Auslegungsvermerk der Gemeinde
(Öffentlichkeitsbeteiligung § 43b EnWG)

Der Plan hat ausgelegen in der Zeit vom ..... 20....
bis ..... 20....

in der Gemeinde.....

Gemeinde

Siegel

Planfeststellungsvermerk der Planfeststellungsbehörde

Nach § 43b EnWG i.V.m. § 74 VwVfG planfestgestellt durch Beschluss vom ..... 20....

Planfeststellungsbehörde

Siegel

Auslegungsvermerk der Gemeinde
(Planfeststellungsbeschluss und festgestellter Plan (§ 43b EnWG i.V.m. § 74 VwVfG))

Der Planfeststellungsbeschluss und Ausfertigung des festgestellten Planes haben ausgelegen in der Zeit vom ..... 20....
bis ..... 20....

in der Gemeinde.....

Gemeinde

Siegel

Auswirkungen der Wärmeemission von Höchstspannungserdkabeln auf den Boden und auf landwirtschaftliche Kulturen

380-kV-Höchstspannungsfreileitung
Wesel – Pkt. Meppen, Bl. 4201
Abschnitt: Pkt. Borken Süd – Pkt. Nordvelen

380-kV-Höchstspannungskabel
KÜS Marbeck – KÜS Lüningkamp, KBl. 4240

110-kV-Hochspannungsfreileitung
Hervest-Dorsten – Stadtlohn, Bl. 1520
Abschnitt: Pkt. Borken – Übergabestation Lüningkamp

110-kV-Hochspannungsfreileitung
Pkt. Nordvelen – Pkt. Holthausen, Bl. 1386

Stand:	06.05.2014
Inhalt:	Blatt 1 - 45

amprion
Amprion GmbH
Genehmigungen / Umweltschutz Leitungen

Auswirkungen der Wärmeemission von Höchstspannungserdkabeln auf den Boden und auf landwirtschaftliche Kulturen

Gutachten im Auftrag der
Amprion GmbH

angefertigt von
Prof. Dr. Peter Trüby

UNI FREIBURG
Institut für Bodenkunde

Terra Planta

UNI FREIBURG
Institut für Bodenkunde

Prof. Dr. Peter Trüby

Albert-Ludwigs-Universität Freiburg Br.
Institut für Bodenkunde
und Waldernährungslehre

Bertoldstr. 17
79085 Freiburg Br.

Telefon: 07622/9203
Mobil: 01701729870790
Fax: 07622/671529
Peter.Trueby@bodenkunde.uni-freiburg.de

Terra Planta

Prof. Dr. Peter Trüby

Öffentlich bestellter und vereidigter
Sachverständiger für Land- und
Forstwirtschaftliche Bodenkunde

Alte Wehrerstr. 14
79650Schopfheim

Telefon: 07622/9203
Mobil: 01729870790
Fax: 07622/671529
TerraPlanta@t-online.de

Inhalt

1 Ausgangssituation 3

2 Aktueller Kenntnisstand und Grundlagen für das Gutachten 3

3 Aufgabe dieses Gutachtens 3

4 Definition der Lastfälle, zu erwartende Kabel- und Schutzrohrtemperaturen 3

5 Grundsätzliches zum Wärmehaushalt von Böden 5

6 Das "Freiburger Experiment" 6

6.1 Szenarien und Betriebstemperaturen im "Freiburger Experiment" 6

6.2 Methodischer Ansatz des "Freiburger Experiments" 7

6.3 Standortseigenschaften und deren Übertragbarkeit auf den Standort Borken/Nordvelen 9

6.3.1 Klimatische Situation 9

6.3.2 Bodeneigenschaften 10

6.3.3 "Freiburger Experiment", "Osterather Kabeltest" und reale Kabelanlage in Borken/Nordvelen 12

6.4 Ergebnisse des "Freiburger Experiments" 14

6.4.1 Vorlaufphase 14

6.4.2 Die Pulsexperimente 15

Übertragung auf die Verhältnisse in Borken/Nordvelen 16

6.4.3 Langzeitversuche 16

Übertragung auf die Verhältnisse in Borken/Nordvelen 19

6.4.4 Wärmeausbreitung im Boden 20

Übertragung auf die Verhältnisse in Borken/Nordvelen 21

6.4.5 Das Grundwasserexperiment 21

Übertragung auf die Verhältnisse in Borken/Nordvelen 22

6.4.6 Auswirkungen auf den Bodenwasserhaushalt 22

Übertragung auf die Verhältnisse in Borken/Nordvelen 23

6.4.7 Wirkungen auf die Schneedecke und das Auftreten von Frost 24

6.4.8 Auswirkungen auf landwirtschaftliche Kulturen 26

7 Neue Erkenntnisse aus dem "Kabeltest Osterath" 28

7.1 Methodischer Ansatz 29

7.2 Bodentemperatur und Bodenfeuchte 30

7.2.1 Betriebsbedingungen 30
7.3 Thermische Auswirkungen im Oberboden 32
7.4 Auswirkungen auf die Bodenfeuchte 34
7.5 Landwirtschaftliche Kulturversuche 36
7.5.1 Kulturversuch mit Kartoffeln 36
7.5.2 Kulturversuch mit Körnermais 37
7.5.3 Kulturversuch mit Winterweizen 38
7.5.4 Erträge 40
8 Zusammenfassende Bewertung 41
8.1 Welche Auswirkungen auf den Boden ergeben sich bei Normalauslastung der Kabel? 41
8.2 Was bewirken temporäre Spitzenlasten? 41
8.3 Was bewirken Grund- oder Stauwasser? 41
8.4 Welche Auswirkungen ergeben sich auf den Wärmeaustausch mit der Atmosphäre? 42
8.5 Wie weit reichen die lateralen Auswirkungen? 42
8.6 Welche Auswirkungen ergeben sich für den Bodenwasserhaushalt? 42
8.7 Welche Auswirkungen ergeben sich auf eine Schneedecke und das Frostgeschehen? 43
8.8 Welche Auswirkungen ergeben sich auf landwirtschaftliche Kulturen? 43
8.9 Welche weiteren ökologischen Konsequenzen sind zu erwarten? 44
9 Grundsätzliches zur Sicherheit der getroffenen Aussagen 44
10 Literatur 45

1 Ausgangssituation

Mit der Energiewende werden große Anforderungen an die Stromübertragung gestellt, die mit der derzeit vorhandenen Netzinfrastruktur nur teilweise erfüllt werden können. Es wird daher künftig zu einem verstärkten Netzausbau kommen. Neben der konventionellen Übertragungstechnik mittels Freileitung werden erdverlegte Höchstspannungserdkabel an Bedeutung gewinnen. Entsprechende gesetzliche Regelungen sind getroffen (ANONYMUS 2009). Darüber hinaus wird die Erdverkabelung anstelle neuer Freileitungen seitens der Bevölkerung nachdrücklich gefordert.

2 Aktueller Kenntnisstand und Grundlagen für das Gutachten

Der Betrieb von Höchstspannungskabelanlagen ist stets mit einer Wärmeemission verbunden. In der BRD existieren bisher keine im Freiland verlegten 380 kV-Kabel, an denen die ökologischen Auswirkungen am realen Objekt gemessen werden könnten. Die thermischen Auswirkungen auf den Wärme- und Wasserhaushalt des Bodens sind deshalb für 380 kV-Leitungen am realen Objekt nicht untersucht. Die derzeit verwertbaren Kenntnisse stützen sich auf Untersuchungen von 110 kV-Anlagen (TRINKS, 2011), Modellrechnungen für Höchstspannungserdkabel (BRAKELMANN et al., unveröffentlicht) und ein Freilandexperiment, das an der Universität Freiburg (im folgenden "Freiburger Experiment" genannt) durchgeführt wurde (UTHER et al., 2009; TRÜBY und ALDINGER, 2013). Darüber hinaus liegen jetzt auch neue, bisher nicht veröffentlichte Erkenntnisse aus einem in Meerbusch-Osterath durchgeführten Kabeltest vor. Auf die für diese Begutachtung relevanten Ergebnisse wird in Kap. 8 zurückgegriffen. 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.

3 Aufgabe dieses Gutachtens

Ziel des Gutachtens ist, für das Vorhaben Erdverkabelung "Wesel-Meppen", Verkabelungsabschnitt Borken Süd/Nordvelen, mögliche ökologische Auswirkungen der Wärmeemission einzuschätzen und zu bewerten. Dabei ist der Fokus auf den Bodenwärmehaushalt, den Bodenwasserhaushalt und landwirtschaftliche Kulturen gerichtet. Dem Gutachten zugrunde gelegt werden die in Kap. 4 genannten Kabel- bzw. Schutzrohrtemperaturen. 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) eingehalten werden, sind diese baulichen Auswirkungen zuverlässig einschätzbar und mit anderen baulichen Eingriffen vergleichbar.

Die wissenschaftliche Grundlage für dieses Gutachten sind die Ergebnisse des "Freiburger Experiments" (Kap. 6). Sie werden ergänzt durch neue Erkenntnisse aus dem Kabeltest in Meerbusch-Osterath (Kap. 7).

4 Definition der Lastfälle, zu erwartende Kabel- und Schutzrohrtemperaturen

Die für die Begutachtung zugrunde gelegten 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 lebhafte Diskussion ausgelöst haben. Dazu beigetragen hat vor allem die Veröffentlichung von missverständlichen Boden- und Kabeltemperaturen. Es ist deshalb zunächst notwendig, diesen Sachverhalt klarzustellen. Eine besondere Rolle spielen dabei die in der Diskussion immer wieder zitierten "Kabeltemperaturen" von 90 °C. Faktisch handelt es sich um die ***Maximal-Temperatur des Kupferleiters*** im inneren Teil Kabels***.*** Dies ist eine ***technische Grenztemperatur***, 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 von 90 °C lägen die ***Temperaturen*** an der Oberfläche ***des Kabelmantels*** um ca. ***15-20 K niedriger***, also bei ca. ***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 1 bis 3 K niedriger liegen werden. ***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 bei ***< 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 ***Kupferleitertemperaturen*** von ca. ***61°C*** erreicht werden. Die im unmittelbaren Kabelbereich auftretenden ***Temperaturen am Kabelschutzrohr*** wären ***< 50° C***.

Bei der folgenden Begutachtung der Auswirkungen beim Netzbetrieb wird von diesen beiden Lastfällen und den damit korrespondierenden Temperaturen ausgegangen. Abweichend davon liegt den in Kap. 8 beschriebenen Ergebnissen des ***Kabeltests*** in Meerbusch-Osterath ein ***Betrieb weit oberhalb der Auslegungslast*** zugrunde. 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 von ca. 50 °C eingestellt werden. Aufgrund der Trägheit des Systems wird dieser Gleichgewichtszustand erst nach mehreren Wochen erreicht. Um diesen Vorgang zu beschleunigen, wurde die Anlage mit der technischen Maximallast belastet. ***Als technische Maximallast*** wird die Last definiert, die innerhalb kurzer Zeiträume eine ***Erwärmung des Kupferleiters auf 90 °C*** bewirkt. Der Betrieb bei technischer Maximallast diente ausschließlich zu Versuchszwecken. Die Grenztemperatur von 90 °C ist für den Netzbetrieb nicht relevant.

5 Grundsätzliches zum Wärmehaushalt von Böden

Die folgenden Ausführungen stützen sich auf Feldmessungen, die im Rahmen des "Freiburger Experiments" in einem ungestörten Boden durchgeführt wurden. Sie stehen im Einklang mit den Ausführungen in der bodenkundlichen Fachliteratur (BLUME et al., 2010).
Während des insgesamt 5-jährigen Meßzeitraumes war die interanuelle Variation der Bodentemperaturen relativ gering. Die gilt sowohl für die absoluten Temperaturen als auch für die Jahresgänge. Innerhalb eines Jahres ergibt sich hingegen eine ausgeprägte jahreszeitliche Differenzierung, die sich über die gesamte hier betrachtete Bodentiefe bemerkbar macht (Abb. 1). Entsprechend der Witterungsentwicklung ergeben sich sommerliche Temperaturmaxima in den Monaten Juli bis September.

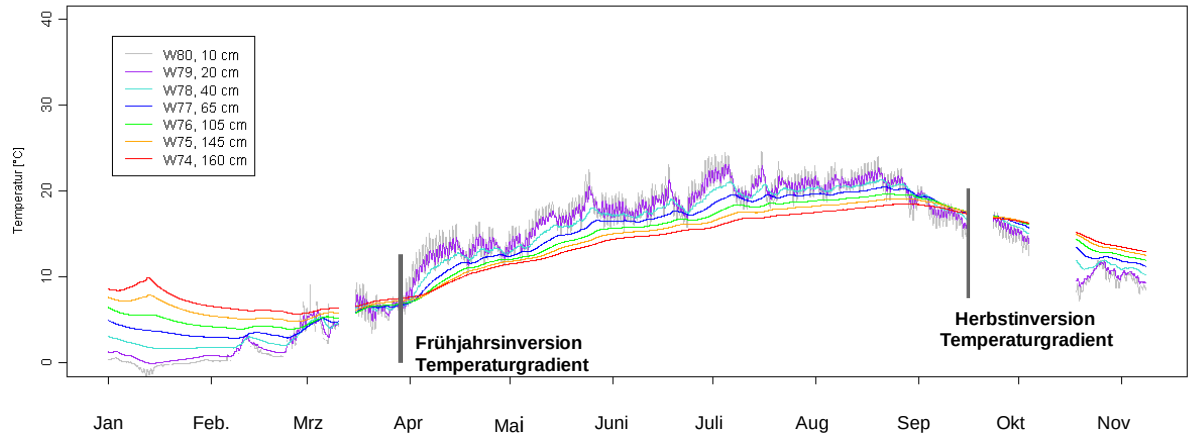

Abb. 1: Typischer Jahresgang der Bodentemperaturen (Vertikalprofil)

Während dieser Zeit kommt es im Oberboden zu stark ausgeprägten Tagesgängen, wobei Tagesschwankungen von mehr als 15 K auftreten können. In größerer Bodentiefe ist die saisonale und diurnale Varianz deutlich geringer. Die maximale annuelle Temperaturdifferenz erreicht im Oberboden u.U. mehr als 30 K im Unterboden immer noch bis zu 10 K.
Die vertikalen Temperaturprofile unterliegen außerdem einer ausgeprägten annuellen Variation mit einer regelmäßigen Inversion der Temperaturgradienten (Abb. 3). Im Sommer steigen die Temperaturen nach oben hin an, im Winter nehmen sie zur Bodenoberfläche hin ab. Die Inversion der Gradienten erfolgt regelmäßig im April und im September. In der Übergangsphase liegen die Isohypsen unmittelbar nebeneinander. Es bestehen während dieser Zeit kaum noch vertikale Temperaturgradienten. Die Wärmeflüsse kommen deshalb weitgehend zum Stillstand. Bemerkenswert ist weiterhin, daß in den Sommermonaten auch in 160 cm Bodentiefe noch deutliche Temperaturgradienten aus-

geprägt sind, die einen Wärmefluß auch in größere Bodentiefen anzeigen. Dies belegt, daß der Wärmehaushalt des Bodens insgesamt maßgeblich von der sommerlichen Erwärmung geprägt wird.

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 wissenschaftlich begründete, sehr 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. 6.4.2 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.

6.1 Szenarien und Betriebstemperaturen im "Freiburger Experiment"

Zu Beginn des Experiments lagen weder die zuvor zitierten Modellrechnungen noch die Erfahrungen aus dem 110 kV-Kabeltest in Meerbusch-Osterath vor. Es gab deshalb keine verlässlichen Daten zu den zu erwartenden Kabeltemperaturen. Aus diesem Grund wurde das Experiment im Ansatz bewusst konservativ angelegt und 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 Erwärmungen der Erdkabel 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 insgesamt 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.

Übertragung auf die Verhältnisse in Borken/Nordvelen

Die für den Betrieb der Kabelanlage Borken/Nordvelen zu erwartenden Temperaturen an den Schutzrohren werden von den Betriebstemperaturen im "Freiburger Experiment" vollends abgedeckt. Die in Borken/Nordvelen unter Normallast zu erwartenden Temperaturen liegen im unteren Bereich des in Freiburg verwendeten Temperaturspektrums. Dort waren die Versuche stets mit Temperaturen >= 35 °C durchgeführt worden. Für die Bewertung der Temperaturänderungen an der Oberfläche werden deshalb für den Normallastfall der Langzeitversuch bei 40 °C, für die dauerhafte Auslegungslast der Vegetationsversuch bei 50 °C verwendet. Dies führt im Hinblick auf den Normallastfall zu einer sehr konservativen Bewertung, da die Temperatur am Schutzrohr unter Normallast kleiner als 40 °C sein wird. Im Hinblick auf die Auslegungslast ist die im Langzeit-Vegetationsversuch verwendete Temperatur von 50 °C repräsentativ, da im Falle eines dauerhaften Betriebs der Kabelanlage mit Auslegungslast - die betreiberseitig nicht geplant ist - am Schutzrohr ebenfalls Temperaturen in Höhe von ca. 50 °C erreicht würden.

6.2 Methodischer Ansatz des "Freiburger Experiments"

Abb. 2: Warmwasserheizanlage

Der Aufbau der Versuchsanlage erfolgte analog zum Aufbau einer realen 3-adrigen Kabeltrasse. Anstelle von Erdkabeln wurden Stahlrohre (Abb. 2) 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 Feinsand 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.

Ein Überblick über den Aufbau der Anlage und die Instrumentierung findet sich in Abb. 3. Zum Temperatur- und Feuchtemonitoring wurden insgesamt 80 Thermofühler und 20 Feuchtesonden in den Boden eingebaut.

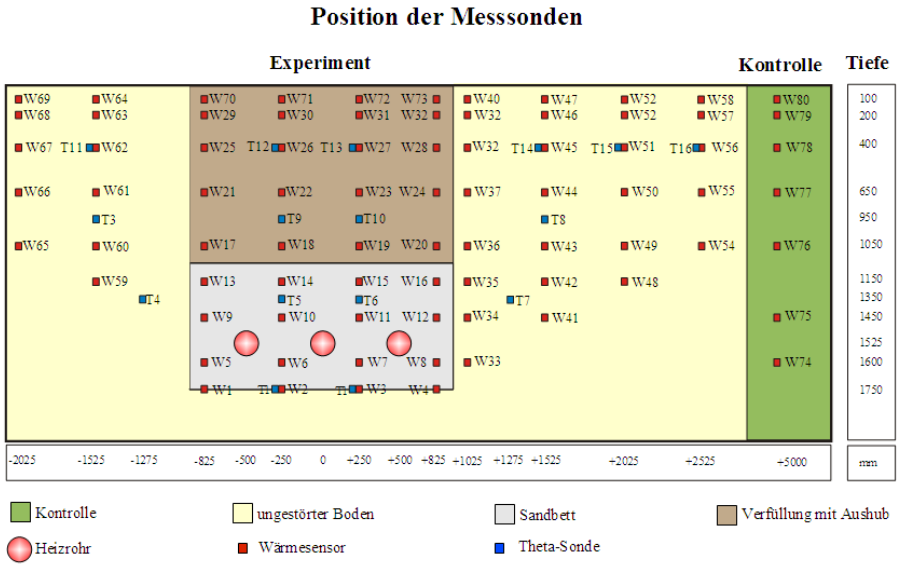

Abb. 3: Übersicht über die Instrumentierung und den Aufbau des "Kabelgrabens"

Übertragung auf die Verhältnisse in Borken/Nordvelen

Vergleicht man die verwendete Versuchsanordnung mit der geplanten Kabelanlage in Borken/Nordvelen, so ergibt sich folgendes Bild:

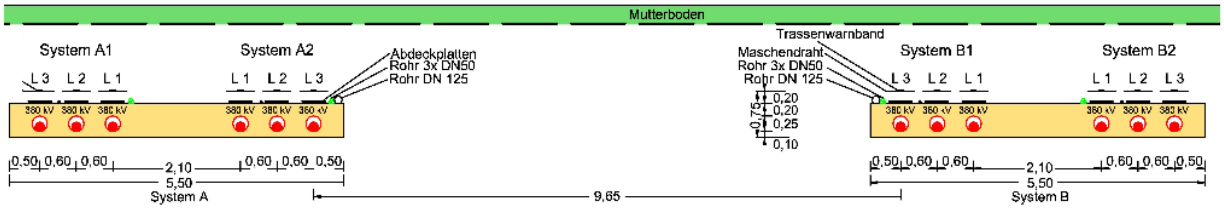

Abb. 4: Aufbau der 380 kV-Erdkabelanlage in Borken/Nordvelen

Die geplante Kabeltrasse in Borken/Nordvelen besteht aus vier symmetrisch angeordneten, jeweils dreiadrigen Kabelsträngen (Abb. 4). In der Mitte befindet sich ein ca. 4,5 m breiter rekultivierter Streifen, der ursprünglich als Baustraße verwendet wurde. Es handelt sich also faktisch um 2 getrennt voneinander arbeitende Systeme, die sich thermisch nicht oder allenfalls marginal beeinflussen. Innerhalb dieser Systeme befinden sich jeweils zwei weitere 3-adrige Systeme, die sich wegen des ca. 2 m breiten Zwischenraumes gegenseitig allenfalls im Unterboden und im Bereich der Bettung beeinflussen. Bei den auftretenden Temperaturen werden die zu erwartenden Wechselwirkungen sehr gering sein. Die gesamte Anlage kann daher näherungsweise als vierfach-Wiederholung eines 3-adrigen Systems gesehen werden, wie es im "Freiburger Experiment" unterstellt wurde. Es bestehen deshalb im Hinblick auf die thermischen Eigenschaften keine grundsätzlichen Unterschiede. Die Einschätzung der zu erwartenden Temperaturprofile, insbesondere der Oberbodentemperaturen und der lateralen Ausdehnung, ist deshalb auch für Borken/Nordvelen zutreffend.

Abweichend von den Bedingungen im “Freiburger Experiment“ erfolgt die Verlegung in Borken/Nordvelen in größerer Tiefe. Hier beträgt die Mächtigkeit der Überdeckung der Kabelanlage 1,8 m. Dadurch werden die an der Oberfläche zu erwartenden Effekte weiter abgeschwächt. Auch in dieser Hinsicht wird bei der folgenden Bewertung von deutlich ungünstigeren Bedingungen ausgegangen.

6.3 Standortseigenschaften und deren Übertragbarkeit auf den Standort Borken/Nordvelen

“Kein Standort gleicht exakt dem anderen.“ Im Folgenden wird deshalb eine Bewertung und Einschätzung der Übertragbarkeit der voneinander abweichenden Standortseigenschaften vorgenommen.

6.3.1 *Klimatische Situation*

Zur Charakterisierung der klimatischen Situation werden langjährige Mittel des Jahresniederschlags und der Jahrestemperatur herangezogen. Im unmittelbaren Bereich der Versuchsflächen in Freiburg/Emmendingen existiert keine meteorologische Station. Für das “Freiburger Experiment“ wird deshalb auf die 2,5 km entfernte Station Emmendingen-Mundingen zurückgegriffen.
Für den Standort Meerbusch-Osterath existieren ebenfalls keine Klimadaten. Es wird deshalb auf Daten für angrenzende Gemeinde Willich zurückgegriffen.

Tabelle 1: 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
Borken	50	750	9,0 - 9,3 °C

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

Die mittleren Jahrestemperaturen der Stationen Mundingen, Raesfeld und Borken sind annähernd identisch (Tab. 1). Am Standort Osterath liegen sie etwas höher. Die Niederschläge von Osterath, Raesfeld und Borken sind auf sehr ähnlichem Niveau. Der Standort Emmendingen Mundingen ist hingegen etwas feuchter.

Bewertung

Alle Standorte sind im Westen der BRD gelegene Tieflagenstandorte, die topografisch und klimatisch grundsätzlich ähnlich sind. Wählt man als Referenz 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 K und die Differenzen bei den Niederschlagsmengen mit maximal 153 mm klein. Auch im Hinblick auf die durchaus erhebliche interannuelle und die kleinstandörtliche klimatische Variation an einem Standort sind die Unterschiede klein.

Die unterschiedlichen Niederschlagsmengen sind bezüglich thermischer Effekte zweitrangig, da diese die Wärmeableitung im Boden bei ausreichender Wassersättigung nur marginal beeinflussen. Ein Einfluss auf die Wärmeleitfähigkeit des Bodens ist erst bei Bodenfeuchtegehalten < 5 % zu erwarten.

Derart niedrige Feuchtegehalte werden sich aber bei Niederschlägen von durchschnittlich 750 mm nicht einstellen.

6.3.2 *Bodeneigenschaften*

In die folgende Betrachtung werden nur terrestrische Böden einbezogen. Nur bei diesen Böden sind ökologische relevante thermische Effekte zu erwarten (vgl. Abschn. 6.4.5). Hydromorph geprägte Böden, insbesondere vom Grundwasser beeinflusste Böden, scheiden damit aus. Im Streckenabschnitt Borken/Nordvelen kommen laut Bodenkarte folgende Bodentypen vor:

Hydromorphe Böden	**Terrestrische Böden**
Gley	Podsol
Pseudogley	Braunerde-Podsol
Gley-Podsol	Plaggenesch
Podsol-Gley	Aufschüttung ohne Bodenentwicklung

Von den insgesamt vier terrestrischen Böden ist nur der Plaggenesch flächenmäßig von Bedeutung. Plaggenesche sind sehr wertvolle, tiefgründig humose Böden mit einem hohen Produktionspotential.

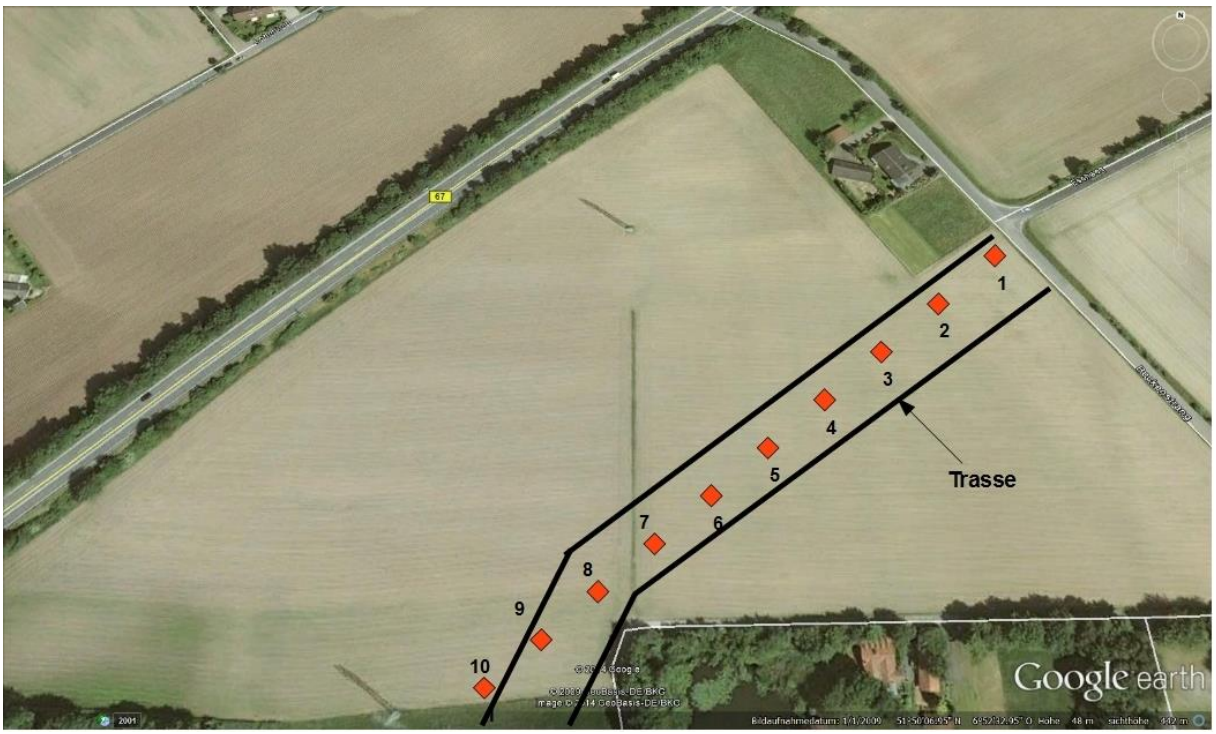

Abb. 5: Bohrplan zur Felderhebung im Bereich der Plaggenesche

Standortserkundung im Bereich der Plaggenesche

Im Zuge einer Standortserkundung wurden insgesamt 10 Bohrungen eingebracht, wobei Humusgehalt, Textur und Hydromorphierung nach Feldmethoden angesprochen wurden (Abb. 5). Ausgangssubstrat der Bodenbildung ist ein sandiges bis feinsandig-schluffiges Sediment, das zumindest im oberen Bereich nicht erkennbar geschichtet ist. Bis in eine Tiefe von 1,3 m ist das Substrat vollständig skelettfrei.

Die Beimischung von Grobskelett führt meist zu sehr inhomogenen, räumlich stark variierenden Bodenkörpern, die untereinander kaum vergleichbar sind. Durch das Fehlen der Grobskelettfraktion

sind die Substrate der zur Begutachtung verwendeten Standorte Freiburg und Osterath insgesamt sehr ähnlich. Die Versuchsergebnisse sind somit auf den Standort Borken übertragbar.

Abb. 6: Bohrkernserie Plaggenesch

Im Detail erbrachten die Bohrungen folgende Ergebnisse:

Auf der gesamten abgebohrten Strecke fanden sich Böden mit einem sehr mächtigen Humuskörper, der bis Tiefen von 60-70 cm reichte. Ein derart mächtiger Humuskörper ist charakteristisch für den Plaggenesch. In den obersten 40 Zentimetern ist der Humusgehalt der Klasse h4 zuzuordnen, wobei die Gehalte auf ca. 5-6 % eingeschätzt werden. Im Bereich zwischen 40 und 70 cm Bodentiefe sind die Gehalte mit 2-3 % deutlich niedriger. Sie liegen in der Gehaltsklasse h3. Der Humuskörper ist auf der gesamten erbohrten Strecke durchgängig vorhanden und insgesamt sehr homogen.

Die in Abb. 6 dargestellte Serie von Bohrkernen zeigt einen typischen Plaggenesch. Deutlich zu erkennen ist der mächtige Humuskörper mit vergleichsweise hohem Humusanteil. Nach unten hin anschließend folgen mehrere verbraunte Mineralbodenhorizonte ohne Hydromorphierung. Im östlichen und im südlichen Teil des Vorkommens treten zunehmend hydromorphe Merkmale zutage. Dabei kann es sich sowohl um Grund- als auch um Stauwassereinfluß handeln.

Die Textur bewegt sich überwiegend im Bereich sandiger Substrate. Die Bodenart variiert zwischen Us und Su2. Extreme Bodenarten kommen nicht vor. Die Variation ist insgesamt sehr klein. An den Standorten Freiburg und Osterath ergaben sich sehr ähnliche Bodenarten aus den Gruppen Sandlehme, Sandschluffe und Schlufflehme (Abb. 7).

In direktem Zusammenhang zur Körnung steht die Feldkapazität, ein Maß für das Wasserhaltevermögen des Bodens. Das Wasserhaltevermögen ist für die Wärmeableitung von entscheidender Bedeutung. Für eine ausreichenden Abtransport der emittierten Wärme ist ein Bodenwassergehalt > 5 Vol. % erforderlich. Anhand der Bodenarten errechnen sich sehr hohe Speicherleistungen zwischen 28 und 41 L/m^{-2} 10 cm^{-1} Horizontmächtigkeit. Die Restfeuchte am permanenten Welkepunkt variiert zwischen 8 und 14 L/m^{-2} 10 cm^{-1} Horizontmächtigkeit. Pflanzen sind daher nicht in der Lage den Boden auf eine Restfeuchte < 5 Vol. % auszutrocknen. Dies gilt auch für die Austrocknung infolge der Evaporation, die nur im Oberboden von Bedeutung ist. Eine Austrocknung des Bodens auf Feuchte-

gehalte unterhalb der kritischen Grenze ist somit nicht zu erwarten. Eine für die Wärmeableitung ausreichende Wärmeleitfähigkeit des Substrates ist daher stets gegeben. Bei geeigneter Kabelbettung ist sowohl beim Normalbetrieb als auch beim Betrieb unter Auslegungslast eine Überhitzung der Kabelanlage nicht zu erwarten.

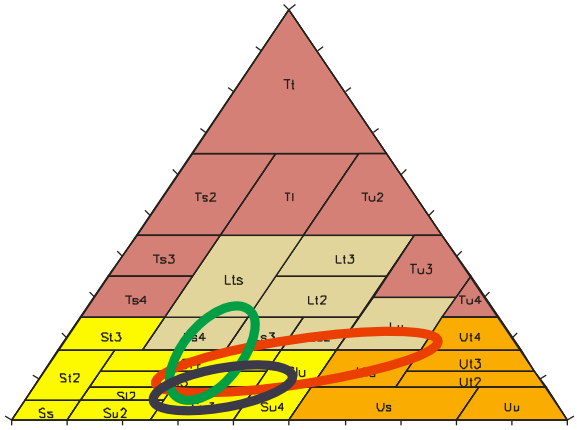

Abb. 7: Körnung

(Standorte: Freiburg/Emmendingen rot; Borken blau; Osterath grün)

An den Standorten Freiburg und Osterath liegen die Wasserspeicherleistungen im selben Bereich, so dass die Übertragbarkeit der dort gewonnenen Erkenntnisse in vollem Umfang gegeben ist. Die standörtlichen Unterschiede sind unter Berücksichtigung der natürlichen Standortsinhomogenität vernachlässigbar gering.

Hinsichtlich der chemisch-petrografischen Eigenschaften sind die Substrate ebenfalls ähnlich. In beiden Fällen handelt es sich um rein silikatische Substrate ohne Carbonatanteil.

Bewertung

Im ökologisch relevanten Oberboden bewegt sich das Korngrößenspektrum im Bereich einer mittleren Körnung. Die Variation ist insgesamt vergleichsweise gering. Die Bodenartengruppen Ton (Tt) Schluff (Uu) und Sand (Ss) sind nicht vertreten. Es ergeben sich deshalb auf allen Standorten sehr günstige, relativ einheitliche physikalische Bodeneigenschaften. Dies gilt vor allem für den Wasserhaushalt des Bodens, der die Bodenfruchtbarkeit maßgeblich beeinflusst.
Aufgrund dieser Befunde sind substratbedingte, für die Bodenfruchtbarkeit relevante Unterschiede zwischen den einzelnen Standorten gering. Die Standorte sind somit auch hinsichtlich der Bodeneigenschaften in vollem Umfang vergleichbar.

6.3.3 *"Freiburger Experiment", "Osterather Kabeltest" und reale Kabelanlage in Borken/Nordvelen*

Die Anlage des "Freiburger Experiments" erfolgte analog zum Bau einer realen Kabeltrasse. Anstelle der Kabel wurden Stahlrohre verwendet. Das Bettungsmaterial war ein feinkörniger Sand. Abweichend von der für Borken/Nordvelen geplanten, insgesamt 4-strängigen Trasse wurde jedoch lediglich ein dreiadriger Strang angelegt. Interaktionen zwischen einzelnen Strängen bleiben dabei unberücksichtigt. Die Kabelanlage in Borken/Nordvelen ist jedoch mehrsträngig. Gewisse Interaktionen sind deshalb nicht auszuschließen. Weitere Unterschiede bestehen bezüglich der Mächtigkeit der Überdeckung. Davon abhängig sind die zu erwartenden Temperaturdifferenzen im durchwurzelten

Bodenraum. Die Überdeckung war in Freiburg/Emmendingen 145 cm, in Meerbusch Osterath 130 cm. In Borken /Nordvelen beträgt sie 180 cm.

Die Kabelanlage in Osterath kommt der 380 kV-Erdkabelanlage von Borken/Nordvelen deutlich näher. Durch die in Schutzrohren verlegten Kabel erfolgt die Wärmeemission hier weitgehend identisch mit der Anlage in Borken/Nordvelen. Grundsätzlich verschieden ist die Betriebsspannung, die in Osterath 110 kV, in Borken/Nordvelen 380 kV beträgt.

Bewertung

Die Verwendung von Stahlrohren im "Freiburger Experiment" anstelle kunststoffummantelter Kabel, wie sie für die Kabeltrasse in Borken/Nordvelen vorgesehen sind, bewirkt einen schnelleren Wärmetransport. Es werden deshalb bei Stahlrohren je Zeiteinheit größere Wärmemengen in den Boden abgegeben als im Realfall bei kunststoffummantelten, in Schutzrohren verlegten Kabeln. Hier wirkt das innerhalb des Schutzrohres bestehende Luftpolster wärmedämmend. Der Wärmefluss wird dadurch reduziert. Die Versuchsbedingungen des "Freiburger Experiments" sind somit ungünstiger als im Netzbetrieb.

Hinsichtlich des Aufbaus entspricht die Kabelanlage in Meerbusch-Osterath weitestgehend der Anlage in Borken/Nordvelen. Dementsprechend sind keine oder allenfalls marginale Unterschiede bei der Wärmeableitung und der Wärmeverteilung zu erwarten. Inwieweit sich die unterschiedlichen Betriebsspannungen auf die Wärmeemission bzw. die Verlustleistung auswirken werden, kann derzeit nicht verlässlich prognostiziert werden. Eine gewisse Restunsicherheit der Prognose ist dadurch gegeben. Dem wird jedoch durch die extremen Versuchsbedingungen Rechnung getragen. Es ist davon auszugehen, dass, wie im "Freiburger Experiment", die Verlustleistungen auch beim "Osterather Kabeltest" deutlich höher lagen als im Netzbetrieb.

Die Kabelanlage in Borken/Nordvelen besteht de facto aus zwei voneinander unabhängigen, jeweils zweisträngigen Systemen. Der Abstand zwischen beiden Systemen beträgt 9,40 m. Die thermischen Wechselwirkungen zwischen beiden Systemen sind dadurch vernachlässigbar. Der Abstand der Einzelstränge innerhalb eines Systems beträgt lediglich 1,85 m. Gewisse Wechselwirkungen können hier nicht ausgeschlossen werden. Aus dem Versuch in Freiburg zeigte sich, dass das jeweils äußere Rohr geringfügig kühler war als das Zentrale. Bei der Kabelanlage Borken/Nordvelen kann die Temperatur an den beiden benachbarten Kabeln zwischen den Strängen eines Systems deshalb geringfügig ansteigen. Zwischen den beiden Strängen eines Systems wird die Temperatur nicht auf das Niveau des äußeren Bereichs sinken, sondern geringfügig höher sein. Die Differenzen werden jedoch vernachlässigbar gering sein.

Die größere Verlegetiefe in Borken/Nordvelen führt dazu, dass die Wärme auf einen größeren Bodenkörper verteilt wird und vor allem im Winter langsamer an die Atmosphäre abgegeben wird. Die Temperaturdifferenzen werden deshalb an der Oberfläche geringer ausfallen und die Effekte werden im ökologisch relevanten Bereich des Oberbodens gedämpft. Gegenüber den Bedingungen des "Freiburger Experiments" und vor allem des "Kabeltests in Osterath" ist dies eine günstigere Situation.

Trotz abweichendem Trassenkörper und der Verwendung von Stahlrohren anstelle realer Kabel können die Ergebnisse des "Freiburger Experiments" eine zuverlässige Prognose bezüglich der zu erwartenden Wärmeverteilung im Boden liefern. Die Verwendung von Stahlrohren anstelle von Kabeln und die geringere Verlegetiefe ist im Vergleich zur Realität ein deutlich ungünstigerer Ansatz.

Abschließende Bewertung

Anhand der geschilderten Sachlage wird deutlich, dass trotz bestehender regionaler und kleinstandörtlicher Unterschiede eine Übertragbarkeit der Befunde auf die Verhältnisse in Borken/Nordvelen gegeben ist. Die Prognosen sind stets unter sehr konservativ getroffener Auslegung der Ergebnisse des "Freiburger Experiments" und des "Kabeltests Osterath" ermittelt worden. Das in beiden Studien zugrunde gelegte Worst Case-Szenario darf nicht als Regelfall des Netzbetriebs gesehen werden. Vielmehr ermöglicht es, Unsicherheiten bei der Übertragung der Ergebnisse auf andere Standorte zu kompensieren.

Der Versuchsstandorte Freiburg/Emmendingen und Meerbusch-Osterath sind sowohl im Hinblick auf die klimatischen Bedingungen als auch im Hinblick auf die Bodenverhältnisse mit dem Standort der Erdkabelanlage in Borken in vollem Umfang vergleichbar.

6.4 Ergebnisse des "Freiburger Experiments"

6.4.1 *Vorlaufphase*

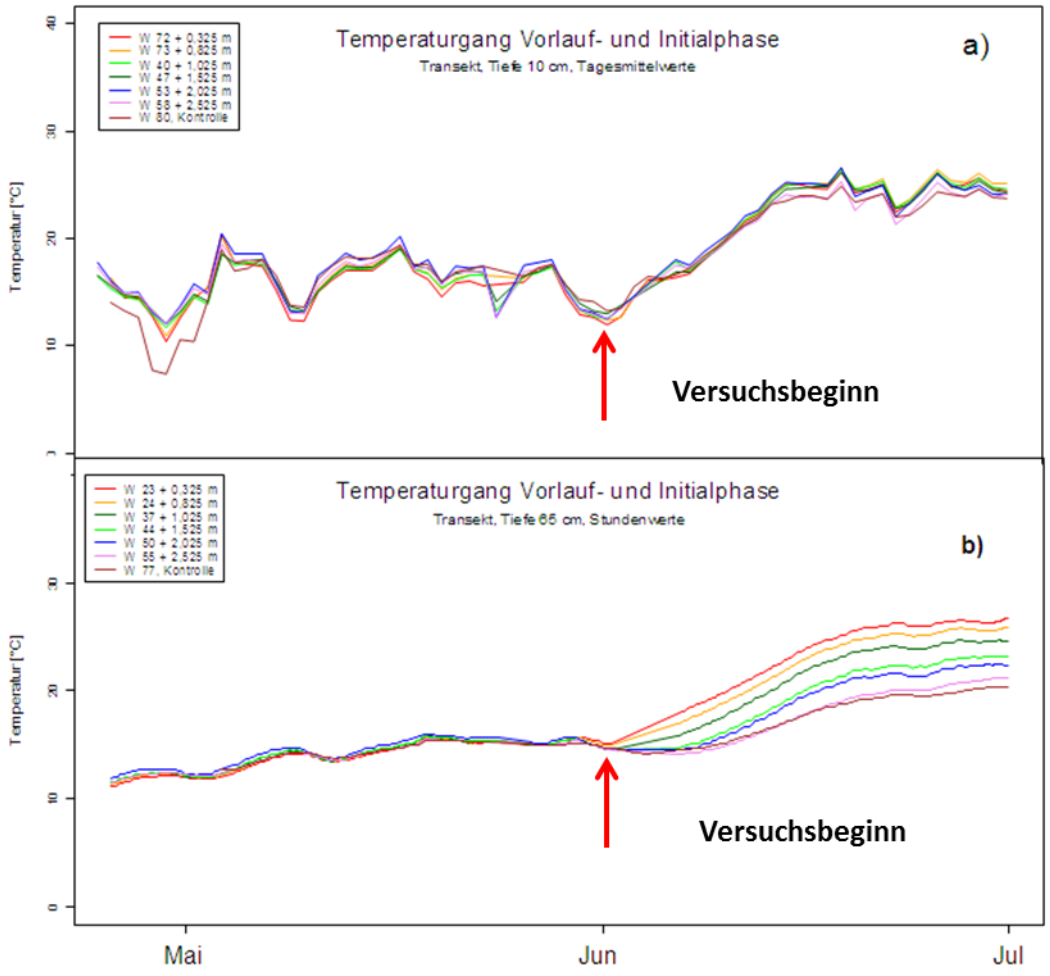

Abb. 8: Horizontale Temperaturprofile während der Vorlauf- und Initialphase.

a) Profil in 10 cm Tiefe (Tagesmittelwerte)
b) Profil in 65 cm Tiefe (Stundenwerte)

Durch eine Vorlaufphase ohne Wärmezufuhr sollte zunächst die Inhomogenität der Wärmeverteilung im Boden festgestellt und die Messgenauigkeit der Anlage überprüft werden.

An der Bodenoberfläche bestimmen Tagesschwankungen die Bodentemperaturen so stark, daß eine eventuell bestehende räumliche Differenzierung davon vollständig überdeckt wird. In Abb. 8 a sind deshalb Tagesmittel dargestellt. Die an der Bodenoberfläche auftretenden lateralen Temperaturunterschiede sind im Durchschnitt < 1 K. Bei Betrachtung der Stundenwerte sind die Differenzen jedoch größer. In größerer Tiefe unterscheiden sich selbst die auf Stundenwerten basierenden Temperaturkurven kaum noch. Die räumliche Variation der Temperaturen ist dort < 0,12 K. Demnach ist die laterale Wärmeverteilung im Boden insgesamt sehr homogen. Die Ergebnisse zeigen jedoch auch, daß die Bodenstörung bei der Anlage des Bauwerks die Wärmeverteilung nicht erkennbar beeinflußt hat.

Mit dem Beginn des Betriebs beginnen sich vertikale und horizontale Temperaturgradienten aufzubauen. Im Unterboden reagieren die Bodentemperaturen sehr rasch und empfindlich auf die zugeführte Wärme (Abb. 8 b).

6.4.2 *Die Pulsexperimente*

In Abbildung 9 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 werden bis in eine Tiefe von 65 cm exakt nachgezeichnet. Selbst bei stärkerer Erwärmung auf bis zu 75°C sind die einzelnen Wärmepulse im Oberboden (20 cm Tiefe) kaum noch identifizierbar. Die durch die Wärmepulse verursachten Temperaturspitzen sind dem saisonal bedingten Temperaturgang aufgesetzt (HARTGE & HORN, 1978). Im Bereich der Sandbettung werden stets die höchsten Temperaturen erreicht. Deutlich zeigt sich jedoch, daß die Temperaturen mit zunehmender Entfernung kontinuierlich abnehmen. Bemerkenswert dazu ist, daß sich die zwischen Sandbett und Verfüllung bestehende Lagerungs- und Körnungsdiskontinuität nicht erkennbar auswirkt.

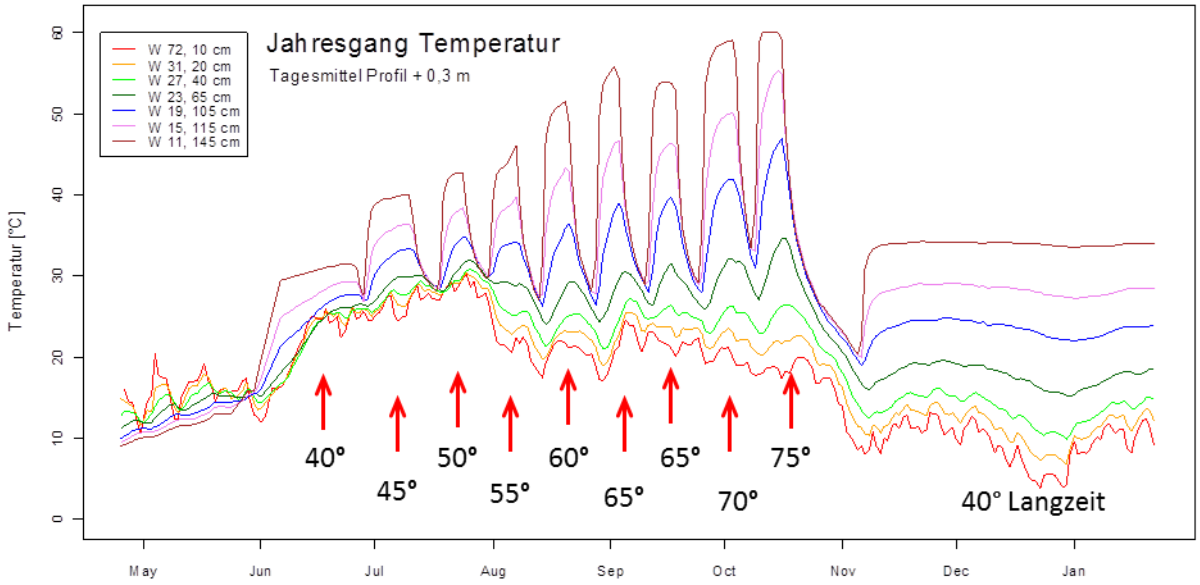

Abb. 9: Vertikales Temperaturprofil oberhalb des zentralen Heizrohres während der Pulsexperimente und des Langzeitexperiments bei 40 °C

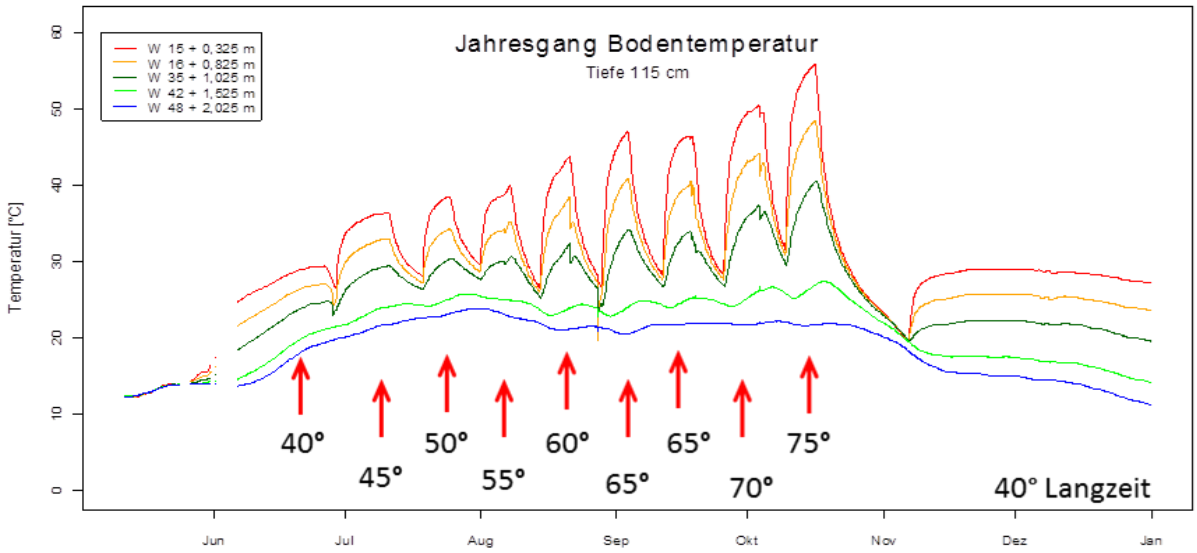

Abb. 10: Horizontale Temperaturprofile während der Pulsexperimente und des Langzeitexperiments bei 40 °C .
(Längenangaben in der Legende entsprechen dem Abstand der Meßstellen vom Zentrum der Meßeinrichtung)

Die horizontalen und vertikalen Temperaturprofile sind grundsätzlich sehr ähnlich (Abb. 9 und 10). Auch in ***horizontaler Richtung*** nehmen die Einflüsse mit der Entfernung zur Wärmequelle hin ab (Abb. 10). Der Wärmeabfluß erfolgt nicht nur zur Atmosphäre hin sondern auch seitlich in einen räumlich nicht begrenzten Bodenkörper mit einer sehr homogenen Wärmeverteilung. In einer Tiefe von 145 cm sind Effekte bis in eine Entfernung von 1 m von der äußeren Wärmequelle erkennbar. Die Effekte sind jedoch bereits in dieser Entfernung nur noch gering.
Die in 5 Metern Entfernung eingerichtete Kontrolle ist unbeeinflußt. Die seitlichen Effekte werden sich auch im quellennahen Bereich auf eine Zone von ca. 2,0 bis 2,5 m Breite beschränken.

Übertragung auf die Verhältnisse in Borken/Nordvelen

Bei den Pulsexperimenten wurde durch die Heizanlage ein kurzfristiger Anstieg der Heiztemperatur auf den vorgegebenen Sollwert erzwungen. Die Solltemperatur stellte sich dabei innerhalb weniger Stunden ein. Unter den Bedingungen des Netzbetriebs wird der Anstieg der Kabeltemperatur auch bei kurzfristiger Einspeisung von Spitzenströmen erheblich langsamer erfolgen. Die Bedingungen im Experiment sind somit hinsichtlich der zu erwartenden thermischen Effekte wesentlich ungünstiger. Es ist deshalb davon auszugehen, daß sich ein kurzfristiger, ein bis zweiwöchiger Betrieb bei Auslegungslast im Wesentlichen auf den Bereich der Bettung und den Unterboden auswirken wird. Die Oberbodentemperaturen werden allenfalls marginal oder nicht merkbar reagieren.

6.4.3 *Langzeitversuche*

Der an die Pulsversuche anschließende, im November begonnene Langzeitversuch bei 40 °C zeichnete sich anfänglich noch durch einen bis zur Bodenoberfläche reichenden Temperaturanstieg aus. Ein winterlicher Kälteeinbruch überformte dann jedoch das Vertikalprofil bis in eine Tiefe von 115 cm (Abb. 9). Im Winter bewirkte die Aufheizung keine grundsätzliche Änderung des natürlichen Temperaturprofils. Anders war dies jedoch bei den Wärmepulsen im Zeitraum von August bis Oktober. Bei Temperaturen > 50 °C kam es zu einer Inversion der Temperaturgradienten und einer vor allem im Unterboden grundsätzlich veränderten Wärmeverteilung. Die bei ungestörten Bedingungen im

Sommer stets vorhandene Wärmescheide (Abb. 1) 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. 11). Hier waren die Temperaturprofile ganzjährig von der

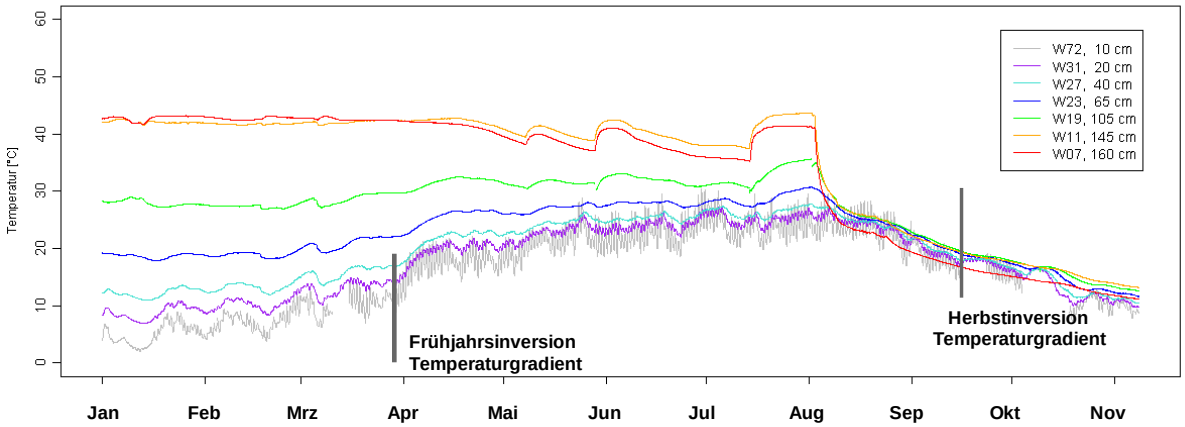

Abb. 11: Jahresgang der Bodentemperaturen während des Vegetationsexperiments bei 50°C (Vertikalprofil)

Wärmeemission dominiert. 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 Temperaturbedingungen ergeben. In der Zone darüber waren die Temperaturen maßgeblich geprägt vom Wärmeaustausch mit der Atmosphäre. Die Temperaturen folgten hier dem typischen Jahresgang (vgl. Abb. 1).

Als weiterer Maßstab zur Beurteilung von thermischen Effekten können die Temperaturdifferenzen zwischen der Versuchsparzelle und dem ungestörten Boden (Kontrolle) herangezogen werden. Diese wurden für die wärmste Zone im Bereich oberhalb der zentralen Wärmequelle nach Tiefenstufen getrennt berechnet (Abb. 12 und 13). Dargestellt ist zunächst ein Langzeitversuch bei 40 °C, der in den Wintermonaten durchgeführt wurde, in denen die thermischen Effekte besonders ausgeprägt sind.

Das Diagramm (Abb. 12, oben) zeigt die Temperatur des zentralen Heizrohres, 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 betrugen die Differenzen bis zu 6 K, in der Bettung um die Wärmequelle um bis zu 25 K.

Abb. 13 zeigt die Ergebnisse des Langzeit-Vegetationsexperiments, das über einen Zeitraum von mehr als 11 Monaten bei konstant 50°C durchgeführt wurde. Diese Temperaturen könnten bei dauerhafter Auslegungslast erreicht werden.
Die Ergebnisse zeigen sehr eindrucksvoll, daß die Differenzen im Jahresverlauf erheblich variierten. Die stärksten Effekte traten ausgangs Winter auf, wo die Temperaturen an der Bodenoberfläche stets niedrig sind. Während dieser Zeit wurde die Wärme bevorzugt oberhalb der Trasse an die Atmosphäre abgegeben. Es kam dort zu einer Temperaturerhöhung von bis zu 5,5 K. In den Sommermonaten

waren die Unterschiede 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.

Temperaturdifferenzen im Vergleich zum ungestörten Boden

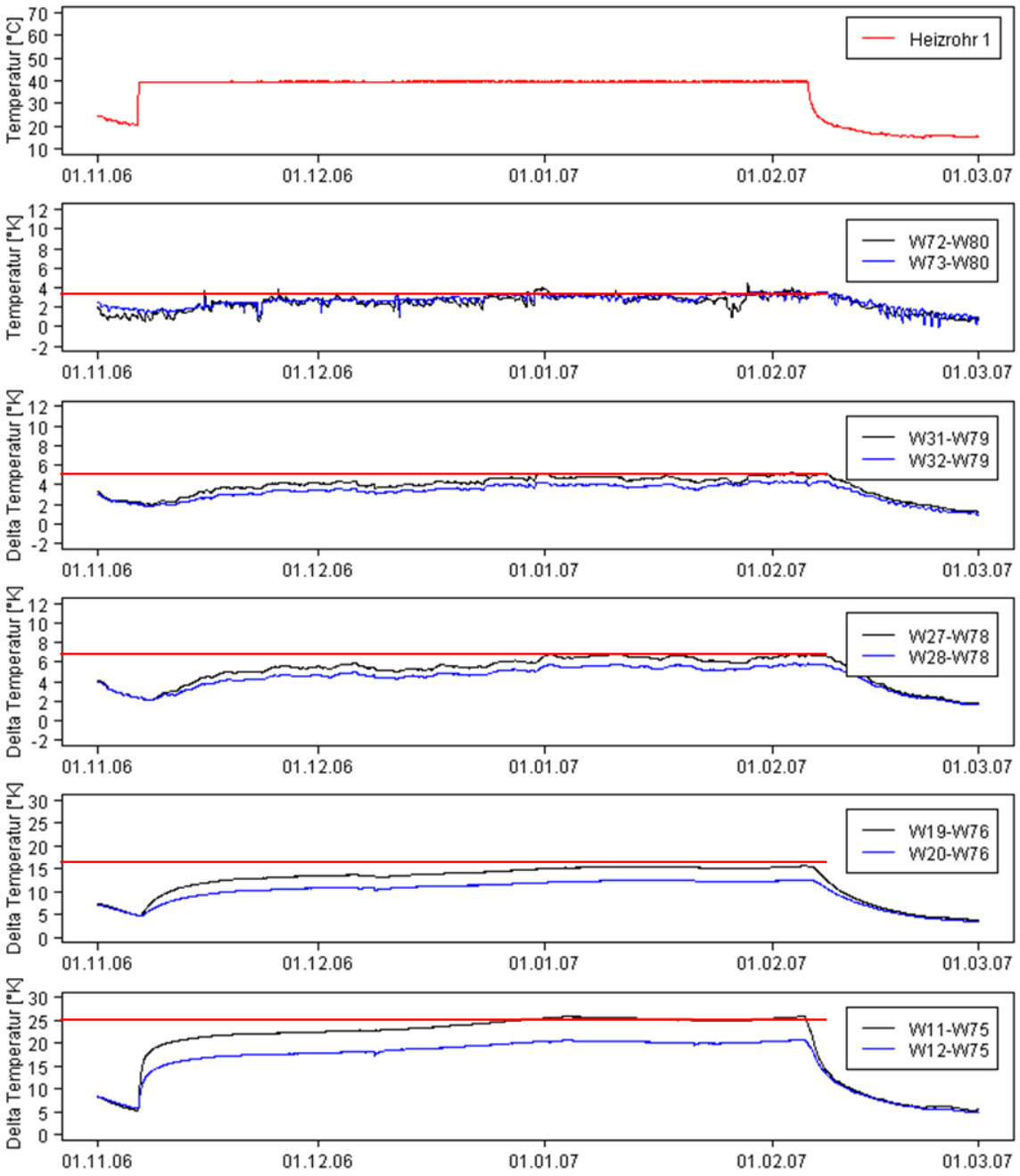

Abb. 12: Temperaturdifferenzen zwischen dem unbeeinflussten Boden und der Versuchsparzelle bei dauerhaft 40°C Rohrtemperatur
(schwarze Linie) Zone oberhalb des zentralen
(blaue Linie) Zone oberhalb des äußeren Heizrohres.

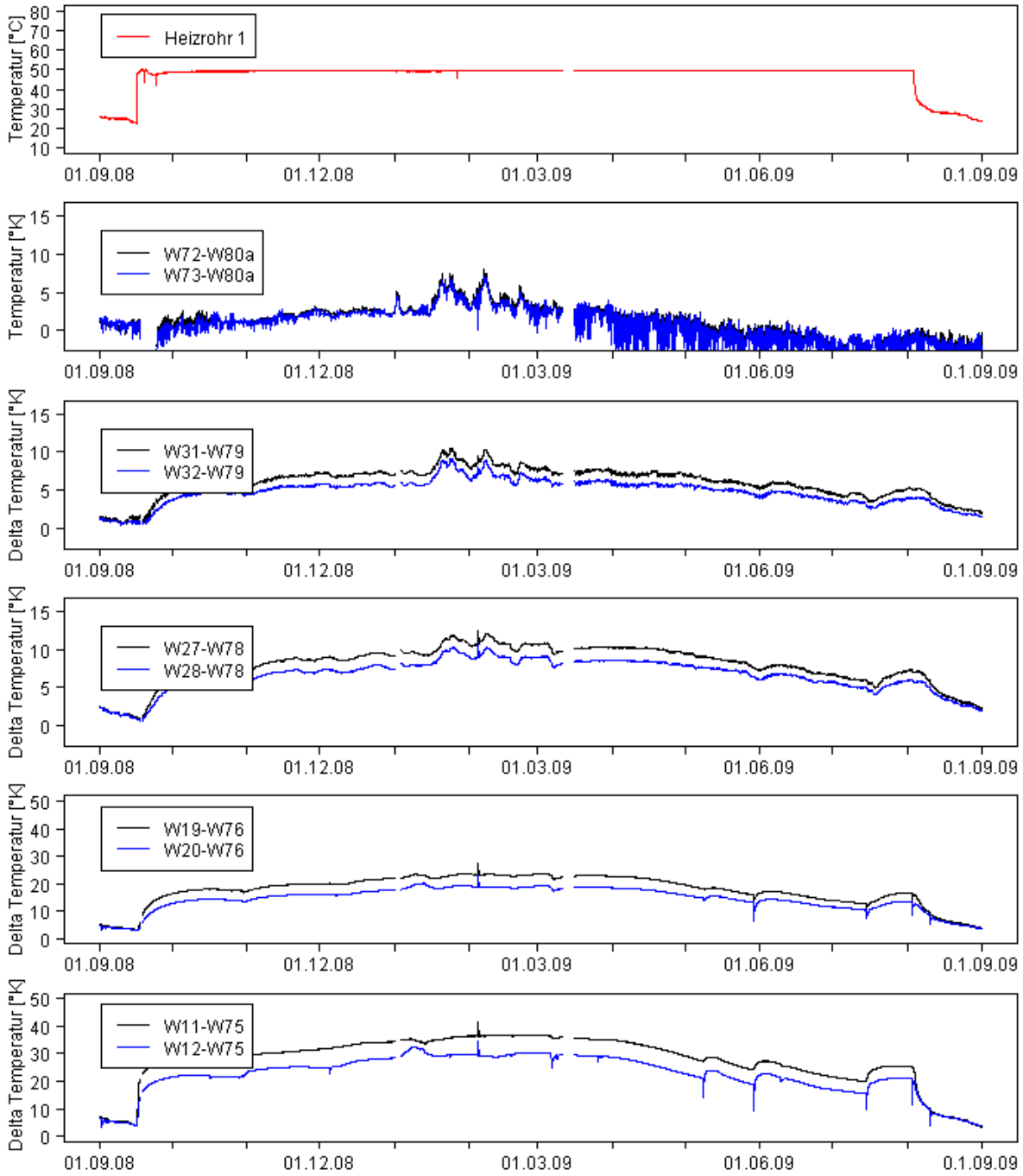

Abb. 13: Temperaturdifferenzen zwischen dem unbeeinflussten Boden und der Versuchsparzelle bei dauerhaft 50 °C Rohrtemperatur
(Vegetationsversuch und Langzeitexperiment)

Übertragung auf die Verhältnisse in Borken/Nordvelen

Unter Normallastbedingungen werden sich am Schutzrohr niedrigere Temperaturen ausbilden als diejenigen, die im "Freiburger Experiment" verwendet wurden. Legt man der Einschätzung die Ergebnisse des 40°C Langzeitexperiments zugrunde, so sind die im Oberboden zu erwartenden Temperaturänderungen im Durchschnitt <=3 K. Unter Berücksichtigung der Erkenntnisse aus dem Vegetationsexperiment bei 50 °C dürfte die zu erwartende Temperaturerhöhung ca. 3,5 K betragen.

Sofern es im Netzbetrieb zu einem mehrmonatigen Betrieb bei Auslegungslast kommen würde, könnten sich Temperaturdifferenzen von bis zu 5,5 K ergeben. Nach Einschätzung der Netzbetreiber und dem derzeitigem Planungsstand ist jedoch davon auszugehen, daß im Netzbetrieb die Auslastung mit Auslegungslast nur kurzfristig auftreten wird. In diesem Fall würden sich im Bereich der Trasse Temperaturdifferenzen < 5 K einstellen. Dies deckt sich auch mit den Prognosen aus den Modellrechnungen von BRAKELMANN et al. (unveröffentlicht).

6.4.4 *Wärmeausbreitung im Boden*

Die Wärmeausbreitung und deren zeitliche Entwicklung sind am Beispiel des Langzeitexperiments mit 60°C dargestellt (Abb. 14). Vor Beginn der Aufwärmung war die Wärmeverteilung im Boden sehr homogen. Lediglich im Bereich der Heizanlage ergeben sich etwas höhere Temperaturen, was durch die noch enthaltene Restwärme aus dem vorangegangenen Experiment bedingt war (Abb. 14 a). Vierzehn Tage nach Beginn der Aufheizung ergab sich schließlich ein wesentlich differenziertes Bild (Abb. 14 b). Im Bereich der Wärmequellen hatten sich die Temperaturen jetzt der Zieltemperatur von

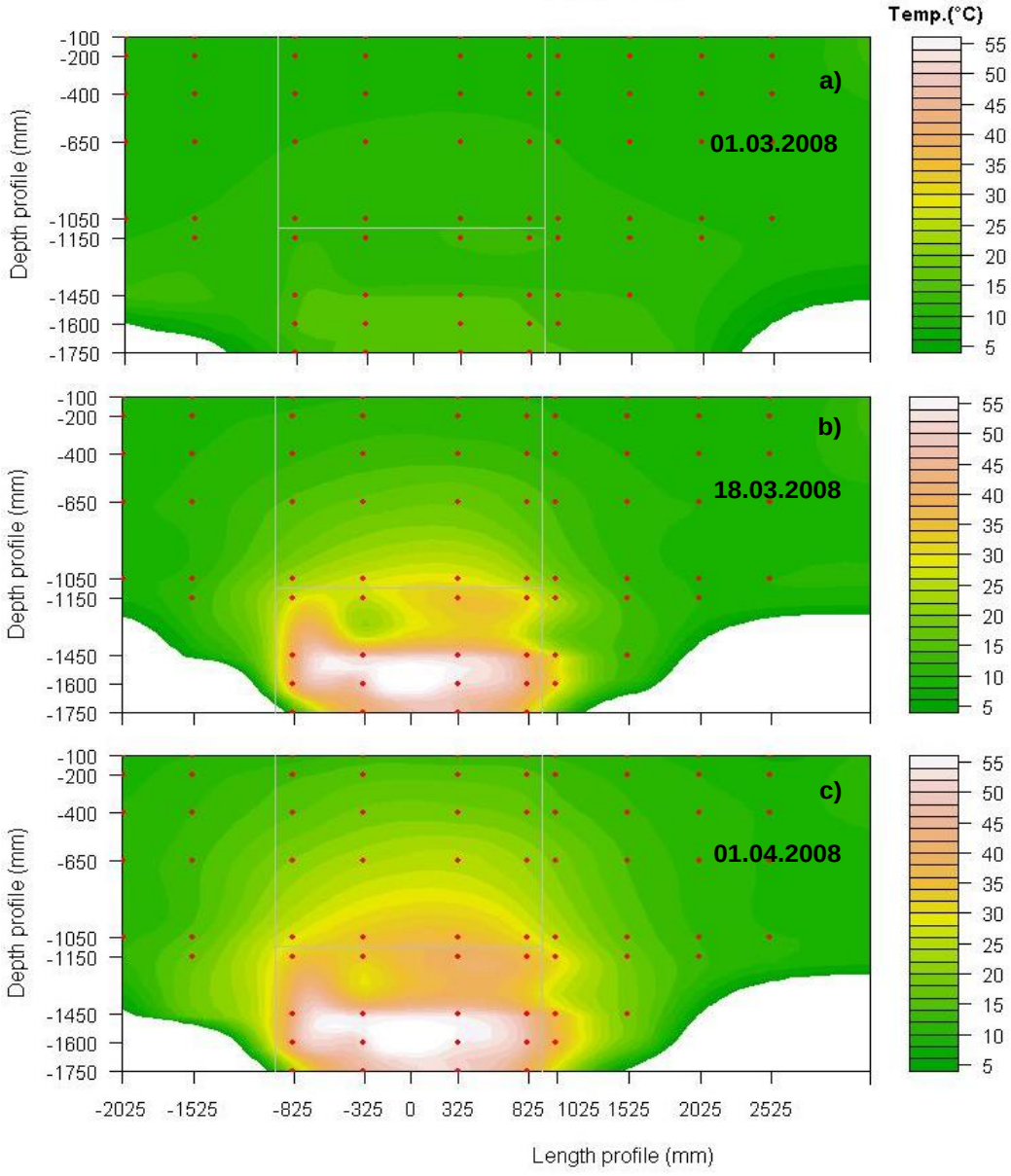

Abb. 14: Zeitlicher Gang der Wärmeausbreitung im Boden bei Erwärmung auf 60 °C

60 °C angenähert. Es zeigten sich nun deutliche vertikale Temperaturgradienten im Bereich der Trasse, die den Wärmestrom zur Oberfläche hin anzeigen. Zu diesem Zeitpunkt hat die Wärmefront die Bodenoberfläche jedoch noch nicht erreicht. Zwei Wochen später war die Wärmefront bis an die Bodenoberfläche vorangeschritten (Abb. 14 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.

Übertragung auf die Verhältnisse in Borken/Nordvelen

Die Ergebnisse des Experiments zeigen, daß die Wärmeflüsse im Winter bevorzugt nach oben zur Atmosphäre hin erfolgen. Im Sommer trifft dies nur mit Einschränkung zu. Hier erfolgt ein zusätzlicher, seitlicher Wärmefluß in den Unterboden. Für die Kabelanlage in Borken/Nordvelen lässt sich folgendes Verteilungsmuster ableiten:

Die Wärmeableitung zur Atmosphäre hin wird sich auf den Bereich der beiden Trassenkörper seitlich des rekultivierten Zwischenstreifens beschränken. Der Zwischenstreifen selbst wird von thermischen Effekten nicht bzw. allenfalls im Unterboden betroffen sein. Dafür sind die Entfernungen zu den Kabeln zu groß. Die beiden Trassenkörper sind thermisch unabhängig. Im Bereich der beiden Trassen wird es vor allem im Winter zu zweigipfeligen Temperaturprofilen kommen, wobei die Temperaturmaxima jeweils über dem mittleren Leiter der beiden Stränge auftreten werden. Im Sommer wird dieses Temperaturprofil weniger deutlich ausgeprägt sein. Hier wird es zu einer schwach differenzierten Temperaturerhöhung über den gesamten Bereich der beiden Trassen kommen.

Weiter prognostiziert werden kann, daß die lateralen Auswirkungen an der Bodenoberfläche einen Bereich von 2,5 Metern seitlich des äußeren Leiters nicht überschreiten werden.

6.4.5 *Das Grundwasserexperiment*

Der Verlauf des Grundwasserexperiments ist in Abb. 15 dargestellt. Begonnen wurde mit dem Aufheizen des Bodens bei 50°C. Diese Temperatur wurde während des gesamten Experiments aufrechterhalten (Abb. 15 a). Das Sandbett (Abb. 15 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. 15 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 bleibt 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 der Grundwassertemperatur an.

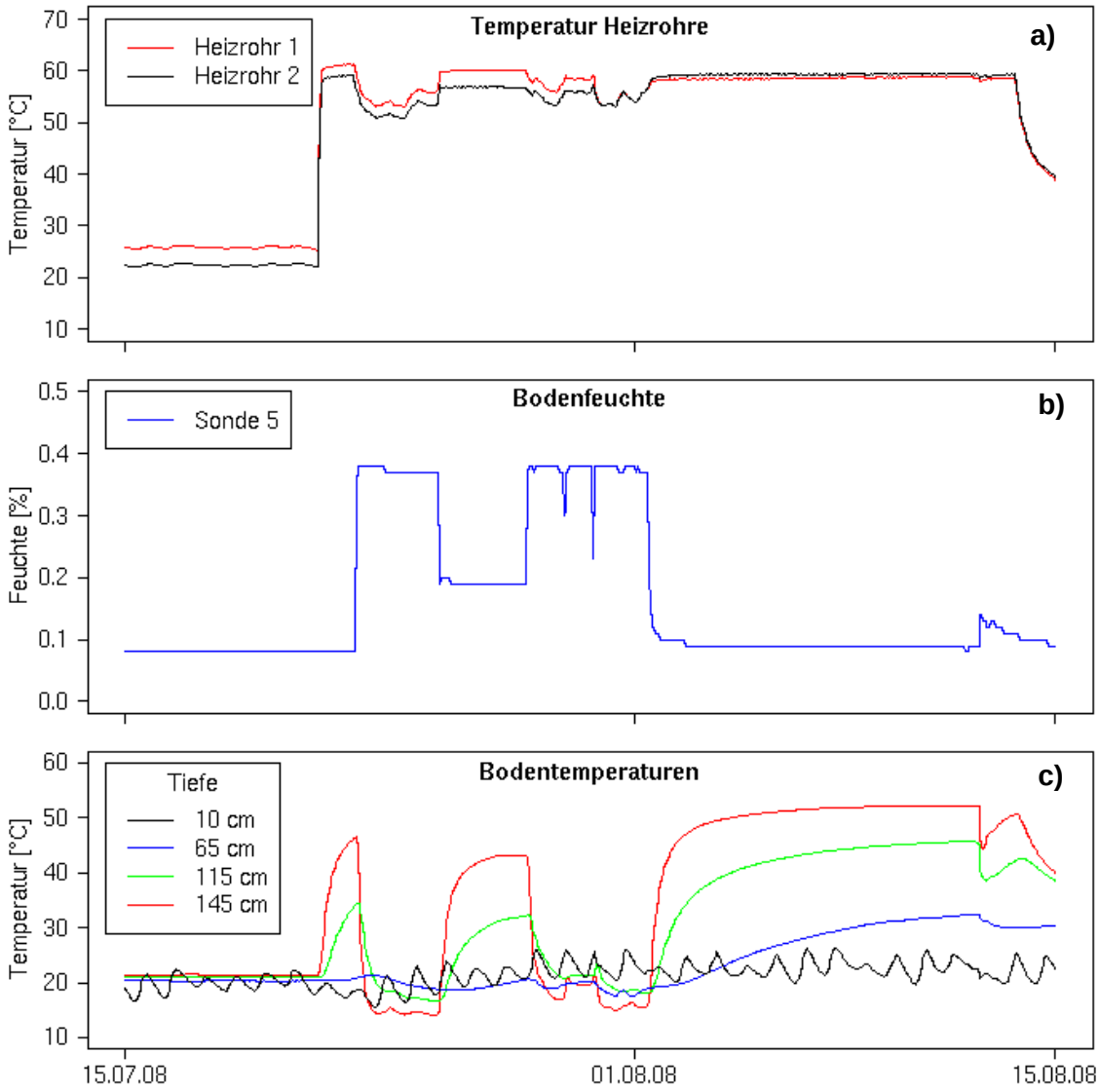

Abbildung 15: Das Grundwasserexperiment

Übertragung auf die Verhältnisse in Borken/Nordvelen

Die Kabeltrasse Borken/Nordvelen verläuft streckenweise durch grund- und stauwasserbeeinflusste Böden. Sofern sich die Kabelanlage im Bereich des Grundwasserkörpers befindet, sind die thermischen Auswirkungen vernachlässigbar klein. Dies gilt in abgeschwächter Form auch für Stauwasserbeeinflussung. Allerdings ist Stauwasser nur temporär vorhanden, so daß sich hier zeitweise auch terrestrische Bedingungen einstellen können. Die zuvor getroffenen, aus dem "Freiburger Experiment" gewonnenen Einschätzungen beziehen sich auf terrestrische Böden. Die potentielle Austrocknung ist deshalb bei der getroffenen Bewertung bereits berücksichtigt.

6.4.6 *Auswirkungen auf den Bodenwasserhaushalt*

Im ungestörten Boden und im Bereich der Verfüllung betrug die Bodenfeuchte meist zwischen 28 Vol. % und 40 Vol. % (Abb. 16). Dies entspricht einer relativ hohen Wassersättigung. Im Sandbett waren die Wassergehalte aufgrund der geringen Speicherleistung 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 witterungsbe-

dingt 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 Grubensohle durch. Im gewachsenen Boden und der Verfüllung entspricht dies einem typischen Jahresgang.

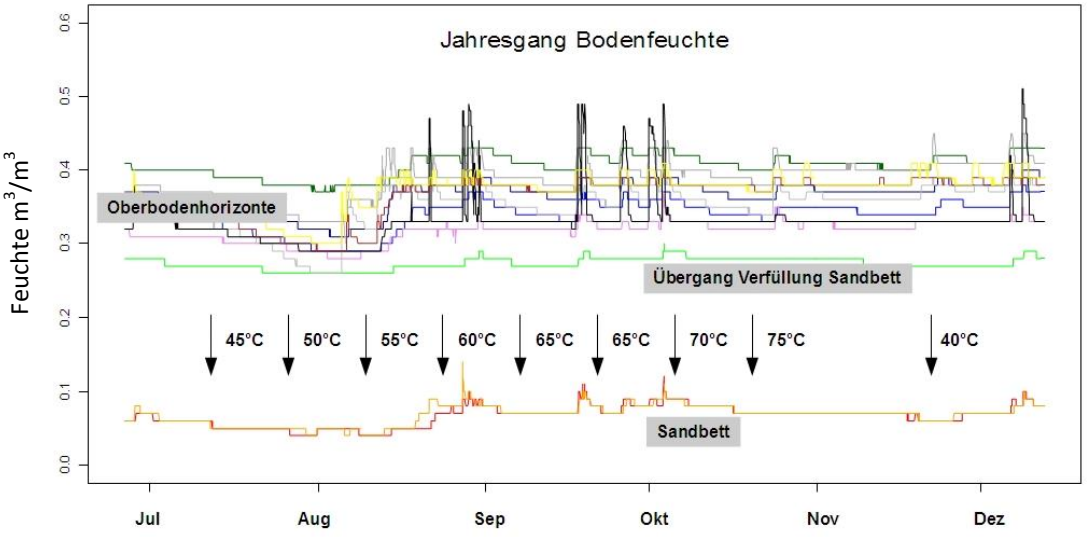

Abbildung 16: Bodenfeuchte während des Pulsexperiments und eines Langzeitexperiments bei 40 °C

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 Jahresgang 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. 16). Die Wärmezufuhr bleibt 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.

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.

Übertragung auf die Verhältnisse in Borken/Nordvelen

Wie im Zuge des "Freiburger Experiments" beobachtet, werden sich auch in Borken/Nordvelen keine ***thermisch bedingten***, ökologisch relevanten Veränderungen des Bodenwasserhaushalts ergeben. Dafür sind die zu erwartenden Temperaturen zu gering und die zu überwindenden Transportstrecken zur Oberfläche hin zu lang. Dies bedeutet jedoch nicht, daß durch die Maßnahme Änderungen des Bodenwasserhaushalts ausgeschlossen werden können. Dabei handelt es sich allerdings um Auswirkungen durch die Baumaßnahme und das Bauwerk selbst, deren Einschätzung nicht Gegenstand dieses Gutachtens ist.

Für die Kabelanlage Borken/Nordvelen lässt sich prognostizieren, daß die thermisch bedingten Auswirkungen auf den Ertrag mit höchster Wahrscheinlichkeit ebenfalls gering sein werden. Von deutlich größerem Einfluss könnten die Auswirkungen durch den baulichen Eingriff sein, falls dieser nicht sachgerecht durchgeführt wird. Es wird daher ausdrücklich empfohlen dafür Sorge zu tragen, daß bei der Bauausführung und der anschließenden Rekultivierung die gesetzlichen Vorgaben der BBodSchV und die Ausführungsbestimmungen in vollem Umfang eingehalten werden. In diesem Fall wären auch die baulichen Auswirkungen kalkulierbar.
Wie bereits erwähnt, können thermische Effekte nicht vollständig ausgeschlossen werden. Zur Klärung derzeit nicht einschätzbarer Auswirkungen auf landwirtschaftliche Kulturen wird nach Abschluss der Baumaßnahmen ein mehrjähriges, umfangreiches ökologisches und technisches Monitoring unter maßgeblicher Beteiligung des WLV durchgeführt werden. Es wird dann auch möglich sein, Auswirkungen exakt zu quantifizieren.

6.4.7 *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 auf 50 °C hat die Bildung einer geschlossenen Schneedecke nicht verhindert (Abb. 17). 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. 18). Erst später schritt das Auftauen auch seitlich voran (Abb. 19).

Abbildung 17: Meßfläche unmittelbar nach Schneefall auf ungefrorenem Boden bei Erwärmung auf 50°C
(Markierung entspricht dem Bereich der Wärmequellen)

Abbildung 18: Meßfläche bei einsetzender Tauphase bei Erwärmung auf 50°C
(Markierung entspricht dem Bereich der Wärmequellen)

Abbildung 19: Meßfläche nach fortgeschrittener Tauphase bei Erwärmung auf 50°C
(Markierung entspricht dem Bereich der Wärmequellen)

Abbildung 20: Auftreten von Bodenfrost bei Erwärmung auf 50°C
(Markierung entspricht dem Zentrum der Wärmequellen)

Grundsätzlich führt 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 reicht nicht aus, Oberflächenfrost zu verhindern (Abb. 20). Dafür ist die zugeführte Energie zu gering. Auch eine längere, starke Auslastung der Kabel wird ein Auftreten von Bodenfrost nicht verhindern.

6.4.8 *Auswirkungen auf landwirtschaftliche Kulturen*

"Freiburger Experiment"

Zur Ersteinschätzung möglicher Auswirkungen auf landwirtschaftliche Kulturen wurde eine Demo-Fläche 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. 21 und 22). 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 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 21: Winterweizen nach der Einsaat
(Markierung entspricht dem Bereich der Wärmequellen)

Abbildung 22: 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. Dies wird so auch für die Kabelanlage in Borken/Nordvelen prognostiziert. Mögliche negative Effekte auf den Ertrag können niemals völlig ausgeschlossen werden. Fest steht jedoch, 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 mit Auslegungslast, was nach Aussagen des Betreibers nicht beabsichtigt 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 Abschn. 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 Neue Erkenntnisse aus dem “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 handelt sich dabei um eine 110 kV-Verbindungstrasse zwischen zwei Umspannanlagen. Diese konnte temporär zu Versuchszwecken genutzt werden. Der Versuchsaufbau ermöglichte es, verschiedene Betriebsszenarien zu testen und die Anlage auch langfristig mit technischer Maximallast zu betreiben. Die mehrjährigen Messreihen sind bisher nur teilweise ausgewertet. Die Ergebnisse sind daher vorläufig. Der Kabeltest ist zwischenzeitlich abgeschlossen. Das thermische Monitoring wird jedoch für den nun folgenden Netzbetrieb weitergeführt.

Abb. 23: 110-kV Kabeltrasse in Meerbusch-Osterath

Abb. 24: Kabeltrasse unmittelbar vor der Fertigstellung

Abb. 25: Instrumentierung der Kabelanlage zur Temperatur- und Feuchtemessung

7.1 Methodischer Ansatz

Zur Untersuchung möglicher Effekte auf landwirtschaftliche Kulturen wurden auf einer ca. 75 m langen Kabelstrecke Versuchsparzellen mit Kartoffeln, Mais und Winterweizen angelegt. Bepflanzt wurden drei Versuchsfelder mit verschiedenen Bettungsmaterialien und eine Kontrollparzelle abseits der Trasse. Die Abbildungen 23 und 24 zeigen die Trasse im Bereich der Versuchsfelder zu Beginn der Bauphase und kurz vor der Fertigstellung. Erkennbar sind die drei Schutzrohre und die teilweise

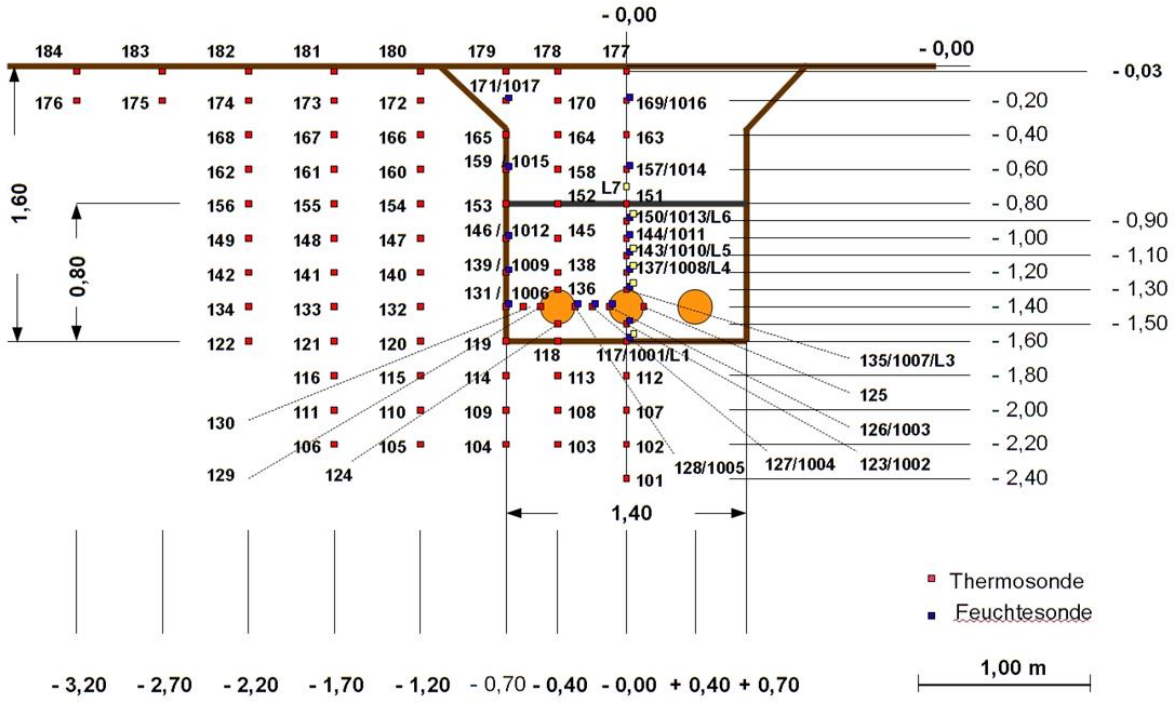

Abb. 26: Instrumentierung zur kontinuierlichen Messung der Bodentemperatur und -feuchte

erfolgte Einbettung in verschiedene Bettungsmaterialien sowie die im oberen Bereich der Verfüllung eingelegten Warnbänder. Abbildung 25 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. 26).

7.2 Bodentemperatur und Bodenfeuchte

7.2.1 *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, die zu Schäden an den Kabeln hätten führen können, betrieben. Der Versuch erfolgte somit unter extremen Testbedingungen, bei denen ***Kabelmanteltemperaturen*** von annähernd 70 °C erzeugt wurden. Die Auslegungslast der Kabelanlage wurde dabei über lange, mehrmonatige Zeiträume um das 1,3- bis 1,4-fache überschritten. Eine derart hohe Auslastung liegt weit über der geplanten Auslastung im Netzbetrieb. Aufgrund dessen liefert der Versuch auch in Bezug auf Borken sehr belastbare Erkenntnisse zu den zu erwartenden thermischen Auswirkungen im Boden. Derart extreme Bedingungen, werden im geplanten Netzbetrieb mit Normal- und Auslegungslast nicht erreicht.

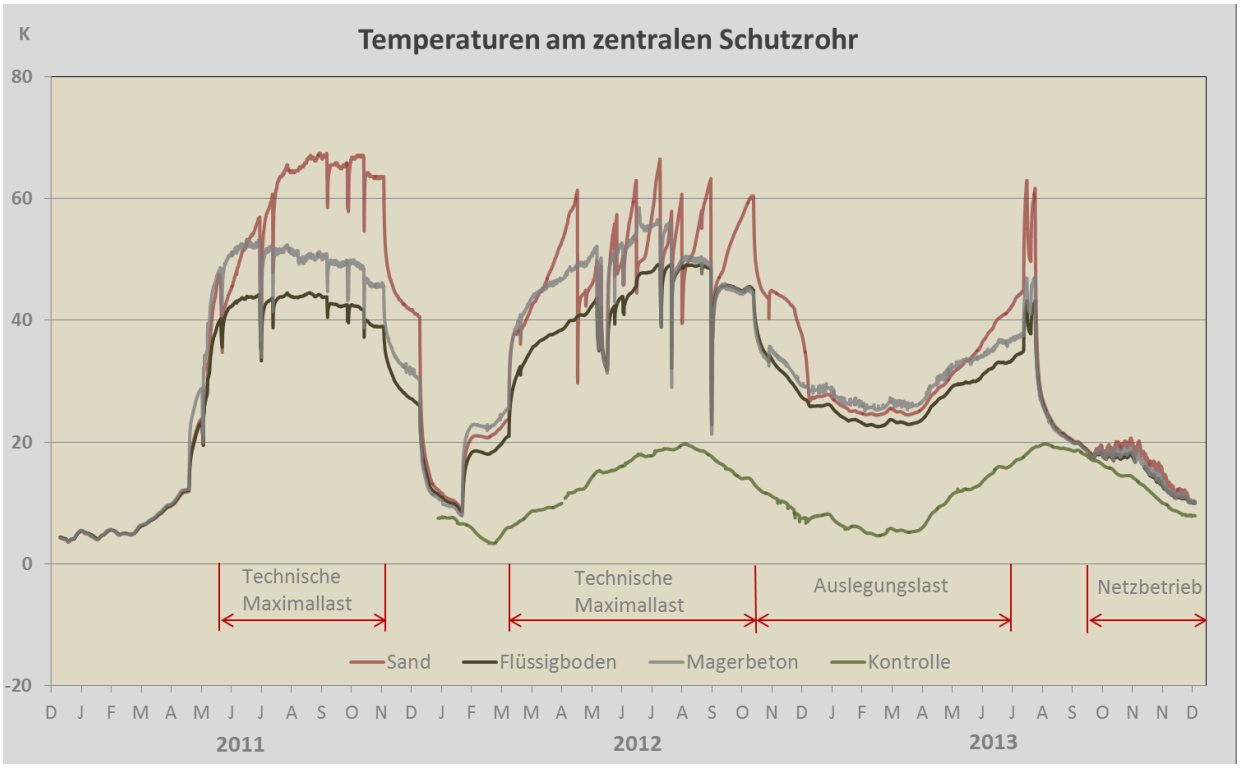

Abb. 27: Temperaturen am zentralen Schutzrohr bei technischer Maximallast, Auslegungslast und bei Netzbetrieb (<=Normallast) (Kontrolle in gleicher Bodentiefe)

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. 26). Nach Überschreiten eines Maximums kam es im Zeitraum November 2011 - Januar 2012 durch Umschalten auf Auslegungslast und anschließendem Abschalten zu einem Temperaturrückgang auf das Niveau der Kontrolle. Danach folgte ein erneuter Test bei technischer Maximallast, der bis Ende

Oktober 2012 andauerte. Im Anschluss daran wurde die Anlage bis Mitte Juli 2013 auf Auslegungslast zurückgefahren. Mit einem letzten Test bei technischer Maximallast wurde der Versuchsbetrieb Ende Juli 2013 beendet. Der Netzbetrieb wurde schließlich im September 2013 aufgenommen.

Bemerkenswert ist, dass die Temperaturen auch in einer Tiefe von 1,4 m noch maßgeblich vom witterungsbedingten natürlichen Jahresgang bestimmt werden. Die durch die Wärmeemission bedingten Effekte sind diesem aufgesetzt. Dies hatte sich auch beim "Freiburger Experiment" schon gezeigt. Bei ***technischer Maximallast*** waren die Temperaturen am zentralen Schutzrohr im Vergleich zur Kontrolle um ca. 30 K, bei der ungeeigneten Sandbettung sogar um bis zu 40 K höher. Bei Auslegungslast waren die Differenzen zur Kontrolle für alle Bettungsmaterialien annähernd gleich und mit Werten um 20 K deutlich niedriger. Beim derzeitigen Netzbetrieb <= Normallast betragen die entsprechenden Differenzen nur noch ca. 5 K.
Der Temperaturverlauf hängt weiterhin ab vom jeweiligen Bettungsmaterial. Der Versuch zeigt die unterschiedliche thermische Belastbarkeit der Bettungsmaterialien und das davon abhängige Temperaturverhalten. Bei geeignetem Material (Flüssigboden, 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 emittierte Wärme von der Schutzrohroberfläche abzuführen. Um Schäden an der Anlage zu vermeiden, musste diese 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 an der Professur für Bodenökologie der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg eine umfassende Studie durchgeführt (DEMAND, unveröffentlicht).

Bewertung
Die Ergebnisse zeigen, dass es bei den gewählten, extremen Versuchsbedingungen an den Schutzrohroberflächen zu einer starken Erwärmung kam. Derart hohe Temperaturen traten jedoch nur in Tiefen > 1 Meter auf. Sie sind deshalb ökologisch von untergeordneter Relevanz. Die Darstellung diente primär dazu den extremen Betrieb zu dokumentieren und die thermischen Bedingungen unmittelbar an der Kabelanlage offenzulegen.

Im Vergleich mit dem Betrieb bei technischer Maximallast sind die Temperaturen bei dauerhaftem Betrieb mit Auslegungslast durchschnittlich um etwa 20 K, beim derzeitigen Netzbetrieb <= Normallast noch deutlich niedriger. Bezüglich der zu erwartenden Effekte in Borken/Nordvelen besteht daher ein solider Puffer. Für die im Folgenden beschriebenen Kulturversuche ist festzuhalten, dass diese im Vergleich zum Netzbetrieb mit unrealistisch hohen Temperaturen durchgeführt worden sind.

Übertragung auf die Verhältnisse in Borken/Nordvelen
Berücksichtigt man die für den Normallastfall in Borken/Nordvelen prognostizierten Temperaturen an der Schutzrohroberfläche, so deckt das in Osterath erzeugte Temperaturspektrum diese vollends ab. Dort werden Temperaturen < 33 °C im Normalbetrieb und maximal 50 °C bei länger anhaltendem Betrieb mit Auslegungslast prognostiziert.

7.3 Thermische Auswirkungen im Oberboden

Ökologisch relevant sind primär die Temperaturen im Oberboden bzw. in der Hauptwurzelzone. An der Bodenoberfläche (3 cm Tiefe) ergaben sich beim ***Betrieb mit technischer Maximallast*** durchschnittliche Temperaturdifferenzen (Versuch-Kontrolle) von 3,6 K. In 20 cm Tiefe sind es 5,5 K (Tab. 2).

Tabelle 2: Übersicht über die Temperaturdifferenzen zwischen Kontrolle und Versuch

Variante	Sand		Flüssigboden		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

Die für die Jahre 2012 und 2013 dargestellten Temperaturdifferenzen (Abb. 28) sind lastabhängig differenziert. Die höchsten Differenzen ergaben sich erwartungsgemäß bei technischer Maximallast. Die Trägheit des Systems kam dabei klar zum Ausdruck. Nach Einstellung der technischen Maximallast kam es zu einer allmählichen Differenzierung der Temperaturen an der Bodenoberfläche. Nach etwa 3 Monaten stellte sich die Temperaturdifferenz auf einem weitgehend konstanten Niveau von 4 K ein. Erst nach dieser Zeit hatte sich ein Gleichgewicht zwischen der Wärmeemission und dem Wärmeabfluß eingestellt. Die emittierte Wärme kam erst mit einer Verzögerung von ca. 10 Wochen an der Bodenoberfläche an (Abb. 28). Mit der Einstellung der Auslegungslast Ende Oktober 2012 kam es zu einer deutlichen Verringerung der mittleren Temperaturdifferenzen auf Mittelwerte von 2,5 K an der Bodenoberfläche bzw. 3,5 K in 20 cm Tiefe (Tab. 2).

Interpretation

Die Ergebnisse des "Kabeltests Osterath" stehen im Konsens mit den Befunden aus dem "Freiburger Experiment". Die Auswirkungen der Wärmeemission konzentrierten sich auf die unmittelbare Umgebung der Wärmequellen bzw. die Kabelbettung. In der ökologisch relevanten Oberbodenzone waren die thermischen Effekte auch unter extremer Kabelauslastung vergleichsweise gering. Bei normaler Auslastung werden die Differenzen noch geringer ausfallen. Die getroffenen Prognosen werden dadurch weiter erhärtet.

Die Ergebnisse belegen zudem eine starke Trägheit des Systems, die für den Netzbetrieb von Bedeutung ist. Eine Belastung der Kabelanlage mit Auslegungslast wird sich daher an der Bodenoberfläche erst nach längerer Zeit auswirken. Dabei kann es sich um mehrere Wochen handeln. Ein eintretender (n-1)-Fall mit routinemäßiger Behebung der Störung wird somit allenfalls geringfügige Effekte verursachen.

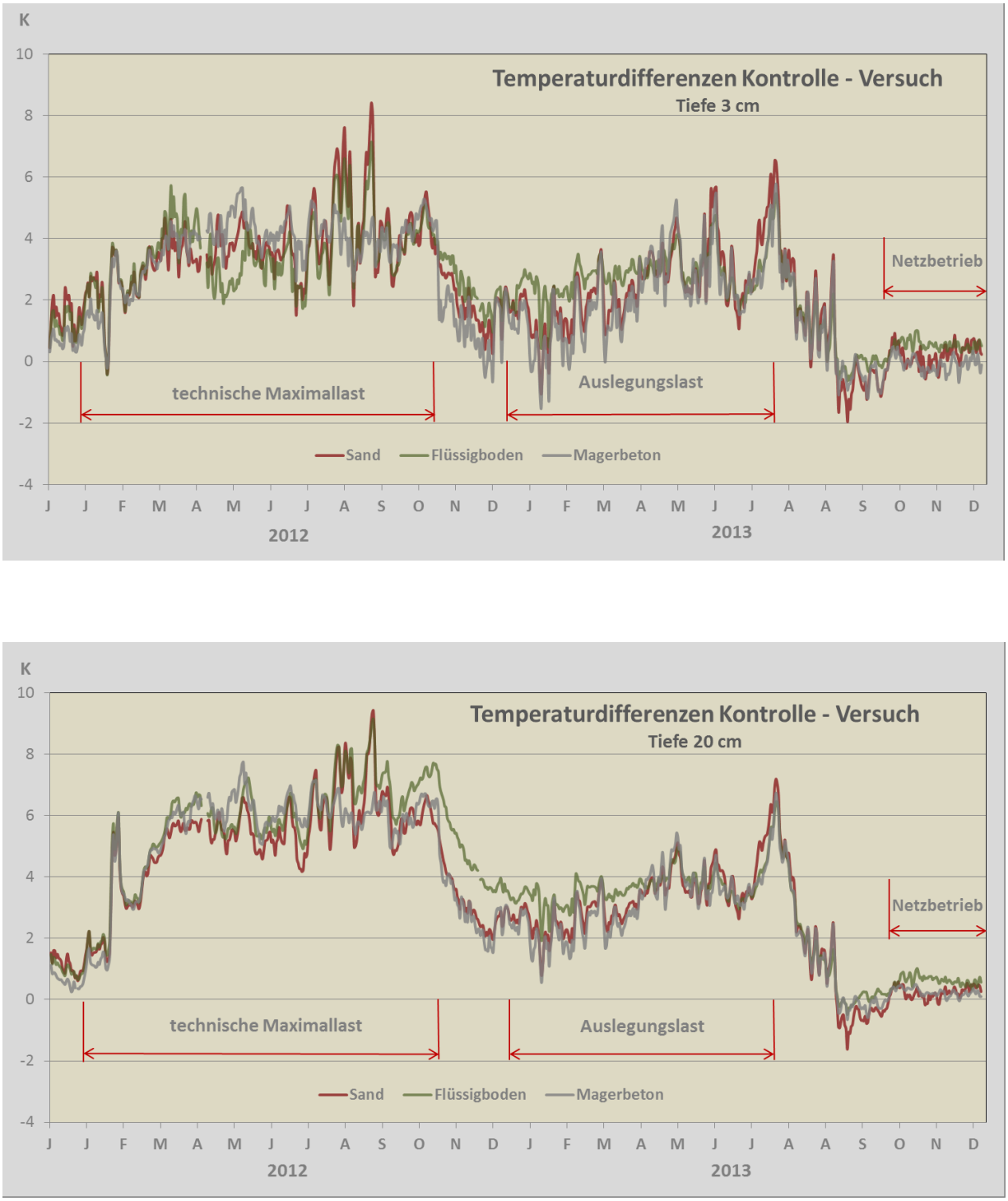

Abb. 28: Temperaturdifferenzen Kontrolle – Versuch im Oberboden bei technischer Maximallast, Auslegungslast und bei Netzbetrieb (<=Normallast)

Übertragung auf die Verhältnisse in Borken/Nordvelen

Mit den Versuchen in der 110 kV-Kabelanlage in Osterath konnten die Verhältnisse der in Borken/Nordvelen geplanten Anlage weiter angenähert werden. Erstmalig wurden mehrjährig angelegte Messungen und Testpflanzungen am realen Objekt durchgeführt.
Die Anlage in Osterath entspricht im Aufbau prinzipiell einer Systemkomponente der geplanten 380 kV-Anlage in Borken/Nordvelen. Eine Einschätzung möglicher Abweichungen durch die Kombination mehrerer Systeme findet sich in Abschn. 6.3.3.

Analog zum "Freiburger Experiment" wurden die Betriebsszenarien im Hinblick auf den Netzbetrieb auch hier äußerst konservativ angelegt. Bezüglich der zu erwartenden Verlustleistungen im Netzbetrieb bestehen deshalb erhebliche Reserven. Es ist nicht davon auszugehen, dass sich durch die Änderung der Spannungsebene und der Dimension der Anlage grundsätzlich andere Verlustleistungen ergeben werden.

Beide Standorte liegen in NRW in einer Entfernung von ca. 80 km. Aufgrund der räumlichen Nähe und einer sehr ähnlichen Meereshöhe unterscheidet sich die klimatische Situation sowohl hinsichtlich der Jahrestemperatur als auch des Niederschlages kaum. Im Vergleich zum "Freiburger Experiment" wurden somit auch die klimatischen Bedingungen den Verhältnissen in Borken/Nordvelen noch besser angenähert.

Die Substrateigenschaften beider Standorte sind ebenfalls ähnlich. In beiden Fällen handelt es sich um sandige bis feinkiesige silikatische Sedimente. Unterschiede bestehen lediglich im Vorrat an organischer Substanz, der in Borken/Nordvelen aufgrund der Plaggenwirtschaft deutlich erhöht ist. Für die Wärmeableitung ist dies höchstwahrscheinlich von untergeordneter Bedeutung, da die aufgrund erhöhten Humusgehalts möglicherweise reduzierte Wärmeleitfähigkeit durch eine entsprechend größere Wasserspeicherleistung des Bodens kompensiert wird.

Ein weiterer Unterschied besteht in der Verlegetiefe, die in Borken/Nordvelen größer sein wird. Das gesamte System wird dadurch noch träger, da das betroffene Bodenvolumen größer ist und für den Wärmeaustausch mit der Atmosphäre längere Strecken zurückgelegt werden müssen. Von Spitzenlasten ausgehende Wärmefronten werden die Bodenoberfläche später erreichen und die für eine Einstellung des thermischen Gleichgewichts erforderliche Zeit wird sich verlängern.

7.4 Auswirkungen auf die Bodenfeuchte

Im Oberboden unterlag die Bodenfeuchte sowohl auf den Versuchsparzellen als auch auf der Kontrolle dem typischen Jahresgang (Abb. 29). Dieser war geprägt von saisonalen bzw. witterungsbedingten Austrockungs- 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. Die Austrocknungsperiode im Zeitraum von August bis September zeigte, dass die Austrocknung auf den Versuchsparzellen bei ca. 14 Vol. % Wassergehalt zum Stillstand kam. Für die Versuchsparzellen sind die einzelnen Ganglinien weitgehend kongruent. Im Jahresgang sehr ähnlich, aber systematisch niedriger war dagegen die Bodenfeuchte im Bereich der Kontrolle. Hier betrug die Restfeuchte nur noch 9 Vol. %. Infolge mehrerer Niederschlagsereignisse wurden die Wasservorräte im Spätjahr auf allen Parzellen wieder bis auf 25 - 30 Vol. % aufgefüllt.

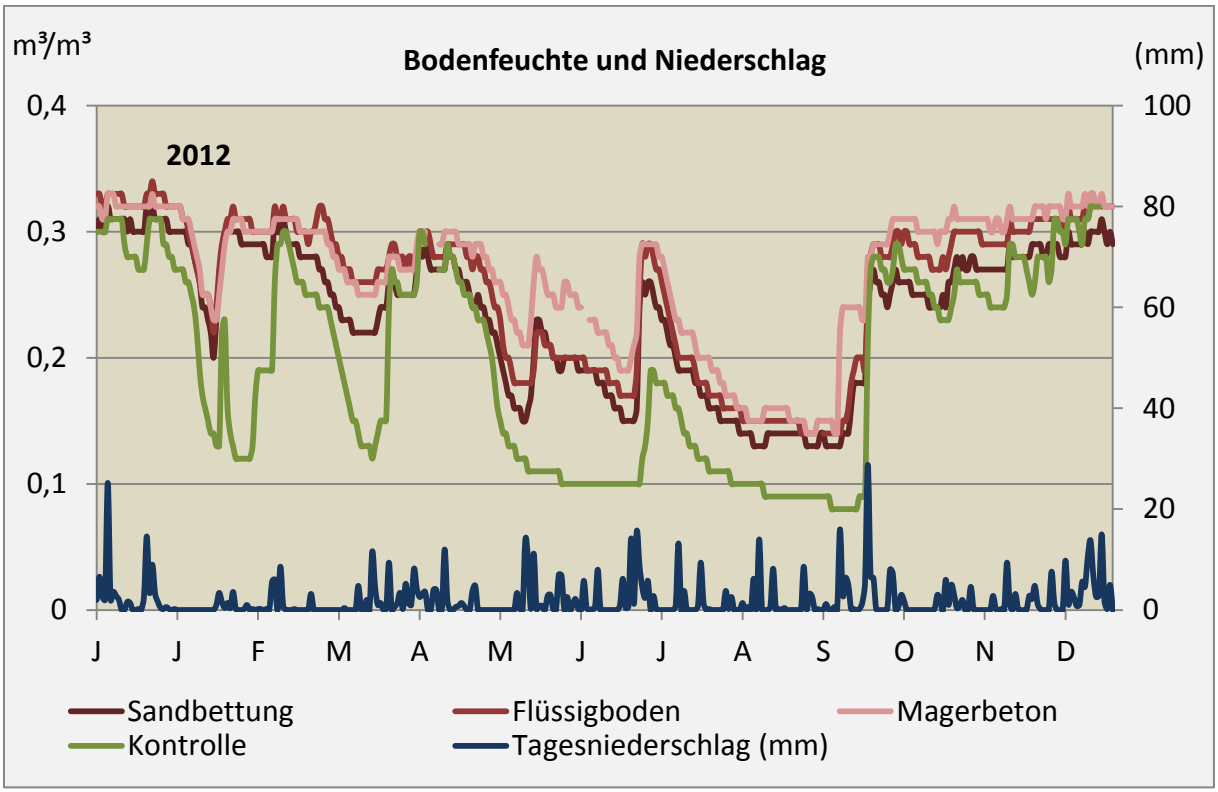

Abb. 29: Jahresgang der Feuchte im Oberboden der Versuchs- und Kontrollparzellen (20 cm Tiefe)

Interpretation

Wie schon im "Freiburger Experiment" festgestellt, zeigte sich klar, dass die thermischen Auswirkungen einer Kabelanlage in der ökologisch relevanten Bodenzone keine erkennbaren Veränderungen des natürlichen Feuchteganges bewirken werden. Dies gilt auch bei lang anhaltender technischer Maximallast.

Die stärkere Austrocknung im Bereich der Kontrolle ist wahrscheinlich auf ungünstigere Substrateigenschaften zurückzuführen. Die bei der Rückverfüllung des Kabelgrabens erfolgte Vermischung des Substrates und die Aufhebung der Schichtung haben vermutlich zu einer Verbesserung des Wasserhaltevermögens geführt.

Übertragung auf die Verhältnisse in Borken/Nordvelen

Hinsichtlich der Vergleichbarkeit der Substrate wird auf die Ausführungen in Abschn. 6.3.2 verwiesen. Im Unterboden der nicht vom Grundwasser beeinflussten Böden in Borken/Nordvelen treten an den Schichtgrenzen bisweilen Staunässeerscheinungen auf. Durch den Abtrag und die Wiederverfüllung kommt es zwangsläufig zu einer Vermischung und damit auch zu einer Homogenisierung des Materials. Die vorhandenen dichten Lagen werden beim Aushub aufgebrochen und neu strukturiert. Bei sachgerechter Rekultivierung wird dies zu günstigeren Bodeneigenschaften führen. Positiv davon beeinflußt wird dabei der pflanzenverfügbare Wasservorrat.

Wegen der im Vergleich zu Osterath größeren Verlegetiefe sind thermische Effekte auf den Bodenwasserhaushalt noch unwahrscheinlicher.

7.5 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 “Osterather Kabeltests“ wurden dazu drei Kulturversuche durchgeführt und erfolgreich abgeschlossen.

7.5.1 *Kulturversuch mit Kartoffeln*

Gepflanzt wurden zunächst Kartoffeln. Angelegt wurden drei Versuchsparzellen 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 Versuchsparzellen ohne erkennbare Unterschiede im Wuchs aufgelaufen. In beiden Fällen etablierte sich eine wüchsige Kultur mit normalen Erträgen. Zwischen den Versuchspflanzungen auf der Trasse und denen der Kontrolle ergaben sich auch zum Ende der Kulturperiode keine erkennbaren Unterschiede (Abb. 30, 31, 32).

Abbildung 30: Kultur nach dem Auflaufen der Pflanzen
Versuchs- (links) **und Kontrollfläche** (rechts)

Abbildung 31: Geschlossene Kultur am 24.6.2011.
Versuchsfläche (links) **Kontrollfläche** (rechts)

Abbildung 32: Kultur kurz vor der Reife am 12.7.2011.
Versuchsfläche (links) **Kontrollfläche** (rechts)

7.5.2 *Kulturversuch mit Körnermais*

Etwa zwei Wochen nach der Aussaat war der Mais auf den Versuchsparzellen aufgelaufen und ca. 2 bis 5 cm hoch (Abb. 33). Auf der Kontrollfläche war hingegen noch kein Austrieb erkennbar. Weitere 4 Wochen danach haben die Pflanzen auf den Versuchsparzellen bereits eine Höhe von 40 - 60 cm erreicht. Auf der Kontrolle waren sie tendenziell kleiner. Im August war die Kultur auf allen Parzellen in optimalem Zustand (Abb. 34). Der Blütenansatz war in vollem Gange. Anfang September setzte die Reife ein. Diese war auf den Versuchsflächen tendenziell weiter vorangeschritten. In der zweiten Septemberhälfte setzte dann eine 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 Reihen. Ende Oktober war der Mais flächendeckend gereift (Abb. 35). Die Kultur zeigte über die gesamte Vegetationsperiode sowohl auf der Versuchsfläche als auch auf der Kontrolle einen insgesamt normalen Verlauf ohne Auffälligkeiten. Es traten keine Wachstumsanomalien, Ernährungsstörungen oder biotische Schäden auf.

Abb. 33: Zustand der Versuchsflächen nach der Aussaat am 15.5.2012
(Versuchsparzelle: links; Kontrolle: rechts)

Abb. 34: Zustand der Maiskulturen am 20.8.2012
(Hintergrund: Kontrolle; Vordergrund: Parzelle “Magerbeton“

Abb. 35: Zustand der Maiskultur am 29.10.2012
Versuchs- (links) **und Kontrollfläche** (rechts)

7.5.3 *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 betrugen 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 10 Millimeter. Der Austrieb konzentrierte sich auf das Zentrum der Trasse. Auf der Kontrolle war der Austrieb bisher nicht erfolgt (Abb. 36). Zwei Wochen später war die Saat auch auf der Kontrolle aufgelaufen. Die Keimlinge waren signifikant kleiner als auf den Versuchsparzellen. Anfang Juni waren die Kulturen schließlich flächendeckend geschlossen und sehr vital (Abb. 37). Die Kontrollfläche lag jedoch im Höhenwachstum und im Entwicklungszustand insgesamt etwas zurück. Der

Abb. 36: Zustand der Kulturen am 4.12.2012
Versuchsfläche (links) **und Kontrolle** (rechts)

Abb. 37: Zustand der Kulturen am 3.6.2013
(Versuchsfläche (links) **und Kontrolle** (rechts))

Abb. 38: Übersicht Winterweizen unmittelbar vor der Ernte
(Vordergrund: Kontrolle; Hintergrund Versuchsparzellen)

Ährenansatz war auf den Versuchsparzellen deutlich weiter vorangeschritten. Die unmittelbar über der Trasse wachsende Kultur war höher, später auch in der Ährenentwicklung und dem Reifegrad weiter. Anfang August war der Weizen schließlich auf allen Parzellen reif (Abb. 38). Die ursprünglichen Unterschiede im Reifegrad hatten sich nivelliert. Die Feuchtegehalte der Weizenkörner waren auf allen Flächen unter 15 % gesunken.

7.5.4 *Erträge*

In Tabelle 3 sind die Ergebnisse der Versuche zusammengefasst. Bei allen 3 Kulturversuchen wurden insgesamt mittlere bis gute Erträge erzielt. Auf den Versuchsparzellen waren die Erträge stets höher als auf der Kontrolle. In keinem Fall traten ein über das normale Maß hinausgehender Schädlingsbefall oder sonstige phytopathologische Auffälligkeiten auf.

Tabelle 3: Erträge aus den Versuchen mit Kartoffeln und Mais [t/ha]

	Kontrolle	Kabeltrasse		
Bettungsmaterial	----	Sand	Flüssigboden	Magerbeton
Kartoffeln	26,0	30,1*		
Mais	9,0	9,4	9,6	10,2
Winterweizen	6,6	7,8	8,0	7,6

* kollektive Erfassung der Erträge, keine Separation nach Bettungsmaterialien

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 kommen würde. 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.

Die in der ökologisch relevanten Oberbodenzone zweifellos auftretenden thermischen Effekte bewirken je nach Saatzeitpunkt und Witterungsverhältnissen ein vorzeitiges Auflaufen und eine frühere Reife der Kulturen. Diese wird sich nach den derzeitigen Erkenntnissen im Rahmen von 10 bis 14 Tagen bewegen.

Seitens der Landwirtschaft wird befürchtet, dass durch die frühere Reife im Trassenbereich eine separate Ernte erforderlich wäre. Für die bisher untersuchten Kulturen hat sich diese Befürchtung nicht bestätigt. Alle Kulturen konnten zum gleichen Zeitpunkt geerntet werden. Nicht völlig auszuschließen ist dies jedoch bei Sonderkulturen mit Gemüse oder Feldfrüchten wie z.B. Erdbeeren. Ebenfalls denkbar ist eine Qualitätsminderung bei Silomais, wenn im Trassenbereich der optimale Reifegrad überschritten ist. Bei dieser Einschätzung ist jedoch zu berücksichtigen, dass die Bewertung auf der Grundlage extremer Betriebsbedingungen erfolgt ist. Es ist deshalb damit zu rechnen, dass sich in Borken/Nordvelen unter normalen Betriebsbedingungen andere, deutlich günstigere Verhältnisse ergeben werden.

8 Zusammenfassende Bewertung

8.1 Welche Auswirkungen auf den Boden ergeben sich bei Normalauslastung der Kabel?

Unter Normallast wird sich die Wärmeemission vorrangig in der Kabelbettung auswirken. Im Vergleich zum ungestörten Boden ist im Bereich der Bettung (1,60 - 2,15 m Tiefe) mit erheblichen Temperaturerhöhungen zu rechnen. Diese sind bodenökologisch von untergeordneter Relevanz. An der Bodenoberfläche (0-20 cm Bodentiefe) sind die Effekte sehr viel geringer. Sie konzentrieren sich zudem auf die Zone unmittelbar über dem zentralen Leiter eines Kabelstranges. Bei Dauerbetrieb unter Normallast, können die Temperaturen dort bis zu 3 K höher liegen. Zu 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.

8.2 Was bewirken temporäre Spitzenlasten?

Temporäre Spitzenlasten können z.B. durch Einspeisung großer Strommengen aus Windkraft- oder Solaranlagen auftreten, so daß die Anlage kurzfristig bei Auslegungslast betrieben wird. Die dafür kalkulierten Zeiträume dauern nach Einschätzung des Betreibers weniger als 10 Tage. Es ist deshalb davon auszugehen, daß die bei dauerhafter Auslegungslast erreichbaren Temperaturen von 50 °C deutlich unterschritten werden. Spitzenlasten in Höhe der Auslegungslast werden den Wärmehaushalt des ***Unterbodens*** temporär merklich beeinflussen. Betroffen davon ist primär der Bereich der Bettung. In der quellennahen Zone wird 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 die Wärmefront witterungsabhängig erst nach mehreren Wochen ankommen. Die Oberbodentemperaturen würden sich dann gegenüber dem Normalbetrieb um 1 bis 1,5 K erhöhen. Im Vergleich zur Kontrolle würden die Temperaturen bei sehr konservativer Einschätzung um maximal 3,8 K ansteigen.

8.3 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 in der Kabelbettung Wasser ansammeln sollte oder die Gräben Anschluss an das Grundwasser haben, werden die zu erwartenden bodenökologischen Effekte vernachlässigbar gering 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. Dennoch wird auch Stauwasser den Wärmefluß in entferntere Bodenzonen stark behindern und thermische Effekte vor allem an der Bodenoberfläche stark reduzieren. Für den Betrieb hilfreich ist dieses vor allem dann, wenn der Staukörper in der Nähe der Grubensohle auftritt und der Wasserstau die Bettung erreicht.

8.4 Welche Auswirkungen ergeben sich auf den Wärmeaustausch mit der Atmosphäre?

An der Bodenoberfläche wird der Wärmehaushalt maßgeblich vom Wärmeaustausch mit der Atmosphäre geprägt. Die dadurch verursachten Tagesschwankungen der Bodentemperatur sind zumindest im Sommer weit größer als die zu erwartende Erwärmung durch die Erdkabel. Anhand der Tagesmittelwerte zeigt sich jedoch meist eine signifikante Temperaturerhöhung, die einen Wärmefluß zur Bodenoberfläche hin indiziert. 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. Abhängig von der jahreszeitlichen Entwicklung der Lufttemperatur und der Sonneneinstrahlung beginnt sich der Boden im Frühjahr zu erwärmen. Es kommt dadurch regelmäßig zu einer Inversion der Temperaturgradienten im Boden. Die Temperaturen nehmen von da an nach obenhin zu. Dieser Zustand hält bis etwa September/Oktober an. Danach ergibt sich erneut eine Inversion der Gradienten. Die Temperaturen nehmen nun von unten nach oben hin ab. Die Inversion der Gradienten kann sich je nach klimatischer Situation zeitlich verschieben. Es ist davon auszugehen, daß sie in Hochlagen oder weiter nördlich gelegenen Regionen im Frühjahr später und im Spätjahr früher erfolgt. Die frühjährliche Inversion der Gradienten führt dazu, daß kein direkter Wärmefluß von der Wärmequelle im Unterboden zur Oberfläche hin möglich ist, weil ihm ein witterungsabhängiger Wärmestrom in den Boden entgegensteht. Die Wärme wird während dieser Zeit verstärkt seitlich oder in den Untergrund abfließen.
Vor der frühjährlichen Inversion der Temperaturgradienten treten im Oberboden die größten Temperaturdifferenzen auf. Dies ist auf den zur Oberfläche hin ungebremsten Wärmetransport zurückzuführen. Im Oberboden wird sich die Wärmeemission deshalb im Spätwinter am deutlichsten auswirken.

8.5 Wie weit reichen die lateralen Auswirkungen?

Die lateralen Auswirkungen sind nach Tiefenstufen verschieden. Ökologisch relevant sind primär die Auswirkungen im durchwurzelbaren Oberboden. Bei Normalauslastung der Kabel werden die seitlichen Auswirkungen einem Abstand von 2,5 Metern vom jeweils äußersten Leiter eines Systems nicht überschreiten. Dies gilt auch für Auslegungslast.
In größerer Bodentiefe kann der Einflußbereich über die 2,5 Metermarke hinausgehen. Auf dem Niveau der Kabel sind die Auswirkungen am größten. Sie können hier in einem Abstand von 2,5 m um bis zu 3 K ansteigen. Ökologisch sind diese Temperaturerhöhungen von geringer Relevanz.

8.6 Welche Auswirkungen ergeben sich für den Bodenwasserhaushalt?

Beim “Freiburger Experiment“ ergaben keine erkennbaren, thermisch bedingten Auswirkungen auf den Bodenwasserhaushalt. 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 die Erwärmung auf bis zu 75 °C zeigte keine erkennbare Wirkung. Eine Einschränkung diesbezüglich besteht lediglich für die unmittelbare Kontaktzone zwischen Sandbett und Kabeloberfläche, die mit der Messordnung des “Freiburger Experiments“ nicht erfasst werden konnte. Der “Kabeltest Osterath“ zeigte, dass es bei dauerhafter technischer Maximallast in der Bettung tatsächlich zu einer Aus-

trocknung im kabelnahen Bereich kommen kann. Betroffen war allerdings nur die aufgrund der Grobkörnigkeit ungeeignete Sandbettung. Diese Austrocknung ist ökologisch 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 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 Höchstspannungserdkabelanlage und der davon ausgehenden Wärmeemission eine ökologische relevante Veränderung des Bodenwasserhaushalts bewirkt werden würde.

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

Der unter Normallast und bei Auslegungslast an der Bodenoberfläche auftretende Temperaturanstieg reicht nicht aus, um eine Schneebedeckung oder auch das Auftreten von Bodenfrost zu verhindern. Effekte treten lediglich dann auf, wenn sich die Temperaturen nahe dem Gefrierpunkt bewegen oder die Tauphase einsetzt. Es kommt dann zu einem beschleunigten 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.

8.8 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 in Borken/Nordvelen eine grundsätzlich andere Situation ergeben wird.
Die vielfach geäußerten Befürchtungen, die von den Erdkabeln ausgehende Bodenerwärmung könnte zu substantiellen Ertragseinbußen oder gar zu einem Totalausfall landwirtschaftlicher Kulturen führen, sind durch die Experimente widerlegt. Es bestehen auch sonst keine Hinweise auf negative

Auswirkungen z.B. durch erhöhten Schädlingsbefall oder pathogene Organismen. Vielmehr könnten die Erträge aufgrund günstigerer Standortsbedingungen sogar geringfügig ansteigen.
Wahrscheinlich sind hingegen ein früheres Auflaufen und eine frühere Reife der Kulturen. Im Netzbetrieb dürfte es sich dabei um Zeiträume von maximal 10 Tagen handeln. Im Regelfall wird dies dennoch eine kollektive Ernte ermöglichen und keine Erschwernis der Bewirtschaftung mit sich bringen. Gewisse qualitative Veränderungen, wie beispielsweise eine verstärkte Verunkrautung sind hingegen nicht ausgeschlossen.

8.9 Welche weiteren ökologischen Konsequenzen sind zu erwarten?

Die ökologischen 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 ausgeschlossen werden. Davon betroffen wären allerdings primär Dauergrünland und mehrjährige landwirtschaftliche Kulturen. Die Temperaturerhöhung ist dem Jahresgang der Temperaturen "aufgesetzt". Es wird dadurch im Bereich der Kabelanlage grundsätzlich wärmer sein. Anders als bei kurzumtriebigen landwirtschaftlichen Kulturen könnte es bei Wiesennutzung zu kumulativen Effekten kommen, wodurch sich das Artenspektrum verändern könnte. Grundsätzlich kann die Wärmezufuhr zu einer Verlängerung der Vegetationszeit führen, was sich auf die Biomasseproduktion auch positiv auswirken könnte. Dies könnte vor allem bei Grünland eine gewisse Rolle spielen. Aus den bisherigen Erkenntnissen ist jedoch anzunehmen, daß diese thermisch bedingten Auswirkungen sehr gering sein werden. Die anfänglich geäußerte Befürchtung, die Wärmezufuhr könnte ein verfrühtes Austreiben der Gehölzflora und diese damit einer erhöhten Spätfrostgefahr aussetzen, ist eher unwahrscheinlich, da der Austrieb prioritär durch die Lufttemperatur und die Strahlung ausgelöst wird. Zudem ist eine tiefwurzelnde Gehölzflora im Bereich der Trassen ohnehin nicht erlaubt.
Anders als die Makroflora reagieren Mikroorganismen relativ empfindlich auf Temperaturänderungen in ihrer Umgebung. Bei ausreichendem Wasserangebot wird dies das Mikroorganismenwachstum in den oberflächennahen Bodenhorizonten zumindest zeitweise stimulieren. Es könnten sich dadurch entlang der Leitungen Zonen erhöhter mikrobieller Aktivität entwickeln. Diese könnte z.B. eine verstärkte Mineralisierung bewirken. Im Unterboden könnte es dagegen vor allem bei höheren Temperaturen zu einer Reduktion der Mikroorganismentätigkeit kommen. Die dazu am Institut für Bodenkunde und Waldernährungslehre durchgeführten Respirationsversuche zeigten jedoch, daß es bei den zu erwartenden Temperaturen nicht zu einer Teilsterilisierung kommen wird. Ebenso wenig werden die geringfügigen Temperaturerhöhungen im Oberboden eine relevante Stimulation der mikrobiellen Aktivität bewirken.
Bisher nicht untersucht sind mögliche Auswirkungen auf die Bodenfauna. Es ist bekannt, daß sich besonders die Makrofauna sehr stark an der Wärmeverteilung orientiert. Vor allem in den Wintermonaten könnte dies zu einem Anstieg der Populationen im Bereich der Trasse führen. Eine entsprechende Überprüfung durch faunistische Erhebungen ist im Trassenabschnitt Raesfeld im Rahmen des dort durchzuführenden ökologischen Monitorings vorgesehen.

9 Grundsätzliches zur Sicherheit der getroffenen Aussagen

Die getroffene Begutachtung stützt sich auf das "Freiburger Experiment", den "Osterather Kabeltest" und auf Modellrechnungen des Fachbereichs Energietechnik und -speicherung der Universität Duisburg. Es existieren bisher keine verwertbaren Messungen an Anlagen, die der geplanten Anlage in Borken/Nordvelen genau entsprechen. Das Vorgehen bei diesem Gutachten, sich auf Experimente

und Modellrechnungen zu stützen, ist deshalb die einzige Möglichkeit die zu erwartenden Auswirkungen verlässlich einzuschätzen. Die getroffenen Aussagen haben dadurch den Charakter von Prognosen, die grundsätzlich mit Unsicherheiten behaftet sind. Dazu ist jedoch anzumerken, daß vor allem mit dem über fast 5 Jahre durchgeführten **"Freiburger Experiment"** und dem **"Osterather Kabeltest"** eine solide Basis an ***gemessenen Daten*** geschaffen worden ist, die in sich konsistent ist und dadurch eine sehr sichere Einschätzung der zu erwartenden Auswirkungen ermöglicht. Die parallel dazu durchgeführten Modellrechnungen bilden ein weiteres, unabhängig davon erarbeitetes Fundament, das zu sehr ähnlichen Ergebnissen führt. Die Prognose erfolgte deshalb auf der Basis eines sehr soliden Kenntnisstandes.

10 Literatur

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

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

HARTGE, und R. HORN (1978)

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

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 (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 nach bestem Wissen und Gewissen angefertigt habe.
Schopfheim, den 6.5.2014

Prof. Dr. Peter Trüby
(vom Regierungspräsidium Freiburg Br. öffentlich bestellter und vereidigter Sachverständiger für Land-und Forstwirtschaftliche Bodenkunde)