

TELMA	Beiheft 5	Seite 133 - 158	4 Abb., 9 Tab.	Hannover, Juli 2015
-------	-----------	-----------------	----------------	---------------------

Treibhausgasemissionen aus Mooren und Möglichkeiten der Verringerung

Greenhouse gas emissions of peatlands and measures for reduction

HEINRICH HÖPER

Zusammenfassung

Moore stehen in einem intensiven Gasaustausch mit der Atmosphäre. Natürliche Moore haben über Jahrtausende Kohlendioxid aufgenommen und den Kohlenstoff als Torf gespeichert. Dabei haben sie Methan abgegeben. Entwässerte und genutzte Moore setzen den Kohlenstoff als Kohlendioxid wieder frei und emittieren zudem klimarelevantes Lachgas als Ergebnis der Stickstoffdüngung und der Torfmineralisation. Zur Charakterisierung der Ist-Situation und zur Beurteilung von Maßnahmen ist es erforderlich, belastbare Daten über die Treibhausgasemissionen der Moore zu haben. Im Rahmen von zwei bundesweit angelegten Verbundvorhaben wurden an einer Vielzahl von Standorten unterschiedlichen Moortyps, unterschiedlicher Nutzung und unterschiedlicher Klima- und Wasserregime mit einer abgestimmten Methodik die Flüsse der wesentlichen Treibhausgase direkt gemessen. Im Rahmen dieser Verbundvorhaben wurden in Niedersachsen zwischen 2007 und 2012 an 22 Standorten mindestens zweijährige Messungen mit der Haubentechnik vorgenommen. Dieser Beitrag gibt einen Überblick über untersuchte Standorte und Messergebnisse. Darüber hinaus werden Ansätze zur Ermittlung der Treibhausgasemissionen aus der industriellen Torfgewinnung dargestellt. Unter Verwendung eigener Ergebnisse und von Literaturdaten wird eine Abschätzung der Treibhausgasemissionen aus Moor und Torfgewinnung für das Land Niedersachsen vorgenommen. Abschließend geht der Beitrag auf Maßnahmen zur Verminderung der Treibhausgasemissionen aus Mooren sowie beispielhaft auf Emissionsminderungskosten ein.

Abstract

Peatlands are intensively exchanging greenhouse gases with the free atmosphere. Natural peatlands, mires, sequester carbon dioxide as carbon in the peat and emit methane. Peatlands under agriculture or forest are mostly drained and emit carbon dioxide due to peat mineralization and nitrous oxide due to fertilization and nitrogen mineralization. In order to characterize the actual situation and to evaluate measures for the reduction of greenhouse gas emissions measured values on gas exchange are needed. Within two national projects direct measurements of the greenhouse gas exchange have been conducted on a wide range of sites, covering different peatland types, land use forms and hydrological situations and using a standardized methodology. Between 2007 and 2012 22 sites have been studied in Lower Saxony over at least two years using the closed cover method. An overview on sites and results is given. Moreover, approaches to estimate the greenhouse gas emissions due to peat excavation and horticultural peat use are

presented. Own emission factors and data from literature are used to estimate the contribution of peatlands and peat use to the greenhouse gas emissions of Lower Saxony. Finally measures for the reduction of greenhouse gas emissions are discussed and estimates on reduction costs are given from examples.

1. Einleitung

Moore beeinflussen das globale Klima, indem sie eine Quelle oder eine Senke für klima-relevante Gase darstellen. Das gilt vor allem für Kohlendioxid (CO_2), Methan (CH_4) und Lachgas (N_2O), die als Bestandteile der Atmosphäre die Rückstrahlung der von der Sonne eingestrahlten Energie in den Weltraum vermindern und somit den Wärmehaushalt der Erde beeinflussen. Derzeit gibt es deutliche Hinweise, dass der Mensch durch seine Aktivitäten den Anteil an Treibhausgasen in der Atmosphäre erhöht hat, weiter erhöhen wird und es zu einer anthropogenen, vom Menschen verursachten globalen Erwärmung kommt. In erster Linie ist hierfür die Verwendung fossiler Energieträger (v.a. Öl, Gas, Kohle) verantwortlich, doch auch Landnutzung und Landnutzungsveränderungen haben einen wichtigen Anteil daran, von global etwa 20 % (IPCC 2007). Deutschlandweit machen Landwirtschaft und Landnutzungen einen Anteil von 11 % an den gesamten Treibhausgasemissionen aus, wovon ein wesentlicher Anteil auf die Moornutzung entfällt (UMWELTBUNDESAMT 2013). Die Moornutzung liefert den größten Einzelbeitrag zu den deutschen Emissionen, außerhalb des Energiesektors.

In Bundesländern mit einem hohen Flächenanteil der Moore, wie Niedersachsen, hat die Moornutzung einen höheren Anteil an den Treibhausgasemissionen. Aus diesem Grund spielen die Moorstandorte bei der Empfehlung der Regierungskommission Klimaschutz des Landes für eine niedersächsische Klimaschutzstrategie (NIEDERSÄCHSISCHES MINISTERIUM FÜR UMWELT, ENERGIE UND KLIMASCHUTZ 2012) auch eine besondere Rolle. In einer vom Niedersächsischen Ministerium für Ernährung, Landwirtschaft, Verbraucherschutz und Landesentwicklung (ML) in Auftrag gegebenen Studie zum Klimaschutz im Agrarsektor werden Maßnahmen im Bereich Moor- und Torfnutzung vorgeschlagen (FLESSA et al. 2012). Unter der Federführung des Niedersächsischen Ministeriums für Umwelt, Energie und Klimaschutz (MU) wurde 2013 die Arbeitsgruppe „Moorentwicklung“ ins Leben gerufen, die ressortübergreifend Maßnahmen zur Reduzierung der Treibhausgasemissionen aus Mooren vorschlagen und Wege zu deren Umsetzung entwickeln soll.

Der folgende Beitrag hat zum Ziel, den aktuellen Kenntnisstand aufzuzeigen hinsichtlich

- standorttypischer und nutzungsabhängiger Treibhausgasemissionen für niedersächsische Moore und für die Gewinnung von Hochmoortorf,
- einer Abschätzung der Treibhausgasemissionen aus Moor und Torf für Niedersachsen und
- Möglichkeiten und Grenzen von Maßnahmen zur Reduzierung der Treibhausgasemissionen.

Dabei wird auch auf die Methodik zur Messung der Treibhausgasemissionen, auf Szenariobetrachtungen bezüglich der zeitlichen Entwicklung von Emissionen und auf Emissionsminderungskosten eingegangen.

2. Begriffe – Konzepte

Der Begriff Moor ist je nach Fachgebiet mit unterschiedlichen Bedeutungen hinterlegt. Moore sind in Mitteleuropa nach der letzten Eiszeit entstanden. In den Mooren hat sich über Jahrtausende Torf angesammelt, indem Pflanzenmaterial nach dem Absterben unter Wasserüberschuss (klimatisch oder topographisch bedingt) konserviert wurde. Idealerweise sind somit Moore Standorte, die organische Substanz akkumulieren, wobei das Torfwachstum historisch im Mittel weniger als 1 mm pro Jahr beträgt (HÖPER 2007). Dies setzt eine torfbildende Vegetation und entsprechend nasse Bedingungen voraus.

Allerdings kann es selbst unter optimalen Bedingungen dazu kommen, dass Moore nicht unbegrenzt Torf akkumulieren. Niedermoore können nicht über den Grundwasserstand hinaus wachsen, und auch für die vom Regenwasser gespeisten Hochmoore wird angenommen, dass sich das Wachstum mit zunehmender Moormächtigkeit verlangsamt und schließlich zum Erliegen kommt (CLYMO 1984). Als Ursachen werden diskutiert (a) der stärkere Oberflächenabfluss aufgrund der zunehmenden Geländeneigung an den Moorrändern, (b) zunehmende Versickerungsverluste aufgrund eines wachsenden hydraulischen Gradienten zwischen Oberfläche und Grundwasser und (c) eine mit der Moormächtigkeit zunehmende Methanfreisetzung, die sich negativ auf die Kohlenstoffbilanz auswirkt.

Bereits im Mittelalter, verstärkt aber im 18. und 19. Jahrhundert, begann man Moore zu entwässern und urbar zu machen. Heute sind gut 80 % der Moore unter landwirtschaftlicher Nutzung, überwiegend als Grünland, teilweise als Ackerland. Nur ein kleiner Teil der Moore in Niedersachsen ist noch in einem naturnahen Zustand (HÖPER 2007). Dagegen gibt es vor allem bei den Hochmooren einige zehntausend Hektar degenerierte Standorte, die zwar ungenutzt, aber relativ trocken sind und eine Sekundärvegetation aus lichtem Birkenwald und Heide aufweisen. Auf diesen Standorten findet keine Torfbildung, jedoch eine Mineralisation der Torfe mit Freisetzung von Treibhausgasen statt.

Im folgenden Beitrag werden Moore im geologischen Sinne verstanden als Standorte mit einer mindestens 30 cm mächtigen Torfschicht und mindestens 30 % organischer Substanz, unabhängig von der Vegetation. Natürlich mit mineralischen Sedimenten überlagerte Standorte werden hier nicht betrachtet. Moore wurden teilweise mit dem Ziel einer nachhaltigen landwirtschaftlichen Nutzung durch technische Maßnahmen, z. B. Übersandung oder Tiefpflügen, kultiviert. Dabei sind wesentliche Mooreigenschaften verändert worden. Nach AG Boden (2006) sind diese Böden den Mineralböden zuzurechnen, wenn eine Mineralbodenaufgabe von mehr als 20 cm vorhanden ist. Dies gilt für Sandmischkulturen und für ackerbaulich genutzte Sanddeckkulturen. Dagegen werden Sanddeckkulturen unter Grünland, mit flacher Sandauflage, den kultivierten Mooren zugeordnet. Da Sandmisch- und Sanddeckkulturen eine flächenhafte Bedeutung in Niedersachsen haben, werden auch Ergebnisse zu den Treibhausgasemissionen dieser Standorte vorgestellt.

Bei der Betrachtung der Klimarelevanz der Moorstandorte werden Systemgrenzen definiert, die sich z.T. auch aus der nationalen Berichterstattung und den Vorgaben des IPCC (2007) ergeben. So werden bei allen Moorstandorten nur die Treibhausgasemissionen zwischen Boden und Atmosphäre betrachtet und nicht die Emissionen, die oberhalb der

Bodenoberfläche entstehen, z. B. Methanfreisetzung bei der Weidehaltung von Wiederkäuern oder CO₂-Emissionen beim Einsatz von Maschinen. Diese Emissionen treten auch an anderer Stelle auf, unabhängig von den Standortbedingungen.

Dagegen werden bei der Torfgewinnung die Emissionen berücksichtigt, die sich aus der Verwendung der Torfe ergeben. Die Verwendung der Torfe ist unabdingbar mit deren Gewinnung verbunden. Allerdings wird hier nur die Freisetzung von CO₂ berücksichtigt und nicht die weiteren Treibhausgase, die bei der Weiterverarbeitung und Nutzung der Torfe, z. B. in Blumentöpfen oder im Garten, auftreten können.

Flüsse von Treibhausgasen können sowohl vom Boden in die Atmosphäre (Quelle) als auch von der Atmosphäre in den Boden (Senke) stattfinden. Die Treibhausgasbilanz eines Standortes, d.h. die Frage, ob der Standort eine Quelle oder eine Senke für Treibhausgase ist, unterscheidet sich von der Kohlenstoffbilanz, d.h. der Frage, ob der Standort Kohlenstoff in der Summe der Nettoflüsse aus CO₂, Methankohlenstoff und gelöstem Kohlenstoff freisetzt oder festlegt. Nach der Vorzeichenkonvention des IPCC (2007) werden Flüsse, die zu einem Anstieg der Gaskonzentration in der Atmosphäre führen, mit einem positiven Vorzeichen versehen. Die Klimawirkung der verschiedenen Gase wird im Globalen Treibhauspotenzial zusammengefasst und in CO₂-Äquivalenten (CO₂-Äq.) angegeben (IPCC 2007, vgl. auch HÖPER 2007).

3. Methodik

Zur Ermittlung des Treibhausgasaustausches zwischen Moorboden und freier Atmosphäre stehen verschiedene Verfahren zur Verfügung (Tab. 1). Eine grobe Abschätzung der Kohlendioxidfreisetzung kann über die Abnahme der Geländehöhe (Höhenverluste) erfolgen. Dies ist allerdings nur für Standorte möglich, auf denen die CO₂-Freisetzung die vorwiegende Quelle der Treibhausgase ist, und basiert auf Annahmen über Dichte, Kohlenstoff- und Aschegehalte der Torfe sowie über den Anteil der Sackung und Schrumpfung an den Höhenverlusten (HÖPER 2007). Es können nur Aussagen über die C-Freisetzung oder -festlegung und damit nicht über den gesamten Treibhausgasaustausch getroffen werden. Mit der Haubentechnik kann der Gasaustausch direkt gemessen werden. Hier wird über einen definierten Zeitraum die Zu- oder Abnahme der Treibhausgaskonzentrationen in einer Haube gemessen, die gasdicht auf den Boden aufgesetzt wird. In der Regel erfolgt die Messung der CO₂-Konzentrationen direkt im Gelände, für andere Gase, hier v.a. CH₄ und N₂O, werden Gasproben gewonnen und im Labor analysiert. Vorteile dieses Verfahrens sind, dass alle relevanten Gase erfasst und die kleinräumige Variabilität, z. B. zwischen Flurstücken und Nutzungsvarianten abgebildet werden können. Allerdings sind die Messungen personal- (manuelle Methode) oder kostenaufwändig (automatische Methode). Das Aufsetzen der Hauben bewirkt eine geringfügige Störung des freien Gasaustausches. Die zwischen den manuellen Messungen liegenden Zeiträume müssen interpoliert werden (BEETZ et al. 2013). Bei den automatischen Verfahren stellt die Kühlung der Hauben an sonnigen Tagen ein besonderes Problem dar.

Bei der Eddy-Kovarianz-Methode findet die Gasmessung direkt im offenen System statt. An einem Messturm befestigte Sensoren messen die Spurengaskonzentrationen, die Windrichtung und die vertikale Windgeschwindigkeit oberhalb der Vegetation. Die Messdaten werden ausgewertet und Gasflussraten ermittelt. Vorteile sind die hohe Datendichte, die vollautomatische und kontinuierliche Messung und die Möglichkeit, den mittleren Treibhausgasausaustausch einer größeren Fläche im Umfeld des Turms zu ermitteln. Auch können alleine mit diesem Verfahren Waldstandorte untersucht werden. Nachteile sind die hohen Investitionskosten, vor allem wenn neben CO_2 und CH_4 auch N_2O in die Messungen einbezogen werden soll, und der hohe Betreuungs- und Auswertungsaufwand. Zudem können keine kleinen Parzellen untersucht werden. Meteorologisch bedingte Datenlücken müssen durch Modelle geschlossen werden.

Alle Verfahren müssen durch weitere Messungen ergänzt werden, um vollständige Treibhausgas- und Kohlenstoffbilanzen für die Standorte zu bekommen. Hierzu müssen Kohlenstoffeinträge über die organische Düngung und Kohlenstoffausträge mit dem Erntegut oder, in gelöster Form, mit Drän- und Sickerwasser ermittelt werden.

Keines der beschriebenen Verfahren kann alle Einsatzbereiche abdecken. Alle drei, auf direkten Messungen des Gasflusses aufbauenden Verfahren sind teuer, so dass routinemäßige Messungen im Rahmen von Renaturierungsprojekten in der Regel nicht in Frage kommen.

Tab. 1: Verfahren zur Messung von Treibhausgasemissionen aus Böden, Vor- (+) und Nachteile (-) nach Drösler (unveröffentlicht), modifiziert.

Techniques for the measurement of the greenhouse gas exchange of soils, advantages (+) and disadvantages following Drösler (unpublished), modified.

	Höhen- verluste	manuelle Hauben	automatische Hauben	Eddy- Kovarianz
erfasste Gase	CO_2 (als C)	$\text{CO}_2, \text{CH}_4, \text{N}_2\text{O}$	$\text{CO}_2, \text{CH}_4, \text{N}_2\text{O}$	CO_2, CH_4
ungestörter Gasaustausch	+++	+/-	+/-	+++
Einschätzung größerer Flächen	+++	+/-	+/-	+++
Erfassung der räumlichen Variabilität / Management	++	+++	++	---
Abbildung der zeitlichen Variabilität	---	+	++	++
Materialkosten	++	++	--	---
Personalkosten	++	--	-	--
Arbeitsbelastung	++	--	+	+

4. Jährliche Treibhausgasemissionen nach Nutzung und Moortyp

Tabelle 2 gibt eine Übersicht über die Standorte in Niedersachsen, auf denen in den vergangenen Jahren Messungen der Treibhausgasemissionen durchgeführt worden sind. Insgesamt liegen mindestens zweijährige Messreihen mit der manuellen Haubentechnik von 4 Niedermoor-, 13 Hochmoorstandorten und 3 Sanddeckkulturen vor. Daneben werden

Tab. 2: Standorte mit Messungen zum Treibhausgas-Austausch mit manuellen Hauben in Niedersachsen zwischen 2007 und 2011.
 Sites with measurements of the greenhouse gas exchange using the manual cover technique in Lower Saxony between 2007 and 2011.

Standort (Jahre)	Nutzung / Vegetation	Moor-Mächtigkeit m	GW-Stand (Jahr/Sommer) cm u GOF	Corg ⁵ %	Nt ⁵ %	pH ⁵	Bewirtschaftung
<i>Niedermoor</i>							
Dümmner 1 (4)	Acker	1,6/2,7 ¹	30/42	29,1	1,5	5,6	CCM-Mais; 50/110 kg N
Dümmner 2 (4)	Extensivgrünland, trocken	1,6/2,7 ¹	24/41	30,9	1,7	5,4	0-2 Schnitte, 0 kg N
Dümmner 7 (2)	Extensivgrünland, nass	0,9/2,0 ¹	11/20	38,8	2,6	4,7	2 Schnitte, 0 kg N
Dümmner 8 (2)	(Wasserschwadenröhricht)	1,1/2,3 ¹	-12/-6	14,1/18,3 ⁴	1,0/1,3 ⁴	4,8/4,3 ⁴	keine
<i>Hochmoor</i>							
Surwold 2 (2)	Acker	0,5	92/97	31,0	0,9	4,1	Kart./Silomais, 180 kg N, 4 Schnitte, 170 kg N/ha/a
Ahlenmoor 1 (2)	Intensivgrünland	1,4/3,3 ²	54/65	47,2	2,1	3,6	keine
Ahlenmoor 2 (2)	Extensivgrünland, nass	1,0/3,4 ²	25/35	49,8	2,3	3,4	Torfgewinnung
Westermoor (2)	Abtorfung, seit 2009	0,3/2,4 ²	35/41	53,9	1,11	3,8	Torfgewinnung
Westermoor (2)	Abtorfung, seit 2000	0,1/2,0 ²	51/61	55,4	1,08	3,9	Torfgewinnung
Ahlenmoor 3 (2)	Abtorfungsfläche, vernässt seit 2006	2,6, Wasser in 0,9-1,8	-20/-19	46,7	1,5	2,9	keine
Leegmoor 1 (2)	Abtorfungsfläche, vernässt seit 1983, Pfeifengras	1,6	13/28	33,2	1,1	3,4	keine
Leegmoor 2 (2)	Abtorfungsfläche, vernässt seit 1983, Wollgras	0,2/1,0 ²	-4/4	57,5	0,9	3,7	keine
Leegmoor 3 (2)	Abtorfungsfläche, vernässt seit 1983, S. cuspidatum	0,2/1,0 ²	-14/-6	n.b.	n.b.	n.b.	keine
Ahlenmoor 4 (2)	Degenerationsstadium, Pfeifengras/Moorbirke	1,2/5,2 ²	9/12	49,0	2,7	2,9	keine
Ahlenmoor 5 (2)	naturnah, Sphagnum, Erica	1,2/5,2 ²	13/15	48,9	1,8	3,0	keine
Ahlenmoor 6 (2)	naturnah, Schwingrasen	1,5/5,2 ²	6/9	48,0	1,4	2,9	keine
Ramsloh (2)	Torfmooskultur	0,15/2,1 ²	8/7	n.b.	n.b.	n.b.	Torfmooskultur
<i>Sandteckkultur, übersandetes Moor</i>							
Surwold (2)	Acker, HH	0,2/0,6 ³	118/134	8,8	0,40	5,0	Weizen/Silomais 270 kg N/ha/a
Ochsenmoor (2)	Acker, HN	0,3/0,55 ³	65	7,4	0,52	4,9	Weizen/Silomais 235 kg N/ha/a
Ochsenmoor (2)	Extensivgrünland, HN	0,3/0,4 ³	71/90	7,7	0,58	5,3	2 Schnitte, 0 kg N/ha/a

¹ Torf / Gesamtmächtigkeit incl. Mulde; ² Weißtorf / Gesamtmächtigkeit (wurzelechte Hochmoore); ³ humoser Sand / Untergrenze Torfe;

⁴ Tiefen 0-15, 15-110 cm; ⁵ Werte im oberen Horizont (i.d.R. 0-20, Acker 0-30 cm); n.b. nicht bestimmt

die Ergebnisse aus der langjährigen Entwicklung der Humusvorräte einer Boden-Dauerbeobachtungsfläche auf einer Hochmoor-Sandmischkultur herangezogen (HÖPER & MEESENBURG, 2012). Die in Niedersachsen an Niedermooren gewonnenen Daten werden in den Kontext der von DRÖSLER et al. (2011, 2013) bundesweit ermittelten Werte gestellt.

4.1 Landwirtschaftlich genutzte Moore

Auf ackerbaulich genutzten Mooren betragen die Treibhausgasemissionen im Mittel 32 bis 34 t CO₂-Äq./ha/Jahr (Tab. 3 und 4). Davon gehen 70-90 % auf die Freisetzung von CO₂ zurück, der Rest ist N₂O. Bei einer angenommenen Dichte der reinen Torfe von 0,1 kg/l und einem CO₂-Anteil von 80 % an den Treibhausgasemissionen entspricht dies einem Höhenverlust von knapp 1,5 cm pro Jahr. Der Unterschied zwischen Hochmoor und Niedermoor ist gering. Dies ist vermutlich auf die Stickstoffdüngung zurückzuführen. Das C/N-Verhältnis im Oberboden der Hochmoorstandorte nähert sich dem der Niedermoorstandorte an, so dass auch die Umsetzbarkeit der Torfe ähnlich wird.

Eine Besonderheit stellt in diesem Zusammenhang der in Niedersachsen in der Dümmeriederung untersuchte Ackerstandort dar. Dieser Standort, der regelmäßig mit Schweinegülle gedüngt und mit Corn-Cob-Mix-Mais (CCM-Mais) in Monokultur bestanden war, wies über einen Zeitraum von 4 Jahren mittlere Emissionen von lediglich 8,6 t CO₂-Äq./ha/Jahr mit Minima und Maxima von 1,5 bzw. 16,4 t CO₂-Äq./ha/Jahr auf (BEYER et al. 2015). Die Ursachen liegen zum einen darin begründet, dass im ersten Messjahr die Nutzung des Maises von Silomais auf CCM-Mais umgestellt wurde. Da bei CCM-Mais nur der Maiskolben geerntet wird, verbleibt mit dem Maisstroh mehr organisches Material auf der Fläche als beim Silomais. Offensichtlich wurde das Maisstroh innerhalb eines Jahres nicht vollständig abgebaut, so dass es vorübergehend zu einer Akkumulation von Pflanzenmaterial im Boden kam. Zum anderen ist der Standort durch hohe Wasserstände geprägt. In den Wintermonaten steht das Wasser zeitweise an der Bodenoberfläche, im Jahresmittel bei 30 cm unter Flur und im Mittel des Sommerhalbjahres (01.05.-31.10.) bei 42 cm unter Flur. Offen ist, auf welche Standorte sich diese Ergebnisse übertragen lassen. Dies gilt vor allem in Hinblick auf die Frage, inwieweit die hydrologischen und klimatischen Bedingungen eine nennenswerte Anhebung der Wasserstände zulassen, ohne die Befahrbarkeit der Standorte bei Saat und Ernte zu beeinträchtigen.

Tab. 3: Treibhausgasemissionen der in Niedersachsen untersuchten Hochmoorstandorte unter landwirtschaftlicher Nutzung. Mittelwerte, Minima und Maxima in Klammern. Greenhouse gas emissions of bog sites under agricultural use examined in Lower Saxony. Means, minimum and maximum values in parentheses.

Nutzungskategorie	Standort in Niedersachsen	Treibhausgasemissionen [t CO ₂ -Äq./ha/a]	Zitat
Acker	Surwold	32,2 (29,3 - 35,1)	BEYER und HÖPER (2015)
Grünland intensiv	Ahlenmoor	25,9 (20,7 - 31,2)	BEETZ et al. (2012)
Grünland extensiv trocken	nicht untersucht	20,1	DRÖSLER et al. (2011)
Grünland extensiv nass	Ahlenmoor	-0,7 (-4,8 - 3,4)	BEETZ et al. (2012)

Tab. 4: Treibhausgasemissionen der in Niedersachsen (NI) untersuchten Niedermoorstandorte unter landwirtschaftlicher Nutzung und bundesweiter Vergleichsstandorte (D; DRÖSLER et al. 2011). Mittelwerte, Minima und Maxima in Klammern.

Greenhouse gas emissions of fen sites under agricultural use examined in Lower Saxony (NI) compared to results of a national study (D; DRÖSLER et al. 2011). Means, minimum and maximum values in parentheses.

Nutzungskategorie	Standort in Niedersachsen	Treibhausgasemissionen (NI) [t CO ₂ -Äq./ha/a]	Treibhausgasemissionen (D) [t CO ₂ -Äq./ha/a]
Acker	Dümmer	8,6 (1,5 - 16,4)	33,8 (14,2 - 50,0)
Grünland intensiv / mittelintensiv	nicht untersucht		30,9 (21,3 - 40,7)
Grünland extensiv trocken	Dümmer	18,3 (15,2 - 21,7)	22,5 (19,5 - 30,9)
Grünland extensiv nass	Dümmer	9,3 (8,9 - 9,7)	10,3 (5,8 - 16,3)

Auf Moorgrünland mittlerer und hoher Nutzungsintensität sind Treibhausgasemissionen im Mittel von 26 t auf Hochmoor und 31 t CO₂-Äq./ha/Jahr auf Niedermoor beobachtet worden. Damit liegen die Emissionen unter intensiver Grünlandnutzung im Mittel nur 10-20 % unter denen von Ackernutzung. Auf extensiv genutztem, aber nicht vernässten Grünland sind bundesweit Emissionen im Mittel von 20 (Hochmoor) bzw. 23 t CO₂-Äq./ha/Jahr (Niedermoor) ermittelt worden. Die am Dümmer gemessenen Werte lagen etwas darunter, vermutlich auch hier aufgrund der höheren Wasserstände (Jahresmittel: 24 cm unter Geländeoberfläche (GOF), bundesweit 29 cm). Bei den Vergleichen ist allerdings auch die Variation der Werte zwischen den Jahren zu beachten.

Durch eine Extensivierung der Grünlandnutzung können die Treibhausgasemissionen somit im Mittel um 6-8 t CO₂-Äq./ha/Jahr bzw. 20-30 % im Vergleich zum Grünland mittlerer oder hoher Intensität reduziert werden. Dies ist zumindest die Differenz zwischen Grünlandstandorten der Kategorien „mittlere bis hohe Intensität, trocken“ und „extensiv, trocken“ nach DRÖSLER et al. (2011). Hierbei ist zu beachten, dass die Kategorisierung der real untersuchten Grünlandstandorte bei DRÖSLER et al. (2011) hinsichtlich der Nutzungsintensität nach Schnitthäufigkeit („extensiv“ bedeutet bei Wiesennutzung weniger als 2 Schnitte) und hinsichtlich der Feuchte nach Vegetation und Vernässungsmaßnahmen („trocken“ bedeutet Vegetation frischer Standorte ohne aktive Vernässung) vorgenommen wurde. Bei der Zusammenfassung der Standorte innerhalb der Kategorien zeigt sich allerdings, dass das Grünland der Kategorie „extensiv, trocken“ nicht nur extensiver bewirtschaftet wird, sondern auch höhere Wasserstände aufweist als das der Kategorie „mittel bis hoch intensiv, trocken“ (im Mittel 29 bzw. 49 cm unter Flur). Dies kann darauf zurückgeführt werden, dass auf den extensiv genutzten Standorten geringere Anforderungen an die Entwässerung gestellt werden oder dass sich diese etwas nasser Standorte nur noch für eine extensive Nutzung eignen. Die Differenz der Treibhausgasemissionen zwischen diesen beiden Grünlandkategorien ist also nicht allein auf die Extensivierung, sondern auch auf eine unterschiedliche Wasserführung zurückzuführen.

Eine deutliche Minderung der Treibhausgasemissionen wird erst durch eine starke Vernässung der Standorte erreicht. So weist Grünland der Kategorie „extensiv nass“ auf Niedermoor Emissionen von 9-10 t und auf Hochmoor sogar eine Festlegung von $-0,7 \text{ t CO}_2\text{-Äq./ha/Jahr}$ auf. Der letzte Wert ist überraschend niedrig, unterliegt allerdings auch einer gewissen Streuung zwischen den beiden Messjahren (Einzelwerte: $-4,8$ bzw. $+3,4 \text{ t CO}_2\text{-Äq./ha/Jahr}$). Es kann als gesichert gelten, dass durch Vernässung eine deutliche Emissionsminderung von mindestens 70 % gegenüber dem Grünland mittlerer und hoher Nutzungsintensität erreicht wird, wobei im Jahresmittel Wasserstände deutlich höher als 25 cm unter Flur anzustreben sind.

4.2 Degenerierte, naturnahe und vernässte Moore

Für Hochmoorstandorte liegen zu den in Tab. 5 aufgeführten Nutzungskategorien Messergebnisse zu Treibhausgasemissionen vor. Ein trockenes degeneriertes Hochmoor mit Pfeifengrasdominanz und spärlichem Birkenbewuchs wies im Mittel von 2 Jahren eine Emission von etwa $5 \text{ t CO}_2\text{-Äq./ha/a}$ auf und lag damit unter den bundesweit erhobenen Vergleichswerten von knapp $10 \text{ t CO}_2\text{-Äq./ha/a}$. Trotz der hohen Relativabweichung der Mittelwerte um den Faktor 2 zeigt sich anhand der Minima- und Maxima eine Überschneidung der Wertebereiche. Abweichungen vom Mittelwert in der Größenordnung von 2 bis $4 \text{ t CO}_2\text{-Äq./ha/a}$ sind aufgrund unterschiedlicher jährlicher Witterungsbedingungen und Standortbedingungen normal.

Die beiden naturnahen Standorte im Ahlenmoor können als Referenz für den Zielzustand der Moorrenaturierung aus Sicht des Klimaschutzes dienen. Im Mittel weisen die Standorte eine klimakühlende Wirkung von $-1,4 \text{ t CO}_2\text{-Äq./ha/a}$ auf, wobei in Einzeljahren auch eine Nettofreisetzung klimarelevanter Gase stattfinden kann. Die Emissionen im Ahlenmoor liegen zwar niedriger als der Mittelwert vergleichbarer Standorte aus der bundesweiten Studie, lassen sich aber noch in den Streubereich der dort gemessenen Werte einordnen. Bei den vernässten Abtorfungsflächen lassen sich in Abhängigkeit der Wasserstände 2 Gruppen unterscheiden, wobei der Unterschied bei den niedersächsischen Untersuchungen geringer ausfällt als bei den bundesweiten Vergleichswerten. Die beiden Varianten „Pfeifengras“ und „Wollgras“ aus dem Leegmoor, mit Wasserständen an oder geringfügig unterhalb der Bodenoberfläche, zeigen einen Treibhausgasaustausch im Bereich der Klimaneutralität. Allerdings wurden in einem Jahr in der Wollgrasvariante erhöhte Emissionen gemessen. Die überstauten Flächen im Ahlenmoor und im Leegmoor mit dominanter Vegetation von *Sphagnum cuspidatum* weisen dagegen, aufgrund höherer Methanfreisetzung, auch eine höhere Gesamt-Treibhausgasemission von etwa $4 \text{ t CO}_2\text{-Äq./ha/a}$ auf. Die bundesweiten Vergleichswerte liegen mit $8 \text{ t CO}_2\text{-Äq./ha/a}$ höher, wobei auch hier der Unterschied nicht überbewertet werden sollte.

Bei den naturnahen Niedermoores zeigen die Untersuchungsfläche am Dümmer und die Vergleichsgruppe ähnlich hohe Treibhausgasemissionen von ca. $3 \text{ t CO}_2\text{-Äq./ha/a}$. Die Werte liegen deutlich höher, als die von HÖPER (2007) ermittelten ($0,35 \text{ t CO}_2\text{-Äq./ha/a}$), wobei jedoch eine deutliche Variation zwischen den Messjahren bei den Gasflussmessungen

gen zu beobachten ist. Es bleibt festzustellen, dass naturnahe Niedermoore bestenfalls Klimaneutralität erreichen und damit keine Senke für Treibhausgase darstellen können. Eine kühlende Wirkung bezogen auf das globale Klima kann durch die Niedermoorrenaturierung in unserem Naturraum somit nicht erreicht werden.

Überstauplächen auf Niedermoor mit Wasserständen deutlich über Gelände wurden in Niedersachsen nicht untersucht. Eine Vergleichsfläche aus dem Peenetal in Mecklenburg-Vorpommern, mit unkontrolliertem Überstau von zeitweise über 0,5 m, weist sehr hohe Methanemissionen auf, die u.a. auf den Zustrom von gelöstem, organischen Kohlenstoff mit dem Überstauwasser zurückgeführt werden können (DRÖSLER et al. 2013).

Tab. 5: Treibhausgasemissionen der in Niedersachsen (NI) untersuchten degenerierten, naturnahen oder vernässten Moorstandorte und bundesweiter Vergleichsstandorte (D; DRÖSLER et al. 2011). Mittelwerte, Minima und Maxima in Klammern.

Greenhouse gas emissions of degraded, natural oder rewetted peatlands on sites examined in Lower Saxony (NI) and results of a national study (D; DRÖSLER et al. 2011). Means, minimum and maximum values in parentheses.

Kategorie	Standort in Niedersachsen	THG-Emissionen (NI) [t CO ₂ -Äq./ha/a]	THG-Emissionen (D) [t CO ₂ -Äq./ha/a]
Hochmoor			
Hochmoor, trocken (degeneriertes Hochmoor)	Ahlenmoor 4 (Pfeifengras, Birke)	5,1 (3,1 - 7,2)	9,6 (5,3 - 12,1)
renaturiert (Leegmoor, 1986 wiedervernässt, kein oder geringer Überstau)	Leegmoor 1 (Pfeifengras)	-1,1 (-2,4 - 0,3)	0,1 (-1,8 - 2,9)
	Leegmoor 2 (Wollgras)	2,8 (-2,0 - 7,5)	
naturnah	Ahlenmoor 5 / 6	-1,3 (-3,9 - 1,4)	
Überstau (hier: Abtorfungsflächen)	Ahlenmoor 3	3,8 (2,7 - 4,9)	8,3 (6,1 - 10,4)
	Leegmoor 3 (<i>S. cuspidatum</i> , <i>S. fallax</i>)	3,9 (2,8 - 4,9)	
Niedermoor			
naturnah, renaturiert Überstau	Dümmer 8 nicht untersucht	2,6 (-2,9 - 8,1)	3,3 (-4,3 - 11,9) 28,3 (10,6 - 71,7)

4.3 Torfmooskultur

In Ramsloh wurde 2005 ein 1000 m² großes Versuchsfeld zur Etablierung einer Torfmooskultur angelegt (Standorteigenschaften siehe Tab. 2). Der Treibhausgasaustausch, als Mittelwert der Jahre 2010 und 2011, zeigt eine klimakühlende Wirkung von -2,8 t CO₂-Äq./ha/a (-2,2 und -3,4 in den Einzeljahren). Es wurde eine Kohlenstofffestlegung von -0,95 t C/ha/a (-0,75 bis -1,14) und eine Methanfreisetzung von 24 (16-31) kg CH₄-C/ha/Jahr gemessen. Ein signifikanter Gasfluss von Lachgas fand nicht statt. Der

mittlere Biomasseaufwuchs auf den liegenden Schwarztorfen betrug $1,02 \pm 0,08$ t C/ha/a und lag damit in gleicher Größenordnung wie die aus den Gasflussmessungen abgeleitete C-Festlegung (BEYER & HÖPER 2015). Bei einer Beerntung der Torfmoos-Biomasse würde dieser Standort zu einer leichten Treibhausgasquelle werden, da ja die Kohlenstoff-festlegung entfällt, aber die klimawirksame Methanfreisetzung in Höhe von $0,8$ t CO₂-Äq./ha/a zu Buche schlägt. Die Gesamtfreisetzung läge aber immer noch in der Größenordnung von anderen wiedervernässten Standorten ohne Ernte von Pflanzenmaterial. Bei einer Systembetrachtung müsste zudem berücksichtigt werden, dass durch die Verwendung von Torfmoosen aus Niedersachsen im Gartenbau fossile Torfe substituiert und klimawirksame Transporte, z. B. von Torf aus dem Baltikum, vermindert werden könnten.

4.4 Moorkultusole

Bei den Moorkultusolen sind im Zuge der Bodennutzung wesentliche Veränderung am Bodenprofil vorgenommen worden (AG Boden, 2006). Damit wurde das Ziel verfolgt, die landwirtschaftliche und forstliche Nutzbarkeit und die Ertragsfähigkeit der Standorte zu verbessern. Zu den Moorkultusolen zählen vor allem Sanddeckkulturen oder übersandete Moore und Sandmischkulturen.

Bei **Sanddeckkulturen**, von denen es derzeit etwa 14.000 ha in Niedersachsen gibt, wurde Sand auf den Oberboden aufgetragen und eingearbeitet, um die Befahr- und Beweidbarkeit, v.a. von mächtigen Mooren zu verbessern. Bei einer meist flachen Übersandung wurde i.d.R. Grünlandnutzung empfohlen, da hier, im Gegensatz zur Ackernutzung, nicht stetig durch Bodenbearbeitung Torf hochgepflügt und der Oxidation ausgesetzt wird. Zwei der untersuchten Standorte wurden allerdings ackerbaulich genutzt, und es zeigt sich, dass die Treibhausgasemissionen in gleicher Größenordnung liegen, wie bei ackerbaulich genutzten Mooren (Tab. 6). Bei Grünlandnutzung der Sanddeckkulturen lagen die Emissionen dagegen deutlich niedriger als bei Ackernutzung (14,9 im Vergleich zu 34,1 t CO₂-Äq./ha/a), aber auch geringer als auf Moorstandorten unter Grünlandnutzung (14,9 t im Vergleich zu 18,3 t bzw. 22,5 t CO₂-Äq./ha/a).

Tab. 6: Treibhausgasemissionen der in Niedersachsen untersuchten Sanddeckkulturen.
Greenhouse gas emissions on sand cover cultivation in Lower Saxony.

Nutzungskategorie	Standort in Niedersachsen	Treibhausgasemissionen [t CO ₂ -Äq./ha/a]
<i>Sanddeckkultur, Hochmoor</i> Acker	Surwold	26,8 (22,4 - 31,2)
<i>Sanddeckkultur, Niedermoor</i> Acker	Ochsenmoor	34,1 (33,7 - 34,4)
Grünland extensiv trocken	Ochsenmoor	14,9 (13,2 - 16,5)

Für **Sandmischkulturen** (SMK) liegen keine direkten Messungen der Treibhausgasemissionen vor. Allerdings können zur Bewertung dieser Standorte die Langzeitergebnisse aus der Boden-Dauerbeobachtung in Niedersachsen herangezogen werden (HÖPER & MEESENBURG, 2012). Der Standort Dalumer Moor (BDF024-L) wurde 1978 als Sandmischkultur angelegt und 1993 als Boden-Dauerbeobachtungsfläche in Betrieb genommen (Tab. 7). Zwischen 1993 und 2010 hat der Standort im Mittel 1,1 t C/Jahr aus der Ackerkrume verloren. Hinzu kommen N₂O-Emissionen. Diese wurden allerdings nicht direkt gemessen und müssen daher anhand vorliegender Modelle geschätzt werden. Nach FREIBAUER & KALTSCHMITT (2003) ergibt sich eine Emission von $5,1 \pm 0,6$ kg N₂O-N/ha/Jahr, nach DECHOW & FREIBAUER (2011) $2,2 \pm 1,5$ kg N₂O-N/ha/Jahr, als Mittelwert aus beiden $3,7$ kg N₂O-N/ha/Jahr. Die aktuellen Treibhausgasemissionen (CO₂ plus N₂O) der Sandmischkultur betragen somit $5,8$ t CO₂-Äq./ha/a. Historisch ist zudem zu berücksichtigen, dass die SMK zwischen dem Jahr der Einrichtung (1978) und dem Beginn der Boden-Dauerbeobachtung (1993) bereits einen Teil der organischen Substanz aus der Krume verloren hat. Dieser C-Verlust wird auf 71 t C/ha geschätzt. Dabei wurden folgende Annahmen zugrundegelegt. Der Pflughorizont besitzt eine Mächtigkeit von 30 cm. 1978 enthält er 15 % Humus ($7,5$ % C_{org}) bei einer Dichte von $1,09$ kg/l. 1993 hat der C_{org}-Gehalt auf $4,9$ % ab - und die Dichte auf $1,18$ kg/l zugenommen. Legt man diesen C-Verlust auf eine Nutzungsdauer von 100 Jahren um, so ergibt sich eine zusätzliche CO₂-Emission von $2,6$ t CO₂-Äq./ha/a.

Tab. 7: Standorteigenschaften und Bewirtschaftung der Boden-Dauerbeobachtungsfläche Dalumer Moor (BDF024-L) auf Sandmischkultur aus Hochmoor.
Site characteristics and land-use of the soil monitoring plot Dalumer Moor (BDF024-L) on deep plough cultivation.

Standort	Nutzung	Moor-Mächtigkeit	GW-Stand (Jahr) m	C _{org} cm u GOF	N _t %	pH %	Bewirtschaftung
Dalumer Moor	Acker	1,5 m	> 200	4,7	0,18	3,9	Ackergras, Kartoffeln, Mais, 240 kg N/ha/a

4.5 Abtorfung und Torfverwendung

Die Treibhausgasemissionen aus der Abtorfung und der Torfverwendung setzen sich wie folgt zusammen (HÖPER 2007):

- Emissionen der für den Torfabbau bereitgehaltenen, noch nicht abgetorften Flächen
- Emissionen der Torfabbaufächen während der Abtorfung
- Emissionen der nach Torfabbau noch nicht vernässten Flächen
- Emissionen aus der Gewinnung und Lagerung der Torfe
- Emissionen bei der Verwendung der Torfe.

Da in Niedersachsen Torfabbau nur noch auf bereits landwirtschaftlich genutzten Mooren oder degradierten und auf jeden Fall bereits entwässerten Mooren stattfindet, ist eine Entwässerung vor Beginn der Abtorfung nicht oder nur noch in geringem Umfang erforderlich. Die Emissionen nach a) entsprechen somit den, bereits vor Genehmigung des Torfabbaus stattfindenden Emissionen.

Auch während des Torfabbaus werden Treibhausgase, im Wesentlichen CO₂, freigesetzt. Nach aktuellen Messungen im Westermoor auf zwei benachbarten Standorten über jeweils 2 Jahre liegen die Emissionen nach b) im Mittel bei $5,1 \pm 1,0$ t CO₂-Äq./ha/Jahr (Tab. 8). Ähnlich hohe Emissionen können auch für c) angenommen werden, solange die Flächen nicht zu lange liegen, so dass sich eine flächendeckende Vegetation einstellt oder es zu einer Selbstvernässung durch Vernachlässigung der Entwässerungseinrichtungen kommt. Die Treibhausgasemissionen aus Torfgewinnung, -lagerung und gärtnerischer Torfverwendung, wie sie in Deutschland fast ausschließlich stattfindet, wurden von HÖPER (2007) auf 0,18 t CO₂-Äq./m³ Torf geschätzt. BEYER (2014) kommt aufgrund höherer Lagerungsdichten und höherer C-Gehalte der Torfe zu höheren Werten. Er hat für zwei aktuell abgetorfte Flächen einen Kohlenstoffexport durch Torfgewinnung von 60,9 und 64,7 t C/ha/Jahr ermittelt, entsprechend 0,22 bzw. 0,24 t CO₂-Äq./m³/Jahr bei einem Abtorfungsvolumen von 1000 m³/ha/Jahr. Bei diesen Betrachtungen wird vereinfacht angenommen, dass der gewonnene Torf mit der Abfuhr von der Fläche sofort zu CO₂ mineralisiert wird.

Derzeit werden in Niedersachsen 7,3 Mio. m³ Torf auf knapp 11.500 ha Fläche abgebaut (SCHMATZLER 2012). Daraus ergibt sich gegenwärtig eine Gesamtemission von 1,74 Mio. t CO₂-Äq./a, wovon 60.000 t CO₂-Äq./a auf die Abtorfungsflächen und der Rest auf die Torfverwendung entfallen.

Tab. 8: Standorteigenschaften und Treibhausgasemissionen der aktuellen Abtorfungsflächen.
Site characteristics and greenhouse gas emissions of areas currently under peat mining.

Einheit		Westermoor 1	Westermoor 2
Abtorfung seit		2008	2000
Weißtorf-/Schwarztorfmächtigkeit	m	0,3 / 2,1	0,1 / 1,9
Lagerungsdichte (0-20)	kg/dm ³	$0,12 \pm 0,02$	$0,11 \pm 0,01$
THG-Emission auf der Fläche	t CO ₂ -Äq./ha/Jahr	$5,7 \pm 0,3$	$4,5 \pm 0,02$
Torfexport	t C/ha/Jahr	$64,7 \pm 10,8$	$60,9 \pm 5,5$
mittlere Wasserstände	cm u. GOF	35	51

Lagerungsdichte je Standort als Mittelwert aus 2 Terminen (März und Juni), 2 Schichten (0-10, 10-20 cm) jeweils beprobt mit 10 Stechzylindern à 250 ml

5. Gesamtmissionen Niedersachsen

Aus den oben zusammengestellten standort- und nutzungsspezifischen Treibhausgasemissionen der organischen Böden wurden unter Nutzung von Informationen über die flächenhafte Verbreitung der Moore die Treibhausgasemissionen für Moor und Torf errechnet (Kapitel 5.1). Für den Bereich der Torfgewinnung wurde zudem ermittelt, wie sich die landesweiten Emissionen auf diesem Sektor zukünftig entwickeln werden (Kapitel 5.2).

5.1 Treibhausgasemissionen anhand der aktuellen Flächenkulisse

HÜBSCH et al. (2013) haben basierend auf der noch im Entwurf befindlichen Bodenkarte im Maßstab 1:50.000 (BK50) die aktuelle Moorfläche und die Nutzung der Moore nach ATKIS ermittelt. Anhand dieser Flächenkulisse wurden Treibhausgasemissionen aus niedersächsischen Mooren sowie aus der Torfgewinnung und Nutzung von knapp 10,6 Mio. t CO₂-Äq./ha/a ermittelt (Tab. 9). Davon gehen 80 % auf die landwirtschaftliche Moornutzung (incl. Extensivgrünland) und 14 % auf Torfgewinnung und -nutzung zurück (Abb. 1).

Tab. 9: Gesamtfläche und Treibhausgasemissionen Niedersächsischer Hoch- und Niedermoore nach Nutzung. Fläche und Nutzung nach HÜBSCH et al. (2013) basierend auf der Bodenkarte 1:50.000 (Stand: Juli 2013).

Total area and greenhouse gas emissions of bogs and fens in Lower Saxony, differentiated by land use. Area and land use following HÜBSCH et al. (2013), based on the Soil Map 1:50.000 (status: July 2013).

Nutzung	Fläche [ha]			THG-Emissionen [t CO ₂ -Äq./ha/a]		
	Hochmoor	Niedermoor	Summe	Hochmoor	Niedermoor	Summe
Acker	22.356	28.918	51.274	719.863	977.428	1.697.292
Grünland, davon	109.961	131.571	241.532			
- Wirtschaftsgrünland	ca. 94.000	ca. 124.000	218.000	2.434.600	3.831.600	6.266.200
- Extensivgrünland ^a	ca. 15.961	ca. 7.571	23.532	288.734	96.987	385.722
Forst ^b	19.914	24.038	43.952	101.561	202.726	304.287
Naturnah ^c	39.024	1.507	40.531	189.071	3.918	192.989
Abtorfung ^d	11.500		11.500	1.740.000		1.740.000
Summe	202.755	186.034	388.789	5.473.830	5.112.660	10.586.490

^a Annahme Hochmoor (HH): 90 % extensiv trocken, 10 % extensiv nass; Niedermoor (HN): 70 % extensiv trocken, 30 % extensiv nass; ^b HH: HÖPER (2007); HN: 50 % HÖPER (2007), 50 % (FREIBAUER, unveröffentlicht 11 t CO₂-Äq./ha/a); ^c Annahme HH: 95% Hochmoor trocken, 5% naturnah; ^d von Abtorfungsflächen und aus gärtnerischer Torfnutzung

5.2 Entwicklung der Treibhausgasemissionen aus Torfabbau

In den kommenden Jahren wird die Torfgewinnung deutlich zurückgehen (SCHMATZLER 2012) und damit auch die Treibhausgasemissionen. Betrachtet man die bereits genehmigten Abbauverfahren, ergibt sich die grüne Kurve, nimmt man derzeit beantragte Verfahren

mit dazu, die blaue Kurve, wobei zu berücksichtigen ist, dass nicht alle Anträge in vollem Umfang bewilligt werden (Abb. 2). Danach werden sich die Torfgewinnung in Niedersachsen und die damit verbundenen Treibhausgasemissionen in den kommenden 10 Jahren mindestens halbieren.

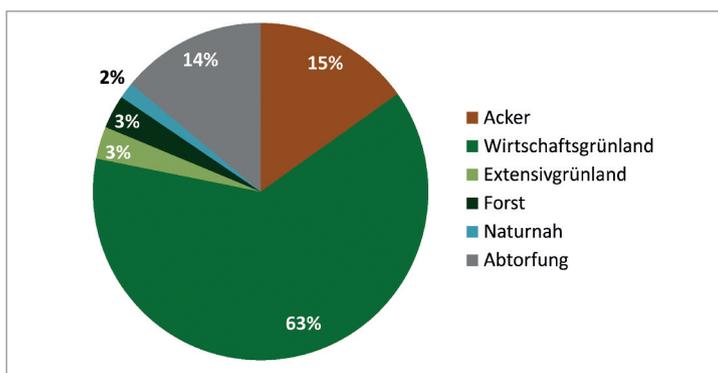


Abb. 1: Anteil der Treibhausgasemissionen aus unterschiedlichen Moornutzungen und der Torfgewinnung an den Gesamtemissionen des Sektors Moor und Torf in Niedersachsen (nach Tab. 9). Percentage of greenhouse gas emissions due to different forms of land use on peatlands and due to the use of peat for horticultural purposes relative to the total emissions from peatlands and peat in Lower Saxony (Tab. 9).

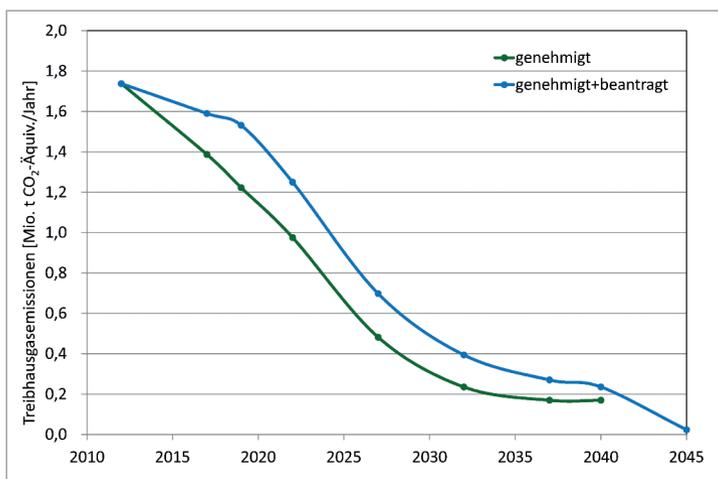


Abb. 2: Prognostizierte Treibhausgasemissionen aus der Torfgewinnung und -verwendung in Niedersachsen. Eigene Berechnungen, basierend auf den genehmigten bzw. zusätzlich beantragten Torfgewinnungsmengen nach SCHMATZLER (2012).

Predicted greenhouse gas emissions from peat excavation and horticultural use in Lower Saxony. Own estimates based on authorised and requested excavation rights according to SCHMATZLER (2012).

6. Zeitliche Entwicklungen der Treibhausgasemissionen

Die oben dargestellten jährlichen Werte für Treibhausgasemissionen stellen einen statistischen Zustand dar, der so über Jahrzehnte nicht immer gegeben ist. Ursachen für Veränderungen der Emissionen im Laufe der Zeit können sein:

- a) Veränderungen aufgrund einer systemimmanenten Abfolge von Nutzungen, z. B. Torfabbau mit Folgenutzung Naturschutz
- b) Veränderungen innerhalb einer Übergangszeit nach Nutzungsänderung, z. B. erhöhte Methanfreisetzung in den ersten Jahren nach Vernässung
- c) Selbstvernässung von Standorten durch Höhenverluste in Verbindung mit nicht dränfähigen Stauschichten (Schwarztorf) oder nicht möglicher Vertiefung der Vorflut
- d) Veränderungen aufgrund des prognostizierten Klimawandels, v.a. hinsichtlich veränderter Saisonalität der Niederschläge und Anstieg der Temperaturen
- e) Reduktion der Moorfläche, da die Torfe meist von den Moorrändern her komplett oxidiert oder umgebrochen werden.

Es ist daher sinnvoll, Szenarienberechnungen anzustellen, die die Entwicklung der Standorte über die Zeit abbilden. Hierzu werden im Folgenden 2 Beispiele dargestellt.

6.1 Torfabbau versus landwirtschaftliche Moornutzung

Mit Umsetzung des Niedersächsischen Moorschutzprogramms (1981, 1986, 1991) ist Torfabbau im Wesentlichen nur noch auf landwirtschaftlich genutzten Hochmooren genehmigungsfähig. Als Folgenutzung ist Wiedervernässung und Naturschutz vorgesehen, verbunden mit der Auflage, neben liegenden Niedermoortorfen mindestens 50 cm Hochmoor-Schwarztorf in den Abbauflächen zu belassen. Durch die Wiedervernässung werden diese Resttorfe vollständig vor weiterer Zersetzung geschützt. Nach einer Übergangszeit wird Torfwachstum ermöglicht, das zu einer, wenn auch geringfügigen Senkenfunktion des Standortes für Treibhausgase führt. Erfolgt dagegen kein Torfabbau auf der Fläche, wird die landwirtschaftliche Nutzung als Ackerland oder Wirtschaftsgrünland fortgesetzt. Die Wasserverhältnisse werden entsprechend der Erfordernis einer Befahr- oder Beweidbarkeit reguliert, und es kommt zu Höhenverlusten von 1 bis 2 cm pro Jahr mit entsprechender Freisetzung von klimarelevantem Kohlendioxid sowie zusätzlich, aufgrund der Düngung, von besonders klimaschädlichem Lachgas. Für eine vergleichende Betrachtung sind zeitliche Szenarien erforderlich, da vor allem der Torfabbau eine zeitliche Abfolge unterschiedlicher Maßnahmen mit einer deutlich unterschiedlichen Klimawirkung darstellt.

Aus der Szenarienbetrachtung ergibt sich, dass der Torfabbau zwar zu einer beschleunigten Freisetzung an Treibhausgasen führt, dass aber nach 70 bis 80 Jahren unter Ackernutzung und 80 bis über 100 Jahren unter Intensivgrünland die gleichen kumulierten Treibhausgasemissionen erreicht werden (Abb. 3). Nach diesem Break-even Punkt gehen die Emissionen unter landwirtschaftlicher Nutzung weiter, bis der Torfkörper komplett mineralisiert ist, während nach Torfabbau und Wiedervernässung der restliche Torfkörper konserviert und ein wachsendes Hochmoor begünstigt wird.

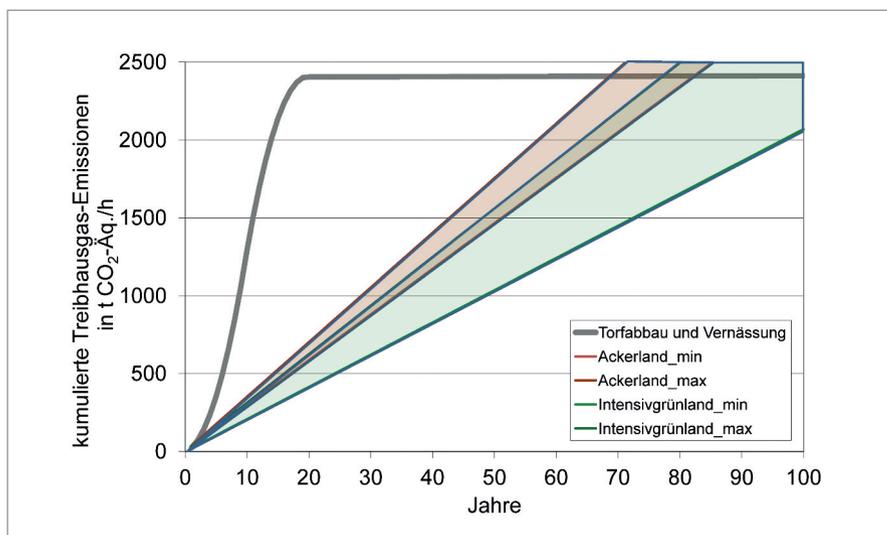


Abb. 3: Kumulierte Freisetzung an Treibhausgasen bei Torfabbau, einschließlich gärtnerischer Torfnutzung und anschließender Vernässung, im Vergleich zu landwirtschaftlicher Nutzung als Acker oder Intensivgrünland (jeweils Minima und Maxima aus Tab. 3) für einen Zeitraum von 100 Jahren.

Annahmen: Es stehen 1,5 m Hochmoortorf an, davon wird 1 m zur Torfgewinnung innerhalb von 10 Jahren abgebaut, 0,5 m bleiben für die anschließende Vernässung stehen. Die gewonnenen Torfe werden innerhalb von 10 Jahren komplett mineralisiert. Auf den landwirtschaftlich genutzten Mooren wird die Vorflut stetig den Höhenverlusten angepasst.

Cumulated greenhouse gas emissions from peat excavation, including horticultural peat use and rewetting of the excavation area, compared to agricultural use as arable land or intensive grassland (minima and maxima from Tab. 3) over a period of 100 years.

Assumptions: There are 1,5 m of peat, of which 1 m is excavated within 10 years. 0,5 m of peat remain for rewetting. The excavated peat is mineralized within 10 years after excavation. Under agricultural land use the water table is regularly adjusted to maintain good conditions for farming.

6.2 THG-Emissionen nach der Vernässung von Abtorfungsflächen

Bei der Vernässung von Mooren kann es in den ersten Jahren bis Jahrzehnten zu deutlich erhöhten Treibhausgasemissionen kommen, wenn durch Überstau Gärprozesse von leicht umsetzbarem Pflanzenmaterial ausgelöst werden. Vor allem bei der Vernässung von Niedermoorstandorten wurden hohe Methanemissionen beobachtet, die in ihrer Klimawirkung die potenzielle Funktion eines Standortes als CO₂-Senke deutlich übersteigen. AUGUSTIN & JOOSTEN (2007) gehen davon aus, dass diese Phase mehr als 15 Jahre dauert, bevor sich die Treibhausgasflüsse vernässter Moore denen von naturnahen Mooren nähern könnten.

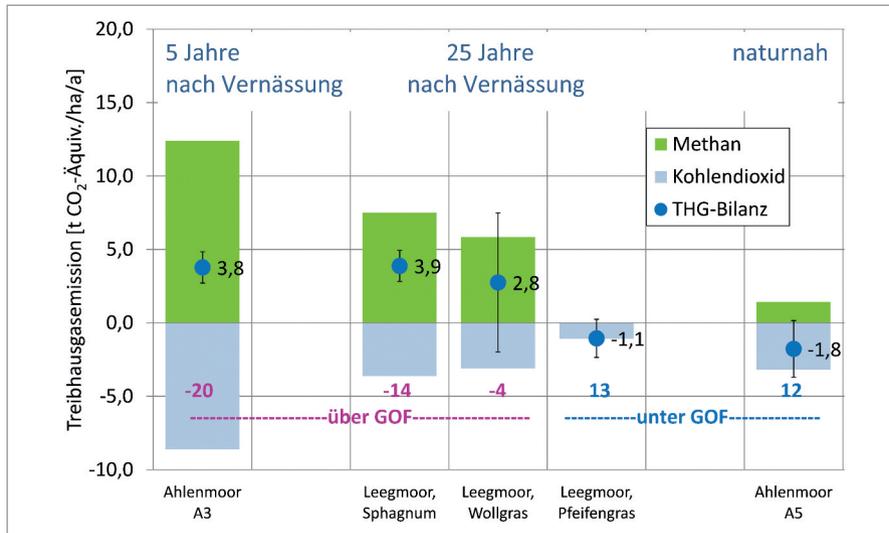


Abb. 4: Methan- und Kohlendioxidaustausch, Treibhausgasbilanz (THG-Bilanz) (Mittelwerte, Minima und Maxima von 2 Untersuchungsjahren) und Wasserstände von vernässten Abtorfungsflächen nach unterschiedlicher Vernässungsdauer, und einem naturnahen Hochmoor als Referenzfläche. Exchange of methane and carbon dioxide, greenhouse gas balance (mean, minimum and maximum of two years) and water table (cm below surface) of rewetted former peat excavation areas, as a function of time elapsed since rewetting and compared to a natural mire site as a reference.

Für Niedersachsen kann eine erste Chronologie der Treibhausgasflüsse nach der Vernässung von Abtorfungsflächen erstellt werden (Abb. 4). Zunächst zeigt sich, dass die überstauten ehemaligen Abtorfungsflächen auch kurz nach Beginn der Vernässung deutlich geringere Treibhausgasemissionen mit 3,8 t CO₂-Äq./ha/a als überstaute Niedermoore mit im Mittel 28,3 t CO₂-Äq./ha/a (Tab. 5) aufweisen. Nach 25 Jahren Vernässung fällt die Bilanz gemischt aus. In überstauten Teilbereichen treten gleich hohe Emissionen wie auf der frisch vernässten Fläche auf. Die Emissionen werden vor allem durch die Methanfreisetzung bestimmt, allerdings findet eine deutliche C-Festlegung und damit Torfbildung statt. Bei Wasserständen leicht unter Flur gehen die Methanemissionen deutlich zurück, allerdings nimmt auch die C-Festlegung ab; dennoch zeigt der Standort eine leicht kühlende Wirkung. Allerdings sind im Leegmoor nach 25 Jahren im Mittel der untersuchten Varianten noch nicht wieder die Verhältnisse naturnaher Moore erreicht.

Bei dieser Bewertung ist aber auch zu berücksichtigen, dass zwar immerhin zweijährige Messreihen vorliegen und damit eine gewisse klimatische Varianz einbezogen worden ist, aufgrund der Aufwändigkeit der Verfahren aber nur einzelne Standorte untersucht werden konnten.

Im Vergleich zu den Annahmen von AUGUSTIN & JOOSTEN (2007) bleibt festzustellen, dass nach eigenen Messungen die Methanemissionen auf vernässten Hochmooren deutlich geringer sind als auf vernässten Niedermooren, dass aber die Übergangszeit zwischen Ver-

nässung und Wiederherstellung natürlicher Verhältnisse mehr als 25 Jahre betragen kann. Offen ist, wie sich die Vernässung von Hochmoorgrünland auf die Methanemissionen auswirkt, wenn hier eine mit Nährstoffen angereicherte Grasnarbe unter Wasser gesetzt wird. Wichtig ist, die Böden vor Überstau zu hagen (vor allem Kalium wäscht schnell aus), möglichst viel pflanzliche Biomasse von der Fläche zu entfernen und den Überstau so gering wie möglich zu halten. Das Entfernen der Krume (20-30 cm) ist aus Kostengründen sowie aufgrund der Treibhausgasfreisetzung bei der Mineralisation der entnommenen Torfe in der Regel nicht zu empfehlen, könnte jedoch auf stark eutrophierten Standorten die Bedingungen für die Ansiedlung moortypischer Pflanzen verbessern.

7. Möglichkeiten und Grenzen zur Verminderung der Treibhausgasemissionen

Aus den Untersuchungen von DRÖSLER et al. (2011) und den in Kap. 4 dargestellten Ergebnissen lässt sich ableiten, dass der Wasserstand der wichtigste Bestimmungsfaktor für die Treibhausgasemissionen ist und dass die Nutzungsintensität eine gewisse, aber eher untergeordnete Rolle spielt. Zudem zeigt sich nach Kap. 5.1, dass eine deutlich Reduktion der landesweiten Emissionen nur durch eine Einbeziehung der landwirtschaftlich genutzten Moore erreicht werden kann.

So kann durch die **Umwandlung von Acker zu Grünland** oder durch eine **Extensivierung der Grünlandnutzung** bei unveränderten Wasserständen in etwa eine Emissionsminderung um 10 bis 30 % erreicht werden. Unter aktuellen wirtschaftlichen Verhältnissen ist die Kosteneffizienz dieser Maßnahmen eher gering, da der relativ geringen Emissionsminderung hohe betriebswirtschaftliche Kosten durch eine deutliche Reduzierung des Deckungsbetrages gegenüberstehen (DRÖSLER et al. 2013).

Eine deutliche Reduzierung der Treibhausgasemissionen kann nur durch eine **Anhebung der Wasserstände** erzielt werden. Hier stellt sich die Frage, inwieweit durch eine aktive Steuerung Wasserstände dergestalt optimiert werden können, dass eine betriebswirtschaftlich orientierte Landwirtschaft bei einer gleichzeitigen Reduktion der Emissionen möglich ist. Dazu müssten im Jahresmittel Wasserstände deutlich höher als 50 cm unter Flur eingestellt werden. Allerdings sind hierbei die Grenzen für die Beweidung und Befahrung zu beachten. Günstig wäre eine Wiesen- oder Ackernutzung, die nur ein gelegentliches Befahren erfordert. Für die Befahrung wären Wasserstände nicht höher als 35 bis 40 cm unter Flur erforderlich. Auch wäre eine Anpassung der Fahrzeugtechnik möglich (z. B. Niederdruckreifen, leichte Fahrzeuge), um die Befahrbarkeit auf den nassen Standorten zu verbessern. Durch diese Maßnahmen könnten die THG-Emissionen um 30-40 % gesenkt werden bei Aufrechterhaltung einer betriebswirtschaftlich orientierten Landwirtschaft. Dem wären allerdings die Kosten der Wasserregulierung gegenüberzustellen. Auch stellen die Topographie und die eingeschränkte Wasserleitfähigkeit der Torfe auf manchen Standorten Hindernisse für eine erfolgreiche Teilvernässung dar.

Optimal wäre eine **vollständige Vernässung** der landwirtschaftlich genutzten Moore. Dadurch könnten die Emissionen an diesen Standorten um 90 % und mehr gesenkt werden.

Eine betriebswirtschaftlich orientierte, klassische Landwirtschaft ist dann nicht mehr möglich. Nach Schätzungen von FLESSA et al. (2012) kann durch eine vollständige Vernässung von 5 bzw. 20 % des Moorgrünlandes eine Minderung der Treibhausgasemissionen um 280.000 bzw. 1.130.000 t CO₂-Äq./a erzielt werden. Dies entspricht 2,6 bzw. 10,6 % der aktuellen Treibhausgasemissionen aus Moor und Torf in Niedersachsen (vgl. Tab. 9). Offen ist, ob im Bereich der energetischen oder stofflichen Verwertung von moortypischem Pflanzenmaterial (Schilf, Rohrkolben, Erle, Weide) betriebswirtschaftliche Alternativen zur Bewirtschaftung nasser Moore entwickelt werden können.

Auch in Naturschutzgebieten und auf den nach Torfgewinnung vernässten Flächen kann durch eine Optimierung der Wasserstände eine Reduktion der Treibhausgasemissionen erreicht werden. So weisen Hochmoordegenerationsstadien mit Birkenbewuchs, Pfeifengras- oder Heidevegetation Treibhausgasemissionen von etwa 10 t CO₂ Äq./ha/a auf, die durch Vernässungsmaßnahmen deutlich gesenkt werden können. Auch auf vernässten Abtorfungsflächen gibt es trockenere oder überstaute Bereiche mit erhöhten Emissionen. Hier kann durch Justierung der Wasserstände eine Minderung der Emissionen erreicht werden. Mittlere Jahreswasserstände von etwa 10 cm unter Flur wären anzustreben, wobei die Topographie und die zwischenjährlichen Witterungsschwankungen der Optimierung der Wasserstände Grenzen setzen.

Im Hinblick auf den Erfolg geplanter Vernässungsmaßnahmen sind u.a. folgende Aspekte zu berücksichtigen:

- Lassen sich entsprechende Wasserrechtsverfahren umsetzen?
- Steht genug Wasser in erforderlicher Qualität zur Verfügung?
- Welche Wasserstände lassen sich über welchen Zeitraum unter Berücksichtigung von klimatischen Bedingungen, Stauschichten und Gebietswasserstand einstellen?
- Wie wirken sich hohe Nährstoffgehalte im Oberboden auf den Renaturierungserfolg aus und ist eine Hagerung der Standorte vor Vernässung sinnvoll?
- Welche Folgen haben Geländeunebenheiten für die Kosten (Dichte der Dämme und Stauanlagen) und den Renaturierungserfolg?
- Stehen dauerhaft Kapazitäten für ein Monitoring (Vegetation, Wasserstände) und für die Wartung der Vernässungseinrichtungen zur Verfügung?

Auch die **Aufforstung ehemals landwirtschaftlich genutzter Moore** bei gleichzeitiger Anhebung der Wasserstände ist denkbar. Rein rechnerisch wäre eine Emissionsminderung um 50 % gegenüber Acker oder Intensivgrünland möglich, die teilweise auf Extensivierung (Unterlassung von Düngung und Bodenbearbeitung), teilweise auf die Vernässung zurückgeführt werden kann. Neben forstwirtschaftlichen Aspekten ist hierbei aber auch zu beachten, dass Wälder eine höhere Verdunstung als Offenlandstandorte haben und es daher vor allem in den Sommermonaten zu einem stärkeren Austrocknen des Oberbodens mit einer Erhöhung der CO₂-Emissionen kommen kann (HÖPER, 2007).

Der Tiefumbruch von Mooren, v.a. die Anlage von Sandmisch- und Sanddeckkulturen, kann ebenfalls zu einer Reduktion der Treibhausgasemissionen beitragen, indem Torf durch Sand abgedeckt und die Torfmineralisation gemindert wird. Bei fachgerechter Erstellung entstehen ertragsstabile Standorte, die Sandböden gleichzusetzen sind. Solche

Maßnahmen wären allerdings nur für Gebiete in Betracht zu ziehen, die aus Sicht des Naturschutzes nicht von Interesse und auch nicht als Pufferflächen für renaturierte Bereiche vorzuhalten sind. Bedingung bei den Sanddeckkulturen wäre außerdem, dass die Sandüberdeckung eine Mächtigkeit von mehr als 35 cm aufweist und somit das Hochpflügen von Torf unmöglich gemacht wird. Beide Systeme sind allerdings nicht vollständig klimaneutral. Sandmischkulturen verlieren in den ersten Jahrzehnten etwa die Hälfte des in der Krume gebundenen Kohlenstoffs, der als CO₂ in die Luft freigesetzt wird (KUNTZE 1987). Der unterhalb der Krume liegende Torf wird zwar deutlich langsamer umgesetzt als der im Oberboden, dennoch kann man auch hier eine gewisse Mineralisation der im Unterboden oberhalb des Wasserspiegels liegenden Torfe annehmen.

In der **Reduzierung der Torfverwendung** liegt ebenfalls ein Potenzial zur Reduzierung der Treibhausgasemissionen. So kann die Torfverwendung im nicht-gewerblichen Bereich weiter vermindert und im gewerblichen Bereich der Einsatz von Torfsubstituten weiter vorangetrieben werden. Probleme bereiten hier allerdings die häufig ungünstigen Substrateigenschaften der Substitute im Vergleich zum Torf sowie die Konkurrenz zwischen der stofflichen und energetischen Verwertung vieler organischer Materialien.

8. Emissionsminderungskosten

Für einen transsektoralen Vergleich der Kosteneffizienz von Klimaschutzmaßnahmen werden Emissionsminderungskosten ermittelt, d.h. die Kosten werden auf die Emissionsminderung bezogen und in €/t CO₂-Äq. angegeben. Bei Renaturierungs- oder Vernässungsprojekten auf Moorstandorten entstehen Kosten u.a. durch Landerwerb, Pacht bzw. Ausgleich für den Verlust an Deckungsbeitrag beim Bewirtschafter, technische Maßnahmen, ggf. Anpassungen der regionalen Infrastruktur (z. B. Verlegung von Straßen und baulichen Einrichtungen) und Wassermanagement (z. B. Beiträge für Wasser- und Bodenverbände). Bei dieser Vorgehensweise werden Investitionen und Landerwerbskosten in der Regel auf 20 Jahre abgeschrieben (DRÖSLER et al., 2013). Dies ist ein konservativer Ansatz, der eher zu hohen Kosten kommt. Bauliche Einrichtungen haben eher längere Laufzeiten, und vernässte Moore können über Jahrhunderte niedrigere Emissionen im Vergleich zum nicht vernässten Zustand aufweisen, so dass die tatsächlichen Emissionsminderungskosten deutlich niedriger ausfallen dürften.

DRÖSLER et al. (2012) haben Emissionsminderungskosten für Großschutzgebiete ermittelt, die vorrangig aus Naturschutzgründen angelegt worden sind und bei denen sich aufgrund von Synergieeffekten auch ein Beitrag zum Klimaschutz eingestellt hat. Für ein 923 ha großes Vernässungsgebiet im Ochsenmoor (Dümmer) ermitteln sie Emissionsminderungskosten von 50 bis 67 €/t CO₂-Äq. Im Mittel aller Flächen konnten die THG-Emissionen um 12 bis 15 t CO₂ Äq./ha/a vermindert und damit etwa halbiert werden. Aufgrund des Schutzzweckes „Vogelschutz“, der ein Offenhalten der Flächen durch eine jährliche Mahd erfordert, müssen die Wasserstände im Sommerhalbjahr abgesenkt werden. Dadurch kann derzeit keine weitere Minderung der Treibhausgasemissionen oder sogar eine vollständige Konservierung des Torfkörpers erreicht werden.

Im Rahmen des vom BMBF geförderten Forschungsprojektes „Klimaschutz – Moornutzungsstrategien“ (2006-2010) wurden in nordwestdeutschen, nordostdeutschen und bayrischen Moorgebieten detaillierte Betriebs- und Expertenbefragungen durchgeführt (DRÖSLER et al. 2011, SCHALLER et al. 2012). Auf Grundlage dieser Daten wurden Deckungsbeiträge der Moorflächen unter landwirtschaftlicher Nutzung und der Naturschutzflächen berechnet. Weiterhin wurden Kosten für das Wassermanagement und zum Teil Kosten für die aufgrund der Vernässung erforderlichen infrastrukturellen Maßnahmen (Straßenbau, Erwerb von Hofstellen) ermittelt und der potenziellen Emissionsminderung bei Umsetzung der Maßnahmen gegenübergestellt. Es zeigte sich, dass die Treibhausgasvermeidungskosten am geringsten sind, wenn

- extensive, kaum oder nicht landwirtschaftlich genutzte Flächen vernässt werden;
- intensiv landwirtschaftlich genutzte Flächen vollständig bis zum naturnahen Zustand unter Nutzungsaufgabe vernässt werden (DRÖSLER et al. 2011)

Im ersten Fall ist zwar die Emissionsminderung pro Hektar nicht so hoch, die Opportunitätskosten (i.d.R. Pacht- oder Kaufpreise) sind aber auch verhältnismäßig gering. Im zweiten Fall entstehen zwar infolge der Nutzungsaufgabe hohe Opportunitätskosten, diesen steht aber auch eine hohe Emissionsminderung gegenüber.

Für 4 Projektgebiete in Brandenburg, Bayern und Niedersachsen (Ahlenmoor, Dümmer) ergaben sich Emissionsminderungskosten zwischen 15 und 135 €/t CO₂-Äq. Diese Werte liegen zwar deutlich über dem Preis der an der Emissionsbörse in Leipzig gehandelten Emissionsrechte (7,26 €/t CO₂, Stand 20.02.2015). Andere Verfahren der landnutzungsgebundenen Energiegewinnung aus Biomasse weisen vergleichsweise höhere Emissionsminderungskosten auf, so z. B. Verfahren zur Gewinnung von Strom und Wärme aus Biogas mit Minderungskosten zwischen 50 und mehr als 300 €/t CO₂ (WBA 2007). Und hierbei sind die durch die Nutzung induzierten Emissionen aus dem Boden, z. B. abnehmende Humusgehalte oder düngungsabhängige N₂O-Emissionen, noch nicht berücksichtigt (BUTTERBACH-BAHL et al. 2012). Vermeidungskosten von Moorrenaturierungsmaßnahmen liegen somit durchaus in einem konkurrenzfähigen Bereich.

9. Schlussfolgerungen

Landwirtschaftlich oder forstlich genutzte, gedränte Moore setzen in wesentlichem Umfang Treibhausgase frei. Durch vollständige Vernässung können die Emissionen stark reduziert und die noch vorhandenen Torfe konserviert werden. Eine nennenswerte Senke für Treibhausgase kann durch solche Maßnahmen nicht erreicht werden. Einer Festlegung von Kohlendioxid bei der Torfbildung ist die Methanfreisetzung gegenüberzustellen, so dass sich renaturierte Standorte im günstigsten Falle etwa klimaneutral verhalten.

Methoden zur direkten Messung der Treibhausgasemissionen sind sehr aufwändig und werden auf absehbare Zeit nicht für einen Routineeinsatz zur Verfügung stehen. Nach zwei bundesweiten Forschungs- und Entwicklungsprojekten und mindestens zweijährigen Messungen an 22 Standorten in Niedersachsen und mehr als 100 Standorten in Deutsch-

land lassen sich jedoch die Treibhausgasemissionen für die wichtigsten Kombinationen aus Moortyp und Landnutzung mit ausreichender Genauigkeit abschätzen. Auch lässt sich anhand einer Regressionsformel der Einfluss von Wasserständen und Nutzungsintensität abbilden. Eine Bestimmungsungenauigkeit von knapp 30 % ist dabei zu berücksichtigen. Für die Betrachtung zukünftiger Emissionen sind Szenarienberechnungen erforderlich, die den Rückgang der Moorfläche, Änderungen in der Wasserführung durch Selbstvernässung oder Dränabbau und typische Nutzungsabfolgen, wie z. B. Vernässung nach Torfabbau, berücksichtigen.

Aus den geschätzten Emissionen vor und nach der Umsetzung von Vernässungs- und Extensivierungsmaßnahmen kann die Emissionsminderung ermittelt und den Kosten gegenübergestellt werden. Volkswirtschaftlich ist es sinnvoll, eine vollständige Renaturierung unter Nutzungsaufgabe anzustreben, da den Kosten eine maximale Reduktion der Treibhausgasemissionen gegenübergestellt werden kann. Dadurch ergeben sich Emissionsminderungskosten, die konkurrenzfähig mit anderen landnutzungsbezogenen Maßnahmen sind. Extensivierungsmaßnahmen ohne Vernässung führen dagegen nur zu einer relativ geringen Emissionsminderung, häufig in Verbindung mit einer deutlichen Reduktion der landwirtschaftlichen Deckungsbeiträge, so dass die Emissionsminderungskosten relativ hoch ausfallen.

Bei der Bewertung all dieser Maßnahmen gilt es aber auch, die soziale Nachhaltigkeit für den ländlichen Raum nicht aus den Augen zu verlieren.

10. Danksagung

Die Untersuchungen wurden gefördert durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) und das Thünen Institut, Braunschweig, im Rahmen von zwei bundesweiten Projekten unter Leitung von Prof. Dr. M. Drösler (Hochschule Weihenstephan-Triesdorf).

11. Literaturverzeichnis

- AG BODEN (2006): [Ad-hoc-Arbeitsgruppe der Geologischen Landesämter und der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe der Bundesrepublik Deutschland]. Bodenkundliche Kartieranleitung. – 5. Aufl: 438 S., Stuttgart (Schweizerbart).
- AUGUSTIN, J. & JOOSTEN, H. (2007): Peatland rewetting and the greenhouse effect. – *IMCG Newsletter*, **12**: 29-30.
- BEETZ, S., LIEBERSBACH, H., GLATZEL, S., JURASINSKI, G., BUCZKO, U. & HÖPER, H. (2013): Effects of land use intensity on the full greenhouse gas balance in an Atlantic peat bog. – *Biogeosciences* **10**: 1067-1082.

- BEYER, J. C. (2014): Greenhouse gas exchange of organic soils in Northwest Germany Effects of organic soil cultivation, agricultural land use and restoration. – Dissertation an der Universität Bremen, Institut für Geographie. 262 S. <http://elib.suub.uni-bremen.de/edocs/00103939-1.pdf> (24.02.2015).
- BEYER, C. & HÖPER, H. (2015): Greenhouse gas exchange of rewetted bog peat extraction sites and a *Sphagnum* cultivation site in northwest Germany. – *Biogeosciences* **12**: 2101-2117.
- BEYER, C., LIEBERSBACH, H. & HÖPER, H. (2015): Multiyear greenhouse gas flux measurements on a temperate fen soil used for cropland or grassland. – *J. Plant Nutr. Soil Sci.* **178**(1): 99-111.
- BUTTERBACH-BAHL, K., LEIBLE, L., KÄLBER, S., KAPPLER, G. & KIESE, R. (2012): Treibhausgasbilanz nachwachsender Rohstoffe – eine wissenschaftliche Kurzdarstellung. – Karlsruher Institut für Technologie (KIT), KIT Scientific Report **7556**: 56 S., Karlsruhe (KIT Scientific Publishing).
- CLYMO, R.S. (1984): The limits to peat bog growth. – *Philosophical Transactions of the Royal Society of London* **B 303**: 605-654.
- DECHOW, R.; FREIBAUER, A. (2011): Assessment of German nitrous oxide emissions using empirical modelling approaches. – *Nutrient cycling in agroecosystems* **91** (3): 235-254.
- DRÖSLER, M., AUGUSTIN, J., BERGMANN, L., FÖRSTER, C., FUCHS, D., HERMANN, J., KANTELHARDT, J., KAPFER, A., KRÜGER, G., SCHALLER, L., SOMMER, M., SCHWEIGER, M., STEFFENHAGEN, P., TIEMEYER B. & WEHRHAN, M. (2012): Beitrag ausgewählter Schutzgebiete zum Klimaschutz und dessen monetäre Bewertung. – *BfN-Skripten* **328**: 1-163.
- DRÖSLER, M., FREIBAUER, A., ADELMANN, W., AUGUSTIN, J., BERGMANN, L., BEYER, C., CHOJNICKI, B., FÖRSTER, C., GIEBELS, M., GÖRLITZ, S., HÖPER, H., KANTELHARDT, J., LIEBERSBACH, H., HAHNSCHÖFL, M., MINKE, M., PETSCHOW, U., PFADENHAUER, J., SCHALLER, L., SCHÄGNER, P., SOMMER, M., THUILLE, A. & WEHRHAN, M. (2011): Klimaschutz durch Moorschutz in der Praxis. Ergebnisse aus dem BMBF-Verbundprojekt „Klimaschutz – Moornutzungsstrategien“ 2006-2010. – *vTI-Arbeitsberichte* **4/2011**: 1-21.
- DRÖSLER, M., FREIBAUER, A., ADELMANN, W., AUGUSTIN, J., BERGMANN, L., BEYER, C., CHOJNICKI, B., FÖRSTER, C., GIEBELS, M., GÖRLITZ, S., HÖPER, H., KANTELHARDT, J., LIEBERSBACH, H., HAHNSCHÖFL, M., MINKE, M., PETSCHOW, U., PFADENHAUER, J., SCHALLER, L., SCHÄGNER, P., SOMMER, M., THUILLE, A. & WEHRHAN, M. (2013): Abschlussbericht BMBF-Verbundprojekt „Klimaschutz – Moornutzungsstrategien“ 2006-2010. – <http://edok01.tib.uni-hannover.de/edoks/e01fb13/735500762.pdf> (26.09.2014).
- FLESSA, H., MÜLLER, D., PLASSMANN, K., OSTERBURG, B., TECHEN, A., NITSCH, H., NIEBERG, H., SANDERS, J., MEYER ZU HARTLAGE, O., BECKMANN, E. & ANSPACH V. (2012): Studie zur Vorbereitung einer effizienten und gut abgestimmten Klimaschutzpolitik für den Agrarsektor. *Landbauforschung* **SH 361**: 1-472.
- FREIBAUER, A. & KALTSCHMITT, M. (2003) Controls and models for estimating direct nitrous oxide emissions from temperate and subboreal agricultural mineral soils in Europe. – *Biogeochemistry* **63**: 93-115.
- HÖPER, H. (2007): Freisetzung klimarelevanter Gase aus deutschen Mooren. – *Telma* **37**: 85-116.

- HÖPER, H. & MEESENBURG, H. (Hrsg.) (2012): 20 Jahre Bodendauerbeobachtung in Niedersachsen. – Geoberichte **23**: 1-254.
- HÜBSCH, L., ENGEL, N., BOESS, J., MÜLLER, U., HÖPER, H., SCHÄFER, W., LANGNER, S. & GEHRT, E. (2013): Erstellung einer Gebietskulisse von Böden mit hohen Kohlenstoffgehalten im Auftrag des Niedersächsischen Ministeriums für Umwelt, Energie und Klimaschutz. – Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie, Hannover, 46 S. (unveröffentlicht).
- IPCC (2007): Intergovernmental Panel on Climate Change: IPCC Fourth Assessment Report: Climate Change 2007. Cambridge and New York (Cambridge University Press).
http://www.ipcc.ch/publications_and_data/ar4/syr/en/contents.html (26.09.2014).
- KUNTZE, H. (1987): Prozesse der Bodenentwicklung auf Sandmischkulturen. – Telma **17**: 41-49.
- NIEDERSÄCHSISCHES MINISTERIUM FÜR UMWELT, ENERGIE UND KLIMASCHUTZ (2012): Regierungskommission Klimaschutz: Empfehlungen für eine niedersächsische Klimaschutzstrategie. – 170 S., Hannover (NIEDERSÄCHSISCHES MINISTERIUM FÜR UMWELT, ENERGIE UND KLIMASCHUTZ).
- SCHALLER, L., DRÖSLER, M.; HÖPER, H. & KANTELHARDT, J. (2012): The costs of drowning GHG-emissions in the peatlands – An economic assessment of potential agricultural emission-reduction in the LULUCF sector. – Proceedings of the International Association of Agricultural Economists (IAAE) Triennial Conference, 18.-24. August 2012: 19 S., Foz do Iguaçu, Brasilien, (International Association of Agricultural Economists).
http://ageconsearch.umn.edu/bitstream/125219/2/IAAE_2012_Schaller_selectedpaper_16648.pdf (26.09.2014)
- SCHMATZLER, E. (2012): Die Torfindustrie in Niedersachsen. Ergebnisse einer Umfrage zur Zukunft der Torfgewinnung in Niedersachsen. – Telma **42**: 27-42.
- UMWELTBUNDESAMT (2013): Berichterstattung unter der Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen und dem Kyoto-Protokoll 2013 Nationaler Inventarbericht zum Deutschen Treibhausgasinventar 1990 - 2011. – Climate Change, **08/2013**: 884 S., Dessau.
- WBA (2007): Wissenschaftlicher Beirat Agrarpolitik beim Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz: Nutzung von Biomasse zur Energiegewinnung – Empfehlungen an die Politik. – 255 S., Bonn (Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz). http://www.bmelv.de/SharedDocs/Downloads/Ministerium/Beiraete/Agrarpolitik/GutachtenWBA.pdf?__blob=publicationFile (26.09.2014).

Anschrift des Verfassers:

Heinrich Höper
 Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie
 Stilleweg 2
 D-30655 Hannover
 E-Mail: heinrich.hoeper@lbeg.niedersachsen.de

