

BMU-Studie
„Ökologische Auswirkungen
von 380-kV-Erdleitungen und
HGÜ-Erdleitungen“

(03MAP189 Laufzeit: 01.10.2009-31.12.2011)

Band 1

Zusammenfassung der wesentlichen
Ergebnisse

Auftraggeber:

**Bundesministerium für Umwelt,
Naturschutz und Reaktorsicher-
heit**

**Referat KI III 3
Stresemannstr. 128-130
10117 Berlin**

Auftragnehmer:

efzn

Energie-Forschungszentrum
Niedersachsen

Am Stollen 19A
38640 Goslar

Unterauftragnehmer:



OECOS GmbH
Bellmannstraße 36
22607 Hamburg

Auftraggeber:		
	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit	Referat KI III 3 Stresemannstr. 128-130 10117 Berlin
Auftragnehmer:		
 Energie-Forschungszentrum Niedersachsen	Energie-Forschungszentrum Niedersachsen (EFZN) <u>Projektleiter:</u> Prof. Dr.-Ing. Hans-Peter Beck <u>Projektkoordination:</u> Ass. jur. Wolfgang Dietze	Am Stollen 19A 38640 Goslar
Forschungsstellen:		
	Institut für Energieversorgung und Hochspannungstechnik Leibniz Universität Hannover <u>Bearbeiter:</u> Prof. Dr.-Ing. habil. Lutz Hofmann; Dipl.-Ing. M. Mohrmann; Dipl.-Ing. C. Rathke	Appelstraße 9a 30167 Hannover
	Institut für deutsches und internationales Berg- und Energierecht der Technischen Universität Clausthal <u>Bearbeiter:</u> Prof. Dr. jur. Hartmut Weyer; Ass.jur. Diana Schneider	Arnold-Sommerfeld-Straße 6 38678 Clausthal-Zellerfeld
	Lehrstuhl für Öffentliches Recht, insbesondere Verwaltungsrecht der Georg-August-Universität Göttingen <u>Bearbeiter:</u> Prof. Dr. jur. Thomas Mann	Platz der Göttinger Sieben 6, 37073 Göttingen
Unterauftragnehmer:		
	OECOS GmbH <u>Bearbeiter:</u> apl. Prof. Dr. Karsten Runge; ; Dipl. Geogr. Philipp Meister; Dipl. Geogr. Elena Rottgardt	Bellmannstraße 36 22607 Hamburg

Inhaltsverzeichnis

1. Hintergrund und Ziel der Studie	1
2. Methodisches Vorgehen	3
3. Kurzfassung der Ergebnisse	5
4. Fazit	17
5. Anhang	18

Legende: Gefährdung: 1 = von vollständiger Vernichtung bedroht, 2 = stark gefährdet; 3 = gefährdet. Regenerierbarkeit: N = nicht regenerierbar, K = kaum regenerierbar, B = bedingt regenerierbar, S = schwer regenerierbar. Tendenz: positiv = Bestandsentwicklung positiv, stabil = Bestand weitgehend stabil negativ = Bestandsentwicklung negativ ? = Entwicklungstendenz nicht abschätzbar. § 30 BNatSchG: § = gesetzlich geschütztes Biotop.

Trockenrasen und einige wenige spezifische Grünlandstandorte sind nur schwer regenerierbar und sind daher bei der Wahl einer Erdkabeltrasse nach Möglichkeit zu umgehen (vgl. Tabelle 8).

2.3.9 Vermeidungs- und Minderungsmaßnahmen

Der Eingriff in schutzwürdige Biotopie sollte möglichst gering gehalten werden. Vermeidungs- und Minderungsmaßnahmen können am effektivsten bei der Trassierung auf einem frühzeitigen Planungsstadium einsetzen, damit ökologisch wertvolle Biotopie beim Bau gar nicht erst tangiert werden (ERM 2010). Durch eine wohlüberlegte Trassenführung lassen sich eine Vielzahl von Beeinträchtigungen vermeiden. Falls eine Verlegung der Trasse in schutzwürdigen Bereichen auch nach sorgfältiger Prüfung unvermeidlich ist, besteht die Möglichkeit, diese Biotopotypen zu unterdückern - dies ist allerdings mit hohen Kosten verbunden (vgl. Abschn. 2.4.5).

Vegetationsschutzmaßnahmen sind gemäß DIN 18920 durchzuführen. So ist z.B. stets zu prüfen, ob flach wurzelnde Biotopielemente neben dem Kabelgraben zwischengelagert werden können, um sie nach Beendigung der Bauarbeiten erneut am Standort wiederherzustellen. Gehölzeinschlag kann durch die Nutzung größerer Gehölzlücken minimiert werden. Ein schmal gehaltener Arbeitsstreifen kann Beeinträchtigungen verringern, ggf. sogar vollständig vermeiden (IBNI et al. 2008, S.162). Durch saisonal angepasste Bauzeitenregelungen und die Verkürzung der Inanspruchnahme wertvoller Biotopie auf ein absolutes Minimum lassen sich auch im Fall eines unvermeidlichen Eingriffs noch Beeinträchtigungen verringern, bspw. im Bereich von Feuchtlebensräumen und Gewässern durch die Reduzierung notwendiger Wasserhaltungsmaßnahmen.

2.4 Auswirkungen von Erdkabeltrassen auf das Schutzgut Boden

2.4.1 Übersicht

Die Verlegung von Erdkabeln im Untergrund führt v.a. in der Bauphase zu Beeinträchtigungen der Bodenfunktionen auf dem Wege der Bodenverdichtung, der Störung des Bodengefüges und des Bodenwasserhaushaltes, sowie der Einbringung von Fremdstoffen. Die Anlage und der Betrieb von Höchstspannungskabeln wirkt sich

ggf. auf dem Wege der Bodenversiegelung sowie der Erwärmung und potenzieller Austrocknung nachteilig auf den Boden aus.

Boden ist stets Teil eines Ökosystems und bildet zusammen mit der bodennahen Luftschicht den Lebensraum für die Lebensgemeinschaft aus Pflanzen, Tieren und Mikroorganismen (SCHEFFER u. SCHACHTSCHABEL 2010, S. 3). Dabei ist zu beachten, dass Bodeneigenschaften oft auf engstem Raum variieren (vgl. RICHER/MÜHLETHALER 2002, S. 12). Neben seinen natürlichen Funktionen erfüllt der Boden Funktionen als Archiv der Natur- und Kulturgeschichte und für Bodennutzungen (BBodSchG 1998, § 2). Einflussfaktoren der Bauphase wie Abgrabung, Versiegelung, Verdichtung und Bodenumlagerung als auch Einflussfaktoren der Betriebsphase wie Erwärmung und Austrocknung wirken sich auf die Bodenfunktionen je nach Eingriffsintensität und Standorteigenschaft temporär oder dauerhaft aus (vgl. BOSCH & PARTNER u. WOLF 2000, S. 108). Im Einzelnen sind v.a. Beeinträchtigungen von Bodenaufbau, Bodenwasserhaushalt, Lebensraumfunktion und Archivfunktion möglich.

Das Risiko irreversibler Bodenschäden durch Bau und Betrieb von Erdkabeln kann durch eine bodenkundliche Begleitung erheblich gesenkt werden (vgl. BLUM 2007, S. 140; RICHER/MÜHLTHALER 2002, S. 13).

2.4.2 Schutzwürdige Böden

Der Bodenschutz ist in Deutschland gesetzlich im Rahmen des Bundes-Bodenschutzgesetzes (BBodSchG) verankert und ist in räumlichen Planungsprozessen zu berücksichtigen. Aus Sicht der Bodenvorsorge gelten Böden mit folgenden Eigenschaften als besonders schutzwürdig (vgl. LBEG 2008, S. 8):

- besondere Standorteigenschaften,
- hohe natürliche Bodenfruchtbarkeit,
- hohe kulturgeschichtliche Bedeutung,
- hohe naturgeschichtliche Bedeutung,
- Seltenheit.

"Böden mit besonderen Standorteigenschaften" sind v.a. extrem nasse Böden wie z.B. Hoch- und Niedermoore sowie sehr nährstoffarme Böden.

"Hohe natürliche Bodenfruchtbarkeit" ist insbesondere für die Agrarwirtschaft von erheblicher Bedeutung. Parabraunerde oder auch Schwarzerde gelten z.B. als sehr fruchtbar und sind als besonders schutzwürdig einzustufen (vgl. LBEG 2008, S.11).

"Kulturhistorisch bedeutsame Böden" sind Zeugnisse vormaliger Bewirtschaftungsformen. Solche Böden sind bspw. durch heute nicht mehr gebräuchliche ackerbauliche Maßnahmen entstanden, die charakteristische Spuren in den Bodenprofilen hinterlassen haben. Beispiel eines kulturhistorisch bedeutsamen Bodens ist der Plaggenesch (vgl. ERM 2008, 6-4.14).

"Böden mit hoher naturgeschichtlicher Bedeutung" liefern Informationen über vergangene Klima- und Vegetationsverhältnisse wie z.B. die geowissenschaftlich bedeutenden Paläoböden. Hierzu gehören auch Geotope in Form von markanten Bodenformationen, Gesteinsaufschlüssen, Mineralienfundstellen, Fossilien und Höhlen.

"Seltene Böden" gelten als besonders schutzwürdig und sind häufig durch eine geringe flächenhafte Verbreitung gekennzeichnet. Hierzu gehören v.a. naturnahe Moore und Gleye mit starker Vernässung (vgl. LBEG 2008, S. 24).

Informationsgrundlagen über schutzwürdige Böden sind über die entsprechenden Landesbehörden verfügbar, bspw. über das Niedersächsische Bodeninformationssystem (vgl. LBEG 2008).

2.4.3 Bodenverdichtung

Während der Bauphase wird der Boden vielfältig durch schwere Baufahrzeuge belastet und ist damit im Hinblick auf eine Bodenverdichtung gefährdet. Bodenverdichtung tritt ein, wenn „die Auflast die Eigenstabilität der Böden – gemessen als Scherwiderstand – übertrifft“ (BOSCH&PARTNER U. WOLF 2000, S. 110). Bodenverdichtung kennzeichnet sich durch eine Abnahme des Porenanteils (Vol %) mit flüssigen und gasförmigen Bestandteilen und eine Zunahme der festen Volumenteile im Boden. Dies hat erhebliche Folgen für die Bodenfunktion als Lebensraum für Pflanzen und Tiere (vgl. SCHEFFER/SCHACHTSCHABEL 2010 S. 516).

Bei der Verlegung eines Erdkabels muss die gesamte Kabeltrasse für den Abtransport von Bodenmaterial und den Antransport von Baumaterial, insbesondere auch Bettungsmaterial zugänglich sein (vgl. Berichtsteil Technik, Teil I, Abschn. 1). Ein Zugang für Schwertransporter ist mindestens im Abstand der verwendeten Kabellängen erforderlich (vgl. GEO et al. 2009, S. 36). Auch bei Dükerungen von mehr als 300 m Länge kommen größere Bohranlagen auf einer Fläche von rd. 1.000 m² auf der Seite des Bohrgeräts und rd. 300 m² auf der Zielseite der Bohrungen zum Einsatz. Für ihren Transport werden Schwerlaster und demzufolge auch spezielle Baustraßen benötigt (vgl. GEO et al. 2009, S. 46). Für die Intensität der Verdichtung sind als Fahrzeugparameter Gesamtmasse, Radlast, Reifeninnendruck, Überrollhäufigkeit und Kontaktfläche entscheidend (BOSCH et al. 2000, S. 110). Die Höchstspannungskabel werden auf Spezialspulen mit Tiefladern zu der Kabeltrasse transportiert, wobei das Gewicht einer Spule bei ca. 40 t liegt (vgl. PAUL 2007, S. 12, vgl. Berichtsteil Technik, Teil I, Abschn. 1.5.3).

Wenn das Baugelände ohne schützende Radunterlage befahren wird, kann es zu Verdichtungen bis in tiefere Bodenschichten kommen (vgl. GEO et al. 2009,

S. 87). Durch Geräte >40 t hervorgerufene Strukturschäden und Verdichtungen im Unterboden (bis 1,7 m Tiefe gemessen) sind BLUM (2007, S. 136) zufolge irreversibel. Feuchte und nasse Böden können schon bei einmaligem Überfahren mit schweren Baumaschinen geschädigt werden. In diesem Zustand wird das Hohlraumvolumen im Unterboden schon durch geringen Druck reduziert. Eine gute bis sehr gute Befahrbarkeit und gleichzeitig geringe Gefährdung ist unabhängig vom Tongehalt des Bodens bei einer Feuchtestufe 2 gegeben. Bei einem Tongehalt < 45 und einer Feuchtestufe 4 ist der Boden jedoch nicht nur schlecht befahrbar, sondern auch hoch gefährdet (SPONAGEL 2005). Schluffreiche und feinsandige Böden mit geringem Tongehalt reagieren im nassen Zustand aufgrund ihrer geringen Gefügestabilität mit Verschlammung. Böden mit hohem Tongehalt sind im feuchten Zustand aufgrund der teigigen Konsistenz der Tonanteile besonders verdichtungsempfindlich. Auch die Empfindlichkeit von Moorböden ist gegenüber Verdichtung extrem hoch (AG Boden 1994). Besonders schutzwürdige Böden und deren Empfindlichkeit gegenüber Verdichtung sind in Tabelle 9 aufgelistet.

Tabelle 9: Verdichtungsempfindliche schutzwürdige Böden (Nach LBEG 2008 u. BUNDESVERBAND BODEN 2003)

SCHUTZWÜRDIGKEIT	VERDICHTUNGSEMPFINDLICHE BÖDEN
Böden mit besonderen Standorteigenschaften	Extrem nasse Böden (z.B. Hoch- und Niedermoore, Anmoorböden, Gleye, Auenböden mit natürlichem Wasserhaushalt oder nur geringfügig abgesenkten Wasserständen)
	Salzböden des Binnenlandes
	Sehr nährstoffarme Böden
Böden mit hoher natürlicher Bodenfruchtbarkeit	Plaggenesche in der Geest Parabraunerden
Böden mit hoher kulturgeschichtlicher Bedeutung	Plaggenesche mit charakteristischer Ausbildung
	Wölbäcker und Terrassenäcker mit charakteristischer Ausbildung
	Wurten
	Heidepodsole mit charakteristischer Ausbildung und Vegetation
Böden mit hoher naturgeschichtlicher Bedeutung	Kultivierte Moore (z.B. Fehnkultur, Sanddeckkultur; im Einzelfall prüfen)
	Repräsentative Böden (Boden-Dauerbeobachtungsflächen als Vertreter repräsentativer Böden)
	Paläoböden
	Stauwasserböden (Pseudogley unter Wald oder in NSG und/oder starke Vernäsung, als Extremstandort; Stagnogley)
	Terrestrische anthropogene Böden (Kolluvien unter Wald u. in NSG; Plaggenesch als schützenswert einzustufen; Hortisol und Rigisol unter Wald, Biotop u. in NSG; Tiefumbruchboden unter Wald u. in NSG)
	Auenböden (bei naturnahen Verhältnissen und unter Wald, Biotop, u. in NSG)
	Gleye (naturnahe Vegetationsverhältnisse unter Wald, Biotop u. in NSG)
	Marschen (Organomarsch, Moormarsch, Organomarsch über fossilem Podsol)
	Natürliche Moore
Kultivierte Moore (als Beispiel kulturgeschichtlicher bedeutsamer Böden, unter Wald u. in NSG, Art der Kultivierung muss bekannt sein z.B. Fehnkultur, Sandmischkultur)	

Bodenverdichtung schädigt primär die Regler- und Speicherfunktion der Böden für den Wasserhaushalt und führt zu Staunässe oder mangelnder Durchlüftung. Dies resultiert in verstärkter Aktivität von anaeroben Bakterien und in einem lebensungünstig veränderten Stoffhaushalt mit Auswirkungen auf das Grundwasser und die Atmosphäre (vgl. GEO et al. 2009, S. 87/93). Sekundär schädigt Bodenverdichtung das Pflanzenwachstum, wobei speziell die Durchwurzelbarkeit des Bodens sinkt, gefolgt von einem Rückgang von anfallender Pflanzen- und Wurzelstreu, welche die Lebensgrundlage für die meisten Bodenlebewesen bildet und die Basis des Nährstoffkreislaufs auf dem Boden darstellt. Daraus resultiert eine Verschiebung des Artenspektrums (vgl. BOSCH et. al. 2000, S. 112).

Aus Erfahrungen bei mechanischen Bodeneingriffen für Leitungstrassen in Dänemark schließen GEO et al. (2009, S. 93), dass es bei diesen Arbeiten nicht zwangsläufig zu Bodenverdichtungen und entsprechenden landwirtschaftlichen Nutzungseinschränkungen kommen muss. Bodenverdichtung kann im Falle einer Bündelung der benötigten Fahrstraßen bzw. Kabeltrassen mit bereits vorhandenen Verkehrswegen leicht vermieden werden (vgl. ML 2008, S. 40), doch führt dies ggf. zu kostenwirksamen Umwegen (vgl. BRAKELMANN 2004, S. 46). Die Reduzierung der besonders schwerlastigen Transporte auf die Kabeleinzugspunkte und die flexible Anlage mobiler Baustraßen sind weitere Maßnahmen, die einer Bodenverdichtung entgegenwirken (vgl. BRAKELMANN 2009). Aufgrund der besonderen Verdichtungsgefährdung nasser Böden sind an empfindlichen Standorten in Schlechtwetterphasen ggf. Bauverzögerungen nicht auszuschließen.

2.4.4 Störung des Bodengefüges durch Aushub, Zwischenlagerung und Wiedereinbau

Bei der Realisierung der Kabeltrasse kommt es zu umfangreichen Erdbewegungen. Dabei müssen die Bodenhorizonte während des Bodenaushubs sorgfältig getrennt gelagert werden, um sie anschließend in ihrer natürlichen Schichtung wieder einzubauen. Eine Rekultivierung ist sonst nicht mehr möglich (RICHER U. MÜHLETHALER 2002, S. 14). Zu Beginn der Bauphase wird der Oberboden in der gesamten Breite des Baufeldes abgetragen und neben dem Kabelgraben nach Horizonten getrennt gelagert (vgl. GEO et al. 2009, S. 40). FORWIND (2005, S. 24) zufolge ergibt sich für ein Kabelsystem ein Bodenaushub von etwa $4,5 \text{ m}^3/\text{m}$, wobei der Bedarf an Bettungsmaterial rund $1,5 \text{ m}^3/\text{m}$ beträgt. Im Berichtsteil Technik, Teil I Abschn. 1.4.5.2, wird bei 4 Systemen mit einem Aushub von etwa $18 \text{ m}^3/\text{m}$ gerechnet. Bei der abschließenden Verfüllung des Kabelgrabens wird das ursprüngliche Bodenmaterial zum größten Teil wiederverwendet, wobei Ober- und Unterboden nach Horizonten getrennt eingebaut werden.

Überschüssiges Bodenmaterial wird nach Beendigung der Bauphase abgefahren. Durch umgelagertes Bodenmaterial und die daran gebundenen Stoffe kann es in benachbarten Ökosystemen zu sogenannten *Off-Site-Schäden*, bspw. durch Gewässerbelastungen kommen (vgl. BMU 2002, S. 27). Speziell bei grundwassernahen Böden wie etwa Niedermooren führen Umlagerung und Bodenaustausch zu stark negativen Veränderungen der Bodenstruktur (vgl. ML 2008, S. 40).

Auch die Wiederverwendung desselben Bodenmaterials bei der Verfüllung der Baugrube stellt das gewachsene Bodenprofil nicht sofort wieder her. Boden kann nur in langen Zeiträumen zu seinem natürlichen Zustand regenerieren. RICHER und MÜHLTHALER (2002, S. 15) empfehlen in den ersten zwei Jahren nur extensive Grünlandwirtschaft und frühestens im dritten Jahr nach der Rekultivierung wieder Ackerbau. Zu einer chemischen Veränderung der Zusammensetzung des Bodenmaterials kommt es GEO et al. (2009, S. 89) zufolge nicht, da Ober- und Unterboden im normalen Bauablauf getrennt voneinander wieder verwendet werden.

2.4.5 Auswirkungen auf den Bodenwasserhaushalt

Grundsätzlich sind bei der Planung und Realisierung von Wasserhaltungsmaßnahmen bzw. Grundwasserabsenkungen die Bestimmungen des Wasserhaushaltsgesetzes und des jeweiligen Landeswassergesetzes zu beachten. Sowohl Böden mit hoch anstehendem Grundwasserstand wie z.B. Niedermoore, als auch Böden mit gespannten Grundwasserleitern können bei der Verlegung eines Erdkabels temporär oder dauerhaft geschädigt werden (vgl. u.a. GEO et al. 2009, S. 41 u. 90 ff.).

Bei hoch anstehendem Grundwasser wird während der Bauarbeiten Wasserhaltung betrieben. Die Dauer der Wasserhaltung sollte so kurz wie möglich bemessen sein, um den natürlichen Zustand des Bodens in der Umgebung der Kabeltrasse nicht nachhaltig zu verändern.

Werden durch Kabelgräben durchgängige wasserstauende Bodenhorizonte oder gespannte Grundwasserleiter durchstoßen, kann es bei anschließend unzureichendem Verschluss zu einer dauerhaften Drainagewirkung kommen – stau-nasse Böden könnten bspw. in die Tiefe entwässert werden. Mineralisierung und Sackung bei Moorböden sowie Versauerung und Maiboltbildung in Marschböden sind die Folge (vgl. GFN et al. 2004, S. 11-2; GEO et al. 2009, S. 92, ML 2008, S. 16). Besonders schutzwürdige Böden und deren Empfindlichkeit gegenüber Entwässerung sind in Tabelle 10 aufgelistet.

Eine weitere Form unerwünschter Drainagewirkung wird durch ein Längsgefälle im Boden hervorgerufen. Sollte Wasser durch den Kabelgraben in Geländesenken

gelangen, kommt es zu Vernässungserscheinungen, die im Allgemeinen jedoch nicht dauerhaft sind (vgl. GEO et al. 2009, S. 92).

Tabelle 10: Entwässerungsempfindliche schutzwürdige Böden (nach LBEG 2008 u. BUNDESVERBAND BODEN 2003)

SCHUTZWÜRDIGKEIT	ENTWÄSSERUNGSEMPFINDLICHE BÖDEN
Böden mit besonderen Standorteigenschaften	Extrem nasse Böden (z.B. Hoch- und Niedermoore, Anmoorböden, Gleye, Auenböden mit natürlichem Wasserhaushalt oder nur geringfügig abgesenkten Wasserständen)
Seltene Böden	Stauwasserböden (Pseudogley unter Wald oder in NSG und/oder starke Vernässung, als Extremstandort; Stagnogley)
	Auenböden (bei naturnahen Verhältnissen und unter Wald, Biotop, u. in NSG)
	Gleye (naturnahe Vegetationsverhältnisse unter Wald, Biotop u. in NSG)
	Marschen (Organomarsch, Moormarsch, Organomarsch über fossilem Podsol)
	Natürliche Moore
	Kultivierte Moore (als Beispiel kulturgeschichtlicher, bedeutsamer Böden, unter Wald u. in NSG, Art der Kultivierung muss bekannt sein, z.B. Fehnkultur, Sandmischkultur)

Auswirkungen des Betriebs von Höchstspannungskabeln auf den Bodenwasserhaushalt sind grundsätzlich auf dem Wege einer Erwärmung und sukzessiven Austrocknung des Bodens denkbar. Nach BRAKELMANN (mdl. 2011) beschränken sich entsprechende Vorgänge allerdings auf die direkte Kabelumgebung. In den ersten Wochen bis Monaten einer ungebettet verlegten Kabelstrecke verliert der Boden einige cm um ein ungebettet verlegtes Kabel herum seine Kapillarität und hält danach dauerhaft einen Wärmeleitwert von 0,5 W/mK. Der Einfluss eines Hochspannungskabels auf den Bodenwasserhaushalt eines Bodens mit Wärmeleitwert 1 W/mK wurde in einem dreijährigen Freilandversuch von TRÜBY u. UTHNER (2011) untersucht. Im Ergebnis konnte kein nennenswerter Einfluss auf den Bodenwasserhaushalt festgestellt werden.

2.4.6 Einbringung von Fremdstoffen

Während der Bauphase werden im Allgemeinen Magerbeton und Kabelsand als Bettungsmaterialien, in seltenen Ausnahmen auch vorgefertigte Tunnelkörper in den Boden eingebracht (vgl. Berichtsteil Technik, Teil I, Abschn. 1.4.5.3). Das Material reduziert die Masse des natürlich gewachsenen Bodens und den damit zusammenhängenden Bodenfunktionen. Die Folge ist bspw. ein geringer Verlust an Wurzelraum für Pflanzen. Auch das bei freier Verlegung notwendige Freihalten der Trasse von tief wurzelnden Sträuchern und Pflanzen während der Betriebsphase wirkt sich qualitativ auf Boden und Bodenfunktionen aus (vgl. PAUL 2007, S. 13; FORWIND 2005, S. 29). Nur bei nicht fachgerechter Durchführung von Bau- und Wartungsarbeiten können Schmier- und Treibstoffe in den Boden eindringen (vgl. ML 2008, S. 41). Insbesondere baubedingt ist eine unbeabsichtigte Beein-

trächtigung des Grundwassers durch Schadstoffeinträge, z.B. im Falle eines Maschinenschadens mit Austritt von Treib- oder Schmierstoffen, nicht vollständig auszuschließen (IBNI 2008, S. 78).

2.4.7 Versiegelung aufgrund von Nebenanlagen

Mit dem Bau von Nebenanlagen wie Muffenbauwerken, Cross-bonding-Kästen, Kühlungs-, Steuerungs- und Kabelübergangsanlagen (KÜA) kommt es auch bei der Anlage von Höchstspannungstrassen zu Flächenversiegelungen. Versiegelte Böden sind überbaute bzw. überdeckte Böden, die zuvor unterschiedlich stark abgetragen oder verdichtet worden sind (SCHEFFER/SCHACHTSCHABEL 2010, S. 370). Grundsätzlich können Bodenversiegelungen insofern als dauerhafte Schädigung betrachtet werden. Der Anteil von Bodenversiegelungen ist bei der Anlage von Höchstspannungskabeltrassen jedoch gering.

Eine dauerhafte Anlage von trassenbegleitenden Straßen und Wegen ist BRAKELMANN (2009) zufolge nicht erforderlich, da im Reparaturfall eine Erreichbarkeit stets mit flexiblen Baustraßen hergestellt werden kann.

2.4.8 Bodenerwärmung im Betrieb

Während des Betriebs erwärmt sich ein Höchstspannungskabel und gibt diese Wärme anschließend an das Erdreich ab (vgl. Berichtsteil Technik, Teil II). Die Erwärmung an der Leiteroberfläche ist abhängig von einer Reihe von Faktoren, u.a.:

- der Legetiefe,
- der Kabelisolierung,
- der Bettung des Kabels,
- der Anordnung der Kabel,
- dem Kabelabstand untereinander,
- der Wärmeleitfähigkeit des Erdreichs,
- ergänzender Vermeidungs- und Verminderungsmaßnahmen
- sowie vor allem der tatsächlichen Kabelauslastung (FORWIND 2005, S. 18).

Da eine ins Erdreich abfließende Verlustwärme stets auch einen wirtschaftlichen Verlust darstellt, ist es sowohl im ökologischen wie im ökonomischen Interesse, die Wärmeentwicklung im Kabel und seiner Umgebung gering zu halten. Die Kabelauslegung wird sich u.a. auch daran orientieren, einen dauerhaften wirtschaftlichen Verlust durch unnötige Abwärme auszuschließen. Aufgrund der üblichen n-1 Auslegung werden Erdkabel im Normalbetrieb lediglich mit einem Teil des Nennstroms ausgelastet, so dass die Temperaturerhöhung in 30 cm Tiefe BRAKELMANN (2010) zufolge 2-3 K nicht überschreitet. Der Richtwert von 2-3 K in 30 cm Tiefe als maximale Erwärmung war für Offshore-Windparks anschließende

Seekabel entwickelt worden, die insbesondere im Wattenmeer keine Beeinträchtigungen für die Meeresfauna entfalten sollten.

BRAKELMANN (2004, S. 46) zufolge wird bei den bisher verlegten Hochspannungskabeln die direkte Umgebung eines Kabels im Normalbetrieb bis zu einem Abstand von ca. 30 bis 50 cm nennenswert erwärmt, wobei die Erwärmung des Bodens mit zunehmendem Abstand vom Kabel abnimmt und spätestens ab einer Entfernung von ± 3 m vom Kabelgraben aus nicht mehr messbar ist. Über ein Glasfaserkabel, welches BRAKELMANN (2010) zufolge bei Höchstspannungskabeln heute standardmäßig eingearbeitet wird, kann das Maß der Verlustwärme mit einem intelligenten Monitoring überwacht werden (vgl. auch Berichtsteil Technik, Teil II).

Die Bodenbeschaffenheit bzw. der Bodentyp spielt bei den Auswirkungen der Verlustwärme eine zentrale Rolle. So transportieren trockenere Böden die Wärme schlechter als feuchte Böden, wodurch es bei trockenen Böden zu einer Erhöhung des Temperaturgradienten und dementsprechend auch zu einem Anstieg der Kabeltemperatur kommt (vgl. GEO et al. 2009, S. 97). Gute kapillare Eigenschaften eines Bodens begünstigen die Wasserhaltefähigkeit. So liegt laut Berichtsteil Technik, Teil II, Abschn. 3.3.3 die Grenzisotheime von Lehm bspw. bei 50° , die von Sand jedoch nur bei 30° . Ein ohne Bettungsmaterial verlegtes Kabel trocknet einen Normalboden, für den üblicherweise ein Wärmeleitwert von 1 W/mK angesetzt wird, innerhalb der ersten Wochen bis Monate in der direkten Kabelumgebung dauerhaft aus, so dass dieser Boden seine Kapillarität verliert und danach einen Wärmeleitwert von $0,5 \text{ W/mK}$ auf Dauer hält (BRAKELMANN mdl. 2011). Mit Hilfe der Bemessung des Magerbeton-Bettungsmaterials kann die Wärmeableitung standortbezogen in großen Spannen optimiert werden.

Mit Blick auf die durch krautige Vegetation durchwurzelt oberste Bodenschicht sind mögliche Temperaturveränderungen insbesondere in den oberen 50 cm unter EOK beurteilungsrelevant. Im groben Schnitt der Bodentypen und im langjährigen Mittel schwankt die natürliche Temperatur in 50 cm Tiefe in Deutschland (Potsdam) zwischen 0° C und 19° C , wobei sie den Monatsmittelwerten träge folgt. Die Tagesamplitude schwankt meist nur um 2 bis 3 K.

JARASS et. al. (1996, S. 20) zufolge kann die Bodenerwärmung, ausgelöst durch den Betrieb von Erdkabeln, als Umweltfaktor vernachlässigt werden, weil sie um mehr als eine Größenordnung unter dem Effekt der natürlichen Globalstrahlung liege. Nur wenn das Kabel über eine längere Zeit unter Höchstlast genutzt werde, können Erwärmung und auch Austrocknung des Bodens GEO et al. (2009, S. 96 u. 104) zufolge kleinräumig bzw. vorübergehend graduell zu Veränderungen führen. Diese Quellen beziehen sich allerdings v.a. auf die bislang üblichen Erdverkabelungen im Nieder- bis Mittelspannungsbereich. Für die bisher wenig erprobten Erdkabel auf der Höchstspannungsebene wird es maßgeblich von deren techni-

scher Auslegung abhängen, ob es zu nennenswerten Bodenveränderungen kommen kann. U_{THE}R et al. (2009) betonen zu Recht, dass mit dem Boden ein komplexes System physikalischer Parameter betroffen ist, dessen standörtlich unterschiedliche Reaktionen schwer vorher zu bestimmen sind (U_{THE}R et al. 2009, S. 6).

Eine moderate Temperaturerhöhung im Boden beschleunigt im Allgemeinen die Aktivität mikrobieller Bodenorganismen und damit insbesondere Zersetzungs Vorgänge. Eine Temperaturerhöhung um 10° aber steigert die biochemischen Prozesse im Boden bereits um das 2-3fache. Solche Temperaturverschiebungen könnten in Abhängigkeit der standörtlichen Bodenverhältnisse nicht mehr zu puffern sein und würden ggf. die Bodeneigenschaften dauerhaft verändern. In Ermangelung wissenschaftlich fundierter Richtwerte für die maximal tragbare Erwärmung in terrestrischen Böden gehen wir im Folgenden von einem Daumenwert von maximal 5 K in 50 cm unter EOK aus. Dieser Wert entspricht in etwa der doppelten Tagesamplitude in dieser Bodentiefe und berücksichtigt somit Pufferkapazitäten.

Maßgeblich für das Risiko des Auftretens von Situationen mit einer starken Bodenerwärmung ist die technische Auslegung des jeweiligen Höchstspannungskabels. In der Planung empfiehlt sich, insbesondere bei einem Bestand schlecht wärmeableitender Böden, frühzeitig auch seltene Ausnahmesituationen mit einer über eine lange Zeit andauernden, deutlich erhöhten Wärmeemission zu berücksichtigen. Es ist für die Ermittlung der möglichen Umweltkonsequenzen wesentlich zu wissen, wie häufig höhere Wärmeemissionen an den jeweiligen Hot Spots mit hohen thermischen Widerständen auftreten können, wie zuverlässig Vorsorge- und Vermeidungsmaßnahmen greifen sowie in welcher Dauer und in welcher Ausdehnung mit Temperaturveränderungen gerechnet werden kann.

2.4.9 Vermeidungs- und Minderungsmaßnahmen

2.4.9.1 Bodenvermischung

Einfach aufgebaute Bodentypen, bei denen nur ein oder zwei Bodenhorizonte berührt werden, lassen sich durch eine saubere Trennung von Ober- und Unterboden während der Entnahme, der Lagerung und dem Wiedereinbau weitgehend mit der ursprünglichen Schichtung wieder herstellen (vgl. DIN 18915 - Vegetationstechnik im Landschaftsbau - Bodenarbeiten). Allerdings ist in jedem Fall das gewachsene Profil gestört. Komplizierter aufgebaute Böden brauchen lange Zeiträume der Bodenentwicklung, um zu regenerieren - in seltenen Fällen werden Bodenfunktionen irreversibel geschädigt. Bei gegenüber Strukturschäden besonders empfindlichen Böden sollte ein Oberbodenabtrag nach Möglichkeit - z.B. durch Dükerung - vermieden werden, da die Grasnabe bzw. die Humusaufgabe eine stabilisierende Wirkung hat (IBNI et al. 2008).

2.4.9.2 Bodenverdichtung

Bodenverdichtung lässt sich durch diverse technische Vorkehrungen hinsichtlich der Bau- und Transportfahrzeuge vermeiden. Die Radlast der Bau- und Transportfahrzeuge kann durch Mehrachsen und bodenschonende Fahrwerke reduziert werden. Generell sollte (u.a. zur Vermeidung von Bodenschlupf) auf eine bodenschonende Kraftübertragung, bspw. durch Allradantrieb, zapfwellengetriebene statt gezogener Geräte und Aufsattel- und Anbaugeräte, geachtet werden (BMELF 1999). Ein hoher Reifendruck bspw. bewirkt ein tieferes Eindringen der Druckzwiesel der Auflast in das Bodengefüge, als dies bei einem verringerten Reifendruck der Fall ist. Bau- und Transportfahrzeuge mit einem verringerten Reifendruck und mit möglichst breiten Reifen empfehlen sich daher in verdichtungsgefährdeten Bereichen. Auch Gitterräder, Zwillingsreifen, Breit- und Terrareifen sowie Bandlaufwerke mindern den Kontaktflächendruck. Grundsätzlich sind die Bauarbeiten zeitlich so zu planen, dass die Böden nur in ausreichend trockenem Zustand befahren werden.

Soweit möglich sind vorhandene Verkehrswege zu nutzen, ansonsten ist die Anlage von Baustraßen notwendig, um den Lastendruck zu verteilen. Die Norm DIN 4124 „Baugruben und Gräben, Böschungen – Verbau – Arbeitsraumbreiten“ fordert einen Straßenoberbau von 15 cm Dicke, der z.B. aus Schotter oder aus aufbereitetem Bauschutt hergestellt werden kann, weil einfach eingebaut, wieder entfernt und ggf. mehrmals verwendet werden kann (Auskunft RATHKE 15.11.10). In Dänemark ist es offenbar üblich, empfindliche Böden auch bei großen Baustellen durch Baustraßen aus mobilen Stahlplatten herzustellen (GEO et al. 2009, S. 87). Es ist jedoch fraglich, ob dies in Deutschland mit o.g. Norm vereinbar ist. In stark beanspruchten Bereichen kann es auch vorteilhaft sein, Baustraßen aus geotextilen Matten gemäß DIN 18915 herzustellen. In Verbindung mit einer korngestuftem Sand-Kiesauflage oder vergleichbarer Technik kann irreversiblen Struktur-schäden vorgebeugt werden (IBNI et al. 2008, S. 55 ff.). Auch diese Baustraßen sind nach Beendigung der Bauarbeiten vollständig entfernbar. Im Bereich besonders hochwertiger Strukturen und morphogenetischer Besonderheiten ist eine möglichst weitgehende Verschmälerung des Arbeitsstreifens zu erwägen.

Unbeabsichtigt verdichteter Oberboden kann nach Beendigung der Baumaßnahme ggf. durch Tiefenlockerung seine Funktionsfähigkeit weitgehend wiedererlangen (vgl. ERM 6-4.6). Doch sollte IBNI et al. (2008) zufolge die Tiefenlockerung im Bereich des Arbeitsstreifens vor Wiederaufbringung der oberen Bodenschicht auf ein notwendiges Maß beschränkt werden. Auch durch Zwischenfruchtanbau ist eine biologische Lockerung und Stabilisierung des Bodens denkbar.

2.4.9.3 Bodenwasserhaushalt

Wasserstauende Schichten, die vom Kabelgraben ggf. durchbrochen werden, können durch quellfähige Tone wie etwa Betonit wieder vollständig abgedichtet werden. Auf diese Weise sind Beeinträchtigungen des Bodenwasserhaushalts vermeidbar (GEO et al. 2009). Zum Beispiel an (Nieder-) Moorstandorten kann so die Funktionsbeeinträchtigung durch Entwässerung gering gehalten werden. Auch durch zeitlich gestraffte Baumaßnahmen und eine rasche Wiederbefüllung des Grabens können Beeinträchtigungen minimiert werden (IBNI et. al. 2008, S. 55 ff.).

2.4.9.4 Bodenerwärmung

Eine Verminderung der Bodenerwärmung ist durch unterschiedliche Maßnahmen möglich, die im Wesentlichen im technischen Berichtsteil, Teil II, abgehandelt werden. In erster Linie verringert die Wahl eines angemessenen Leitermaterials und eines großen Leiterquerschnitts Verlustwärme. Über die Bemessung des Bettungsmaterials kann darüber hinaus die Wärmeabgabe standortbezogen ausgeregelt werden. Auch eine Verlegung des Kabels in größerer Tiefe kann einer Erwärmung des belebten Oberbodens vorbeugen. Bei einer streckenweise getunnelten Verlegung kann aktiv belüftet werden. Falls erforderlich, kann die Bodenerwärmung auch durch externe Kühlung vermindert werden, die bspw. für den (n-1)-Fall vorgehalten wird. Aufwendige Maßnahmen bleiben i. Allg. aufgrund der hohen Kosten auf die Hot Spots der Wärmeentwicklung beschränkt.

2.5 Auswirkungen von Erdkabeln auf Gewässer

2.5.1 Auswirkungen von Erdkabel auf das Grundwasser

Im Zuge von Erdkabelverlegungen sind mögliche baubedingte Auswirkungen auf das Grundwasser, d.h. auf ganzjährig vorhandene, durch Niederschlag gespeiste Wasservorkommen, zu beachten (NLT 2009, S. 12, SCHEFFER/SCHACHTSCHABEL 2010, S. 220, GOUDIE 2002, S. 368). Maßgebend sind die Bestimmungen des Wasserhaushaltsgesetzes und des jeweiligen Landeswassergesetzes. Beeinträchtigungen des Grundwassers sind insbesondere in folgenden Situationen denkbar (vgl. Abschn. 2.3.2.4):

- Bei Feuchtgebieten mit hoch anstehendem Grundwasser wie z.B. Niedermooren, die für die Zeit der Kabelverlegung eine aktiv herbeigeführte Grundwasserabsenkung erfordern und entwässert werden könnten (vgl. GEO et al. 2009, S. 41; ECOFYS 2008, S. 97).