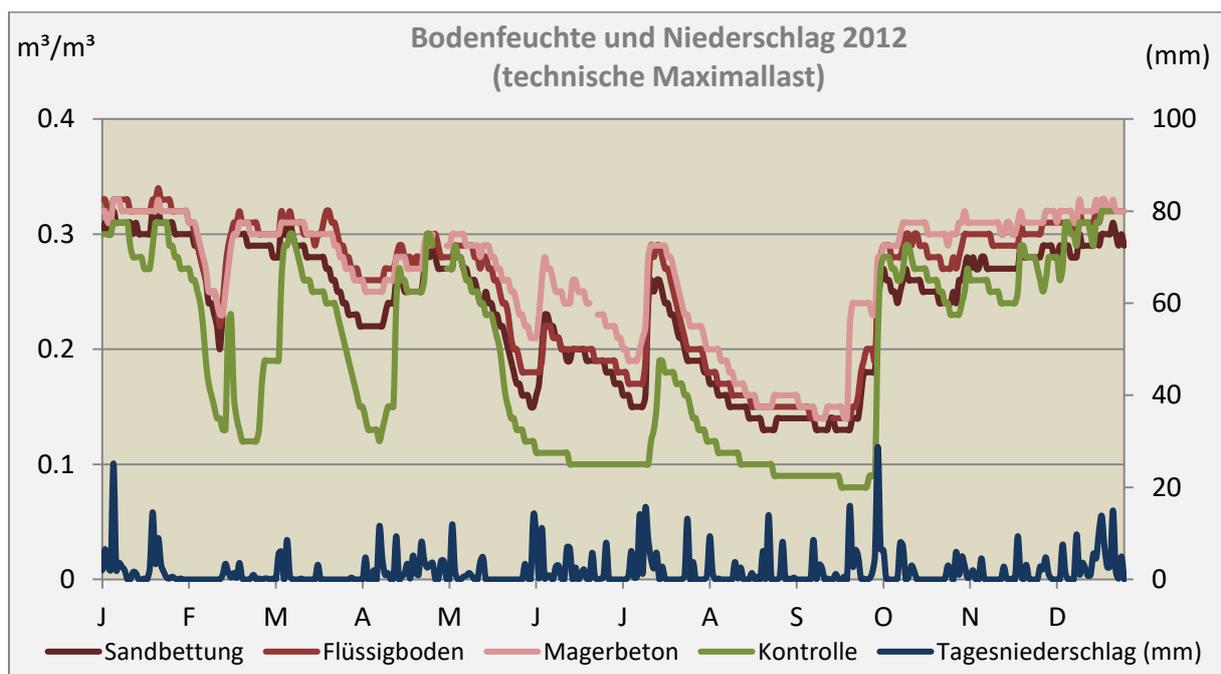


Abb. 28: Jahresgang der Feuchte im Oberboden der Versuchs- und Kontrollpartellen (20 cm Tiefe)

Die geringere Bodenfeuchte im Bereich der Kontrolle ist wahrscheinlich auf ungünstigere Substrateigenschaften zurückzuführen. Die bei der Rückverfüllung des Kabelgrabens erfolgte Homogenisierung des Substrates und die Aufhebung der ursprünglich vorhandenen Schichtung haben vermutlich zu einer Verbesserung des Wasserhaltevermögens geführt.

Wie im "Freiburger Experiment" zeigte sich klar, daß die Bodenerwärmung durch eine Kabelanlage in der ökologisch relevanten Bodenzone selbst bei *technischer Maximallast* keine erkennbaren Veränderungen des natürlichen Feuchteganges bewirkte. Dies gilt erst recht für einen Betrieb unter Auslegungslast oder Normallast. Die annuelle Variation der Feuchte wird bestimmt durch die saisonabhängige Evapotranspiration und das Niederschlagsgeschehen. Zu der vielfach zitierten, in verschiedenen Modellen unterstellten betriebsbedingten „vollständigen“ Bodenaustrocknung wird es nicht kommen.

7.6 Landwirtschaftliche Kulturversuche

Ziel der Kulturversuche war zu prognostizieren, wie Bau und Betrieb einer Erdkabelanlage den Zustand und den Ertrag landwirtschaftlicher Kulturen beeinflussen werden. Im Rahmen des "Kabeltests Osterath" wurden dazu 6 Kulturversuche durchgeführt und erfolgreich abgeschlossen. Die Versuche sind begleitend zu den verschiedenen Betriebs Szenarien durchgeführt worden. Die Kulturen Kartoffeln (2012) und Körnermais standen während der gesamten Vegetationszeit unter dem Einfluß der *technischen Maximallast*. Dabei handelt es sich um den thermischen Extremfall, der mit der Kabelanlage erzeugt werden konnte. Die thermischen Bedingungen sind daher im Hinblick auf den Netzbetrieb nicht repräsentativ. Der im Anschluß daran gepflanzte Winterweizen war zum Zeitpunkt der Saat und des Auflaufens ebenfalls den extremen Bedingungen der *technischen Maximallast* ausgesetzt. Im Januar wurde die Last auf *Auslegungslast* zurückgefahren. Die drei danach angelegten Kulturversuche wurden bei Netzbetrieb deutlich unterhalb der *Normallast* durchgeführt.

7.6.1 Kulturversuch mit Kartoffeln

Gepflanzt wurden zunächst Kartoffeln. Angelegt wurden drei Versuchspartellen auf den verschiedenen Bettungsmaterialien und eine Kontrollfläche außerhalb. Obwohl der Versuch unter ungünstigsten Ausgangsbedingungen unmittelbar nach der Rekultivierung erfolgt war, zeigte sich ein normaler Kulturverlauf. Die Kultur war sowohl auf der Kontrolle als auch auf den Versuchspartellen ohne erkennbare Unterschiede im Wuchs aufgelaufen. In beiden Fällen etablierte sich eine wüchsige Kultur mit normalem Wachstumsverlauf. Zwischen den Versuchspflanzungen auf der Trasse und denen der Kontrolle ergaben sich auch zum Ende der Kulturperiode keine erkennbaren Unterschiede (Abb. 29, 30, 31).



Abbildung 29: Kultur nach dem Auflaufen der Pflanzen
Versuchs- (links) und Kontrollfläche (rechts)



Abbildung 30: Geschlossene Kultur am 24.6.2011.
Versuchsfläche (links) Kontrollfläche (rechts)



Abbildung 31: Kultur kurz vor der Reife am 12.7.2011.
Versuchsfläche (links) Kontrollfläche (rechts)

7.6.2 Kulturversuch mit Körnermais

Etwa zwei Wochen nach der Aussaat war der Mais auf den Versuchspartzen aufgelaufen und ca. 2 bis 5 cm hoch (Abb. 32). Auf der Kontrollfläche war hingegen noch kein Austrieb erkennbar. Weitere 4 Wochen danach hatten die Pflanzen auf den Versuchspartzen bereits eine Höhe von 40 - 60 cm erreicht. Auf der Kontrolle waren sie tendenziell kleiner. Im August war die Kultur auf allen Partzen in optimalem Zustand (Abb. 33). Der Blütenansatz war in vollem Gange. Anfang September setzte die Reife ein. Diese war auf den Versuchsfächen tendenziell weiter vorangeschritten. In der zweiten Septemberhälfte setzte dann eine erkennbare Differenzierung des Reifeprozesses zwischen den thermisch am stärksten beeinflussten Bereichen im Zentrum der Trasse und den außerhalb liegenden Bereichen ein. Der Reifeprozess war unmittelbar über dem zentralen Leiter deutlich weiter vorangeschritten. Betroffen davon war eine Zone mit einer Ausdehnung über eine bis drei Pflanzreihen. Ende Oktober war der Mais flächendeckend gereift (Abb. 34). Die Kultur zeigte über die gesamte Vegetationsperiode sowohl auf der Versuchsfäche als auch auf der Kontrolle einen insgesamt normalen Verlauf ohne Auffälligkeiten. Es traten keine erkennbaren Wachstumsanomalien, Ernährungsstörungen oder biotische Schäden auf.



Abb. 32: Zustand der Versuchsflächen nach der Aussaat am 15.5.2012
 (Versuchsparzelle: links; Kontrolle: rechts)



Abb. 33: Zustand der Maiskulturen am 20.8.2012
 (Hintergrund: Kontrolle; Vordergrund: Parzelle "Magerbeton"; rote Linie: Parzellengrenze)



Abb. 34: Zustand der Maiskultur am 29.10.2012
 Versuchs- (links) und Kontrollfläche (rechts)

7.6.3 Kulturversuch mit Winterweizen

Zum Zeitpunkt der Einsaat im November 2012 waren die Bodentemperaturen im Bereich des Keimbettes auf unter 8 °C abgesunken. Mit einem schnellen Austrieb war daher nicht zu rechnen. Auf der Trasse waren die Temperaturen im Vergleich zur Kontrolle erhöht. An der Bodenoberfläche betrug die Temperaturdifferenzen bis zu 2 K. In 20 cm Tiefe waren die Unterschiede um bis zu 3 K gerichtet höher.

Anfang Dezember war die Saat auf der Trasse aufgelaufen. Die Keimlinge erreichten hier eine Größe von ca. 5 bis 15 Millimeter. Der Austrieb konzentrierte sich auf das Zentrum der Trasse. Auf der Kontrolle war der Austrieb bisher nicht erfolgt (Abb. 35). Zwei Wochen später war die Saat auch auf der Kontrolle aufgelaufen. Die Keimlinge waren signifikant kleiner als auf den Versuchspartellen. Anfang Juni waren die Kulturen schließlich flächendeckend geschlossen und sehr vital (Abb. 36). Die Kontrollfläche lag jedoch im Höhenwachstum und im Entwicklungszustand insgesamt etwas zurück. Der



Abb. 35: Zustand der Kulturen am 4.12.2012
Versuchsfläche (links) und Kontrolle (rechts)



Abb. 36: Zustand der Kulturen am 3.6.2013
Versuchsfläche (links) und Kontrolle (rechts)



Abb. 37: Übersicht Winterweizen unmittelbar vor der Ernte
(Vordergrund: Kontrolle; Hintergrund Versuchspartzellen)

Ährenansatz war auf den Versuchspartzellen deutlich weiter vorgeschritten. Die unmittelbar über den Kabeln wachsende Kultur war höher, später auch in der Ährenentwicklung und dem Reifegrad weiter. Anfang August war der Weizen schließlich auf allen Partzellen reif (Abb. 37). Die ursprünglichen Unterschiede im Reifegrad hatten sich nivelliert. Die Feuchtegehalte der Weizenkörner waren auf allen Flächen unter 15 % gesunken.

7.6.4 Kulturversuche mit Gerste, Raps und Kartoffeln

Die Versuche mit Sommergerste, Winterraps und Kartoffeln 2016 wurden erstmals unter den Bedingungen des realen **Netzbetriebs** durchgeführt. Die Auslastung der Anlage lag dauerhaft unter 50 % der erwarteten Normallast. Die Wärmeemission war deshalb weitaus geringer als bei den zuvor durchgeführten Kabeltests. In der ökologisch relevanten Oberbodenzone bewegte sich die Temperaturerhöhung im Rahmen der kleinstandörtlichen räumlichen Variation der Bodentemperatur. Thermische, den Ertrag landwirtschaftlicher Kulturen beeinflussende Effekte, sind daher weitestgehend auszuschließen.

Beim derzeitigen Netzbetrieb kam es in keinem Fall zu einem unterschiedlichen Wuchsverhalten oder sonstigen Auffälligkeiten zwischen Trasse und Kontrolle. Thermisch bedingte Effekte, wie ein früheres Auflaufen der Saat oder eine frühere Abreife, waren angesichts der fehlenden Temperaturdifferenzierung im Oberboden ohnehin nicht zu erwarten. Eine detaillierte Dokumentation der Versuche und deren Ergebnisse findet sich im Abschlußbericht zu den Feldversuchen (TRÜBY, 2016).

Das Ausbleiben thermischer Effekte im Wurzelraum und das faktisch gleiche Wuchsverhalten der Kulturen zeigen, daß vom Bauwerk selbst ebenfalls keine erkennbaren Effekte ausgehen. Dies, obwohl für die Tiefbaumaßnahmen und für die Rekultivierung kein Bodenschutzkonzept erstellt wurde. Dies sind a priori weit ungünstigere Bedingungen als bei einer sachgerecht ausgeführten Rekultivierung. Im Unterschied zur künftigen Bauausführung mit einer bodenkundlichen Baubegleitung und einem Bodenschutzkonzept wurde mit den Kulturversuchen unmittelbar nach der Fertigstellung des Bauwerks ohne Regenerationsphase oder Zwischenbewirtschaftung für den Boden begonnen. Hinzu kommt, daß für die Rekultivierung keinerlei bauliche Auflagen gemacht wurden. Vielmehr wurde es der ausführenden Firma überlassen, den Kabelgraben zu verfüllen und den Oberboden aufzutragen. Es ist daher eher von

einer suboptimalen Rekultivierung auszugehen, die in diesem Fall offensichtlich zu keinen nachhaltig wirksamen negativen Auswirkungen geführt hat.

7.6.5 Erträge

In Tabelle 2 sind die Ergebnisse der Versuche zusammengefasst. Bei allen Kulturversuchen wurden insgesamt mittlere bis gute Erträge erzielt. Auf den Versuchspartzen waren die Erträge meist höher als auf der Kontrolle. In keinem Fall traten ein über das normale Maß hinausgehender Schädlingsbefall oder sonstige phytopathologische Auffälligkeiten auf.

Tabelle 2: Erträge		
Frischmasse Erntegut (t/ha)		
Frucht	Kontrolle	Trasse
Kartoffeln	26	30,1
Mais	12,5	13,6
Winterweizen	7,7	9,0
Gerste	5,5	5,2
Raps	3,2	3,2
Kartoffeln	17,2	23,7

Bei allen in Osterath durchgeführten Pflanzversuchen ergaben sich unter sehr ungünstigen Prämissen keinerlei Hinweise auf substantielle Wachstumsänderungen oder Ertragseinbußen. In fünf von sechs Versuchen waren die Erträge im Bereich der Trasse gleich oder tendenziell höher als auf der Kontrolle.

7.6.6 Bewertung

Aus den in Osterath durchgeführten Kulturversuchen und der im "Freiburger Experiment" angelegten Demo-Pflanzung ergibt sich ein sehr eindeutiger, in sich geschlossener Befund. Aus keinem der Versuche ergaben sich Hinweise darauf, daß es durch die Anlage und den Betrieb von Erdkabelanlagen zu Ertragseinbußen oder sonstigen negativen Einflüssen auf landwirtschaftliche Kulturen kommt. Dies gilt sowohl im Hinblick auf die thermischen Auswirkungen als auch auf das Bauwerk selbst, wenn die Bauarbeiten schonend und die Rekultivierung sachgerecht ausgeführt werden. Für die Befürchtungen aus der Landwirtschaft, die Bodenerwärmung durch den Betrieb von Erdkabelanlagen könne zu Ertragseinbußen führen, ergaben die Untersuchungen keinerlei Hinweise. Viel eher ist zu erwarten, daß das Wachstum durch die ohnehin nur geringe Temperaturerhöhung stimuliert wird. Wenngleich es sich um Feldversuche ohne Wiederholungen handelt und eine statistische Absicherung dadurch nicht möglich ist, sind die Ergebnisse in ihrer Gesamtheit eindeutig.

Es besteht kein Zweifel daran, daß in der für die landwirtschaftliche Produktion relevanten Oberbodenzone eine gewisse Erwärmung auftreten wird. Aus dem bisherigen Netzbetrieb spricht allerdings vieles dafür, daß die Erwärmung gering und von untergeordneter Relevanz sein wird. Grundsätzlich können die Keimung und das Auflaufen der Kulturen beschleunigt werden. Dies zeigte sich bei Mais und Winterweizen eindeutig. Diese Effekte sind jedoch ausschließlich unter *technischer Maximallast* bzw. dauerhaft angelegter *Auslegungslast*, also bei einer unrealistisch hohen Bodenerwärmung aufgetreten. Beim bisherigen *Netzbetrieb* sind derartige Effekte aufgrund zu geringer Oberbodenerwärmung nicht aufgetreten. Als Prognose ergibt sich daraus, daß diese Effekte bei *Normallast* zwar nicht völlig auszuschließen sind, daß sie jedoch sehr unwahrscheinlich sind und allenfalls ansatzweise auftreten werden.

Die vielfach angeführte frühere Abreife der Kulturen ist grundsätzlich ebenfalls in Betracht zu ziehen und nicht völlig auszuschließen. Bei bestimmten Kulturen könnte dies durchaus ein gewisses Problem

darstellen. Dies wäre dann der Fall, wenn Feldfrüchte im Bereich der Trasse aufgrund eines unterschiedlichen Reifegrades gesondert geerntet werden müssten. Zutreffend wäre dies vor allem für Sonderkulturen, eventuell auch für Silomais, nicht jedoch für Kartoffeln, Körnermais, Sommergetreide etc. Der unter extremen Betriebsbedingungen beobachtete Kulturvorsprung von 10 - 14 Tagen wird im normalen **Netzbetrieb** mit Sicherheit nicht auftreten. Die zu erwartenden Effekte werden daher sehr gering sein und sich allenfalls tendenziell bemerkbar machen. Es wird daher auch keine gesonderte Ernte im Trassenbereich erforderlich sein.

Negative Auswirkungen könnten indirekt auch von einer durch Bodenerwärmung verursachten Bodenaustrocknung ausgehen. Diese würde - träte sie tatsächlich auf - höchstwahrscheinlich zu viel gravierenderen Effekten auf das Wachstum führen als die Effekte, die durch die Erwärmung zu erwarten sind. In den vorangegangenen Versuchen hat sich jedoch gezeigt, daß die Bodenfeuchte auch bei extrem hoher, langfristig anhaltender Wärmeemission von der Erwärmung nicht beeinflusst wird, sondern dem witterungs- und saisonabhängigen Jahresgang folgt. Das gilt insbesondere für den Oberboden. Hier sind keinerlei Effekte feststellbar. Die Bodenerwärmung ist deshalb im Hinblick auf die befürchtete Bodenaustrocknung irrelevant.

Insgesamt ist festzustellen, daß die Wärmeemission einer Erdkabelanlage bei den bisher untersuchten landwirtschaftlichen Kulturen allenfalls marginale Auswirkungen haben wird. Es gibt keinerlei Hinweise darauf, daß die Bodenerwärmung zu Ertragseinbußen führen könnte. Weiterhin zeigte sich, daß durch eine bodenschonende Bauweise und eine sachgerechte Rekultivierung nachhaltige, die Landwirtschaft beeinträchtigende Auswirkungen verhindert werden können.

8 Monitoring Raesfeld

Die Erdkabeltrasse Raesfeld-Borken ist vom Gesetzgeber als Pilotprojekt für künftige Anlagen angelegt worden. Als Betreiber der Kabelanlage führt die Amprion GmbH ein ökologisches Monitoring durch. Der Fokus ist dabei auf thermische und hydrologische Effekte im Boden gerichtet. Parallel dazu werden faunistische Untersuchungen durchgeführt. Weiterhin sind landwirtschaftliche Kulturversuche vorgesehen, die von der Landwirtschaftskammer Nordrhein-Westfalen wissenschaftlich begleitet werden. Das Monitoring ist langfristig angelegt.

8.1 Auswahl und Ausstattung des Meßfeldes



Abb. 38: Lage des Meßfeldes

Das Meßfeld wurde analog zum "Freiburger Experiment" und zum "Kabeltest Osterath" orthogonal zur Trasse angelegt (Abb. 38). Außerhalb der Trasse wurde eine Kontrolle eingerichtet. Der Standort wurde zuvor ackerbaulich genutzt. Der Boden ist frei von Grund- und Stauwasser. Dies war eine der Grundvoraussetzungen, um bezüglich der zu erwartenden thermischen Effekte von möglichst ungünstigen Voraussetzungen auszugehen. Ein Auftreten von Grundwasser im Bereich der Bettung bzw. der Kabelanlage hätte zu einer weitestgehenden Eliminierung thermischer Effekte geführt.



Abb. 39: Plaggenesch nach der Rekultivierung

Der Bodentyp ist ein typischer Plaggenesch (Abb. 39). Plaggenesche sind Böden mit einem besonders mächtigen Humuskörper, der über mehr als ein Jahrhundert anthropogen aufgebaut wurde. Es handelt sich deshalb um außergewöhnlich wertvolle, sehr fruchtbare Böden. In seiner ursprünglichen Lagerung hatte der Humuskörper eine Mächtigkeit von 60-90 cm. Das Substrat ist überwiegend sandig mit variablen kleineren Beimischungen von Ton und Schluff. Es ist vielfach geschichtet. Im Untergrund finden sich eindrucksvoll ausgeprägte reliktsche Stauwasserphänomene. Die Kabelanlage besteht aus den symmetrisch angeordneten Systemen A und B, die durch einen 4 m breiten, während der Bauarbeiten als Baustraße genutzten Streifen getrennt werden. Beide Systeme bestehen aus jeweils 2 weiteren,

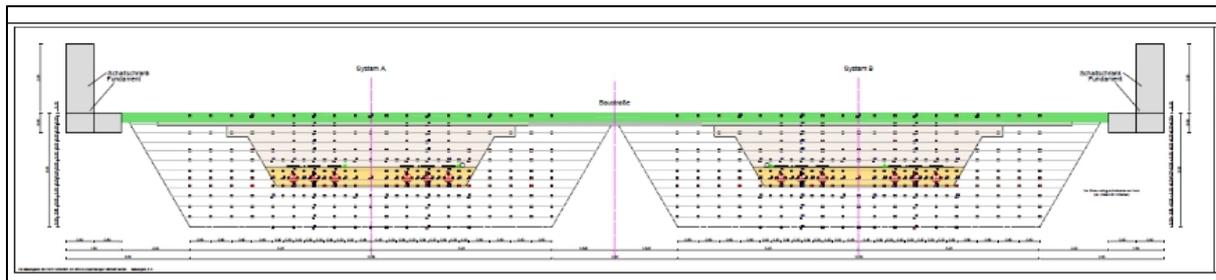


Abb. 40: Installationsplan

ebenfalls symmetrisch angeordneten Untersystemen A1/A2 und B1/B2. Die Sensoren sind in einer Ebene orthogonal zur Kabelanlage angeordnet. In einem Abstand von ca. 2 m seitlich zur Trasse befinden sich jeweils 1 Schaltschrank mit den Meßeinrichtungen und ein Kabelschacht. Um eine hinreichende räumliche Auflösung der Temperaturprofile zu erreichen, wurde eine sehr große Anzahl an Sensoren eingesetzt. Insgesamt wurden 591 Thermistoren und 138 Feuchtesonden symmetrisch zur Trassenachse eingebaut (Abb. 40). Der als Baustraße genutzte Zwischenstreifen wurde nicht bestückt.



Abb. 41: Instrumentierung am Schutzrohr, Verguss mit ZFSV und Sensorfeld

Die größten thermischen Effekte werden in einer sehr engen Zone um die Kabelanlage auftreten. Dem entsprechend intensiv war dort auch die Instrumentierung (Abb. 41 links). Mit den an der Schutzrohr-oberfläche angebrachten Feuchtesonden könnte eine Austrocknung des Bettungsmaterials räumlich hoch aufgelöst erfaßt werden.

Als Bettungsmaterial wurde ausschließlich ZFSV verwendet, der sich in den Voruntersuchungen als besonders geeignet erwiesen hatte (Abb. 41 Mitte).

Abb. 41 (rechts) zeigt das Meßfeld mit den beiden Schaltschrank und der meteorologischen Station unmittelbar nach der Fertigstellung.

8.2 Temperaturen und Feuchte

Die beiden Loggerstationen sind im Frühjahr 2015 vollumfänglich in Betrieb genommen worden. Verwertbare Meßergebnisse mit kongruenten Datensätzen existieren seit Februar 2015.

8.2.1 Kabelauslastung

Die Kabelanlage war im Jahr 2015 zu Testzwecken erstmals unter Spannung gesetzt worden. Die Dauer des Tests war kurz und die Übertragungsleistung vernachlässigbar gering. Im Juli 2016 wurde die Anlage schließlich erstmals mit geringer und stark variierender Last dem Netz zugeschaltet. Betriebsbedingte thermische Effekte sind bis zu diesem Zeitpunkt ausgeschlossen. Sofern sich dennoch Effekte ergeben sollten, sind diese dem Bauwerk bzw. der Baumaßnahme zuzuordnen. Die entsprechenden Stromdaten liegen dazu leider nicht vor.

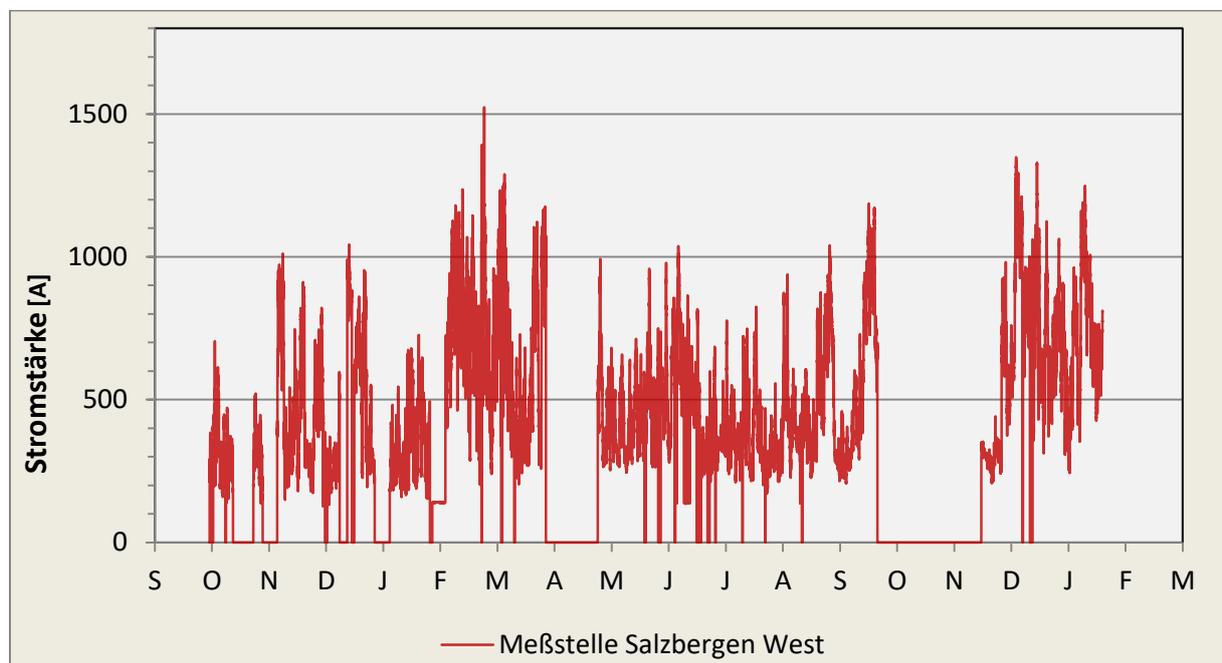


Abb. 42: Kabelauslastung im Zeitraum 10/2016 bis 02/2018 [A]

Im Oktober 2016 ist erstmals ein annähernd kontinuierlicher Betrieb aufgenommen worden (Abb. 42). Die Kabelauslastung variierte dabei über einen weiten Bereich, da die Anlage mehrfach für einige Tage ausgeschaltet wurde. Die Stromstärken waren im Durchschnitt < 500 A. Spitzenwerte erreichten mehrfach über 1000 A. Eine erste Zäsur ergab sich mit der Unterbrechung der Übertragung Mitte Februar

2017. Nach Wiederinbetriebnahme erreichte die Auslastung ein deutlich höheres Niveau. Im März 2017 traten erstmals Stromstärken > 1500 A auf. Eine weitere Zäsur folgte durch eine längere Unterbrechung im Zeitraum April bis Mai 2017. Im Anschluß daran wurde die Auslastung auf ein mittleres Niveau um 500 A reduziert. In der Zeit von Oktober bis November blieb die Anlage erneut für längere Zeit abgeschaltet. Danach wurde die Auslastung auf das bisher höchste Niveau gesteigert, wobei es kaum noch zu Unterbrechungen kam. Im Januar 2018 erfolgte der Betrieb kontinuierlich mit Stromstärken > 500 A.

Bei dem bisherigen Betrieb am Netz traten 4 verschiedene, über längere Zeiträume anhaltende Lastniveaus auf (Abb. 42; Tab. 3). Die mittleren Stromstärken variierten dabei zwischen knapp 300 A und 700 A. Die Stromstärke variierte zeitlich außerordentlich stark. Während der gesamten Zeit kam es neben den längeren Abschaltphasen auch immer wieder zu kurzfristigen Betriebsunterbrechungen.

Die durch den Anlagenbetrieb bedingten thermischen Effekte sind nur im Kontext mit der Auslastung der Kabelanlage zu werten. Eine Bezugsgrundlage dafür ist die **Auslegungslast**. Es handelt sich dabei um die Last, mit der die Kabelanlage dauerhaft betrieben werden kann. Mit dem bisherigen Betrieb ist diese Last nicht erreicht worden. Der bisher höchste mittlere Auslastungsgrad mit 26 % wurde im Frühjahr 2018 erreicht (Tab. 3). Bei den kurzfristig aufgetretenen Übertragungsspitzen stieg die Auslastung auf bis zu 55 %.

Als weitere Bezugsgröße dient die **Normallast**, die auf 60 % der Auslegungslast geschätzt wird. Bezogen auf Normallast ist die bisherige Kabelauslastung deutlich höher. Hier wäre von 43% Auslastung auszugehen.

Tabelle 3: Durchschnittliche Kabelauslastung (Meßstelle Salzbergen West)				
Zeitraum	11.10.16 - 8.2.17	16.2.- 25.3.17	10.5.-5.10.17	18.12.17-8.2.18
Stromstärke [A]	289	623	443	706
% Auslegungslast	11	23	16	26
% erw. Normallast	18	38	27	43

8.2.2 Bodentemperaturen

Die Bodentemperaturen (Abb. 43) folgten nach Tiefenstufen differenziert dem typischen saisonalen Jahresgang mit ausgeprägten Extrema im Zeitraum Juni bis August und Januar bis März. Die annuellen Temperaturamplituden variierten im Oberboden je nach Witterung zwischen 20 K bis 30 K. Bedingt durch das Witterungsgeschehen streuen die Temperaturen hier wesentlich stärker als im Unterboden. Zum Unterboden hin werden die Amplituden kontinuierlich kleiner. Die Amplituden variieren hier nur noch um 10 K und es besteht auch kaum mehr eine interannuelle Variation. Aufgrund der Trägheit des Systems verliert der Einfluß des Witterungsgeschehens mit der Tiefe zunehmend an Bedeutung. Dennoch ist selbst in eine Tiefe von 335 cm der saisonal bedingte Jahresgang noch deutlich ausgeprägt. Der Wärmestrom aus der Atmosphäre prägt den Temperaturverlauf auch in dieser Tiefe dominant.

Bemerkenswert ist auch der mit der Tiefe einhergehende zeitliche Versatz der Jahresgänge, der auf die Trägheit des Systems zurückzuführen ist. Charakteristisch sind weiterhin die alljährlichen Inversionen

der Temperaturgradienten, die regelmäßig in den Monaten April/Mai und Oktober/November auftreten. Bedingt durch den Wärmestrom aus der Atmosphäre sind die Temperaturen im Sommer an der Oberfläche höher als im Untergrund. Während des Sommers erfolgt somit ein permanenter Wärmestrom von der Atmosphäre in den Boden. Ein Wärmefluß zur Atmosphäre hin wird dadurch verhindert. Erst mit dem Einsetzen des Winters fließt die Wärme in umgekehrter Richtung zur Atmosphäre hin ab.

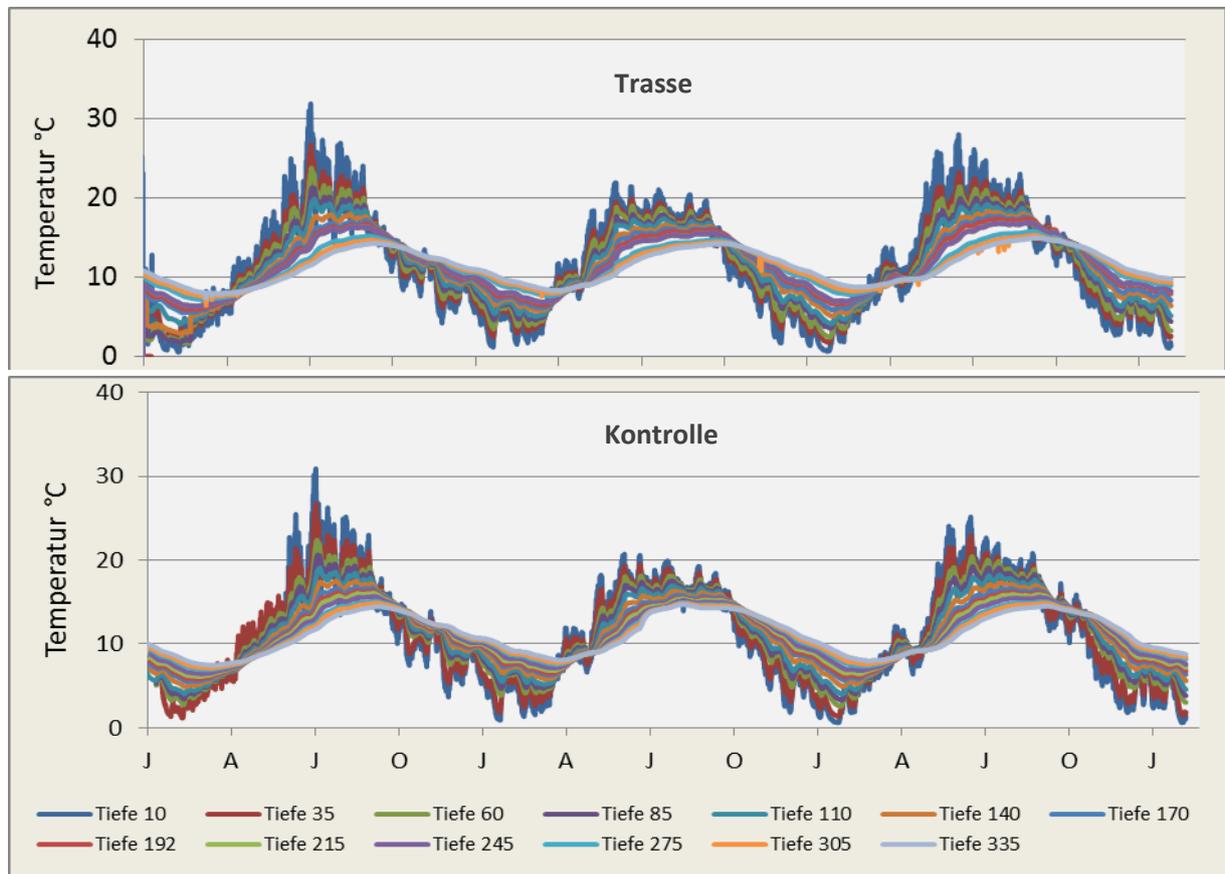


Abb. 43: Vertikale Temperaturprofile auf der Trasse und der Kontrolle

Die Temperaturprofile von Trasse und Kontrolle zeigten keinerlei erkennbare Unterschiede (Abb.43). Vor dem Hintergrund der räumlichen Variation ergibt sich ein nahezu identischer Temperaturverlauf mit annähernd kongruenten Kurvenscharen. In beiden Fällen wird das Witterungsgeschehen bis ins Detail nachgezeichnet. Kontrolle und Trasse verhalten sich demnach thermisch weitestgehend gleich. Die Baumaßnahme und die damit verbundene Destrukturierung des Bodenmaterials haben zu keinen substantziellen Veränderungen im thermischen Verhalten geführt. Dies gilt auch für das Bauwerk. Weder die Kabelanlage noch die ZFSV-Bettung haben erkennbare Veränderungen der Temperaturprofile bewirkt.

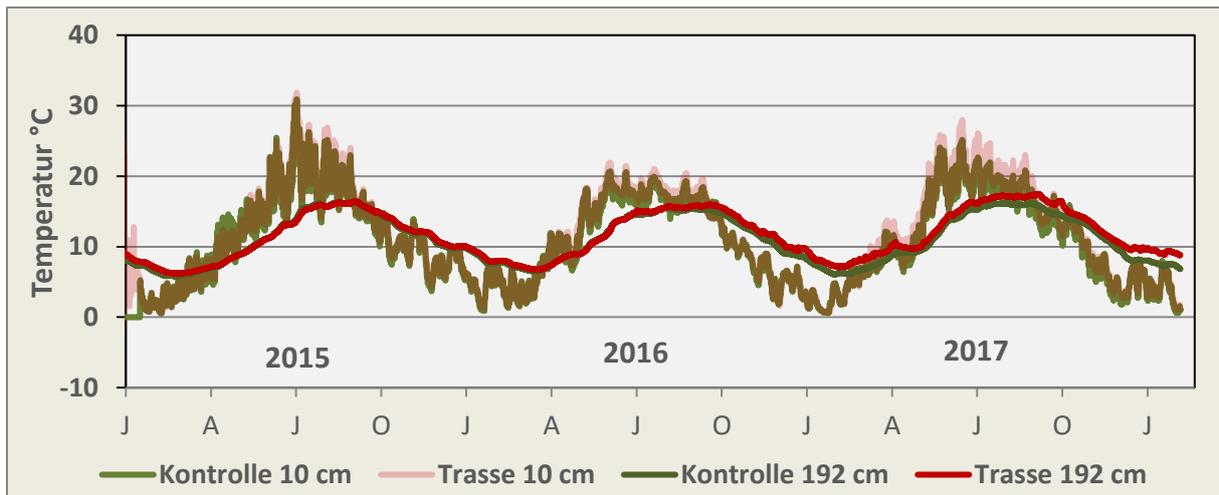


Abb. 44: Absoluttemperaturen Trasse-Kontrolle im Oberboden und an der Schutzrohroberfläche

Für die Evaluation betriebsbedingter Effekte ist eine detailliertere Betrachtung notwendig (Abb. 44). Durch den Betrieb mit nur mäßiger Auslastung sind die Effekte gering. Sie konzentrieren sich auf die Bettung bzw. die unmittelbare Umgebung der Kabel. Bis zur Inbetriebnahme der Anlage im Juli 2016 sind die Temperaturen an der Schutzrohroberfläche identisch mit denen der Kontrolle. Die Ganglinien sind deckungsgleich. Danach setzte eine lastabhängige Differenzierung der Temperaturen zwischen Trasse und Kontrolle ein.

Im Oberboden streuen die Temperaturen witterungsbedingt stark. Doch auch hier sind die die Ganglinien weitgehend kongruent. In den Sommermonaten deutet sich allerdings eine geringfügige Differenzierung an. Auf der Trasse sind die Temperaturen stets etwas höher als auf der Kontrolle.

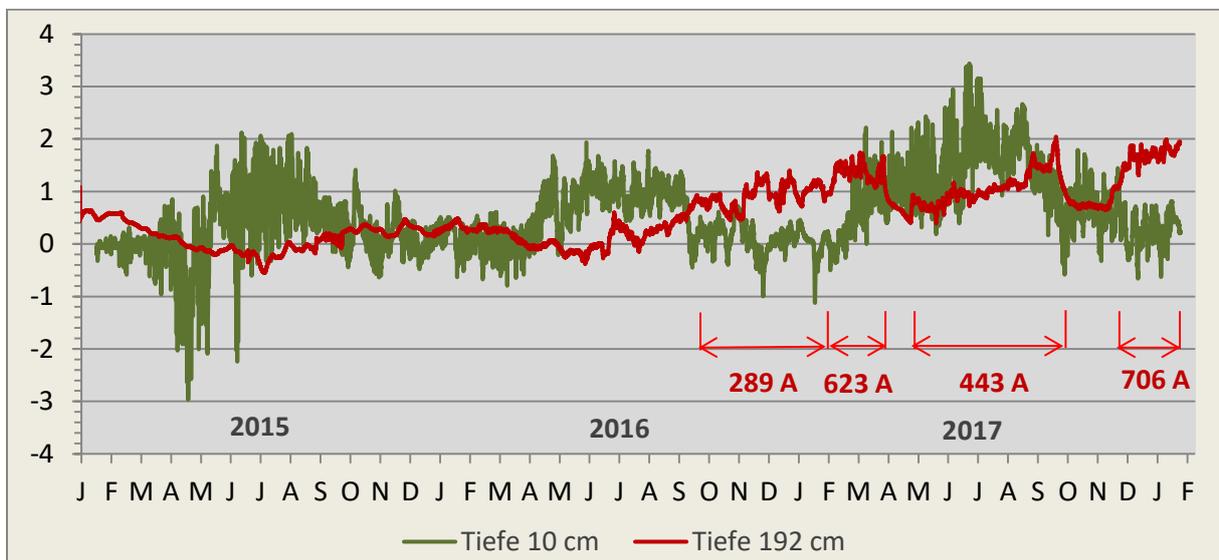


Abb. 45: Temperaturdifferenzen Trasse-Kontrolle an der Bodenoberfläche (10 cm Tiefe) und auf dem Niveau der Kabel (Schutzrohroberfläche)

Im Januar/Februar 2015 kam es an den Schutzrohren erstmals zu geringfügig erhöhten Temperaturen, was vermutlich auf den Testbetrieb im Zuge der Inbetriebnahme der Anlage zurückzuführen ist. Die Temperaturdifferenzen waren $< 1\text{K}$ (Abb. 45). Daten zur Stromlast liegen dazu leider nicht vor.

Danach folgt ein etwa 15-monatiger Zeitabschnitt ohne Stromübertragung. Die Temperaturdifferenzen sind im Durchschnitt gleich Null.

Nach der Inbetriebnahme im Juli 2016 kam es an den Schutzrohren im unmittelbaren Kabelbereich zu einer mit der Last kontinuierlich ansteigenden Erwärmung. Diese war im Vergleich zu den vorangegangenen Experimenten in Freiburg und Osterath minimal. Die maximale Temperaturdifferenz zwischen Trasse und Kontrolle wurde im Oktober 2017 erreicht. Sie betrug selbst an den **Schutzrohroberflächen** lediglich ca. 1,5 K (Abb. 44). Der Betrieb erfolgte in diesem Zeitraum mit durchschnittlich ca. 25% der Auslegungslast, wobei die Last nicht anhaltend war. Durch die temporäre Reduzierung auf annähernd Null, kam es immer wieder zur Abkühlungsphasen, in denen die Temperaturen erfahrungsgemäß rasch absinken.

Im folgenden Zeitabschnitt lag die mittlere Auslastung mit nur 16 % der Auslegungslast deutlich niedriger, was an der Schutzrohroberfläche entsprechend niedrigere Temperaturdifferenzen um ca. 1 K zur Folge hatte.

Im letzten Zeitabschnitt (Dez. 2017 - Feb. 2018) lag die Kabelauslastung wieder höher. Dementsprechend stiegen auch die Temperaturdifferenzen an der Schutzrohroberfläche an. Sie erreichten jetzt im Mittel 1,8 K.

8.2.3 Interpretation und Bewertung

Aus dem Pilotprojekt Raesfeld liegen erstmals Messungen am realen Objekt vor. Es ist erstmals möglich, betriebsbedingte thermische Effekte mit bekannten Übertragungslasten aus dem Netzbetrieb zu verknüpfen, wenngleich die im Routinebetrieb erwartete **Normallast** noch nicht erreicht wurde. Die bisher festgestellten Effekte ergeben im Hinblick auf einen kontinuierlichen Netzbetrieb unter Normallast deshalb noch kein abschließendes Bild. Die Ergebnisse ermöglichen es jedoch die thermischen Effekte weiter einzuzugrenzen und die Prognosen sicherer zu machen.

Betriebsbedingte thermische Effekte waren bisher nur an den Schutzrohroberflächen feststellbar. Die Temperaturdifferenzen zwischen Trasse und Kontrolle waren in Relation zur Kabelauslastung selbst dort unerwartet klein. Diese erreichte über längere Zeit bis zu einem Viertel der Auslegungslast und bewirkte eine Temperaturerhöhung < 2 K. Eine sichere Prognose für die Erhöhung bei dauerhafter Auslastung mit Auslegungslast lässt sich daraus noch nicht erstellen. Gleichwohl lässt sich anhand der Befunde aus dem "Kabeltest Osterath" zumindest eine Einschätzung vornehmen. Dort ergab sich ein annähernd linearer Zusammenhang zwischen Auslastung und Temperaturerhöhung an den Schutzrohren. Demnach würden die Temperaturen an den Schutzrohren in Raesfeld bei **Auslegungslast** um 8 K steigen. Die im Kabeltest Osterath festgestellte Differenz von 20 K würde damit weit unterschritten. Zu berücksichtigen ist hierbei jedoch, daß ein dauerhafter Betrieb unter Auslegungslast nicht zu erwarten ist.

Für die Temperaturen im Oberboden bedeutet dies, daß die aus dem "Kabeltest Osterath" prognostizierte Erhöhung von 2 K ebenfalls möglicherweise sogar deutlich unterschritten wird. Dafür spricht auch die um 45 cm größere Überdeckung der Kabelanlage in Raesfeld, die zu einer weiteren Minderung von Temperatureffekten an der Oberfläche beitragen wird.

Auf den ersten Blick widersprüchlich dazu erscheinen die gemessenen Temperaturdifferenzen an der Bodenoberfläche. Die Differenzen erreichen eine ähnliche Größenordnung wie diejenigen in unmittelbarer Umgebung der Kabel. Ein kausaler Zusammenhang ist physikalisch ausgeschlossen. Die auffällige

saisonale Differenzierung steht zudem in keinerlei erkennbarem Zusammenhang zum Betriebsgeschehen der Kabelanlage. Maximale Differenzen traten stets in den Sommermonaten und auch schon vor der Inbetriebnahme der Anlage auf. Vermutlich ist dies Folge einer partiellen Überschattung der Kontrolle durch die angrenzenden landwirtschaftlichen Kulturen.

8.3 Bodenfeuchte

8.3.1 Oberboden

Die Bodenfeuchte war nach Tiefenstufen differenziert. Im Oberboden folgte die Bodenfeuchte ähnlich der Bodentemperatur einem saisonabhängigen Jahresgang (Abb. 46), der maßgeblich von der Witterung geprägt wurde. Dies zeigte sich besonders deutlich für den Humuskörper. Die zeitliche Variation der Feuchte war dort deutlich größer als in den nach untenhin anschließenden Horizonten der Verfüllung, wo die Feuchtegehalte kaum noch variieren. Eine saisonale Variation ist dort nur noch angedeutet.

Zwischen Trasse und Kontrolle bestehen keine interpretierbaren Unterschiede. In beiden Fällen folgte der Jahresgang dem Witterungsgeschehen. Die Baumaßnahme hat demnach zu keinen ökologisch relevanten Veränderungen oder gar einer Verschlechterung im Wasserregime des Bodens geführt.

8.3.2 Bettung und Umgebung

In der Bettung und deren unmittelbaren Umgebung ergab sich kaum mehr eine saisonale Differenzierung (Abb. 47). Der Einfluß des Witterungsgeschehens war hier auf gravierende Niederschlagsereignisse reduziert.

Oberhalb der Bettung war die Bodenfeuchte gegenüber der Kontrolle erhöht. Der schon in 85 cm angedeutete Trend setzt sich hier fort. Im Bereich der Bettung traten schließlich signifikante Unterschiede auf. Hier erreichten die Feuchtegehalte im Vergleich zur Kontrolle das Doppelte bis das Dreifache. Die Ursache dafür ist die vom Ursprungszustand abweichende Matrix des ZFSVs. Diese ist durch die Beimischungen aus mineralischer Feinsubstanz insgesamt feinkörniger und feinporöser. Die Porung unterscheidet sich hierdurch signifikant von der der Kontrolle. Dies bewirkte ein deutlich erhöhtes Wasserhaltevermögen. Entsprechend reduziert war dagegen die Wasserleitfähigkeit, was sich offensichtlich auch auf die Zone oberhalb der Bettung auswirkte und dort zu erhöhten Wassergehalten führte.

Die relativ hohen Wassergehalte in der Bettung könnten durch den Restwassergehalt aus der Herstellung des ZFSVs bedingt sein. Im Bereich der Schutzrohre setzte nahezu zeitgleich mit der Inbetriebnahme der Anlage eine Abnahme der Feuchte auf ein niedrigeres Niveau ein. Es könnte sich dabei um einen Wasserentzug handeln, der durch die Aushärtung des ZFSVs bedingt ist. Danach folgte witterungsbedingt wieder ein gewisser Anstieg der Feuchte, der im gesamten Trassenkörper festzustellen ist. Als Trend deutet sich jedoch an, daß sich die Feuchte langfristig auf einem Niveau um 20 % einstellen wird. Dies entspricht auch den Erfahrungen aus dem "Kabeltest Osterath".

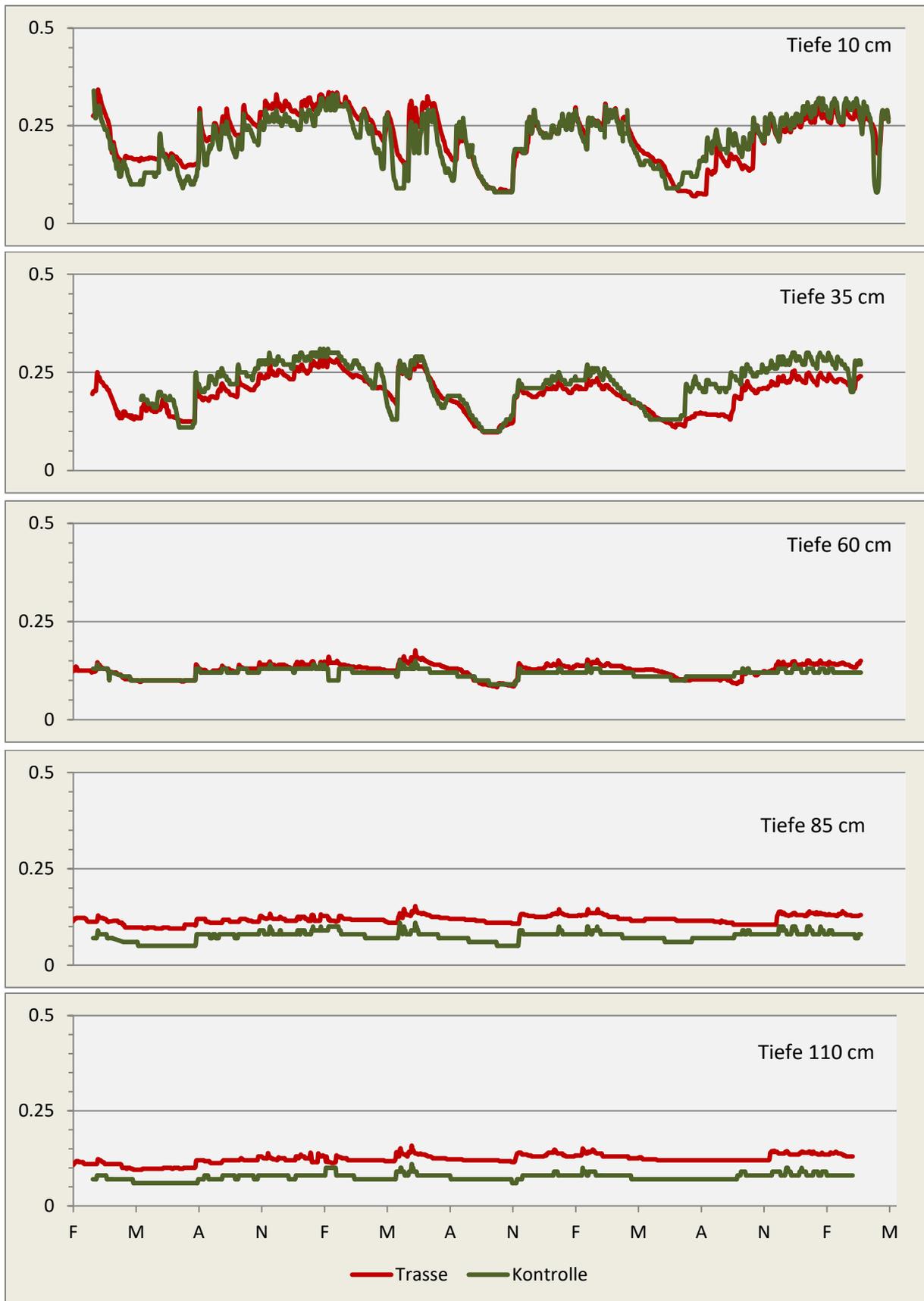


Abb. 46: Bodenfeuchte im oberen verfüllten Bereich der Trasse

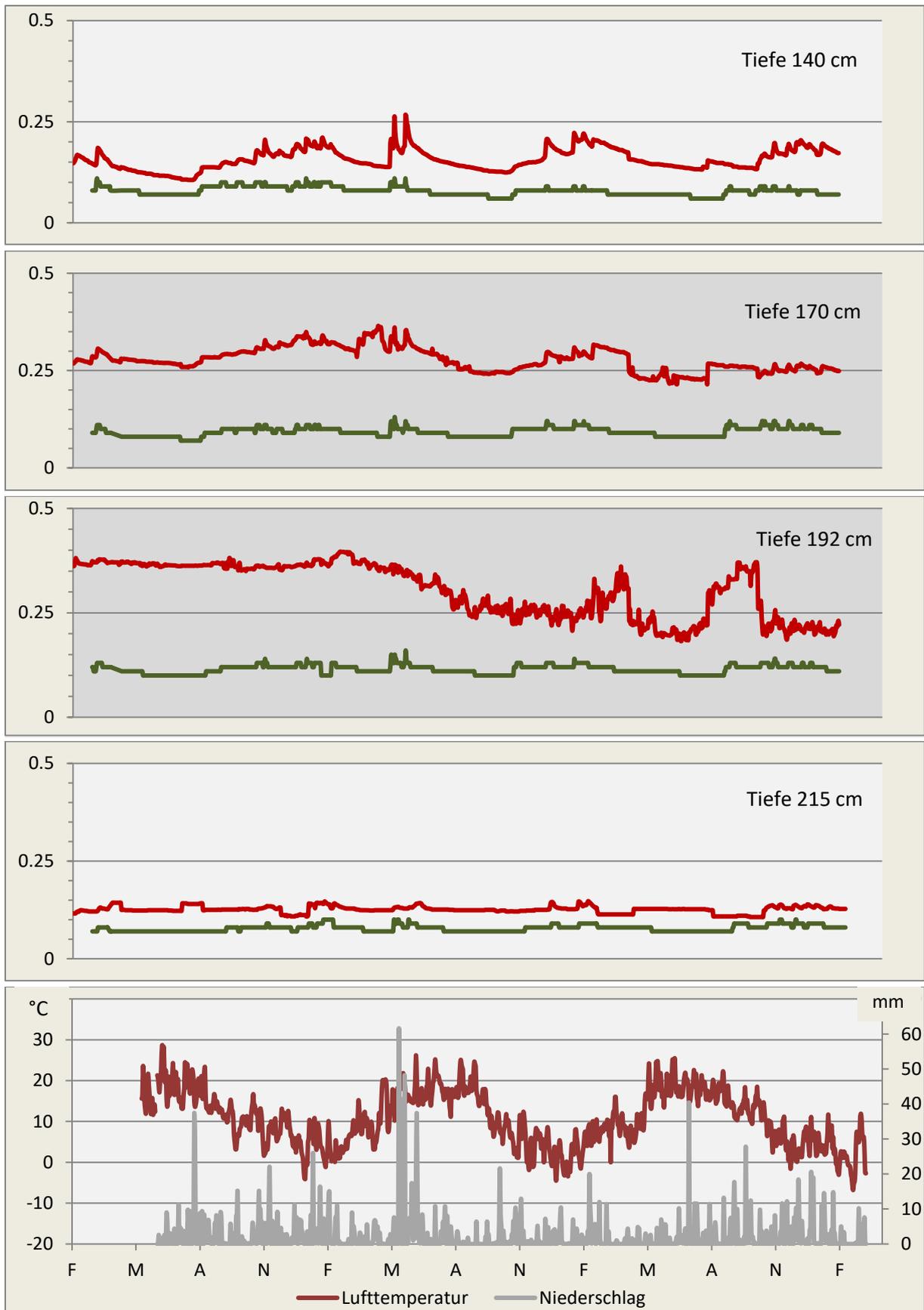


Abb. 47: Lufttemperatur, Niederschlag und Bodenfeuchte im unteren Trassenbereich (bestehend aus Verfüllung, Bettungskörper und Untergrund)

8.3.3 Interpretation und Bewertung

Die Bodenfeuchte wird in der ökologisch relevanten Oberbodenzone weder durch das Bauwerk noch durch den Betrieb nachweisbar beeinflusst. Die geringen Abweichungen zwischen Trasse und Kontrolle sind nicht signifikant. Die Jahresgänge sind weitestgehend kongruent. Durch den horizontweisen Abtrag des Bodens und die schonende, ebenfalls horizontweise erfolgte Wiederverfüllung ist die ursprüngliche Bodenmatrix im oberen Bereich des Trassenkörpers weitgehend unverändert erhalten bzw. wiederhergestellt worden. Es sind daher auch keine Änderung der physikalischen Bodeneigenschaften zu erwarten. Im Hinblick auf das Wasserregime ist die Bodenqualität in keiner Weise beeinträchtigt worden. Die Kabelanlage mit der ZFSV-Bettung ist hingegen als Fremdkörper einzustufen, der sich vom ursprünglichen Zustand erheblich unterscheidet, wenngleich er aus demselben oder zumindest ähnlichem Material hergestellt wurde. Die Wasserspeicherleistung ist durch die Beimischung feinkörnigen Materials gegenüber der Kontrolle deutlich erhöht. Gleichzeitig geht vom Bettungskörper eine gewisse Stauwirkung aus, die zu erhöhten Feuchtegehalten in den darüber liegenden Horizonten führt. Die dadurch bewirkte Erhöhung der Feuchte ist ökologisch und auch im Hinblick auf die landwirtschaftliche Nutzung unbedenklich. Reduzierende Bedingungen werden dadurch nicht erreicht. Die Zone unterhalb der Kabelanlage ist ökologisch irrelevant.

9 Einfluß auf das Lösungs- und Sorptionsverhalten von Nährstoffen

Die Wärmeemission einer Erdkabelanlage kann sowohl in die mikrobiellen Prozesse als auch in die im Boden ablaufenden Lösungs- und Sorptionsreaktionen eingreifen.

Denkbar sind sowohl eine verstärkte Freisetzung von Stoffen als auch eine verstärkte Fixierung durch Ausfällung. Bei den Sorptionsreaktionen ist hingegen ausschließlich eine Begünstigung der Desorption zu erwarten.

Anhand von Laboruntersuchungen sollte eine Einschätzung thermischer Auswirkungen das Lösungsverhalten mineralischer Nährstoffe vorgenommen werden.

9.1 Auswirkungen auf das Lösungsverhalten und die Desorption von Nährstoffen

Mineralische Nährstoffe liegen im Boden in verschiedenen Bindungsformen vor. Sie sind gebunden in chemischen Verbindungen (Salzen), sorbiert an die Bodenaustauscher oder sie sind in der Bodenlösung in ionarer Form enthalten. Bodenökologisch entscheidend sind die sorbierten und die ionar gelösten, mobilen Fraktionen. Diese können von der Pflanze aufgenommen oder auch ausgewaschen werden. Die mobilen Fraktionen stehen in Abhängigkeit von den Umgebungsbedingungen (Feuchte, Temperatur, Stoffeintrag etc.) in ständiger Wechselwirkung mit der Bodenfestsubstanz. Verantwortlich dafür ist eine Vielzahl sich gegenseitig beeinflussender Lösungs- und Fällungsreaktionen sowie Sorptionsprozessen. Das Zusammenwirken dieser Reaktionen ist so komplex, daß es mit den Instrumentarien der Thermodynamik nicht zuverlässig beschrieben werden kann.

Die Löslichkeit chemischer Verbindungen ist temperaturabhängig. Die von einer Erdkabelanlage ausgehende Erwärmung des Bodens wird deshalb auch das Lösungsverhalten von Nährstoffen beeinflussen. In Abhängigkeit von der Lösungsenthalpie einer Substanz kann eine Temperaturerhöhung sowohl eine Steigerung als auch eine Verminderung der Löslichkeit bewirken. Bei endothermen Lösungsreaktionen nimmt die Lösung mit steigender Temperatur zu, bei exothermen Reaktionen nimmt sie ab. Bei

leicht löslichen Salzen sind grundsätzlich geringe Effekte zu erwarten, da diese bei ausreichender Feuchte überwiegend in dissoziierter Form vorliegen.

Sorbierte Substanzen sind im Sinne der Chemie keine Verbindungen. Im Boden erfolgt die Sorption aufgrund elektrostatischer Wechselwirkungen zwischen Ionen und einer geladenen Oberfläche. Bei den im Boden vorhandenen, zur Sorption befähigten Stoffen handelt es sich um den Humus, Tonminerale, Aluminium- und Eisen-Oxide. Die Ladung dieser Substanzen ist meist negativ, so daß bevorzugt Kationen sorbiert werden können. Daraus resultiert die KAK (Kationenaustauschkapazität) des Bodens. An Tonmineralen und Oxiden können partiell auch positive Ladungen auftreten. Deren Anzahl ist jedoch im Vergleich zu den negativen Ladungen sehr gering. Die sorptive Bindung von Stoffen ist im Vergleich zu echten chemischen Bindungen relativ schwach und stets reversibel. Die Zusammensetzung sorptiv gebundener Kationen an den Austauscheroberflächen hängt ab von der Ionenkonzentration der Bodenlösung, der Ionengröße und der Wertigkeit. Sorptionsreaktionen sind schnell ablaufende Reaktionen, die empfindlich auf eine Veränderung der Umgebungsbedingungen reagieren. Es handelt sich vermutlich um exotherme, spontan ablaufende Reaktionen. Dementsprechend wird eine Temperaturerhöhung in der Regel zu einer Verschiebung der Sorptionsgleichgewichte zugunsten der Desorption bzw. einer Freisetzung in die Bodenlösung führen.

Aus bodenökologischer Sicht bedeutet dies, daß es durch eine Bodenerwärmung sowohl zu einer verstärkten Freisetzung als auch zu einer Fixierung von Nährstoffen kommen kann. Eine verstärkte Freisetzung erhöht das Angebot an pflanzenverfügbaren Nährstoffen. Dies kann sich positiv auf die aktuelle Nährstoffversorgung auswirken. Andererseits erhöht sich durch die Freisetzung auch das Risiko der Auswaschung. Dies gilt vor allem für den Bereich guter bis sehr guter Nährstoffversorgung, der bei landwirtschaftlichen Kulturen meist eingestellt wird. Eine temperaturbedingte Verminderung der Löslichkeit kann eine Fällungsreaktion auslösen und der Bodenlösung Nährstoffe entziehen.

9.2 Methoden

Um ein möglichst breites Spektrum an Böden zu berücksichtigen, wurden Untersuchungen an insgesamt 29 verschiedenen Bodentypen durchgeführt. Die ausgewählten Böden repräsentieren ca. 80 % der in der BRD vorkommenden terrestrischen Bodentypen. Das gewählte Temperaturspektrum orientierte sich an der unrealistisch hohen Leitertemperatur von 90 °C.

Die Bestimmung löslicher und austauschbarer Kationen erfolgte durch Extraktion (TRÜBY und ALDINGER, 1986). Zur Erfassung der Temperaturabhängigkeit wurde die Extraktionstemperatur in 10 K-Stufen zwischen 20 °C und 90 °C variiert. Als Extraktionsmittel wurde 0,5 n NH_4Cl -Lösung ohne Zusatz von Puffersubstanzen verwendet.

9.3 Ergebnisse

Kalium

Kalium ist ein wichtiges Pflanzennährelement mit einer Reihe von spezifischen Eigenschaften, die es von anderen Nährelementen abhebt. An den Bodenaustauschern ist die Kaliumsättigung meist

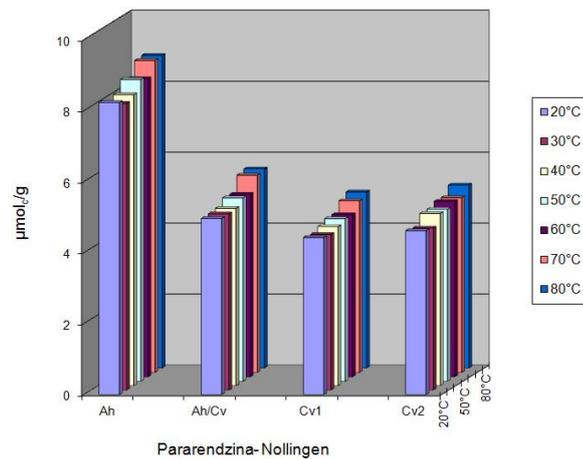
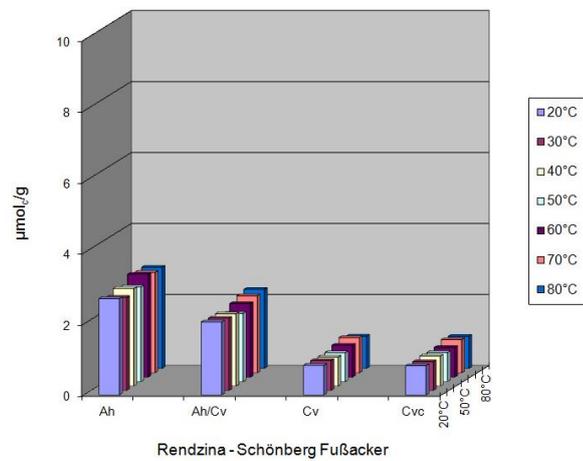
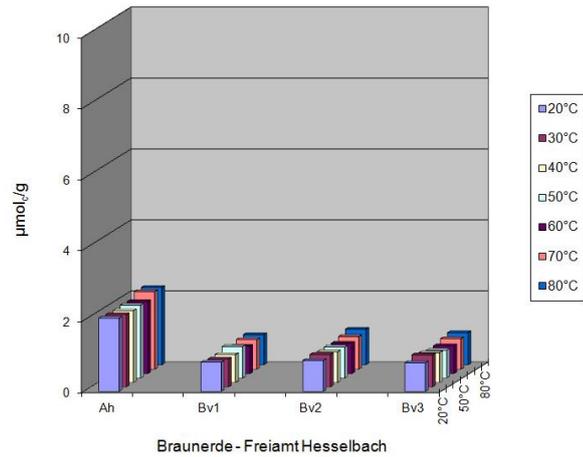


Abb. 48: Temperaturabhängigkeit des austauschbaren und löslichen Kaliums

relativ klein. Im Unterschied zu den meisten anderen Kationen im Boden besitzt Kalium kaum eine Affinität zur organischen Substanz. Die Bindung erfolgt vorrangig an die mineralische Substanz. An den Rändern von Tonmineralen, vor allem aber in den Zwischenschichten einzelner Dreischicht-Tonminerale, ist die Sorption von Kalium aufgrund der Ionengröße sterisch begünstigt. Kalium geht dadurch

spezielle sorptive Bindungen ein, die deutlich stärker sind als die anderer Elemente. Insofern spielt Kalium eine Sonderrolle bei den Nährstoffen.

Die Verteilung des austauschbaren Kaliums in einer Braunerde (Abb. 48, oben) ist charakteristisch für lehmige silikatische Substrate. Im Oberboden waren die Gehalte geringfügig erhöht. Anders als bei fast allen anderen Elementen zeigten sich keine Temperatureffekte. Das desorbierte Kalium war für alle Temperaturstufen weitestgehend gleich. Die geringen Unterschiede bewegten sich im Bereich des Analysenfehlers.

Das thermische Verhalten in carbonathaltigen Böden zeigt sich an einer Rendzina auf calcitischem Gestein (Abb. 48, Mitte). Carbonatische Substrate sind i.A. vergleichsweise arm an Kalium. Das Kalium ist hier vorwiegend in der silikatisch-oxidischen Restfraktion enthalten. Diese ist vollständig in Carbonate eingebettet und nimmt deshalb an den chemischen Umsätzen fast nicht teil. Hinzu kommt, daß Kalium in der wesentlich reaktiveren Carbonatfraktion aufgrund der hohen Löslichkeit der Kaliumcarbonate allenfalls akzessorisch vorhanden ist. Es handelt sich hierbei um eine für Kalium spezielle Situation. Erwartungsgemäß traten auch hier keine erkennbaren Temperatureffekte auf.

Die höchsten Mengen an austauschbarem Kalium fanden sich in einer Tonmergel-Pararendzina (Abb. 48, unten). Es ist bekannt, daß tonreiche Böden mit größeren Anteilen an Dreischichttonmineralen i.A. vergleichsweise hohe Mengen an austauschbarem Kalium enthalten.

Anders als bei allen anderen Böden ergaben sich hier deshalb zumindest tendenzielle Effekte. Steigende Temperaturen bewirkten eine verstärkte Desorption von den Austauschern, deren Ausmaß allerdings vergleichsweise gering war.

Insgesamt gesehen sind die Temperatureffekte bei Kalium so schwach ausgeprägt, daß die im realen Kabelbetrieb auch unter dauerhafter *Auslegungslast* auftretenden Temperaturen selbst im stärker erwärmten Unterboden keine relevante Kaliumdesorption bewirken werden. Die im Oberboden zu erwartenden Temperaturänderungen sind im Hinblick darauf bedeutungslos.

Magnesium

Magnesium ist nach Calcium meist das zweithäufigste basische Kation am Austauscher. Es ist ein wichtiges, im Boden relativ mobiles Pflanzennährelement, das mehr als Kalium und Calcium der Auswaschung unterliegt.

Die Mengen an austauschbarem Magnesium liegen in sauren, nicht gedüngten Böden auf vielen Standorten im Bereich des latenten Mangels. Bei landwirtschaftlicher Nutzung wird Magnesium, vor allem bei Ackernutzung, durch Düngung regelmäßig zugeführt. Dies führt zu einer gegenüber ungedüngten Böden deutlich erhöhten Magnesiumsättigung an den Austauschern. Die Düngung erfolgt i.A. mit dolomitischen Kalken, seltener mit löslichen Magnesium-Salzen, die in der Bodenlösung leicht dissoziieren und zu erhöhten Konzentration in der Bodenlösung führen.

Eine Braunerde auf Buntsandstein wurde als Beispiel für silikatische, saure Böden gewählt (Abb. 49, oben.) Im Ah-Horizont fanden sich erhöhte Magnesiumwerte. Es handelt sich dabei vermutlich überwiegend um an der organischen Substanz sorptiv gebundenes Magnesium. Im Unterboden waren die Gehalte minimal.

In allen Horizonten traten zwar nur kleine, aber eindeutige Temperatureffekte auf. Die Desorption von Magnesium nimmt mit der Temperatur zu.

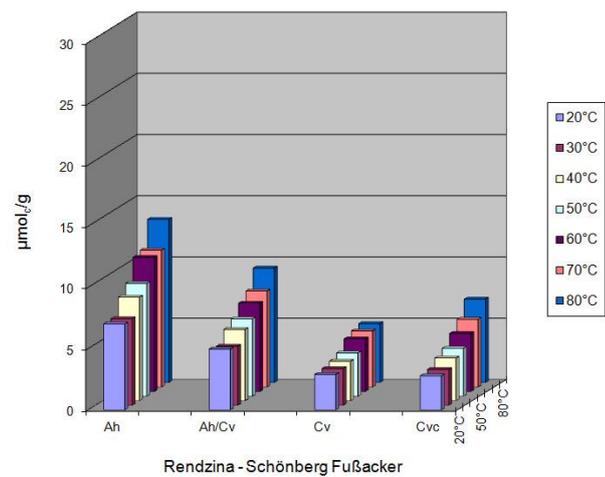
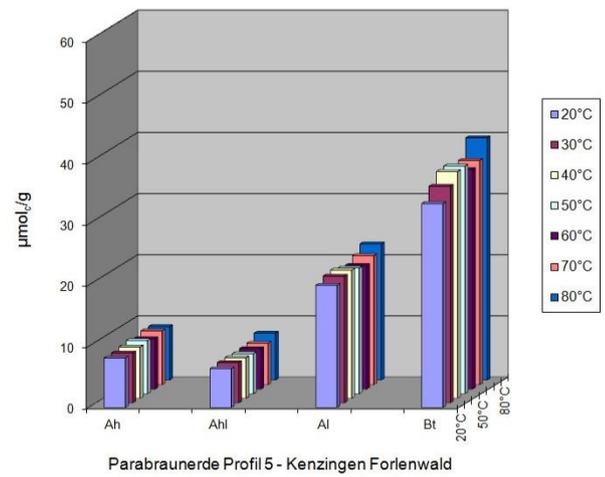
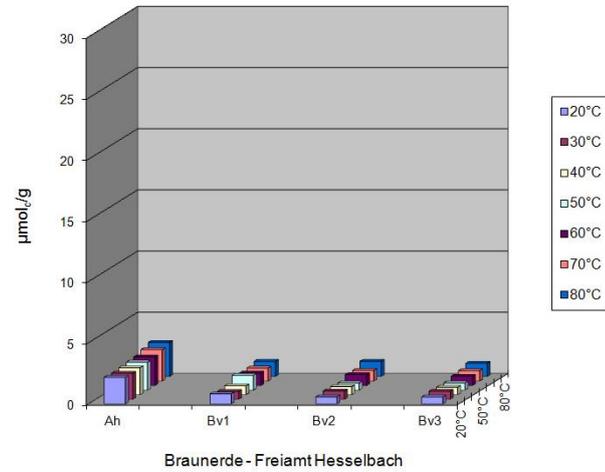


Abbildung 49: Temperaturabhängigkeit des austauschbaren und löslichen Magnesiums

Für eine Parabraunerde aus Löß (Abb. 49, Mitte) ergab sich ein differenzierteres Bild, das durch die Entcarbonatisierung und die anschließende Entbasung bedingt war. Die beiden Oberbodenhorizonte sind vollständig carbonatfrei. Die Entbasung ist weit vorangeschritten. Die Magnesiumsättigung hat sich dadurch auf einem für carbonathaltige Böden niedrigem Niveau eingestellt. Temperatureffekte waren allenfalls angedeutet. Sie waren vernachlässigbar gering.

In den beiden folgenden carbonatfreien Horizonten nahm die Magnesiumsättigung zu. Mit steigender Temperatur kam es hier zunächst zu einer tendenziell verstärkten Desorption. Insgesamt gesehen waren die Temperatureffekte aber auch hier nur marginal.

Abweichend davon waren Temperatureffekte bei carbonathaltigen Böden wesentlich deutlicher ausgeprägt. Dies zeigte sich bei einer aus calcitischem Gestein entstandenen Rendzina, die auch im Ah-Horizont noch Carbonat enthält (Abb. 49, unten). Magnesium ist hier in Form von Magnesit oder Dolomit beigemischt. Für Magnesium ergab sich ein starker Temperatureffekt, der wahrscheinlich durch die Lösung von Dolomit bedingt ist. Die vergleichsweise geringe Desorption von Magnesium von den Bodenaustauschern wurde dadurch überprägt. Eine Erhöhung der Temperatur bewirkte demnach vorrangig eine verstärkte Lösung carbonatischer Verbindungen.

Calcium

In silikatischen Böden ist Calcium das mengenmäßig bedeutsamste basische Kation an den Austauschern. In carbonatischen Böden sind die Werte im Vergleich dazu um das 10- bis 50-fache höher. Ob es sich dabei tatsächlich um austauschbares Calcium und nicht überwiegend um gelöstes handelt, ist jedoch unklar.

In der Landwirtschaft wird vor allem bei Ackernutzung zur Einstellung eines optimalen pH-Wertes regelmäßig gekalkt. Da der Kalk oberflächlich aufgebracht wird, finden sich an der Bodenoberfläche oft deutlich größere Mengen an austauschbarem und löslichem Calcium als im Unterboden.

Die Braunerde unter Wald zeigt die typische vertikale Calcium-Verteilung ungestörter, silikatischer Böden (Abb. 50, oben). Die Gehalte nehmen zum Unterboden hin zu. Hier ergab sich eine deutliche Temperaturabhängigkeit der Calciumsorption. Das Sorptions- und Lösungsgleichgewicht verschob sich mit zunehmender Temperatur kontinuierlich zugunsten der Desorption bzw. der Lösung von Calcium. Die Auswirkungen waren im oberen Temperaturbereich deutlich. Im unteren Temperaturbereich von 20 - 40 °C waren sie geringer.

Als Beispiel für carbonathaltige Substrate wurde eine auf calcitischem Gestein entstandene, oberflächlich vollständig entcarbonatisierte Terra fusca gewählt (Abb. 50, Mitte). Im Vergleich mit rein silikatischen Böden sind die Austauscher in den kalkfreien Oberbodenhorizonten Ah und T1 noch mit großen Mengen an Calcium belegt. Die Situation ist hier vergleichbar mit derjenigen gekalkter Ackerböden. In den Horizonten T2 und T3 ist Calciumcarbonat enthalten. Deshalb waren auch die extrahierten Gehalte an austauschbarem und löslichem Calcium deutlich höher.

Auffällig war, daß die beiden Oberbodenhorizonte auf die Änderung der Temperatur fast nicht reagierten. Deutliche Effekte zeigten sich hingegen bei den beiden carbonathaltigen Horizonten. Hier bewirkte eine Temperaturerhöhung eine stark erhöhte Freisetzung von Ca, das offensichtlich aus der Carbonatlösung stammte. Als Schlussfolgerung ergibt sich daraus, daß eine Bodenerwärmung die Calciumsorption offenbar wenig beeinflusst, die Carbonatlösung hingegen erheblich verstärkt wird.

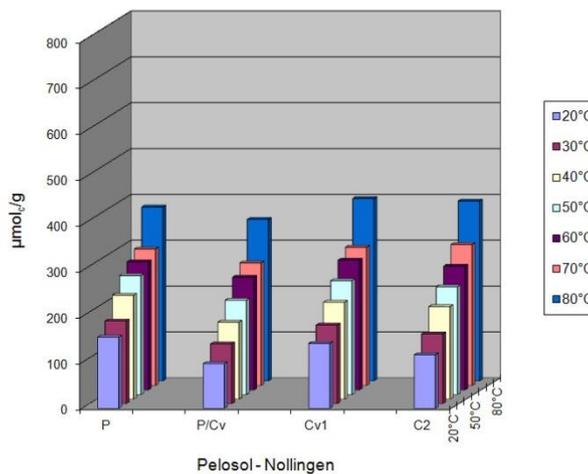
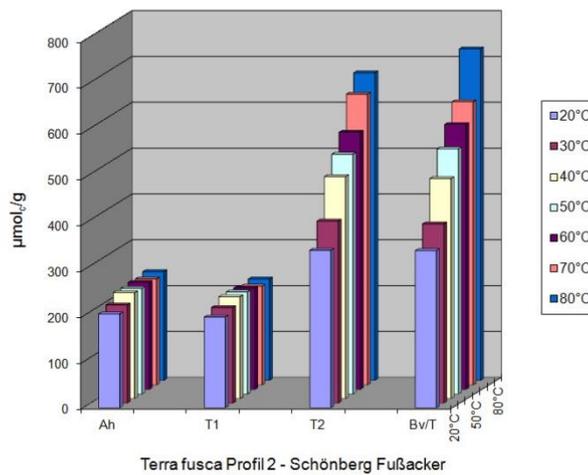
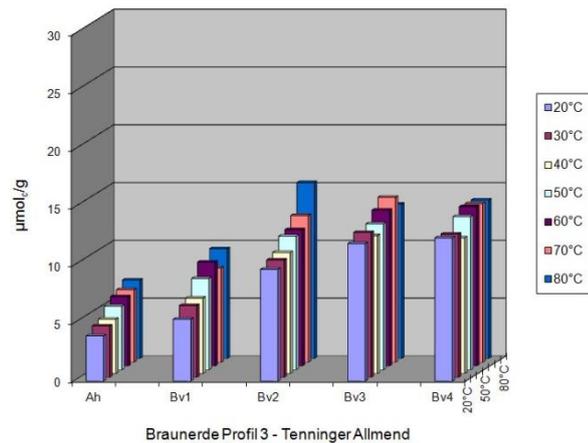


Abb. 50: Temperaturabhängigkeit des austauschbaren und löslichen Calciums

Die Befunde für den über die gesamte Mächtigkeit carbonathaltigen Pelosol erhärten diese Annahme (Abb. 50, unten). Es ergaben sich für alle Horizonte ausgeprägte Temperatureffekte, die eine verstärkte Carbonatlösung indizieren. Weiterhin wird deutlich, daß eine Temperaturerhöhung in die Carbonatlö-

sung weit stärker eingreift als ein temperaturbedingter Eingriff in das Kohlensäure-Carbonat Gleichgewicht, das die Carbonatlösung ebenfalls beeinflusst. Eine Temperaturerhöhung bewirkt zwar eine Reduktion des CO_2 in der Bodenlösung und dadurch eine verringerte Lösung des Kalkes. Dieser Effekt wird offenbar aber durch die temperaturbedingte Verschiebung des Lösungsgleichgewichts von Carbonaten zugunsten gelösten Calciums überkompensiert.

Aluminium

Aluminium kommt in Böden, vor allem silikatischen Böden, in großer Menge vor. Obwohl es nicht zu den essentiellen Pflanzennährelementen gehört, spielt es in der Pflanzenernährung eine große Rolle. Aluminium wird durch Verwitterung silikatischer Substrate in relativ großer Menge u.a. auch in ionarer Form freigesetzt. In seiner dreiwertigen Form und durch die vergleichsweise hohen Konzentrationen in der Bodenlösung ist die Eintauschstärke an den Bodenaustauschern konkurrenzlos. In ungekalkten, sauren Böden sind i.A. mehr als 80% der Austauschplätze mit Aluminium belegt. Bei der Aufnahme von Nährstoffen tritt Aluminium daher stets als Konkurrent auf, der die Akquisition wichtiger Nährstoffe durch die Pflanze erheblich beeinträchtigen kann. Thermische Effekte auf die Aluminiumdesorption würden deshalb indirekt die Aufnahme anderer Nährstoffe betreffen. Außerdem gehört Aluminium zu den sogenannten Kationsäuren, die auch in den Säurehaushalt des Bodens eingreifen. Bei einer Desorption von Aluminium werden durch die daran anschließende Hydrolysereaktion bis zu 3 Protonen je Formelumsatz freigesetzt. Das Aluminium unterliegt nach der Desorption einer Weiterreaktion zu $\text{Al}(\text{OH})_3$.

Das austauschbare und lösliche Aluminium spielt in carbonatischen oder Böden mit hohem pH-Wert keine Rolle (Abb. 51, oben). Dementsprechend sind auch mögliche thermische Effekte irrelevant. Der Fokus richtet sich deshalb ausschließlich auf silikatische Böden, in denen das Aluminium stets eine dominierende Rolle spielt. In der Landwirtschaft werden Ackerböden hingegen regelmäßig gekalkt, um Calcium und Magnesium zuzuführen und den pH-Wert des Bodens in einem bezüglich der Nährstoffverfügbarkeit optimalen Bereich einzustellen. Das Problem der kompetitiven Wirkung des Aluminiums wird dadurch entschärft.

Hinsichtlich der thermischen Auswirkungen der Aluminiumsorption ergaben sich für verschiedene Böden sehr unterschiedliche Befunde. Besonders deutliche Effekte zeigten sich bei Podsolen (Abb. 51, Mitte). Bedingt durch die stark sauren Verhältnisse finden sich in Podsolen hohe Anteile an austauschbarem Aluminium. In den humusbeeinflussten Ah-, Ahe- und Bsh-Horizonten bestand eine deutliche Temperaturabhängigkeit, wobei die Anteile austauschbaren Aluminiums in diesen Horizonten mit zunehmender Temperatur abnahmen. Dies unterscheidet Aluminium von allen anderen hier betrachteten Elementen. In den mineralischen Unterbodenhorizonten bewirkte die Temperaturerhöhung hingegen eine deutlich geringere Differenzierung.

Ein sehr ähnlicher Befund zeigte sich für eine Braunerde (Abb. 51, unten). Auch hier ergab sich für den Ah-Horizont eine klare Abnahme desorbierten Aluminiums mit zunehmender Temperatur. In den Bv-Horizonten sind die Temperatureffekte wie beim Podsol nur marginal. Dies legt den Schluß nahe, daß vor allem das an die organische Substanz reversibel gebundene Aluminium auf die Temperaturerhöhung reagiert. Aus thermodynamischer Sicht führt eine Temperaturerhöhung meist zu einer verstärkten Desorption, was auch bei allen anderen Elementen der Fall war. Wahrscheinlich wird die auf die Desorption folgende Hydrolysereaktion thermisch beeinflusst und es kommt daher durch die Bildung von schwerlöslichem $\text{Al}(\text{OH})_3$ zu einer verstärkten Ausfällung.

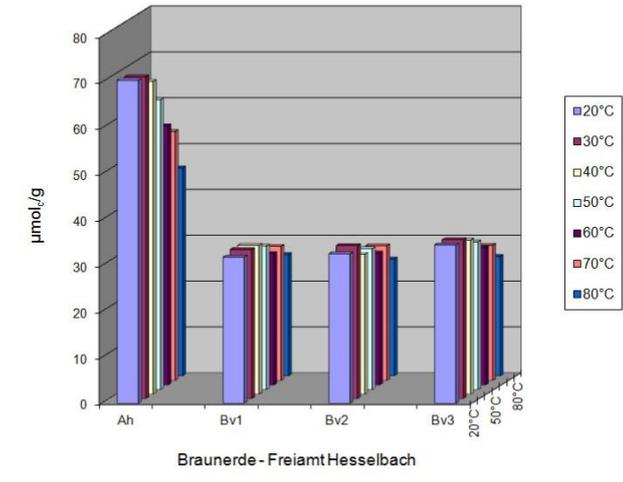
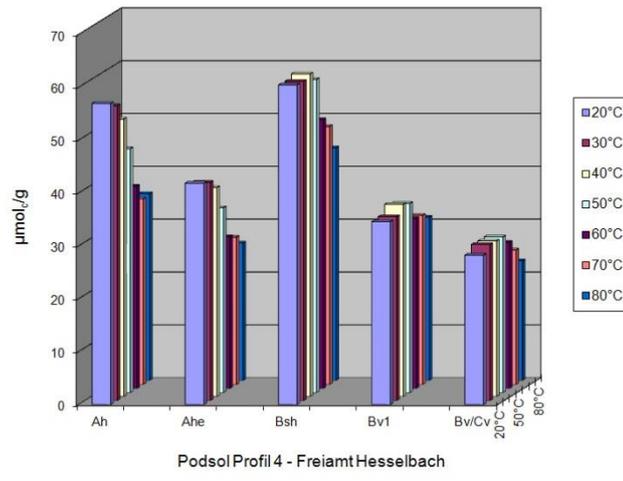
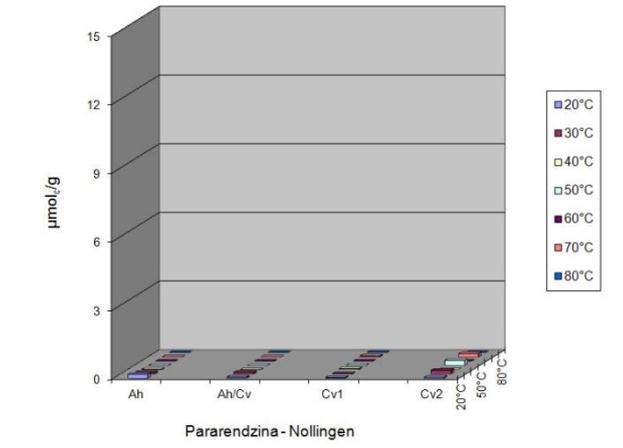


Abbildung 51: Temperaturabhängigkeit des austauschbaren und löslichen Aluminiums

Die temperaturbedingten Änderungen betragen i.A. weniger als 10% des nach der Standardmethode (TRÜBY und ALDINGER, 1989) bestimmten austauschbaren Aluminiums. Auf landwirtschaftlich genutzten gekalkten Böden sind diese Effekte irrelevant.

9.4 Schlussfolgerungen und Bewertung

Die mit einer Temperaturerhöhung einhergehende, verstärkte Freisetzung austauschbar gebundener Nährstoffe sowie die verstärkte Lösung nährstoffhaltiger Verbindungen werden die Nährstoffkonzentrationen in der Bodenlösung in Abhängigkeit von der Temperaturerhöhung erhöhen. Dies bewirkt einerseits eine Verbesserung der Nährstoffverfügbarkeit und eine möglicherweise verstärkte Aufnahme durch die Pflanze. Andererseits erhöht sich jedoch auch das Risiko der Auswaschung. Grundsätzlich ist dabei zu berücksichtigen, daß dies primär für ungedüngte Böden gilt, in denen die gelösten Nährstoffanteile viel geringer sind als die Sorbierten. In gedüngten landwirtschaftlichen Böden ist dies nicht der Fall. Durch die Zufuhr leicht löslicher Düngersalze wird dieses Verhältnis umgekehrt. Sofern die Sättigungskonzentration einer Verbindung unterschritten ist, ist das Lösungsverhalten weitestgehend temperaturunabhängig. Temperatureffekte werden deshalb in landwirtschaftlichen Böden nur dann auftreten, wenn sich die Mengen gelöster Nährstoffe durch den Entzug denen ungedüngter Böden annähern. Dies dürfte bei intensiv betriebener Landwirtschaft eher selten der Fall sein. Dennoch soll im Folgenden das Risiko einer thermisch bedingten verstärkten Nährstoffauswaschung eingeschätzt und bewertet werden.

Nach den derzeitigen Erkenntnissen kann sich beim Betrieb einer Kabelanlage mit dauerhafter **Auslegungslast** der Boden im Bereich der Schutzrohroberfläche auf ca. 30 °C erwärmen. Die Temperaturerhöhung gegenüber dem ungestörten Boden könnte hier bis zu 20 K betragen. Mit zunehmendem Abstand von der Wärmequelle nimmt diese Differenz kontinuierlich ab. An der Bodenoberfläche beträgt sie voraussichtlich maximal 3 K.

In Hinblick auf das bei den Laboruntersuchungen verwendete Temperaturspektrum sind die thermischen Beeinflussungen in den Oberbodenhorizonten marginal. Die zu erwartenden thermischen Auswirkungen auf die Nährstoffverfügbarkeit bzw. den Nährstoffhaushalt sind deshalb in den Oberbodenhorizonten nicht relevant. Es ist nicht davon auszugehen, daß sich negative Auswirkungen auf die Nährstoffversorgung der Pflanzen, insbesondere auf die gedüngter landwirtschaftlicher Kulturen ergeben könnten, zumal die Bodentemperatur saisonal bedingt schon im Bereich von 10 K variiert.

Bei einem Kabelbetrieb mit dauerhafter **Auslegungslast** wird im Unterboden unterhalb von 60 cm der Temperaturbereich von 20-30 °C tangiert. Alle Nährelemente unterliegen dort einer verstärkten Desorption oder Lösung. Bei carbonatfreien Böden sind die Effekte generell, vor allem aber für Ca, Mg und K, sehr gering. Für die Nährstoffversorgung landwirtschaftlicher Kulturen ist dies irrelevant, da der Boden in dieser Tiefe kaum noch durchwurzelt ist.

Etwas anders sind die Verhältnisse in carbonathaltigen Böden. Hier wird die Temperaturerhöhung die Kalklösung verstärken. Im Oberboden sind die Effekte aufgrund der geringfügigen Temperaturerhöhung irrelevant. Die Temperaturerhöhung ist damit auch für die Lösung der durch Kalkung oberflächlich aufgetragenen Carbonate irrelevant. Für den Unterboden gilt dies nicht. Zumindest in unmittelbarer Umgebung der Kabel wird eine verstärkte Carbonatlösung auftreten. Diese wird zu einer erhöhten Freisetzung von Calcium und Magnesium führen.

Welche ökologischen Konsequenzen resultieren daraus? Eine verstärkte Desorption birgt grundsätzlich das Risiko der Auswaschung, wenn ein entsprechender Sickerwasserfluß vorhanden ist. Dies gilt vor allem für Stoffe, die außerhalb der durchwurzelten Zone freigesetzt werden, was in diesem Fall zutrifft. Aufgrund der bestehenden Temperaturgradienten wird die räumliche Ausdehnung sehr begrenzt sein.

Die thermisch bedingte Verlagerung von Stoffen wird deshalb innerhalb sehr kurzer Distanzen wieder zum Stillstand kommen. Dies ist vergleichbar mit dem in carbonatischen Böden stets ablaufenden Prozess der Entcarbonatisierung. Oberflächlich gelöster Kalk wird oft nach einer wenige Dezimeter langen Transportstrecke ausgefällt und in Form sekundärer Anreicherungen wieder akkumuliert. Aus ökologischer Sicht bedeutet dies ohne Zweifel einen Verlust an Basizität, der jedoch im Hinblick auf die im Vergleich dazu meist großen Vorräte an Carbonaten und das zu erwartende geringe Ausmaß ohne Bedeutung ist.

10 Auswirkungen auf die mikrobielle Aktivität

Mikroorganismen sind an sehr zahlreichen Prozessen im Boden beteiligt. Dies gilt vor allem für das System Boden-Pflanze. Die Artenzusammensetzung, die Abundanz, die Aktivität und das Zusammenwirken der Mikroorganismen sind in ihrer Gesamtheit nicht überschaubar. Die Umgebungsbedingungen, insbesondere die Umgebungstemperatur ist dabei von zentraler Bedeutung. Aufgrund der komplexen Zusammenhänge ist es unmöglich, die durch den Betrieb einer Kabelanlage bewirkten thermischen Auswirkungen vollständig zu erfassen und zuverlässig zu bewerten. Dennoch erscheint es möglich, anhand der Basalatmung thermische Einflüsse auf die mikrobielle Aktivität aufzuzeigen und damit eine Orientierungshilfe für die Bewertung ökologischer Auswirkungen zu bekommen. Qualitative Veränderungen im Artenspektrum können damit jedoch nicht erfasst werden.

Mikroorganismen spielen im Kreislauf der organischen Substanz eine zentrale Rolle. Sie sind am Ab- und Umbau der aus der Biomasseproduktion anfallenden Streu maßgeblich beteiligt. Sie sind verantwortlich für den Humuskörper, von dem eine Reihe anderer Bodeneigenschaften beeinflusst werden. An den Streuumsatz gekoppelt ist u.a. die Stickstoffmineralisation, die vor allem in ungedüngten Böden einen wesentlichen Beitrag zur N-Ernährung von Pflanzen darstellt. Ein weiterer, ökologisch bedeutsamer Prozess ist die Nitrifikation, bei der Ammonium in Nitrat umgewandelt wird. Dies bedeutet gleichzeitig auch die Umwandlung des im Boden wenig mobilen Ammoniums in die mobile Form des Nitrats. Dafür existieren im Boden kaum Sorptionsplätze. Es kann deshalb zu einer verstärkten Auswaschung kommen.

10.1 Arbeitshypothese und Ziel

Beim Betrieb von Erdkabelanlagen wird es im unmittelbaren Kabelbereich zu einer Bodenerwärmung kommen. Bei dauerhaftem Betrieb mit Auslegungslast können bis ca. 30 °C erreicht werden. Eine Temperaturerhöhung auf bis zu 35 °C wird bei zahlreichen Bakteriengruppen zu einer Stimulation der mikrobiellen Aktivität führen, sofern die Umgebungsbedingungen geeignet sind und insbesondere die Bodenfeuchte dafür ausreicht. Ein weiterer Anstieg der Temperatur auf bis zu 50 °C könnte bei temperaturempfindlichen Organismen bereits eine Verringerung der Vermehrungsrate und damit auch eine Verringerung der Population oder eine Verschiebung der mikrobiellen Gemeinschaft insgesamt verursachen. Zudem kann die Temperaturerhöhung zu einem Rückgang der mikrobiellen Aktivität führen.

Ziel war, die Zusammenhänge zwischen Bodentemperatur und mikrobieller Aktivität für verschiedene Böden, zumindest pauschal, anhand der Basalatmung zu erfassen und zu quantifizieren.

10.2 Methoden

Die Bestimmung der Basalatmung erfolgte im Wesentlichen nach der Methode ISERMEYER (1952). Diese wurde jedoch zur Erhöhung des Probendurchsatzes modifiziert. Die Bebrütungszeit wurde auf 9 Tage festgelegt. Die folgenden Respirationsraten werden grundsätzlich in $[\text{mg CO}_2 / 9 \text{ d} \cdot 20 \text{ g}]$ angegeben. Ausgewählt wurden 16 Bodenproben aus verschiedenen Bodentypen und Horizonten. Die Bebrütung erfolgte in einem Temperaturbereich von 20 - 50 °C. Die Temperatur wurde innerhalb dieses Rahmens schrittweise um 5 K erhöht.

10.3 Ergebnisse

Absolute Respirationsraten

Die absoluten Respirationsraten machen das nach Bodentypen bzw. Horizonten differenzierte Respirationspotential deutlich (Abb. 52). Erwartungsgemäß ergaben sich für die einzelnen Horizonte sehr

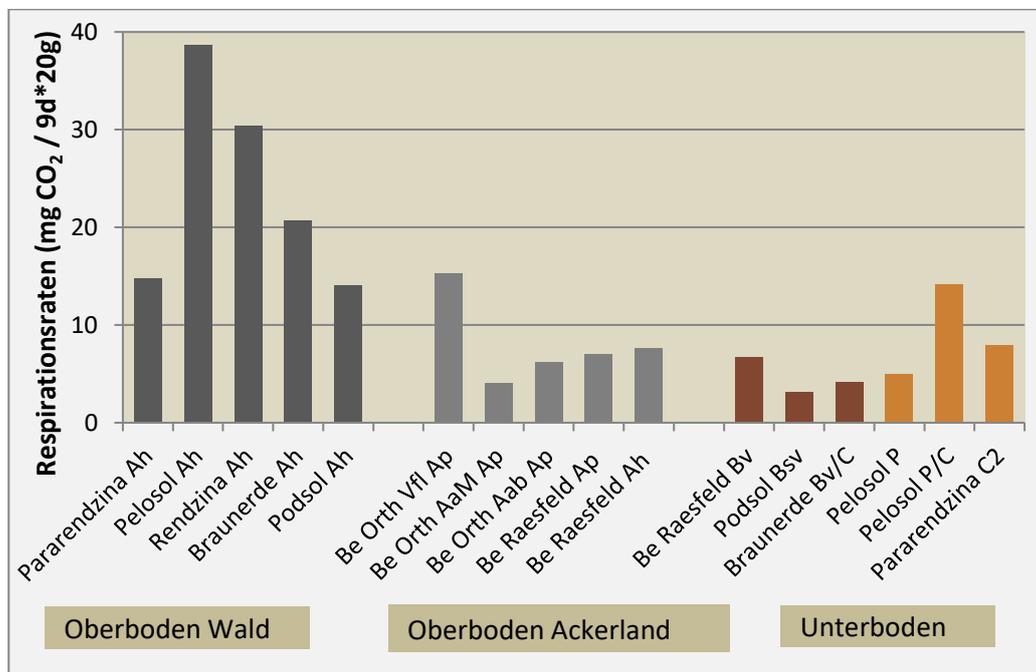


Abbildung 52: Absolute Respiration bei 20°C und einer Bebrütungszeit von 9 Tagen

Be Orth VfI = Braunerde Osterath Versuchsfeld; Be Orth AaM = Braunerde Osterath Acker angrenzend Mais

Be Orth Aab = Braunerde Osterath Acker angrenzend brachliegend

Be Raesfeld = Braunerde Plaggensch Raesfeld Bereich Meßstellen und Ertragsserhebungen

unterschiedliche Respirationsraten, die vom Humusgehalt, von der Bodenacidität und der Bodenmatrix maßgeblich beeinflusst waren. Der Vorrat an verwertbarem Kohlenstoff ist für heterotrophe Mikroorganismen die entscheidende Energie- und Nahrungsquelle. Es ergaben sich deshalb für die Ah-Horizonte mit hohem Humusgehalt deutlich höhere Respirationsraten als für die Mineralbodenhorizonte. Es zeigte sich weiterhin, daß die Respirationsraten bei gleichzeitiger Anwesenheit von Carbonaten am höchsten waren. Dies ist allgemein bekannt. Vergleichsweise gering waren sie für die Ap-Horizonte ackerbaulich genutzter Flächen. Dies zeigen die Ackerstandorte in Meerbusch Osterath sowie der zum Monitoring in Raesfeld vorgesehene Acker im Bereich der Kabelanlage.

Die Oberböden von Äckern zeigten grundsätzlich geringere Respirationsraten als die von Waldböden (Abb. 52). Dies ist zumindest zum Teil auf die meist geringeren Humusgehalte zurückzuführen. Die

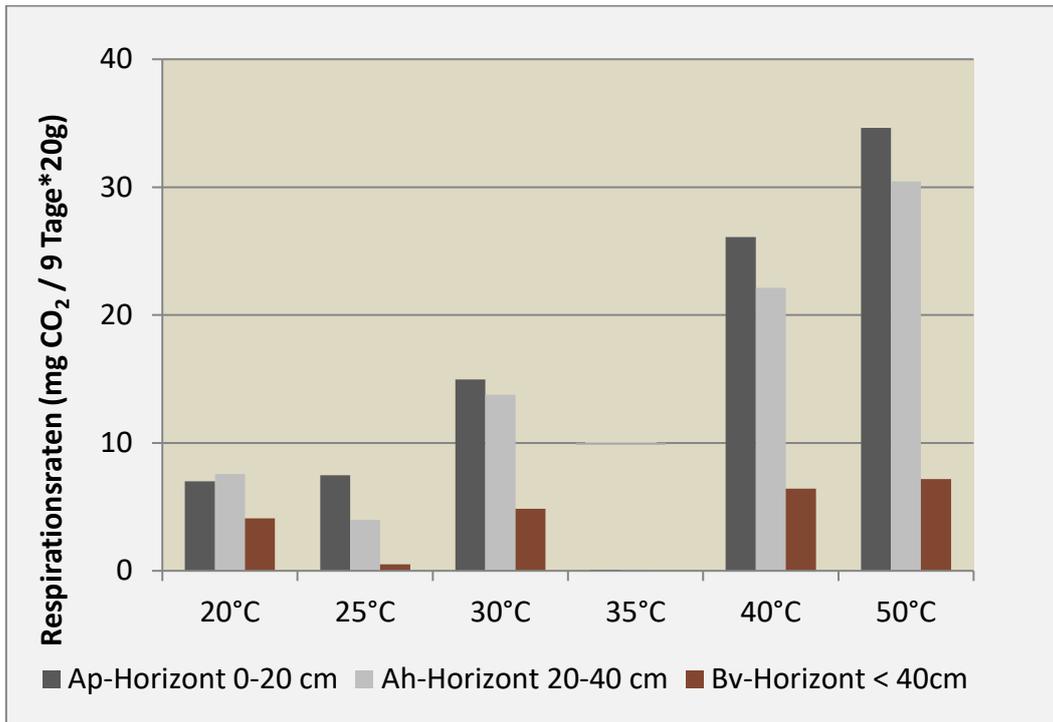


Abbildung 53: Respirationsraten eines Plaggeneschs (Raesfeld) in Abhängigkeit von der Temperatur

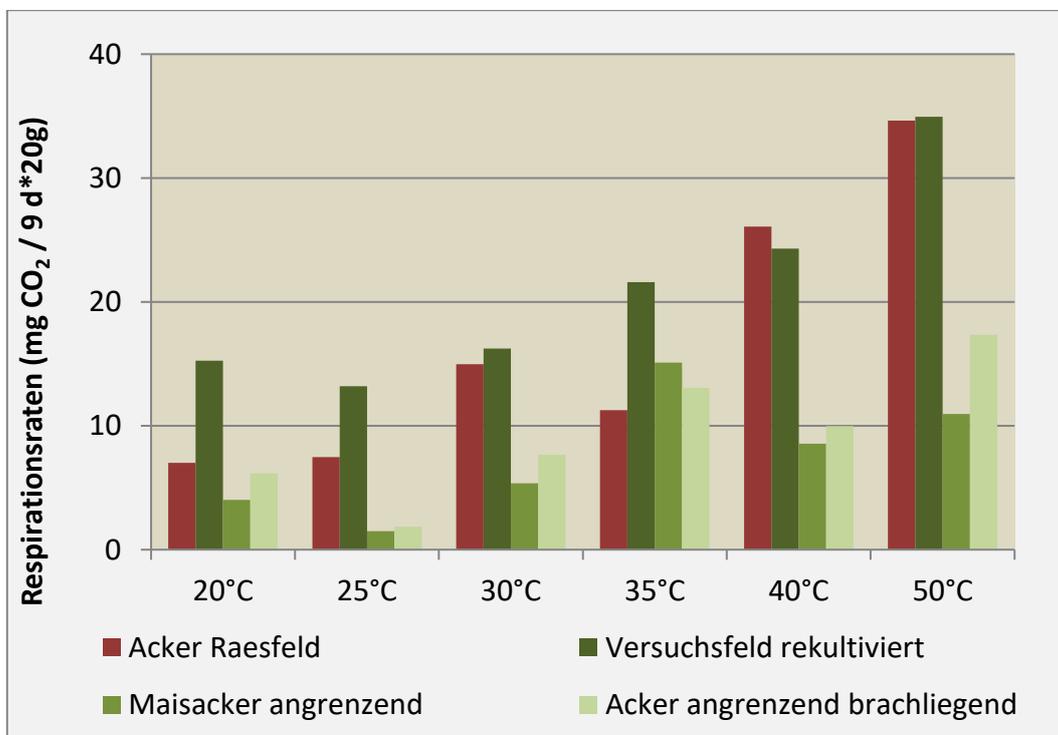


Abbildung 54: Temperaturabhängigkeit der Respirationsraten von Ah-Horizonten bei Ackernutzung (Meerbusch-Osterath grüne Säulen und Plaggenesch Raesfeld rote Säulen)

Respiration im Ah-Horizont eines Plaggeneschs (Standort Raesfeld) ist allerdings trotz relativ hoher Humusgehalte und insgesamt günstigen Bodeneigenschaften bei einer Bebrütungstemperatur von 20 °C nur sehr gering (Abb. 52). Offensichtlich spielt hier die Qualität der organischen Substanz eine maßgebliche Rolle. Wahrscheinlich hat die über lange Zeiträume durchgeführte Plaggenwirtschaft zu einer Akkumulation metastabiler, für Mikroorganismen schwer angreifbarer Huminstoffe geführt.

Temperaturabhängigkeit der Respiration

In fast allen Fällen stieg die Basalatmung mit steigender Temperatur an. Der Temperaturanstieg bewirkte somit im Bereich von 20 - 50 °C generell einen Anstieg der mikrobiellen Aktivität. Auch bei Temperaturen von 50 °C war keine Verringerung der Respiration festzustellen. Das Ausmaß der Respiration und des temperaturbedingten Anstiegs war nach Horizonten und Bodentypen differenziert.

Zur Charakterisierung der Temperaturabhängigkeit sind im Folgenden 3 typische Beispiele dargestellt. Es handelt sich dabei um den Plaggenesch nahe des Sensorfeldes (Raesfeld), um Oberböden silikatischer Ackerböden im Bereich der Versuchsanlage Osterath und um einen kalkhaltigen Pelosol unter Wald aus der Schwarzwaldvorbergzone.

Bei den beiden Oberbodenhorizonten des Plaggeneschs zeigte sich eine klare Temperaturabhängigkeit der Respiration (Abb. 53; 54). Im Temperaturbereich von 20 - 25 °C waren die Raten zunächst annähernd gleich. Oberhalb von 30 °C bewirkte die Temperaturerhöhung einen kontinuierlichen, annähernd linearen Anstieg der Respiration.

Im Bv-Horizont (Abb. 52) bewirkte die Temperaturerhöhung hingegen nur sehr geringe Effekte, die sich kaum von der natürlichen Variation abheben. Ursache dafür ist, daß dort kaum noch zersetzbares organisches Material enthalten ist.

Im Vergleich mit den anderen Oberbodenhorizonten ergab sich ein differenzierteres Bild (Abb. 54). Für den Ah-Horizont des Plaggeneschs Raesfeld und den Oberboden des Trassenkörpers Osterath bestätigte sich die Temperaturabhängigkeit, für die Ah-Horizonte zweier benachbarter Standorte hingegen nicht. Hier streuten die Respirationsraten zusammenhanglos auf einem niedrigen Niveau.

Beim Oberboden aus Osterath handelt es sich um Material, das über längere Zeit auf Mieten zwischengelagert und danach als Rekultivierungsschicht wieder aufgetragen wurde. Höchstwahrscheinlich haben die Umlagerung und die Durchmischung bei der Wiederverfüllung zu einer Stimulation der mikrobiellen Aktivität geführt. Dafür sprechen die schon bei geringen Temperaturen relativ hohen Respirationen.

Für den aus Dolomitmergel entstandenen Pelosol ergab sich ein deutlich anderes Bild (Abb. 55). Die absoluten Respirationen waren im Vergleich zu Braunerde Raesfeld deutlich höher. Auffällig ist, daß für den Ah-Horizont faktisch keine Temperaturabhängigkeit bestand. Die Respirationen waren über den gesamten hier angewandten Temperaturbereich auf annähernd gleichem Niveau. Der mineralische P-Horizont reagierte hingegen deutlich auf die Temperaturerhöhung, obwohl auch hier die Humusgehalte im Vergleich zum Ah-Horizont gering waren. Der Anstieg der Respiration mit der Temperatur war hier annähernd linear. Bei 50 °C erreichte der P-Horizont die gleichen Respirationen wie der Ah-Horizont. Der P/C-Übergangshorizont verhielt sich annähernd gleich. Die absoluten Respirationen waren jedoch deutlich geringer.

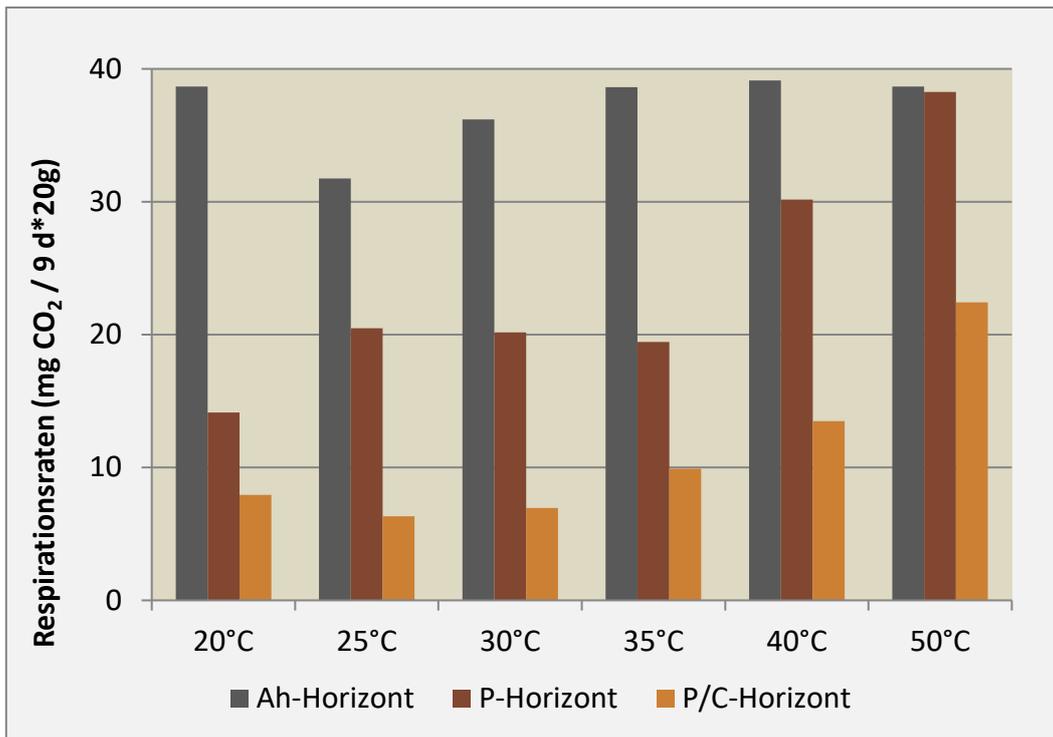


Abbildung 55: Respirationsraten eines carbonathaltigen Pelosols im Wald in Abhängigkeit von der Temperatur

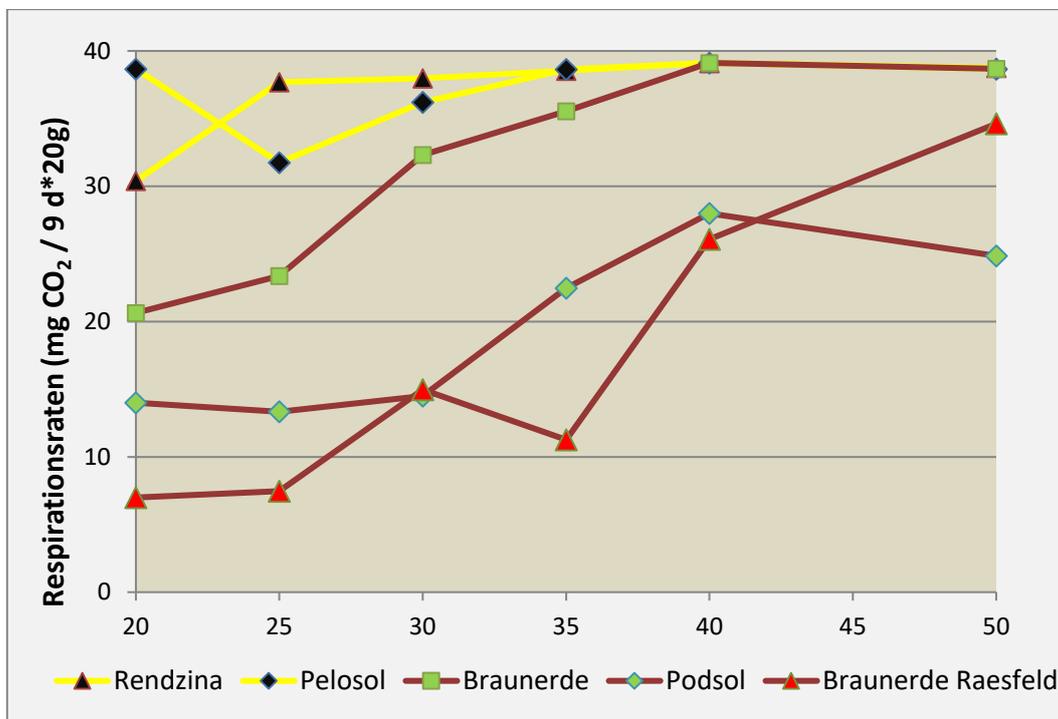


Abbildung 56: Temperaturabhängigkeit der Respirationsraten von Ah-Horizonten carbonatischer und carbonatfreier Böden

Die besonders hohen Respirationsraten des Pelosols lassen sich aus seinen besonderen Eigenschaften ableiten. Zum einen wirkt der Carbonatgehalt stets stimulierend auf die mikrobielle Aktivität, zum anderen bewirkt der hohe Tongehalt eine große, für Mikroorganismen besiedelbare Oberfläche und ein meist großes Wasserhaltevermögen. Dadurch entsteht ein für das Mikroorganismenwachstum günstiger Lebensraum.

Der Einfluß des Substrates auf die Respiration hängt neben dem Humusgehalt stark davon ab, ob Carbonate vorhanden sind oder ob es sich um rein silikatische Substrate handelt. Es ist bekannt, daß sich die Anwesenheit von Carbonaten grundsätzlich positiv auf die biologische Aktivität von Böden auswirkt. Dementsprechend wurden für die Ah-Horizonte carbonathaltiger Böden (Rendzina; dolomitischer Pelosol) auch die höchsten Respirationsraten bestimmt (Abb. 56). Eine Temperaturerhöhung bewirkte keine Änderung der Respiration. Die optimale Respirationsrate ist hier vermutlich bereits erreicht. Deutliche Temperatureffekte ergaben sich hingegen bei den silikatischen Böden Braunerde und Podsol. Hier stieg die Respiration ab ca. 30 °C kontinuierlich an.

Für die Unterböden ergab sich ein etwas anderer Befund (Abb. 57). Die absoluten Respirationsraten waren viel niedriger und bei carbonatischen Böden zeigte sich eine klare Temperaturabhängigkeit, die ab einer Temperatur > 35°C einsetzte. Darunter waren die Effekte vernachlässigbar gering. Bei den silikatischen Unterböden blieben Temperatureffekte aus. Hier scheint die nur in geringen Mengen vorhandene, vermutlich schwer zersetzbare Wurzelstreu limitierend zu wirken.

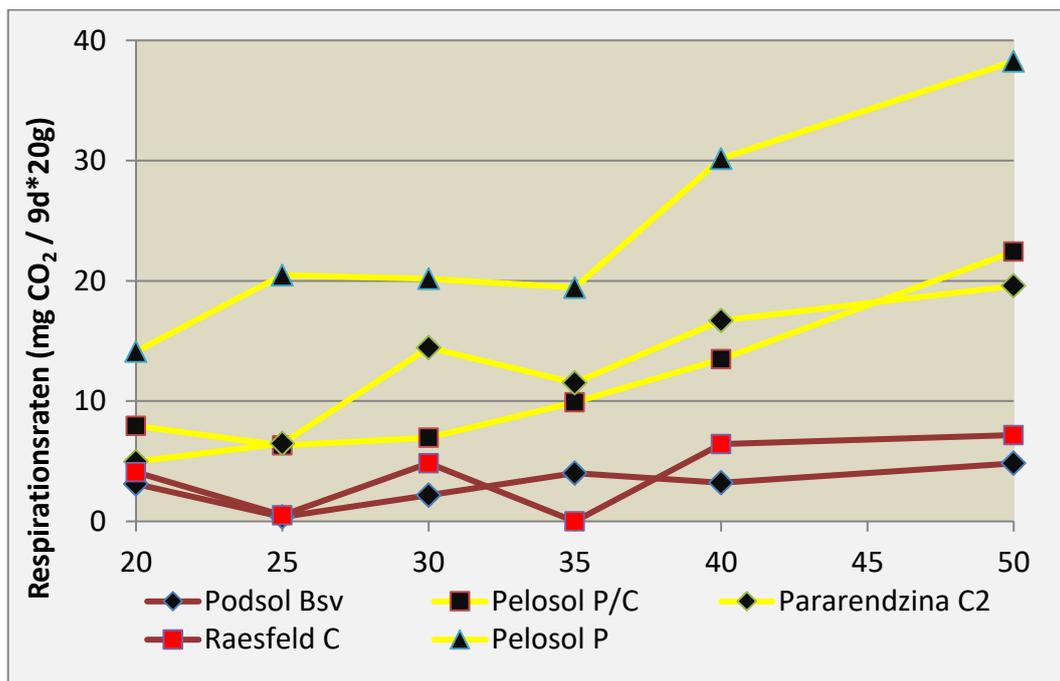


Abbildung 57: Temperaturabhängigkeit der Respirationsraten mineralischer Unterbodenhorizonte carbonatischer (gelbe Linien) und carbonatfreier (rote Linien) Substrate

10.4 Schlussfolgerungen und Bewertung

Die Ergebnisse der Brutversuche zeigten, daß die mit dem Betrieb von Hochspannungserdkabelanlagen einhergehende Wärmeemission die mikrobielle Aktivität grundsätzlich stimulieren wird. Dies gilt für den gesamten hier untersuchten Temperaturbereich von 20 - 50 °C. Eine Temperaturerhöhung auf die für **Auslegungslast** prognostizierten Temperaturen bewirkt einen proportionalen eventuell auch einen überproportionalen Anstieg der Respiration. In keinem Fall kommt es zu einer Verringerung der biologischen Aktivität. Die im Boden vorhandenen Mikroorganismen sind offenbar auch bei Temperaturen um 40 °C hinsichtlich der Lebens- und Vermehrungsfähigkeit relativ unempfindlich gegenüber der Erwärmung. Ein Anstieg der Mineralisierungsrate beschleunigt den ökosysteminternen Umsatz und bewirkt einen beschleunigten Abbau der Streu und der organischen Substanz im Boden. Grundsätzlich könnte sich dadurch der Vorrat an metastabilem Humus im Boden verringern. Zudem bewirkt der Anstieg der Mineralisierung eine verstärkte Freisetzung von Stickstoff aus der organischen Substanz, wodurch vermutlich auch der Prozess der Nitrifikation stimuliert wird. Damit verbunden ist ein erhöhtes Auswaschungsrisiko von Nitrat. Jedoch befinden sich bei landwirtschaftlichen Böden, im Gegensatz zum Oberboden, nur vergleichsweise geringe Stickstoffgehalte im Unterboden bzw. in den Verlegetiefen des Kabels.

Im Hinblick auf eine ökologische Bewertung erfordern diese Befunde eine differenzierte Betrachtung. Die Tatsache, daß die beobachteten Temperatureffekte vom Humusgehalt des Bodens maßgeblich beeinflusst werden, impliziert, daß die Effekte vor allem in den Oberbodenhorizonten auftreten werden. Dort aber ist die Temperaturerhöhung klein. Es ist deshalb nur mit einer allenfalls geringfügigen Stimulation der mikrobiellen Aktivität zu rechnen.

Zu berücksichtigen ist weiterhin, daß die Temperaturen in den Oberbodenhorizonten sehr erheblichen Tagesschwankungen unterliegen. Deren Amplituden liegen weit über der durch die Wärmeemission einer Kabelanlage verursachten, annähernd konstanten Temperaturerhöhung. Der tägliche Wechsel zwischen Erwärmung und Abkühlung wird höchstwahrscheinlich zu einer geringeren biologischen Aktivität führen als eine konstante Erwärmung bei einer Tagesmitteltemperatur. Hinzu kommt, daß es unter Feldbedingungen witterungs- und saisonbedingt zu sehr stark variierenden Feuchteverhältnissen kommt, die bis zur Austrocknung in den Bereich der Welkefeuchte reichen können. Die mikrobielle Aktivität kann dabei weitgehend zum Erliegen kommen. Im Vergleich dazu handelt es sich bei den unter Laborbedingungen eingestellten konstanten Temperaturen und der optimalen Bodenfeuchte um einen standardisierten, idealen Zustand und um einen sehr konservativen Versuchsansatz. Die tatsächlichen Auswirkungen werden deshalb geringer ausfallen als in den Brutversuchen.

Betrachtet man den Zustand unmittelbar an den Kabelsträngen im unteren Bereich einer Kabelanlage (z.B. der Bettung), so sind die Verhältnisse dort genau umgekehrt. Hier treten die höchsten Temperaturen auf. Das dort eingebrachte Bettungsmaterial ist jedoch, sofern es sich um industriell aufbereiteten Sand handelt, humusfrei. Bei Verwendung von ZFSV könnten durch die Verwendung des am Standort vorhandenen Materials Spuren an Humus mit enthalten sein.

Grundsätzlich sind im Bereich der Bettung und in den rein mineralischen Unterbodensubstraten die Voraussetzungen für das Wachstum heterotropher Mikroorganismen aufgrund fehlender Energie- und Nahrungsquellen sehr ungünstig. Es ist deshalb allenfalls mit marginalen Effekten zu rechnen.

Im Bereich der Bettung könnte der Prozess der Mineralisierung zu einem Verlust der ohnehin nur in geringsten Mengen vorhandenen organischen Substanz führen. Die mikrobielle Aktivität wird sich im

Bereich der Bettung jedoch auch bei erhöhten Temperaturen nur auf niedrigstem Niveau einstellen. Aus bodenökologischer Sicht ist dieser Verlust an organischer Substanz irrelevant.

Ackerböden enthalten meist weniger Humus als Waldböden. Die für die Ap-Horizonte ermittelten Respirationsraten waren deshalb stets deutlich niedriger als die von Waldböden. Andererseits waren die Temperatureffekte bei den Ackerböden deutlicher ausgeprägt. Bei entsprechend hoher Temperatur nivelliert sich deshalb der Unterschied. Durch die im Oberboden auftretenden geringen Temperaturänderungen bleiben die Respirationsraten in Ackerböden jedoch stets kleiner.

In carbonathaltigen Oberböden sind die Respirationsraten aufgrund der pH-Werte i.A. deutlich höher als in carbonatfreien, silikatischen Substraten. Bekanntermaßen wird deshalb auch die bei landwirtschaftlicher Nutzung regelmäßig stattfindende Kalkung zu einer Steigerung der mikrobiellen Aktivität führen. Diese bringt die Mikroorganismenpopulationen vermutlich nahe an das Optimum der Aktivität. Folglich sind auch die thermischen Effekte bei carbonatischen Substraten sehr klein. Der an der Oberfläche zu erwartende, nur geringe Temperaturanstieg wird deshalb allenfalls marginale Effekte hervorrufen.

11 Auswirkungen auf die Bodenfauna

Die Erdverkabelung ist ein schwerwiegender Eingriff in das Schutzgut Boden. Bei der Anlage der Trasse in offener Bauweise wird der Boden bis in eine Tiefe von mindestens zwei Metern vollständig abgetragen. Die natürliche Lagerung wird vollständig aufgehoben. Dadurch kommt es zu einer zumindest teilweisen Zerstörung individueller Lebensräume, von der vor allem die Bodenfauna betroffen ist. Besonders gravierend ist dies für die Makro- und die Megafauna. Regenwurmgänge, Wühlmaus- und Maulwurfsbauten werden durch den Eingriff völlig zerstört. Es ist davon auszugehen, daß ein erheblicher Teil der Fauna allein schon die mechanische Beanspruchung nicht überlebt. Die gesamte Fauna wird dadurch erheblich beeinträchtigt werden. Wenngleich diese Auswirkungen grundsätzlich reversibel sind, kann die Rekonvaleszenz in Abhängigkeit von den Randbedingungen u.U. sehr lange Zeit in Anspruch nehmen und zu einem qualitativ veränderten Endzustand führen. Die bodenschonende Bauausführung, die sachgerechte Wiederverfüllung und die begleitenden Rekultivierungsmaßnahmen sind dabei von zentraler Bedeutung.

Die Auswirkungen auf die Bodenfauna sind auf der Pilotstrecke Raesfeld kontinuierlich untersucht worden. Seit Abschluß der Baumaßnahmen im Mai 2015 wurden regelmäßig faunistische Erhebungen durchgeführt. Die Studie konzentrierte sich auf Regenwürmer, deren Stoffumsätze von großer Bedeutung sind.

11.1 Bedeutung der Regenwürmer

Die Regenwürmer beeinflussen sowohl die physikalischen als auch die chemischen Eigenschaften des Bodens. Beide bestimmen vorrangig die Qualität als Pflanzenstandort bzw. die Bodenfruchtbarkeit schlechthin.

Regenwürmer sind maßgeblich beteiligt an der Strukturbildung und der davon direkt abhängigen Porenverteilung. Dies gilt vor allem für den von der Regenwurmfauna geschaffenen Anteil an biogenen Poren, die für den Gas- und Wasserhaushalt des Bodens von entscheidender Bedeutung sind. In den mittleren und groben Poren erfolgt der Gasaustausch mit der Atmosphäre.

Ebenso bedeutsam sind die Einflüsse auf den Humuskörper im Boden. Regenwürmer sind beteiligt am Streuabbau und der Humifizierung, zwei Prozesse, bei dem die Streu sukzessive in die molekulare Größenordnung ab- bzw. umgebaut wird. Dabei entstehen u.a. metastabile Huminstoffe, die die organische Substanz vor der raschen Mineralisierung schützen. Nur dadurch ist es möglich, daß sich ein dauerhafter Humuskörper im Boden aufbaut. Besonders bedeutsam dabei sind die anözischen Regenwürmer, die neben organischem Material auch größere Mengen an mineralischen Bestandteilen mitaufnehmen (EDWARDS, 1972). Dabei kommt es zum Prozess der Ton-Humuskopplung. Dieser bewirkt eine physiko-chemische Verbindung zwischen den mineralischen und organischen Komponenten. Darüber hinaus sind die Ausscheidungen der Regenwürmer je nach Regenwurmart stabil aggregiert, was einer Verschlämmung des Oberbodens und der Erosion entgegenwirkt.

Der unter maßgeblicher Beteiligung der Regenwurmfauna aufgebaute Humuskörper stellt einen großen Teil der Kationentauschkapazität, die für die Bereitstellung pflanzenverfügbarer Nährstoffe verantwortlich ist.

In Deutschland sind etwas mehr als 40 Regenwurmartarten bekannt, deren Lebensräume insgesamt sehr unterschiedlich sind. Trockenheit ist grundsätzlich ein limitierender Faktor für ihr Vorkommen. Leh-mige Wiesenböden mit einer entsprechend hohen Feldkapazität sind ideale Standorte. Von ebenso großer Bedeutung ist das Nahrungsangebot. Auch im Hinblick darauf sind Wiesenstandorte besonders günstig, da der Bewuchs dort flächendeckend während des gesamten Jahres vorhanden ist. Vergleichsweise gering ist das Nahrungsangebot hingegen bei Ackernutzung, da die Vegetation mit der Ernte annähernd vollständig entfernt wird. Darüber hinaus führt die oft intensive Bodenbearbeitung zu einer Reduzierung des Artenspektrums und der Bestände.

11.2 Arbeitshypothese und Ziele der Voruntersuchungen

In Bezug auf den *baulichen Eingriff* wurde davon ausgegangen, daß dieser zu einer weitgehenden Vernichtung oder zumindest zu einer substanziellen Dezimierung der Bodenfauna führen würde. Des Weiteren wird es durch den *Betrieb der Anlage* zu einer Bodenerwärmung kommen, die den Lebensraum der Fauna sowohl positiv als auch negativ beeinflussen kann.

Im Einzelnen sollten folgende Fragen geklärt werden:

- Bewirkt der *bauliche Eingriff* eine weitgehende Vernichtung der Regenwurmfauna?
- Wie erfolgt die Wiederbesiedelung und mit welcher Geschwindigkeit läuft sie ab?
- Kommt es zu Veränderungen des Artenspektrums?
- Kehren die tiefgrabenden Regenwürmer auf die Trasse zurück und wie lange dauert die Regeneration ihres Lebensraumes?
- Hat der *Betrieb* der Kabelanlage Auswirkungen auf die Regenwurmabundanz?
- Führt die Erwärmung zu einem veränderten Artenspektrum?
- Bewirkt die Erwärmung einen veränderten Lebenszyklus?
- Kommt es zu thermisch bedingten Verhaltensänderungen oder zu Ausweichreaktionen?

11.3 Methoden

Die erste Erhebung wurde im Juni 2015 unmittelbar nach Abschluß der Rekultivierung durchgeführt. Der frisch verfüllte Trassenkörper war zu diesem Zeitpunkt noch völlig vegetationslos. Ziel war, den initialen Regenwurmbestand zu erfassen. Als Fangmethode wurde die Handauslesung gewählt. Bei den

folgenden Erhebungen wurde eine kombinierte Methode aus Handauslesung und Austreiben mittels Senfsuspension eingesetzt (FLADE, 2010)

Die Phase der Wiederbesiedelung wurde durch begleitende Experimente näher untersucht (Abb. 58). Im Einzelnen sollte geklärt werden, wie sich die Bestände sowohl qualitativ als auch quantitativ entwickeln und welche Rolle dabei die Zuwanderung aus den angrenzenden Feldern spielt.



Abb. 58: Versuchspartellen zur Kontrolle der Wiederbesiedelung

Durch die fehlende Vegetationsdecke und die Zerstörung des Lebensraumes sind die Würmer den Räubern bei der Wiedereinwanderung weitgehend schutzlos ausgeliefert. Auf der Fläche bestehen vor allem für die anözischen Formen zunächst kaum Unterschlupfmöglichkeiten, da die Bauten zerstört wurden. Zur Förderung der Einwanderung und der Wiedererholung wurden deshalb Mikrohabitate eingerichtet, die den Tieren bei der Einwanderung Schutz gewähren sollten. Dazu wurden unmittelbar nach der Einsaat der Rekultivierungsvegetation kleine Bretter mit einer Größe von 12 cm x 30 cm ausgelegt, die als Deckung dienten und die Tiere vor der Einstrahlung und der Austrocknung schützen sollten (Abb. 60). Sie dienten außerdem zur Kontrolle der Wiederbesiedelung.

Das Versuchsdesign dazu war folgendes:

Kontrolle: Die Parzelle wurde im Anschluß an die Wiederverfüllung unverändert übernommen.

Parzelle 1:

Mit dem Ziel sowohl die seitliche Zuwanderung als auch die Abwanderung der noch vorhandenen Würmer zu unterbinden, wurde die Parzelle mit Raseneinfassungen vollständig eingezäunt. Durch kontinuierlich angelegte Inventuren sollte die Entwicklung des überlebenden Bestandes verfolgt werden.

Parzelle 2

Die quer zur Trasse abgezaunte Parzelle war zur Seite hin geöffnet, um die Zuwanderung aus den angrenzenden Ackerflächen zu ermöglichen. Zur Kontrolle der Bestände wurden durch systematisch ausgelegte Brettchen Mikrohabitate geschaffen. Ziel war, den Einfluß der Zuwanderung auf die Abundanz und die Artenzusammensetzung des Restbestandes zu klären.

Parzelle 3

Die Anlage dieser Parzelle entspricht im Wesentlichen der von Parzelle 2. Abweichend davon wurde sie zur Begünstigung der Migration und zum Schutz vor Räubern mit zusätzlichen Schutzvorkehrungen ausgestattet, die den Tieren bei der Einwanderung über die vegetationslose Fläche Deckung gewähren sollten. Dazu wurden durch in Linien angeordnete Brettchen durchgängige Zuwanderungsbahnen von den angrenzenden Äckern ins Zentrum der Parzelle eingerichtet.

11.4 Erhebungen im ersten Jahr nach der Zwischenbewirtschaftung

Im Juni 2015, nur ca. 4 Wochen nach Fertigstellung der Trasse fanden sich auf der Trasse bereits deutliche Regenwurmspuren. Es ergab sich eine mittlere Regenwurmabundanz von 28 RW/m². Es handelte sich dabei ausschließlich um *A. caliginosa*, die als Erstbesiedler und hinsichtlich der Standortseigenschaften als eher anspruchslose Art gilt. Bemerkenswert dazu war, daß fast alle Würmer in Wurzelnestern der vorangegangenen Maiskultur gefunden wurden (Abb. 59 unten). Vermutlich dienten diese dem mechanischen Schutz bei den Erdarbeiten. Nicht gefunden wurde hingegen *Lum-*



Abb. 59: Erste Regenwurmspuren nach der Re-kultivierung (oben) und Wurzelnester aus der vorangegangenen Maiskultur (unten)

bricus terrestris, der als anözische Art ein dauerhaft angelegtes Bausystem bewohnt. Während *Aporrectodea caliginosa* in überraschend großer Zahl überlebte, ist der Bestand an *Lumbricus terrestris* durch die Zerstörung der Bauten offenbar weitgehend ausgelöscht worden.





Abb. 60: Mikrohabitat (oben links), freigelegtes Mikrohabitat mit Regenwurmlosung (oben rechts), Regenwurm (unten links) und frische Losung (unten rechts)

Nur etwa 3 Monate nach Abschluß der Rekultivierung fand sich unter den Brettchen bereits eine hohe Überformung der Bodenoberfläche. Die Bodenoberfläche war dort zwischenzeitlich flächig mit einer Feinwurzeltapete überzogen. Im Durchschnitt waren etwa 60 % der Fläche mit Regenwurmlosung bedeckt. Bedingt durch die üppige Vegetation mit einem geradezu unerschöpflichen Nahrungsangebot und einem perfekten Schutz vor Austrocknung und Fressfeinden fanden die Regenwürmer sehr günstige Lebensbedingungen vor. Besonders günstig wirkte sich das mehrmalige Mulchen aus, wodurch die Nahrung vorzerkleinert und wesentlich leichter zugänglich gemacht wurde. In der Konsequenz stellte sich deshalb schon innerhalb von nur 3 Monaten ein deutlich erhöhter Bestand an Regenwürmern ein. Im Durchschnitt wurden nun schon 113 Individuen/m², im Extremfall sogar bis zu 153 Individuen/m² gefunden. Die Zahl der Regenwürmer hat sich somit innerhalb kurzer Zeit annähernd vervierfacht. Völlig überraschend war schließlich der Befund, daß die Abundanz auf der eingezäunten und den frei zugänglichen Flächen praktisch gleich war. Die Schlußfolgerung daraus ist, daß die Zuwanderung von außen bei der Erholung der Bestände eine untergeordnete Rolle spielte. Eine sehr erhebliche Anzahl an Würmern hatte den Eingriff offensichtlich in unterschiedlichen Entwicklungsstadien unbeschadet überlebt.

Die im April 2016, also weniger als ein Jahr nach der Rekultivierung durchgeführte Erhebung bestätigte diesen Befund (Tab. 5). Mit durchschnittlich 136 Exemplaren/m² wurde auf der eingezäunten Parzelle mit Abstand die größte Regenwurmabundanz gefunden. Auf den Parzellen mit freiem Zugang und dem Seitenstreifen betrug die Zahl der Individuen dagegen nur etwas mehr als die Hälfte davon. Auf dem angrenzenden Acker lagen die Werte geringfügig höher als beim Seitenstreifen und Parzelle 1. Die Individuenzahlen haben auf der Trasse inzwischen das Niveau des angrenzenden Ackers erreicht.

Tabelle 5: Übersicht über die Regenwurmerhebung im April 2016						
Plot	Ort/Tiefe [cm]	Individuenzahl		Fläche	Individuenzahl/m ²	
		0-30	>30		0-30	>30
1	Trasse Seitenstreifen ehem. Lagerfläche	9	0	0,13	68	0
2		6	0	0,10	62	0
3		3	1	0,13	24	8
4		16	0	0,13	128	0
5		7	0	0,11	64	0
	Σ	41	1	∅	69	2
6	Trasse Parzelle 1 gezäunt	14	1	0,11	129	9
7		18	1	0,11	170	9
8		12	2	0,11	110	18
	Σ	44	4	∅	136	12
9	Trasse Parzellen 2,3 freier Zugang	3	1	0,12	26	9
10		10	0	0,10	101	0
11		10	0	0,11	95	0
	Σ	23	1	∅	74	3
12	Trasse feucht	26	0	0,12	212	0
13	Kontrolle Ackergras Intensivkultur	10	0	0,11	95	0
14		11	0	0,10	111	0
15		8	0	0,07	114	0
16		6	0	0,11	55	0
17		9	0	0,14	64	0
	Σ	44	0	∅	88	0
	ΣΣ	178	6	∅	96	3

Die Artenverteilung (Abb. 60) zeigt erneut die Dominanz von *Aporrectodea caliginosa*, die etwa drei Viertel des gesamten Bestandes stellt. Darauf folgte mit 11% *Lumbricus terrestris*, der aufgrund der Ackernutzung vor der Baumaßnahme komplett fehlte oder nur mit sehr geringer Abundanz vorkam.

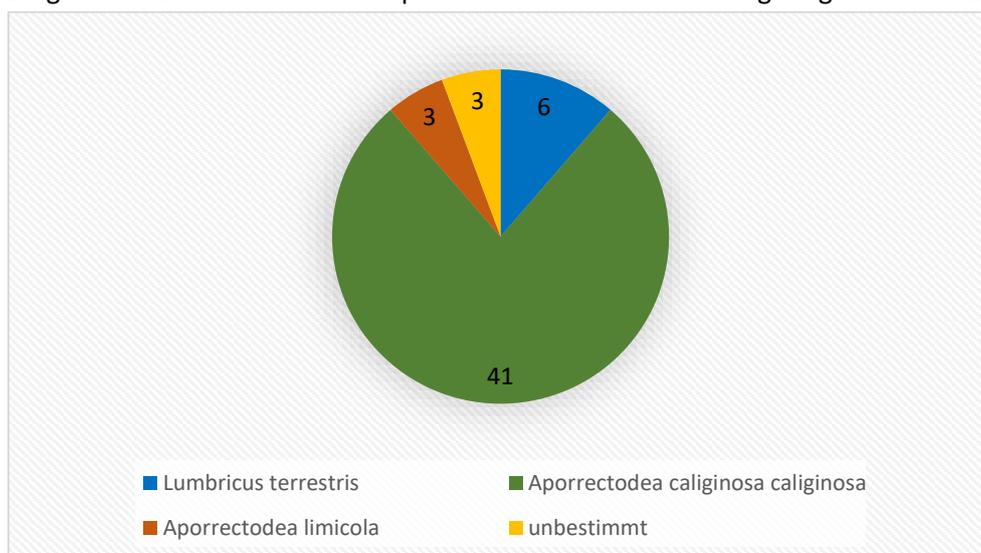


Abb. 60: Artenverteilung auf der Trasse und dem angrenzenden Ackerland 10 Monate nach der Re-kultivierung (pauschale Erhebung über alle Parzellen)

Interpretation und Bewertung

Schon weniger als ein Jahr nach der Rekultivierung hat sich der Regenwurmbestand wieder auf dem Niveau vor der Baumaßnahme eingestellt bzw. dieses sogar überschritten. Die Rekonvaleszenz ist damit deutlich rascher erfolgt als ursprünglich angenommen. Dies ist auf verschiedene Ursachen zurückzuführen. Die sorgfältig angelegten Mieten und die während der Zwischenlagerung rasch erfolgten Begrünung mit Winterroggen haben sich mit Sicherheit positiv auf die Erhaltung des Restbestandes ausgewirkt. Von noch größerer Bedeutung dürfte allerdings die Zwischenbewirtschaftungskultur gewesen sein, die im Bereich der Versuchspartellen aus Rotklee bestand, der auf dem nährstoffreichen Substrat optimal gewachsen war. Mehrfaches Mulchen hat die Nahrung leichter zugänglich gemacht und gleichzeitig zu einer flächendeckenden Streuauflage geführt, die den Würmern Deckung und Schutz vor Austrocknung gewährt hat. Die zeitnahe Anlage einer geeigneten Zwischenbewirtschaftungskultur spielt deshalb für die Erholung der Regenwurmfauna eine wichtige Rolle.

Grundsätzlich schwer zu erklären ist der Befund, daß die Bestände auf der eingezäunten Fläche am höchsten sind. Wenngleich nicht auszuschließen ist, daß durch die Zäunung auch die Zuwanderung von Räubern reduziert wurde, kann dies die großen Unterschiede zur Parzelle mit freiem Zugang nicht erklären. Die Ersterhebung hatte gezeigt, daß die Individuenzahlen unmittelbar nach der Rekultivierung auf beiden Flächen annähernd gleich waren. Dies war aufgrund der beim Wiederauftrag erfolgten Homogenisierung des Oberbodenmaterials zu erwarten. Die danach erfolgte, starke Differenzierung der Abundanzen muss daher andere Ursachen haben. Ursächlich ist vermutlich eine kleinstandörtliche, auf Reliefunebenheiten basierende Differenzierung, die auf kurzer Strecke sehr unterschiedlich ausfallen kann. Bei der Wiederverfüllung des Kabelgrabens ist das Relief zur Kompensation von zu erwartenden Setzungserscheinungen über den Systemachsen erhöht worden, so daß ein wellenartiges Profil quer zur Trasse entstanden ist. Die tiefsten und damit auch die feuchtesten Stellen finden sich stets über der Trassenachse oberhalb der ehemaligen Baustraße. Genau an diesen Stellen wurde auch die höchste Abundanz festgestellt. Es handelt sich dabei um die Plots Nr. 7, 10 und 12. Dies spricht dafür, daß die kleinräumig sehr hohe räumliche Varianz des Vorkommens vom Oberflächenrelief und dem davon abhängigen Feuchteregime erheblich mitbestimmt wird.

Leider konnte nicht geklärt werden wie sich das Artenspektrum, insbesondere der Bestand an *L. terrestris* im Detail entwickelte. Die dafür erforderliche, nach Einstichen separierte Artenbestimmung konnte nicht durchgeführt werden. Bei der ersten Erhebung unmittelbar nach der Rekultivierung war *L. terrestris* vollständig verschwunden. Zumindest wurden keine entwickelten Würmer gefunden. Eine orientierende Erhebung vor Beginn der Baumaßnahmen durch LAMPARSKI und KOBEL-LAMPARSKI hatte ebenfalls keine Hinweise auf das Vorkommen von *L. terrestris* vor Beginn der Baumaßnahme ergeben. Es ist deshalb wahrscheinlich, daß *L. terrestris* aufgrund der günstigen Bedingungen zwischenzeitlich auf der Trasse (wieder) vorkommt.

11.5 Erhebung MSc. Stauber 2016

Eine weitere, wesentlich umfangreichere Erhebung wurde im Oktober/November 2016 im Rahmen einer Masterarbeit von J. Stauber an der Universität zu Köln durchgeführt.

Im Einzelnen sollten folgende Fragen geklärt werden:

- Welche Auswirkungen ergeben sich durch das Bauwerk und die Baumaßnahme?
- Bestehen Zusammenhänge zwischen Abundanz und Eingriffsstärke durch die Baumaßnahme?
- Sind die Auswirkungen abhängig von den Standortseigenschaften?
- Welche Rolle spielt die Zwischenbewirtschaftungsvegetation?
- Welche Zusammenhänge bestehen zwischen Abundanz/Artenverteilung und Standort?
- Welche Zusammenhänge bestehen zwischen Abundanz/Artenverteilung und Nutzungsform?

11.5.1 Zusammenhang Abundanz Trasse-Kontrolle

Auf der Trasse war die Regenwurmabundanz generell deutlich größer als auf den Referenzflächen außerhalb (Tab. 4). Auf den Referenzflächen erreichten die Individuenzahlen im Vergleich zur Trasse höchstens 65 %, meist sogar weniger als 5 %. Nicht zutreffend ist dies lediglich für die Kontrolle IC, die im Unterschied zu den anderen Kontrollparzellen als Dauergrünland genutzt wird. Hier war die Abundanz größer als auf der Trasse. Sie nimmt dadurch eine Sonderstellung ein.

Tabelle 4: Abundanz Trasse-Kontrolle [Individuen/m ²]					
Standort	IA	IC	IIB	IIC	IIIB
Trasse	348	322	287	422	173
Kontrolle	29	381	181	19	6

11.5.2 Zusammenhang Abundanz - Standort/Bewirtschaftungsform

Bezüglich der standörtlichen Differenzierung ergab sich für die Trasse und die Kontrolle ein unterschiedliches Bild. Im Bereich der Trasse liegen die Abundanzen insgesamt auf einem ähnlich hohen Niveau (Tab. 6; Abb. 61). Deutlich niedrigere Werte ergaben sich lediglich für einen Standort. Die nur sehr schwache standörtliche Differenzierung ist darauf zurückzuführen, daß das Substrat hinsichtlich der physikalischen und chemischen Eigenschaften kaum variiert. Dies gilt für die Humusgehalte, Carbonatgehalte und die pH-Werte, die durchweg im schwach sauren, für die Regenwürmer optimalen Bereich liegen. Die Bodenmatrix besteht überwiegend aus Sand mit kleineren Anteilen von Schluff und Ton. Durch Stauwasser bedingte Unterschiede im Wasserhaushalt wurden durch das Aufbrechen der Staukörper beim Abtrag des Materials weitgehend eliminiert. Zudem bewirkten der Abtrag und die anschließende Wiedereinbringung eine gewisse Homogenisierung des Materials. Im Unterschied zu den Kontrollparzellen ist die gesamte Trasse mit einer Zwischenbewirtschaftungsvegetation aus verschiedenen Gräsern und Klee bestockt und gleichbehandelt worden. Der auf den Kontrollflächen wirksame Einfluß der Nutzungsform wird dadurch eliminiert. Dies spricht dafür, daß die Bodenmatrix für die Wiederbesiedelung als potentiell differenzierender Parameter zumindest in diesem Fall eine untergeordnete Rolle spielt.

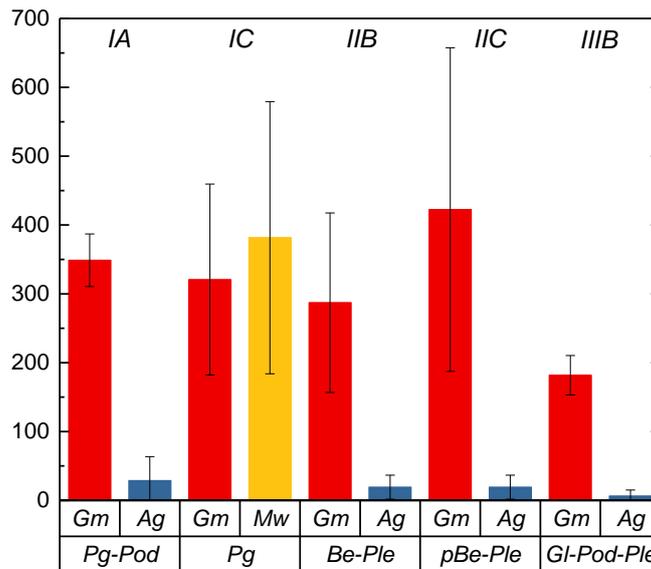


Abb. 61: Regenwurmabundanz in Abhängigkeit vom Standort und von der Nutzungsform

(Gm Grünland; Ag Acker; Mw Dauergrünland; Pg-Pod Pseudogley-Podsol; Pg Pseudogley; Be Braunerde-Plaggenesch; pBe-Ple pseudovergleyter Braunerde-Plaggenesch; Gl-Po-Ple Gley-Podsol-Plaggenesch)

Für die Referenzparzellen außerhalb der Trasse ergab sich hingegen ein wesentlich stärker differenziertes Bild, das maßgeblich von der unterschiedlichen Nutzung geprägt war. Auf den Ackerflächen wurde eine deutlich geringere Anzahl an Würmern gefunden als auf dem als Dauergrünland genutzten Standort. Hier war die Abundanz tendenziell größer als auf dem korrespondierenden, mit der Zwischenbewirtschaftungsvegetation bestockten Trassenabschnitt. Die Ursache dafür ist vermutlich, daß unter Dauergrünland langfristig kein mechanischer Eingriff erfolgt und die Bodenlagerung in ihrer ursprünglichen Form unverändert erhalten blieb. Begünstigend dürfte sich auch die üblicherweise durchgeführte Düngung ausgewirkt haben, die meist zu einem üppigen eiweißreichen Nahrungsangebot führt.

Geht man davon aus, daß die Substrate auf der Trasse und der Kontrolle des Grünlandstandortes vor der Baumaßnahme annähernd gleich und die Vegetation gleichwertig war, so bleibt der bauliche Eingriff das vorrangig differenzierende Merkmal. Daran zeigt sich, daß die Baumaßnahme zwar zunächst eine temporäre Reduzierung der Regenwurmbestände bewirkt hat. Die Bestände haben sich jedoch nach 2 Jahren so weit erholt, daß die Unterschiede zwischen Trasse und Kontrolle nur noch als Tendenz erkennbar waren. Weiterhin machen die Befunde deutlich, daß die Regenwurmpopulation maßgeblich von der Nutzungsform bestimmt wird und der Einfluß des baulichen Eingriffs und der Bodeneigenschaften dagegen sehr gering ist. Bei einer Nutzung als Grünland unterbleibt der bei Ackernutzung übliche, destruktive Eingriff in den Lebensraum der Bodenfauna. Durch die Bodenbearbeitung kommt es außer der direkten mechanischen Dezimierung der Würmer auch zu einer partiellen Zerstörung des Lebensraumes, von der vor allem die in Bauten lebenden anözischen Würmer betroffen sind. Erwartungsgemäß war die Abundanz deshalb bei Ackernutzung stets deutlich niedriger. Oft fehlten anözische Arten vollständig.

11.5.3 Zusammenhang Abundanz - Bodentiefe

Im Oberboden wurde bei weitem der höchste Anteil des gesamten Regenwurmbestandes gefunden (Tab. 5). Die relativen Anteile erreichten je nach Standort meist mehr als 90 %. Eine interpretierbare Differenzierung nach den einzelnen Standorten ergab sich nicht. Die Bodenzone oberhalb von 30 Zentimetern entspricht dem Hauptlebensraum der endogenen Würmer, die i.A. den größten Teil des gesamten Bestandes ausmachen. Die meist in vergleichsweise geringer Stückzahl vorkommenden anözi-schen Arten erschließen den Boden bis in größere Tiefen. Sie werden bei Grabungen bis maximal 30 cm Tiefe nur selten erfasst. Im Unterboden ist daher grundsätzlich mit geringeren Fangzahlen zu rechnen, was tatsächlich auch der Fall war. Die vertikal differenzierte Abundanz resultiert primär aus der Beprobung unterschiedlicher Lebensräume. Es ist deshalb davon auszugehen, daß in Tiefen > 30 cm vorwiegend anözische Arten gefangen werden.

Tabelle 5: Abundanz in Abhängigkeit von der Bodentiefe bzw. der Fangmethode [Individuen/m ²]					
Standort	IA	IC	IIB	IIC	IIIB
Tiefe 0-30 cm	339	308	256	403	157
Tiefe > 30 cm	16	13	31	19	16
Gesamt	355	321	387	422	173
Anteil aus Tiefe 0-30	95 %	95 %	89 %	95 %	90 %

11.5.4 Artenverteilung

Von den in Deutschland vorkommenden 46 Arten wurden insgesamt 7 Arten bestimmt. Die Artenzahl bewegt sich damit im Normalbereich (EDWARDS & BOHLEN ,1996; LEE, 1985).

Mit durchschnittlich 74 % der bestimmten Würmer stellten die Gattungen *Allolobophora* und *Aporrectodea* den weitaus überwiegenden Teil am Gesamtbestand (Tab. 7, 8). Bei den auf Artniveau bestimmten Arten wurden *Ap. caliginosa* und *Al. chlorotica* am häufigsten gefunden. Beide Arten waren auf allen Standorten auch bei Ackernutzung vertreten. *Ap. caliginosa* kam dort meist mit hoher Abundanz vor. Dies spricht für eine relativ große Toleranz gegenüber Ackernutzung und Bodenbearbeitung (IVASK et al. 2007). *Al. chlorotica* war zwar auch auf den meisten Standorten vorhanden. Die Abundanz war jedoch deutlich kleiner. *Al. cupulifera* kam nur mit wenigen Exemplaren vor. Fast alle Exemplare wurden unter Grünland gefunden. Damit gehörten die meisten der gefangenen Würmer zu den endogäischen Arten.

Tabelle 6: Mittlere Abundanz nach Arten und Standorten [Individuen/m ²]										
Standort	IA		IC		IIB		IIC		IIIB	
	T	K	T	K	T	K	T	K	T	K
Nutzung	Gr	A	Gr	Gr	Gr	A	Gr	A	Gr	A
<i>Al. /Ap.</i>	35	3	73	119	126	117	157	13	29	<1
<i>Lumbricus</i>	214	<1	32	47	19	10	144	<1	84	<1
<i>Al. chlorotica</i>	26	6	41	59	1	<1	<1	<1	<1	<1
<i>Al. cupulifera</i>	<1	<1	6	6	<1	1	<1	<1	<1	<1
<i>Ap. caliginosa</i>	13	10	26	40	74	21	16	3	26	6
<i>L. castaneus</i>	<1	<1	2	1	1	<1	<1	<1	3	<1
<i>L. baicalensis</i>	6	<1	<1	1	<1	<1	10	<1	6	<1
<i>L. rubellus</i>	<1	<1	1	<1	2	<1	<1	<1	<1	<1
<i>L. terrestris</i>	3	<1	8	12	6	<1	10	<1	3	<1
Juv./Fragmente	50	10	133	96	59	33	86	3	19	0
Best. Arten	297	19	189	285	229	149	337	16	151	6
<i>Al./Ap.</i> %	25	99	77	79	88	93	51	99	36	99
Gesamt	347	29	322	381	288	182	423	19	170	6
Std-Abw. s	8	35	139	198	130	118	235	18	29	9

Bei den Lumbriziden war *L. terrestris* die bei weitem dominierende Art. Danach folgten die epigäisch lebenden Formen *L. baicalensis* > *L. castaneus* > *L. rubellus*, die insgesamt nur eine untergeordnete Rolle spielen.

Zwischen den einzelnen Standorten variierte die Artenverteilung erheblich (Tab. 6). *Al. chlorotica* wurde fast ausschließlich auf den Standorten IA und IC gefunden, dort jedoch in relativ großer Abundanz. *Al. chlorotica* kommt grundsätzlich auf einem breiten Spektrum an Böden vor. Bevorzugt werden relativ feuchte Standorte unter Grünland (BOUCHÉ, 1972; JÄNSCH et al. 2013; PAOLETTI, 1999; SIMS und GERARD, 1999). Anzeichen dafür gibt es auch bei dieser Erhebung. Auf den stauwasserbeeinflussten Standorten IA mit Pseudogley-Podsol und IC mit Pseudogley wurden die meisten Exemplare gefunden.

Ap. caliginosa war hingegen auf allen Standorten mit relativ hohen Individuenzahlen vorhanden. Auch bei dieser Art war die Population durch die Grünlandnutzung stark begünstigt. Selbst bei diesen eher anspruchslosen Gattungen *Aporrectodea* und *Allolobophora* ergab sich eine klare Abhängigkeit der Abundanz zugunsten der Grünlandnutzung.

L. terrestris kam nach 1 ½ Jahren auf allen Standorten vor. Sein Vorkommen beschränkte sich jedoch ausschließlich auf die Trasse und die Kontrolle mit Dauergrünland. Auf den als Acker genutzten Parzellen fehlte er hingegen fast vollständig. Hauptgrund dafür ist die regelmäßige Zerstörung des Lebensraums durch die übliche Bodenbearbeitung und ein meist unzureichendes Nahrungsangebot. Dies führt zu einer vergleichsweise hohen Mortalität, die mit einer durch die späte Geschlechtsreife bedingten, geringen Reproduktionsrate einhergeht (CURRY and COTTON, 1983). Eine Etablierung des Bestandes an *L. terrestris* ist unter Ackernutzung weitgehend ausgeschlossen.

Eine vergleichsweise große Zahl an Würmern war nicht geschlechtsreif. Die Bestimmung konnte dafür nur auf Gattungsniveau und auch hier nur mit einer gewissen Unsicherheit erfolgen. Insofern sind die Resultate zurückhaltend zu interpretieren. Die Gattungen *Allolobophora* und *Aporrectodea* waren jedoch klar dominierend. Allerdings waren deren prozentuale Anteile am Gesamtbestand geringer als bei den sicher bestimmten Individuen.

11.6 Routineerhebung 2017

Der Vergleich der Erhebungen 2016-2017 zeigt, daß die Regenwurmabundanz innerhalb eines Jahres nochmals deutlich angestiegen ist (Tab. 7; Abb. 62). Auf der Trasse wurden zwischenzeitlich mehr als 500 Individuen/m² gefunden. Der Populationsanstieg erfolgte für die Trasse und die Kontrolle unabhängig von der Nutzungsform. Der Anstieg fiel auf der Trasse deutlicher aus als auf den Kontrollparzellen. Auf der Trasse wurde erstmals eine tendenziell höhere Abundanz festgestellt als auf dem angrenzenden Dauergrünland. Dort ist aufgrund des üppigen Nährstoffangebots und fehlender Bodenbearbeitung von optimalen Lebensbedingungen für die Regenwurmfauna auszugehen.

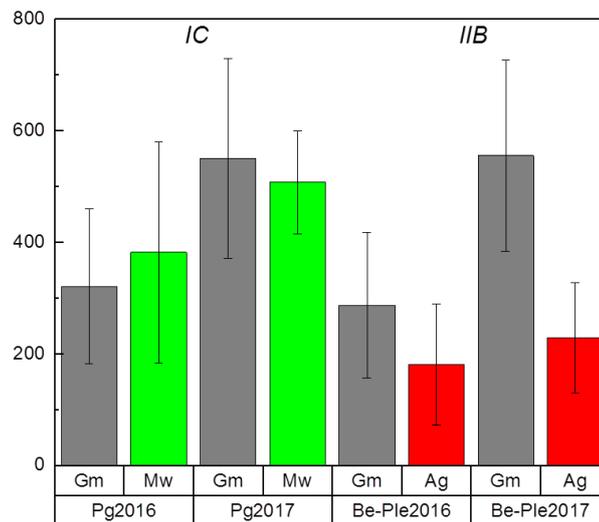


Abb. 62: Abundanzen nach Standort und Nutzungsform (Erhebungen 2016/2017)

GM - Grünland; MW - Dauergrünland/Wiese; Ag – Ackerland
Pg - Pseudogley; Be-Ple - Pseudogley-Plaggenesch

Bezogen auf das Gesamtvorkommen war die Population, wie auch im Vorjahr, von den Gattungen *Aporrectodea* und *Allolobophora* dominiert. Das Artenspektrum blieb weitgehend unverändert. Eine ausgesprochen positive Entwicklung des Bestandes zeichnete sich für *L. terrestris* ab. Die Abundanz war auf der Trasse um das 6- bis 10-fache angestiegen. Auf den Kontrollparzellen fiel der Anstieg dagegen geringer aus. Bemerkenswert ist, daß *L. terrestris* mit einer Abundanz von 5 Exemplaren/m² auch unter Ackernutzung vorkam (Tab. 7). Im Jahr zuvor konnte er dort nicht nachgewiesen werden. Möglicherweise kam es hier zu einer Rückwanderung von der vergleichsweise stark besiedelten Trasse zum angrenzenden Acker. Dies ist aufgrund der Probenahme in unmittelbarer Nähe zum Trassenrand durchaus wahrscheinlich.

Tabelle 7: Artenverteilung nach Erhebungsjahr								
Standort Jahr	IC Pg				IIC Be-Pe			
	2016		2017		2016		2017	
Plot Nutzung	Trasse Grld	Kontr. DGrld	Trasse Grld	Kontr. DGrld	Trasse Grld	Kontr. Acker	Trasse Grld	Kontr. Acker
<i>Al. /Ap. spp.</i>	73	119	241	174	126	117	218	142
<i>Lumbricus spp</i>	32	47	62	54	19	10	106	11
<i>Al. chlorotica</i>	41	59	78	74	1	0	0	0
<i>Al. cupulifera</i>	6	6	5	8	0	1	0	0
<i>Ap. caliginosa</i>	26	40	62	131	74	21	99	59
<i>L. castaneus</i>	2	1	19	0	1	0	1	0
<i>L. baicalensis</i>	0	1	0	0	0	0	0	0
<i>L. rubellus</i>	1	0	4	11	2	0	5	0
<i>L. terrestris</i>	8	12	45	34	6	0	59	5
Juv./Fragmente	133	96	34	21	59	33	68	11
Best. Arten	189	285	516	486	229	149	487	229
Al./Ap. %	77	79	74	79	88	93	65	92
Abundanz	322	381	550	507	287	181	555	240
Std.-Abw. s	139	198	179	93	130	108	171	99
Pg – Pseudogley; Be-Pe - Brauerde-Pseudogley; Grld – Grünland; DGrld - Dauergrünland								

Der gegenüber der Vorjahreserhebung festgestellte Anstieg der Population ist beträchtlich. Er erfolgte gleichermaßen auf der Trasse und auf den Referenzflächen. Es handelt sich somit nicht primär um einen Effekt im Zusammenhang mit der Wiederbesiedelung. Hauptursache für den erneuten Anstieg ist vermutlich der günstige Witterungsverlauf, der die Populationsdynamik maßgeblich prägt. Erfreulich und ökologisch relevant ist die Zunahme der Abundanz von *L. terrestris*. Der gravierende bauliche Eingriff hat den Bestand nur temporär reduziert. Die rekultivierte, mit Gräsern und/oder Klee bestockte Trasse hat sich innerhalb kurzer Zeit zu einem optimalen Habitat für die Regenwurmfauna entwickelt. Förderlich ist sicherlich auch die fehlende Bodenbearbeitung gewesen, auf die die anözischen Lebensformen besonders empfindlich reagieren. Es gibt Anzeichen dafür, daß von der Trasse aus zwischenzeitlich sogar eine Wiederbesiedelung der angrenzenden Ackerflächen mit *L. terrestris* erfolgte, der dort infolge der Ackernutzung nicht mehr vorkam.

11.7 Zusammenfassung, Schlußfolgerungen und Prognosen

Zweieinhalb Jahre nach der Rekultivierung hatte sich der Regenwurmbestand auf einem sehr hohen Niveau etabliert. Schon ein Jahr nach Abschluß der Baumaßnahme war die Regenwurmabundanz auf der Trasse auf demselben Niveau oder sogar tendenziell höher als auf den Referenzflächen außerhalb der Trasse. Dies war der herausragende Befund der Erhebung. Die Zwischenbewirtschaftungskultur und das dadurch entstandene, günstige Habitat spielten dabei die entscheidende Rolle. Die Einfluß der Standortseigenschaften und auch die Auswirkungen der Baumaßnahme traten dagegen in den Hinter-

grund. Es zeigte sich, daß sowohl die Regenwurmabundanz als auch die Artenverteilung durch die Bewirtschaftungsform - Acker oder Grünlandnutzung - maßgeblich beeinflußt wurden. Unter Grünland bestehen grundsätzlich günstigere Lebensbedingungen als bei Ackernutzung. Hauptursache dafür ist ein wesentlich besseres Nahrungsangebot sowie ein besserer Schutz vor Räufern und Austrocknung. Hinzu kommt, daß bei Grünlandnutzung keine nennenswerten mechanischen Schäden durch Bodenbearbeitung auftreten und die regelmäßige Zerstörung des Lebensraums deshalb ausbleibt.

Die Stärke des baulichen Eingriffs variiert orthogonal zur Trassenachse. Der vermutete Zusammenhang zwischen der Eingriffsstärke und Abundanz war jedoch nicht nachweisbar.

Ap. caliginosa und *Ap. chloritica* waren sowohl auf der Trasse als auch auf den Referenzflächen die dominierenden Arten. Sie gelten als relativ anspruchslose endogäische Arten mit hohen Reproduktionsraten und einer hohen Toleranz gegenüber der Bodenbearbeitung. Im Unterschied dazu stellt der anözisch lebende *L. terrestris* deutlich höhere Anforderungen an das Habitat, das er durch die Anlage tiefreichender Bauten selbst mitgestaltet. Er gilt als empfindlich gegenüber Bodenbearbeitung, durch die Teile seiner Bauten regelmäßig zerstört werden. Dementsprechend kommt er bei Ackernutzung nur sehr selten oder gar nicht vor. Die durch den Bodenabtrag bewirkte Zerstörung der Habitate ist daher nur auf den als Grünland genutzten Standorten relevant. Während der Rekultivierungsphase haben sich die Bestände jedoch rasch erholt bzw. sogar neu etabliert.

Der bauliche Eingriff hat zwar zu einer starken temporären Dezimierung der Regenwurmbestände geführt. Seit Abschluß der Baumaßnahme hat die Abundanz jedoch kontinuierlich zugenommen und ein sehr hohes Niveau erreicht, das weit über dem Niveau der als Acker genutzten Referenzflächen lag. Grund dafür ist die fehlende Bodenbearbeitung und die nährstoffreiche Zwischenbewirtschaftungsvegetation. Auf der rekultivierten Trasse ist dadurch ein optimales Habitat für Würmer entstanden.

Der aus ökologischer Sicht sehr wertvolle *L. terrestris* kam zwischenzeitlich überall auf der Trasse vor, u.a. auch auf den Standorten, auf denen er zuvor nicht vertreten war. Innerhalb von 2 ½ Jahren hat sich die Regenwurmpopulation damit vollständig erholt und teilweise sogar neu etabliert. Die Wiederbesiedelungsphase ist damit abgeschlossen.

Als Schlußfolgerung im Hinblick auf die Baumaßnahmen in offener Bauweise ergibt sich, daß diese grundsätzlich als schwere Eingriffe in den Lebensraum der Bodenfauna zu werten sind. Die dadurch verursachten ökologischen Schäden sind jedoch reversibel. Die Rekonvaleszenz erfolgt rasch. Nachhaltige negative Auswirkungen sind nicht zu erwarten.

Interpretation und Schlußfolgerungen

Die zunächst befürchtete Ausrottung von *L. terrestris* ist ausgeblieben. Erstaunlich ist, daß sich die Bestände rasch erholt haben und er nach relativ kurzer Zeit auf der gesamten Trasse vorkommt. Er kommt jetzt auch an Ackerstandorten vor, wo er zuvor gar nicht oder nur mit einigen wenigen Exemplaren vorhanden war. Als Schlußfolgerung ergibt sich daraus, daß stets ein gewisses Reproduktionspotential vorhanden gewesen sein muß, auch wenn bei den Inventuren keine oder nur sehr wenige adulte Würmer gefunden werden. Ackernutzung mit ihrer destruktiven Wirkung auf die Habitate bewirkt vermutlich eine derart hohe Mortalität, daß nur wenige Juvenile das adulte Stadium erreichen und geschlechtsreif werden. Permanente Ackernutzung ist daher ein viel stärkerer, nachhaltig wirksamer Eingriff in die Bestände als die Anlage einer Kabeltrasse in offener Bauweise. Während der Zwischenbewirtschaftung dient die Trasse als Refugium für die gesamte Bodenfauna, die sich dort weitgehend

ungestört entwickeln kann. Bereits eine einjährige Aussetzung der Bewirtschaftung wird dazu führen, daß sich dort reproduktionsfähige Bestände etablieren. Die ursprünglich angedachte Beschleunigung der Wiederbesiedelung durch Einbringung gezüchteter oder anderenorts gefangener Würmer ist überflüssig.

Grundsätzlich vorstellbar ist, daß sich das **Bauwerk**, insbesondere der **Bettungskörper** nachteilig auf die Qualität der Regenwurmhabitate auswirken könnten. Aus dem Verlauf der Wiederbesiedelung und der Populationsentwicklung ergaben sich darauf jedoch keine Hinweise. Betroffen davon wären ohnehin nur die anözischen Lebensformen. Nur diese wären in der Lage überhaupt in diese Zone vorzudringen. Die Populationsentwicklung von *L. terrestris* spricht eindeutig dagegen. Durch den erst in einer Tiefe von 1,5 m beginnenden Bettungskörper steht auch für ihn ein ausreichend großer Bodenkörper als Lebensraum zur Verfügung.

Empfehlungen für die Praxis

Bei bodenschonender Bauweise und mit einem sachgerechten Mietenmanagement werden vor allem endogäische Würmer den Eingriff in verschiedenen Entwicklungsstadien weitgehend unbeschadet überleben. Bei der Rekonvaleszenz spielt die Zwischenbewirtschaftungsvegetation eine entscheidende Rolle. Rotklee hat sich dabei als besonders gut geeignet erwiesen. Er war auf den rekultivierten Flächen innerhalb kurzer Zeit flächendeckend aufgelaufen. Innerhalb weniger Wochen war ein üppiger Bestand vorhanden, der dem Schutz vor Fressfeinden, Einstrahlung und Austrocknung diente. Weit wichtiger war jedoch das nährstoffreiche Nahrungsangebot, das den Würmern in großer Menge zur Verfügung stand. Vorteilhaft dabei war es, den Klee bzw. den Grasbestand mehrfach zu mulchen und die Rückstände auf der Fläche zu belassen. Sie standen den Würmern dann in aufbereiteter Form zur Verfügung.

Das bisher angewandte Mietenmanagement, die Rekultivierung und die Zwischenbewirtschaftung haben sich im Hinblick auf die Rekonvaleszenz der Regenwurmfauna bewährt. Grundsätzlich zu vermeiden ist jedoch eine längere Zwischenlagerung des Aushubs. Ist dies nicht möglich, ist eine unverzügliche Begrünung zu empfehlen u.a. auch um der überlebenden Bodenfauna ein ausreichendes Nahrungsangebot bereitzustellen. Für die Rückverfüllung wird empfohlen, den Zeitpunkt so zu wählen, daß umgehend eine Begrünung erfolgen und sich möglichst rasch ein flächendeckender Bewuchs einstellen kann. Eine Verbesserung des Nahrungsangebots kann durch Mulchen erreicht werden. Ein Abtransport des Schnittgutes ist zu vermeiden.

Prognose

So vielversprechend und erfreulich die Erfolge der Rekultivierung und Zwischenbewirtschaftung sind, so ernüchternd ist auch die Prognose. Der überwiegende Teil der Trasse wird auch künftig wieder als Ackerland genutzt. Nach der Freigabe wird die Trasse in der Regel unverzüglich wieder in Ackerflächen überführt werden. Die Regenwurmbestände werden sich dann innerhalb kurzer Zeit wieder auf dem Niveau der Kontrollen einstellen. Adulte Exemplare an *L. terrestris* werden diesen Wandel längerfristig kaum überleben. Grundsätzlich positiv zu bewerten ist, daß sich während der Zwischenbewirtschaftungsphase reproduktionsfähige Bestände entwickeln können, die zumindest zeitweise zur Erhaltung der Artenvielfalt beitragen werden.

Ebenso wenig nachhaltig wird der Beitrag der Regenwurmfauna zur Restrukturierung nach der Wiederaufnahme der Ackernutzung sein. Biogenes Gefüge wird danach innerhalb kurzer Zeit zerfallen und

es wird durch ein durch die Bodenbearbeitung erzeugtes Gefüge ersetzt werden. Die durch die Fauna geschaffene, vertikale Porenkontinuität wird spätestens nach erneuter Bildung einer Pflugsohle wieder aufgehoben werden. Daran wird auch eine lange Rekonvaleszenzphase nichts ändern.

Erhebung nach Wiederaufnahme der Ackernutzung

Inzwischen liegen durch die Folgerhebung im Mai 2020 aktuelle Erkenntnisse dazu vor, die die Prognose in vollem Umfang bestätigen. Die Wiederaufnahme der Ackernutzung im Trassenbereich hatte gegenüber dem Vorbestand eine Reduktion der Abundanz um fast 90 % bewirkt. Damit einher ging auch eine deutliche Einengung des Artenspektrums. Nach einem Zeitraum von weniger als 2 Jahren kam *Lumbricus terrestris* nicht mehr vor.

Zu den möglichen betriebsbedingten Auswirkungen liegen derzeit nur initiale Erfahrungen vor. Diese sprechen dafür, daß die thermischen Auswirkungen zumindest an der Oberfläche vergleichsweise gering ausfallen werden. Thermisch signifikant verändert würden nur die tieferliegenden Bodenzonen. Betroffen wären dadurch nur die anözischen Formen. Für *L. terrestris* wird nach der Wiederaufnahme der Ackernutzung, unabhängig von möglichen thermischen Einflüssen, ein Einbruch der Population bis hin zum annähernd völligen Verschwinden adulter Exemplare prognostiziert. Bei Grünlandnutzung ist dies nicht der Fall. Selbst wenn es dort zu thermischen Veränderungen kommt, steht auch für die anözischen Formen genügend Raum zur Verfügung, um sich in adäquate Bodenzonen zurückzuziehen. Dies ist eine bekannte Reaktion, die auch unter ungestörten natürlichen Temperaturschwankungen erfolgt.

12 Zusammenfassende Bewertung der bisherigen Erkenntnisse

Zu den möglichen ökologischen Auswirkungen von Höchstspannungserdkabelanlagen ist seit 2006 intensiv geforscht worden. Das Gutachten stützt sich auf diese Ergebnisse, die in den Kapiteln 6 - 10 auszugsweise dargestellt sind. Aus den Experimenten in Freiburg und Osterath und den bisherigen Erfahrungen aus dem Pilotprojekt Raesfeld ergibt sich nun ein in sich geschlossenes Bild, das eine hinreichende Einschätzung der zu erwartenden ökologischen Auswirkungen ermöglicht. Dabei wird schwerpunktartig auf Fragen eingegangen, die von der Bevölkerung, von Grundstückseigentümern, Bewirtschaftern und Trägern öffentlicher Belange gestellt wurden.

12.1 Welche Auswirkungen ergeben sich auf den Boden?

Auch unter **dauerhafter Auslegungslast** wird sich die Wärmeemission vorrangig im Unterboden bzw. in der Kabelbettung auswirken. Im Vergleich zum ungestörten Boden ist im Bereich der Bettung mit erheblichen Temperaturerhöhungen zu rechnen, die an der Schutzrohroberfläche bis zu 20 K betragen können. Sie sind bodenökologisch jedoch von untergeordneter Relevanz.

Im Oberboden (0-20 cm Bodentiefe) sind die Effekte sehr viel geringer. Sie konzentrieren sich zudem auf die Zone unmittelbar über dem zentralen Leiter eines Kabelstranges. Dies ist die wärmste Zone. Bei **Dauerbetrieb unter Auslegungslast**, können die Temperaturen dort im Mittel bis zu 3 K höher liegen. Zur Seite hin schwächen sich diese Effekte auf kurzer Distanz ab. Schon in einem Abstand von 1 m vom Trassenrand werden die Differenzen unter 1 K sinken. Unter den Bedingungen des **normalen Netzbetriebes** werden die Temperaturerhöhung über den Systemen und die Auswirkung zur Seite hin geringer ausfallen.

12.2 Was bewirken temporäre Spitzenlasten?

Temporäre Spitzenlasten können z.B. durch Einspeisung großer Strommengen aus Windkraft- oder Solaranlagen auftreten. Dabei wird es höchstwahrscheinlich auch zu erheblichen Schwankungen der Auslastung kommen. Die Anlage wird dann temporär bei **Auslegungslast** betrieben werden. Die Zeiträume werden voraussichtlich relativ kurz sein. Es ist deshalb davon auszugehen, daß die bei **dauerhafter Auslegungslast** erreichbaren Temperaturen deutlich unterschritten werden.

Spitzenlasten in Höhe der **Auslegungslast** werden primär den Bereich der Bettung erwärmen. In der quellennahen Zone kann sich die Wärmeemission schon innerhalb weniger Stunden deutlich bemerkbar machen. Bei kurzfristigen Spitzenlasten an einzelnen Tagen werden sich die Effekte auf die Kabelbettung beschränken. An der Bodenoberfläche wird sich die Wärmefront nicht bemerkbar machen. Kurzfristig auftretende Spitzenlasten bewirken nahe der Wärmequelle kontinuierlich ansteigende Temperaturen. Bei längerer Dauer beginnt sich ein quasi-stationärer Zustand einzustellen. Wird die Last zurückgefahren oder kommt es zu einer kurzfristigen Unterbrechung erfolgt rasch ein Einbruch der Temperaturen. Die thermischen Auswirkungen werden deshalb nicht nur von der Last, sondern auch von deren Variation abhängen. Eine stark variierende, temporär gegen Null sinkende Last wird danach geringere Effekte hervorrufen als eine im Mittel gleich große, aber kontinuierlich anliegende Last.

12.3 Was bewirken Grund- oder Stauwasser?

Ein Auftreten von Grund- oder Stauwasser bewirkt eine grundsätzliche Änderung der thermischen Eigenschaften des Bodens. Bei einem Auftreten von Grundwasser ist von einem perfekten Wärmeaustausch zwischen Kabelanlage und Bodenkörper auszugehen. Für den praktischen Betrieb von Höchstspannungserdkabeln bedeutet ein Auftreten von Grundwasser deshalb eine ideale Wärmeableitung von der Schutzrohroberfläche in den Boden. Hinzu kommt ein Wärmefluß, der an den Grundwasserstrom gekoppelt ist. Wenn immer sich im Trassenkörper Wasser ansammeln sollte oder dieser Anschluss an das Grundwasser haben sollte, werden die zu erwartenden thermischen Effekte an der Bodenoberfläche stark gedämpft und kaum nachweisbar sein.

Etwas anders ist dies bei Auftreten von Stauwasser. Dieses ist nur temporär vorhanden und unterliegt normalerweise keinem oder nur einem sehr langsamen lateralen Fluß. Die zugeführte Wärme wird deshalb nicht oder nur langsam abgeführt. Stauwasser wird zunächst erwärmt, wodurch der Wärme fluß in entferntere Bodenzonen deutlich reduziert wird. Bis zur Bodenoberfläche werden thermische Effekte dadurch stark gedämpft und zeitlich verzögert.

12.4 Welche Auswirkungen ergeben sich auf den Wärmehaushalt des Bodens?

Der Wärmehaushalt des Bodens wird maßgeblich vom Wärmeaustausch mit der Atmosphäre geprägt. Die Einflüsse reichen bis unter die Sohle des Trassenkörpers hinaus. In 3,35 m Tiefe sind noch ausgeprägte saisonale Jahresgänge vorhanden. Daran wird auch der Betrieb von Erdkabelanlage nichts ändern. Die thermischen Effekte werden dem saisonalen Gang stets nur "aufgesetzt" sein.

Die durch den Wärmetausch mit der Atmosphäre verursachten täglichen Schwankungen der Oberbodentemperatur sind zumindest im Sommer weit größer als die zu erwartende Erwärmung durch den Betrieb einer Erdkabelanlage.

Ungeachtet dessen kann an der Bodenoberfläche eine signifikante betriebsbedingte Temperaturerhöhung auftreten, die durch den Wärmefluß zur Bodenoberfläche hin verursacht wird. Einen direkten Wärmeabfluß zur Atmosphäre hin wird es im Sommer aufgrund inverser Temperaturgradienten nicht geben. Dennoch kommt es an der Oberfläche zu erhöhten Temperaturen durch die Wärmezufuhr aus der Atmosphäre. Der Wärmestrom aus der Atmosphäre steht dem betriebsbedingten Wärmestrom aus dem Unterboden entgegen. Die eingestrahlte Wärme wird sich deshalb auf ein kleineres Bodenvolumen verteilen und dort zu erhöhten Temperaturen führen. Die Wärme aus der Kabelanlage wird dagegen zunächst zur Seite hin oder in den Untergrund abfließen. Im Winter fließt die betriebsbedingte Wärme direkt zur Atmosphäre hin ab. Die Temperaturunterschiede zum unbeeinflussten Standort sind allerdings relativ klein. Das Ausmaß der Temperaturerhöhung hängt direkt ab von der Entfernung zur Wärmequelle. Sie ist deshalb oberhalb der Schutzrohre am größten.

Die Temperaturänderung an der Oberfläche wird saisonal unterschiedlich ausfallen. Vor der frühjährlichen Inversion der Temperaturgradienten traten im Oberboden stets die größten Temperaturdifferenzen auf. Dies ist auf den zur Oberfläche hin ungebremsen Wärmetransport zurückzuführen. Es ist daher zu erwarten, dass sich die Wärmeemission im Oberboden im Spätwinter am deutlichsten auswirken.

12.5 Wie weit reichen die lateralen Auswirkungen?

Die lateralen Auswirkungen sind nach Tiefenstufen verschieden. Ökologisch relevant sind primär die Auswirkungen im durchwurzelbaren Oberboden. Bei Betrieb unter **Auslegungslast** werden die seitlichen Auswirkungen einem Abstand von 1,5 m vom jeweils äußersten Leiter eines Systems nicht überschreiten. Für **Normallast** wird die Distanz höchstwahrscheinlich nur noch ca. 1 m betragen.

In zunehmender Bodentiefe wird der seitliche Einflußbereich größer. Auf dem Niveau der Kabel sind die Auswirkungen am größten. Bei Auslegungslast können die seitlichen Wirkungen hier 2 Meter erreichen bzw. geringfügig darüber liegen. Ökologisch sind diese Temperaturerhöhungen von untergeordneter Relevanz.

12.6 Welche Auswirkungen ergeben sich für den Bodenwasserhaushalt?

Nach allen bisherigen Erkenntnissen sind **thermisch bedingte Auswirkungen** auf den Bodenwasserhaushalt ausgeschlossen. Die Ganglinien der Bodenfeuchte reagierten primär auf das Witterungsgeschehen. Auch in wärmequellennahen Bereichen ergaben sich keine Hinweise darauf, daß die Wärmezufuhr sich in irgendeiner Weise auf den Wassergehalt des Bodens auswirken könnte. Selbst Kabelschirmtemperaturen von bis zu 75 °C zeigten bei geeigneter Bettung keine erkennbare Wirkung. Die beim "Kabeltest Osterath" in der Sandbettung aufgetretene Austrocknung ist auf die ungeeignete Körnung des Substrates zurückzuführen. Diese wird bei feinkörnigem Sand oder bei ZFSV nicht auftreten. Sie ist zudem nur für den Betrieb der Anlage von Bedeutung. Ökologisch ist sie irrelevant.

Im Hinblick auf die ökologisch relevante Bodenzone gilt folgendes: Die Erwärmung des Bodens wird zwar den Dampfdruck über der flüssigen Phase erhöhen und damit auch einen stärkeren vertikalen

Austausch ermöglichen. An der Bodenoberfläche sind die zu erwartenden Temperaturerhöhungen jedoch so gering, daß nur eine geringfügige Erhöhung des Dampfdrucks zu erwarten ist. Selbst wenn es an der Bodenoberfläche durch einen erhöhten Wasserdampfdruck zu einer verstärkten Austrocknung kommen würde, wären die zu erwartenden Effekte vernachlässigbar gering, da die Wasserleitfähigkeit mit zunehmender Austrocknung stark abnimmt. Die Wassernachlieferung aus tieferen Horizonten wird dadurch faktisch unterbunden. Hinzu kommt die Körnungsdiskontinuität zwischen Bettung und Verfüllung, die als Sperre wirkt. Eine Nachlieferung aus diesem Bereich wäre nur bei voller Wassersättigung des sandigen Bettungskörpers möglich. Diese tritt bei terrestrischen Böden nicht auf. Eine in die Tiefe fortschreitende Austrocknung ist somit nicht zu erwarten. Es ist höchst unwahrscheinlich, daß durch den *Betrieb* einer Erdkabelanlage und der davon ausgehenden Wärmeemission eine ökologische relevante Veränderung des Bodenwasserhaushalts bewirkt werden könnte.

12.7 Welche Auswirkungen ergeben sich auf eine Schneedecke und das Frostgeschehen?

Der bei *Auslegungslast* an der Bodenoberfläche auftretende Temperaturanstieg reicht nicht aus, um eine Schneebedeckung oder auch das Auftreten von Bodenfrost zu verhindern. Effekte werden lediglich dann auftreten, wenn sich die Temperaturen nahe dem Gefrierpunkt bewegen oder die Tauphase einsetzt. Es kommt dann zu einem früheren Abschmelzen der Schneedecke. Die Effekte sind abhängig von der regionalen klimatischen Situation.

Ein schnelleres Abschmelzen der Schneedecke kann den Wärmehaushalt des Bodens zumindest temporär beeinflussen. Die isolierende Wirkung der Schneedecke ist dann zeitweise nicht mehr gegeben. Bei länger anhaltenden Frostphasen könnte der Boden dann abweichend vom Umfeld gefrieren. Andererseits wird sich der Boden durch die fehlende Schneedecke auch schneller erwärmen, was das Wachstum im Frühjahr begünstigen könnte.

Die Einflüsse auf die Schneedecke und die Schneeschmelze sind jedoch auch abhängig vom allgemeinen Frostgeschehen. Dabei ist von Bedeutung, ob der Boden zum Zeitpunkt des Schneefalls gefroren ist oder nicht. Tritt vor dem Schneefall Frost auf, bleibt die Mächtigkeit der Schneedecke unbeeinflusst und die Effekte werden insgesamt abgeschwächt.

Grundsätzlich ist davon auszugehen, daß entlang der Trasse thermische Effekte auftreten, die diese im Gelände visuell erkennbar machen. Ökologisch dürften diese Effekte jedoch kaum eine Rolle spielen. Bereits kleine Reliefunterschiede bewirken ebenfalls ein flächig differenziertes Abschmelzen der Schneedecke. Die Auswirkungen dürften sich dadurch überwiegend im Rahmen der räumlichen Variation bewegen.

12.8 Welche Auswirkungen ergeben sich auf landwirtschaftliche Kulturen?

Die an der Bodenoberfläche auftretenden Temperaturerhöhungen sind deutlich geringer als die annuelle und die interannuelle Variation. Pflanzen sind somit grundsätzlich an die auftretenden Veränderungen angepaßt. Tiefgreifende Auswirkungen auf das Wuchsverhalten, die Vitalität oder den Gesundheitszustand sind deshalb nicht zu erwarten. Landwirtschaftliche Kulturen sind meist einjährig. Es kommt daher nicht zu über jahrelang anhaltenden kumulativen Effekten. Die Effekte sind geringer als

diejenigen, die sich in einem "wärmeren" oder einem "kälteren" Jahr ergeben werden. Es ist nicht anzunehmen, daß sich dadurch eine grundsätzlich andere Situation ergeben wird.

Die vielfach geäußerten Befürchtungen, die von den Erdkabeln ausgehende Bodenerwärmung würde zu substantiellen Ertragseinbußen oder gar zu einem Totalausfall landwirtschaftlicher Kulturen führen, sind durch insgesamt 7 Versuche mit gängigen landwirtschaftlichen Kulturen widerlegt.

Es bestehen auch sonst keine Hinweise auf negative Auswirkungen z.B. durch erhöhten Schädlingsbefall oder pathogene Organismen. Vielmehr könnten die Erträge aufgrund günstigerer Standortbedingungen sogar geringfügig ansteigen.

Nach den neueren Erkenntnissen aus dem **Netzbetrieb** wird die Erwärmung des Oberbodens voraussichtlich deutlich geringer ausfallen als auf der Grundlage des "Osterather Kabeltests" prognostiziert. Die unter **technischer Maximallast** erreichten Oberbodentemperaturen werden im Netzbetrieb bei weitem nicht auftreten. Vermutlich wird es auch im Netzbetrieb nicht zu einer dauerhaften Auslastung bei **Auslegungslast** kommen, so daß die Temperaturerhöhung geringer ausfallen wird als für diesen Fall prognostiziert. Ein signifikant früheres Auflaufen oder eine frühere Reife der Kulturen ist dadurch sehr unwahrscheinlich. Dafür sprechen die unter Netzbedingungen durchgeführten Versuche, wenngleich diese noch unterhalb Normallast durchgeführt wurden. Im Regelfall wird eine kollektive Bewirtschaftung möglich und eine separate Ernte nicht erforderlich sein.

12.9 Welche Auswirkungen ergeben sich auf die Bodenfauna?

Die Bodenfauna wird durch den baulichen Eingriff stark in Mitleidenschaft gezogen werden. Dies gilt für alle Artengruppen. Regenwurminventuren zeigten jedoch, daß eine erhebliche Zahl an Regenwürmern die Baumaßnahme überleben wird und daß es deshalb nach Abschluß der Zwischenbewirtschaftung zu einer raschen Wiederbesiedelung und Erholung der Bestände kommt. Die Zwischenbewirtschaftungsvegetation spielt dabei eine entscheidende Rolle. Wird diese mehrfach gemulcht, ist sie eine nahezu unerschöpfliche Nahrungsquelle und gewährt den Würmern gleichzeitig Schutz vor Räubern und vor der Austrocknung. Es entsteht auf der Trasse ein hochwertiges Habitat, das qualitativ deutlich besser ist als unter Ackernutzung. Ackernutzung wirkt sich auf die Bestände weit stärker und vor allem nachhaltiger aus als die temporäre Zerstörung des Lebensraums durch die Baumaßnahme.

Sehr günstige Bedingungen stellen sich auch für die anözischen Würmer ein. *Lumbricus terrestris* kann sich auf der Trasse etablieren, wenn er zuvor wegen Ackernutzung gar nicht vorkam.

Die Wiederbesiedelung mit Maulwürfen setzt ebenfalls unmittelbar nach der Rekultivierung ein. Die Besiedelung erfolgt anders als bei den Würmern fast ausschließlich von den Trassenrändern her. Günstig wirkt sich darauf die rasche Wiederbesiedelung mit Regenwürmern aus, die den Maulwürfen als Hauptnahrungsquelle dienen.

Auch die seitens der Landwirtschaft unerwünschten Wühlmäuse besiedeln die Trasse aufgrund des guten Nahrungsangebots und der Deckung durch die Rekultivierungsvegetation schnell. Mit der Wiederaufnahme der regulären Bewirtschaftung werden die Bestände durch Bodenbearbeitung oder Reduzierung des Nahrungsangebotes schnell wieder reduziert. Bei Ackernutzung werden sie weitestgehend aufgelöst werden. Die mögliche Gradation der Mäusepopulation ist daher lediglich ein temporärer Effekt.

Die Baumaßnahme wird auf die Bodenfauna ohne nachhaltig negative Auswirkungen bleiben. Während der Rekultivierungsphase wird sich die Biodiversität sogar erhöhen.

Inwieweit sich der Betrieb der Anlage auf die Fauna auswirken wird, wird das langfristig angelegte Monitoring zeigen. Es ist jedoch zu vermuten, daß sich die Umwandlung der Trasse in Ackerland weit stärker auf die Fauna auswirken wird als die betriebsbedingte Bodenerwärmung.

12.10 Welche Auswirkungen ergeben sich auf die Lösungs- und Sorptionsgleichgewichte im Boden?

Die Sorptions- und Lösungsgleichgewichte werden durch die Bodenerwärmung beeinflusst werden. Bei Kalium, Magnesium und Calcium kommt es zu einer verstärkten Desorption von den Bodenaustauschern und möglicherweise auch zu einer beschleunigten Lösung von leicht löslichen Salzen. Die Effekte sind analytisch zweifelsfrei nachzuweisen. Bei den im Boden auftretenden Temperaturen und der zu erwartenden betriebsbedingten Erwärmung sind die Auswirkungen jedoch äußerst gering.

Im Oberboden sind die Effekte in Relation zur prognostizierten Temperaturerhöhung um 3 K grundsätzlich bedeutungslos. Im Unterboden vor allem im Bereich der Bettung können deutlich größere Temperaturdifferenzen von bis zu 20 K auftreten. In carbonatfreien Böden werden die Auswirkungen aber auch dort sehr gering sein. Die Desorption bzw. die Lösung von Kalium, Magnesium und Calcium wird geringfügig zunehmen, bei Aluminium wird sie abnehmen. Bei carbonatischen Substraten wird es hingegen zu einer verstärkten Carbonatlösung und dadurch auch zu einer verstärkten Freisetzung von Calcium, bei dolomitischen Substraten auch von Magnesium kommen. Dies kann zu einer kleinräumigen Umverteilung im Bereich der Bettung führen. Ökologisch ist diese allerdings ohne Relevanz.

12.11 Welche Auswirkungen ergeben sich auf die mikrobielle Aktivität?

Ein Temperaturanstieg stimuliert die mikrobielle Aktivität. Die thermisch bedingte Stimulation beginnt sich allerdings erst bei Temperaturen > 30-35 °C nachweisbar auszuwirken. Zu einer Reduktion der Aktivität wird es auch in den wärmsten Zonen nicht kommen.

Im Oberboden ist aufgrund des Vorrats an zersetzbarer organischer Substanz grundsätzlich von einer höheren mikrobiellen Aktivität auszugehen. Dennoch werden die Auswirkungen auch dort vernachlässigbar gering sein, da die Temperaturen < 30 °C sind und die Temperaturerhöhung im Mittel nur 3 K beträgt.

Im Unterboden können Temperaturen > 35 °C auftreten. Der für dauerhaft angelegte **Auslegungslast** mögliche Temperaturanstieg auf bis zu 40 °C würde dort zumindest bei carbonatischen Böden die mikrobielle Aktivität stimulieren. Durch den nur in Spuren vorhandenen Anteil anorganischer Substanz fehlt zumindest den heterotrophen Mikroorganismen die Energiequelle. Es wird deshalb ebenfalls nur zu marginalen Effekten kommen, die mengenmäßig keine Rolle spielen. Nicht auszuschließen ist hingegen, daß sich das Mikroorganismenspektrum qualitativ verändert.

12.12 Welche Veränderungen sind generell zu erwarten?

Durch die Baumaßnahme wird der vorhandene Boden abgetragen und in seiner natürlichen Lagerung vollständig zerstört. Eine Wiederherstellung des ursprünglichen Zustandes ist ausgeschlossen. Durch die Verfüllung des Kabelgrabens und die Rekultivierung der Trasse wird ein neuer Boden entstehen,

der sich im Aufbau vom ursprünglichen vorhandenen Boden erheblich unterscheiden kann. Daran kann auch eine noch so detaillierte horizontweise Wiederverfüllung nichts ändern. Grundsätzlich erscheint es auch wenig sinnvoll ungünstige Bodeneigenschaften wie z.B. Verdichtung oder scharfe Schichtgrenzen mit groben Körnungsdiskontinuitäten künstlich wieder zu erzeugen. Insofern sind Abweichungen von der natürlich entstandenen Bodenlagerung unausweichlich.

Aus bodenökologischer Sicht kommt es auf eine Wiederherstellung des Ursprungszustandes gar nicht an. Entscheidend ist vielmehr, daß der Boden im Hinblick auf seine Eigenschaften und die einzelnen Bodenfunktionen nicht nachteilig verändert wird. Dies kann durch eine bodenschonende Bauweise und eine sachgerechte Rekultivierung erreicht werden. Im Hinblick auf thermische Effekte wird sich der vom Ursprungszustand abweichende Bodenzustand dann allenfalls marginal auswirken, da die Wärmeverteilung und die Wärmeflüsse vom Aufbau des Bodens oder der Horizontierung nicht erkennbar beeinflußt werden.

12.13 Gibt es längerfristige Auswirkungen auf die Vegetation?

Langfristig auftretende ökologische Konsequenzen sind anhand der bisher gewonnenen Erkenntnisse nur qualitativ zu beurteilen. Wenngleich sich die Wärmezufuhr an der Bodenoberfläche nur durch relativ geringe Temperaturdifferenzen bemerkbar macht, können längerfristig auftretende Einflüsse nicht völlig ausgeschlossen werden. Davon betroffen wären allerdings primär Dauergrünland und mehrjährige landwirtschaftliche Kulturen. Die Temperaturerhöhung ist dem natürlichen Jahresgang der Temperaturen "aufgesetzt". Es wird dadurch im Bereich der Kabelanlage grundsätzlich wärmer sein. Anders als bei kurzumtriebigen landwirtschaftlichen Kulturen könnte dies bei Dauerwiesennutzung eine Sukzession der Pflanzengesellschaft, mit einem veränderten Artenspektrum auslösen. Grundsätzlich kann die Wärmezufuhr zu einer Verlängerung der Vegetationszeit führen, was sich auf die Biomasseproduktion auch positiv auswirken könnte. Aus den bisherigen Erkenntnissen ist jedoch anzunehmen, daß diese Auswirkungen äußerst gering sein werden.

13 Übertragung der Erkenntnisse auf den Streckenabschnitt 110- /380-kV Höchstspannungsleitung Gütersloh – Wehrendorf (EnLAG, Vorhaben 16) Abschnitt: Pkt. Hesseln - Pkt. Königsholz (Landesgrenze NRW/NDS)

"Kein Standort gleicht exakt dem anderen". Es ist deshalb notwendig die Übertragbarkeit der aus den Experimenten und dem Monitoring Raesfeld gewonnenen Erkenntnisse zu prüfen und eine Einschätzung für den jeweiligen Standort zu treffen. Der Fokus ist dabei auf die Standortseigenschaften, die Baumaßnahme und das Bauwerk selbst gerichtet.

13.1 Klimatische Situation

Sowohl die Witterung als auch die lokalklimatische Situation können die thermischen Auswirkungen des Kabelbetriebs beeinflussen. Für die Übertragung der Erkenntnisse aus den Experimenten und dem Kabelbetrieb in Raesfeld müssen deshalb die Vergleichbarkeit sichergestellt und Auswirkungen von eventuellen standörtlichen Unterschieden bewertet werden.

Zur Charakterisierung der klimatischen Situation werden langjährige Mittel des Jahresniederschlags und der Jahrestemperatur von nahegelegenen Meßstationen zu den Versuchsstandorten Freiburg, Osterath und Raesfeld herangezogen. Die mittleren Jahrestemperaturen der einzelnen Stationen unterscheiden sich kaum. Aufgrund der räumlichen Nähe sind die Niederschläge der NRW-Standorte ebenfalls sehr ähnlich. Der Standort Emmendingen Mundingen ist tendenziell etwas feuchter (Tab. 8).

Für Borgholzhausen bewegt sich die jährliche Niederschlagsmenge im Streubereich der Versuchsstandorte. Die mittlere Jahrestemperatur ist um 0,6 K bis 1,4 K niedriger.

Tabelle 8: Übersicht über die klimatische Situation			
Standort	Höhe [m ü. NN]	Ø Jahresniederschlag mm	Ø Jahrestemperatur °C
Mundingen Emmendingen	201	903	9,4
Willich Meerbusch-Osterath	41	799	10,1
Raesfeld*	45	750	9,3
Borgholzhausen**	137	862	8,7

*Klimadaten aus: www.preagro.de/preagro_mops/Praxis/Raes.htm

** Klimadaten aus: <https://de.climate-data.org/europa/deutschland/nordrhein-westfalen/borgholzhausen-22278/>

Bewertung

Die Versuchsstandorte in Osterath, Freiburg und Raesfeld sind Tieflagenstandorte, die topografisch und klimatisch grundsätzlich ähnlich sind. Betrachtet man die Klimadaten für die gesamte BRD, so variieren hier die mittleren Jahrestemperaturen in einem Bereich von ca. 5 °C bis 11 °C, die Niederschläge von ca. 550 mm bis 2000 mm. Gemessen daran sind die Temperaturdifferenzen < 1,4 K und die Differenzen bei den Niederschlagsmengen mit maximal 112 mm klein. Auch im Hinblick auf die durchaus erhebliche interannuelle und die kleinstandörtliche klimatische Variation an einem Standort sind die Unterschiede klein.

Die klimatische Situation in Borgholzhausen unterscheidet sich im Vergleich dazu kaum. Die mittleren Jahresniederschläge liegen im Streubereich derjenigen der Versuchsstandorte. Die geringfügig differierenden Niederschlagsmengen sind bezüglich thermischer Effekte nachrangig. Ein Einfluss auf die Wärmeleitfähigkeit des Bodens ist erst bei deutlich niedrigeren Mengen zu erwarten. Die Ergebnisse aus den Feldversuchen Freiburg und Osterath sowie dem Pilotstandort Raesfeld sind daher im Hinblick auf die klimatische Situation untereinander ohne Einschränkung miteinander vergleichbar.

Die etwas geringere mittlere Jahrestemperatur kann zu geringfügigen zeitlichen Verschiebungen bei der Inversion der Temperaturgradienten führen, die regelmäßig im Frühjahr und Herbst auftritt (Kap 5, Abb.2). Die winterlichen, zur Oberfläche hin abnehmenden Temperaturgradienten könnten dadurch über einen etwas längeren Zeitraum ausgeprägt sein, wodurch die Wärmeabgabe in die Atmosphäre begünstigt würde. Dies könnte im Vergleich mit den Voruntersuchungen kurzfristig zu geringfügig erhöhten Temperaturen an der Bodenoberfläche führen.

13.2 Hydrogeologische Situation

Die hydrologischen Bedingungen, insbesondere der Flurabstand der Grundwasseroberfläche sind für die Einschätzung der thermischen Auswirkungen von zentraler Bedeutung. Liegt die Kabelanlage im

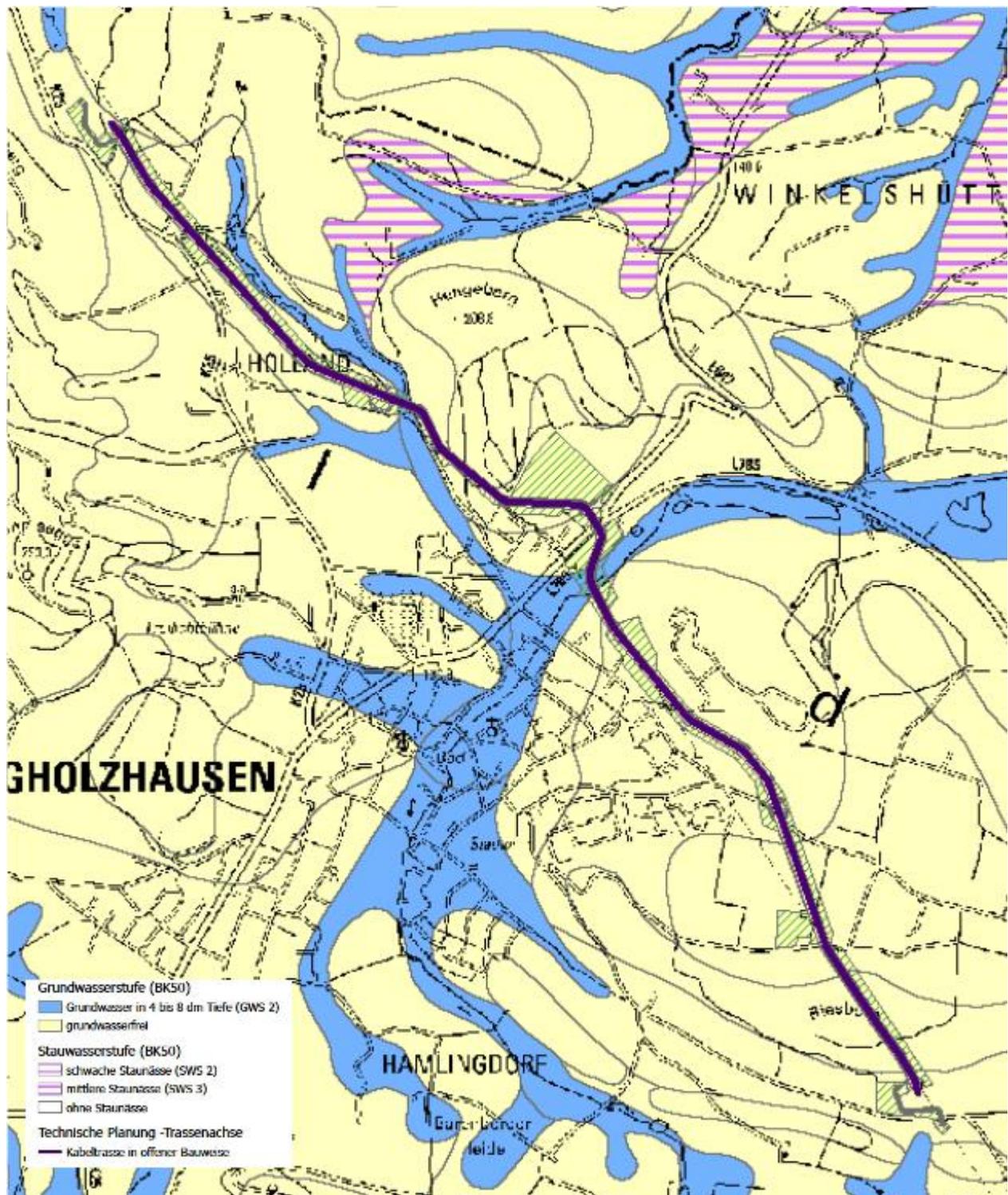


Abb. 63: Vorkommen von Grund- und Stauwasser im Trassenbereich nach der Bodenkarte BK 50 mit Trassenführung und bodenschutzfachlichen Erkundungsbohrungen.

Quelle: Ingenieurbüro Feldwisch, N. Feldwisch: Bodenschutzkonzept - 110-/380-kV Höchstspannungsleitung Gütersloh – Wehrendorf (EnLAG, Vorhaben 16) Abschnitt: Pkt. Hesseln - Pkt. Königsholz (Landesgrenze NRW/NDS) (Bl. 4210)

Bereich des Grundwasserkörpers oder erreicht die Grundwasseroberfläche sogar den verfüllten Raum oberhalb des Bettungskörpers werden die thermischen Auswirkungen weitestgehend eliminiert. Hydromorphierung durch hoch anstehendes Grundwasser tritt lediglich in den Niederungen entlang des

Violenbaches und einem kurzen Abschnitt ca. 1 km nordöstlich davon auf (Abb. 63). Bei den Bodentypen handelt es sich um Gleye, wobei das Grundwasser in 4 bis 8 dm Tiefe ansteht. Die Kabelanlage wird sich deshalb dort dauerhaft im Grundwasserkörper befinden. Das an einzelnen Stellen vorkommende Schichtwasser liegt tiefer. Es beeinflusst die Kabelanlage nicht.

13.3 Boden- und Substrateigenschaften

Welche Substrate und Bodentypen kommen vor?

Die im Bereich des künftigen Trassenkörpers vorkommenden Substrate lassen sich im Wesentlichen auf zwei grundsätzlich verschiedene Substrattypen einengen. Dabei handelt es sich zum einen um Sedimente im Bereich der Niederungen, Decklehme und Verwitterungslehme zum anderen um geringmächtige skelettreiche Schuttdecken über carbonatischem Festgestein.

Im nordwestlichen und zentralen Trassenabschnitt steht das Festgestein meist erst in Tiefen > 15 dm an (Abb. 64). Lediglich am Rand des Hengbergs tritt das Festgestein auf kurzer Distanz näher an die Oberfläche. Die Überdeckung mit feinem Material beträgt hier nur noch 5 bis 6 dm. Südöstlich anschließend folgt erneut ein ca. 800 m langer Streckenabschnitt mit hoch anstehendem Festgestein. Sowohl am Hengberg als auch hier tangiert die Baumaßnahme das Festgestein. Nach Südosten hin nimmt die Mächtigkeit der Deckschichten auf 1,5 m zu. Am Riesberg steht das Festgestein bereits in einer Tiefe von 3 dm an. Hier finden sich die flachgründigsten Böden des gesamten Trassenabschnitts.

Aufgrund der Topographie und der Klüftigkeit des überwiegend carbonatischen Substrates und ist ein zusammenhängender Grundwasserkörper ausgeschlossen. Im weitaus überwiegenden Teil der Kabelstrecke kommen deshalb rein terrestrische Böden vor. Bei den Bodentypen (Abb. 65) handelt es sich um Rendzinen, Rendzina-Braunerden und Parabraunerden, die mit 98 % der Gesamtfläche (Feldwisch, 2020) den weitaus größten Streckenanteil einnehmen.

Bodenarten

Bei den Bodenarten ist zu unterscheiden zwischen den Verwitterungslehmen, den Decklehmen und den Talablagerungen. Die **Verwitterungslehme** sind in der Regel deutlich steinreicher als die beiden anderen Substrate. Dies gilt vor allem für die an den Hängen vorkommenden Kalkverwitterungslehme, die häufig mehr als 70 % Skelett enthalten. Deren Verwitterungsrückstand ist tonreich. Dies zeigen auch die Körnungsanalysen des geologischen Gutachtens (KÜHN Geoconsulting, 2020). Oftmals sind diesen Substraten jedoch aus Lößablagerungen stammende Schluff- und Feinsandanteile beigemischt. Dies ist auch im Bereich der Kabeltrasse der Fall. Dementsprechend variiert die Körnung im Bereich Ufs, Tu und Tus. Das Wasserhaltevermögen der Feinsubstanz (FK) ist vergleichsweise hoch. Das des gesamten Bodens ist aufgrund des hohen Skelettanteils dagegen gering. Die Verwitterungslehme unterscheiden sich aufgrund des hohen Skelettanteils erheblich von den Substraten des "Freiburger Experiments" und des "Kabeltests Osterath". Dies macht eine gesonderte Bewertung erforderlich.

Bei den **Decklehmen** handelt es sich vermutlich um entcarbonatisierte Lößdecken. Diese sind im Allgemeinen weitestgehend skelettfrei. Die Bodenart ist fast ausschließlich um Schluff (U) mit variablen Beimischungen von Feinsand (fs) und/oder Ton (T). Die am häufigsten vorkommende Bodenart ist feinsandig-toniger Schluff (Ufst).

Bei den **Talablagerungen** handelt es sich um Material, das aus den Decklehmen abgetragen wurde. Dementsprechend unterscheiden sich auch die Bodenarten nur marginal. In den obersten Zonen des

Sediments ist die am häufigsten vorkommende Bodenart ebenfalls feinsandig-toniger Schluff (Ufst). Gelegentlich finden sich auch etwas tonreichere Stellen vom Typ sandig-schluffiger Ton (Tus). Die Talablagerungen sind insgesamt vergleichsweise homogen.

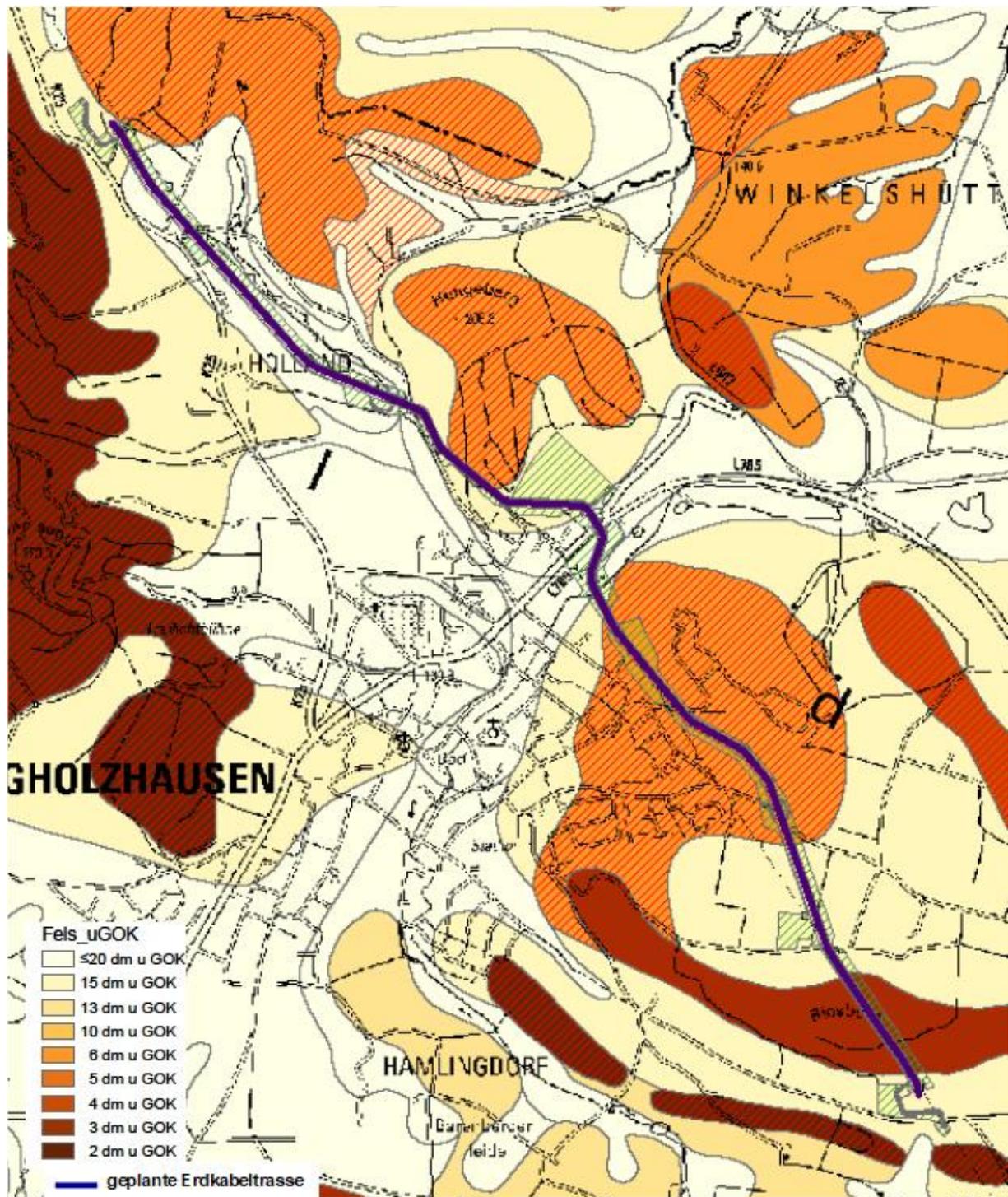


Abb. 64: Lage des anstehenden Festgesteins in Bezug auf die Geländeoberkante nach der BK 50 mit Trassenführung

Quelle: Ingenieurbüro Feldwisch, N. Feldwisch (2020): Bodenschutzkonzept - 110-/380-kV Höchstspannungsleitung Gütersloh – Wehrendorf (EnLAG, Vorhaben 16) Abschnitt: Pkt. Hesseln - Pkt. Königsholz (Landesgrenze NRW/NDS) (Bl. 4210)

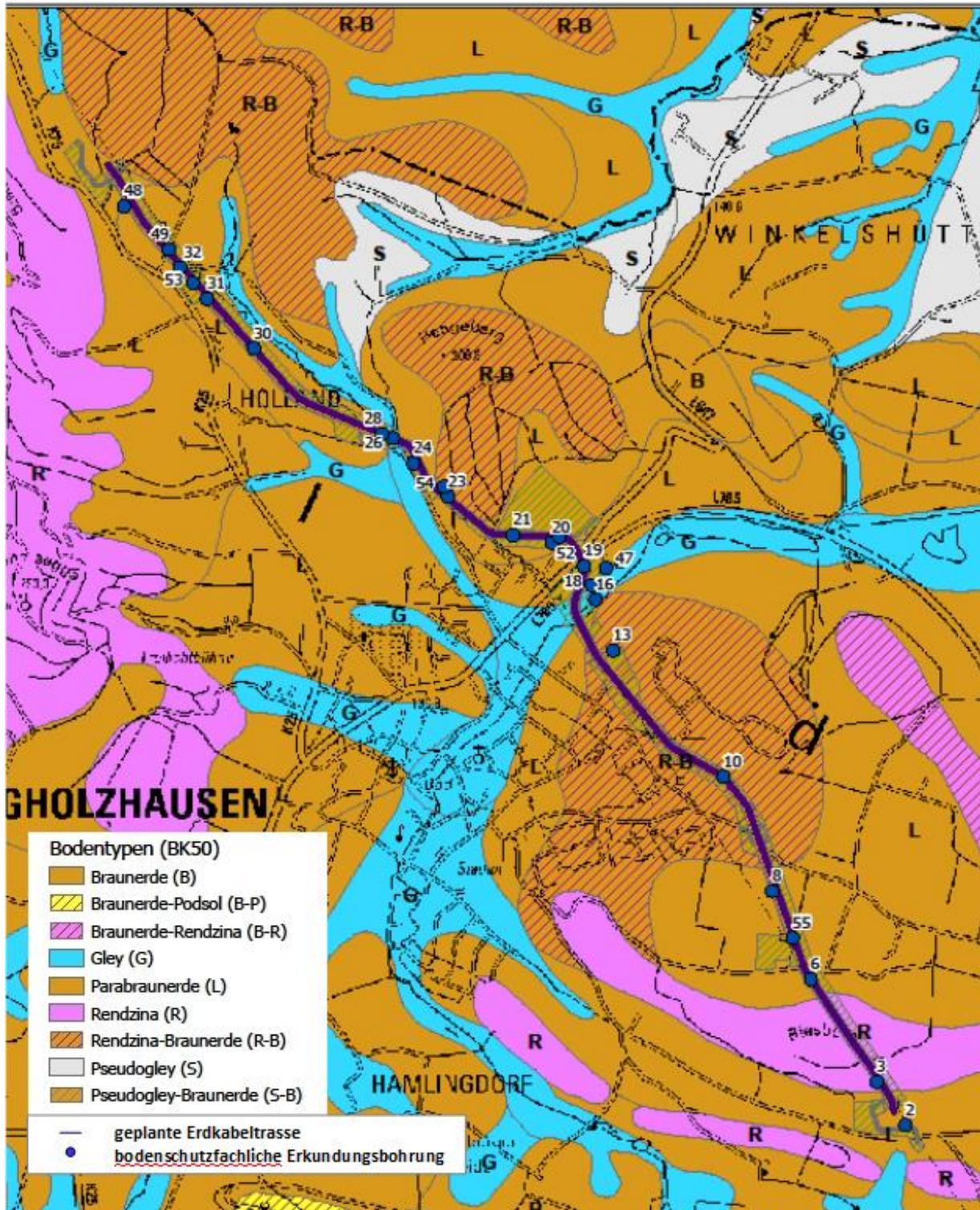


Abb. 65: BK 50 mit Trassenführung und bodenschutzfachlichen Erkundungsbohrungen

Quelle: Ingenieurbüro Feldwisch, N. Feldwisch (2020): Bodenschutzkonzept - 110-/380-kV Höchstspannungsleitung Gütersloh – Wehrendorf (EnLAG, Vorhaben 16) Abschnitt: Pkt. Hesseln - Pkt. Königsholz (Landesgrenze NRW/NDS) (Bl. 4210)

Die **Decklehme** und die **Talablagerungen** in Borgholzhausen sind weitgehend identisch mit den Substraten aus dem "Freiburger Experiment" und dem "Kabeltest Osterath". Die Ergebnisse aus diesen Experimenten können deshalb im Hinblick auf die Bodenart uneingeschränkt auf die entsprechenden Streckenabschnitte in Borgholzhausen übertragen werden.

Anders ist dies jedoch bei den Streckenabschnitten, in denen stark skeletthaltige **Verwitterungsdecken** oder gar das Festgestein bis nahe an die Geländeoberfläche reichen (Abb. 65). Dies ist auf etwa einem Drittel der gesamten Trassenlänge der Fall. In der skelettreichen, oft klüftigen Matrix fehlt größtenteils der für eine ausreichende Wärmeableitung erforderliche Anteil an Feinsubstanz. Bei der Anlage des Kabelgrabens wird der ursprüngliche feste Gesteinskörper zerstört und in Gesteinsbruch umgewandelt. Beim Wiedereinbau dieses Gesteinsbruchs entstünden zwangsläufig große, mit Luft gefüllte Hohlräume, wodurch die Wasserspeicherleistung auf annähernd Null absinken würde. Weiterhin würden die Kontaktflächen zwischen den Gesteinsbruchstücken auf ein Minimum reduziert. Dies würde zu einer stark reduzierten Wärmeleitfähigkeit führen, die für den Betrieb einer Erdkabelanlage wahrscheinlich nicht mehr ausreichen würde. Ein Wiedereinbau dieses felsigen Materials ist daher ohne weitere Behandlung ausgeschlossen.

Modifiziertes Füllmaterial

Um bei der Verfüllung des Kabelgrabens auf Fremdmaterial zu verzichten und den Standort möglichst ähnlich dem Ausgangszustand wiederherzustellen, wird der anfallende Gesteinsschutt wiederverwendet. Dieser wird zunächst zerkleinert und anschließend mit feinem, beim Aushub der Trasse anfallendem Material (sandig-toniger Schluff) versetzt. Dadurch können die für eine ausreichende Wärmeleitfähigkeit erforderlichen Wärmebrücken erzeugt und ein ausreichendes Wasserhaltevermögen des Füllmaterials sichergestellt werden.

Zur Optimierung der Gesteinsmischungen wurden durch das Ingenieurbüro KÜHN Consulting in Kooperation mit der RWTH Aachen Vorversuche durchgeführt. Getestet wurde die Abhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit λ vom Wassergehalt und dem Anteil an beigemischter Feinsubstanz.

Tabelle 9: Wärmeleitfähigkeit λ [W/K*m] in Abhängigkeit vom Stein- und Feuchtegehalt des modifizierten Füllmaterials			
Steingehalt/Wassergehalt [%]	5	10	13
75	1,2	2,2	2,0
80	1,4	2,1	2,1
85	1,5	2,1	2,0
95	1,1	1,6	1,6

Quelle: KÜHN Geoconsulting (2020): **Amprion Bl. 4210 (Gütersloh – Lüstringen): Erdkabelverlegung Borgholzhausen**. Stellungnahme zur Ermittlung der Wärmeleitfähigkeit an Kalkstein/Löss-Mischproben

Die Ergebnisse zeigten, daß die Wärmeleitfähigkeit des modifizierten Substrates schon bei einer Feuchte von 5 % mehr als 1,0 [W/K*m] beträgt. Eine Steigerung der Feuchte auf 10 % bzw. 13 % bewirkte bei einer Beimischung von 5 % Feinmaterial eine Erhöhung auf 1,6 [W/K*m]. Höhere Beimischungen von Feinsubstanz bewirkten eine Steigerung auf mehr als 2 [W/K*m], wobei eine Erhöhung der Feuchtegehalte dann kaum noch Wirkung zeigte.

Im Hinblick auf die zu erwartenden thermischen Effekte ist es grundsätzlich möglich mit autochtonem Material ein Füllsubstrat mit einer guten bis sehr guten Wärmeableitung herzustellen. Die Wärmeleitfähigkeiten liegen in der gleichen Größenordnung wie die im Zuge einer Erhebung in Osterath gemessenen Werte. Diese betragen in der Flüssigbodenbettung im Durchschnitt 2,7 [W/K*m], im mineralischen Füllkörper 2,4 [W/K*m] und im humosen Oberboden 1,3[W/K*m]. Derartige Werte würden bereits bei einer Beimischung von 15 % Feinsubstanz und einem Wassergehalt > 10 % annähernd erreicht. Für die Füllung im Freiburger Experiment ist aufgrund des sehr ähnlichen Substrates von weitgehend gleichen Werten auszugehen. Die Ergebnisse aus den Experimenten sind deshalb grundsätzlich auch auf das modifizierte Füllmaterial aus Kalksteinschutt und schluffreicher Feinsubstanz übertragbar.

Nicht außer Acht zu lassen ist jedoch, daß das an den Kabelgraben seitlich angrenzende Substrat grundsätzlich anders beschaffen ist. Dieses besteht im unteren Bereich aus klüftigem, carbonatischem Festgestein und einer darüber liegenden Verwitterungsdecke aus carbonatischem Solifluktionsschutt. An Rand des Kabelgrabens erfolgt deshalb ein Wärmeübergang in ein völlig anderes Substrat, das in Abschnitt 13.6.5 gesondert beschrieben und bewertet wird.

13.4 Aufbau der Kabelanlage im Abschnitt Borgholzhausen

Die Kabelanlage im Abschnitt „Borgholzhausen“ unterscheidet sich von den Versuchsanlagen in Freiburg und Osterath sowie dem Sensorfeld in Raesfeld erheblich. Für die Begutachtung ist daher eine Neubewertung und Anpassung der Befunde erforderlich.

Im Unterschied zu den Versuchsanlagen besteht die Kabelanlage „Borgholzhausen“ aus mehreren Stromkreisen mit verschiedenen Spannungsebenen (Abb. 66 - 69). Es handelt sich dabei um eine von Westnetz betriebene 110 kV-Anlage und eine 380 kV-Anlage. Die Anzahl der Kabelstränge beträgt 6 bzw. 12. Die 380 kV-Anlage ist in mehreren Streckenabschnitten annähernd identisch mit der Anlage in Raesfeld. Von dem in Raesfeld verwirklichten, standardisierten Grabenprofil musste aufgrund der stark variierenden Topographie mehrfach abgewichen werden. Realisiert werden dadurch insgesamt 4 Varianten mit unterschiedlicher Kabelanordnung, wobei zunächst nach der Reliefsituation hinsichtlich Ebene bzw. Hang zu unterscheiden ist. Bedingt durch die naturräumlichen Besonderheiten ist es weiterhin erforderlich, die Trassenbreite auf einzelnen Streckenabschnitten zu reduzieren und durch einen modifizierten Bauablauf auf die mittige Baustraße zu verzichten. Es ist deshalb weiterhin zu unterscheiden zwischen einer Verlegung mit bzw. ohne mittige Baustraße.

Die **110 kV-Anlage** besteht aus 2 Systemen, wobei die einzelnen Kabel zu „Dreier-Strängen“ gebündelt sind. Die Abstände zwischen den Kabelbündeln sind mit lediglich 50 cm relativ klein.

13.4.1 Verlegung in weitgehend ebenem Gelände mit und ohne mittige Baustraße

Die eben verlegte **380-kV-Anlage** mit mittiger Baustraße (Abb. 66) entspricht in der Kabelanordnung weitgehend dem ursprünglichen Regelgrabenprofil der Pilotstrecke Raesfeld. Im Detail bestehen jedoch folgende Unterschiede: Die Kabelabstände innerhalb der Untersysteme sind im Vergleich mit

Raesfeld um 20 cm größer, der Abstand zwischen den Untersystemen wurde um 70 cm verkürzt. Der Abstand zwischen den beiden Systemen A und B wird hingegen um 3,05 m größer.

Die minimale Überdeckung ist mit lediglich 140 cm um 40 cm geringer als in Raesfeld. Im Vergleich mit dem "Freiburger Experiment" und dem "Kabeltest Osterath" liegen die Kabel in ebenem Gelände hingegen um 5 cm bzw. 10 cm tiefer.

Bei der Variante ohne mittige Baustraße wird der Systemabstand zwischen A und B (Abb. 67) um mehr als die Hälfte verkleinert. Die beiden ursprünglich weit auseinander liegenden Systeme rücken mit einem Abstand von nur noch 4 Metern deutlich näher zusammen.

Mit durchschnittlich 1,5 m ist die Überdeckung der **110 kV-Anlage** annähernd identisch mit derjenigen der Versuchsanlagen in Osterath und Freiburg. Bedingt durch die größere vertikale Ausdehnung des Kabelbündels resultiert kann daraus eine geringfügig kleinere Überdeckung resultieren.

13.4.2 Verlegung in geneigtem Gelände mit und ohne mittige Baustraße

Für die Verlegung in geneigtem Gelände sind ebenfalls 2 Varianten vorgesehen, die sich vor allem durch die Systemabstände zwischen A und B unterscheiden (Abb. 68 und 69). Die Anordnung der Kabel in den Untersystemen entspricht derjenigen, bei weitgehend ebener Verlegung. Sofern keine mittige Baustraße angelegt wird, verkürzt sich der Systemabstand auch hier gegenüber Raesfeld auf 4 m. Bei Anlage einer mittigen Baustraße beträgt der Systemabstand 12,7 m. Im Vergleich mit Raesfeld rücken die Untersysteme um 3,05 m auseinander.

Ein weiterer Unterschied besteht im Hinblick auf die Überdeckung der Systeme, die durch die Hangneigung variiert. Bei der **380 kV-Anlage** beträgt die minimale Tiefe 1,40 m, die maximale 3,05 m. Die minimale Tiefe von 1,40 m ist um 15 cm, die maximale um 165 cm größer als in Osterath. Die Übertragung der Ergebnisse aus Osterath entspricht somit einer sehr konservativen Betrachtungsweise. Im Vergleich mit Raesfeld ist die Überdeckung neigungsabhängig um ca. 40 cm geringer bzw. um bis zu 125 cm größer. Dies erfordert eine entsprechend differenzierte Bewertung. Die neigungsabhängig unterschiedliche Überdeckung wird zu einem unsymmetrischen Wärmeprofil führen (Abb. 73, S. 107).

13.4.3 Grabenprofile im Trassenverlauf

Beginnend an der KÜS Riesberg wird die Anlage bis zum Streckenabschnitt 0 + 500 ohne mittige Baustraße verlegt (Abb. 70). Daran schließt eine ca. 1,2 km lange, überwiegend in ebenem Gelände verlaufende Strecke mit mittiger Baustraße an. Zur nordöstlichen Umgehung des Siedlungsbereiches erfolgt die Bauausführung ab Kilometer 1 + 900 bis zu Kilometer 3 + 0,00 erneut ohne mittige Baustraße. Der restliche Streckenabschnitt bis zur KÜS Klusebrink wird mit mittiger Baustraße ausgeführt (Abb. 71). Von dem insgesamt 4,2 km langen Trassenabschnitt wird der überwiegende Teil der Strecke (2,6 km) sehr ähnlich dem Grabenprofil in Raesfeld gebaut.

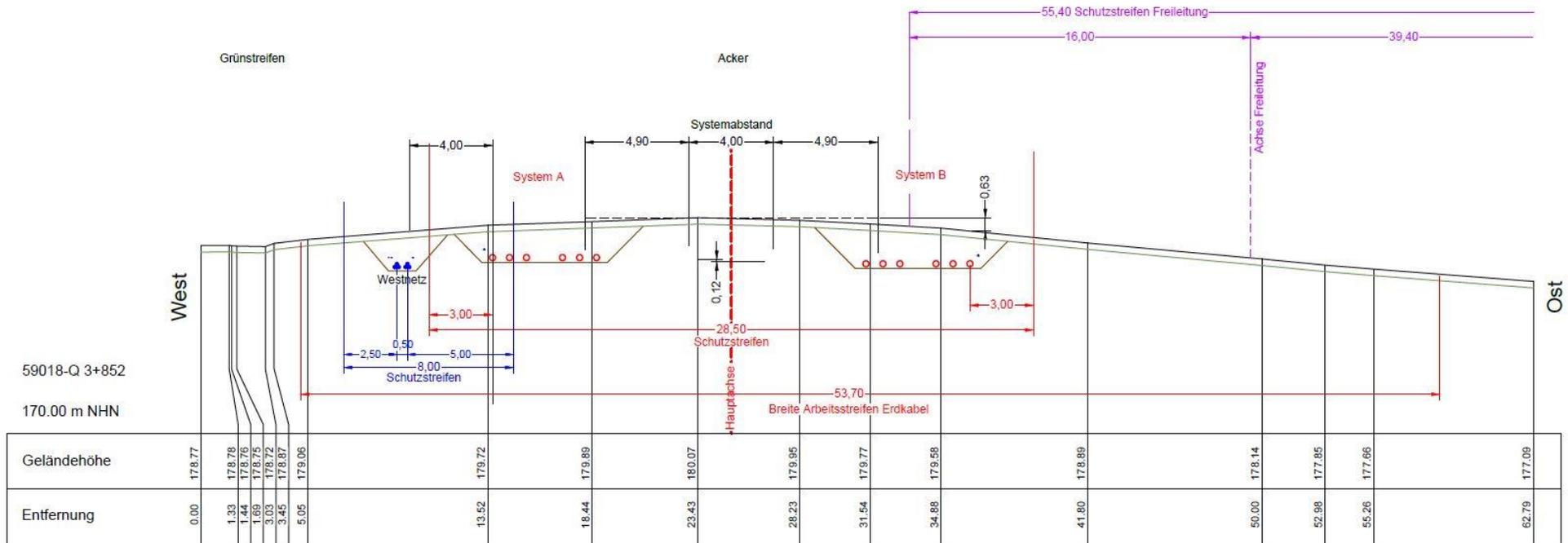


Abb. 66: Grabenprofil in weitgehend ebenem Gelände mit mittiger Baustraße
 Beispiel: Relief bei km 3+852

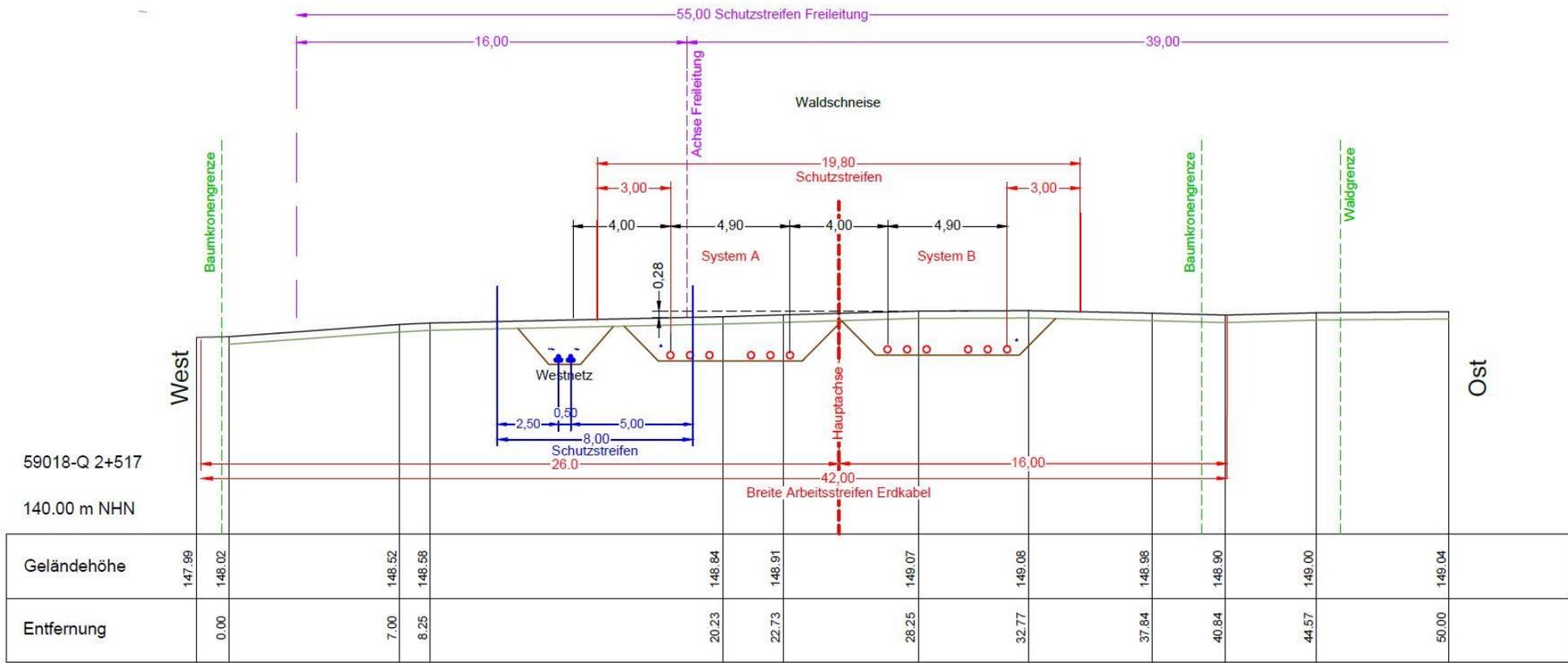


Abb. 67: Grabenprofil in weitgehend ebenem Gelände ohne mittige Baustraße
 Beispiel: Relief bei km 2+517

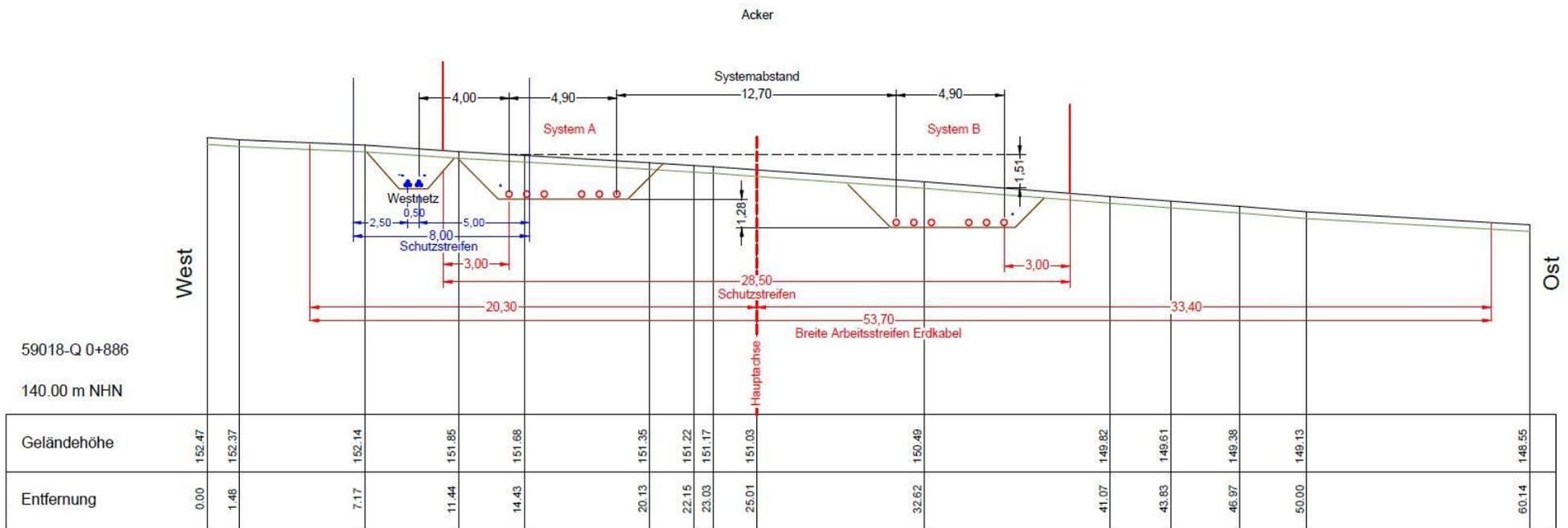


Abb. 68: Grabenprofil im geneigten Gelände mit mittlerer Baustraße
Beispiel: Relief bei km 0+866

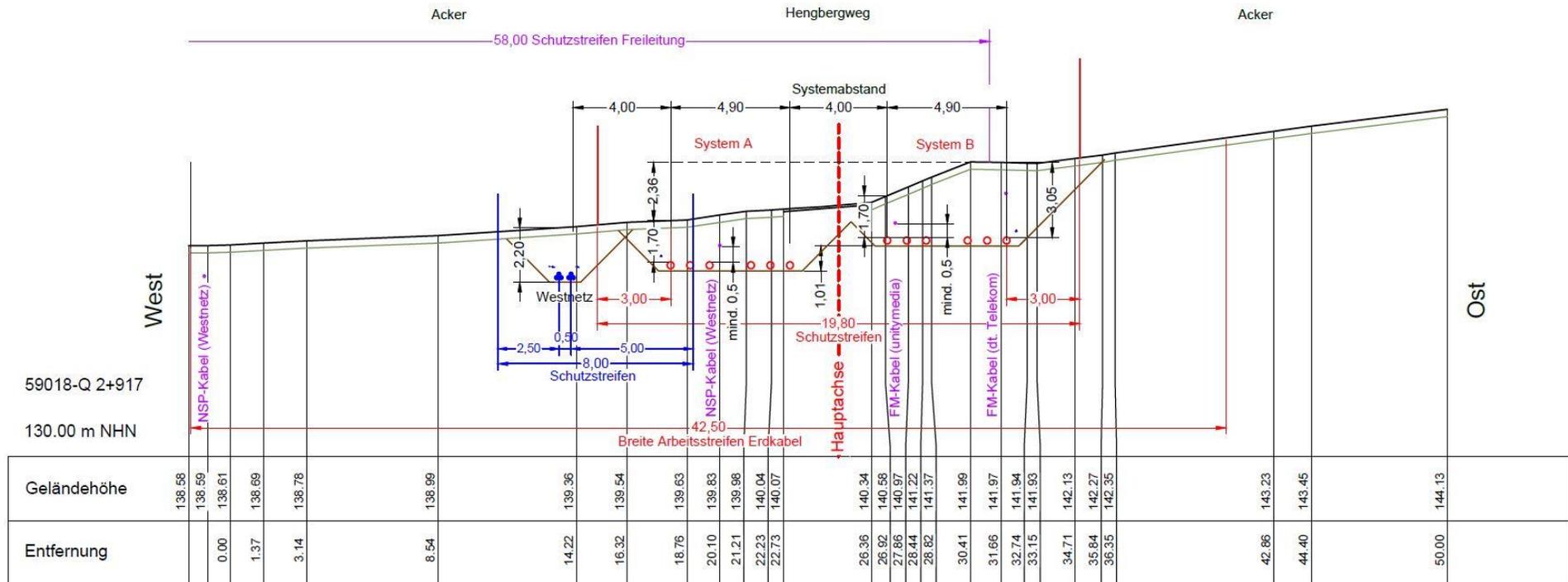


Abb. 69: Grabenprofil in geneigtem Gelände ohne mittlere Baustraße
 Beispiel: Relief bei km 2+917

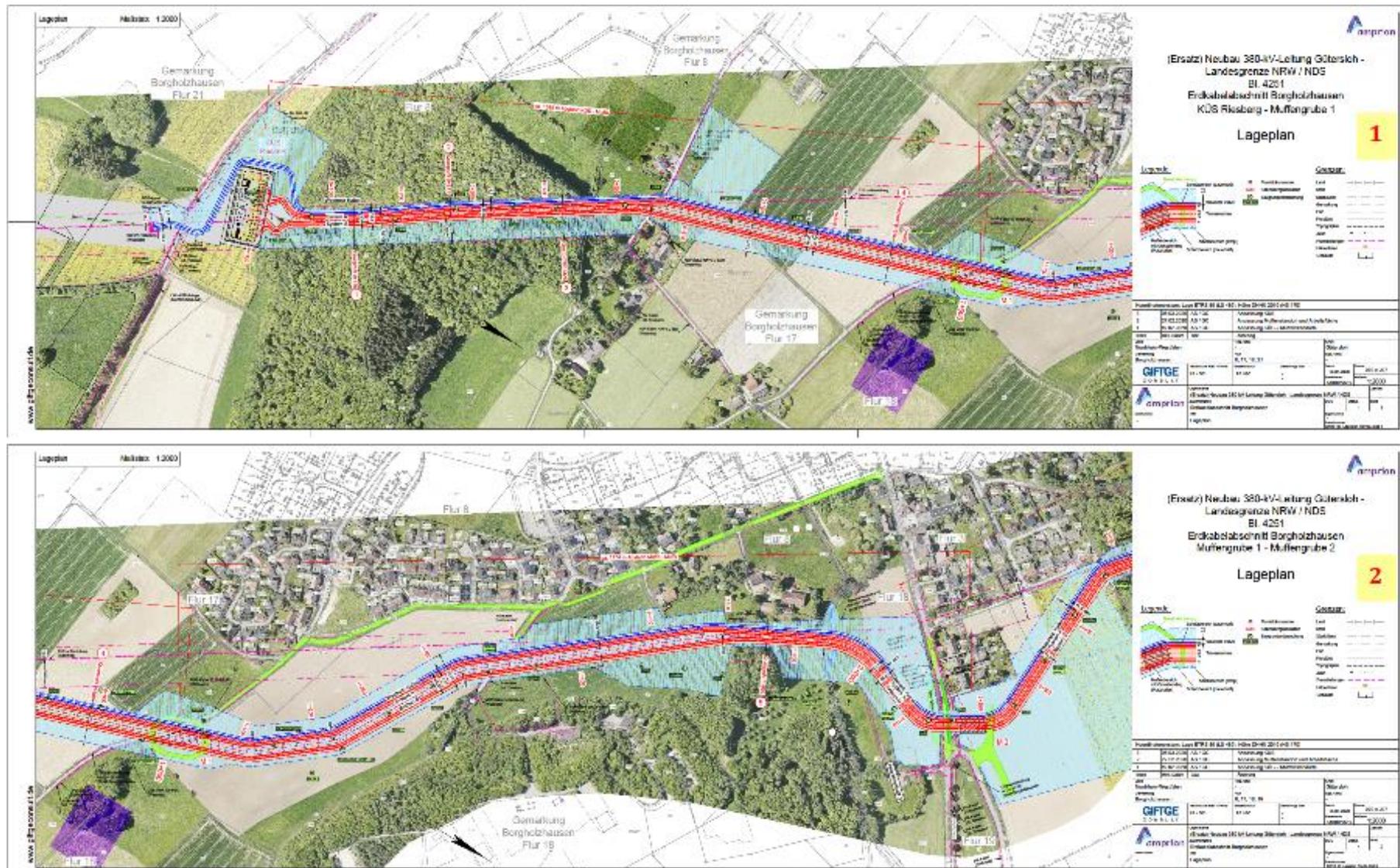


Abb. 70: Verlauf der Erdkabeltrasse im südlichen Teil des Verkabelungsabschnitts (Lagepläne 1 und 2)

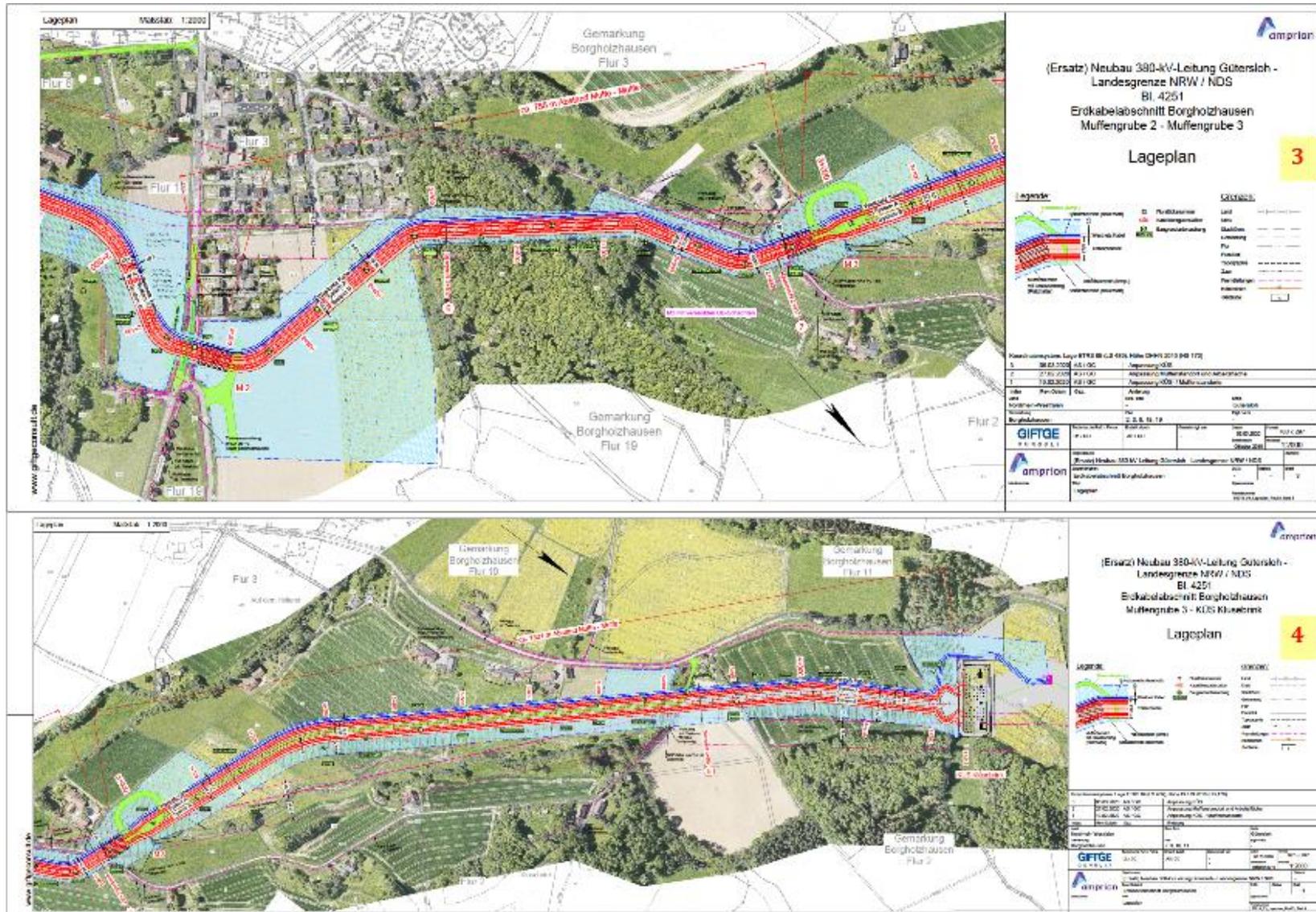


Abb. 71: Verlauf der Erdkabeltrasse im nördlichen Teil des Verkabelungsabschnitts (Lagepläne 3 und 4)

13.5 Verlustleistung im Kontext mit dem “Freiburger Experiment“

Die zu erwartende Bodenerwärmung hängt direkt ab von der Verlustleistung der Kabelanlage. Diese bestimmt die Wärmemenge pro Zeiteinheit, die in den Boden abgegeben wird. Die ist der entscheidende Parameter für die Prognose thermischer Effekte. Für die Kabelanlage in Borgholzhausen liegen berechnete Verlustleistungen für 3 Lastfälle vor. Es ist dadurch erstmals möglich, die zu erwartende Bodenerwärmung in Borgholzhausen im Kontext mit den Ergebnissen aus dem “Freiburger Experiment“ einzuschätzen.

Unter Normallast mit 1080 A ist die Verlustleistung im Vergleich zu derjenigen im “Freiburger Experiment“ nur sehr gering (Tab. 10). Dies gilt auch noch für den n-1 Fall bei 1800 A.

Tabelle 10: Berechnete Verlustleistungen für die Kabelanlage Borgholzhausen*			
	380 kV-Anlage		
Strom [A]	1080	1800	2040
Verlustleistung [W/m Kabel]	13,6	30,6	38,1
	110 kV-Anlage		
Strom [A]	476		
Verlustleistung [W/m Kabel]	12,5		
*D. Thiele, AMPRION GmbH: Verlustleistungsabschätzung als Basis zur Beeinflussungsbeurteilung von Erdverkabelungsabschnitten im Rahmen des Leitungsbauvorhabens EnLAG16 Wehrendorf – Gütersloh. Mitt. vom 04.02.2020			

Für die dauerhafte Erwärmung des Systems auf 50 °C war eine durchschnittliche Verlustleistung von 144 W/m erforderlich. Unter diesen Bedingungen betrug die quellennahe Erwärmung der Sandbettung gegenüber der Kontrolle max. 32 °C (Abb. 9, S. 11). An der Bodenoberfläche erreichten die Differenzen gegenüber der Kontrolle kurzfristig bis zu 7 K. Sie lagen im Jahresdurchschnitt jedoch nur bei ca. 3 K. In Relation zu den berechneten Verlustleistungen lag dem *Experiment* demnach durchgehend eine **10-fach höhere Verlustleistung** zugrunde, die im Netzbetrieb nicht erreicht wird. Dies trifft nach den Berechnungen zur Verlustleistung selbst für den für den Fall einer temporären Erhöhung des Stromes auf 2040 A nicht zu. Es ist daher im Normalbetrieb von Erdkabelanlagen mit Verlustleistungen < 50 Watt/m Kabel mit deutlich geringeren Temperatureffekten zu rechnen.

Tabelle 11: Gemessene Verlustleistung im Langzeitversuch “Freiburger Experiment“			
Zeitraum	Systemtemperatur °C	Energieeinsatz kWh	Ø Verlustleistung W/m Rohr
23.09.2018 – 03.08.2019	50	10.041	144

13.6 Interpretation und Bewertung

13.6.1 Substrat

Welchen Einfluß haben Abweichungen bei der Bodenmatrix bzw. der Bodenart?

Der Boden ist ein 3-Phasensystem aus Festsubstanz, Wasser und Luft. Davon direkt abhängig ist die Wärmeleitfähigkeit, die die thermischen Auswirkungen des Kabelbetriebs maßgeblich beeinflusst. Die Wärmeleitfähigkeit resultiert aus der Wärmeleitfähigkeit der einzelnen Komponenten und deren Zusammenwirken. Der Wärmeleitfähigkeitskoeffizient (λ) der reinen Festsubstanz ist meist $\lambda > 2 \text{ W/K}\cdot\text{m}$. Mit lediglich 0,6 bzw. 0,026 $\text{W/K}\cdot\text{m}$ sind die Werte für Wasser bzw. Luft wesentlich geringer. Demensprechend variiert die Wärmeleitfähigkeit in Abhängigkeit vom Wassergehalt in einem weiten Rahmen. Dabei spielt nicht nur die Wärmeleitfähigkeit des Wassers, sondern auch die Eigenschaft als leitendes Medium eine zentrale Rolle. Insgesamt wirkt sich die mineralogische Zusammensetzung deutlich schwächer auf die Leitfähigkeit aus als die Bodenart, die das Wasserhaltevermögen bestimmt. In einer begleitenden Studie (Demand, 2013) hatte sich gezeigt, daß die Wärmeleitfähigkeit mit dem Wassergehalt kontinuierlich ansteigt und diese bei Gehalten $> 5 \text{ Vol. \%}$ Wärmeleitfähigkeiten $\lambda > 1 \text{ W/K}\cdot\text{m}$ bewirkt. Nach den bisherigen Erfahrungen reicht diese Leitfähigkeit aus, auch bei hohem Auslastungsgrad eine Überhitzung der Kabel und einer Austrocknung des kabelnahen Bettungsbereiches zu verhindern. Die Wärme wird entsprechend der Temperaturgradienten abgeführt und final in die Atmosphäre abgegeben. Bereits lehmige Sande (Sl) oder sandiger Schluff (Us) haben eine Feldkapazität $> 25 \text{ Vol. \%}$ und eine nach maximalem Pflanzenentzug verbleibende Restfeuchte (Totwasseranteil) $> 10 \%$.

Die geringfügigen Unterschiede bei der Bodenart werden die Wärmeleitfähigkeit kaum verändern und allenfalls zu marginalen Unterschieden bei den thermischen Effekten führen.

Eine weitere Kenngröße für die Beurteilung thermischer Effekte ist Welkefeuchte des Substrates. Dies ist die Feuchte, die durch den pflanzlichen Wasserentzug nicht unterschritten wird. Sofern für die Herstellung des ZFSV und für die Verfüllung des Kabelgrabens das Material aus den Decklehmen oder dem Feinanteil der Verwitterungslehme verwendet wird, wird die kritische Restfeuchte von 5 Vol. % weder in der ZFSV-Bettung noch im Bereich des Mineralbodens unterschritten werden. Es wird daher nicht zu einer durch mangelhaften Wärmeabfluß bedingten Überhitzung der Kabelanlage kommen. Auch in diesem Punkt ergeben sich keinerlei Änderungen gegenüber den Experimenten.

Anders ist dies jedoch bei den Streckenabschnitten, in denen stark skeletthaltige Verwitterungsdecken oder gar das Festgestein bis nahe an die Geländeoberfläche reichen. Dies ist auf etwa einem Drittel der gesamten Trassenlänge der Fall. In der skelettreichen oft klüftigen Matrix fehlt größtenteils der für die Wärmeableitung erforderliche Anteil an Feinsubstanz. Die Verfüllung erfolgt deshalb nicht mit dem ursprünglichen Material, sondern mit einem modifizierten Material aus Gesteinsbruch und am Standort vorhandenem schluffigem Mineralbodenmaterial (vgl. 13.3).

13.6.2 Bauartbedingte Auswirkungen 380 kV-Anlage

Was bewirkt die von den Experimenten abweichende Überdeckung?

Durch die Erhöhung der Überdeckung wird das Bodenvolumen oberhalb der Kabelanlage vergrößert. Unterstellt man vereinfachend ein längs der Leitung zylinderförmig betroffenes Bodenvolumen, so er-

hört sich dieses im Quadrat zum Abstand von der Wärmequelle. Die Wärmekapazität des Bodenkörpers oberhalb der Anlage wird dadurch überproportional erhöht. Die Wärme wird auf ein deutlich größeres Volumen verteilt. Die Temperaturgradienten zur Oberfläche hin werden kleiner. Der Wärmestrom zur Bodenoberfläche hin wird verlangsamt. Das System wird insgesamt träger auf eine Wärmezufuhr reagieren. Solange der quasi-stationäre Zustand nicht erreicht ist, wird es zu einer geringeren Erwärmung an der Bodenoberfläche kommen.

Mit der Vergrößerung der Überdeckung vergrößert sich auch die Transportstrecke zur Atmosphäre hin. Der Wärmeübergang in die Atmosphäre wird dadurch verzögert. Auch dadurch wird das System insgesamt träger. Die Temperaturerhöhung wird deshalb im Bereich des durchwurzeltten Oberbodens grundsätzlich geringer ausfallen als beim "Kabeltest Osterath". Die Übertragung dieser Versuchsergebnisse auf die Kabelanlage „Borgholzhausen“ entspricht deshalb einem sehr konservativen Vorgehen. Dies gilt insbesondere für die Streckenabschnitte in geneigtem Gelände, wo sich unsymmetrische Wärmeprofile ausprägen werden. Das von der Systemachse hangaufwärts liegende System wird aufgrund der größeren Überdeckung geringere thermische Effekte zeigen als das unterhalb liegende.

Was bewirkt die Erweiterung auf 4 Systeme?

Die Erfahrungen aus dem "Kabeltest Osterath" und dem "Freiburger Experiment" beziehen sich auf ein einzelnes 3-adriges System ohne Wechselwirkung mit anderen Systemen. Die 380 kV Erdkabelanlage "Borgholzhausen" besteht hingegen aus 2 Systemen (A/B) mit jeweils 2 Untersystemen (A1/A2, B1/B2). Diese baulichen Abweichungen sind im Hinblick auf Übertragbarkeit der Ergebnisse zu bewerten.

Wie im "Freiburger Experiment" und beim "Kabeltest Osterath" festgestellt, werden sich die thermischen Effekte auf den Bereich unmittelbar oberhalb der einzelnen Systeme konzentrieren. Die Erweiterung der Anlage wird daran grundsätzlich nichts ändern, sofern sich die einzelnen Systeme nicht gegenseitig beeinflussen. Die Systeme A und B sind durch einen 4 m breiten Trassenstreifen voneinander getrennt. Die vorangegangenen Experimente haben gezeigt, daß die seitlichen Auswirkungen bei dauerhaft hoher Auslastung im Oberboden bis zu 1,5 m betragen können. Auf dem Niveau der Kabel, kann die Seitenwirkung bei dauerhaft angelegter Höchstlast bis zu 2,5 m betragen. Unter derart ungünstigen Bedingungen würden sich die Systeme A und B gegenseitig beeinflussen. Die Temperaturen würden an den beiden benachbarten Leitern der Systeme A1 und A2 bzw. B1 und B2 geringfügig höher sein als an den jeweils äußeren Leitern. Der Zwischenraum würde sich dadurch geringfügig stärker erwärmen als bei voneinander isolierten Systemen. Dieser Effekt würde jedoch ausschließlich im Bereich der Kabelbettung auftreten, wo die Erwärmung am stärksten ist.

An der Bodenoberfläche wird dieser Effekt vernachlässigbar gering sein. Die Temperaturen werden sich in den Zwischenräumen beider Systeme auf dem Niveau der Kontrolle einstellen. Die beiden Systeme sind hier als voneinander unabhängig zu betrachten.

Im Regelfall befinden sich die Untersysteme A1/A2 bzw. B1/B2 hingegen in einem Abstand von lediglich 1,7 Metern. Es wird daher zu gewissen Wechselwirkungen und zu gegenüber der Kontrolle erhöhten Temperaturen in den Zwischenräumen kommen. Davon betroffen ist wiederum vorrangig die Bettung. An der Bodenoberfläche werden die Effekte höchstwahrscheinlich so gering sein, daß sie sich allenfalls bei anhaltend hoher Auslastung nachweisen lassen.

13.6.3 Bauartbedingte Auswirkungen der 110 kV-Anlage

Was bewirkt die von den Experimenten abweichende Überdeckung?

Die im Vergleich mit den Experimenten nur sehr geringen Abweichungen werden allenfalls marginale Unterschiede im thermischen Verhalten der Anlage bewirken. Bei Verlegung in geneigtem Gelände sind die Unterschiede der Überdeckung vernachlässigbar.

Was bewirkt die Änderung der Leiter- und Systemabstände?

Die Vergrößerung der Abstände zwischen den Leitern reduziert die Wechselwirkungen zwischen den Leitern. Die Erwärmung wird dadurch im leiternahen Bereich geringer ausfallen und sich auf den Betrieb der Anlage positiv auswirken. Im Gegenzug wird jedoch die thermisch beeinflusste Zone der Betung größer.

Bei Abständen > 5 m treten keine Wechselwirkungen zwischen den Systemen auf, da die Seitenwirkung auch bei extremer Last < 2,5 m ist. Die in weitgehend ebenem Gelände mit mittiger Baustraße verlegten Kabelabschnitte sind voneinander unabhängig. Die Erweiterung der Abstände gegenüber Raesfeld ist bedeutungslos. Ohne mittige Baustraße sind die Systemabstände soweit reduziert, daß es bei längerfristig erhöhter Auslastung zu Wechselwirkungen kommen kann. Im Zwischenraum können sich Temperaturen einstellen, die geringfügig über dem Niveau der Kontrolle liegen. Dies führt zu einer geringfügig veränderten Wärmeverteilung. An der Bodenoberfläche werden sich die Effekte kaum nachweisen lassen. Sie werden die Temperaturen an den hotspots über den Leitern nicht erhöhen. Insgesamt wird die Trasse dadurch schmaler und die durch die Anlage beeinflusste Fläche wird kleiner.

Was bewirkt die Bündelung der Leiter bei der 110 kV-Anlage?

Die 110 kV-Anlage unterscheidet sich von den bisherigen Versuchsanlagen vor allem durch die Bündelung der Leiter. Die Bündelung der einzelnen Kabel bewirkt eine Behinderung der Wärmeabgabe und eine Konzentrierung der Wärmeabgabe auf einen deutlich engeren Raum. Bei gleicher Verlustleistung werden sich deshalb im Nahbereich der Kabel höhere, möglicherweise sogar deutlich höhere Temperaturen einstellen als bei separater Verlegung. Hinzu kommt, daß die zur Wärmeableitung in die Betung zur Verfügung stehende Oberfläche durch das Aneinanderliegen der Kabel reduziert ist. Der Wärmestrom nach außen wird dadurch behindert. Dies wird zu einer stärkeren Erwärmung der Leiter führen. Damit einhergehend ist eine Erhöhung der Verlustleistung der Kabelanlage. Infolge dessen werden auch die Betriebstemperaturen der Anlage erhöht. In welchem Ausmaß dies geschehen wird, kann hier nicht beurteilt werden.

An der engsten Stelle beträgt der Abstand der benachbarten Kabelbündel lediglich 18 cm. Die beiden Kabelbündel werden sich deshalb gegenseitig beeinflussen. Der Zwischenraum wird sich deutlich erwärmen und es werden sich hier kleinere Temperaturgradienten einstellen als zur Seite hin. Die Systeme werden sich dadurch einseitig erwärmen. Insgesamt resultiert daraus eine stärkere Erwärmung der benachbarten Kabel. Dies ist durch die Ergebnisse der vorangegangenen Experimente bestätigt. Auch dies wird dazu führen, daß sich das System partiell stärker erwärmen wird als dies bei räumlich separierten Systemen der Fall wäre.

13.6.4 Was ändert sich durch die Verlegung in geneigtem Gelände?

Die hangparallele Verlegung führt zu einer ungleichen Mächtigkeit der Überdeckung innerhalb der Untersysteme. Die Unterschiede sind so erheblich, daß daraus eine unsymmetrische Temperaturverteilung

lung, mit entsprechend differenzierten Temperaturen an der Bodenoberfläche resultieren wird. Oberhalb der Systemachsen A1/A2 bzw. B1/B2 werden die Temperaturen stets niedriger sein als unterhalb. Die minimale Mächtigkeit der Überdeckung ist jedoch mindestens gleich bzw. höher als dies in den Vorversuchen der Fall war. Es wird deshalb gegenüber diesen nicht zu erhöhten Temperaturen kommen. Die Übertragung der Erkenntnisse auf diese Systeme entspricht ebenfalls einer sehr konservativen Vorgehensweise.

Die Varianten mit und ohne mittiger Baustraße sind gleich zu bewerten wie bei der Verlegung in weitgehend ebenem Gelände.

13.6.5 Wie ist die Verwendung des modifizierten Füllmaterials einzuschätzen?

Die Untersuchungen durch KÜHN Consulting haben gezeigt, daß es grundsätzlich möglich ist, autochtones Gesteinsmaterial durch Zerkleinerung und Zusatz von Feinsubstanz so aufzubereiten, daß es den thermischen Anforderungen genügt. Bereits mit einem Zusatz von lediglich 5 % Feinsubstanz kann eine Wärmeleitfähigkeit erzeugt werden, die nach den bisherigen Erfahrungen ausreicht, um eine Überhitzung der Anlage zu verhindern. Durch eine Erhöhung des Feinanteils auf 15 % können Wärmeleitfähigkeiten $\lambda > 2,0$ [W/K*m] erzeugt werden, was den Werten im "Kabeltest Osterath" entspricht (vgl. Abschn. 13.4). Die Verfüllung wird sich deshalb thermisch sehr ähnlich verhalten wie das im Freiburger Experiment und dem Kabeltest Osterath verwendete Material. Die Wärme wird über den verfüllten Trassenkörper in sehr ähnlicher Weise mit der Atmosphäre ausgetauscht. Die Ergebnisse der Experimente sind deshalb auch auf den Füllkörper übertragbar.

Eine etwas andere Situation ergibt sich für den ungestörten Bereich an den seitlichen Grenzen der Verfüllung. Hier werden sich relativ scharfe Grenzen zwischen dem Füllmaterial und der Verwitterungsschuttdecke bzw. dem Festgestein ausbilden. Dies kann die vor allem im Sommer auftretenden seitlichen Wärmeflüsse in Abhängigkeit von der Wärmeleitfähigkeit erleichtern oder erschweren. Die Experimente zeigten, daß sich Schichtgrenzen nicht erkennbar auswirken, wenn die Körnung der Substrate ähnlich ist. Dies ist jedoch in Borgholzhausen nicht der Fall. Zwischen dem anstehenden Festgestein und der Verfüllung treffen zwei mineralogisch ähnliche, körnungsmäßig jedoch sehr unterschiedliche Substrate aufeinander. Dies sind grundsätzlich andere Verhältnisse wie bei den Experimenten, bei denen das Füllmaterial und das seitlich anstehende Substrat, abgesehen von der Lagerung, identisch waren.

Die durchschnittliche Wärmeleitfähigkeit von Muschelkalk wird in der Literatur mit $\lambda = 2,5$ [W/K*m] angegeben (BÄR, 2012). Dieser Wert liegt geringfügig höher als die zu erwartenden Werte für das modifizierte Füllmaterial. Der seitliche Wärmeabfluß wird dadurch erleichtert, sofern bei der Verfüllung nicht größere mit Luft gefüllte Hohlräume entstehen, die die Kontaktfläche zwischen den Substraten reduzieren. Im Hinblick darauf wäre ein möglichst hoher Anteil an Feinmaterial hilfreich. Eine Erhöhung des Feinstoffanteils würde jedoch dazu führen, daß sich der Trassenkörper bodenphysikalisch noch stärker gegen das vorhandene Festgestein abhebt und die charakteristischen Eigenschaften eines flachgründigen trockenen Standorts zunehmend verloren gehen. Es wird deshalb empfohlen, den Feinstoffanteil unter Berücksichtigung anderer ökologischer Belange festzulegen und das Substrat auch im Hinblick darauf zu optimieren.

13.7 Prognosen zu thermischen Effekten

Die Begutachtung basiert auf den Erfahrungen aus dem "Kabeltest Osterath" und dem "Freiburger Experiment". Das Monitoring an der Pilotstrecke Raesfeld liefert derzeit weitere, grundlegende Erkenntnisse zum thermischen Verhalten von Erdkabelanlagen. Diese können jedoch zur Prognose von Effekten unter dauerhafter Volllast aufgrund der bisher nur geringen Auslastung derzeit erst wenig beitragen. Die für verschiedene Lastfälle berechneten Verlustleistungen ermöglichen es, einen direkten Zusammenhang zwischen der Verlustleistung und der zu erwartenden Bodenerwärmung herzustellen. Die Prognosen können dadurch weiter präzisiert werden.

13.7.1 Prognosen für die 380 kV-Anlage

Auf den durch *Grundwasser* beeinflussten Streckenabschnitten wird die Temperaturerhöhung an der Bodenoberfläche so gering sein, daß sich diese im Bereich der natürlichen Heterogenität der Bodentemperaturen bewegen wird. Dies gilt auch für die Annahme eines nicht wahrscheinlichen, dauerhaften Betriebs mit Auslegungslast. Die räumliche Variation der Temperaturen liegt nach den bisherigen Erfahrungen im Bereich von 0,5 bis 1,0 K. Eine derart geringe Temperaturerhöhung ist als ökologisch unbedenklich einzustufen.

Im weitaus größten Teil der Strecke finden sich *terrestrische Böden* auf sehr ähnlichen Substraten wie bei den Experimenten in Freiburg und Osterath und dem Sensorfeld der Pilotstrecke Raesfeld. Die Erfahrungen aus den Voruntersuchungen können im Hinblick darauf mit kleineren Modifikationen auf die 380 kV-Anlage im Streckenabschnitt Borgholzhausen übertragen werden. Effekte durch Abweichungen bei der Bauart werden auf der Grundlage der bisherigen Erfahrungen eingeschätzt und bewertet.

Der für die Prognose der Bodenerwärmung entscheidende Parameter ist die Verlustleistung der Kabelanlage. Daneben spielen die hydrologischen Verhältnisse, die Substrateigenschaften (Bodenart) und die Überdeckung eine wesentliche Rolle. Kleinere Variationen bei der Bauart durch Änderungen bei den System- oder Kabelabständen werden sich primär auf die Wärmeverteilung und nur marginal auf die Höhe der Temperaturen in der ökologisch relevanten Oberbodenzone auswirken.

Im Langzeitversuch des "Freiburger Experiments" wurde an den Wärmequellen dauerhaft eine Temperatur von 50 °C eingestellt. Die dazu erforderliche *elektrische Leistung* war gegenüber der bei Normallast betriebenen Anlage in Borgholzhausen *um das Zehnfache erhöht*. Mit diesen für den Netzbetrieb unrealistischen Bedingungen betrug die Temperaturerhöhung an der Bodenoberfläche im *Jahresmittel ca. 3 K*. In Borgholzhausen erreicht die berechnete Verlustleistung selbst im ungünstigsten Lastfall nur ca. ein Drittel davon. Es ist daher weitestgehend auszuschließen, daß die 3 K-Marke im realen Netzbetrieb überschritten werden könnte. Dafür sprechen auch die Ergebnisse aus dem "Kabeltest Osterath" wo ein *Dauerbetrieb mit Auslegungslast* ebenfalls eine Erhöhung der Oberbodentemperatur von *durchschnittlich ca. 3 K* bewirkte. Auch hier handelte es sich um ein für den regulären Netzbetrieb unrealistisches Betriebsszenario. Eine mittlere Temperaturerhöhung von 3 K lässt sich demnach nur mit unrealistischen Betriebsbedingungen erzeugen.

Dafür sprechen auch die ersten Erkenntnisse aus dem *Monitoring in Raesfeld*. Danach wird die Temperaturerhöhung geringer, *möglicherweise* sogar deutlich geringer ausfallen als bisher angenommen. Nach den ersten Erfahrungen aus dem Betrieb der Anlage in Raesfeld dürfte sie sich im Bereich von *2 K* bewegen.

Die Abweichungen der Leiter- und Systemabstände gegenüber dem Regelprofil in Raesfeld werden primär zu Änderungen in der Wärmeverteilung führen. Es ist nicht wahrscheinlich, daß die beabsichtigten Änderungen bei der Bauart wesentlich erhöhte Betriebstemperaturen und eine damit einhergehende Erhöhung der berechneten Verlustleistung bewirken werden. Zudem wurde diese ohnehin für die maximal mögliche Leitertemperatur von 90 °C berechnet. In den Zwischenräumen zwischen den Leitern und Systemen werden sich gewisse Temperaturerhöhungen ergeben, die jedoch an der Bodenoberfläche vernachlässigbar gering sein werden. Dies gilt vor allem für die Temperaturen an den hot-spots über den Leitern.

Die an der Bodenoberfläche (Tiefe 3 cm) zu erwartenden Temperaturdifferenzen für die Verlegung in weitgehend ebenem Gelände sind in Abb. 72 idealisiert dargestellt. Charakteristisch sind die beiden zweigipfeligen Maxima oberhalb der Achsen der Untersysteme. Im Bereich der Baustraße gehen die Differenzen auf Null zurück. Bei Verlegung ohne mittige Baustraße rücken die Maxima entsprechend näher zusammen.

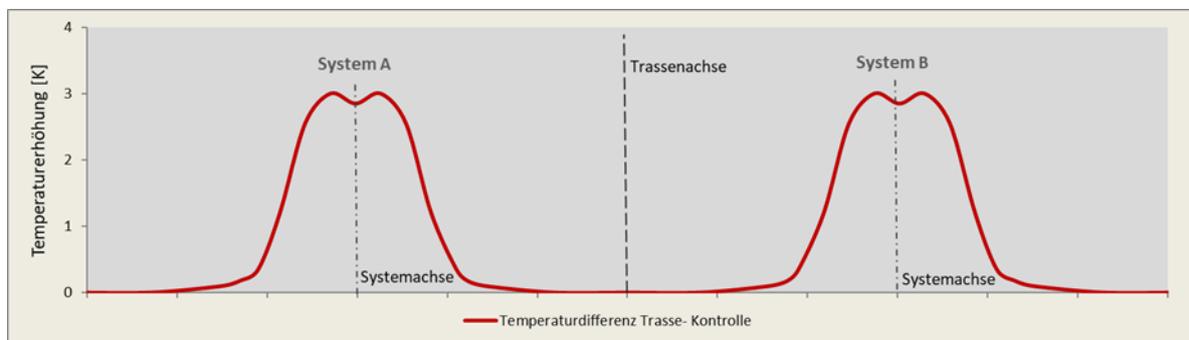


Abb.: 72: Maximale Temperaturdifferenzen (Trasse - Kontrolle) an der Bodenoberfläche (Tiefe 3 cm) 380 kV-Anlage mit mittlerer Baustraße und Verlegung in ebenem Gelände (idealisiert). Querschnitt orthogonal zur Trasse

Bei der Verlegung in geneigtem Gelände ergibt sich durch die unterschiedlich mächtige Überdeckung eine unsymmetrische Verteilung der Temperaturen bzw. Temperaturdifferenzen (Abb. 73). Oberhalb

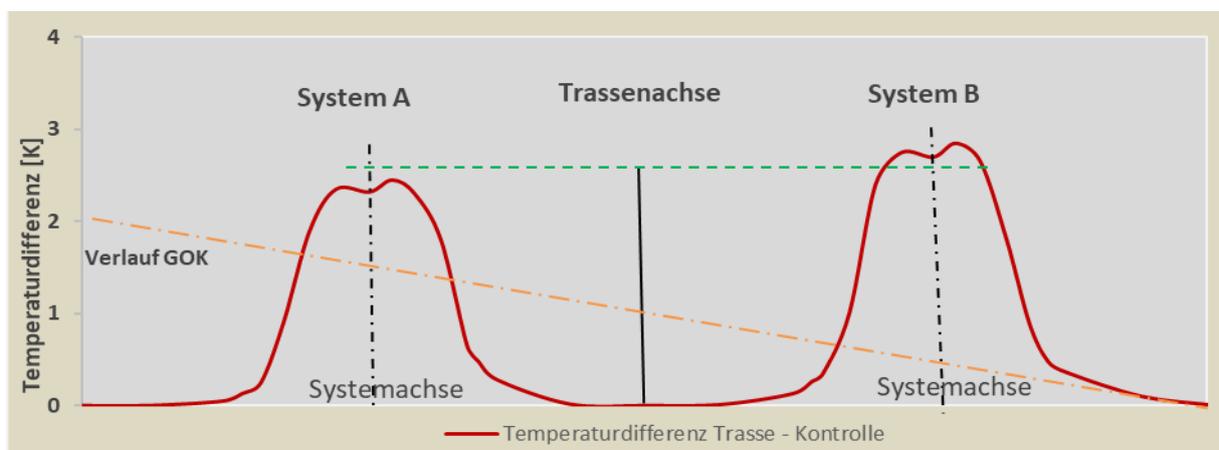


Abb.: 73: Maximale Temperaturdifferenzen (Trasse - Kontrolle) an der Bodenoberfläche (Tiefe 3 cm) 380 kV-Anlage mit mittlerer Baustraße und Verlegung in geneigtem Gelände (idealisiert). Querschnitt orthogonal zur Trasse

der Trassenachse ist die Überdeckung mächtiger als unterhalb. Dort sind die Temperaturen an den hotspots oberhalb der zentralen Leiter dadurch niedriger. Entsprechend höher sind sie unterhalb der Trassenachse. Die Unterschiede werden auf ca. 0,5 K eingeschätzt.

Die Verengung der Systemabstände auf den *Streckenabschnitten ohne mittige Baustraße* wird sich auf die Verlustleistung der Anlage nur marginal auswirken, da sich die seitlichen Einflußbereiche der Systeme allenfalls bei extremer Auslastung und auch dann nur geringfügig überschneiden. Die Auswirkungen auf die Erwärmung des Bodens werden vernachlässigbar gering sein. Aus ökologischer Sicht positiv zu bewerten ist der geringere Flächenverbrauch durch den Verzicht auf die mittige Baustraße.

13.7.2 Prognosen für die 110 kV-Anlage

Für die durch Grundwasser beeinflussten Streckenabschnitte kann die Prognose zur 380 kV-Anlage übertragen werden. Trotz der geringeren Verlegtiefe wird sich auch diese streckenweise im Grundwasserkörper befinden.

Die Bauweise der 110 kV-Anlage weicht grundsätzlich ab von den Versuchsanlagen und der Pilotanlage in Raesfeld. Die zu erwartende Bodenerwärmung kann deshalb nur durch eine auf den bisherigen Erfahrungen basierende Schätzung vorgenommen werden.

Als oberste *Grenze der Belastbarkeit* gelten *Leitertemperaturen von 90 °C*. Diese maximale Betriebstemperatur kann auch bei Bündelung der Leiter nicht überschritten werden. Es handelt sich dabei um die technische Maximallast. Im *“Kabeltest Osterath“* ist die Anlage langfristig bei dauerhaft angelegter technischer Maximallast betrieben und Leitertemperaturen von 90 °C eingestellt worden. Unter diesen im realen Netzbetrieb nicht erreichbaren Betriebstemperaturen war die *mittlere Temperaturdifferenz* zur Kontrolle an der wärmsten Stelle des Systems $< 4 \text{ K}$. Dies ist die höchste Temperaturdifferenz, die mit einer in 1,4 m Tiefe verlegten Kabelanlage in einem schluffig-lehmigen Substrat erzeugt werden kann. Die Bodenerwärmung kann deshalb auch im Streckenabschnitt Borgholzhausen diese Marke nicht überschreiten. Sie wird beim Betrieb mit Auslegungs- oder Normallast sicher geringer ausfallen. Basierend auf den bisherigen Erfahrungen wird sich der Oberboden an der wärmsten Stelle oberhalb des Kabelbündels gegenüber der Kontrolle im Mittel um höchstens 3 K erwärmen. Dabei ist berücksichtigt, daß sich ein Kabelbündel grundsätzlich stärker erwärmen wird als drei einzeln verlegte Kabel, wie dies beim Kabeltest Osterath der Fall war.

Zieht man zur Beurteilung die Ergebnisse aus dem *“Freiburger Experiment“* und die berechneten Verlustleistungen heran, kommt man zum selben Ergebnis. Durch die Bündelung der Kabel wird das System faktisch auf einen Strang reduziert. Die Verlustleistung des Stranges erhöht sich dadurch auf das Dreifache. Diese Verlustleistung entspricht ca. einem Drittel der im Dauerversuch des *“Freiburger Experiments“* eingesetzten Leistung. Es ist deshalb auch bei ungünstigen Betriebsszenarien nicht davon auszugehen, daß sich der Oberboden an der wärmsten Stelle oberhalb der Kabelstränge um mehr als 3 K erwärmen wird.

Berücksichtigt man weiterhin, daß es durch die relativ eng beisammen liegenden Systeme zu einer Konzentrierung der Wärme auf einen engeren Raum kommen wird, wird dies zu höheren Temperaturen im Boden führen, die sich auch an der Oberfläche bemerkbar machen können. Es ist daher nicht

auszuschließen, daß die betriebsbedingte Erwärmung des Oberbodens bei hoher Auslastung annähernd 3 K betragen könnte. Allerdings reduziert sich durch die auf einen kleineren Raum konzentrierte Wärmeabgabe auch die betroffene Fläche. An der Bodenoberfläche wird deshalb der signifikant beeinflusste Streifen entlang der Anlage eine Breite von insgesamt 3,5 m nicht überschreiten. Die Wärmeverteilung (Abb. 74) ist charakterisiert durch 2 Temperaturmaxima oberhalb der beiden Leiterbündel und einer Zone mit geringfügig niedrigeren Temperaturen dazwischen. Zu den Seitenrändern sinken die Temperaturen kontinuierlich auf das Niveau der angrenzenden Böden ab. Im Bereich der Bettung wird die seitliche Beeinflussung größer ausfallen. Bei anhaltender Maximallast könnte der thermisch beeinflusste Bereich eine Breite von bis zu 5,5 m erreichen.

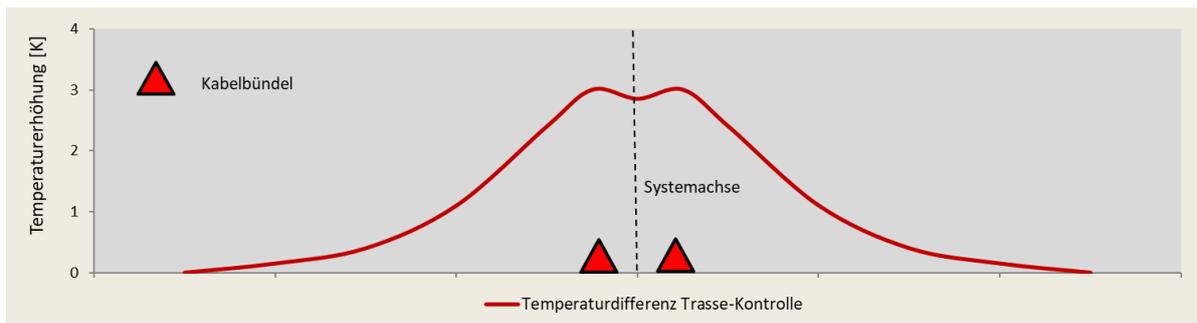


Abb.: 74: Temperaturdifferenzen (Trasse - Kontrolle) an der Bodenoberfläche (Tiefe 3 cm) der 110 kV-Anlage orthogonal zur Trasse bei Betrieb mit Auslegungslast (idealisiert)

13.8 Prognose zum Bodenwasserhaushalt

Die Prognose zum Bodenwasserhaushalt bezieht sich zunächst nur auf thermisch bedingte Effekte. Mögliche Auswirkungen durch den baulichen Eingriff bleiben dabei unberücksichtigt. In keinem der Vorversuche hatte die Bodenerwärmung zu einer Austrocknung des pflanzenökologisch relevanten Bodenraumes oberhalb der Bettung geführt. Die Bodenfeuchte war bis in den Unterboden hin bestimmt durch die saisonal variierende kleinklimatische Situation. Selbst in der ZFSV-Bettung bewirkte der anhaltende Betrieb bei einer **Leitertemperatur** von 90 °C keine messbaren Veränderungen der Feuchte.

Die vorkommenden Bodenarten unterscheiden sich z.T. deutlich von denen der Vorversuche. Dies gilt vor allem für die Verwitterungsdecken über Muschelkalk. Die darauf entwickelten Rendzinen oder Rendzina-Braunerden sind flachgründig und skelettreich. Die Wasserspeicherleistung ist generell sehr gering. Das Festgestein steht teilweise bereits in einer Tiefe von 40 cm an. Es kann für den Wiedereinbau nur aufbereitet und mit Zusatz von Feinsubstanz verwendet werden (vgl. Abschn. 3.6.1 und 3.6.5). Die ursprünglichen Eigenschaften werden dadurch grundlegend verändert. Die Wasserspeicherleistung wird deutlich erhöht. Das thermische Verhalten des modifizierten Füllmaterials unterscheidet sich danach nur noch geringfügig von den Substraten der Experimente. Es wird deshalb auch in diesem Füllkörper zu keiner thermisch bedingten Austrocknung kommen.

Die überwiegend aus U_{tf}, Tu und Tu_s bestehenden Deckschichten und Talablagerungen weichen bezüglich der Körnung nur unwesentlich von den Substraten der Experimente ab. Die Befunde aus den Experimenten können deshalb direkt auf Borgholzhausen übertragen werden. Es wird danach nicht zu einer thermisch bedingten Austrocknung des Trassenkörpers einschließlich des Oberbodens kommen.

Ungeachtet dessen wird die Verfüllung mit modifiziertem Gesteinsmaterial zu einem erheblich veränderten Bodenwasserhaushalt führen. Durch die Beimischung von Feinsubstrat wird die Speicherleistung deutlich erhöht. Der ursprünglich sehr trockene Standort wird zu einem Standort mit zumindest mäßiger Wasserspeicherleistung verändert. Dies kann sich sowohl auf das Wachstum als auch auf die Pflanzengesellschaft positiv auswirken.

13.9 Bodenfauna

Auf die Prognose von Effekten auf die Bodenfauna können die Erfahrungen aus Raesfeld vollumfänglich übertragen werden, sofern die Baumaßnahmen und vor allem die Rekultivierung in gleicher Weise ausgeführt werden. Der bauliche Eingriff wird auch hier die Bodenfauna kurzzeitig dezimieren. Dies gilt vor allem für die Makro- und die Megafauna.

Die Regenwurmbestände werden sich jedoch innerhalb kurzer Zeit regenerieren und die Abundanz wird sich auf dem ursprünglichen Niveau einstellen. Eine große Rolle spielt dabei die Anlage einer nährstoffreichen raschwüchsigen Zwischenbewirtschaftungsvegetation, die den Tieren Nahrung bereitstellt und Deckung gegenüber Feinden gewährt. Eine nachhaltige Schädigung der Bestände ist nach den derzeitigen Erfahrungen ausgeschlossen. Vielmehr wird eine Zwischenbewirtschaftungsphase temporär eine deutliche Aufwertung der Habitate bewirken.

In den Streckenabschnitten mit dem aufbereiteten Füllmaterial wird auch der untere Bodenraum für die Fauna zugänglich. Zudem kommt es insbesondere für die Regenwürmer zu deutlich besseren Feuchteverhältnissen. Es ist daher denkbar, daß sich auf den als Grünland genutzten Flächen ein Bestand an *L. terrestris* etablieren kann. Die grundsätzlich möglichen thermischen Effekte werden im Vergleich zu den physikalischen Veränderungen des ursprünglichen Substrates keinerlei Rolle spielen.

Die Wiederaufnahme der Ackernutzung wird erneut eine starke Dezimierung der Fauna durch die mechanische Bodenbearbeitung und den Verlust an Nahrung bewirken. Das Artenspektrum wird dadurch auf die endogäischen Formen eingengt. Diese hatten sich beim Bau der Anlage in Raesfeld als besonders resistent gegenüber den verschiedenen Eingriffen erwiesen.

13.10 Lösungs- und Desorptionsreaktionen

Durch den fast vollständigen Verlauf der Trasse im grundwasserfreien Bereich ergibt sich gegenüber den Versuchsbedingungen mit voller Wassersättigung hinsichtlich der Lösungs- und Sorptionsprozesse eine abweichende Situation. Die dauerhafte Wassersättigung bewirkt grundsätzlich günstige Bedingungen für die Lösung von Salzen und die Desorption. Zudem erfolgt durch den Grundwasserstrom ein permanenter lateraler Abstrom, der das Lösungsgleichgewicht stetig zu Gunsten der Lösung verschiebt. All dies ist unter terrestrischen Bedingungen nicht der Fall bzw. stark eingeschränkt. Hier wird sich meist ein stationäres Gleichgewicht einstellen, das nur bei stärkeren Niederschlagsereignissen eine Verschiebung der Gleichgewichte zugunsten der Lösung bewirken wird. Die damit einhergehende Verfrachtung von (Nähr-)stoffen ist im Vergleich zu durch Grundwasser beeinflussten Standorten aufgrund der deutlich kleineren Flussraten reduziert. Die thermischen Auswirkungen auf die Sorptions- und Lösungsprozesse werden daher geringer ausfallen als bei den Extraktionsversuchen festgestellt.

An den Hängen am Hengberg und am Riesberg kommen bis in den Oberboden Carbonate vor. Es ist davon auszugehen, daß hier auch die Feinerde noch carbonathaltig ist. Die Lösungsversuche hatten

gezeigt, daß Carbonate bei erhöhten Temperaturen verstärkt gelöst werden. Dementsprechend wird es grundsätzlich zu einer verstärkten Carbonatlösung kommen. Dies trifft auf den Streckenabschnitten mit hoch anstehendem Festgestein zu. Betroffen davon sind vor allem die Füllkörper im Bereich der Rendzinen und der Rendzina-Braunerden, die auch nach der Aufbereitung überwiegend aus carbonatischem Gesteinsbruch bestehen. Die thermisch bedingten Lösungsverluste werden jedoch angesichts der unerschöpflichen Vorräte vernachlässigbar gering und ökologisch völlig bedeutungslos sein. Dies gilt auch für die Bettung in der die Temperaturerhöhung am höchsten sein wird.

Im Oberboden ergibt sich eine andere Situation. Das enthaltene Skelett unterscheidet sich im Carbonatgehalt faktisch nicht vom Festgestein. Die Feinerde dazwischen hat jedoch einen deutlich geringeren Carbonatgehalt, der annähernd Null betragen kann. Im Oberboden sind die thermisch bedingten Effekte aufgrund der nur schwachen Erwärmung sehr gering. Die thermisch bedingte Entcarbonatisierung der Feinerde wird deshalb vernachlässigbar gering sein. Zu einer Bodenversauerung wird es auch aufgrund des hohen Anteils carbonatischem Skelett nicht kommen. Die ökologischen Auswirkungen einer so geringen zusätzlichen Carbonatlösung sind bedeutungslos. Dies gilt auch für den mit der Carbonatlösung einhergehende Ca-Verlust, der angesichts des vergleichsweise geringen Bedarfs der Pflanzen und des im Vergleich dazu unerschöpflichen Vorrats ökologisch ebenfalls bedeutungslos ist.

Seitlich des Kabelgraben steht das unveränderte Festgestein. Auch dort kann es auf dem Niveau der Kabelanlagen noch zu einer gewissen Bodenerwärmung kommen. Auch dort sind die zu erwartenden Verluste an Carbonat aufgrund der nur geringen Erwärmung und des großen Vorrats irrelevant.

Bei den kationischen Nährstoffen kann eine Bodenerwärmung vor allem bei carbonatfreien Substraten eine Verschiebung der Lösungs- und Sorptionsgleichgewichte bewirken und zu einer erhöhten Freisetzung führen. Dies gilt z.B. für die Decklehme und Talfüllungen, die möglicherweise vollständig entcarbonatisiert sind. Die Laborversuche zeigten, daß die Effekte bei den im Boden zu erwartenden Temperaturen gering sein werden. Die grundsätzlich vorstellbaren zusätzlichen Nährstoffverluste sind vernachlässigbar.

13.11 Mikrobielle Aktivität

Die mikrobielle Aktivität ist temperaturabhängig. Bei den im Boden vorkommenden Temperaturen bewirkt eine Erwärmung grundsätzlich eine Stimulation der Aktivität. Die Brutversuche zeigten jedoch, daß die Effekte im Temperaturbereich $< 30\text{ °C}$ sehr gering sind.

Bei den im Teilverkabelungsabschnitt Borgholzhausen überwiegend vorkommenden terrestrischen Böden herrschen aerobe Verhältnisse. Die Ergebnisse der Laborversuche können auf diese Standorte ohne Einschränkung übertragen werden. Im Oberboden wird die prognostizierte Temperaturerhöhung von maximal 3 K nur vernachlässigbar geringe Effekte hervorrufen, obwohl die Bedingungen für die Aktivität heterotropher Mikroorganismen aufgrund des Angebots an organischer Substanz günstig sind. Für eine signifikante Steigerung der Aktivität ist der zu erwartende Temperaturanstieg zu klein. Im Unterboden ist der Temperaturanstieg zwar höher, dafür fehlt die organische Substanz als Energieträger. Die thermisch bedingte Stimulation wird deshalb auch hier vernachlässigbar sein.

Insgesamt ergibt sich keinerlei Anlaß zur Befürchtung, daß es langfristig zu einem thermisch bedingten, ökologisch relevanten Anstieg der Mineralisierungs- oder Nitrifikationsraten kommen könnte. Durch

die Homogenisierung im Zuge des Bodenabtrags und der Wiederverfüllung wird die mikrobielle Aktivität jedoch temporär stimuliert werden.

13.12 Abschließende Bewertung und Prognose

Aufgrund der Übertragungsverluste wird der Betrieb der Erdkabelanlage auch in Borgholzhausen eine Bodenerwärmung bewirken. Diese wird sich auch hier auf den Bereich der Bettung konzentrieren. Der Kabeltest Osterath hat gezeigt, daß mit einem dauerhaften Betrieb unter technischer Maximallast und Leitertemperaturen von 90 °C an der Bodenoberfläche eine mittlere jährliche Temperaturerhöhung von 3 K erreicht werden kann. Dies gilt für die wärmsten Zonen der Trasse, die sich unmittelbar oberhalb der zentralen Leiter der einzelnen Systeme befinden. Es handelt sich dabei um eine technisch erzeugbare, maximale Bodenerwärmung, die Netzbetrieb nicht erreicht werden kann. Am Standort Borgholzhausen wird die 3 K-Marke weder bei der 110 kV-Anlage noch bei der 380 kV-Anlage überschritten werden.

Durch zwischenzeitlich vorliegende Berechnungen der zu erwartenden Verlustleistung ist es möglich, die Ergebnisse aus dem "Freiburger Experiment" im Kontext zum realen Netzbetrieb neu zu bewerten und die Prognosen weiter zu präzisieren. Danach wird die prognostizierte mittlere jährliche Temperaturerhöhung 2 K nicht überschreiten, möglicherweise sogar darunter liegen.

Die Prognose bezieht sich auf die rein terrestrischen Streckenabschnitte, wo die stärksten Effekte zu erwarten sind. Tritt, wie z.B. im Bereich des Violenbaches, Grundwasser auf, werden thermische Effekte weitestgehend eliminiert.

Die beiden Anlagen (110 kV und 380 kV) werden sich gegenseitig nicht beeinflussen. Gleiches gilt für die Systeme A und B der 380 kV-Anlage bei Verlegung mit mittlerer Baustraße. Bei Verlegung ohne mittige Baustraße sind temporär auftretende, geringfügige Wechselwirkungen nicht auszuschließen. An der Bodenoberfläche sind die dadurch bedingten Temperatureffekte vernachlässigbar.

Im Oberboden werden sich 3 thermisch beeinflusste Streifen längs der Anlage ausprägen. Die seitliche Ausdehnung wird eine Distanz von 1,5 m von der jeweils äußersten Wärmequelle nicht überschreiten. Bei Verlegung mit mittlerer Baustraße ist der Bereich der Baustraße im Zentrum der Trasse sowie ein weiterer darüberhinausgehender Teil des Raumes zwischen den beiden Anlagen von der Erwärmung nicht betroffen. Die thermische beeinflusste Fläche des Schutzstreifens reduziert sich dadurch auf etwa die Hälfte.

Bei Verlegung ohne mittlerer Baustraße fehlt der unbeeinflusste Zwischenraum zwischen den beiden Systemen A und B. In diesem Fall ist die Trasse im gesamten Anlagenbereich der 380 kV-Leitung betroffen. Die Intensität der thermischen Beeinflussung ist jedoch im Bereich der Trassenachse nur sehr gering.

Selbst bei Unterstellung extrem konservativer Randbedingungen wird sich die Temperaturerhöhung im Streubereich der mittleren Temperaturen eines wärmeren bzw. kälteren Jahres bewegen.

Die Bodenfeuchte wird sich durch den Betrieb der Anlage nicht nachweisbar verändern. Es wird zu keiner betriebsbedingten Austrocknung in der ökologisch relevanten Oberbodenzone kommen.

Die Bodenfauna insbesondere die Regenwurmfauna wird durch den Betrieb nicht nachhaltig beeinflusst werden. Dies gilt auch für den Bau der Anlage, sofern die Rekultivierung sachkundig ausgeführt und eine geeignete Zwischenbewirtschaftungsvegetation verwendet wird.

Die thermisch bedingten Auswirkungen bewirken grundsätzlich eine verstärkte Lösung und Desorption von Nährstoffkationen. Die dadurch möglicherweise bewirkten Verluste sind jedoch vernachlässigbar gering.

14 Sicherheit der Prognosen

Die Begutachtung stützt sich auf Laboruntersuchungen, das "Freiburger Experiment", den "Kabeltest Osterath" und erste Erfahrungen mit der Pilotanlage Raesfeld. Den Prognosen liegen Ergebnisse aus einer 14-jährigen Forschungstätigkeit zugrunde. Das Monitoring der Pilotanlage Raesfeld liefert erstmals Ergebnisse aus Messungen an einer realen 380 kV-Anlage. Diese ermöglichen es, thermische Effekte mit der Auslastung der Anlage zu verknüpfen, wenngleich die Anlage derzeit nur im Probebetrieb gefahren wird und daher noch keine abschließenden Ergebnisse vorliegen. Die Messungen liefern jedoch wertvolle Erkenntnisse für den Betrieb im unteren Lastbereich. Die Prognosen gewinnen dadurch weiter an Sicherheit.

Im Kontext mit den vorangegangenen Experimenten in Freiburg und Osterath ist es nun möglich, das Ausmaß möglicher Temperatureffekte zu konkretisieren. Die Versuchsbedingungen im "Freiburger Experiment" und beim „Kabeltest Osterath“ waren stets extrem konservativ gewählt, so daß es sich bei diesen Ergebnissen fast immer um Extremfälle handelte, die beim normalen Netzbetrieb nicht erreicht werden. Im Hinblick auf die Variation standörtlicher Parameter und deren Einfluß auf die Bodenerwärmung ergibt sich bei Zugrundelegen solcher Verhältnisse ein hohes Maß an Sicherheit bei den Prognosen für andere Standorte.

Die Experimente wurden ausschließlich auf terrestrischen Böden im sandig lehmigen Körnungsbereich durchgeführt. Dabei handelte es sich um die Substrate, bei denen die größten thermischen Auswirkungen auftreten werden. Das Monitoring in Raesfeld wird ebenfalls unter diesen Bedingungen durchgeführt. Insofern sind die Bedingungen, von denen bei den hier getroffenen Prognosen ausgegangen wird, grundsätzlich sehr konservativ angelegt. Dadurch entsteht ein beträchtlicher Spielraum für Effekte, die sich aus dem schwer einschätzbaren Zusammenwirken einzelner Standortparameter ergeben könnten.

Eine weitere, wesentliche Steigerung der Sicherheit der Prognosen hat sich durch die Berechnung von anlagenbezogenen Verlustleitungen ergeben. Diese ermöglicht es, einen direkten Zusammenhang zu den Erkenntnissen aus dem "Freiburger Experiment" herzustellen und die Prognosen noch besser auf die realen Verhältnisse anzupassen.

Weiterhin ist anzumerken, daß sich die Prognosen auf eine solide Basis über sehr lange Zeiträume **gemessener** Daten stützen. Die Daten sind in sich konsistent und berücksichtigen auch die längerfristige zeitliche Variation der thermischen Auswirkungen die von schwer einschätzbaren standörtlichen und meteorologischen Wirkungen erheblich mitbeeinflusst werden.

Insgesamt erfolgten die Prognosen auf der Basis eines sehr soliden Erfahrungsstandes.

15 Quellenverzeichnis

- ANONYMUS (2009): Gesetz zum Ausbau von Energieleitungen (Energieleitungsausbaugesetz - EnLAG). BGBl. I S. 2870
- ANONYMUS (1999): Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung. BGBl. I S. 1554
- ANONYMUS (2002): Vollzugshilfe zu § 12 BBodSchV. Bund-Länder Arbeitsgemeinschaft Bodenschutz (LABO) 38 S.
- ARMAN, A.N., D.M. CHERRY, L.GOSLAND, P.M. and HOLLINSWORTH (1964): Influence of soil-moisture migration on power rating of cables in h.v. transmission systems. Proc. IEE, 111 5, 1000-1016
- BÄR, K. (2012): Untersuchung der tiefeingeothermischen Potenziale von Hessen. Diss. TU Darmstadt 265 S.
- BOUCHÉ, M. B. (1972). *Lombriciens de France: Écologie et systématique*. Paris: I.N.R.A.
- BLUME, H.P., G.W. BRÜMMER, R. HORN, E. KANDELER, I. KÖGEL-KNABNER, R. KRETSCHMAR, K.STAHR, B.-M. WILCKE (2010): Scheffer/Schachtschabel Lehrbuch der Bodenkunde. Spektrum Akademischer Verlag 16.Auflage 569 S.
- DEMAND, D. (2013): Wärmeleitfähigkeit von Böden: Einfluss von Körnung und Wassergehalt. Fakultät für Forst und Umweltwissenschaften Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, Institut für Bodenkunde und Waldernährungslehre. BSc. Arbeit 1-49
- EDWARDS, A. and P.J. BOHLEN (1996): *Biology and ecology of earthworms*. (3. ed): Chapman & Hall London
- FELDWISCH, Ingenieurbüro (2020). Bodenschutzkonzept Gütersloh – Wehrendorf (EnLAG, Vorhaben 16) Abschnitt: Pkt. Hesseln - Pkt. Königsholz (Landesgrenze NRW/NDS) (Bl. 4210) (unveröffentlicht)
- FLADE J. (2010): Entwicklung und Erprobung eines computerunterstützten Verfahrens zur Regenwurmbestimmung. BSc-Arbeit Institut für Bodenkunde und Waldernährung Albert-Ludwigs-Universität Freiburg im Breisgau
- HARTGE, K.H. und R. HORN (1991): Einführung in die Bodenphysik Enke 3.Auflage
- IVASK, M.; A. KUU and E. SIZOV (2007): Abundance of earthworm species in Estonian arable soils. *European Journal of Soil Biology*, 43, S.39–S42 <https://doi.org/10.1016/j.ejsobi.2007.08.006>
- JÄNSCH, S.; L. STEFFENS; H. HÖFER, H. HORAK; M. ROß-NICKOLL; D. RUSSEL; J. RÖMBKE (2013): State of knowledge of earthworm communities in German soils as a basis for biological soil quality assessment. *Soil Organisms* 85(3), 215–233.
- KÜHN, Geoconsulting (2020): Baugrundgutachten zur Erdkabelverlegung 3. Bericht - Gütersloh – Wehrendorf (EnLAG, Vorhaben 16) Abschnitt: Pkt. Hesseln - Pkt. Königsholz (Landesgrenze NRW/NDS) (Bl. 4210) (unveröffentlicht)
- MOCHLINSKI, K. and C. ENG (1976): Assessment of the influence of soil thermal resistivity on the ratings of distribution cables. Proc. IEE, 123 1, 60-72
- PAOLETTI, M. G. (1999): The role of earthworms for assessment of sustainability and as bioindicators. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 74 (1–3), 137–155.
- SIMS, R. W. and GERARD, B. M. (2011) *Biology of Earthworms*. In AYTEN KARACA (Hrsg.): Springer Heidelberg Dordrecht London New York 311 S.
- TRINKS, S. (2010) in: TU Berlin, Fakultät VI - Planen, Bauen, Umwelt (Hrsg.) Einfluss des Wasser- und Wärmehaushaltes von Böden auf den Betrieb erdverlegter Energiekabel. Dissertation 1-124
- TRÜBY, P. und E. ALDINGER (1989) Eine Methode zur Bestimmung austauschbarer Kationen in Waldböden: Z. Pflanzenernähr. Bodenk. 152, 301-306.:
- TRÜBY, P. und E. ALDINGER (2013): Auswirkungen der Wärmeemission von Hochspannungserdkabeln auf den Wärme- und Wasserhaushalt des Bodens. *Schr.-R. d. Deutschen Rates für Landespflege* 84 S. 100-108
- UTHER, D., P. TRÜBY, E. ALDINGER, H. BRAKELMANN und J.STAMMEN (2009): Wärmeemission bei Hoch- und Höchstspannungserdkabeln. *EW Jg.* 108 10, S. 66-74

Ich versichere, daß ich das Gutachten mit Sorgfalt nach bestem Wissen und Gewissen erstellt habe.

Schopfheim, den 14.07.2020

Prof. Dr. Peter Trüby

